

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім Є.О. Патона НАН України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису
УДК 621.793.74

СТРОГОНОВ ДМИТРО ВАДИМОВИЧ

**ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНИХ ГРАНУЛ І ПОКРИТТІВ ПРИ
ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ РОЗПИЛЕННІ СТРУМОПРОВІДНИХ
ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність - 132 «Матеріалознавство»

Галузь знань – 13 «Механічна інженерія»

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



Д.В. Строгонов

Науковий керівник:

Коржик Володимир Миколайович

Член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор

Київ, 2023

АНОТАЦІЯ

Строгонов Д.В. Отримання сферичних гранул і покриттів при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних дротових 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 – 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі дослідження особливостей процесів сферодизації і диспергування матеріалу при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних дротових матеріалів та впливу цих процесів на структуроутворення, хімічний і фазовий склад та властивості отримуваних гранул і покриттів.

В роботі експериментально досліджено вплив технологічних та конструктивних параметрів процесу плазово-дугового розпилення струмопровідних дротів різного хімічного складу на гранулометричний склад і сферичність отримуваних гранул при їх твердінні і сферодизації у різних середовищах. Розглянуто процес плазово-дугового розпилення порошкових дротів та з'ясовано особливості формування структури, хімічного і фазового складу гранул і покриттів інтерметалідного типу. Досліджено енергоефективність та продуктивність зазначеного процесу, проведено порівняльний аналіз цих показників з іншими розповсюдженими способами плазової сферодизації дротових матеріалів. Розроблені наукові засади для проектування і виготовлення відповідного обладнання та практичні технології отримання сферичних гранул із складнолегованих сплавів та інтерметалідів для застосування у галузі адитивних технологій та порошкової металургії.

Ключові слова: плазово-дугове розпилення, дротові матеріали, сферичність, гранулометричний склад, гранули, покриття, інтерметалідні фази, структура, властивості покриттів.

ABSTRACT

D. Strohonov. Production of spherical granules and coatings during plasma-arc spraying of current-carrying wire materials. – Manuscript.

The thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy on the specialty 132 Materials Science. - E.O. Paton Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical task of researching the features of the processes of spheroidization and dispersion of material during plasma-arc spraying of current-carrying wires and the influence of these processes on the structure formation, chemical and phase composition, and properties of the obtained granules and coatings.

The work experimentally investigated the influence of technological parameters of the process of plasma-arc spraying of current-carrying wires of different chemical composition on the formation of the granulometric composition and the shape of the obtained granules during their hardening and spheroidization in various environments. The features of the process of plasma-arc spraying of flux-cored wires and the formation of the structure, chemical and phase composition of granules and coatings of the intermetallic type are considered. The energy efficiency and productivity of the specified process were investigated, a comparative analysis of these characteristics with other common methods of plasma spheroidization of wire materials was carried out. The scientific principles for the design and manufacture of equipment and practical technologies for obtaining spherical granules from complex alloys and intermetallics for use in the field of 3D printing and powder metallurgy have been developed.

Key words: plasma-arc spraying, wire materials, sphericity, particles size distribution, granules, coatings, intermetallic phases, structure, properties of coatings.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Korzhyk V., Burlachenko O., **Strohonov D.**, Fialko N., Kharlamov M., Grishchenko O., Peleshenko S. Effect of the technological parameters of plasma-arc spraying of flux-cored wire on the structure and properties of the intermetallic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. V.1. № 12 (121). 2023. p. 6-15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274062>

2. Korzhyk V., Khaskin V., Ganushchak O., **Strohonov D.**, Illiashenko Y., Fialko N., Guo C., Grynyuk A., Peleshenko S., Aloshyn A. Features of structure formation when depositing steel (iron) on titanium with plasma-sprayed coatings in the technology of obtaining butt joining of bimetallic plates «titanium-steel». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. V.2, № 12 (122). 2023. p. 6-16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275510>

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Коржик В.М., Гринюк А.А., Чайка А.А., **Строгонов Д.В.**, Тимофеева І.І., Васильківська М.А. Особливості металургійної взаємодії при наплавленні сталевих дротів на титанову пластину з напиленням прошарком. *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 3. с. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.1037434/sem2020.03>

4. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., М.Ю. Харламов М.Ю., Yuhui Y., Дем'янов О.І., **Строгонов Д.В.**, Щерецький В.О. Вплив супутнього обтискаючого потоку повітря на структуру і властивості покриття при плазмово-дуговому напилюванні плавким струмопровідним дротом. *Автоматичне зварювання*. 2022. № 2. с. 3-10. DOI: <https://doi.org/10.1037434/as2022.02>

5. **Строгонов Д.В.**, Коржик В.М., Цзянлун І., Тунік А.Ю., О.М. Бурлаченко О.М., Альошин А.О. Вплив параметрів процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі на

гранулометричний отриманих порошків. *Сучасна електromеталургія*. 2022. № 3. с. 29-38. DOI: <https://doi.org/10.1037434/sem2022.03.05>

6. Коржик В.М., **Строгонов Д.В.**, Бурлаченко О.М., Тунік А.Ю., О.В. Ганущак О.В., Грищенко О.П. Ефективність процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного титанового дроту. *Сучасна електromеталургія*. 2023. № 1. с. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1037434/sem2023.01.05>

Статті у науково періодичних виданнях інших держав:

7. **Strohonov D.**, Ilyashenko Y., Voytenko O., Skachkov I., Korzhyk V., Khaskin V., Aloshyn A., Ganushchak O., Peleshenko S., Dolyanivska O. Equipment for plasma-arc and hybrid welding, 3D printing and coating technologies. *Science of the Europe*. 2023. № 112. p. 56-62. DOI: <https://doi.org/10.105281/zenodo.7708524>

8. Petrov S., Korzhyk V., Bondarenko S., **Strohonov D.** Plasma ignition of water-coal fuel. *American Journal of Modern Energy*. 2022 V. 8(3). p. 41-47. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajme.20220803.11>

Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:

9. Адєєва Л.І., Тунік А.Ю., Костін В.А., Коржик В.М., **Строгонов Д.В.**, Кривко В.І., Сиренко В.І. Дослідження порошків, отриманих методом плазмово-дугової сферодизації порошкового дроту із низьковуглецевої сталі з алюмінієвим наповнювачем, для тривимірного друку металевих виробів. Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. Київ: Міжнародна організація “Зварювання”. 2022. с. 24.

10. Коржик В.М., Бурлаченко О.М., Вігілянська Н.В., Грищенко О.П., Коломицев М.В., **Строгонов Д.В.**, Дем’янов І.А. Інтерметалідні покриття системи Fe–Al, які отримані методами газотермічного напилення. Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. Київ: Міжнародна організація “Зварювання”. 2022. с. 38.

11. Коржик В.М., **Строгонов Д.В.**, Бурлаченко О.М., О.П. Грищенко О.П., Щерецький В.О. Застосування технології плазмового-дугового розпилення прутків та дротяних матеріалів на зворотній полярності. Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. Київ: Міжнародна організація “Зварювання”. 2022. с 39.

12. Voitenko O., Korzhyk V., Demianov O., Shcheretskiy V., Illiashenko Y., Ganushchak O., **Strohonov D.**, Gos I. Plasmatron development for plasma-arc spraying of a fusible wire-anode. 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.

13. Ilyashenko Y., Voytenko O., **Strohonov D.**, Skachkov I., Korzhyk V. Development of plasma-arc welding, 3D printing And coating technologies for the construction And development of the industry of Ukraine. The 8th International scientific and practical conference “Trends, theories and ways of improving science” (February 28 – March 03, 2023) Madrid, Spain. International Science Group. 2023. 565. p. 484-488.

14. Korzhyk V., **Strohonov D.**, Demianov O., Shcheretskiy V., Adeeva L., Tunik A. Features of spherodization process of powders and structure formation of the coatings within plasma-arc sputtering of powder wires with additives of nanoscale refractory additives. The International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2021). P. 170-171.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО РОЗПИЛЕННЯ ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ	
1.1 Плазмово-дугові технології в умовах розвитку сучасного виробництва.....	23
1.2 Класифікація та основні особливості плазмово-дугових технологій розпилення дротових матеріалів і нанесення покриттів:	
<i>1.2.1 Плазмово-дугове розпилення ступропровідних матеріалів.....</i>	<i>26</i>
<i>1.2.2. Плазмово-дугове розпилення «нейтральних» дротів і прутків..</i>	<i>28</i>
<i>1.2.3 Електродугове розпилення.....</i>	<i>28</i>
<i>1.2.4. Мікроплазмове розпилення.....</i>	<i>32</i>
1.3 Огляд сучасних способів сферодизації матеріалів (отримання сферичних гранул із розплаву).....	33
1.4 Перспективи використання технології плазмо-дугового розпилення для сферодизації дротових матеріалів.....	37
1.5 Висновки до розділу 1, постановка мети і задач дослідження.....	38
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1 Лабораторний стенд і допоміжне технологічне обладнання для проведення досліджень.....	41
2.2 Вибір матеріалів для досліджень та їх характеристики.....	43
2.3 Визначення температури і фракційного складу розпилюваних часток.....	45
2.4. Математичне планування експерименту.....	47

2.5	Методика дослідження мікроструктури, хімічного і фазового складу гранул, порошків і покриттів.....	50
2.6	Методики дослідження характеристик (властивостей) гранул і покриттів:	
2.6.1	<i>Коефіцієнт сферичності гранул і порошків.....</i>	51
2.6.2	<i>Мікротвердість і пористість покриттів.....</i>	52
2.6.3	<i>Абразивна і газоабразивна зносостійкість покриттів.....</i>	52
2.6.4	<i>Термостійкість та корозійна стійкість покриттів.....</i>	53
2.7	Висновки до розділу 2.....	54

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДИСПЕРГУВАННЯ, СФЕРОДИЗАЦІЇ ТА ТВЕРДІННЯ КРАПЕЛЬ-ДИСПЕРСНИХ ЧАСТОК ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ РОЗПИЛЕННІ СТРУМОПРОВІДНИХ ДРОТІВ

3.1 Математичне моделювання процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дрових матеріалів:

3.1.1	<i>Моделювання плазмової дуги.....</i>	56
3.1.2	<i>Моделювання турбулентності.....</i>	57
3.1.3	<i>Моделювання розпаду крапель.....</i>	58
3.1.4	<i>Моделювання руху часток в оточуючому середовищі.....</i>	63
3.1.5	<i>Моделювання теплообміну часток з оточуючим середовищем.....</i>	64
3.1.6	<i>Граничні умови при проведенні розрахунків.....</i>	66

3.2 Вплив технологічних і конструктивних параметрів процесу плазмово-дугового розпилення на гранулометричний склад і параметри сферичності гранул:

3.2.1	<i>Вплив параметрів процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту із застосуванням супутнього потоку газу на гранулометричний склад гранул.....</i>	70
-------	---	----

3.2.2 Вплив параметрів процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту із застосуванням супутнього потоку газу на параметри сферичності гранул.....	81
3.2.3 Вплив типу плазмоутворюючого газу на гранулометричний склад і параметри сферичності гранул.....	84
3.2.4 Вплив типу атмосфери на гранулометричний склад і параметри сферичності гранул.....	89
3.3 Аналіз процесів твердіння гранул при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних дротів.....	92
3.4 Особливості диспергування струмопровідних дротів різного хімічного складу.....	96
3.5 Висновки до розділу 3.....	101

РОЗДІЛ 4 ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНУЛ І ПОКРИТТІВ ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ РОЗПИЛЕННІ СТРУМОПРОВІДНИХ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

4.1 Взаємодія сталеві оболонки і сердечника із порошку алюмінію при плазово-дуговому розпиленні струмопровідного порошкового дроту Fe-Al.....	104
4.2. Формування структури, хімічного і фазового складу сферичних гранул інтерметалідного типу плазово-дуговим розпиленням струмопровідного порошкового дроту «сталеві оболонка + порошковий алюмінієвий сердечник».....	108
4.3 Вплив технологічних параметрів процесу плазово-дугового напилення струмопровідного порошкового дроту на структуру і фазовий склад інтерметалідних покриттів на основі Fe ₃ Al.....	118
4.4. Властивості інтерметалідних покриттів на основі Fe ₃ Al, отриманих плазово-дуговим розпиленням струмопровідного порошкового дроту.....	131
4.5. Висновки до розділу 4.....	135

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНИХ ГРАНУЛ І НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ СТРУМОПРОВІДНИХ ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1 Оцінка енергоефективності процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів.....	136
5.2 Розробка обладнання і практичних технологій плазмово-дугового розпилення струмопровідних матеріалів:	
5.2.1 Розробка дослідно-промислового плазмотрону підвищеної потужності для плазмово-дугового розпилення і нанесення покриттів із струмопровідних дротів.....	143
5.2.2 Плазмово-дугове розпилення струмопровідних дротів на оберненій полярності (дріт – катод).....	149
5.3 Розробка установки нового покоління для нанесення покриттів плазмово-дуговим напиленням струмопровідних дротів.....	152
5.4 Розробка дослідно-промислового обладнання для отримання сферичних гранул плазмово-дуговим розпиленням струмопровідних дротових матеріалів.....	157
5.5 Приклади практичного застосування технологій плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротових матеріалів:	
5.5.1. Застосування технології плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів для формування прошарків при отриманні зварних біметалічних з'єднань «титан-сталь».....	167
5.5.2. Застосування інтерметалідних покриттів на основі Fe-Al, для підвищення довговічності поверхонь нагріву труб сміттєспалювального обладнання.....	172
5.5.3. Аналіз перспективності застосування інтерметалідних сферичних гранул, отриманих плазмово-дуговою сферодизацією порошкових дротів для 3D друку і ГП.....	175
5.6 Висновки до розділу 5.....	176

Загальні висновки.....	178
Список використаної літератури.....	181
ДОДАТОК А.....	192
ДОДАТОК Б.....	194

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AS – Arc Spraying

CAE – Computer Aided Engineering

CCGA – Clode-Coupled Gas Atomization

CFD – Computational Fluid Dynamics

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

DPM – Discrete Phase Model

EBM - Electron Beam Melting

EIGA – Electrode Induction Melting Inert Gas Atomization

FFGA – Free-Fall Gas Atomization

GMAW – Gas Metal Arc Welding

HIP – Hot Isostatic Pressing

PA – Plasma Atomization

PAT – Plasma Atomization Technology

PAW – Plasma Arc Welding

PREP – Plasma-Rotating Electrode Process

PTWA – Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spraying

SLM – Selective Laser Melting

SLS – Selective Laser Sintering

TAB – Taylor Analogy Breakup Model

TIG – Tungsten Inert Gas Welding

АДМ – активована дугова металізація

ЕН – електродугове напилення

ГІП – гаряче ізостатичне пресування

ГС – газова система

ГТД – газотурбінний двигун

ГТН – газотермічне напилення

ІМФ – інтермеладна фаща

ККД – коефіцієнт корисної дії

КВМ – коефіцієнт використання матеріалу

ЛТР – локальна термодінамічна рівновага

МПР – мікроплазмове розпилення

ПД – порошковий дріт

ПДР – плазмово-дугове розпилення

ПДН – плазмово-дугове напилення

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

РСФА – рентгеноструктурний фазовий аналіз

РСМА – рентгеноспектральний мікроаналіз

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія

СУ – система управління

G_1 – витрата плазмоутворюючого газу, м³/год.

G_2 – витрата супутнього кільцевого потоку повітря, м³/год.

I – струм розпилення дроту-аноду, А

$L_{\text{вип}}$ – теплота випаровування, Дж/кг

U – напруга на дузі, В

$V_{\text{др}}$ – швидкість подачі дроту-аноду, м/хв.

$V_{\text{вип}}$ -швидкість випаровування, кг/с

$V_{\text{вип}}$ -швидкість випаровування, кг/с

$V_{\text{пл}}$ -швидкість плавлення, кг/с

V – швидкість напилення, м/хв. T – температура плазми, °К

R – радіус плазмового струменю, мм

d_c – діаметр сопла, мм

l_d – довжина дуги, мм

ВСТУП

Інтенсивний розвиток порошкової металургії, адитивних технологій 3D друку металевих виробів (селективне та пряме лазерне плавлення і спікання - SLM, SLS, DMLS, гранульна металургія, тощо) вимагає створення нових матеріалів у вигляді сферичних гранул із складнолегованих сплавів, тугоплавких металів та інтерметалідів з заданим гранулометричним складом і строгими вимогами до їх форми (коефіцієнту сферичності) при наявності мінімальної кількості або повної відсутності дефектних часток. На даний час у якості перспективного способу отримання таких сферичних гранул з заданим гранулометричним складом розглядається технологія плазмово-дугового розпилення, яка викликає широкий практичний інтерес завдяки простоті обладнання, що значно спрощує процес отримання гранул та наявності великої кількості параметрів завдяки яким можна регулювати гранулометричний склад у широких межах у поєднанні з відносно високою продуктивністю та енергоефективністю. У наш час проведена велика кількість досліджень у області формуванні структури і властивостей покриттів, отримуваних при розпиленні струмопровідних дротів, проте процеси сферодизації та формування структури гранул практично не розглядались і потребують подальшого вивчення у рамках даної роботи.

Тому з'ясування особливостей диспергування і сферодизації струмопровідних дротів в процесі плазмово-дугового розпилення та дослідження процесу формування структури отримуваних гранул і покриттів є актуальним завданням. Результати таких досліджень дозволять розробити принципи технології отримання сферичних гранул із складнолегованих сплавів, тугоплавких металів та інтерметалідів для створення металевих виробів складної форми за допомогою технологій 3D друку і порошкової металургії.

Об'єкт дослідження - технологія плазмо-дугового розпилювання струмопровідних дрових матеріалів.

Предмет дослідження - процеси диспергування розплаву, що утворюється в процесі нагріву і плавлення матеріалу струмопровідних дровів, процеси сферодизації і твердіння крапель-дисперсних часток при плазмо-дуговому розпиленні.

Мета роботи – аналіз закономірностей впливу основних технологічних та конструктивних параметрів процесу на формування об'єму диспергованого розплаву, форми часток, структури, хімічного та фазового складу і властивостей гранул та покриттів, отриманих при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних компактних і порошкових дровів, розробка на цій основі рекомендацій по створенню ключових вузлів плазмово-дугового обладнання та практичних технологій отримання гранул із заданими показниками сферичності і захисних покриттів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Дослідити вплив конструктивних параметрів плазмотрону і умов технології плазмово-дугового розпилення на гранулометричний склад та показник сферичності отриманих гранул.
2. Визначити ступінь впливу різних середовищ та плазмоутворюючих газів на гранулометричний склад та параметри сферичності отриманих гранул.
3. Виконати аналіз процесів твердіння дисперсних крапель-часток в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідних дровів.
4. Дослідити фізико-металургійні особливості при нагріві, плавленні і розпиленні плазмовою дугою струмопровідних компактних дровів (неперервного перерізу) різного хімічного складу.
5. Дослідити фізико-металургійні особливості плавлення та розпилення плазмовою дугою струмопровідних порошкових дровів, в тому числі закономірностей утворення та формування хімічного складу розплаву

при плавленні його компонентів в процесі взаємодії порошкового наповнювачу і металеві оболонки.

6. Визначити вплив технологічних параметрів плазово-дугового розпилення струмопровідного порошкового дроту на структуру, хімічний та фазовий склад і властивості отриманих гранул та покриттів.

7. Розробити дослідно-промислове обладнання та практичні технології для отримання сферичних гранул, а також нанесення багатофункціональних покриттів для підвищення довговічності поверхонь нагріву енергетичного обладнання.

У першому розділі проведено критичний аналіз основних способів отримання сферичних гранул за допомогою технологій плазового та електродугового розпилення, встановлено переваги та недоліки зазначених способів. Наведені дані практичного застосування способу плазово-дугового розпилення струмопровідних дрових матеріалів та перспективності використання цього способу для отримання сферичних гранул з заданим гранулометричним складом та підвищеними вимогами до параметрів форми. На основі аналізу технологічних характеристик зазначеного процесу з'ясовано основні переваги даного способу, а саме: відсутність вагомих вимог до вихідного матеріалу (дроту), можливість отримувати гранули і покриття з різною структурою (інтерметалідною, нанокристалічною та аморфною структурою), виробництво яких методами традиційної металургії ускладнене або неможливе; можливість керування дисперсністю частинок, що розпилюються, в широких межах, за рахунок зміни параметрів процесу розпилення; високі показники продуктивності та енергоефективності способу; відносна простота, дешевизна та ефективність обладнання, що застосовується. За результатами огляду основних методів отримання сферичних гранул з розплаву сформульована мета і завдання дисертаційної роботи. Мета роботи полягає у вивченні особливостей процесів сферодизації та диспергування матеріалу при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних компактних та порошкових дровів та впливу

цих процесів на структуроутворення, хімічний і фазовий склад та властивості отримуваних гранул і покриттів.

У другому розділі наведено опис використаних в роботі матеріалів і обладнання. Для вивчення процесів сферодизації і диспергування матеріалу в процесі плазово-дугового розпилення струмопровідних компактних і порошкових дротів запропоновано методику досліджень, вибрано відповідне технологічне обладнання і на його основі створено лабораторний стенд для досліджень вказаних процесів, обрані матеріали для розпилення, які відрізняються між собою за типом і хімічним складом. Обрана методика для визначення гранулометричного складу, параметрів форми та структури, фазового і хімічного складу гранул і покриттів методами металографічного і рентгенофазового аналізу, вимірюванням властивостей гранул і покриттів: мікротвердості, зносостійкості, термостійкості і корозійної стійкості.

Третій розділ присвячено експериментальному дослідженню впливу технологічних і конструктивних параметрів процесу, типів плазмоутворюючих сумішей і оточуючих середовищ на розвиток процесів диспергування і сферодизації дротів різного хімічного складу, а також дослідженню процесів руху і твердіння гранул за допомогою засобів математичного моделювання. Встановлено основні технологічні і конструктивні параметри процесу, які значною мірою впливають на зміну гранулометричного складу гранул – це сила струму, швидкість подачі дроту, довжина дугового проміжку, витрата спутного газу та зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами. З'ясовано, що на зміну параметрів сферичності гранул окрім сили струму значний вплив має тип плазмоутворюючого середовища – так застосування гелію сприяє значному підвищенню коефіцієнту сферичності гранул. Зміна типу атмосфери, де відбувається розпилення матеріалу дроту з повітря на гелій також сприяє підвищенню характеристик цього показника.

У четвертому розділі досліджено мікрOMETALURГІЙНІ процеси, що протікають при плавленні і подальшому розпиленні порошкового дроту, що

складається зі сталевою оболонки та наповнювачу із порошку алюмінію. Показано, що за допомогою зміни технологічних параметрів процесу розпилення можна регулювати хімічний і фазовий склад гранул і покриттів. Підтверджено можливість отримання якісних сферичних гранул інтерметалідів з основними фазами Fe_3Al і $FeAl$ і практично однофазного покриття на основі інтерметаліду Fe_3Al шляхом плазово-дугового розпилення порошкового дроту $Fe-Al$. Досліджено газоабразивну зносостійкість таких покриттів на основі інтерметаліду Fe_3Al при кімнатній температурі, які показали, що зносостійкість покриттів з $Fe-Al$ порошкового дроту, отриманих методом ПДН, перевищує стійкість сталі S235 в середньому у 2 рази, стійкість до абразивного зносу покриттів ПДН з порошкових дротів на основі $Fe-Al$ в 1,8 рази вище, ніж у сталі S235. При цьому зазначені покриття відзначаються відмінними характеристиками термостійкості та корозійної стійкості у середовищах солей та кислот.

У п'ятому розділі наведено розробки технології плазово-дугового розпилення струмопровідних дрових матеріалів на підставі виконаних експериментальних і теоретичних досліджень процесів сферодизації і диспергування матеріалу компактних і порошкових дротів. Виконано розрахунки теплового к.к.д. процесу нагріву дроту, які підтверджують значну енергоефективність і продуктивність способу плазово-дугового розпилення. Розроблено лабораторно-промисловий варіант плазмотрону, конструкція якого дозволяє отримувати мілкодисперсну фракцію сферичних гранул 25...100 мкм до 70 % мас. На цій базі створено інноваційний технологічний комплекс обладнання, який складається з спеціалізованих джерел живлення, шаф керування, газопідготовки та оригінальної камери розпилення і дозволяє отримувати гранули з коефіцієнтом сферичності $S > 0,8$. Розроблено рекомендації, щодо практичного застосування технології плазово-дугового розпилення для отримання сферичних порошоків для 3Д друку (у т.ч. інтерметалідних), а також для формування прошарків при виготовленні

біметалічних з'єднань «титан-сталь» та нанесення покриттів для підвищення довговічності поверхонь нагріву енергетичного обладнання.

В результаті проведених досліджень отримані наступні результати, що мають **наукову новизну і практичну цінність**.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше експериментально доведено, що при плазмово-дуговому розпиленні сталевих струмопровідних компактних дротів діаметром 1,0-1,6 мм застосування супутнього потоку газу при витраті в діапазоні 48-60 м³, який обтискає плазмовий двофазний струмінь, дозволяє отримувати сферичні гранули із середнім діаметром 70-190 мкм, при цьому у випадку застосування дроту діаметром 1,0 мм кількість фракції гранул <70 мкм досягає до 70 мас. %.

2. Вперше виявлено тенденцію до збільшення коефіцієнту сферичності гранул фракції 20...100 мкм при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних компактних дротів з 0,67 до 0,83 при підвищенні сили струму з 150 до 290 А при використанні аргону у якості плазмоутворюючого газу, при цьому, в порівнянні із аргоном, використання плазмоутворюючого газу - гелію дозволяє отримати вказані максимальні значення коефіцієнту сферичності при менших на 18-20% значеннях електричної потужності дуги.

3. Вперше виявлено можливість отримання при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних порошкових дротів системи Fe-Al, виготовлених із металевої оболонки з алюмінієвим порошковим наповнювачем, сферичних гранул із середнім розміром 125-170 мкм та коефіцієнтом сферичності 0,73-0,83 та покриттів, які в основному містять інтерметалідні фази Fe₃Al і FeAl.

4. Вперше експериментально підтверджена можливість плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту за схемою «дріт-катод» при використанні плазмотрону з пустотілим мідним анодом для отримання сферичних гранул, в яких доля основної фракції 25-315 мкм складає до 90 % мас., а коефіцієнт сферичності може досягати 0,8.

Практичне значення отриманих результатів.

Встановлені в роботі закономірності процесів сферодизації і диспергування дрових матеріалів при плазмово-дугового розпиленні струмопровідних компактних і порошкових дровів дозволили розробити рекомендації з конструювання інноваційного обладнання та вибору оптимальних технологічних режимів отримання сферичних гранул, що відповідають вимогам до дисперсних матеріалів для адитивних технологій (3Д друку) і гранульної металургії, а також нанесення функціональних покриттів з високими механічними і експлуатаційними характеристиками.

Практична цінність роботи полягає у наступному:

1. Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволили розробити технологію отримання сферичних гранул з заданим гранулометричним складом з компактних і порошкових дровів різного хімічного складу (у т.ч. інтерметалідів) для виготовлення об'ємних виробів складної форми за допомогою технологій 3Д друку та гранульної металургії.

2. Розроблено технологію нанесення покриттів з порошкового дроту, яка забезпечує щільну, практично однофазну структуру з підвищеними експлуатаційними характеристиками, де основною фазою є інтерметалід типу Fe_3Al .

3. Розроблено новий промисловий плазмотрон із вдосконаленою конструкцією газорозрядної камери та покращеними масо-габаритними характеристиками, який забезпечує можливість роботи при підвищених струмових навантаженнях (до 500 А), більшу дисперсність розплених гранул та нанесення покриттів на внутрішні поверхні діаметром більше 70 мм із підвищеними показниками їх якості.

4. Розроблено дослідно-промислову установку для отримання сферичних гранул плазмово-дуговим розпиленням струмопровідних компактних і порошкових дровів.

5. Результати роботи використані при організації серійного виробництва установки нового покоління для плазмово-дугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дротових матеріалів, при розробці дослідно-промислових технологій нанесення захисних прошарків при отриманні біметалічних зварних з'єднань «титан-сталь» та підвищення довговічності поверхонь нагріву сміттєспалювального обладнання.

Особистий внесок здобувача. При особистій участі автора отримані результати, виконано їх аналіз та сформульовано положення наукової новизни, згідно з матеріалами відображеними в дисертаційній роботі. Автором спільно з керівником роботи сформульовано мету, поставлені задачі дослідження, визначено шляхи їх вирішення. Автором виконано аналітичний огляд, узагальнено результати та основні висновки. За участю автора організовані та проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесів диспергування матеріалу, сферодизації і твердіння гранул в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротових матеріалів, виконано дослідження структури, хімічного і фазового складу отриманих гранул і покриттів. Здобувачем самостійно виконувались експерименти по розпиленню струмопровідних дротів; збору, просіюванню, визначенню теплоємності та подальшому дослідженню гранулометричного складу отриманих гранул; дослідженню форми гранул. Автором розроблено новий плазмотрон для напилення зовнішніх та внутрішніх поверхонь (діаметром більше 70 мм) з водяним охолодженням для роботи на потужностях до 50 кВт та конструкція камери для сферодизації струмопровідних дротових матеріалів. При безпосередній участі автора розроблено та впроваджено технології формування прошарків при створенні біметалічних з'єднань «титан-сталь» та технології нанесення захисних покриттів для підвищення довговічності сміттєспалювального обладнання.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних та

вітчизняних науково-технічних конференціях: «Nanotechnology and nanomaterials NANO-2021» (м. Львів, Україна, 2021 р.), «Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects» (м. Берлін, Німеччина, 2021 р.), «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України» (м. Київ, Україна, 2022 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 робіт, з них 2 статті у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 4 статті у фахових виданнях України, 2 статті у науково періодичних виданнях інших держав, 6 публікації у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 195 сторінках і складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури. Обсяг основного тексту складає 174 сторінки машинописного тексту, містить 85 рисунки, 36 таблиць, список літератури із 108 найменувань на 12 сторінках та 2 додатків.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО РОЗПИЛЕННЯ ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Плазмово-дугові технології в умовах розвитку сучасного виробництва

Газотермічне напилення нині є високотехнологічною галуззю світової економіки з річним обігом близько 7 млрд. доларів [1]. Застосування різних методів газотермічного напилення активно розширюється в авіації, машинобудуванні, медицині, енергетичній та нафтопереробній галузі, металургії та електроніці. У розвинених країнах (США, Німеччина, Франція, Японія) темп зростання складає 5-7 %, в Індії 15-17 %, в Китаї – 20 % [1].

На відміну від багатьох відомих технологічних процесів, газотермічне напилення (ГТН) з'явилося порівняно недавно. До 1960 р. йому не приділяли особливої уваги, поки не з'явилися способи плазмового і детонаційного напилення, що зумовило їх застосування в авіакосмічній галузі промисловості. Нині до найбільш застосовуваних способів відносять такі: газополуменеве напилення, електродугове напилення, плазмове напилення, детонаційне напилення та ін. Проте слід зазначити, що методи газополуменевого дротяного та електродугового напилення на даний час становлять лівову частку ринку газотермічного напилення, завдяки низькій вартості устаткування і незначними технологічними витратами для нанесення покриттів.

Причинами обмеженого застосування детонаційного високошвидкісного газополуменевого і плазмового способів напилення є об'єктивні труднощі, які пов'язані з використанням дорогих порошків і газових сумішей для напилення, які обумовлюють значні витрати на

закупівлю матеріалів і складне, високовартісне обладнання. Також, слід зазначити, що ці способи відрізняються відносно низькою продуктивністю, яка становить не більше 2–8 кг/год [2,3].

Також важливими перевагами використання дротяних та стрижневих матеріалів у порівнянні з порошковим є нагрівання всього об'єму матеріалу, що напилюється, до стану розплаву і нанесення покриття з розплавлених частинок на поверхню виробу. Отримані таким чином покриття за міцністю зчеплення та щільністю не поступаються плазмовим порошковим, а вартість їх нижча у 2-3 рази у зв'язку зі зниженим енергоспоживанням на кг покриття [4]. Собівартість плазмового та газополуменевого напилення покриттів із порошків перевищує собівартість дротяних покриттів у 1,9 та 1,6 рази відповідно.

Тому варіантом подолання відповідних труднощів може бути використання більш економних технологій, де замість спеціалізованих порошків використовуються доступні матеріали – суцільні або порошкові дроти та більш ефективні джерела нагріву на кшталт електричної дуги. До таких технологій слід віднести спосіб плазмово-дугового розпилення.

Перші роботи з дослідження процесу плазмово-дугового напилення були виконані в 60-х роках минулого століття як за кордоном (США), так і в СРСР, поштовхом до цього став бурхливий розвиток авіаційної та ракетної техніки, що вимагало створення нових ефективних способів нанесення тугоплавких покриттів на важконавантажені деталі авіаційних та ракетних ГТД та РРД. У 1961 р у США був запатентований метод плазмового напилення з використанням «нейтрального» та струмопровідного дроту [5]. Вчені з СРСР також зробили значний внесок у розвиток цього способу, у тому числі варто виділити В.А. Петрунічева, В.В. Кудінова, І.Д. Кулагіна (ІМЕТ РАН, Москва), О.М. Краснова (ІПМ НАНУ, Київ), серед вітчизняних вчених слід виділити Ю.С. Борисова, І.В. Кривцуна, В.М. Коржика, С.В. Петрова (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ) та ін., які сконцентрували свою увагу на дослідженні фізичних та металургійних процесів при формуванні

структури гранул та покриттів при плазмово-дуговому розпиленні дротових матеріалів широкого спектру призначення.

У 1960-х роках науковцями з СРСР був розроблений процес плазмово-дугового розпилення (напилення), який був подальшим розвитком способів зварювання та споріднених технологій, що використовують електричну дугу як джерело енергії, зокрема зварювання TIG, PAW та електродугового напилення AS. Розвиток цього способу був обумовлений в першу чергу рядом проблем, що виникають при напиленні порошковими матеріалами плазмотронами непрямої дії, зокрема низькою ерозійною стійкістю мідних сопел в зоні анодної плями, невисокими значеннями ККД нагрівання порошку в плазмовому струмені, КВМ на рівні 20...60% і як та ін [6]. За кордоном дана технологія набула свого найбільшого розвитку на початку 2000 років при створенні таких процесів як PTWA (Plasma Transferred Wire Arc) та PAT (Plasma Atomization Technology). Технологія PTWA була запатентована в 2009 році і використовується переважно при відновленні та підвищенні зносостійкості внутрішніх поверхонь (> 50 мм), таких елементів двигунів, як блоки циліндрів для таких концернів як Ford, Nissan, Volkswagen та ін. Основна маса робіт з розробки такого обладнання була виконана в США (Flame Spray Industries), Німеччині (GTV) та Швейцарії (Oerlikon). Даний спосіб відрізняється високими властивостями міцності напиленого покриття (до 80 МПа), низькою пористістю (1...2%), продуктивністю (на рівні 10 кг/год) і ін [7]. Технологія PAT була розроблена на початку 2000 х років, проте значний поштовх отримала відносно недавно з розвитком адитивних технологій друку тривимірних виробів і використовується для отримання високоякісних сферичних гранул, які отримують в процесі розпилення дротових матеріалів.

Надалі розглянемо кожен спосіб більш детально.

1.2 Класифікація та основні особливості плазмово-дугових технологій розпилення дротових матеріалів і нанесення покриттів

1.2.1 Плазмово-дугове розпилення струмопровідних матеріалів

Сутність процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту (рис. 1.1) полягає у плавленні дроту-аноду, який вводиться у зону високошвидкісного плазмового струменя та подальшому дробленні розплаву, що зривається з торця дроту [8].

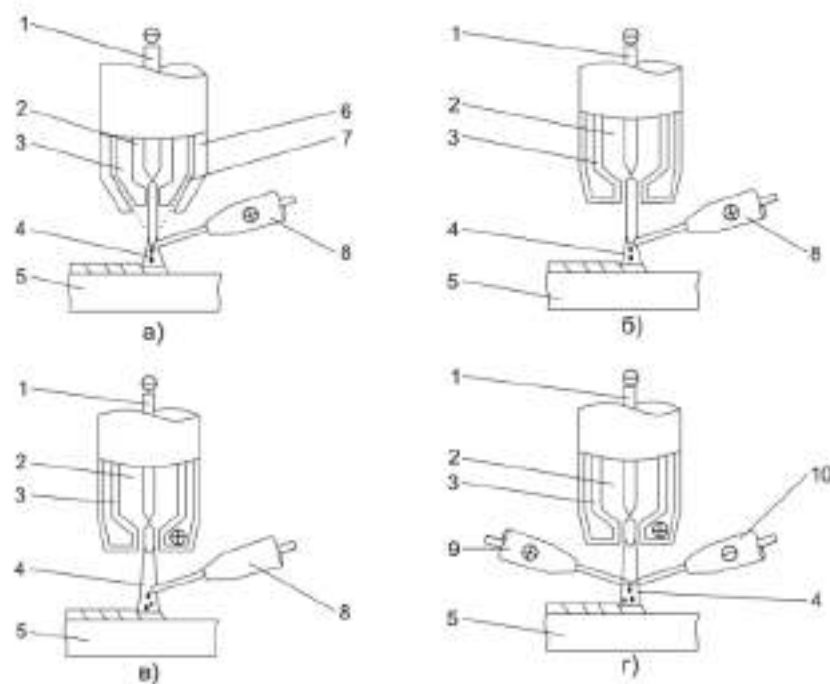


Рис. 1.1 Основні різновиди процесу плазмово-дугового розпилення дротових матеріалів: а, б – плазмово-дугове розпилення струмопровідного дроту з та без використання супутнього потоку газу відповідно; в – плазмово-дугове розпилення нейтрального дроту; г – гібридний процес плазмово-дугового розпилення з використанням двох струмопровідних дротів

Дуга горить між неплавким вольфрамовим катодом і струмопровідним дротом-анодом, що подається за зрізом сопла плазмотрона. Робочий (плазмоутворюючий) газ, що поступає у робочу камеру нагрівається електричною дугою і витікає із сопла у вигляді плазмового струменя. Завдяки впливу електрично активної плями дугового розряду та газу кінець дроту плавиться, а рідка крапля розбивається на дрібні частинки, що

захоплюються струменем плазми 4. Потік частинок металу утворює конус розпилення правильної форми з кутом у вершині $\alpha = 10 - 20^\circ$. Конус розташований у струмені захисного плазмоутворюючого газу. Частинки металу ударяючись об виріб 5, утворюють на поверхні щільний шар покриття. Плазмотрон підключають до джерела живлення з зовнішньою крутопадаючою характеристикою. Дуга між електродом 1 і дротом 8 запалюється допоміжною 40-50 амперною дугою, що збуджується між електродом 1 і соплом 3. Для збудження допоміжної дуги пробивають проміжок між катодом і соплом високочастотним розрядом (за допомогою осцилятора). Щоб розпочалося розпилення, достатньо включити подачу дроту. Кінець дроту під напругою, вводиться в струмінь плазми допоміжної дуги – і запалюється основна робоча дуга. Припиняють розпилення зупинкою подачі дроту. При цьому нагрівання та плавлення дроту відбуваються переважно за рахунок виділення тепла в анодній плямі. Плазмовий струмінь переважно виконує функції розпилення.

При цьому процес має досить високу продуктивність (по відношенню до процесу плазмового напилення порошковими матеріалами), яка може досягати 10-15 кг/год. (за вольфрамом) при потужності плазмотрона до 30 кВт. Проте слід зазначити, що для даного способу характерні досить значні втрати металу дроту на випаровування, які можуть досягати 6% від загальної маси розпиленого матеріалу.

Надалі автори [9] розробили новий, більш перспективний пристрій для плазмово-дугового розпилення. У конструкцію плазмотрона було внесено додаткове сопло (рис.4, а), призначене для обдування зовнішньої ділянки дуги інтенсивним супутнім потоком газу. До особливостей даного способу слід віднести те, що плавлення та струменеве розпилення матеріалу дроту здійснює аргонна плазма, а супутній газ перешкоджає розширенню відкритої ділянки плазмового струменя. Це дозволяє зменшити кут його розкриття за рахунок обтиску плазмового струменя супутнім потоком газу, що забезпечує його прискорення та збільшення газодинамічного напору на

торець дроту і сприяє отриманню оптимального фракційного складу дисперсної фази, а також мінімальні втрати на випаровування матеріалу дроту (до 2%) і мінімальне насичення частками киснем та азотом повітря.

1.2.2. Плазмово-дугове розпилення «нейтральних» дротів і прутків

При розпиленні «нейтрального» дроту (рис. 1, в), основною відмінністю від попереднього способу є те, що дуга горить між катодом 1 і водоохолоджуваним соплом 3. Нагрів, розплавлення та розпилення нейтрального дроту здійснюється плазмовим струменем. Максимальна продуктивність процесу плазмово-дугового розпилення нейтрального дроту значно нижча за продуктивність розпилення струмопровідного дроту і становить 1,5-4 кг/год. в залежності від розпилюваного матеріалу [10]. Так у роботі [11] дослідники для розпилення титанового дроту Ti-6Al-4V використовують комплекс з трьох плазмових генераторів, які дають сукупну продуктивність на рівні 2-5 кг/год. При цьому сумарна електрична потужність, що вкладається у дріт складає від 20 до 90 кВт, тобто питома електрична потужність для отримання 1 кг титанового порошку складає не менше ніж 10 кВт·год.

Тому спосіб плазмово-дугового розпилення «нейтрального» дроту відзначається досить низькою продуктивністю та енергоефективністю і рекомендується в основному для розпилення прутків та гнучких шнурів із неелектропровідних матеріалів, що обумовлює його обмежене застосування у промисловості.

1.2.3 Електродугове розпилення

Одним із найбільш ефективних способів ГТН є електродугове напилення. Цей спосіб відомий давно, починаючи з 50-х років минулого століття та широко застосовується для антикорозійного захисту

металоконструкцій [12,13]. Це відпрацьована технологія захисту від корозії поверхонь сталевих конструкцій та виробів із металів та сплавів.

В процесі електродугового напилення (рис. 1.2) нагрівання і плавлення матеріалу, що розпилюється, здійснюється за рахунок тепла електричної дуги, що горить між витратними електродами (дротом), з яких утворюється розплавлений метал [14]. Рідкий метал здувається з кінців електродів, дробиться під впливом газодинамічних та електромагнітних сил і у вигляді крапель рухається у напрямку до поверхні основи, що напилюється.

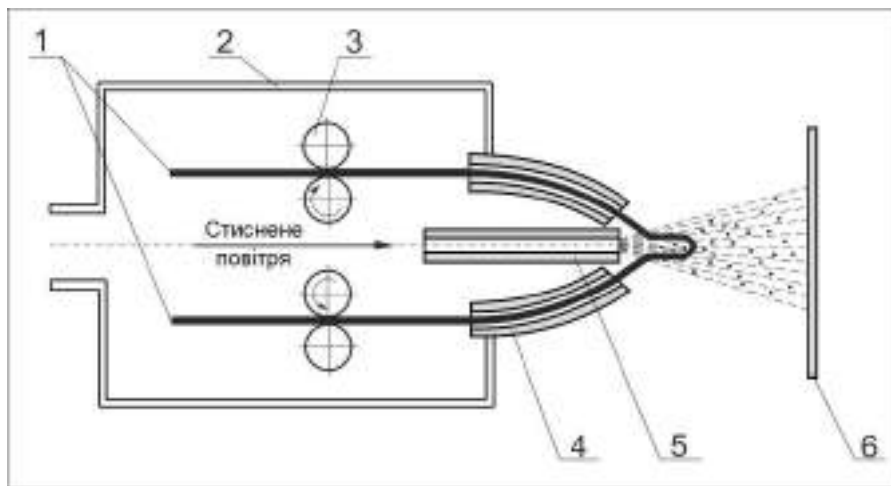


Рис. 1.2. Схема процесу електродугового розпилення:

1 – дроти, що розпилюються; 2 – силові кабелі; 3 – механізм подачі дроту; 4 – струмопровідні наконечники; 5 – повітряне сопло; 6 – виріб.

Рідкий метал на торцях електродів утримується силами поверхневого натягу. У міру накопичення тепла метал під дією електродинамічних сил виштовхується до периферійних частин електродів, де під дією газового потоку відбувається відрив та перенесення частинок.

Найбільшого поширення в конструкціях апаратів для електродугового напилення покриттів набула двоелектродна схема. Матеріал, що розпилюється, у вигляді двох дротів діаметром 1,0-5,0 мм подається в зону горіння дуги механізмом подачі. Напруга від джерела живлення підводиться до контактних пристроїв. Між електродами, що схрещуються, розташовується сопло, призначене для створення швидкісного

розпилюючого потоку газу. Часто для цих цілей використовують стиснене повітря, рідше інші гази, наприклад азот, аргон та інших.

Процес відрізняється відносно високою продуктивністю (до 25 кг/год), простотою обладнання, максимальними значеннями енергетичних ККД розпилення та напилення. Як розпилюваний матеріал можуть використовуватися суцільні дроти з металів і сплавів, так і порошкові дроти. Також даний спосіб дозволяє отримувати різні псевдосплавні композиції розпорошуючи одночасно дроти різного складу і отримувати частинки з унікальними характеристиками. У світовій практиці понад 50% загального обсягу ГТН приходить на електродугове напилення. Найбільш широко воно використовується при створенні корозійностійких покриттів (в основному з Al та Zn) на різних будівельних спорудах. В якості зносостійких покриттів таким методом напилюють різні сталі, бронзи та ін. Перспективні вищевказані композиційні покриття, наприклад зі сталі та міді, міді та олова та інших поєднань.

До недоліків слід віднести інтенсивну взаємодію частинок з активною навколишньою газовою фазою (повітрям). У зв'язку з цим напилений метал насичений киснем та азотом та містить значну кількість оксидів.

Якість електродугових покриттів може бути підвищена при веденні процесу в камері із загальним захистом, розпорошення металу інертними газами або струменем продуктів згоряння. В даний час проводяться роботи з удосконалення способу електродугової металізації – розроблено та вдосконалюється обладнання для надзвукової електродугової металізації (PLAZER 15SA-EM рис. 1.3) [15]. В основу такого надзвукового металізатора закладено процес, в якому обдув стабілізованої електричної дуги здійснюється гарячими продуктами згоряння природного газу з надзвуковою швидкістю [16].



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд надзвукового металізатору (а) та надзвукового струменя (б)

Така система забезпечує високий рівень стабільності горіння дуги внаслідок її орієнтації вздовж газового потоку і, таким чином, процесу передачі тепла електродам та інтенсивний розгін і подрібнення частинок розплавленого металу, їх захист від окислення в польоті та зниження кількості випарованого матеріалу. При цьому важливою характеристикою, яка удосконалюється при використанні такого обладнання, є те, що середній розмір напилюваних частинок зменшується з 150...180 мкм до 40...90 мкм.

Ще одним різновидом електродугового напилення є метод активованої електродугової металізації (АДМ) [17,18]. Технологія та обладнання активованої дугової металізації (АДМ) дозволяють наносити на деталі зносостійкі покриття з підвищеною міцністю зчеплення, що витримують високі контактні навантаження при ударному навантаженні. Особливістю АДМ-апаратів є наявність малогабаритної високоефективної камери згоряння пропано-повітряної суміші, яка використовується як транспортуючий газ. Така суміш дозволяє значно знизити окислення металу, що напилюється, і вигорання легуючих елементів. Продукти згоряння утворюють на виході із сопла високошвидкісний струмінь (швидкість понад 1500 м/с при 2200 К).

Внаслідок особливостей процесу АДМ-покриття (зниження ступеня окислення шару покриття та рівня залишкової напруги) стійкіше проти тріщиноутворення при збільшеній товщині в порівнянні з газополум'єневими та плазмовими. Можливе нанесення покриття товщиною 0,5 - 10,0 мм, при

цьому рівень термічної напруги не призводить до утворення тріщин. Продуктивність даного способу може досягати 18 кг/год. (по сталі).

1.2.4. Мікроплазмове розпилення

Мікроплазмове розпилення (МПР) є одним з методів плазмового напилення, для якого використовуються плазмотрони малої потужності. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена приставка до плазмотрона для мікроплазмового напилення, що дозволяє проводити процес із застосуванням дротяних матеріалів [19,20].

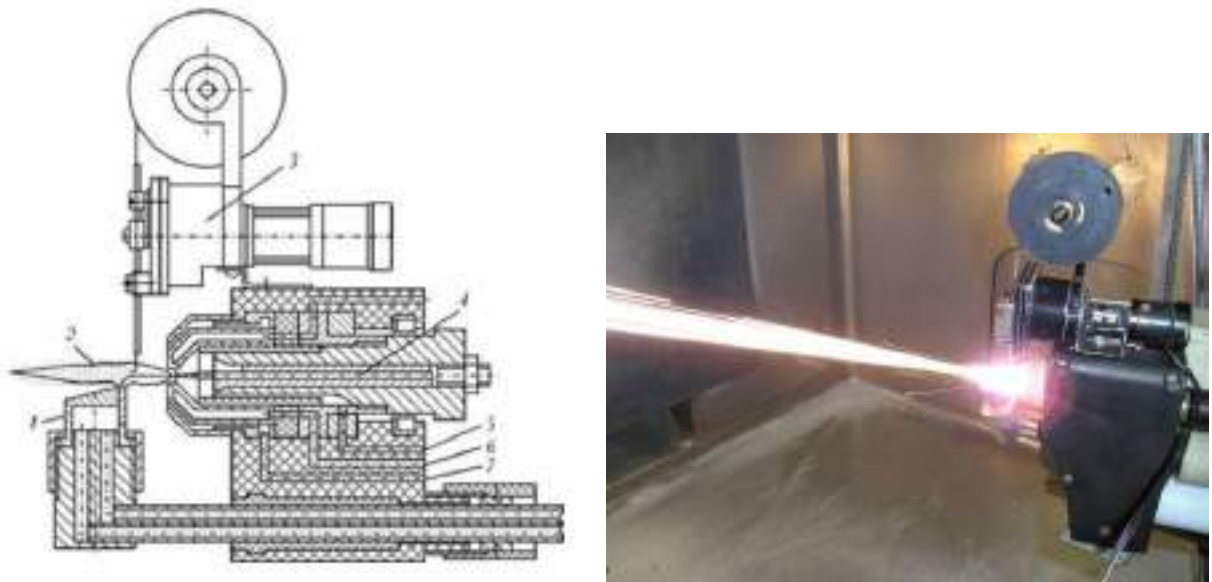


Рис. 1.4. Схема плазмотрону для мікроплазмового розпилення дротів, де: 1 – анод; 2 – плазмовий струмінь; 3 – механізм подачі дроту; 4 – катод; 5-7 – канал подачі відповідно плазмоутворюючого газу, води та захисного газу.

Дуга горить між вольфрамовим електродом (катодом) і водоохолоджуваним анодом. Напилюваний матеріал (дріт) вводиться в область дугового проміжку перед анодною плямою. При цьому діаметр дротів, що використовуються, становить 0,2...0,4 мм. Продуктивність способу знаходиться на рівні 0,1...0,6 кг/ч.

Устаткування МПР, розроблене в ІЕЗ, знайшло практичне застосування для нанесення покриттів та ремонту деталей ГТД – (США, «Pratt &

Whitney»), ремонту поверхні виробів та нанесення біокерамічних покриттів та ін. [21].

Основні переваги процесу МПР полягають у наступному:

- мінімальний розмір плями напилення (1...5мм), забезпечує високу локальність формування покриття і можливість нанесення покриттів на вироби малих розмірів, а також локального ремонту поверхней;
- подача напилюваного матеріалу за наявності виносного анода в дуговий проміжок забезпечує високу ефективність нагрівання дроту;
- можливість формування ламінарного струменя довжиною 100 ... 150 мм забезпечує розплавлення в струмені Ar-плазми тугоплавких матеріалів;
- співвісна подача захисного газу (Ar) обмежує домішування повітря в струмінні та стабілізує плазмовий струмінь;
- мала потужність плазмотрону для мікроплазмового напилення покриттів (до 2 кВт) дозволяє наносити покриття на вироби без їхнього локального перегріву.

1.3 Огляд сучасних способів сферодизації матеріалів (отримання сферичних гранул із розплаву)

Останнім часом у зв'язку з інтенсивним розвитком аерокосмічної, суднобудівної, енергетичної, хімічної та біомедичної галузей виникає потреба у ремонті та виготовленні об'ємних деталей складної форми із сталей, титану, різних високолегованих сплавів на основі нікелю та ін. металів, інтерметалідів, тугоплавких металів та ін. за допомогою адитивних технологій (або технологій 3D друку) та гранульної металургії [22].

До основних технологій 3D друку виробів із цих матеріалів слід віднести: селективне та пряме лазерне плавлення і спікання (SLM – Selective Laser Melting, SLS – Selective Laser Sintering, DMLS – Direct Metal Laser

Sintering), електронно-променеве плавлення (EBM - Electron Beam Melting). До таких деталей, які виготовляють вказаними методами слід віднести: компоненти реактивних та ракетних двигунів, лопатки, диски компресора та вентилятора, камери згоряння, деталі соплового апарату, деталі кріплення, кронштейни, захисні оболонки, патрубки; деталі фюзеляжу літаків, закрилки, лонжерони, шпангоути, стулки шасі; деталі суднових енергетичних установок – клапани, труби теплообмінників, компоненти турбін; деталі біомедичного призначення – хірургічні (стоматологічні) імпланти та ендопротези та ін. [23].

В технологіях гранульної металургії, яка включає компактування сферичних часток (гранул) із мікрокристалічною (нанокристалічною) структурою, що закристалізувалися із розплаву з високою швидкістю), для виготовлення конструкційних, в тому числі гранульних композитів із комплексом підвищених фізико-механічних характеристик найбільш перспективним способом є гаряче ізостатичне пресування (HIP – Hot Isostatic Pressing) [24]. HIP дозволяє створювати матеріали з заздалегідь заданими властивостями за рахунок формування комбінацій гранул різного хімічного, фазового та фракційного складів у необхідних пропорціях. Такі гранульні композити є перспективними для виготовлення деталей авіаційної та автомобільної техніки (компресорні лопатки газотурбінних двигунів, клапани газорозподілу, деталі гідроапаратури, гільзи, поршні, тощо).

Ці методи у якості витратного матеріалу для формування адитивних шарів та гранульних композицій використовують спеціалізовані сферичні гранули, до яких висуваються суворі вимоги до гранулометричного складу, форми, їх механічних та технологічних властивостей. Так, наприклад, для процесу SLM використовуються гранули вузької фракції 25-45 мкм, EBM 45-106 мкм, для DMLS 45-150 мкм, а для технології HIP фракції 106-250 мкм [25]. Також ці гранули повинні мати низький вміст газових сумішей (вміст кисню – не більше 0,15 % мас., вміст водню – не більше 0,01 % мас.), а також хороші технологічні властивості (високі сипучість, високу текучість, насипну

щільність, коефіцієнт сферичності та ін.). Гранули для НІР повинні мати високу насипну щільність, текучість для забезпечення високої щільності пакування та подальшого пресування, відсутність внутрішніх дефектів на кшталт пор, а також мати мікрокристалічну (а в деяких випадках, нанокристалічну) структуру, яка формується при твердінні гранул при надвисоких швидкостях охолодження (10^4 - 10^6 °C/c) та забезпечує підвищені механічні властивості готового виробу [26].

Загальна практика отримання таких гранул включає наступні технології (рис. 1.5.): газове розпилення вільнопадаючого струменя (FFGA – Free Fall Gas Atomization), газове розпилення обмеженого струменя (CCGA – Close-Coupled Gas Atomization), індукційне плавлення електроду з розпиленням газом (EIGA – Electrode Induction Gas Atomization), відцентрового плазмового розпилення заготовки (PREP – Plasma Rotating Electrode Process), плазмове розпилення дроту (РА – Plasma Atomization) [27].

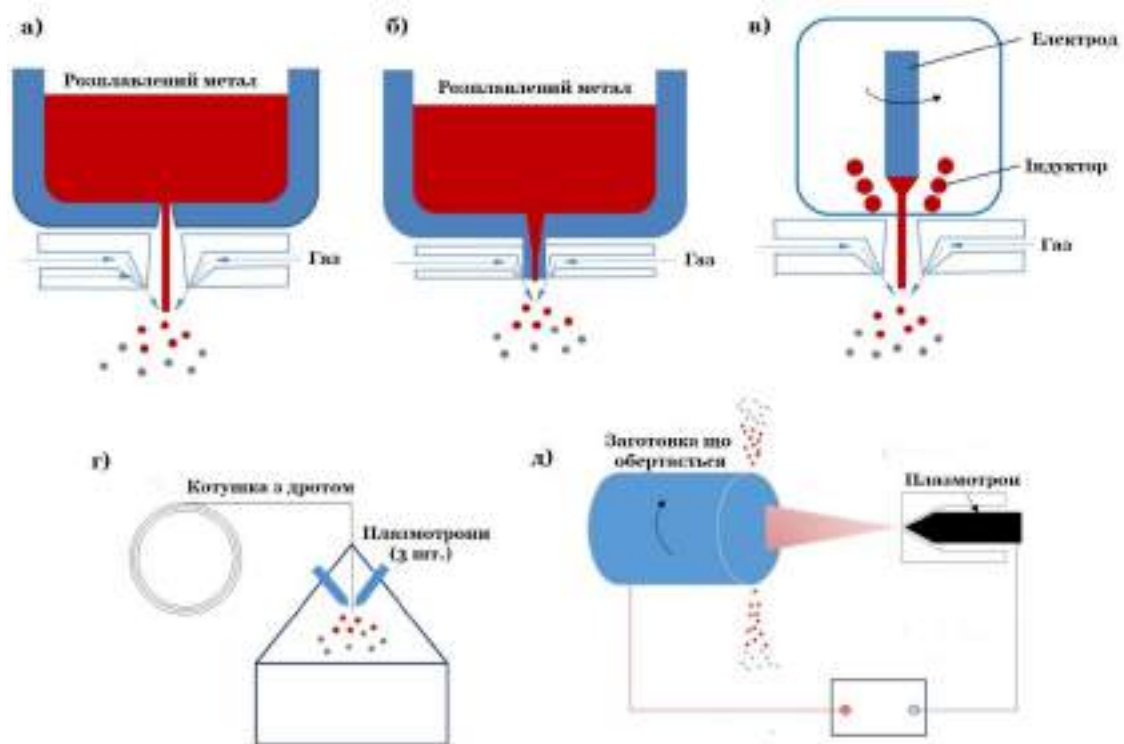


Рис. 1.5. Схеми процесу розпилення: а – FFGA; б - CCGA; в - EIGA; г - РА; д – PREP [22]

У табл. 1.1 наведено ключові особливості вищезазначених способів розпилення та характеристик отриманих гранул [28].

Таблиця 1.1. Ключові особливості різних способів отримання сферичних гранул

	FFGA/CCGA	EIGA	PA	PREP
<i>Вихідний матеріал</i>	попередньо підготовлений розплав	прецизійно оброблені циліндричні заготовки	дротові матеріали, прутки	прецизійно оброблені циліндричні заготовки
<i>Гранулометричний склад</i>	розмір гранул 25-500 мкм відсоток дрібної фракції <100 мкм до 40 % мас.	розмір гранул 25-500 мкм відсоток дрібної фракції <100 мкм до 40 % мас.	розмір гранул 25-300 мкм, відсоток дрібної фракції <100 мкм до 40-50 % мас.	розмір гранул 50-500 мкм відсоток дрібної фракції <100 мкм до 20 % мас.,
<i>Продуктивність</i>	біля 100 кг/8 год.	біля 100 кг/8 год.	біля 100 кг/8 год.	біля 150 кг/8 год.
<i>Морфологія гранул</i>	форма близька до сферичної, коефіцієнт сферичності $S = 0,6-0,7$	форма близька до сферичної, коефіцієнт сферичності $S = > 0,7$	форма сферична, коефіцієнт сферичності $S = > 0,8$	форма сферична, коефіцієнт сферичності $S = > 0,9$
<i>Характеристики гранул</i>	наявність сателітів, несферичних гранул та гранул з порами і включеннями (<15 % мас.)	наявність сателітів, несферичних гранул та гранул з порами (<10 % мас.)	наявність сателітів, несферичних гранул та гранул з аргоновими порами (<5 % мас.)	складність отримання фракції <50 мкм, наявність гранул з вольфрамовими включеннями (<1,5 % мас.)

Найбільш поширеними способами отримання сферичних гранул із складнолегованих сплавів є технології FFGA, CCGA та PREP [29]. Проте попри наявність великої кількості переваг, ці технології мають ряд недоліків до яких слід віднести:

- FFGA, CCGA - відносно низький коефіцієнт сферичності, наявність дефектних сателітних гранул і гранул несферичної форми, закриті аргонові пори та ін.;

- PREP - складність отримання гранул <100 мкм, проблеми, пов'язані з виготовленням циліндричної заготовки з точними розмірами, складність кінематичної схеми цього обладнання, необхідність його експлуатації при надвисоких швидкостях вузлів обертання заготовки (20000-40000 об/хв), труднощі, що виникають при цьому.

Проте, значний потенціал подальшого розвитку і практичного застосування для отримання сферичних гранул із високолегованих сплавів мають технології плазово-дугового розпилення дротів або прутків, однією із

різновидів якої є приведений вище процес РА [30], що і є предметом даного дослідження.

1.4 Перспективи використання технології плазмово-дугового розпилення для сферодизації дротових матеріалів

Основною перевагою технології плазмово-дугового розпилення дротів та прутків, є велика кількість технологічних параметрів завдяки яким можна регулювати гранулометричний склад гранул у широких межах, а також можливість використовувати широку номенклатуру стандартних витратних матеріалів із суцільних дротів та прутків.

Відомо, що існує два різновиди процесу плазмово-дугового розпилення дроту (або прутка) – схеми з використанням у якості присадкового матеріалу нейтрального та струмопровідного дротів («дріт-анод») [31]. У зв'язку з тим, що технологія плазмово-дугового розпилення тільки знаходиться на етапі промислового впровадження найбільш розповсюдженим способом є розпилення нейтрального дроту. Проте цей спосіб має суттєвий недолік – низьку продуктивність. У роботі дослідники для розпилення титанового дроту Ti-6Al-4V використовують комплекс з трьох плазмових генераторів, які дають сукупну продуктивність на рівні 2-5 кг/год [11]. При цьому сумарна електрична потужність, що вкладається у дріт складає від 20 до 90 кВт, тобто питома електрична потужність для отримання 1 кг титанового порошку складає не менше ніж 10 кВт·год. Варіантом підвищення техніко-економічних параметрів процесу може бути використання технології плазмово-дугового напилення струмопровідних дротів, що дозволяє значно підвищити к.к.д. процесу нагріву та плавлення дроту.

Спосіб плазмово-дугового розпилення струмопровідних матеріалів представляє широкий практичний інтерес у зв'язку з перспективністю його

використання для отримання сферичних гранул і покриттів, даний інтерес викликаний низкою істотних переваг, а саме:

- відсутність вагомих вимог до вихідного матеріалу (дроту), доступність технології його виготовлення;
- можливість отримувати гранули і покриття з різною структурою (інтерметалідною, нанокристалічною та аморфною структурою), виробництво яких методами традиційної металургії ускладнене або неможливе;
- можливість керування дисперсністю частинок, що розпилюються, в широких межах, за рахунок зміни параметрів процесу розпилення;
- високі механічні та технологічні характеристиками гранул і покриттів;
- високі показники продуктивності та енергоефективності;
- відносною простотою, дешевизною та ефективністю обладнання, що застосовується.

1.5 Висновки до розділу 1, постановка мети і задач дослідження

1. Виконано аналіз існуючих технологій газотермічного напилення і розпилення дрових матеріалів, які широко застосовуються для нанесення покриттів та сферодизації гранул із розплаву, що формується при плавленні матеріалу дротів та прутків. Визначено переваги та недоліки цих способів.

2. Наведено дані практичного застосування технології плазово-дугового розпилення дозволяють її рекомендувати для проведення подальших досліджень з метою розширення галузей застосування цієї технології у промисловому виробництві, а саме - для сферодизації дротів і формування шарів з інтерметалідною структурою.

3. Розглянуто сучасні способи отримання сферичних гранул із розплаву, з'ясовано, що технологія плазово-дугового розпилення струмопровідних матеріалів є перспективним способом отримання таких гранул завдяки високій продуктивності та енергоефективності у поєднанні з високими технологічними та механічними характеристиками гранул і потребує подальшого вивчення.

Виходячи з проведеного аналізу була сформульована наступна мета цієї роботи – виконання комплексу теоретичних та експериментальних досліджень мікрометалургійних процесів при плазово-дуговому розпиленні компактних і порошкових дротів, вивчення особливостей впливу основних технологічних та конструктивних параметрів процесу на формування об'єму диспергованого розплаву, форми часток, структури, складу і характеристик отриманих сферичних гранул та покриттів, а також створення на цій базі рекомендацій по конструюванню обладнання і розробки та впровадженню практичних технологій отримання сферичних гранул і нанесення захисних покриттів.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити вплив технологічних і конструктивних параметрів режиму плазово-дугового розпилення на гранулометричний склад та параметри сферичності отриманих гранул із модельного компактного дроту;

- визначити ступінь впливу різних середовищ та плазموутворюючих газів на гранулометричний склад та параметри сферичності отриманих гранул.

- виконати аналіз процесів твердіння дисперсних крапель-часток в процесі плазово-дугового розпилення струмопровідних дротів;

- дослідити фізико-металургійні особливості при нагріві, плавленні і розпиленні струмопровідних дротів різного хімічного складу;

- дослідити фізико-металургійні особливості плавлення та розпилення струмопровідних порошкових дротів, в тому числі закономірностей утворення та формування хімічного складу розплаву при плавленні його

компонентів в процесі взаємодії порошкового наповнювачу і металеві оболонки;

- визначити вплив технологічних параметрів режиму процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного порошкового дроту на структуру, хімічний та фазовий склад і властивості отриманих гранул та покриттів;

- розробити дослідно-промислове обладнання для отримання сферичних гранул та практичні технології нанесення багатофункціональних покриттів для підвищення довговічності поверхонь нагріву енергетичного обладнання.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Лабораторний стенд і допоміжне технологічне обладнання для проведення досліджень

Експериментальне дослідження процесів розпилення та напилення струмопровідних дротів виконувалось на дослідницькому обладнанні (рис. 2.1. 2.2.), характеристики якого приведені в табл. 2.1. (виробник ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР», м. Київ).



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд лабораторної установки PLAZER 30-PL-W, де:
1 – трансформаторне джерело живлення основної дуги; 2 – тиристорний електропривід; 3 – трансформаторне джерело живлення чергової дуги; 4 – шафа керування та газопідготовки; 5 – мобільний пульти оператора з сенсорною панеллю

Таблиця 2.1. Технічні характеристики установки «PLAZER 30-PL-W»

Параметр	Значення
Споживана потужність, кВа не більше	180
Напруга живильної мережі трифазного змінного струму частотою 50 Гц	380 ⁺¹⁹ ₋₃₈
Діапазон регулювання напруги холостого ходу, В	120-600
Діапазон регулювання робочого струму, А	30-450
Найбільша тривалість включення, ПВ %	100
Діапазон регулювання витрати повітря, нм ³ /год.	0,5-65
Діапазон регулювання витрати аргону або гелію, нм ³ /год.	0,5-35
Діапазон регулювання швидкості подачі дроту, м/хв.	2-24

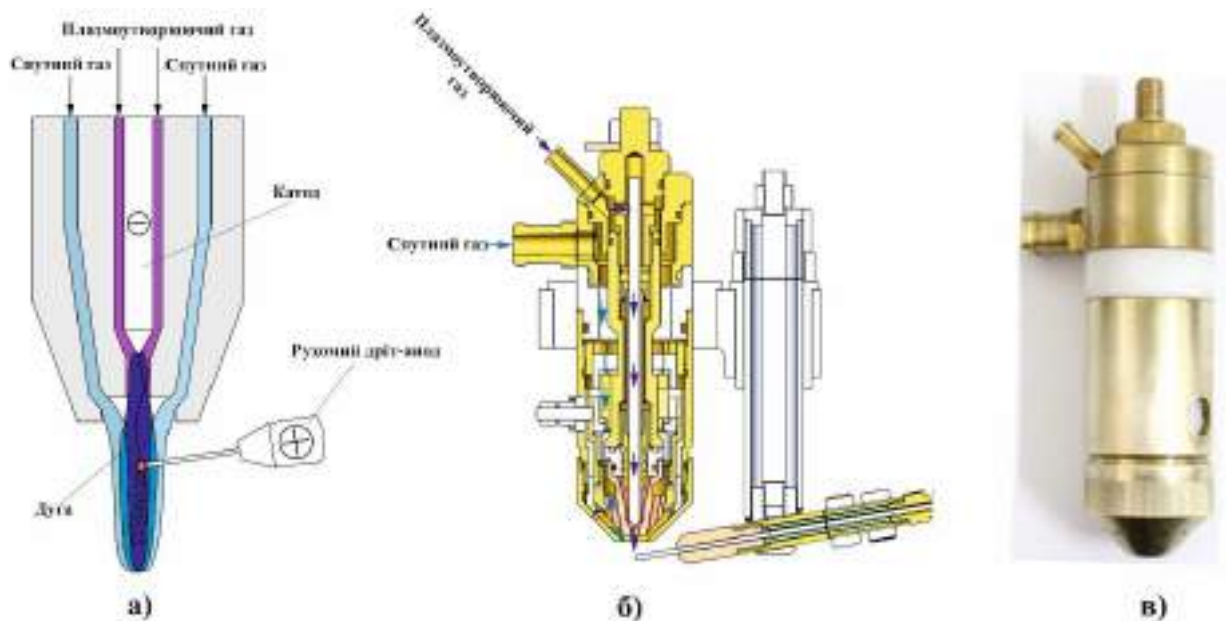


Рис. 2.2. Схема процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту (а), поперечний переріз досліджуваного плазмотрону «PLAZER 30-W» (б) та його зовнішній вигляд (в)

У якості плазмотрону для проведення експериментів по напиленню і розпиленню використовувався плазмотрон марки «PLAZER 30-W» (ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР», м. Київ). Система керування установкою призначена для керування й контролю роботи плазмотрона й інших виконавчих механізмів і одиниць і включає вимірювальну, пускорегулюючу, сигнальну апаратуру, у тому числі програмувальний контролер і сенсорну панель. Система

керування виконана на базі програмно-логічного контролерного комплексу. Програмне забезпечення (ПЗ) містить у собі всі функції керування, налаштування, індикації й аварійної сигналізації режимів роботи установки. Блок керування (тиристорна стойка) забезпечує установку, стабілізацію й контроль вихідного струму джерела живлення. Плавне регулювання струму, обертів двигуна механізмів подачі дроту, приладів керування режимами роботи установки, схеми запуску плазмотрона, газопідготовки повітря й аргону, здійснюється з сенсорної панелі оператора. У шафі керування розміщені прилади для виміру, контролю й регулювання тиску й витрат робочих газів, цифровий індикатор обертів двигуна механізму подачі дроту, прилади керування режимами роботи установки, схеми запуску плазмотрона, газопідготовки повітря й аргону, керування системами подачі дроту та ін.

2.2 Вибір матеріалів для досліджень та їх характеристики

В якості матеріалів для досліджень особливостей диспергування струмопровідних дротів різного хімічного складу були обрані дровові матеріали, які відрізняються між собою за комплексом теплофізичних та фізико-хімічних властивостей:

- розплавленням дроту ($T_{пл}$, C_p , $L_{пл}$);
- розмірами часток розплаву (σ);
- щільністю розпилюваних частинок (ρ).

Застосовували компактні металеві дроти (рис. 2.3, а,) діаметром 1,6 мм, хімічний склад яких наведено в табл. 2.2.

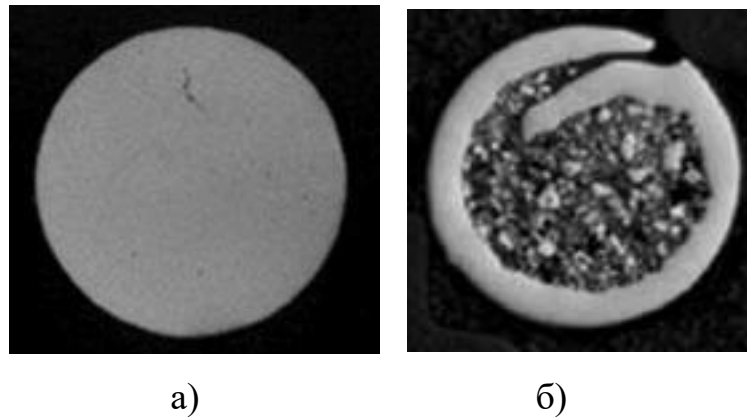


Рис. 2.3. Поперечний переріз компактного (а) та порошкового дровів (б)



Рис. 2.4. Типи та марки досліджуваних дровових матеріалів

Таблиця 2.2. Хімічний склад дровів (діаметр 1,6 мм), що використовувалися при розпиленні в якості анодів

Марка	Масова частка елементів в, %											
	C	Si	Mn	Mg	Ti	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
ER70S-6 AWS A5.18	0,06– 0,15	0,80– 1,15	1,40 – 1,85	-	-	≤0,03 5	≤0,03 5	≤0,1 5	≤0,15	≤0,5	-	основ а
ER304 AWS A5.9 YB/T5092	≤0,08	≤0,60	1,0– 2,5	-		≤0,03	≤0,03	17,0 – 19,0	8,0– 11,0			основ а
ERNiCr-3 AWS A5.14	≤0,05	≤0,5	2,5– 3,5	-	≤0,0 75	≤0,01 5	≤0,01 5	18,0 – 22,0	основ а	≤0,5	Nb 2,0– 3,0	≤3,0
ER5556 AWS A5.10	-	≤0,05	0,5– 0,8	5,8 – 6,8	Zr 0,15 – 0,35	≤0,01 5	≤0,01 5	Be 0,00 2 – 0,00 5	-	0,05	основ а	0,05
ERCu AWS A5.7	Pb ≤0,02	≤0,5	≤0,5	Sn ≤1,0	-	≤0,15	-	-	-	осно ва	≤0,01	≤0,05
ERTi-2 AWS A5.16	≤0,03	-	-	-	осно ва	O 0,08– 0,16	H ≤0,00 8	-	-	N ≤0,0 15	-	≤0,12
ERNiCrMo-3 AWS A5.14	≤0,1	≤0,1	≤0,5	Nb 3,15 – 4,15	≤0,4	Mo 8-10	≤0,01 5	20-2 3	основ а	≤0,1	≤0,4	≤5,0

Для досліджень процесів формування інтерметалідних покриттів і гранул при плазово-дуговому розпиленні порошкових дротів (рис. 2.3, б) використовували дріт системи Fe-Al, який складається з оболонки зі сталі AISI 1008 товщиною 0,4 мм, наповненої порошком Al (насіпна щільність $1,3 \text{ г/см}^3$) зі ступенем наповнення 25–27 об. %, ПД має склад 86 мас. % Fe + 14 мас. % Al, що відповідає інтерметаліду типу Fe_3Al .

2.3 Визначення температури і фракційного складу розпилюваних часток

Розміри і температура часток визначались за наступною методикою згідно схеми (рис. 2.5).

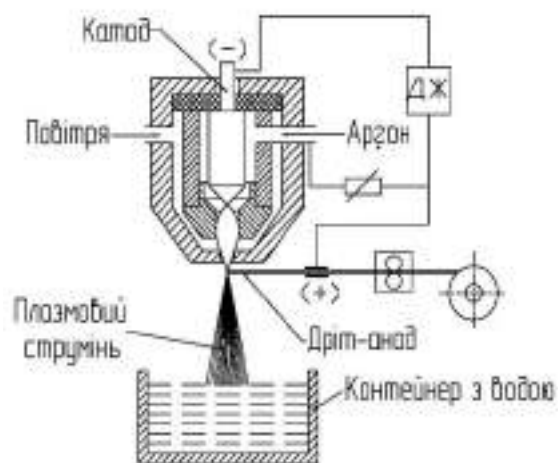


Рис. 2.5. Схема визначення фракційного складу і температури часток при плазово-дуговому розпиленні струмопровідного дроту (а) та зовнішній вигляд процесу розпилення дроту у калориметр (б)

Розпилення дротів виконувалось з відстані 500 мм від торця плазмотрону до дзеркала води в калориметрі, час розпилення для всіх випадків складав 60 с, для кожного матеріалу виконувалось по 3 досліди. Температуру води вимірювали за допомогою ртутного термометра з

точністю до 0,1 °С, причому початкова температура води коливалася для різних випадків від 4 до 5 °С, а кінцева від 24 до 45 °С. При такому незначному перепаді температур закипання води не було, її кількість в посудині контролювалася за рівнем, який залишався незмінним.

Теплоємність часток, що потрапили разом з плазмовим потоком в калориметр визначали за наступним рівнянням:

$$H - H_0 = (m_6 \cdot c_6 + m_B \cdot c_B) \Delta t, \quad (2.1)$$

де H – ентальпія металу при розглянутій температурі, кДж;

H_0 – ентальпія металу при кімнатній температурі, кДж;

$Q_k = (m_B \cdot c_B + m_6 \cdot c_6) \Delta t$ – кількість теплоти, яка прийшла в калориметр, кДж;

$m_6 = 4,1$ кг - вага банки калориметра;

$c_6 = 0,461$ кДж/кг·°С – теплоємність матеріалу банки (сталі) при $t = 20^\circ\text{C}$;

$m_B = 3,0$ кг - вага води в банці;

$c_B = 4,190$ кДж/кг·°С – теплоємність води;

Δt – зміна температури в калориметрі за термометром в °С.

Дослідження фракційного складу часток виконувалось після їх висушування у сушильному шкафу при температурі 150 °С та подальшого просіювання на лабораторному віброгрохоті «Analizzette 3 Spartan» (Німеччина) з комплектом сит 25-500 мкм, маса проби становила не менше 100 г порошку. Гранулометричний склад лабораторних партій порошку досліджували за методом ситового аналізу згідно методики ISO 2591-1:1988 «Test sieving — Part 1: Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate» з набором сит 25-40, 40-63, 63-80, 80-100, 106-125, 125-160, 160-200, 200-250, 250-315, 315-400, 400-450, 450-500 мкм.

2.4. Математичне планування експерименту

При підборі факторів для аналізу процесів газотермічного напилення зазвичай використовується комплекс постійних факторів – основних параметрів режиму. До цих факторів відносять струм (I) і напругу (U) джерела живлення, витрату та склад робочих газів, витрату порошку та дистанція напилення. Однак у випадку ГТН технологій, заснованих на методі дугового напилення дротяних матеріалів, таких як ЕН і ПДН, необхідно забезпечити стабільне горіння робочої дуги. Щоб утворити безперервну і стабільну дугу, необхідно зрівняти швидкість подачі дроту ($W_{\text{пр}}$) зі швидкістю його плавлення, забезпечуючи постійну довжину дуги. Таким чином, фактори струму та швидкості подачі дроту виявляються взаємозалежними при виборі їх значень. Характеристику їх взаємозалежності можна позначити як $K_w = I/W_{\text{пр}}$, яка залежить в кожному конкретному випадку від характеристик дроту (складу, діаметра, температури плавлення та ін.). Вона визначається емпіричною залежністю стабільності горіння дуги від взаємозв'язку I і $W_{\text{пр}}$.

У зв'язку з цим, чинники, відібрані для включення в план експерименту з напилення Fe-Al-покриття за допомогою ПДН і матриця експерименту, представлені в табл. 2.3–2.5.

Значення K_w характеристики за умов ПДН Fe-Al покриття встановлене в результаті попередніх дослідів з визначенням поєднання струму, швидкості подачі дроту та стабільності процесу, дорівнював $180/4,8=230/6\approx 38$.

Факторами були обрані дистанція напилення – h , витрата повітря – $Q_{\text{пов}}$, сила струму – I , швидкість подачі дроту – $W_{\text{пр}}$.

Для аналізу процесу формування покриття при ПДН напиленні Fe-Al дроту та вибору режиму напилення використано метод математичного планування експерименту із застосуванням повного факторного

експерименту 2^3 . Це дозволило дослідити структуру та визначити властивості Fe-Al покриттів, напилених методом ПДН.

Матриця експерименту представлена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Матриця експерименту

№ експерименту		Фактори			
		X_1 (h)	X_2 ($Q_{\text{пов}}$)	X_3 (I)	X_4 ($W_{\text{пр}}$)
Блок №1	1	–	–	–	–
	2	+	–	–	–
	3	–	+	–	–
	4	+	+	–	–
Блок №2	5	–	–	+	+
	6	+	–	+	+
	7	–	+	+	+
	8	+	+	+	+

У табл. 2.4 наведено значення факторів залежно від їх рівня.

Таблиця 2.4. Факторні рівні

Рівні	X_1 , h, мм	X_2 , $Q_{\text{пов}}$, м ³ /ГОД	X_3 I, А	X_4 $W_{\text{пр}}$, м/хв
+	220	45	230	6.0
–	150	40	180	4.8
0	185	42.5	–	–

У табл. 2.5 наведено план експериментів з ПДН Fe-Al покриття.

Таблиця 2.5. План експерименту ПДН Fe-Al покриття

№ експерименту	Фактори				Характеристики		
	h, мм	Q _{пов} , м ³ /год	I, А	W _{пр} , м/хв	K _T	K _w	K _t
1	150	40	180	4.8	4.5	37.5	3.75
2	220	40	180	4.8	4.5	37.5	4.9
3	150	45	180	4.8	5.75	37.5	3.3
4	220	45	180	4.8	5.75	37.5	3.75
5	150	40	230	6.0	5.11	38.3	3.75
6	220	40	230	6.0	5.11	38.3	5.6
7	150	45	230	6.0	5.11	38.3	3.3
8	220	45	230	6.0	5.11	38.3	4.9

Дослідження мікроструктури, фазового складу, визначення мікротвердості та пористості покриттів на зразках були виконані для кожного з 8 дослідів, зазначених у табл. Їхньою метою було оцінка впливу обраних параметрів ПДН на структуру та властивості отриманого Fe-Al покриття.

Для оцінки перебігу процесів що протікають при формуванні струменя частинок, що входять до складу шару покриття FeAl, сформовано комплекси факторів. Ці фактори є якісними характеристиками окремих явищ процесу наплення, тому вони були розраховані для кожного з 8 дослідів проведених в рамках обраного плану експерименту (табл. 2.5).

1. Питома теплоємність на одиницю напиленого матеріалу:

– $K_w = I/W_{пр}$, [А·хв/м] (характеристика стадії плавлення дроту в зоні дуги).

2. Питома теплоємність одиниці об'єму робочого газу:

– $K_T = I/Q_{пов}$, [А·год/м³] (характеристика процесу нагрівання частинок).

3. Оцінка тривалості перебування частинок в об'ємі струменя:

– $K_t = h/Q_{пов}$, (характеристика, що враховує тривалість перебування частинок в обсязі струменя).

Отримані результати плану експерименту були відокремлені в двох блоках за поточним значенням (180 і 230 А).

2.5 Дослідження мікроструктури хімічного і фазового складу гранул і покриттів

Для проведення металографічних досліджень застосовували оптичний мікроскоп Neophot-32 з пристосуванням для цифрового фотографування. Виготовлення та підготовка металографічних шліфів проводилося за такою методикою: порізка зразків на установці «Isomet» фірми Buhler за допомогою алмазовмістних дисків (Diamond Cut-Off Blade 11-4808E); заливка зразків твердіючою речовиною «Протакрил М»; шліфування з використанням водостійкого шліфувального паперу SiC с зернистістю P400, P600 і еластичних дисків, що містять алмазні включення різної дисперсності (A28/14 і A14/10); полірування на вовняному сукні з використанням алмазної суспензії DiaDuo з розміром алмазних частинок 3 мкм.

Пористість покриттів визначали методом гідростатичного зважування згідно ГОСТ 18898-73, а пористість - металографічним способом на приладі OMNIMET (Англія) на ділянках мікрошліфів розміром 120×150 мкм. Визначення пор та неметалічних включень виконували шляхом застосування режиму темного поля та просочення шліфа барвником із флуоресцентними добавками. Пористість покриттів визначали із застосуванням програмно-апаратного комплексу для аналізу мікроструктури порошкових матеріалів, із застосуванням програмного комплексу «АМИС».

Для якісного і кількісного аналізу вмісту компонентів в покриттях, пор і кількості оксидів застосовували оптичну методику (метод аналізу зображення) [85–87], яка полягає у визначенні площі, що припадає на виявлені пори і оксиди, щодо всієї площі шліфа покриття. Цифрове

зображення оброблялося програмою «Image-Pro Plus», яка дозволяє вимірювати вміст компонентів, пористість і оксиди (виділяючи включення, що відрізняються за кольором і яскравістю), визначати кількість і процентне відношення по площі.

Визначення елементного складу гранул і покриттів також проводили методом скануючої електронної мікроскопії на базі аналітичного комплексу, що складається зі скануючого електронного мікроскопа (СЕМ) JSM-35 CF фірми JEOL (Японія) і енергодисперсійного спектрометра (модель INCA Energy-350 фірми Oxford Instruments, Великобританія). Методом рентгенофазового аналізу (РСФА) на дифрактометрі ДРОН-УМ1 досліджували фазовий склад покриттів.

2.6 Методики дослідження характеристик (властивостей) гранул і покриттів

2.6.1 Коефіцієнт сферичності гранул і порошків

Коефіцієнт сферичності S визначається як відношення периметра еквівалентного кола P_{EAC} до реального периметру P .

$$S = \frac{P_{EAC}}{P} = \frac{2\sqrt{\pi \cdot A}}{P}, \quad (2.2)$$

Результат представляється як значення від 0 до 1 - чим менше значення, тим більше неправильну форму має частка. Це зв'язано з тим, що неправильна форма частки призводить до збільшення її периметра.

Дослідження форми частинок і морфології їх поверхонь проводили за допомогою методів оптичної (мікроскопи «UNITRON Versamet-2» і «Neophot-21») та аналітичної растрової електронної (мікроскоп «PHILIPS SEM-515») мікроскопії. Опис форми частинок виконували за методикою зі стандарту ISO 9276-6:2008 «Representation of results of particle size analysis —

Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology» у програмному продукті «MIPAR».

2.6.2 Мікротвердість покриттів

Вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3 з урахуванням рекомендацій по вибору навантаження, часу навантаження та витримки під навантаженням (ГОСТ 9450–76).

Вимірювання мікротвердості окремих складових покриттів проводили при навантаженні 50 г, вимір загальної мікротвердості при навантаженні 200 г. На кожному зразку проводили по 30–50 вимірювань з наступним визначенням середнього значення та побудови варіаційних кривих, які дозволяють визначити найбільш імовірні значення.

2.6.3 Абразивна і газоабразивна зносостійкість покриттів

Випробування товщини покриття в умовах газоабразивного зношування на втрату маси під впливом струменя корунду дисперсністю 850–1000 мкм проводили при 20 і 550 °С. Дослідження абразивної зносостійкості покриттів виконували при терті об нежорстко закріплений абразив.

Випробування на газоабразивне зношування напиленого покриття виконувалось згідно методики стандарту ASTM G76-95. Нагрівання зразка здійснювали полум'ям пальника до температури 550...600 °С. Після досягнення необхідного рівня температури зразка при подачі стисненого повітря починали проводити випробування. Для проведення випробування вибрано такі параметри: тиск стисненого повітря 0,5 МПа, діаметр сопла 8 мм; швидкість газоабразивного потоку (розрахована) – 200 м/с. Газоабразивний струмінь формувався шляхом подачі крихти електрокорунду нормального марки 14 А зернистістю 90 F за з основним діапазоном розміру

частинок 150...180 мкм з мікротвердістю 16,6 Па. Для кожного випробування використовували свіжий абразивний матеріал масою 600 г. Відстань від зрізу сопла до поверхні зразка складала 50 мм, кут нахилу (кут атаки) дорівнював 10°.

Випробування на абразивну зносостійкість покриттів при терті об нежорстко закріпленій абразив виконувалось згідно методики стандарту ASTM G65-94. Зразок базувався і затискався у спеціальному кріпильному оснащенні. За допомогою пружини регулювалося зусилля притискання зразка до колеса. Як абразивний матеріал для випробувань використовується електрокорунд зернистістю F 22 з основною фракцією 850...1000 мкм. Для кожного випробування використовували свіжий абразивний матеріал масою 365 г.

Знос покриття визначався за наступною формулою:

$$I_n = \Delta i / m, \text{ мкм/кг}, \quad (2.3)$$

де I_n – інтенсивність зношування, мкм/кг;

Δi – лінійне зношування покриття, мкм;

m – витрати абразиву для випробування, кг.

2.6.4 Термостійкість та корозійна стійкість покриттів

Термостійкість покриттів, відокремлених від основи, визначали за допомогою дериватографа Q-1500D на повітрі при нагріванні до 1000 °С зі швидкістю 10 °С/хв за характеристикою інтенсивності зміни питомого приросту маси зразка.

Дослідження електрохімічних властивостей покриттів проводили потенціодинамічним методом у потенціостаті П-5827М у середовищах водних розчинів 3 % NaCl та 0,5М H₂SO₄. Як характеристики корозійної стійкості розраховували вагові (W, г/см²·год) та глибинні (P, мм/год) корозійні характеристики, а також визначали термін служби захисного

покриття (τ , роки). Для порівняння характеристик корозійної стійкості покриття використовували десятибальну шкалу за ГОСТ 308–85.

2.7. Висновки за розділом 2

1. Розроблено лабораторний стенд для дослідження процесу плазмово-дугового розпилення та сфердизації струмопровідних дротів, що складається з плазмотрону, джерел живлення, шафи керування та спеціалізованого діагностичного обладнання, що здійснює автоматичну реєстрацію та обробку даних всіх основних параметрів процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів.

2. Для аналізу процесу формування покриттів при ПДН напиленні Fe-Al дроту та вибору режиму напилення використано метод математичного планування експерименту із застосуванням повного факторного експерименту 2^3 . Це дозволило дослідити структуру та визначити властивості Fe-Al покриттів, напилених методом ПДН.

3. Для проведення експериментів і дослідження характеристик гранул і покриттів, отриманих в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів використані методики визначення розмірів і параметрів форми частинок, отриманих під час розпилення струмопровідних дротів різного хімічного складу, структури і фазового складу інтерметалідних покриттів методом металографічного, рентгенофазового аналізу та скануючої електронної мікроскопії, методики визначення мікротвердості, міцності зчеплення, абразивної та газоабразивної зносостійкості, термостійкості та корозійної стійкості плазмових покриттів.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДИСПЕРГУВАННЯ, СФЕРОДИЗАЦІЇ ТА ТВЕРДІННЯ КРАПЕЛЬ-ДИСПЕРСНИХ ЧАСТОК ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ РОЗПИЛЕННІ СТРУМОПРОВІДНИХ ДРОТІВ

3.1 Математичне моделювання процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дрових матеріалів

Плазма, що утворюється в дугових плазмотронах постійного струму, є прикладом термічної плазми, яка характеризується високою густиною електронів (від 10^{21} до 10^{24} м⁻³) і високою частотою зіткнень між її складовими (тобто молекулами, атомами, іонами та електронами) [32]. Високі частоти зіткнень призводять до стану, близького до локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР), в якому кінетичну енергію складових частинок можна охарактеризувати однією температурою. Наближення ЛТР часто порушується поблизу кордонів плазми, коли плазма взаємодіє з твердими стінками, робочим матеріалом або з холодним робочим газом чи атмосферою. Теплова плазма, завдяки її відносно високим густинам і тискам, а отже, малим середнім довжинам вільного пробігу конститивних частинок, найкраще описується рідинними моделями.

Тому для математичного опису процесів, що протікають при формуванні плазмової дуги та витіканні дугової плазми із сопла плазмотрона, були прийняті такі припущення:

- Плазма знаходиться у стані ЛТР, що передбачає спрощення математичної моделі. У результаті цього плазмовий газ розглядається як ньютонівська безперервна рідина, що характеризується однією температурою

та підпорядковується системі рівнянь Нав'є - Стокса, усереднених по Фавру [33].

- Виходячи з припущення ЛТР, термодинамічні і транспортні властивості плазмового газу (такі як c_p , μ , та λ) визначаються температурою газу, без урахування електропровідності (σ) [34].

- Потік плазми вважається стійким, турбулентним і нестисливим. Швидке розігрівання газу викликає його раптове розширення навколо дуги, що призводить до швидкого прискорення, внаслідок чого виникає турбулентний потік [35].

- Силою в'язкої дисипації нехтують, через її відносно невеликий вклад у сумарний баланс.

- Джерело живлення має постійну потужність. Індуковане електричне поле є незначним порівняно з напруженістю електричного поля, прикладеного в області плазмової дуги.

- Плазма є оптично тонкою, тому явща радіації не розглядаються.

- Приелектродні процеси при моделюванні не розглядаються.

3.1.1 Моделювання плазмової дуги

Рівняння, що використовуються при моделюванні плазмових струменів, включають рівняння збереження маси, імпульсу та енергії. Рівняння, засновані на моделюванні критичної до плазмоутворення частини дуги, є електромагнітними рівняннями, що задаються рівняннями Максвелла у вигляді електричного і магнітного векторного потенціалів:

1. Закон збереження маси:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0, \quad (3.1)$$

2. Закон збереження моменту:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = \vec{j} \times \vec{B} - \nabla p + \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{V}) + 2 \nabla \cdot (\mu \vec{S}), \quad (3.2)$$

3. Закон збереження енергії:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \vec{j} \times \vec{E} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \vec{j} \cdot \nabla T, \quad (3.3)$$

4. Рівняння Максвелла:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0, \quad (3.4)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi, \quad (3.5)$$

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}, \quad (3.6)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (3.7)$$

5. Закон Ома:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (3.8)$$

де ρ – щільність газу (кг/м^3); \vec{V} – швидкість газу (м/с); $\vec{j} \times \vec{B}$ – сила Лоренца обумовлена вектором електричного току \vec{j} (А/м^2) та вектором електромагнітної індукції \vec{B} (Тл); p – тиск (Па); μ – динамічна в'язкість плазми ($\text{кг/м}\cdot\text{с}$); \vec{S} – тензор швидкостей деформації; h – ентальпія (Дж/кг); \vec{E} – електричне поле (В/м); k_B – константа Больцмана (Дж/К); e – елементарний заряд (Кл); σ – електропровідність газу ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$); ϕ – електростатичний потенціал (В); \vec{A} – векторний потенціал електромагнітного поля (Тл·м).

3.1.2 Моделювання турбулентності

У дугових плазмотронах постійного струму при попаданні в робочу камеру пристрою робочий газ зазвичай має температуру навколишнього середовища, під час взаємодії з дугою температура газу зростає зі швидкістю близько 10^4 К/мм. Це швидке нагрівання викликає раптове розширення газу і, як наслідок, його швидке прискорення. Швидкість газу через факел часто змінюється на 2 порядки величини (наприклад, від 10 до 1000 м/с). Інтенсивне прискорення газу, швидкість зсуву та температурні градієнти всередині факела разом з електромагнітним впливом [36-38] призводять до того, що потік стає нестабільним і турбулентним. Турбулентність ще більше посилюється, коли потік плазми залишає плазмоутворююче сопло і взаємодіє

з холодним і, таким чином, більш щільним навколишнім середовищем. Для моделювання турбулентного струменя використовували стандартну двухпараметричну к-ε модель, яка забезпечує адекватний опис потоку [39], де турбулентна в'язкість визначає механізм взаємодії між шарами рідкого середовища при турбулентному режимі його витікання та визначається з наступного рівняння:

$$\mu_t = \rho C \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.9)$$

де k – кінетична енергія турбулентності ($\text{м}^2/\text{с}^2$); ε – швидкість дисипації турбулентної енергії ($\text{м}^2/\text{с}^3$); ρ – щільність середи ($\text{кг}/\text{м}^3$); $C_\mu = 0,09$; величина μ_t виражається у $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$.

Ця модель базується на розв'язанні транспортних рівнянь для кінетичної енергії турбулентності (k) та швидкості її дисипації (ε).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (3.11)$$

де G_k описує утворення кінетичної енергії турбулентності за рахунок середнього градієнта швидкості; G_b описує утворення кінетичної енергії турбулентності за рахунок плавучості; Y_M описує внесок флуктуацій розширення до загальної швидкості дисипації; C_1, C_2, C_3 – емпіричні константи; G_k, G_ε – турбулентні числа Прандтля для k та ε .

3.1.3 Моделювання розпаду крапель

Для процесу плазово-дугового розпилення є характерними наступні два механізми утворення крапель – плавлення матеріалу дроту, формування рідкого прошарку на його торці, його витягування у струмок, зрив первинних

крапель у наслідок значного газодинамічного впливу плазмового струменя та їх подальше дроблення струмені [39].

Про руйнування крапель говорять результати дослідження спорідненого процесу - електродугової металізації [40,41], згідно з якими з торців електродів зриваються краплі діаметром 500-800 мкм, проте на робочій дистанції діаметр крапель складає 10-300 мкм.



Рис. 3.1. Формування первинних крапель з рідкого прошарку на торці дроту при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідного дроту

Серед характерних параметрів визначальних стійкість і руйнування крапель найважливішим є число Вебера [42-44].

$$We = \frac{\rho_g \cdot u_{rel}^2 \cdot d_p}{\sigma}, \quad (3.12)$$

де ρ_g - щільність газової фази (кг/м^3); u_{rel}^2 - відносна швидкість між газової фазою та часткою (м/с); d_p - діаметр частинки (м); σ - сила поверхневого натягу краплі (Н/м).

Залежно від значень We виділяється кілька режимів (або механізмів дроблення, рис. 3.2) [45, 46].

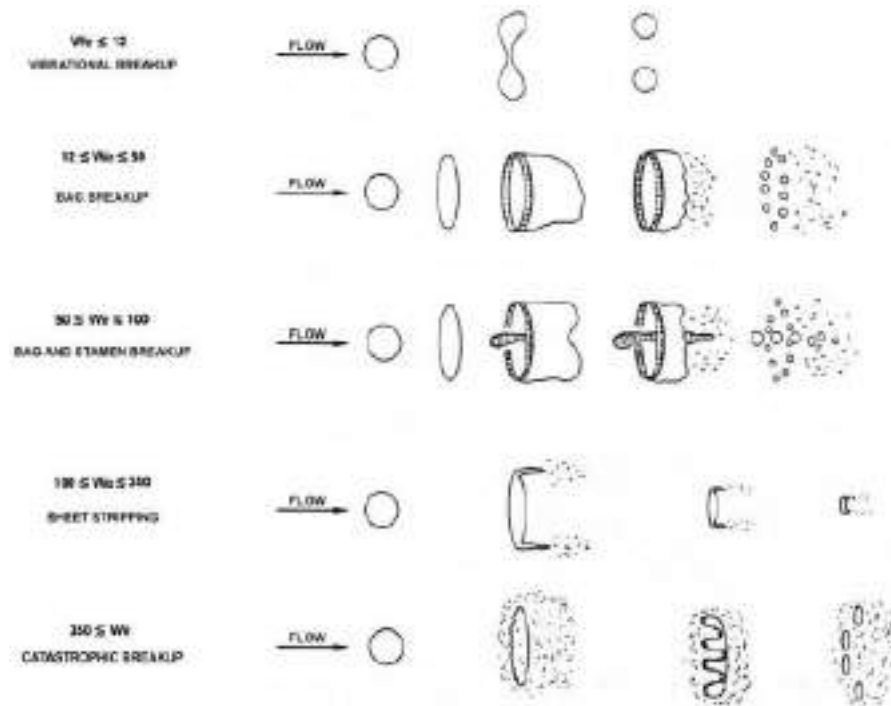


Рис. 3.2. Класифікація механізмів дроблення в залежності від числа We [46]

Згідно сучасним уявленням можна навести наступну класифікацію механізмів дроблення, обмежених критичними числами We^* :

- вібраційне дроблення (vibrational breakup, $We = 8 \div 12$;
- дроблення на кшталт «парашут» (bag breakup), $12 < We < 50$;
- дроблення на кшталт «парашут» із струмком (bag-and-stamen breakup), $50 < We < 100$;
- зрив прикордонного шару рідини з екватора краплі (sheet stripping), $100 < We < 350$;
- зрив мікрокрапель з гребінців хвиль, що виникають на навітряній поверхні краплі, (wave crest stripping), $We > 350$;
- катастрофічне дроблення (catastrophic breakup), $We > 350$.

Згідно з експериментальними результатами [47], при плазмодуговому напиленні частки можуть дробитися на основі механізму вібраційного дроблення (що, як правило, можливо при невеликій відносній швидкості, наприклад, на периферії струменя), а також механізмів дроблення за типом парашут і парашут із струмком.

Відомо, що при моделюванні вторинного дроблення найкращі результати дає модель Taylor Analogue Break-up (TAB), яку застосовують при характері дроблення типу «парашут» (число Вебера $12 < We < 40-100$) [48, 49], який характерний для плазово-дугового розпилення [50].

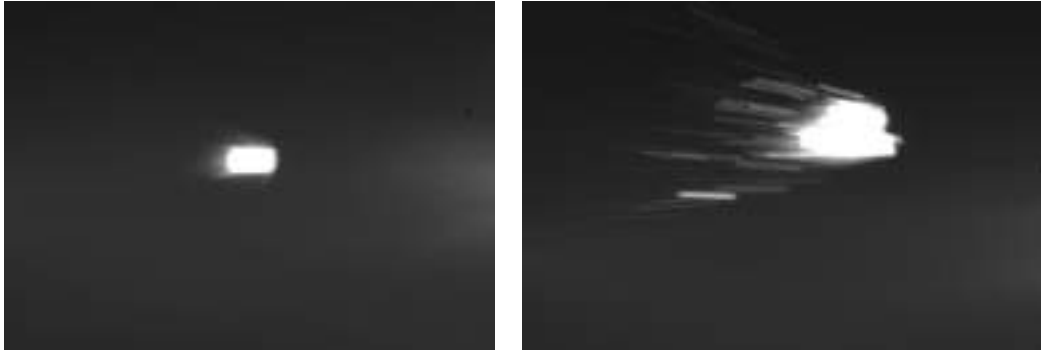


Рис. 3.3. Дроблення первинних крапель на кшталт «парашут» в процесі плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту

Модель TAB проводить аналогію між системою маса-пружина-демпфер та коливаннями і деформацією крапель рідини, що призводять до її дроблення [51]. У цій аналогії сила поверхневого натягу представлена відновлюючою або стабілізуючою силою пружини, а аеродинамічна сила газу є джерелом зовнішньої сили або сили, що дестабілізує масу. Автори [52] також додали демпфуючу силу для представлення в'язкості рідини. Рівняння другого порядку для системи маса-пружина-демпфер приймає наступний вигляд:

$$m\ddot{x} = F - kx - d\dot{x}, \quad (3.13)$$

де m , F , k і d — маса, сила, константа пружини та константа демпфування відповідно. Автори припускають, що x — це зміщення екватора краплі від положення рівноваги у формі сфери до сплющеного еліпсоїда (рис. 3.3).

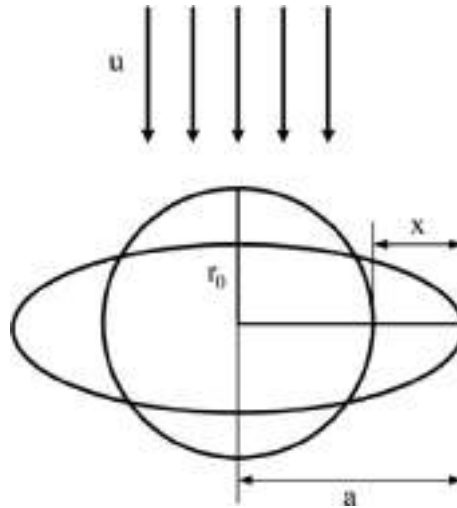


Рис. 3.3. Механізм деформації краплі згідно ТАВ моделі

Використовуючи коефіцієнти аналогії Тейлора, фізичні залежності коефіцієнтів у рівнянні (1) мають наступні значення:

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_g u^2}{\rho_l r}, \quad (3.14)$$

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{G}{\rho_l r^3}, \quad (3.15)$$

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2}, \quad (3.16)$$

де ρ_l – щільність краплі (кг/м^3); ρ_g – щільність неперервної фази (кг/м^3); u – відносна швидкість краплі (м/с); r – радіус вихідної краплі (м); σ – сила поверхневого натягу краплі (Н/м); μ_l – динамічна в'язкість краплі ($\text{кг/м}\cdot\text{с}$). Значення для безрозмірних констант $C_f = 0,33$, $C_d = 5$ та $C_k = 8$ були обрані згідно з експериментальними та теоретичними даними, наведеними у роботі [53]. Введення безрозмірної змінної $y = \frac{C_b}{r}$ та $t^* = \frac{tu}{r}$, де $C_b = 0,5$ припускає, що коли амплітуда коливань краплі перевищує її критичний радіус r – відбувається дроблення краплі, тоді рівняння приймає наступний вигляд:

$$\ddot{y} + \frac{5N}{ReK} \dot{y} + \frac{8}{WeK} y = \frac{2}{3K}, \quad (3.17)$$

де $K = \frac{\rho_l}{\rho_g}$, $N = \frac{\mu_l}{\mu_g}$, число Рейнольдса $Re = \frac{\rho_g u r}{\mu_g}$, число Вебера $We = \frac{\rho_g u^2 r}{\sigma}$. Рівняння (3.13) називається ТАВ моделлю дроблення, яка дійсна для всіх чисел Вебера. Це рівняння також є лінійним, тому його аналітичний розв'язок відповідає наступній формулі:

$$y(t) = \frac{We}{12} + e^{-\frac{t}{t_d}} \left\{ \left(y_0 - \frac{We}{12} \right) \cos \omega t + \frac{1}{\omega} \left(y_0' + \frac{y_0 - \frac{We}{12}}{t_d} \right) \sin \omega t \right\}, \quad (3.18)$$

$$\text{де } y_0 = y(0), y_0' = \frac{dy}{dt}(0), \frac{1}{t_d} = 2.5 \frac{\mu_1}{\rho_1 r^2}, \omega^2 = \frac{1}{t_d^2} - 8 \frac{\sigma}{\rho_1 r^3}$$

3.1.4 Моделювання руху часток в оточуючому середовищі

Математична модель, що використовується для моделювання процесів руху часток у захисному середовищі, заснована на розв'язанні рівнянь Ейлера - Лагранжа та реалізує двосторонній зв'язок між газовою та дисперсною фазами. Процеси, що протікають у газовій фазі моделюються шляхом розв'язання системи рівнянь Нав'є - Стокса, усереднених по Фавру [54], тоді як траєкторії руху окремих частинок визначаються з рішення звичайних диференціальних рівнянь.

Цей підхід до моделювання реалізовано у вигляді моделі дискретної фази Discrete phase model (DPM) [55]. Ця модель передбачає розрахунок індивідуальної траєкторії кожної частки окремо в полі газу.

Під час свого переміщення в плазмовому потоці частинка піддається дії ряду сил, які діють на неї одночасно та мають різний вплив на її траєкторію та час перебування в плазмі. Серед найважливіших сил, які незмінно враховуються, є сили інерції F_i , сили в'язкого опору F_D , та сили гравітації F_g , які визначаються як:

$$F_i = \frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{du_p}{dt}, \quad (3.19)$$

$$F_D = \frac{\pi d_p^2}{4} \cdot C_D \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_R^2, \quad (3.20)$$

$$F_g = \frac{\pi d_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot g, \quad (3.21)$$

де d_p – діаметр частинки (м); ρ_p – щільність частинки (кг/м³); ρ – щільність плазми (кг/м³); C_D – коефіцієнт лобового опору; u_p – швидкість

частинки (м/с); u_R – відносна швидкість між плазмою і часткою (м/с); t – час (с).

Тому баланс сил навколо окремої частинки, яка рухається в потоці плазми, можна записати просто як:

$$F_i = F_D + F_g, \quad (3.22)$$

Рівняння (3.22) також може бути записаним у осесиметричних циліндричних координатах наступним чином:

$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{3}{4} C_D (u_p - u) u_R \left(\frac{\rho}{\rho_p \cdot d_p} \right) \pm g, \quad (3.23)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = -\frac{3}{4} C_D (v_p - v) v_R \left(\frac{\rho}{\rho_p \cdot d_p} \right) \pm g, \quad (3.24)$$

де u_p – швидкість частинки у напрямку z осі плазмового струменя (м/с); u – швидкість плазми у напрямку z (м/с); u_R – відносна швидкість системи плазма-частинка (м/с); v_p – швидкість частинки у напрямку r (м/с); v – швидкість плазми у напрямку r (м/с); v_R – відносна швидкість системи плазма-частинка у напрямку r (м/с).

Прискорення через силу тяжіння ($\pm g$) додається або віднімається з рівнянь осьової чи радіальної компоненти швидкості залежно від орієнтації потоку.

3.1.5 Моделювання теплообміну часток з оточуючим середовищем

Баланс між передачею тепла кондукцією та конвекцією від гарячого газу до частинок і охолодженням частинок через радіаційні втрати тепла в навколишнє середовище визначає температуру частинок (рис. 3.4).

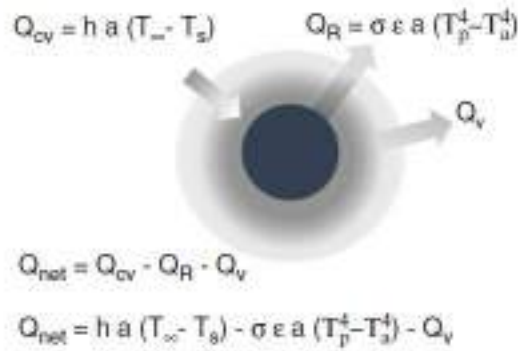


Рис. 3.4. Схема загальної теплопередачі до частинки, Q_{net} , де: Q_R - радіаційні втрати від поверхні твердої частинки та Q_v теплові втрати від випромінювальної пари

У більшості випадків радіаційною передачею тепла від гарячого газу, особливо плазмового газу, до частинки можна знехтувати, оскільки вона зазвичай вважається оптично тонкою [56,57]. Чистий теплообмін між гарячим газом і частинкою можна виразити як:

$$Q = h(\pi d_p^2)(T_\infty - T_s) - (\pi d_p^2)\epsilon\sigma_s(T_s^4 - T_a^4), \quad (3.25)$$

де T_s – поверхнева температура (К); d_p – діаметр частки (м); ϵ - випромінювальна здатність частки; σ_s - константа Стефана-Больцмана ($5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴); T_a – температура навколишнього середовища (К); величина Q виражається у Вт.

Припущення однорідної температури частинок означає, що теплопровідність матеріалу частинок κ_p набагато вища, ніж у газу κ , тобто:

$$Bi = \frac{\kappa}{\kappa_p} < 0,01, \quad (3.26)$$

де Bi – число Біо.

Коефіцієнт теплопередачі між плазмою та частинкою можна виразити через число Нуссельта, яке визначається як:

$$Nu = \frac{hd_p}{\kappa}, \quad (3.27)$$

де h - коефіцієнт теплопередачі (Вт/м²·К); κ - теплопровідність рідини (Вт/м·К).

Розрахунок числа Нуссельта прийнято характеризувати як функцію від числа Рейнольдса, яке визначається наступним співвідношенням, яке часто називають напівемпіричною кореляцією Ранца–Маршаллам [58], для чисел Рейнольдса, менших за 200.

$$Nu = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2,0 + 0,6Re_d^{1/2}Pr^{1/3}, \quad (3.28)$$

де d_p – діаметр частки (м); k_∞ - теплопровідність газової фази (Вт/м·К); Pr – число Прандтля для газової фази.

3.1.6 Граничні умови при проведенні розрахунків

Для розрахунку керівних рівнянь було використане CFD CAE програмне забезпечення, яке вирішує їх за допомогою вбудованого алгоритму. Це програмне забезпечення має базові можливості для вирішення рівнянь збереження неперервності, імпульсу та енергії. Рівняння та співвідношення для визначення електричного потенціалу, магнітного векторного потенціалу, електричного поля, вектора магнітної індукції та вектора густини електричного струму розв'язуються за допомогою призначеної для користувача пам'яті, визначеного користувачем скаляра і призначені для користувача функції.

Схема досліджуваної плазмової дуги постійного струму представлена на рис. 3.5. Дуга горить у потоці плазмоутворюючого газу (аргону) з витратою G_1 , який формується соплом радіусом R_c , та довжиною каналу плазмотрону Z_1 , між тугоплавким (з вольфраму) катодом і дротом-анодом, що плавиться, який розташовується за зрізом сопла на відстані Z_2 від робочого кінця катода. Відкрита ділянка дугового розряду може обдуватися потоком холодного газу (аргоном, повітрям) з витратою G_2 , що подається через кільцевий канал, розташований під кутом α до осі плазмотрону і має внутрішній R_1 і зовнішній R_2 радіуси.

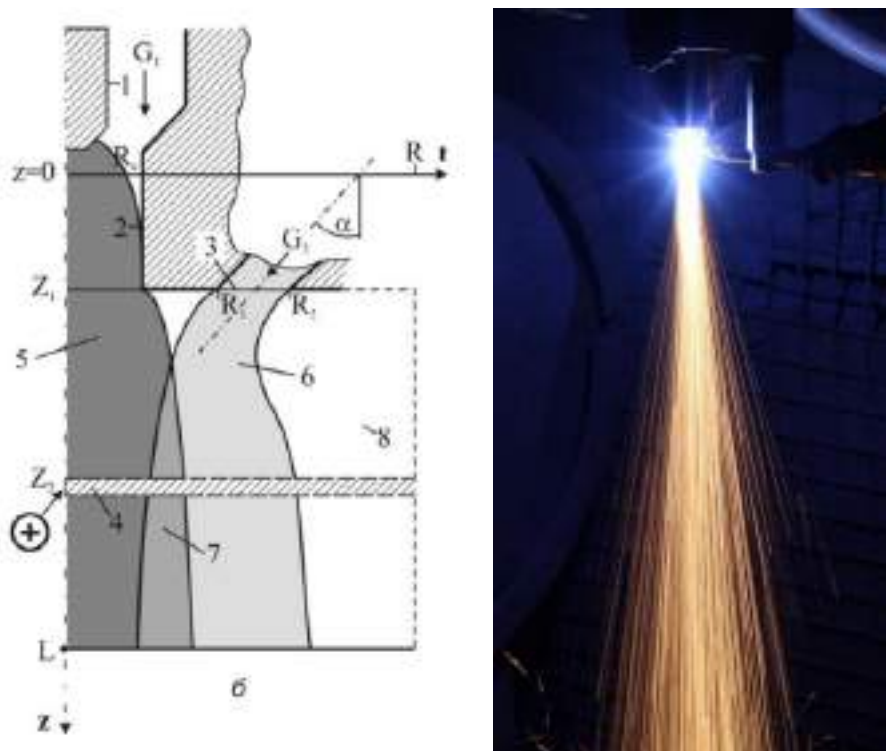


Рис. 3.5. Схема досліджуваної плазмової дуги постійного струму з рухомих дротом-анодом (а) та зовнішній вигляд процесу плазмово-дугового розпилення (б)

Обчислювана область (рис. 3.6) включає у себе циліндр діаметром $d = 600$ мм довжиною $L = 3000$ мм з подальшим переходом на конус. Моделювання сітки виконувалось у 2-D вісесиметричній постановці, розрахункова область дискретизована за допомогою 551375 шестигранних комірок, тривалість кроку - 10^{-4} с, кількість кроків – 1000.

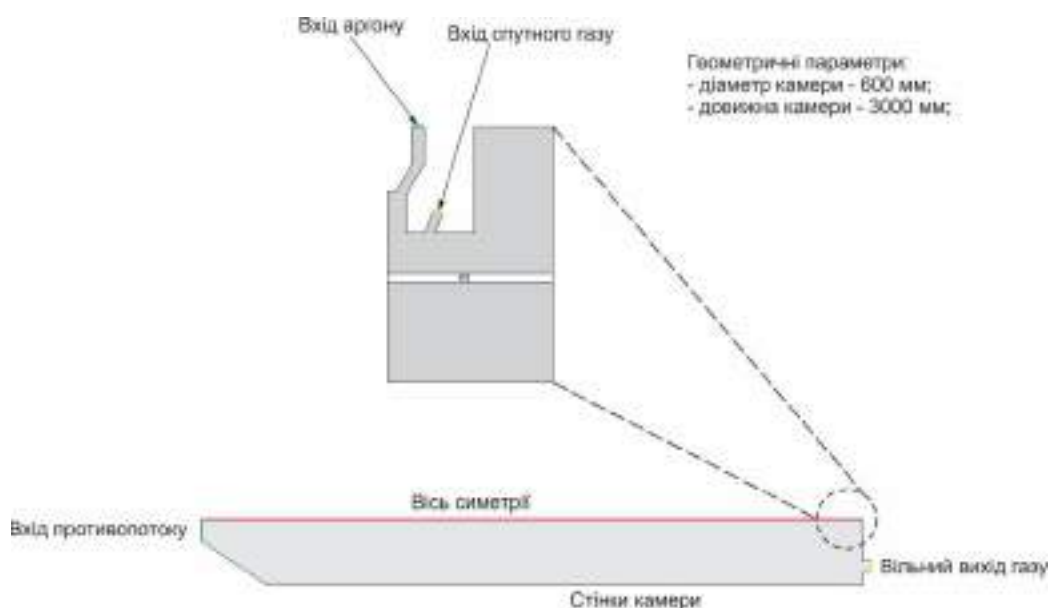


Рис. 3.6. Геометрія розрахункової області камери розпилення

Газодинамічні і магнітогідродинамічні модулі використовувалися разом для вирішення взаємодії між електромагнітним полем і газовим потоком. Крім того, метод визначеної користувачем функції використовується для вирішення додаткових рівнянь - інтерполяції термодинамічних та електричних властивостей газу та ін. Для опису явищ гравітації у сумарному балансі сил була врахована сила тяжіння – $9,81 \text{ м/с}^2$.

Для отримання надійного рішення системи газодинамічних рівнянь використовували модель $k - \epsilon$ з алгоритмом COUPLED. Для моделювання процесів вторинного дроблення крапель розплаву з торця дроту та розрахунку їх траєкторії переміщення, швидкісних і температурних параметрів використовували функцію DPM з механізмом розпаду крапель типу TAB. Параметрами дисперсної фази були:

- дисперсна фаза – сталь AISI 304;
- середній розмір крапель розплаву – 0,65 мм;
- щільність – 7850 кг/м^3 ;
- масова витрата 0,025 кг/с.

3.2 Вплив технологічних і конструктивних параметрів процесу плазово-дугового розпилення на гранулометричний склад і параметри сферичності гранул

Процес плазово-дугового розпилення характеризується великою кількістю технологічних та конструктивних параметрів, які дозволяють регулювати гранулометричний склад та параметри форми розпилюваних часток у широких межах [62-64]. Зміна цих параметрів впливає на швидкість та параметри форми часток, ступінь їх окислення, кількість перенесеного ними тепла, температуру виробу, міцність та щільність покриття і продуктивність процесу та ін.

3.2.1 Вплив параметрів процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту із застосуванням супутнього потоку газу на гранулометричний склад гранул

Вплив змінних параметрів розпилення досліджували в наступних межах (табл. 3.2): сила струму 220–280 А, витрата плазмоутворюючого газу 30–70 л/хв., витрата супутнього газу 36–60 м³/год., швидкість подачі дроту 9,5–12,5 м/хв., відстань катод-анод 8–12 мм, зазор між соплом та кільцевим електродом 1–3 мм та довжина заглиблення катоду 0–1 мм.

Таблиця 3.2. План експерименту з плазово-дугового розпилення модельного дроту ER70S-6 із низьковуглецевої сталі (d=1,6 мм)

Номер режиму	Змінний параметр	Сила струму, А	Напруга дуги, В	Витрата аргону, л/хв.	Витрата повітря, м ³ /год.	Відстань катод-анод, мм	Довжина заглиблення катоду, мм	Відстань між соплами, мм	Швидкість подачі дроту, м/хв.
1	Сила струму	220	75	40	48	8	0,5	2	10,5
2		235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
3		250	80	40	48	8	0,5	2	10,5
4		265	81	40	48	8	0,5	2	11,5
5		280	83	50	48	8	1,0	1	12,5
6	Витрата аргону	235	72	30	48	8	0,5	2	10,5
7		235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
8		235	78	50	48	8	0,5	2	10,5
9		235	82	60	48	8	0,5	2	10,5
10		235	87	70	48	8	0,5	2	10,5
11	Витрата повітря	235	69	40	36	8	0,5	2	10,5
12		235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
13		235	79	40	60	8	0,5	2	10,5
14	Відстань катод-анод	235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
15		235	82	40	48	10	0,5	2	10,5
16		235	93	40	48	12	0,5	2	10,5
17	Довжина заглиблення катоду	235	72	40	48	8	0	2	10,5
18		235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
19		235	77	40	48	8	1,0	2	10,5
20	Відстань між соплами	235	84	40	48	8	0,5	1	10,5
21		235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
22		235	69	40	48	8	0,5	3	10,5
23	Швидкість подачі дроту	235	76	40	48	8	0,5	2	9,5
24		235	76	40	48	8	0,5	2	10,5
225		235	76	40	48	8	0,5	2	11,5

Дріт розпилювали у посудину наповнену водою з дистанції 500 мм, час розпилення складав 200 с.

Дослідна перевірка розмірів диспергованих часток показала, що в загальному випадку, при розпиленні струмопровідних дротів основною фракцією є фракція 25-250 мкм, яка складає 95 % від загальної маси гранул,

кількість часток фракції <25 мкм та 250-315 мкм при оптимальних режимах розпилення знаходиться на досить низькому рівні і не перевищує 5 %.

Аналізуючи отримані дані (рис. 3.7), було встановлено, що збільшення сили струму від 235 до 250 А призводить до збільшення середнього розміру часток на 7 % з 138 до 147 мкм відповідно, а при струмі 220 А на 24 % з 138 до 171 мкм. При цьому в обох випадках доля часток із розмірами менше 100 мкм зменшується в інтервалі значень від 39 до 30 % від загальної маси гранул.

При візуальній оцінці процесу розпилення, можна було побачити, що плавлення дроту відбувається переважно в периферійній частині плазмового струменя.

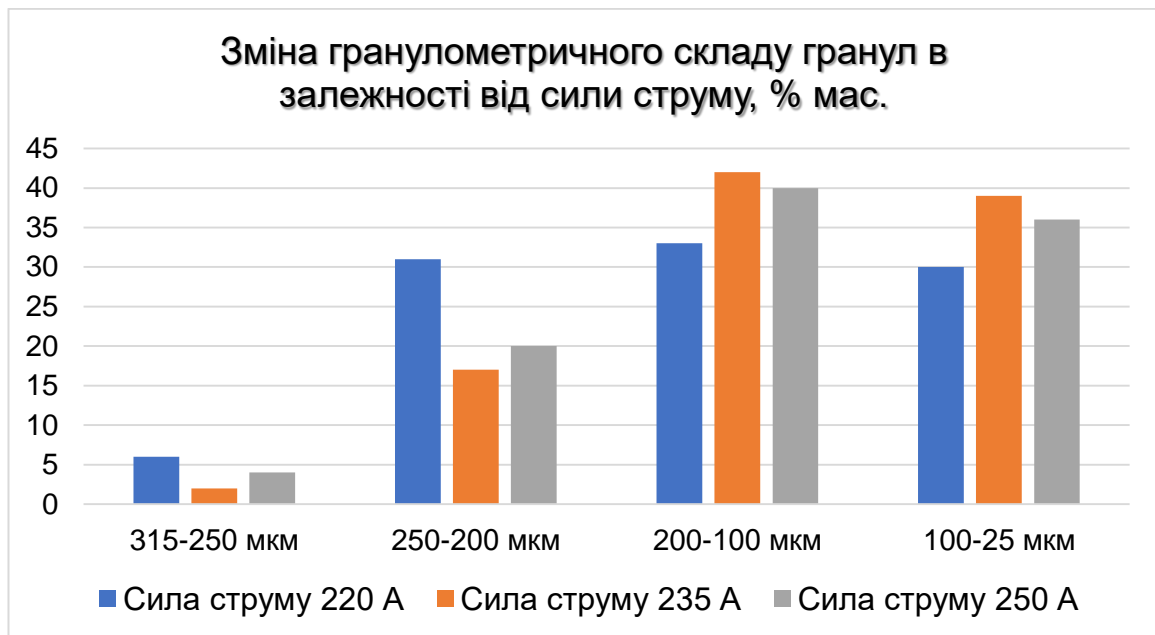


Рис. 3.7. Залежність гранулометричного складу гранул від сили струму

Цей самий ефект проявляється при збільшенні швидкості подачі дроту з 10,5 до 11,5 м/хв., що призводить до збільшення середнього розміру часток на 33 % з 138 до 184 мкм відповідно, а при швидкості подачі дроту 9,5 м/хв на 9 % з 138 до 151 мкм (рис. 3.8). При цьому в обох випадках доля часток із розмірами менше 100 мкм зменшується в інтервалі значень від 39 до 23 % від загальної маси гранул.

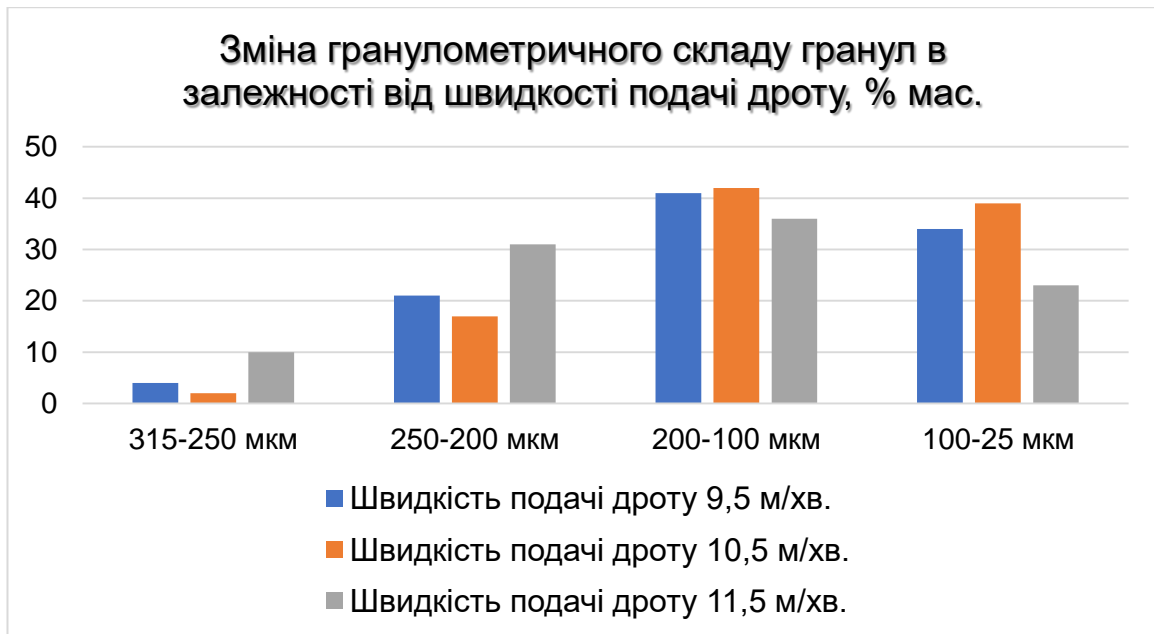


Рис. 3.8. Залежність гранулометричного складу гранул від швидкості подачі дроту

Автори [65,66] пояснюють зміну гранулометричного складу порошку у бік більш крупної фракції, тим що внаслідок зміни сили струму від певного оптимального значення плавлення дроту відбувається переважно в периферійній зоні струменя, де його газодинамічний натиск і ступінь концентрації енергії значно нижче ніж по осі - це створює передумови для крапельного переносу металу.

Для дослідження цього явища було виконано розпилення при збільшеній силі струму 265 А та швидкості подачі дроту 11,5 м/хв. Цей режим забезпечує розташування торця розпилюваного дроту по осі плазмового струменя, внаслідок цього відбувається зміна гранулометричного складу часток у бік меншої фракції, середній розмір порошку зменшується на 13 % з 138 до 120 мкм. При цьому доля часток із розмірами менше 100 мкм збільшується від 39 до 44 % від загальної маси гранул.

Це пояснюється тим, що підвищення ефективної теплової потужності плазмового струменя сприяє зміні характеру перенесення матеріалу електрода від крапельного до струменевого (за рахунок зменшення сили

поверхневого натягу при підвищенні температури перегріву рідкого металу), що значно підвищує вихід дрібної фракції порошку [67].

Збільшення відстані катод-анод з 8 до 10 мм призводить до того, що середній розмір часток збільшується на 11 % до 153 мкм (рис. 3.9). попри ріст напруги з 76 до 82 В. При збільшенні відстані до 12 мм відбувається подальший ріст напруги з 82 до 100 В, що призводить до збільшення потужності яка вкладається у дріт з 19 до 24 кВт, тобто на 22 %, проте, фракційний склад часток зсувається в сторону більш крупних фракцій, при цьому середній розмір часток збільшується на 34 % з 138 до 185 мкм. При збільшенні довжини дугового проміжку від 8 до 12 мм доля часток із розмірами менше 100 мкм зменшується в інтервалі значень з 39 до 24 % від загальної маси гранул.

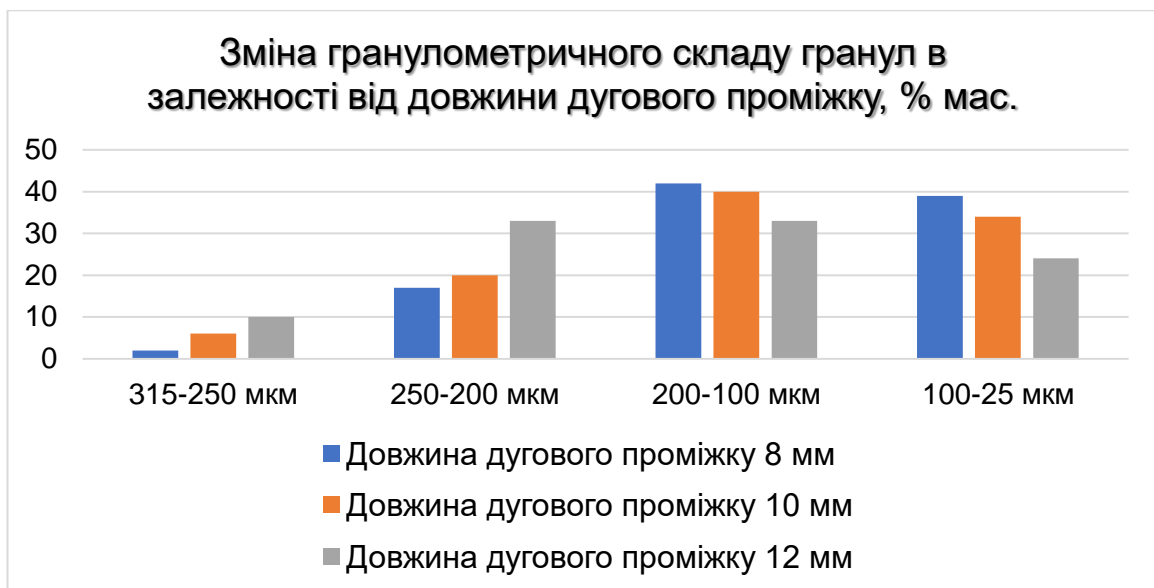


Рис. 3.9. Залежність гранулометричного складу гранул від довжини дугового проміжку (відстань катод-анод)

Це викликано зменшенням коефіцієнту нагріву аноду у зв'язку з зростаючою втратою теплової енергії плазмового струменя на випромінювання і конвекцію на ділянці дугового проміжку та зменшенням швидкості струменя, і як наслідок зменшенням його динамічного впливу на розпилюваний матеріал при збільшенні відстані від сопла плазмотрону [68,69].

Витрата плазмоутворюючого газу має більш складний вплив на процеси диспергування розплаву матеріалу дроту ніж інші вищеперелічені параметри. Так, наприклад, збільшення витрати з 30 до 40 л/хв. призводить до росту дисперсності розпилюваних часток, при цьому середній розмір гранул зменшується на 8 % з 150 до 138 мкм (рис. 3.10), подальше зміщення фракційного складу часток у бік більш дрібних фракцій відбувається при підвищенні витрати до 50 л/хв., так середній розмір часток зменшується на 4 % з 138 на 133 мкм. Проте подальший ріст витрати до 60 л/хв. призводить до отримання більш крупної фракції, середній розмір часток при цьому збільшується з 133 до 142 мкм. При збільшенні витрати плазмоутворюючого газу від 30 до 50 л/хв. доля часток із розмірами менше 100 мкм збільшується від 39 до 43 % від загальної маси гранул.

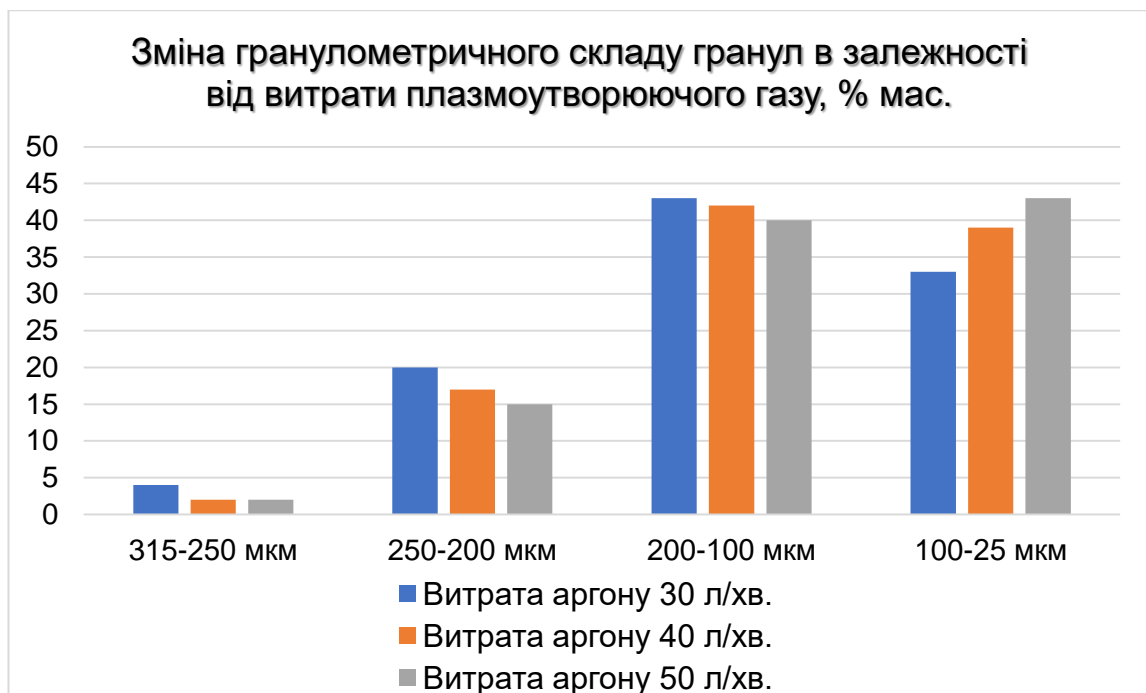


Рис. 3.10. Залежність гранулометричного складу гранул від витрати плазмоутворюючого газу

Збільшення витрати газу з 30 до 40 л/хв., а потім до 50 л/хв. сприяє зростанню напруги на дузі з 72 до 76 В і 80 В відповідно, унаслідок її витягування потоком газу, при цьому величина дугового проміжку залишається незмінною. Це призводить до росту теплової потужності і

ефективності нагріву дроту, дає змогу збільшити динамічний вплив струменя на торець дроту (табл. 3.3) і цим самим інтенсифікувати процес зриву крапель з торця дроту.

Таблиця 3.3. Дослідження напірного тиску плазмового струменя на дистанції розпилення 100 мм

№ експер.	Витрата плазм. газу, л/хв.	Площа плями розпилення, мм ²	Зусилля тиску, г	Напірний тиск σ , МПа
1	30	176	312	0,0177
2	40	181	356	0,0196
3	50	190	409	0,0215
4	70	212	514	0,0242

Проте, подальше підвищення витрати газу до 70 л/хв призводить до зсуву фракційного складу часток у сторону більш крупної фракції, при цьому середній розмір часток збільшується на 12 % з 138 до 154 мкм. При подальшому збільшенні витрати з 50 до 70 л/хв. доля часток із розмірами менше 100 мкм зменшується з 43 % до 36 % від загальної маси гранул.

Це може бути викликано «захолюванням» струменя унаслідок великих витрат тепла на нагрів збільшеної кількості плазмоутворюючого газу. Також слід зазначити що при витраті плазмоутворюючого газу менше 30 л/хв. має місце підвищений знос вольфрамового катоду.

Проведені теоретичні дослідження характеристик дозвукової турбулентної течії аргонової плазми, що генерується плазмотроном із плавким дротом-анодом, показало що доцільно використовувати супутній потік газу з витратами не менше ніж $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год.}$, в результаті чого плазмовий струмінь, що обдувається, значно довше зберігає свій імпульс та енергію і практично не змішується з супутнім газом [70-72].

Подальші експериментальні дослідження показали, що збільшення витрати супутнього потоку (повітря) з 36 до 48 м³/год. сприяє збільшенню

дисперсності розпилюваних часток (рис. 3.11), при цьому середній діаметр гранул зменшується на 21 % з 167 до 138 мкм. Збільшення витрати супутнього потоку з 48 до 60 м³/год. не викликає суттєвої зміни гранулометричного складу, середній діаметр часток зменшується на 6% з 138 до 129 мкм. При збільшенні витрати супутнього потоку від 36 до 60 м³/год. доля часток із розмірами менше 100 мкм збільшується з 32 до 41 % від загальної маси гранул.

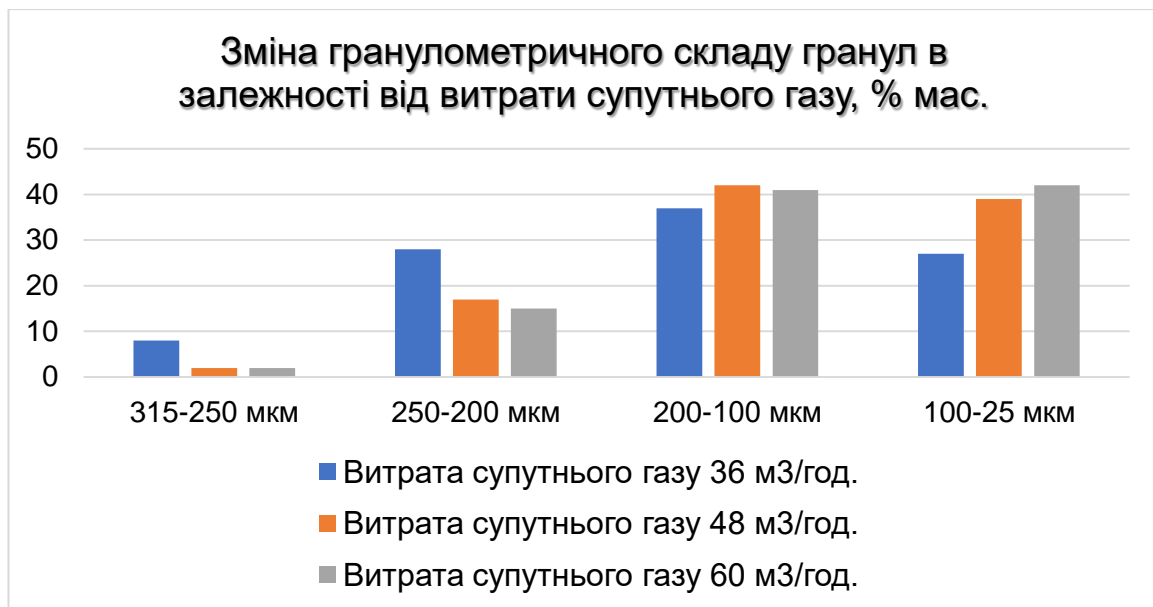


Рис. 3.11. Залежність гранулометричного складу гранул від витрати супутнього газу

Візуальна оцінка процесу розпилення дозволяє побачити, що в загальному випадку підвищення витрати супутнього газу викликає більш інтенсивне стиснення плазмового струменя, що вільно розширюється на виході з сопла, унаслідок чого підвищуються градієнти температур по осі плазмового струменя, протяжність та швидкість його витікання [70-72]. Проте збільшення витрати супутнього газу можливо до певних умов, що обумовлено конструкцією плазмотрону, а саме внутрішнім перетином системи отворів, через які проходить супутній газ. Слід зазначити, що при витраті менше 36 м³/год має місце зменшення в середньому на 30-40 % ресурсу роботи внутрішніх деталей плазмотрону таких як плазмоутворююче та захисне сопла.

Також, слід відмітити, що обдування турбулентного струменя аргонової плазми кільцевим ламінарним потоком холодного газу є одним із ключових параметрів, які мають найбільший вплив на дисперсність розпилюваних часток, так лише за рахунок збільшення витрати супутнього газу з 36 до 60 м³/год. можливо зменшити середній діаметр часток на 22 % з 167 до 129 мкм, при цьому доля часток із розмірами менше 100 мкм збільшується з 32 до 41 % мас.

З'ясовано, що окрім зменшення дисперсності розпилюваних часток збільшення витрати супутнього газу призводить до формування досить вузького відносно високошвидкісного та високотемпературного ядра течії, що у свою чергу сприяє отриманню оптимального швидкісних та температурних характеристик дисперсної фази. Так збільшення витрати супутнього газу від 0 до 40 м³/год. призводить до зменшення поруватості покриттів до 0,5-2,5 %, збільшення міцності зчеплення покриття у 2 рази з 35 МПа до 70 МПа (для сталі AISI 1070). Більш детально результати даних досліджень описані в роботі [71].

Також було розглянуто такі конструктивні параметри як зазор між внутрішнім та зовнішнім соплом через який проходить супутній газ який обтискає плазмовий струмінь та глибина заглиблення катоду (рис. 3.12).

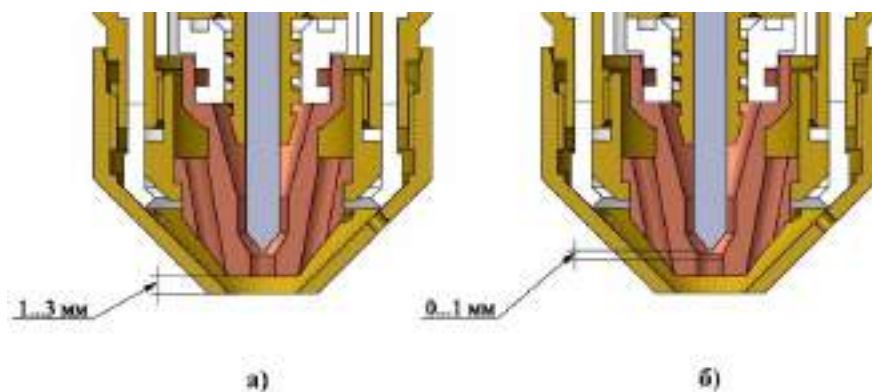


Рис. 3.12. Досліджувані конструктивні параметри плазмотрона: а – зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами; б – відстань заглиблення катоду відносно сопла

Так при збільшенні зазору між соплами з 3 до 2 мм відбувається зменшення фракційного складу часток у більш мілької фракції, середній діаметр часток зменшується на 18 % з 163 до 138 мкм, а при зазорі 1 мм на 15 % з 138 до 117 мкм (рис. 3.13). При цьому зменшення зазору між соплами з 3 до 1 мм дозволяє значно збільшити долю часток із розмірами менше 100 мкм, з 29 до 48 % від загальної маси гранул.

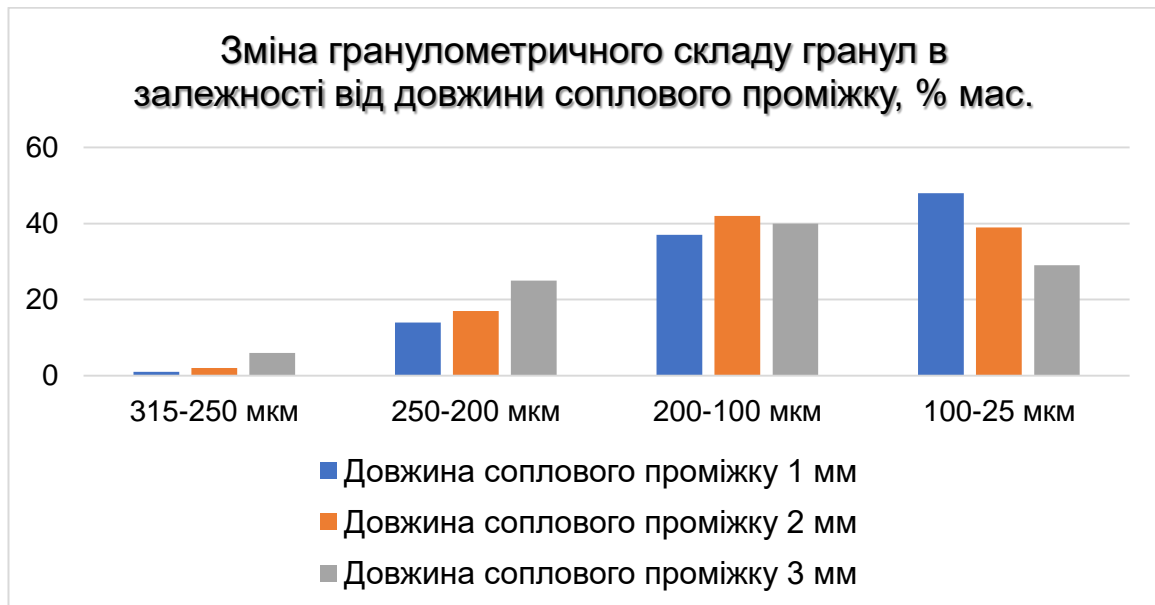


Рис. 3.13. Залежність гранулометричного складу гранул від довжини проміжку між плазмоутворюючим та обтискаючим соплом

Зміна зазору з 3 до 2 мм, а потім до 1 мм сприяє зростанню напруги на дузі з 69 до 76 В і 84 В відповідно. Це виникає унаслідок зміни кута взаємодії супутнього потоку та аргонової плазми, що призводить до більш інтенсивного локального обтиснення плазмового струменю у місці плавлення та зриву капель розплаву дроту. Це дозволяє значно підвищити швидкість струменя та інтенсивність диспергування, при цьому значно збільшується дисперсність розпилюваних часток. Проте, аналізуючи зовнішній вигляд розпилюваних часток можна побачити що, при зменшенні зазору з 3 до 1 мм, має місце збільшення ступеню турбулізації плазмового струменя, що виявляється у інтенсифікації процесу коагуляції крапель при їх зіткненні між собою.

Збільшення відстані заглиблення з 0 до 0,5 мм дещо збільшує дисперсність розпилюваних часток, середній розмір порошку при цьому

зменшується на 5 % з 145 до 138 мкм (рис. 3.14). Подальше збільшення цієї величини до 1,0 мм призводить до незначного зменшення розмірів часток у бік більш мілкої фракції, зміна середнього розміру порошку складає 2 %, тобто зменшення з 138 до 134 мкм. Але якщо розглядати зміну фракційного складу часток менше 100 мкм, то збільшення відстані заглиблення катоду в інтервалі значень від 0 до 1 мм дозволяє незначно підвищити долю цієї фракції з 39 до 41 % від загальної маси гранул.

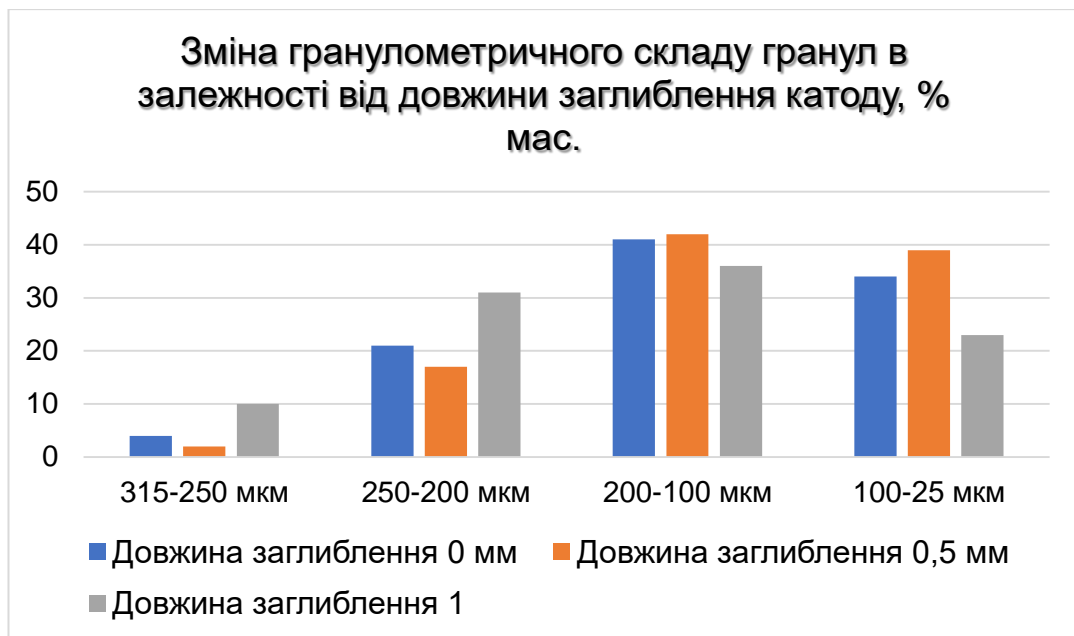


Рис. 3.14. Залежність гранулометричного складу гранул від довжини заглиблення катоду

Зміна довжини заглиблення з 0 до 0,5 мм, а потім до 1 мм сприяє зростанню напруги на дузі з 72 до 76 В і 77 В відповідно, унаслідок її витягування, це призводить до невеликого росту теплової потужності, також слід відзначити, що при цьому положення дроту відносно плазмоутворюючого сопла залишається незмінним, що дає змогу зберегти початковий динамічний вплив струменя на торець дроту. Проте подальше збільшення відстані заглиблення катоду погіршує умови стабілізації дуги у середині робочої камери плазмотрону та створює умови для подвійного дугоутворення.

Таким чином, показана можливість управління розмірами часток отриманого порошку в певному діапазоні значень гранулометричного складу

шляхом зміни основних технологічних параметрів плазмово-дугового розпилювання струмопровідного дроту. На прикладі розпилювання модельного струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі ER70S-6 діаметром 1,6 мм встановлено оптимальний режим, який буде забезпечувати максимальну долю (до 50-60 %) дрібних фракцій (<100 мкм), на які є значний попит в області адитивних технологій 3D друку. А саме: сила струму 280 А; швидкість подачі дроту 12,5 м/хв.; довжина дугового проміжку 8 мм; витрата плазмоутворюючого газу 50 л/хв.; витрата супутнього газу 48 м³/год.; зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплом 1 мм; довжина заглиблення катоду 1,0 мм.

Також виконано експеримент по впливу діаметру дроту на зміну гранулометричного складу гранул (рис. 3.15). На наступному режимі було виконано розпилення струмопровідного дроту із нержавіючої сталі AISI 304 діаметром 1,0 мм: сила струму 200 А; швидкість подачі дроту 12,5 м/хв.; довжина дугового проміжку 8 мм; витрата плазмоутворюючого газу 50 л/хв.; витрата супутнього газу 48 м³/год.; зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплом 2 мм; довжина заглиблення катоду 0,5 мм.

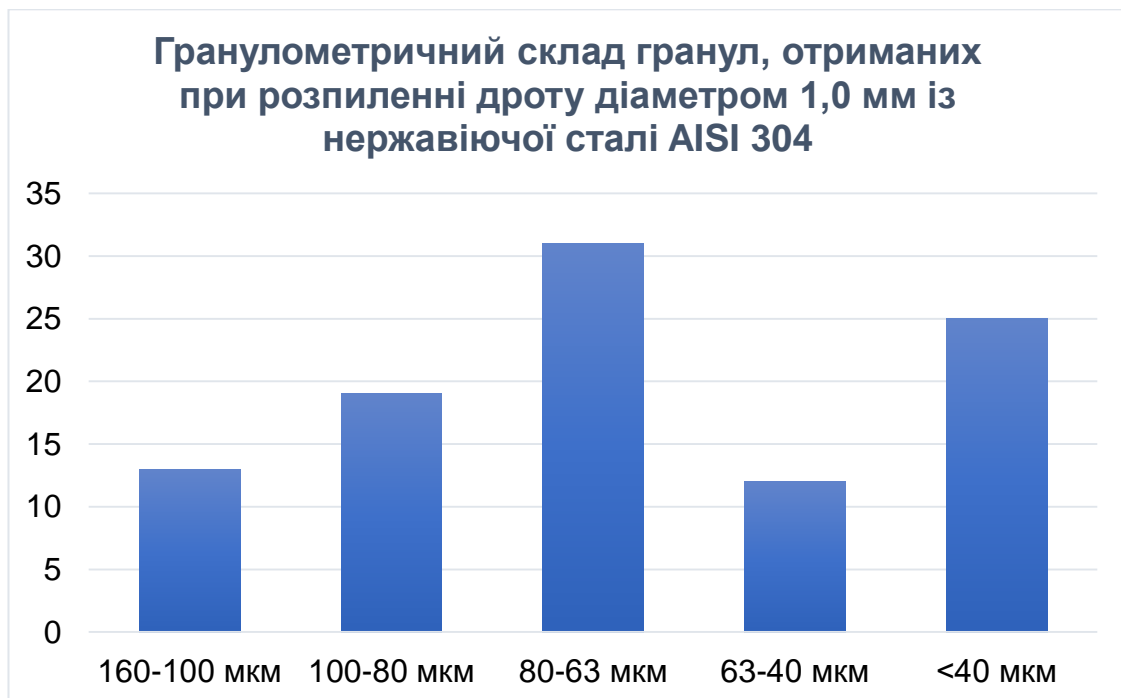


Рис. 3.15. Гранулометричний склад гранул при розпиленні струмопровідного дроту із нержавіючої сталі AISI 304 діаметром 1,0 мм

З'ясовано, що зменшення діаметру дроту сприяє значному зниженню розмірів розпилюваних часток та дозволяє отримувати сферичні гранули із середнім діаметром менше 70 мкм, при цьому у випадку застосування дроту діаметром 1,0 мм кількість фракції гранул <80 мкм досягає до 70 мас. %. Також слід відмітити, що такий ефект досягається при значно менших (до 30 %) значеннях струму 200 та 280 А відповідно, що може бути пов'язано зі зменшеними розмірами рідкого прошарку, що утворюється на торці дроту.

3.2.2 Вплив параметрів процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту із застосуванням супутнього потоку газу на параметри сферичності гранул

Вплив параметрів розпилення на розвиток процесів сферодизації гранул досліджували при зміні двох параметрів режиму: силі струму 150 – 290 А та швидкості подачі дроту 6,0 – 14,0 м/хв. Інші параметри залишались незмінними: витрата плазмоутворюючого газу 40 л/хв., витрата супутнього потоку 45 м³/год., відстань катод-анод 10 мм, зазор між соплом та кільцевим електродом 2 мм та довжина заглиблення катода 0,5 мм.

На лабораторному обладнанні на зазначених режимах було розпилено модельний струмопровідний дріт ER70S-6 діаметром 1,6 та виконані розрахунки теплофізичні характеристик гранул (табл. 3.4) згідно з методикою проведення експериментів наведеною у розділі 2.3.

Таблиця 3.4. Дані розрахунків теплофізичних характеристик гранул, розпилюваних у калориметр при різних параметрах процесу (силі струму)

Тип плазм. газу	Потужність плазм. дуги P, кВт	Зміна температури води у калорим. Δt , °C	Теплоємність часток h, кДж/кг
Режим 1 (150 А)	10,5	15,2	219,1
Режим 2 (180 А)	12,6	18,7	269,5
Режим 3 (210 А)	15,8	24,9	358,3
Режим 4 (240 А)	19,2	30,4	438,2
Режим 5 (290 А)	26,1	40,2	579,4

Аналіз результатів розрахунків показав, що підвищення сили струму з 150 до 290 А призводить до значного збільшення теплоємності часток, зібраних у калориметр майже у 2,6 рази з 219,1 до 579,4 кДж/кг. Це призводить до зменшення сили поверхневого натягу рідких крапель, у наслідок збільшення ступеня їх перегріву та зміни типу переносу електродного металу від крапельного до струминного. При цьому значно скорочується час накопичення крапель на торці розпилюваного дроту та збільшення швидкості їх переходу в плазмовий потік [73]. Аналіз гранулометричного складу отриманих гранул показав, що середній діаметр часток при підвищенні сили струму з 150 до 290 А змінюється в інтервалі значень від 201 до 119 мкм, тобто сприяє отриманню більш мілкодисперсної фракції.

Згідно з методикою, наведеною у розділі 2.6.1 було розраховано коефіцієнт сферичності для фракції гранул 20...100 мкм в залежності від режиму розпилення та побудовано наступні графічні залежності (рис. 3.16).

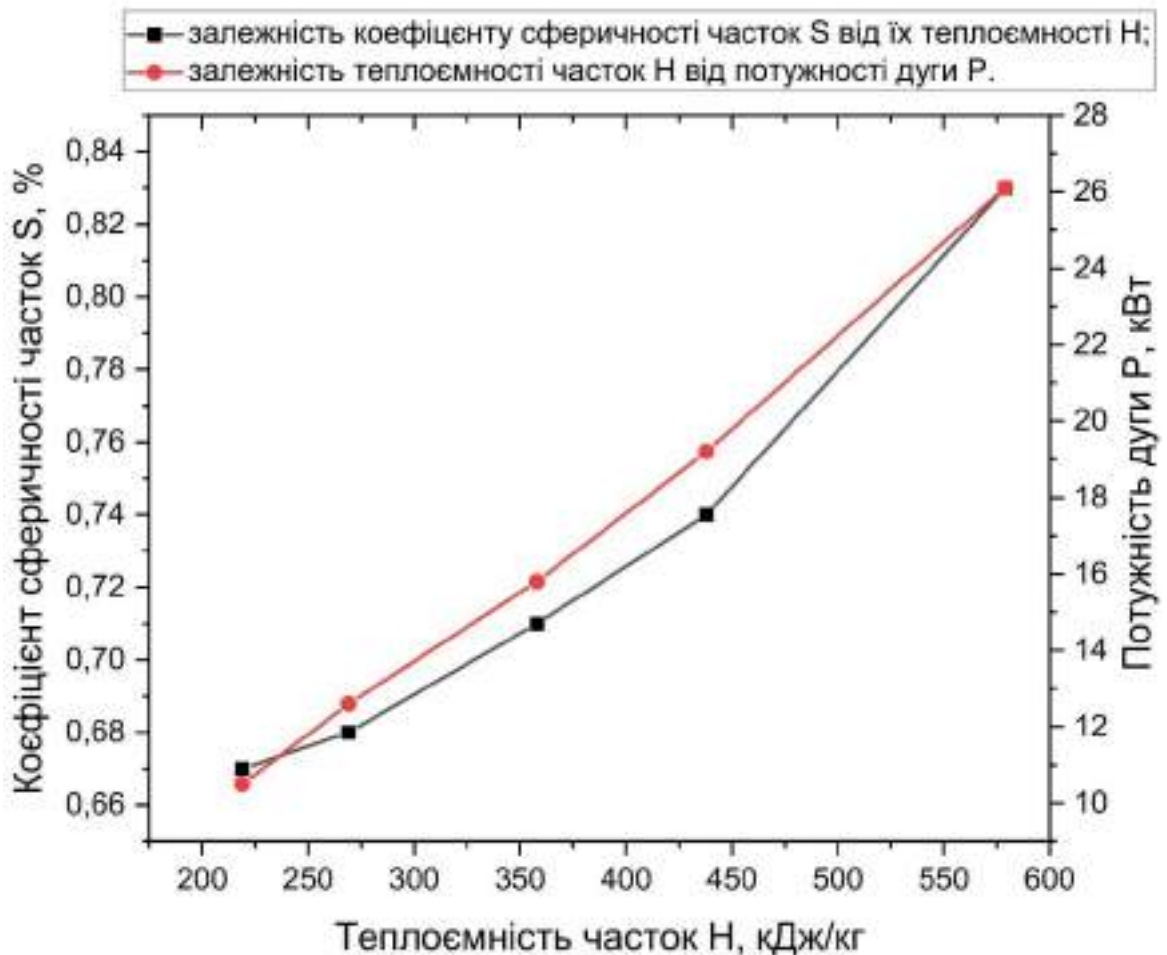


Рис. 3.16. Залежність теплоємності і коефіцієнту сферичності гранул від потужності плазмової дуги P

На рис. 3.16. можна побачити, що підвищення потужності дуги з 10,5 до 26,1 кВт (внаслідок збільшення сили струму) сприяє значному підвищенню коефіцієнту сферичності гранул фракції 20...100 мкм з $S = 0,67$ до 0,83.

Для пояснення цього явища слід звернутися до теорії іншого суміжного процесу газового розпилення розплаву, де час необхідний для сферодизації і твердіння гранулу $\tau_{сф}$ і $\tau_{ТВ}$ відповідно визначається за наступними формулами [74]:

$$\tau_{сф} = \frac{1,785\pi \cdot r_k \cdot \mu_{ж}}{\sigma_{ж}}, \quad (3.31)$$

де r_k – радіус частки після її твердіння, м; $\mu_{ж}$ – динамічна в'язкість розплаву Н·с/м²; $\sigma_{ж}$ – коефіцієнт поверхневого натягу металу Н/м.

$$\tau_{ТВ} = \frac{c_M \cdot \rho_p \cdot d_k}{6\alpha} \ln \frac{t_M - t_{\Gamma}}{t_{пл} - t_{\Gamma}}, \quad (3.32)$$

де c_M – питома теплоємність металу, Дж/°С; t_M – температура металу, °С; t_{Γ} – температура газу, °С; $t_{пл}$ – температура кристалізації металу, °С; α - коефіцієнт тепловіддачі для кінцевої краплі, Вт/м²·С.

З рівнянь можна побачити, що зміна типу переносу з крапельного на струминний при підвищенні сили струму з 150 до 290 А призводить до зменшення діаметру фрагментованих часток і сприяє зменшенню часу їх сферодизації. Також зі збільшенням ступеню перегріву розплаву на торці дроту (що характерно при збільшенні струмового навантаження) значно зменшується його динамічна в'язкість [75], тому можна очікувати значне скорочення часу, необхідного для прийняття краплею ідеально сферичної форми. Слід відзначити, що збільшення теплоємності часток призводить до збільшення часу їх твердіння або їх перебування у розплавленому або частково оплавленому стані – тобто також сприяє покращенню сферичності гранул.

Тому, підвищення потужності плазмової дуги з 10,5 до 26,1 кВт призводить до збільшення теплоємності часток майже у 2,6 рази з 219,1 до 579,4 кДж/кг, що у свою чергу інтенсифікує процеси сферодизації розпилюваних гранул.

3.2.3 Вплив типу плазмоутворюючого газу на гранулометричний склад і параметри сферичності гранул

Відомо, що для процесу плазмово-дугового розпилення притаманні механізми формування крапель рідкого металу, які характерні для процесу напівавтоматичного зварювання GMAW. Так, наприклад, тип плазмоутворюючого газу (захисного газу у випадку GMAW) значною мірою визначає тип перенесення електродного металу і відповідно розміри крапель металу [76].

Тому в процесі виконання роботи було досліджено вплив чистих плазموутворюючих газів – аргону Ar і гелію He та Ar-He сумішей на зміну гранулометричного складу та параметри сферичності часток, що утворюються в процесі плазмово-дугового розпилення.

З використанням цих газів було розпилено струмопровідний дріт із низьковуглецевої сталі ER70S-6 діаметром 1,6 мм на наступному режимі, а саме: силі струму 220 А; швидкості подачі дроту 10,5 м/хв; довжині дугового проміжку 8 мм; витраті плазموутворюючого газу 30 л/хв; витраті спутного газу 48 м³/год; зазорі між плазموутворюючим та обтискаючим соплом 2 мм; довжина заглиблення катоду 1 мм.

Дослідження гранулометричного складу продуктів розпилення показало, що середній розмір розпилюваних часток в He складає 144 мкм, в Ar 129 мкм, а їх суміші 50Ar-50He 121 мкм відповідно.

При цьому має місце зменшення долі крупної фракції 200...315 мкм з 13,5 та 15,0 % для Ar та He відповідно до 8,5 для їх суміші та збільшення кількості мілкодисперсної фракції 63...71 мкм з ≈ 15 % для Ar та He до 19,5 % для суміші 50Ar-50He (рис. 3.17).

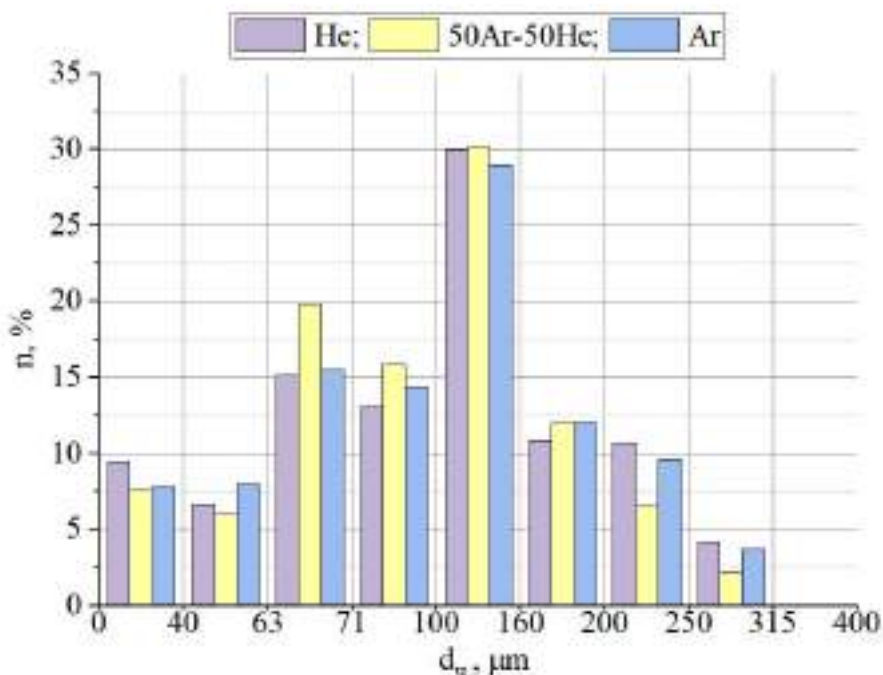


Рис. 3.17. Залежність зміни гранулометричного складу порошку від вибору типу плазموутворюючого газу

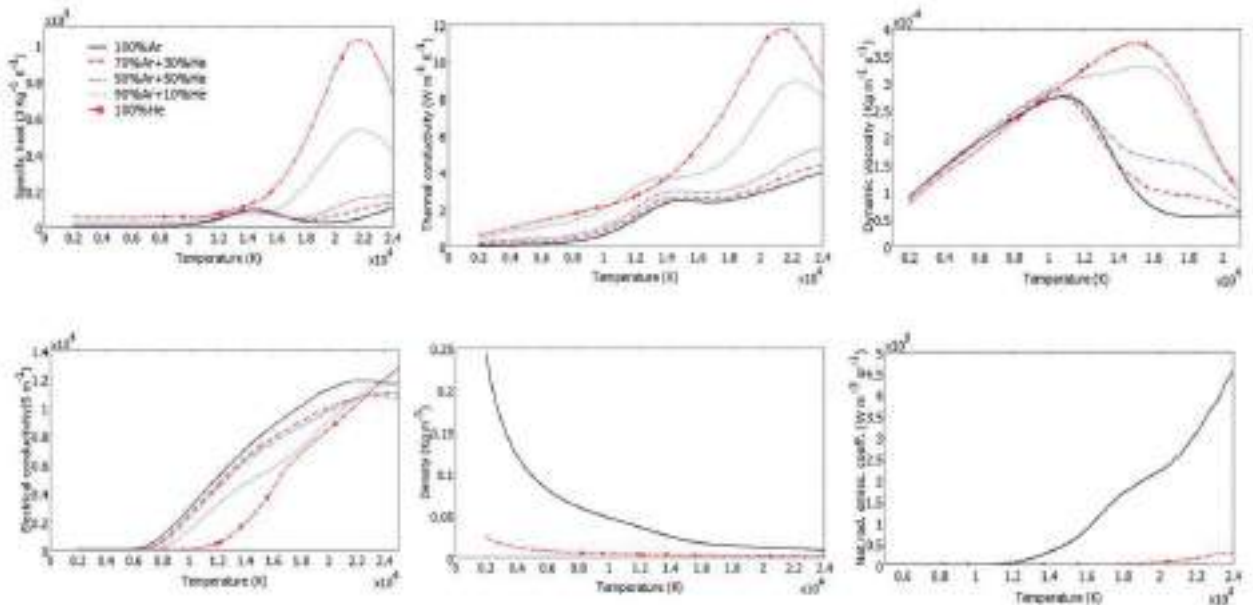


Рис. 3.18. Теплофізичні та транспортні властивості аргон-гелієвих сумішей залежно від температури [77]

Аналіз теоретичних досліджень [77] показав, що додавання гелію в аргон значно впливає на властивості дуги – збільшується як температура плазми, так і її швидкість по осі струменя, також має місце сильніше стискання дуги через меншу електропровідність гелію, збільшується тепловий потік і щільність струму на аноді, а також загальна енергія, що передається дроту.

Для аналізу цього явища було проведено дослідження теплоємності частинок розпилюваних у калориметр. Підставивши вихідні значення у формулу, отримали величину теплоємності частинок разом з плазмовим потоком на підльоті до дзеркала води калориметра (табл. 3.5).

Таблиця 3.5. Дані розрахунків теплофізичних характеристик гранул, розпилюваних у калориметр

Тип плазм. газу	Потужність плазм. дуги Р, кВт	Зміна температури у калорим. Δt , °C	Теплоємність часток h, кДж/кг
Ar	17,6	24,9	358,3
He	19,8	28,7	413,8
50Ar-50He	18,7	26,1	376,4

Аналіз отриманих даних показав, що збільшення вмісту гелію у складі плазмоутворюючої суміші призводить до збільшення потужності плазмової дуги при інших незмінних параметрах процесу (напруги U з 80 до 85 В у випадку суміші 50Ar-50He та до 90 В у випадку використання He) і як наслідок, призводить до підвищення теплоємності часток. Так найбільша теплоємність часток $h = 413,8$ кДж/кг була отримана при використанні чистого He.

Збільшення долі крупної фракції при розпиленні у He, може бути пов'язано зі зміною типу переносу зі струминного на крупнокрапельних т.н. «глобулярний» [78]. Також, аналізуючи зовнішній вигляд торців дроту (рис. 3.19) після різкого обрива дуги можна побачити, що при зміні плазмоутворюючого газу з Ar на He у 1,7 рази зростає довжина оплавленої ділянки дроту, що призвело до того що плавлення дроту частково змістилось у периферійну зону плазмового струменя та потребувало подальшого коригування швидкості подачі дроту.

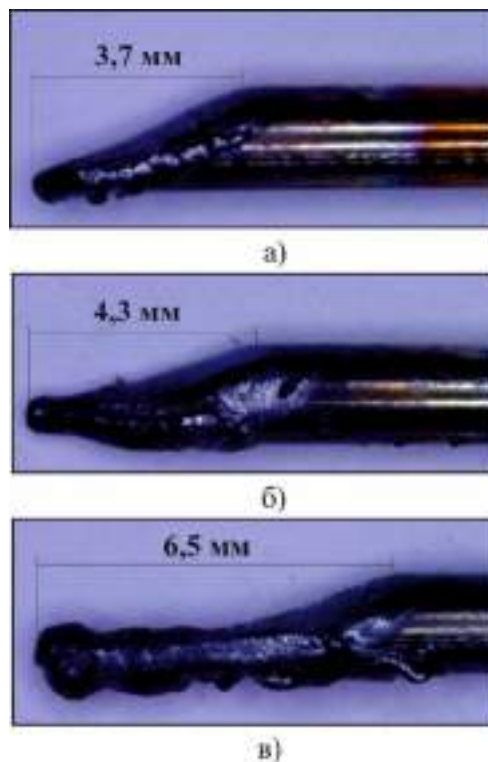


Рис. 3.19. Зовнішній вигляд оплавленого торцю дроту при різкому обриві дуги в залежності від типу плазмоутворюючих газів, де: а – Ar; б - 50Ar-50He; в - He

Дослідження коефіцієнту сферичності часток (рис. 3.20) показали, що збільшення теплоємності часток за рахунок додавання гелію до плазмоутворюючої суміші сприятливо впливає на покращення сферичності часток, при цьому сферичність часток збільшується з 0,73 до 0,83 при використанні 100 % гелію у якості плазмоутворюючого газу.

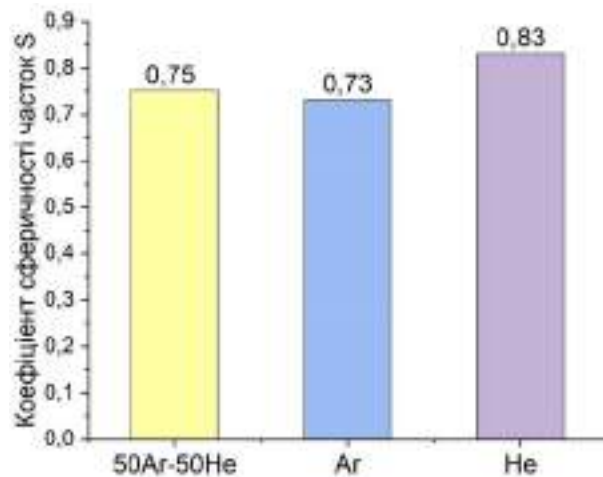


Рис. 3.20. Залежність параметрів сферичності розпилюваних часток фракції 20...100 мкм від типу плазмоутворюючого газу

Зовнішній вигляд розпилюваних часток наведено на рис. 3.21.

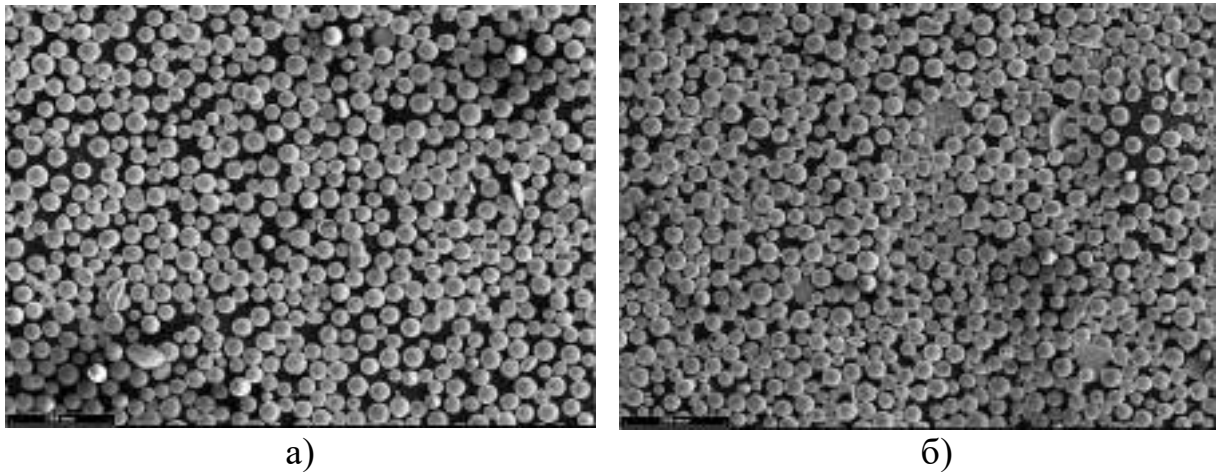


Рис. 3.21. Морфологія гранул фракції 20-100 мкм, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення компактного дроту ER70S-6 при використанні у якості плазмоутворюючого газу аргону (а) та гелію (б)

3.2.4 Вплив типу атмосфери на гранулометричний склад і параметри сферичності гранул

Слід зазначити, що при плазмово-дуговому розпиленні навіть інертний плазмоутворюючий газ не створює повністю захисну атмосферу на всій траєкторії польоту частинок, які знаходяться в частково або повністю розплавленому стані та інтенсивно взаємодіють з газами плазмового струменя та навколишньої атмосфери вже на відстані 20...80 мм від зрізу сопла, тому їх властивості сильно відрізняються від властивостей вихідного матеріалу [79].

В процесі виконання роботи було досліджено вплив типу атмосфери – аргонної (інертної), водяної та повітряної (окиснювальної) на зміну гранулометричного складу та параметри сферичності часток, що утворюються в процесі плазмово-дугового розпилення.

У цих середовищах було розпилено струмопровідний дріт із нержавіючої сталі ER 304 діаметром 1,6 мм на наступному режимі, а саме: силі струму 215 А; швидкості подачі дроту 10,5 м/хв; довжині дугового проміжку 8 мм; витраті плазмоутворюючого газу 40 л/хв; витраті спутного газу 40 м³/год; зазорі між плазмоутворюючим та обтискаючим соплом 2 мм; довжині заглиблення катоду 1 мм.

Дослідження гранулометричного складу продуктів розпилення показало (рис. 3.22), що середній розмір розпилюваних часток при розпиленні у атмосфері аргону складає 131 мкм, що практично не відрізняється від результатів розпилення у атмосфері повітря зі значеннями 126 мкм відповідно.

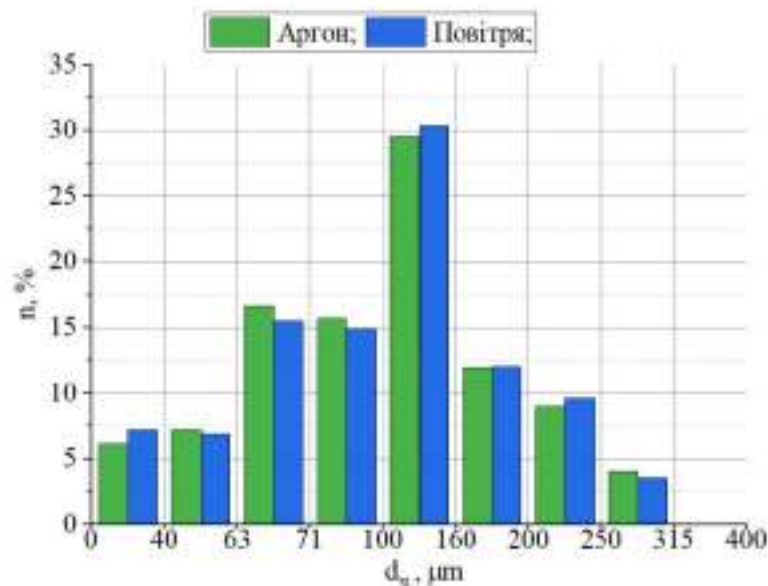


Рис. 3.22. Залежність зміни гранулометричного складу гранул від типу атмосфери

Дослідження коефіцієнту сферичності часток показали, що частки при розпиленні у повітряну атмосферу інтенсивно окислюються у наслідок інтенсивної хімічної взаємодії з киснем та азотом, що входять до складу повітря. При цьому на поверхні часток утворюється щілька окисна пліка (рис. 3.23, б), яка призводить до утворення форми частки неправильної форми з параметром сферичності $S = 0,63$ (рис. 3.24). Схоже явище має місце при розпиленні іншого хімічно активного металу – алюмінію. Автори [80] пояснюють це тим, що на поверхні часток в процесі їх сферодизації та твердіння утворюється щільний оксидний шар, який призводить до зменшення сили поверхневого натягу розплавленого металу і сприяє формуванню часток неправильної форми. Також слід зауважити, що явища окислення можуть ще більше посилюватись (при розпиленні таких активних металів, як титан) або зменшуватися (напр. у випадку розпилення нікелевого чи мідного дроту).

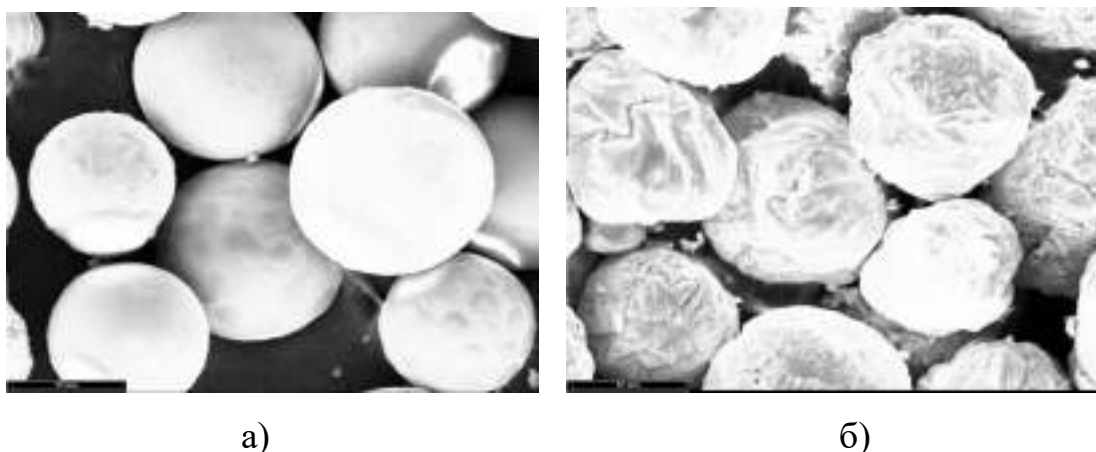


Рис. 3.23. Морфологія порошку фракції 20-100 мкм, отриманого за технологією плазмово-дугового розпилення компактного дроту ER304 при розпиленні у атмосфері аргону (а) та на повітрі (б)

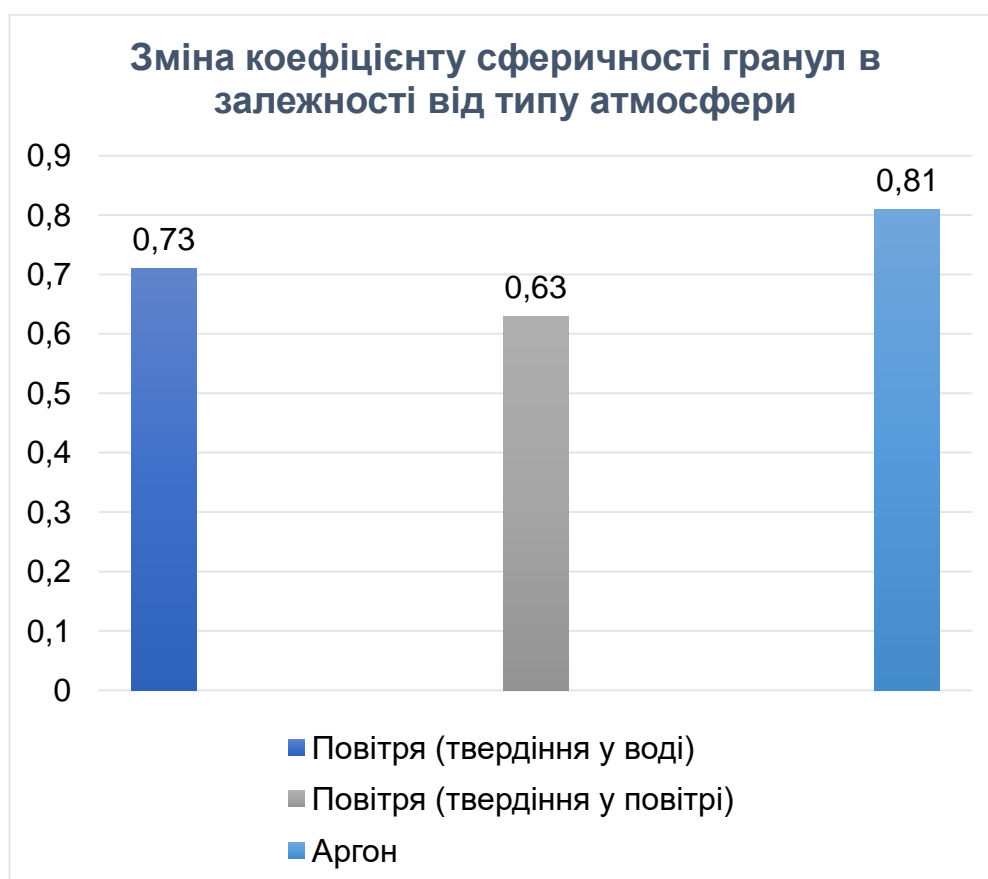


Рис. 3.24. Залежність параметрів сферичності розпилюваних часток фракції 20...100 мкм від типу атмосфери

При розпиленні дроту у атмосфері аргону сферодизувалися частки загалом правильної форми з параметром сферичності $S = 0,81$. Сферодизація часток при розпиленні дроту у воду з дистанції ≈ 500 мм, дає кращі

результати ($S = 0,72$) ніж розпилення у повітряній атмосфері. Це викликано, тим що раптова кристалізація розплавлених часток з невеликої дистанції призводить до їх менш інтенсивної взаємодії з навколишнім середовищем, і як наслідок меншим ступенем їх окислення. Проте цієї дистанції не зовсім достатньо, для того, щоб перегріті частки сферодизувалися під дією сили поверхневого натягу та прийняли форму максимально наближену до ідеально сферичної. Тому, якщо розглядати процеси твердіння та сферодизації порошоків з точки зору якісних параметрів, то сферодизація у воду ($S = 0,71$) займає проміжне положення між сферодизацією у повітряному та аргоновому середовищу, де коефіцієнти сферичності складають $S = 0,63$ та $S = 0,81$ відповідно.

3.3 Аналіз процесів твердіння гранул в процесі плазмово-дугової сферодизації струмопровідних дротів

Крапля, що утворилася на торці дроту, продовжує рух у плазмовому струмені. Вона має початкову температуру та швидкість. На даному етапі плазмовий струмінь характеризується температурними та швидкісними полями. Під час знаходження краплі в потоці плазми відбувається процес їхнього теплообміну та прискорення частки. В процесі плазмово-дугового розпилення, крапля після відриву може мати швидкість до 70 м/с та температуру, що знаходиться в межах від температури плавлення до температури кипіння. Мета розділу: простежити динаміку руху та теплообмін частинок у плазмовому струмені та з оточуючим середовищем. Аналіз процесів теплообміну та руху частинок у плазмі проводився на основі результатів, отриманих при моделюванні згідно методикою, наведеною у розділі 3.1. Прийнято, що після відриву краплі від дроту вона має сферичну

форму. Після плазмового струменя починається ділянка вільного руху частинок у навколишньому середовищі.

На рис. 3.25 показано результати моделювання температурних та швидкісних характеристик плазмового струменя на виході з сопла плазмотрону.

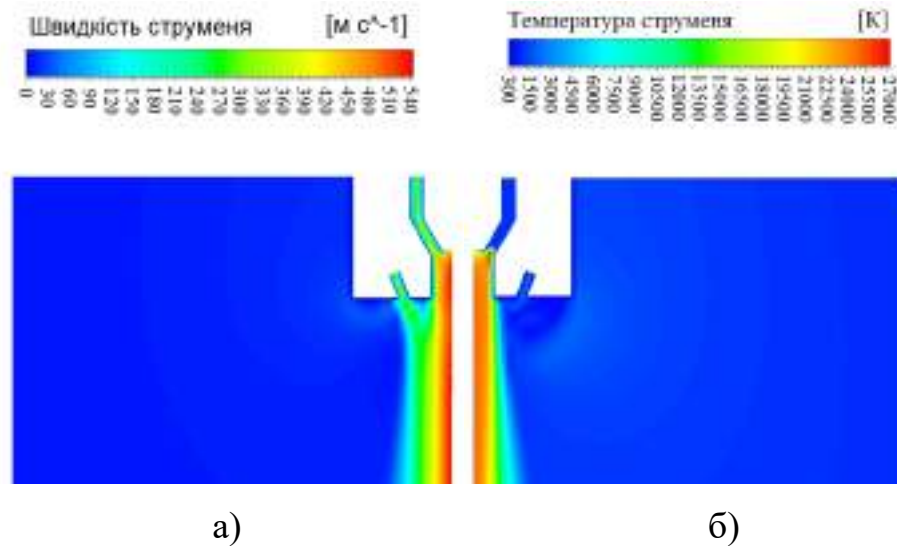


Рис. 3.25. Розподіл швидкостей (а) та температур (б) плазмового струменя на виході з плазмоутворюючого сопла плазмотрону

В цій області значення швидкості та температури струменя досягають найвищих значень – 530-460 м/с та 27000-21500 °К відповідно. Це призводить до того, що частки, які утворюються при плавленні торця дроту у цій зоні зазнають вторинного дроблення під дією значного газодинамічного впливу плазмового струменя і починають інтенсивно прискорюватися за рахунок опору між часткою та плазмою, та набирають максимальну швидкість від 0 до 63 м/с в залежності від їх розміру (рис. 3.27). На основі моделювання, з'ясовано що протяжність цієї високошвидкісної та високотемпературної зони складає 150 мм.

Наступна зона (≥ 150 мм від сопла плазмотрону) характеризується інерційним характером руху плазмового струменя. В цій зоні спостерігається поступове зменшення аксіальних градієнтів газодинамічних і теплових характеристик плазмового потоку до мінімальних значень (рис. 3.26), що призводить до поступового зменшення швидкості часток.

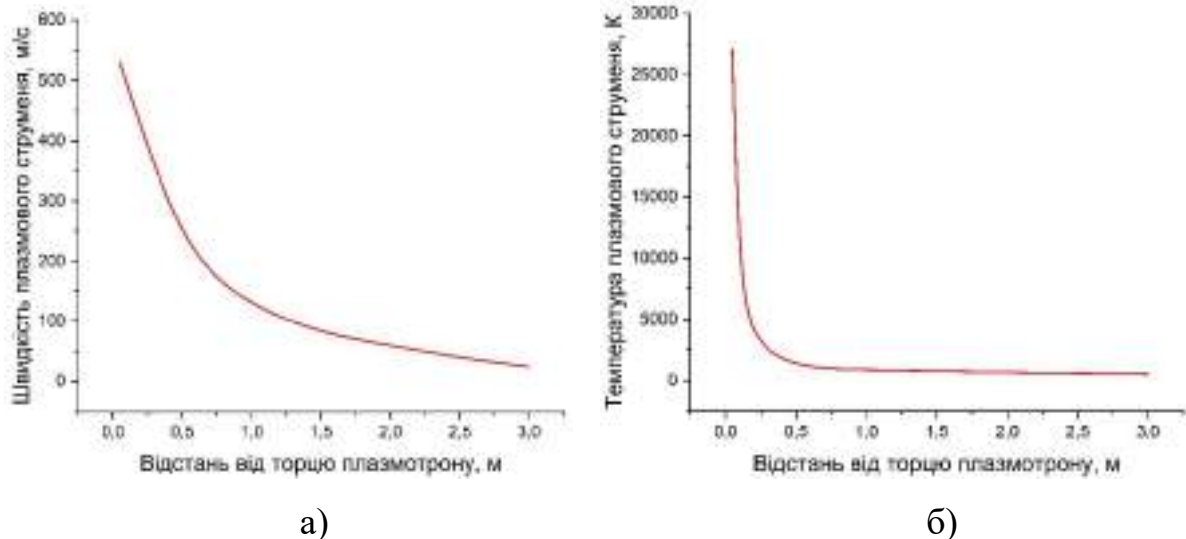


Рис. 3.26. Графіки розподілу швидкостей (а) та температур (б) плазмового струменя по довжині камери розпилення

На виході з високошвидкісної зони (рис. 3.26 а, $Z_1 < Z_2 \leq 150$ мм) частки мають швидкість від 45 до 63 м/с (рис. 3.27), де на них діє виключно сила аеродинамічного опору та сила тяжіння, тому розміри часток значною мірою визначають швидкість їх руху та охолодження.

Експериментальні дослідження процесів диспергування дроту при плазово-дуговому розпиленні показали, що розміри часток, які утворюються унаслідок вторинного розпаду (дроблення) крапель розплаву з торця дроту можуть складати 25-500 мкм. Для даного інтервалу розмірів часток було проведено дослідження впливу їх розмірів на процеси їх гальмування та охолодження в процесі руху в плазовому струмені та .

З'ясовано, що частинки з меншою швидкістю та більшою масою прискорюються до моменту рівноваги сил, а частинки, що мають велику швидкість і мінімальний розмір, гальмуються під впливом опору середовища. Так на рис. 3.27 видно, що частки розміром 400...500 мкм, які на початку мали швидкість на рівні 45 м/с не істотно її втрачають в процесі вільного польоту та на виході з камери мають швидкість 27 м/с, в той час як для часток з розмірами 25...100 мкм падіння швидкості є істотним - з 63 до 7 м/с.

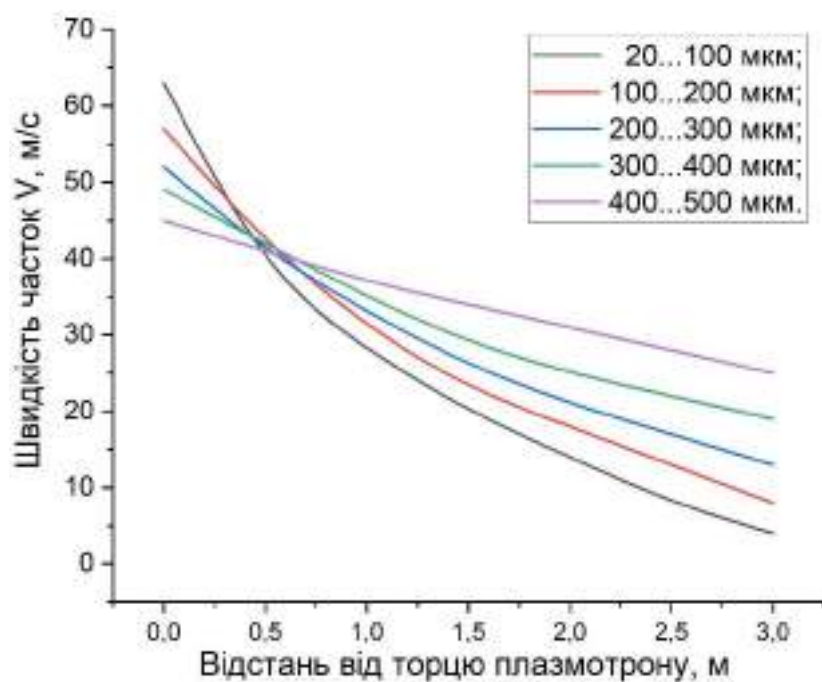


Рис. 3.27. Графік залежності зміни швидкості часток V від відстані від торцю плазмотрону

Аналізуючи графіки залежності температури часток від їх розмірів (рис. 3.28 можна побачити, що частки більших розмірів охолоджуються повільніше часток менших розмірів.

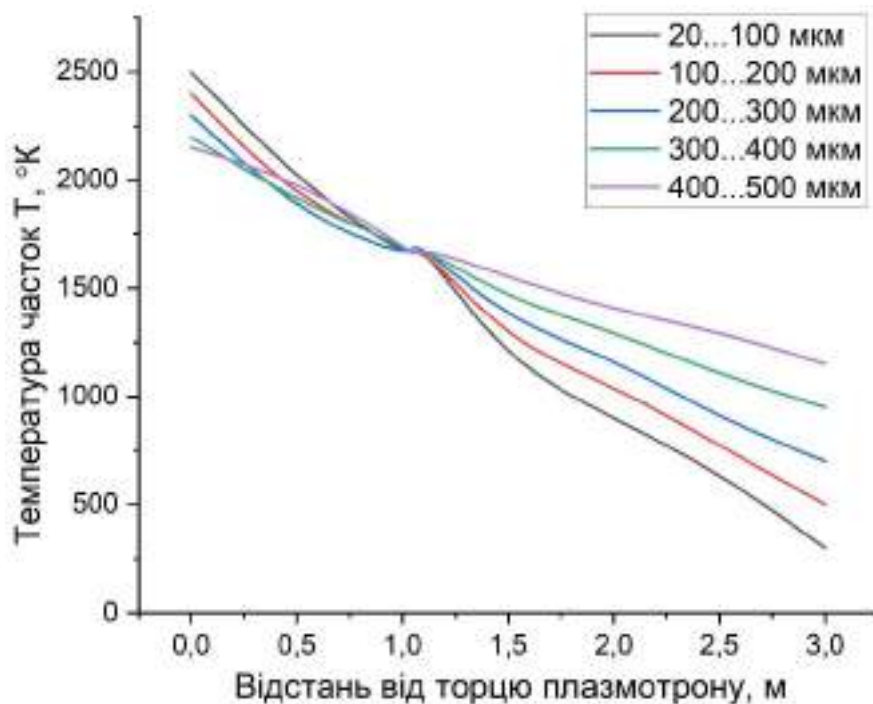


Рис. 3.28. Графік залежності зміни температури часток T від відстані від торцю плазмотрону

Так частки розмірами 400...500 мкм на виході з камери розпилення мають температуру на рівні 1275 °К. Зменшення діаметра часток призводить до збільшення швидкості їх охолодження, що призводить до зменшення їх температури на виході з камери розпилення, так частки 25...100 мкм на виході з камери розпилення мають температуру на рівні 375 °К.

Таким чином, максимальну швидкість та температуру на виході з камери розпилення отримують не ті частки, які мали найбільшу початкову швидкість та температуру, а ті частки які мали більший розмір та масу.

3.4. Особливості диспергування дротів різного хімічного складу

З метою з'ясування особливостей диспергування дротових матеріалів різного хімічного складу (згідно п. 2.2.) було виконано їх плазмово-дугове розпилення та досліджено гранулометричний склад отриманих гранул згідно з методикою, описаною в 2.3. Зовнішній вид частинок наведено на рис. 3.21, 3.23, 3.29-30. Режими процесу розпилення проволочки наведено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Режими розпилення струмопровідних дротів різного хімічного складу

Номер режиму	Марка дроту	Сила струму, А	Напруга дуги, В	Витрата аргону, л/хв.	Витрата повітря, м ³ /год.	Швидкість подачі дроту, м/хв.
1	мідь ERCu	170	69	40	48	12,5
2	нержавіюча сталь ER304		71			9,5
3	нікелевий сплав ERNiCr-3		76			10,5
4	титан ERTi-2		70			9,0
5	алюмінієвий сплав ER5556		67			15,5

Параметри режиму підбирали таким чином, щоб забезпечити стабільне розпилення матеріалу дроту по осі плазмового струменя з мінімальним кутом його розкриття при однаковій потужності плазмової дуги (змінювали швидкість подачі дроту для кожного матеріалу, параметри струму залишалися незмінними). Це дало змогу оцінити вплив теплофізичних і фізико-хімічних характеристик (табл. 3.7) розпилюваних матеріалів на процесі диспергування (рис. 3.31-3.35).

Таблиця 3.7. Теплофізичні та фізико-механічні характеристики розпилюваних матеріалів [81-86]

Матеріал	Щільність ρ , кг/м ³	Температура плавлення $T_{пл}$, К	Теплота плавлення $C \cdot 10^5$, Дж/кг	Питома теплоємність $c_p \cdot 10^3$, Дж/(кг·К)	Сила поверхневого натягу σ , Н/м
Fe	7860	1811	2,48	0,45	1,75
Cu	8920	1353	2,06	0,38	1,28
Al	2710	933	4,01	0,91	0,75
NiCr	8400	1673	2,87	0,44	1,33
Ti	4500	1941	3,59	0,52	1,53

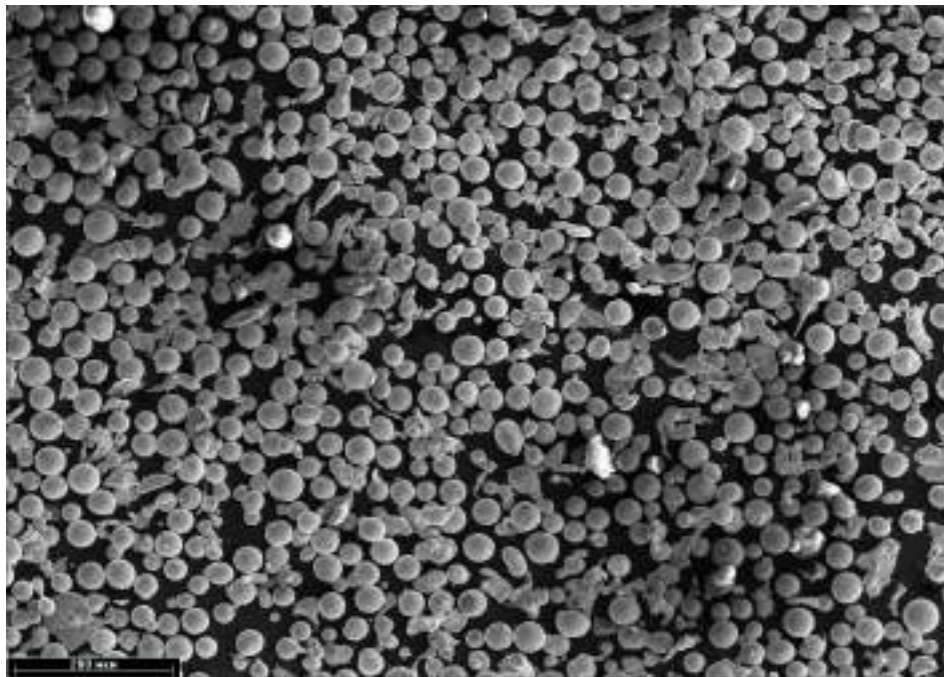


Рис. 3.29. Морфологія гранул фракції 20-100 мкм, отриманих за технологією плазмово-дугового розпилення компактного мідного дроту ERCu

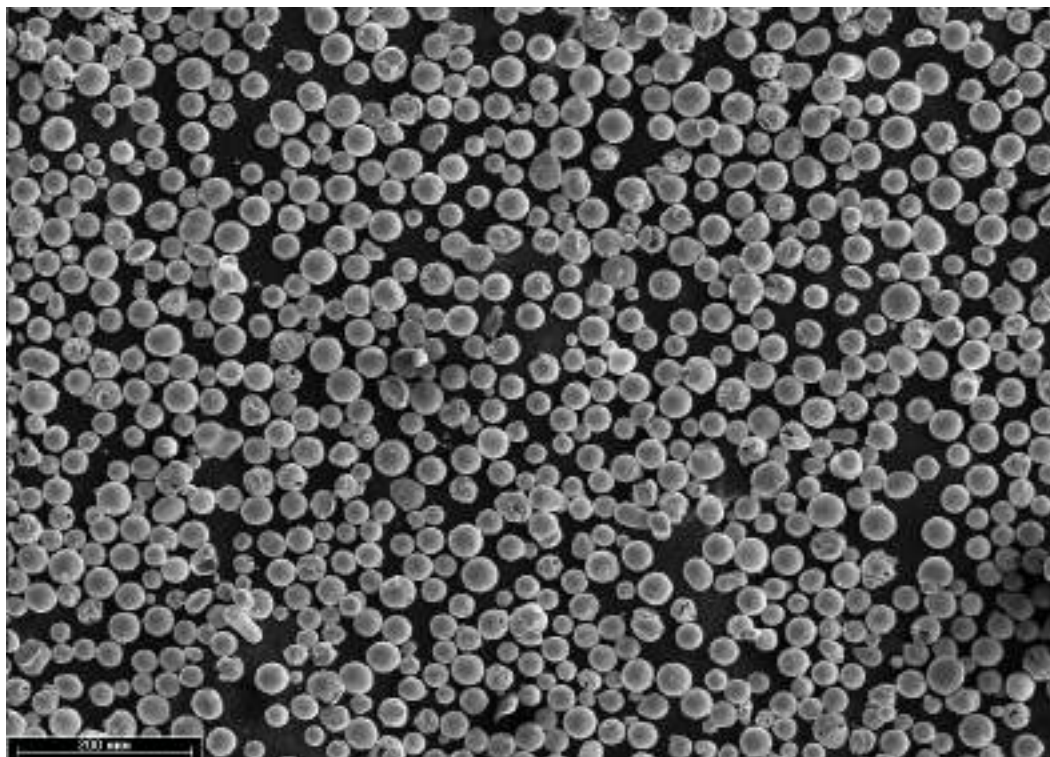


Рис. 3.30. Морфологія гранул фракції 20-100 мкм, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення компактного титанового дроту ERTi-2

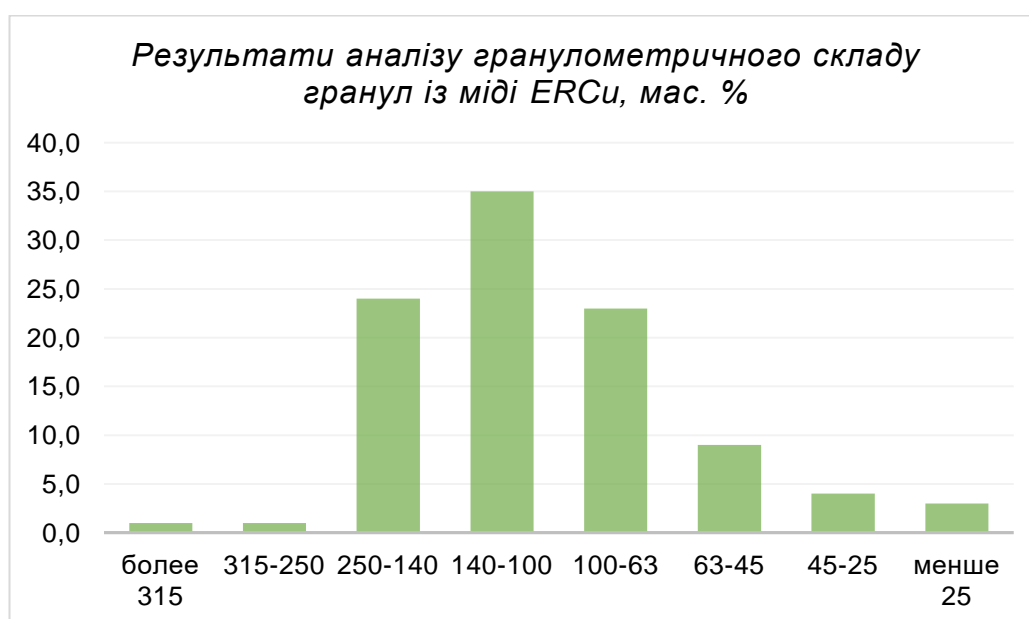


Рис. 3.31. Гранулометричний склад гранул, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення компактного мідного дроту ERCu

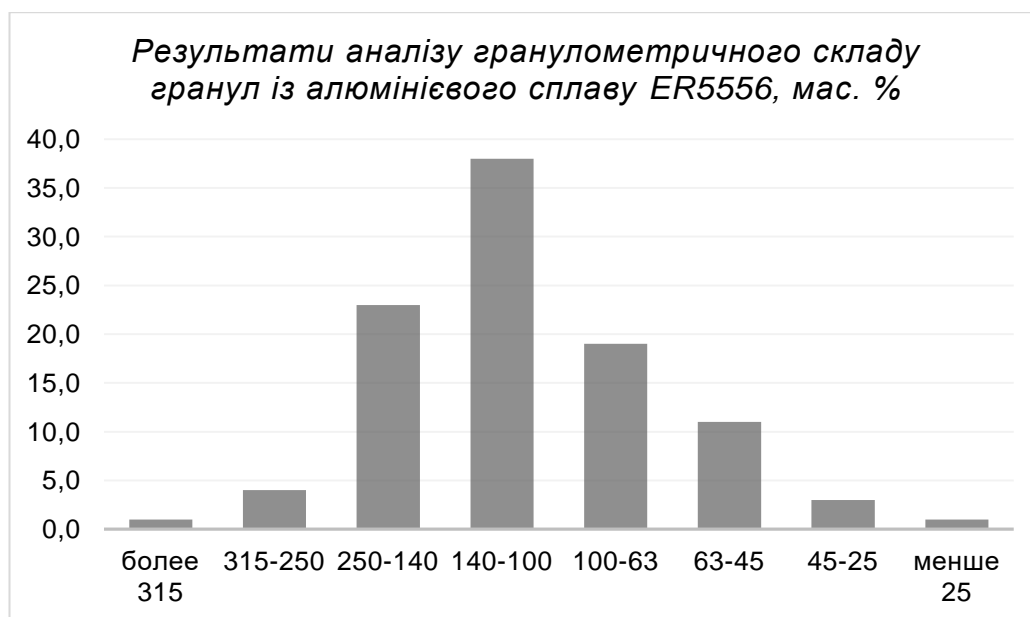


Рис. 3.32. Гранулометричний склад гранул, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення компактного дроту з алюмінієвого сплаву ER5556

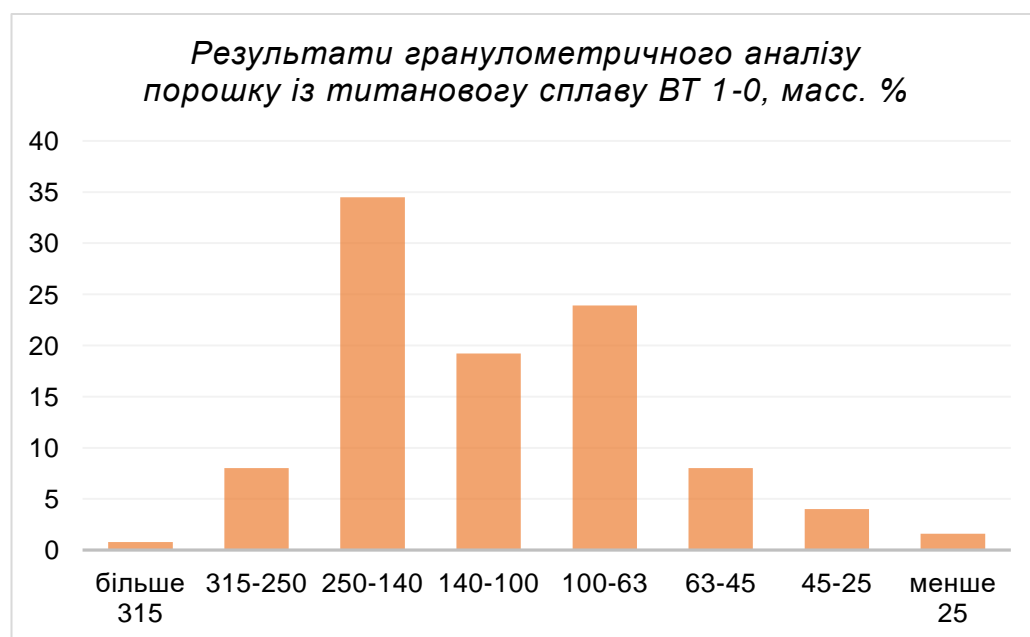


Рис. 3.33. Гранулометричний склад гранул, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення компактного титанового дроту ERTi-2

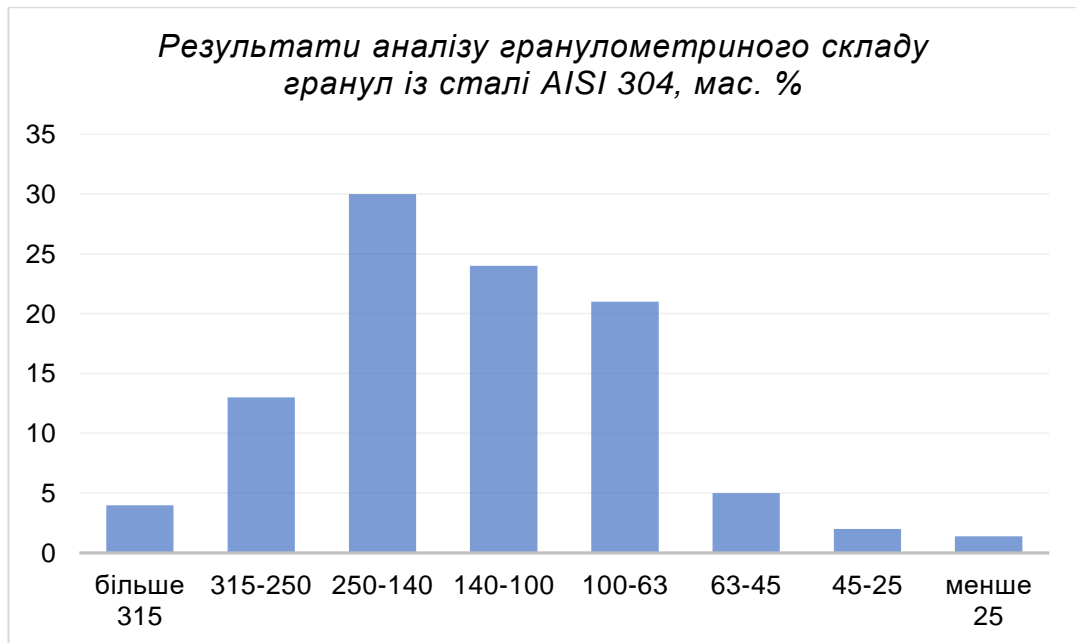


Рис. 3.34. Гранулометричний склад гранул, отриманих за технологією плазмово-дугового розпилення компактного сталевго дроту ER304

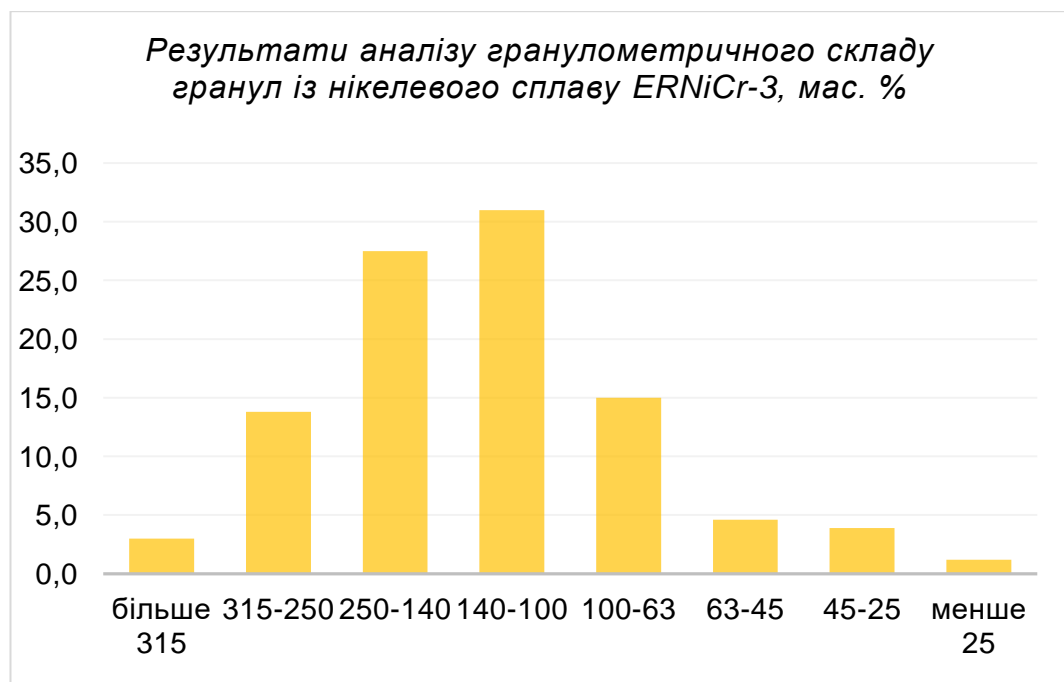


Рис. 3.35. Гранулометричний склад гранул, отриманих за технологією плазмово-дугового розпилення компактного дроту з нікелевого сплаву ERNiCr-3

Було розраховано середній діаметр розпилюваних гранул, результати розрахунків наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7. Дані розрахунків середнього діаметру гранул, отриманих при розпиленні дротів різного хімічного складу

№	Марка дроту	Потужність дуги, кВт	Середній діаметр гранул, мкм
1	мідь ERCu	11,7	121
2	нержавіюча сталь ER304	12,0	152
3	нікелевий сплав ERNiCr-3	12,9	154
4	титан ERTi-2	11,9	161
5	алюмінієвий сплав ER5556	11,4	125

Аналіз результатів розрахунків показав, що в діапазоні потужностей плазмової дуги 11,4-12,9 кВт гранулометричний склад розпилюваних гранул із компактних дротів різного хімічного складу в загальному випадку лежить в інтервалі значень від 315 до 25 мкм. При цьому показник середніх розмірів розпилюваних часток змінюється в досить широкому діапазоні значень від 121 до 161 мкм в залежності від теплофізичних та фізико-механічних властивостей розпилюваних матеріалів. Найменші розміри розпилюваних гранул (121 та 125 мкм), були отримані для матеріалів, які мають найменші значення сили поверхневого натягу (для Cu та Al відповідно), що можна пов'язати зі зміною типу переносу металу з крапельного у бік струминного яке призводить до утворення більш мілкодисперсної фракції гранул.

3.5. Висновки до розділу 3:

1. Було виконано теоретичне та експериментальне дослідження процесів твердіння та сферодизації гранул в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів. Результати моделювання швидкісних та температурних параметрів струменя показали, що на виході з сопла плазмотрона плазмовий струмінь рухається зі швидкістю 540-460 м/с та ядро плазмової струї має температуру на рівні 27000-22500 °K відповідно. Це

призводить до того, що частки, які утворюються при плавленні торця дроту (який подається у область під зріз сопла плазмотрону) зазнають вторинного дроблення під дією значного газодинамічного впливу плазмового струменя і починають інтенсивно прискорюватися за рахунок опору між часткою та плазмою, та набирають максимальну швидкість від 0 до 70 м/с в залежності від їх розміру.

2. Встановлено закономірності впливу технологічних і конструктивних параметрів плазмотрону на гранулометричний склад гранул, отриманих в процесі плазово-дугового розпилення компактних і порошкових дротів діаметром 1,0-1,6 мм по схемі «дріт-анод». З'ясовано, що регулюючи такі параметри, як сила струму, швидкість подачі дроту, витрата плазмоутворюючого та супутнього газів та зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами можна отримувати гранули, середній діаметр яких лежить в інтервалі 70-190 мкм, при цьому при застосуванні дроту діаметром 1,0 мм кількість фракції гранул <70 мкм досягає до 70 мас. %.

3. З'ясовано, що обдування турбулентного струменя аргонної плазми кільцевим ламінарним потоком холодного газу є одним із ключових параметрів, які мають найбільший вплив на дисперсність розпилюваних часток, так лише за рахунок збільшення витрати супутнього газу з 36 до 60 м³/год. можливо зменшити середній діаметр часток на 22 % з 167 до 129 мкм, при цьому доля часток із розмірами менше 100 мкм збільшується з 32 до 41 % мас.

4. Виявлено особливості впливу технологічних параметрів процесу плазово-дугового розпилення на параметри сферичності отриманих гранул. З'ясовано, що збільшення потужності плазової дуги з 10,5 до 26,1 кВт за рахунок збільшення сили струму з 150 до 290 А при використанні аргону у якості плазмоутворюючого газу дозволяє підвищити коефіцієнт сферичності гранул фракції 20...100 мкм з 0,67 до 0,83. При використанні у якості плазмоутворюючого газу гелію заданий коефіцієнт сферичності 0,83 досягається при менших значеннях потужності плазової дуги у 21,3 кВт. У

загальному випадку додавання гелію до плазмоутворюючої суміші сприяє збільшенню коефіцієнту сферичності гранул у інтервалі 0,73...0,83.

5. З'ясовано, що при розпиленні в атмосфері аргону сферодизуються гранули правильної форми з коефіцієнтом сферичності $S = 0,81$, при розпиленні дроту у повітряній атмосфері (твердіння у воді) коефіцієнт сферичності гранул складає $S = 0,71$, а у повітряній атмосфері і подальшому твердінні на повітрі $S = 0,63$.

6. Встановлено особливості диспергування дровових матеріалів різного хімічного складу. З'ясовано, що при постійній потужності плазмової дуги найменші розміри розпилюваних гранул (121 та 125 мкм), були отримані для матеріалів, які мають найменші значення сили поверхневого натягу (для Cu та Al відповідно).

РОЗДІЛ 4

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНУЛ І ПОКРИТТІВ ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ РОЗПИЛЕННІ СТРУМОПРОВІДНИХ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

4.1 Взаємодія сталеві оболонки і сердечника із порошку алюмінію при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідного порошкового дроту Fe-Al

Експериментальні дослідження процесів нагріву, плавлення і взаємодії порошкового дроту 86Fe+14Al мас.%, який складається зі сталеві оболонки із низьковуглецевої сталі Ст08кп та порошкового наповнювачу (алюмінію марки ПА-4) виконувались при наступних технологічних параметрах режиму процесу плазмово-дугового розпилення, які змінювали в таких інтервалах: робочий струм плазмотрона – 180-270 А; робоча напруга дуги 60-80 В; витрата плазмоутворюючого газу (аргону) 2,0 м³/год.; витрата супутнього потоку (який охолоджує сопло та обтискає високотемпературний струмінь) 30 м³/год.; швидкість подачі дроту 6-10 м/хв.

Проведено металографічні дослідження торців дротів при різкому обриві дуги, а також дослідження продуктів їх розпилення.

На рисунках 4.1-4.3 наведено вигляд рухомого дроту-аноду після розпилення, де чітко видно зону нагріву та відриву розплавлених крапель металу, яка має скошений вигляд, характерний для плазмово-дугової технології.

Аналіз даних із вмістом елементів в оплавленому торці дроту після різкого обриву дуги при різних режимах плазмово-дугового розпилення, отриманих пошаровим хімічним аналізом мікро рентгеноспектральним методом свідчить про наявність металургійної взаємодії розплавленої

металевої оболонки та алюмінієвого наповнювача, що призводить до утворення розплаву, інтегральний хімічний склад якого дорівнює інтерметалідам типу Fe_3Al (рис. 4.1., табл. 4.1).

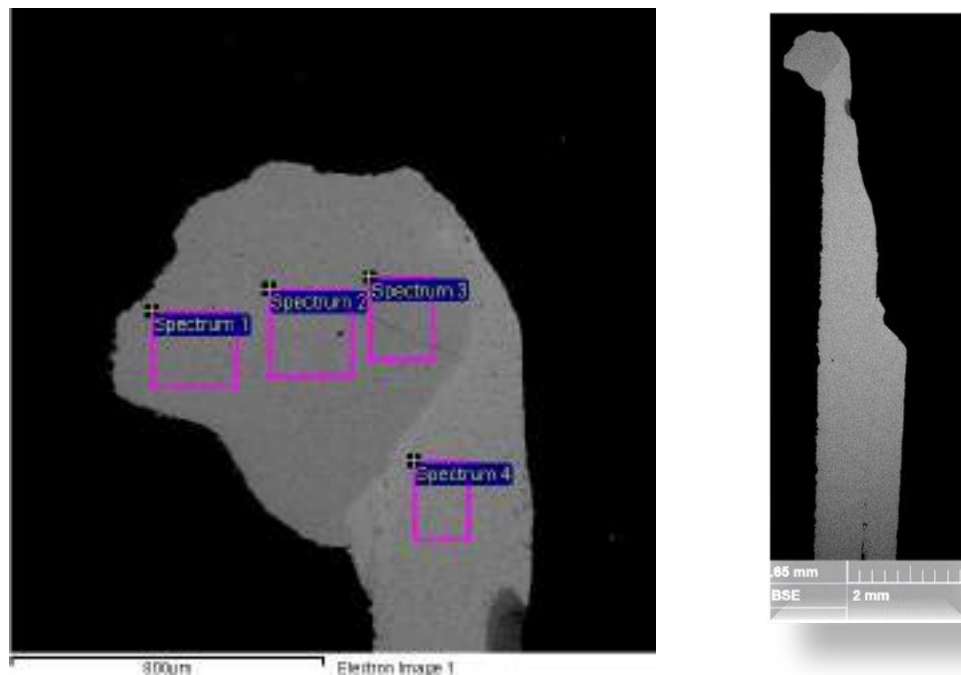


Рис. 4.1. Зовнішній вигляд торцю дроту Fe-Al на режимі 180 А, після різкого обриву дуги в процесі плазово-дугового розпилення, де:

- спектр 1, 2, 3 – зона металургійної взаємодії матеріалу дроту при його плавленні і розпиленні;

- спектр 4 – зона дроту, що не піддається термічному впливу.

Таблиця 4.1. Хімічний склад локальних зон торця порошкового дроту-аноду Fe-Al після різкого обриву дуги в процесі плазово-дугового розпилення (180 А)

Номер локальної зони	Хімічний склад локальних зон, % атом.	
	Fe	Al
Спектр 1	76.49	23.51
Спектр 2	75.49	24.51
Спектр 3	74.15	25.85
Спектр 4	100.00	-

Схожі результати спостерігаються при розпиленні порошкового дроту Fe-Al на режимах 220А та 270А, проте слід зауважити, що при підвищенні струму мають місце більш інтенсивні процеси розплавлення і металургійної взаємодії наповнювача з металевою оболонкою, що призводить до збільшення частки алюмінію у розплаві, що утворюється на торці дроту рис. 4.2-4.3). При цьому його інтегральний хімічний склад відповідає інтерметаліду типу $Fe_3Al+FeAl$ при розпиленні на режимі 220 А та інтерметаліду типу FeAl при 270 А (табл. 4.2-4.3)

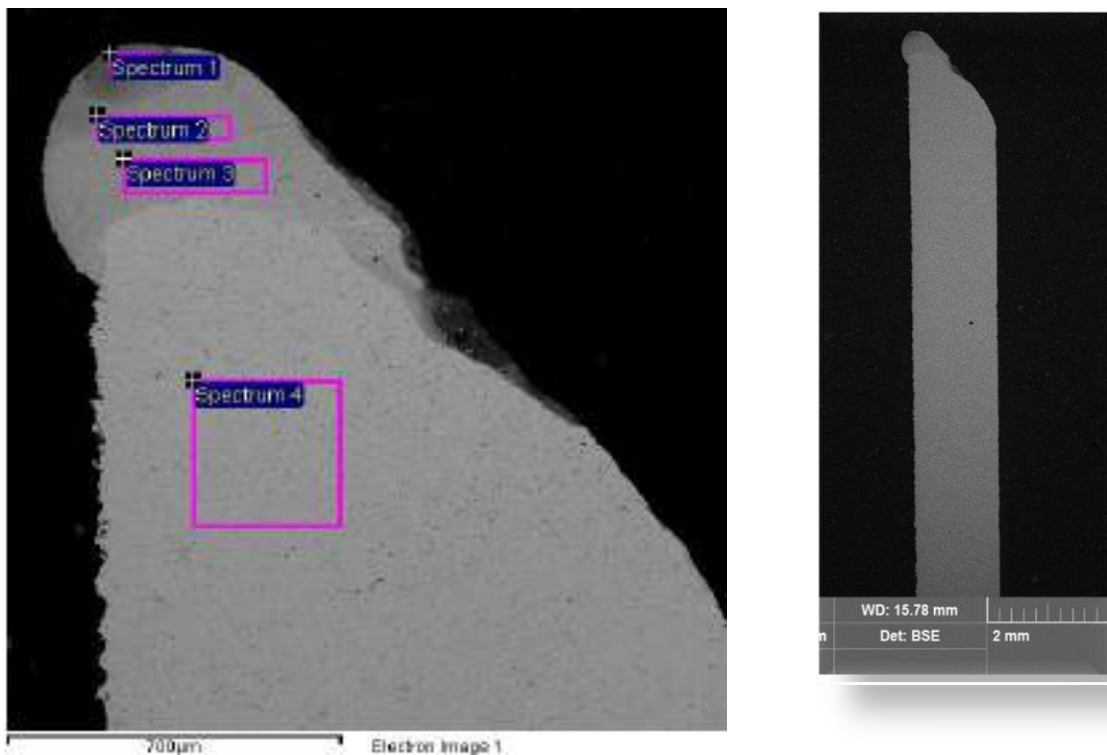


Рис. 4.2. Зовнішній вигляд торцю дроту Fe-Al на режимі 220 А, після різкого обриву дуги в процесі плазмово-дугового розпилення, де:

- спектр 1, 2, 3 – зона металургійної взаємодії матеріалу дроту при його плавленні і розпиленні;
- спектр 4 – зона дроту, що не піддається термічному впливу.

Таблиця 4.2. Хімічний склад локальних зон торця порошкового дроту-аноду Fe-Al після різкого обриву дуги в процесі плазмово-дугового розпилення (220 А)

Номер локальної зони	Хімічний склад локальних зон, % атом.	
	Fe	Al
Спектр 1	29.10	66.63
Спектр 2	66.20	33.80
Спектр 3	69.47	30.53
Спектр 4	100.00	-

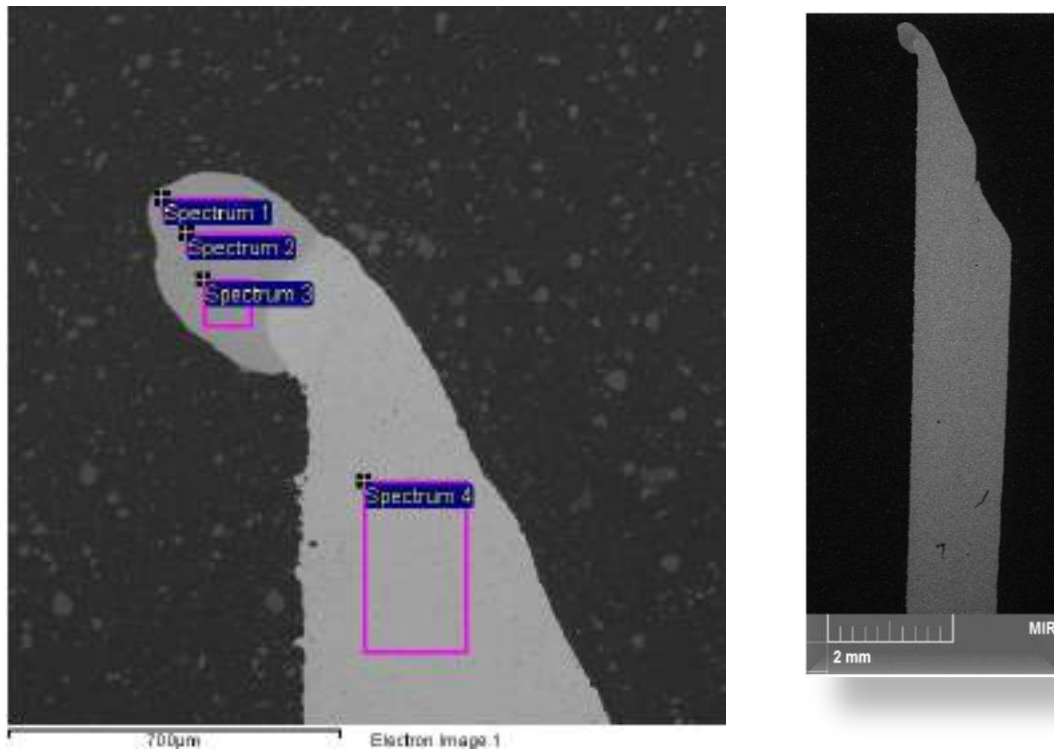


Рис. 4.3. Зовнішній вигляд торцю дроту Fe-Al на режимі 270 А, після різкого обриву дуги в процесі плазмово-дугового розпилення, де:

- спектр 1, 2, 3 – зона металургійної взаємодії матеріалу дроту при його плавленні і розпиленні;
- спектр 4 – зона дроту, що не піддається термічному впливу.

Таблиця 4.3. Хімічний склад локальних зон торця порошкового дроту-аноду Fe-Al після різкого обриву дуги в процесі плазово-дугового розпилення (270 А)

Номер локальної зони	Хімічний склад локальних зон, % атом.	
	Fe	Al
Спектр 1	50.69	49.31
Спектр 2	53.14	46.86
Спектр 3	52.14	47.86
Спектр 4	100.00	-

Таким чином, аналіз отриманих даних показав, що за допомогою зміни технологічних параметрів режиму плазово-дугового розпилення порошкових дротів є можливість регулювати інтенсивність процесів металургійної взаємодії металової оболонки і порошкового наповнювача.. Також слід відмітити, що дослідження розмірів розплавленої зони показали, що з підвищенням сили струму від 180 до 270 А середній розмір розплавленої зони (металургійної взаємодії оболонки і наповнювачу) на торці дроту зменшується у 4,25 рази, а середній вміст (у атом. %) алюмінію і заліза в утвореному розплаві змінюється від 25% і 75% до 48% і 52% відповідно.

4.2. Формування структури, хімічного і фазового складу сферичних гранул інтерметалідного типу плазово-дуговим розпиленням струмопровідного порошкового дроту «сталева оболонка + порошковий алюмінієвий сердечник»

Аналіз зовнішнього вигляду й гранулометричного складу гранул, отриманих при плазово-дуговому розпиленні досліджуваного порошкового дроту-аноду на повітрі та з використанням захисного насадку з аргонною атмосферою дозволяє говорити про те, що основна маса розпиленних гранул має сферичну форму (рис. 4.4), що свідчить про їхнє розплавлення та наступну сферодизацію на шляху від зони нагріву до місця їх збору. Іноді реєструються округлі частки, гантелеподібної та подовженої форми (~5% мас.).

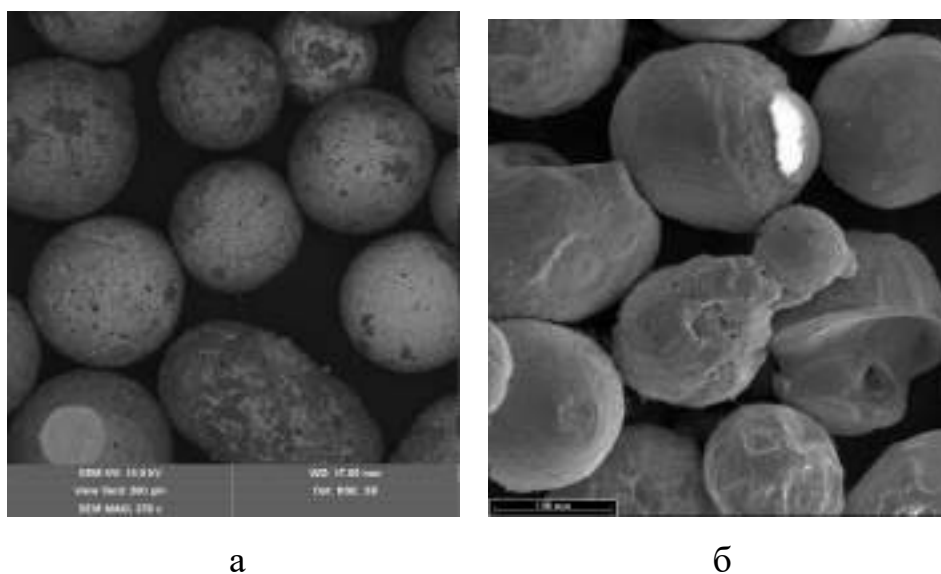


Рис. 4.4. Морфологія гранул фракції 100-200 мкм, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення порошкового дроту Fe-Al з використанням захисного насадку з аргонною атмосферою (а) та на повітрі (б)

Аналіз інтегральних кривих гранулометричного складу гранул - продуктів розпилення ПД Fe-Al дозволяє зробити висновок, що в загальному випадку незалежно від режиму розпилення розміри гранул перебувають в широкому інтервалі значень від 25 до 315 мкм (рис. 4.5). При цьому розрахунки середнього діаметру гранул показали, що у випадку використання струму 180 та 220 А цей параметр складає 144 та 132 мкм відповідно, а при струмі 270 А – 115 мкм, тобто зі збільшенням сили струму має місце тенденція до зменшення розмірів розпилюваних часток.

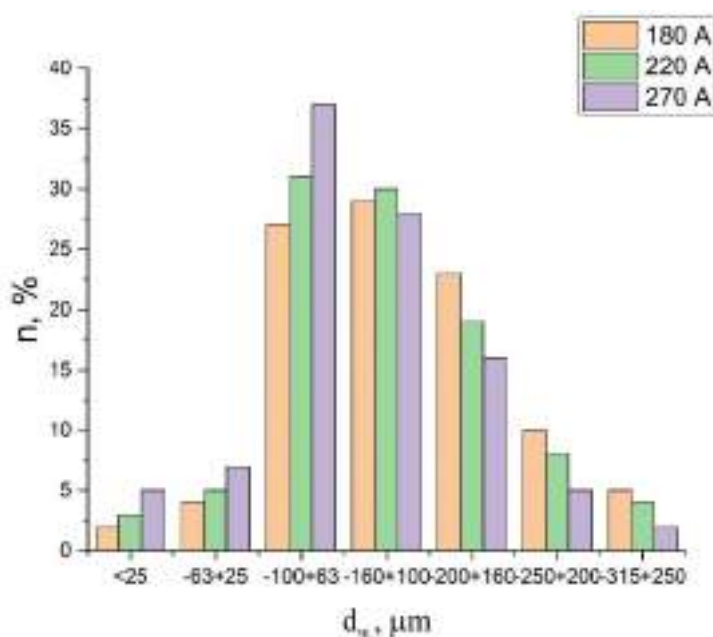


Рис. 4.5. Гранулометричний склад інтерметалідних гранул, отриманих за технологією плазмово-дугового розпилення порошкового дроту Fe-Al на різних режимах розпилення

У табл. 4.4-4.9 наведено результати досліджень фазового складу та мікротвердості гранул, отриманих при використанні захисного насадку з аргонною атмосферою та без його використання – на повітрі, при цьому у обох випадках у якості супутнього газу використовувався аргон.

Таблиця 4.4. Характеристика гранул, отриманих ПДР порошкового дроту Fe-Al при струмі 270 А з захисним насадком з аргонною атмосферою

Режим, сила струму I, А	Розмір часток, мкм	Фазовий склад	Кількість, мас. %	HV 0.25, МПа	
				метал	оксид
270 А	200...315	FeAl+Fe ₃ Al	75,9	3335	7765
		α -Fe (bcc)	24,1		
	100...200	FeAl+Fe ₃ Al	86,3	4590	8153
		α -Fe (bcc)	6,6		
		Fe ₃ O ₄	7,1		
	≤ 100	FeAl+Fe ₃ Al	75,0	4350	5920
		α -Fe-bcc	5,0		
		Fe ₃ O ₄	20,0		
		Fe ₂ O ₃			

Таблиця 4.5. Характеристика гранул, отриманих ПДР порошкового дроту Fe-Al при струмі 220 А з захисним насадком з аргонною атмосферою

Режим, сила струму I, А	Розмір часток, мкм	Фазовий склад	Кількість, мас. %	HV 0.25, МПа	
				метал	оксид
220А	200...315	FeAl+Fe ₃ Al	85,2	3065	4883
		α-Fe (bcc)	7,8		
		γ-Fe ₂ O ₃	7,0		
	100...200	FeAl+Fe ₃ Al	83,9	4474	7300
		α-Fe-bcc	5,9		
		Fe ₃ O ₄	10,2		
	≤100	FeAl+Fe ₃ Al	70,0	4456	6920
		α-Fe-bcc	3,0		
		Fe•Fe ₂ O ₃	27,0		
		Fe ₃ O ₄			

Таблиця 4.6. Характеристика гранул, отриманих ПДР порошкового дроту Fe-Al при струмі 180 А з захисним насадком з аргонною атмосферою

Режим, сила струму I, А	Розмір часток, мкм	Фазовий склад	Кількість, мас. %	HV 0.25, МПа	
				метал	оксид
180 А	200...315	FeAl+Fe ₃ Al	48,7	3170	5401
		α-Fe (bcc)	42,2		
		γ-Fe ₂ O ₃	9,1		
	100...200	FeAl+Fe ₃ Al	35,8	3968	6636
		α-Fe-bcc	38,6		
		Al ₃ O ₄ _Sigma	8,1		
		Fe ₃ O ₄	17,5		
	≤100	FeAl+Fe ₃ Al	30,0	3962	5324
		α-Fe-bcc	25,0		
		Fe•Fe ₂ O ₃	45,0		
		Fe ₃ O ₄			
		Al ₃ O ₄ _Sigma			

Таблиця 4.7. Характеристика гранул, отриманих ПДР порошкового дроту Fe-Al при струмі 270 А на повітрі

Режим, сила струму I, А	Розмір часток, мкм	Фазовий склад	Кількість, мас. %	HV 0.25, МПа	
				метал	оксид
270 А	200...315	FeAl+Fe ₃ Al	9,3	2753	4886
		γ-Fe ₂ O ₃	84,0		
		α-Fe ₂ O ₃	4,8		
		FeO	1,9		
	100...200	FeAl+Fe ₃ Al	28,3	4935	7198
		α-Fe_bcc	12,6		
		α-Fe ₂ O ₃	25,0		
		Fe ₃ O ₄	30,9		
		FeO	3,3		
	≤100	FeAl+Fe ₃ Al	20,0	4573	4503
		α-Fe_bcc	10,0		
		FeO·Fe ₂ O ₃	70,0		
		Al ₃ O ₄ _Sigma			
		γ Al ₂ O ₃			

Таблиця 4.8. Характеристика гранул, отриманих ПДР порошкового дроту Fe-Al при струмі 220 А на повітрі

Режим, сила струму I, А	Розмір часток, мкм	Фазовий склад	Кількість, мас. %	HV 0.25, МПа	
				метал	оксид
220 А	200...315	FeAl+Fe ₃ Al	20,7	3207	5574
		α-Fe_bcc	15,1		
		γ-Fe ₂ O ₃	34,4		
		α-Fe ₂ O ₃	6,2		
		FeO	1,1		
		Al ₃ O ₄ _Sigma	22,5		
	100...200	FeAl+Fe ₃ Al	16,4	3944	7125
		Fe_bcc	8,7		
		Al ₃ O ₄ _Sigma	57,8		
		Fe ₃ O ₄	14,3		
		FeO	2,8		
	≤100	FeAl+Fe ₃ Al	15,0	3255	4641
		α-Fe_bcc	6,0		
		FeO·Fe ₂ O ₃	79,0		
		Al ₃ O ₄ _Sigma			
γ Al ₂ O ₃					

Таблиця 4.9. Характеристика гранул, отриманих ПДР порошкового дроту Fe-Al при струмі 180 А на повітрі

Режим, сила струму I, А	Розмір часток, мкм	Фазовий склад	Кількість, мас. %	HV 0.25, МПа	
				метал	оксид
180 А	200...315	FeAl+Fe ₃ Al	25,5	3018	5583
		Fe_bcc	5,1		
		Fe ₃ O ₄	39,3		
		FeO•Fe ₂ O ₃	13,2		
		Al ₃ O ₄ -Sigma	16,9		
	100...200	FeAl+Fe ₃ Al	15,0	3911	7464
		Fe_bcc	3,3		
		FeO	3,6		
		Fe ₃ O ₄	57,4		
		Al ₃ O ₄ -Sigma	20,8		
	≤100	FeAl+Fe ₃ Al	15,0	4313	6010
		α-Fe_bcc	85,0		
		FeO•Fe ₂ O ₃			
Al ₃ O ₄ -Sigma					

Металографічним методом були досліджені шліфи порошоків до і після хімічного травлення. В нетравленому стані металеві частки мають чіткий ободок товщиною ~5 мкм (рис. 4.6). Після травлення виявлена лита структура металевих часток, яка складається з дрібних дендритів алюмінідів в матриці α-заліза. Поряд з металевими частками в порошках виявлені оксидні частки сірого кольору. В оксидних частках спостерігається внутрішні порожнини.

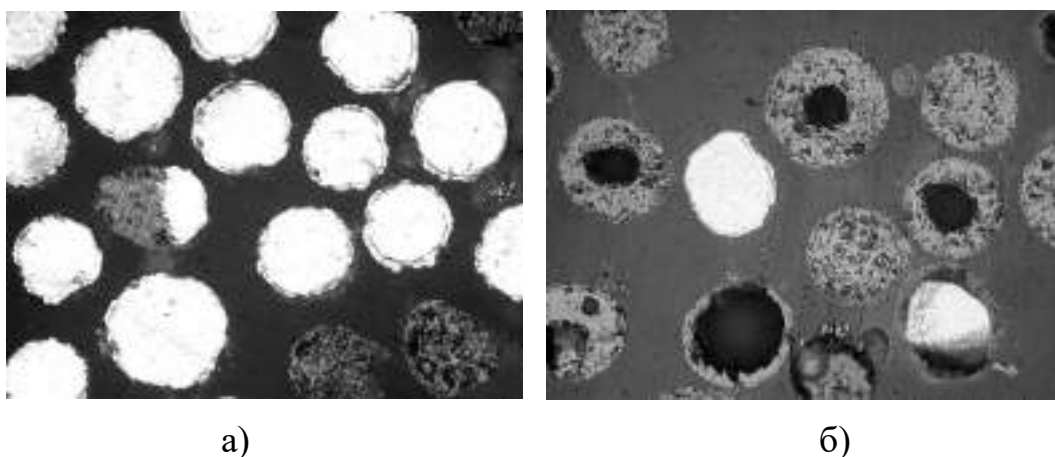


Рис. 4.6. Мікрошліфи гранул, отриманих в процесі плазмово-дугового розпилення порошкового дроту Fe-Al, де: а – інтерметалідні частки; б – оксидні частки

Найбільша кількість оксидних часток реєструється в гранулах, розпилених на повітрі. В результаті дюрOMETричних досліджень встановлено, що мікротвердість металевих часток знаходиться в інтервалі 3,9...4,9 ГПа. За літературними даними, значенням твердості алюмінідів, які утворюються в металевих частках ближчі до FeAl (HV=6 ГПа) ніж до Fe₃Al (HV=2,7 ГПа). Оксидні частки мають більшу високу мікротвердість – 4,5...8,1 ГПа.

Порошки, розпилені при використанні захисного насадку з аргонною атмосферою мають більш стабільний фазовий склад, де основною фазою є FeAl (або суміш FeAl+Fe₃Al, так як рентгенівські максимуми цих фаз співпадають). Другою фазою є α-Fe його кількість знаходиться в інтервалі 7,8...42,2 мас. %. Також реєструються оксиди заліза Fe₃O₄, γ-Fe₂O₃ в кількості 7,1...10,2, а при використанні струму 180 А оксид алюмінію σ - Al₂O₃ ~8,1 мас. % .

При струмі 270 та 220А порошки, отримані ПДР при використанні захисного насадку з аргонною атмосферою, мають максимальну кількість алюмініду (~ 75...86 мас. %), при цьому кількість оксидів мінімальна. При розпиленні на повітрі ведучою фазою становляться оксиди заліза Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO і оксид алюмінію σ - Al₂O₃. Сумарна кількість оксидів досягає 72...91 мас. %, що свідчить про протікання значних процесів окислення.

Відсоток алюмінідів заліза значно зменшується. Максимальне значення FeAl – 28,3 % у фракції 200...315 мкм при I=270А.

Найкращий матеріал за фазовим складом, структурою, показниками твердості, фактором форми був отриманий при розпиленні порошкового дроту при використанні захисного насадку з аргоновою атмосферою на режимі 270 А.

Досліджено гетерогенність хімічного складу інтерметалідних гранул фракції 100...200 мкм (табл. 4.10.), отриманих при розпиленні на струмі 270 А за допомогою методу РСМА. Показано, що має місце певна неоднорідність хімічного складу отриманих гранул, так доля Al може варіювати від 7 до 40 % атом. Але при цьому інтегральний хімічний склад відповідає інтерметалідам типу Fe₃Al, FeAl, та α-Fe, що співпадає з даними досліджень РСФА (табл. 4.4.). Дослідження зміни хімічного складу окремих гранул, показало що гранули мають стабільний хімічний склад по всьому об'єму, зміна хімічного складу елементів не перевищує 0,7 % атом. і знаходиться у межах похибки вимірювання.

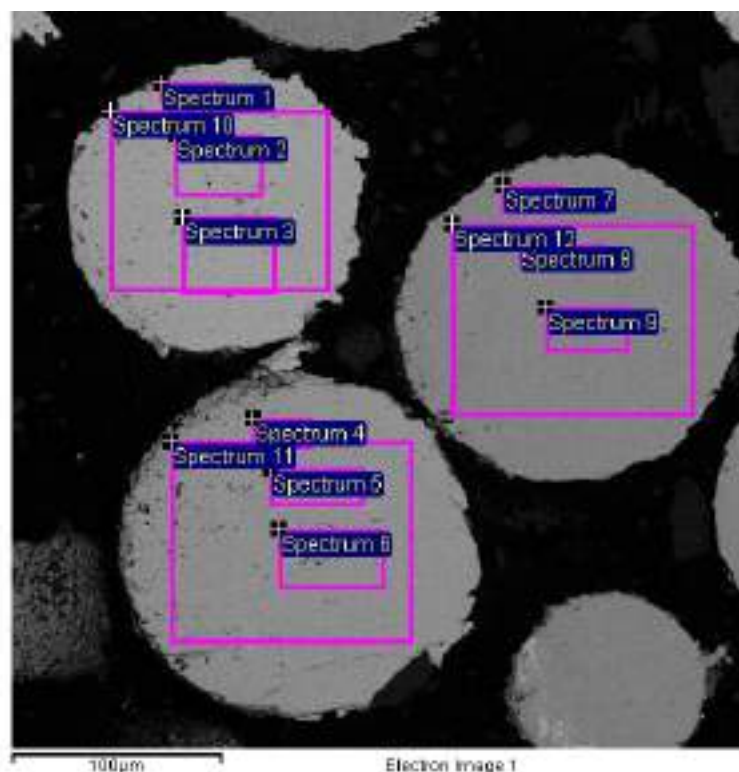


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд досліджуваної ділянки шліфу з інтерметалідних гранул 100...200 мкм

Таблиця 4.10. Хімічний склад локальних зон шліфу гранул 100...200 мкм, отриманих в процесі плазмово-дугового розпилення порошкового дроту-аноду Fe-Al при струмі 270 А

Номер локальної зони	Хімічний склад локальних зон, % атом.	
	Al	Fe
Спектр 1	7.04	92.96
Спектр 2	7.02	92.98
Спектр 3	7.14	92.86
Спектр 4	25.09	74.91
Спектр 5	24.62	75.38
Спектр 6	24.94	75.06
Спектр 7	39.71	60.29
Спектр 8	39.51	60.49
Спектр 9	40.40	59.60
Спектр 10	7.19	92.81
Спектр 11	25.03	74.97
Спектр 12	40.01	59.99

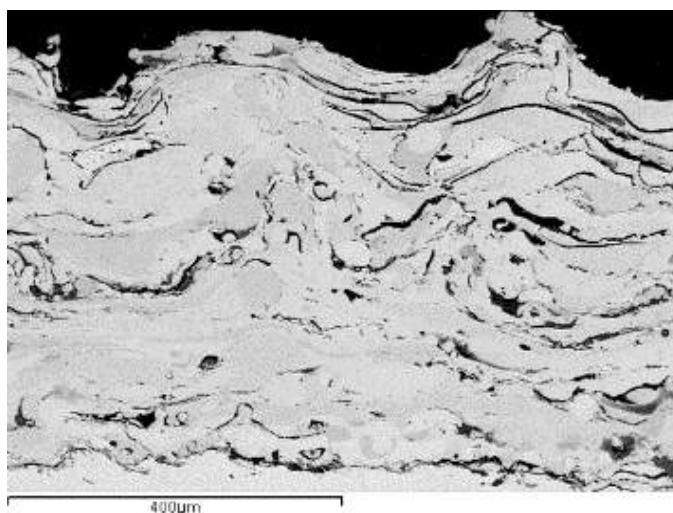
Враховуючи вищеперелічене, до особливостей процесу плазмово-дугового розпилення можна віднести труднощі, пов'язані з нерівномірним нагрівом оболонки порошкового дроту і наповнювачу, де нагрів оболонки здійснюється за рахунок тепла, що виділяється при проходженні струму, тепла, що виділяється в активному анодній плямі та конвективного теплообміну з плазмовою дугою, а нагрів порошкового наповнювачу відбувається лише за рахунок передачі тепла від дуги та оболонки [87].

Шляхом вирішення цієї проблеми має стати розробка нової лінійки плазмотронів зі збільшеним струмовим навантаженням (до 500-600 А), що буде сприяти інтенсифікації металургійних процесів, що протікають між

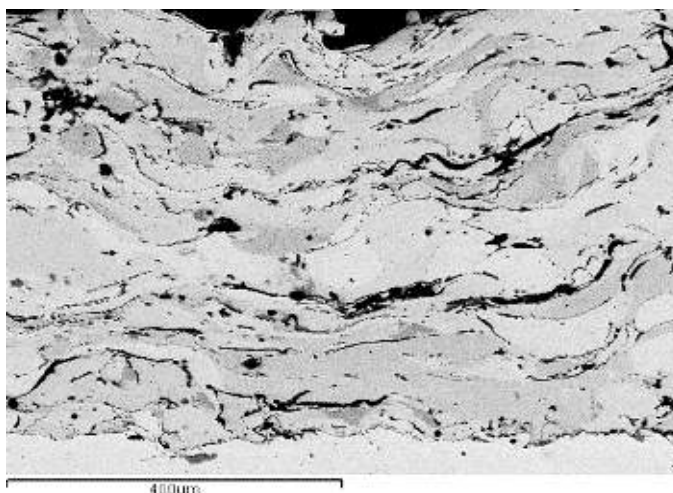
оболонкою та наповнювачем та формування стабільного хімічного і фазового складу по всьому об'єму гранул.

4.3 Вплив технологічних параметрів процесу плазмово-дугового напилення струмопровідного порошкового дроту на структуру і фазовий склад інтерметалідних покриттів на основі Fe_3Al

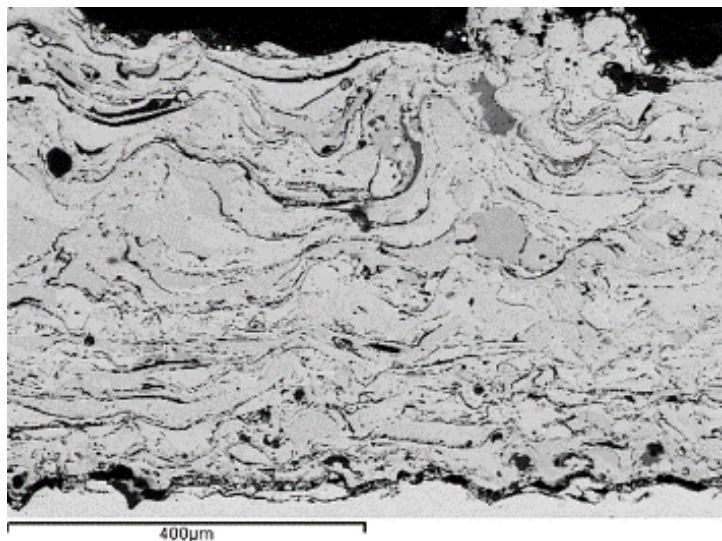
На рис. 4.8-4.9. наведено мікроструктуру та результати РСФА покриттів, які отриманні методом ПДН порошкового дроту Fe-Al згідно з планом експерименту (табл. 2.5).



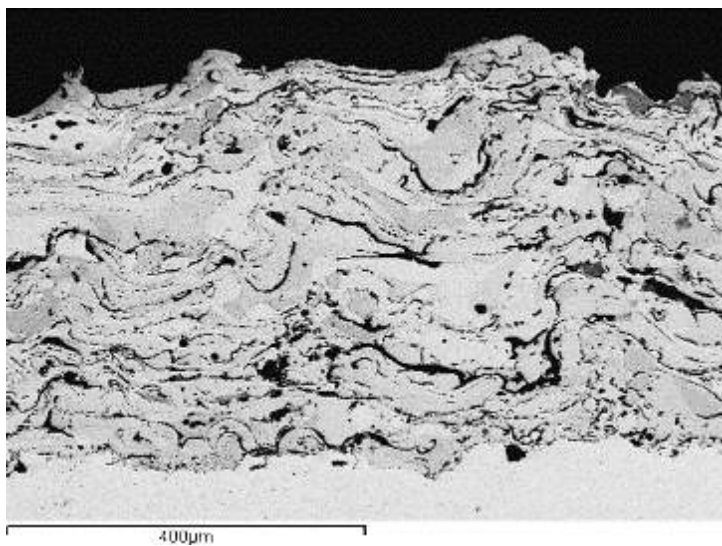
а)



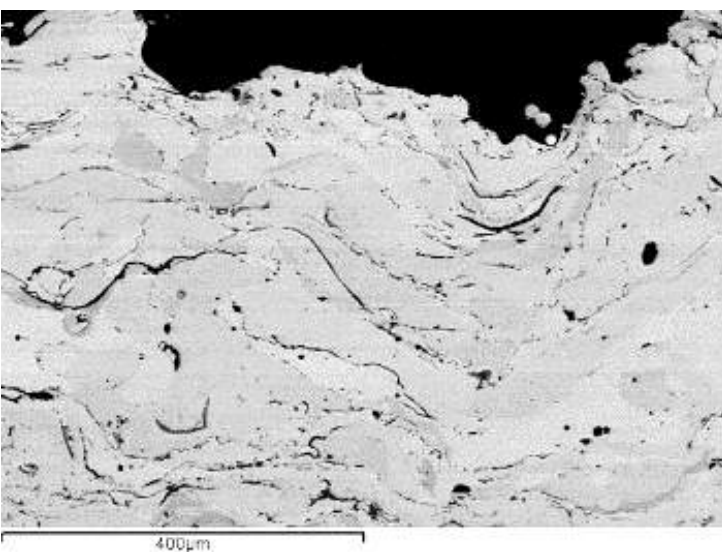
б)



B)



Г)



Д)

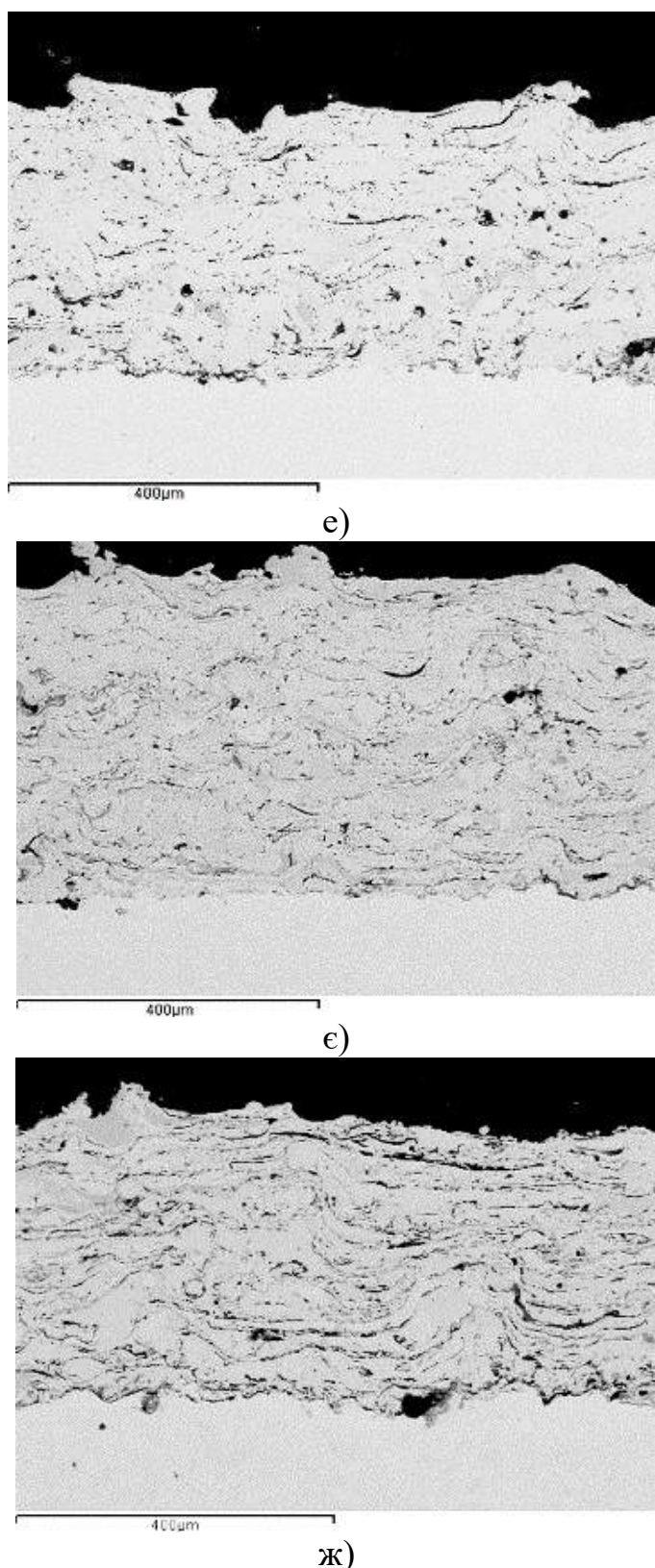
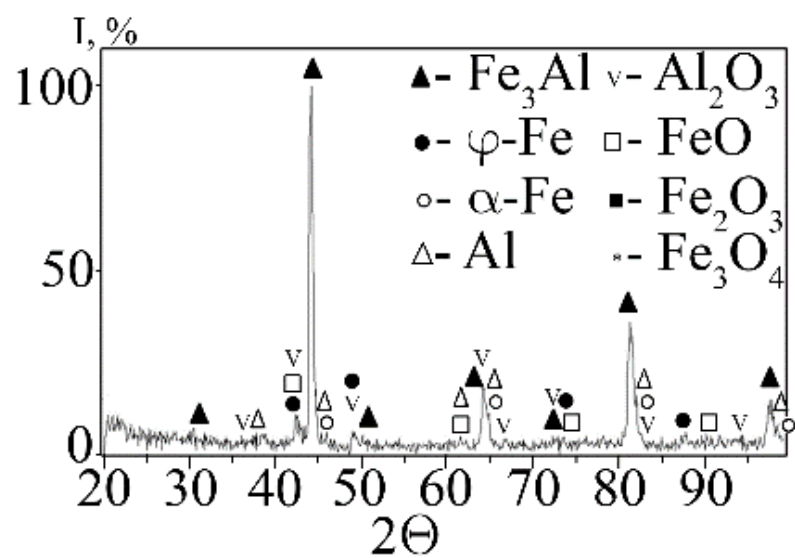
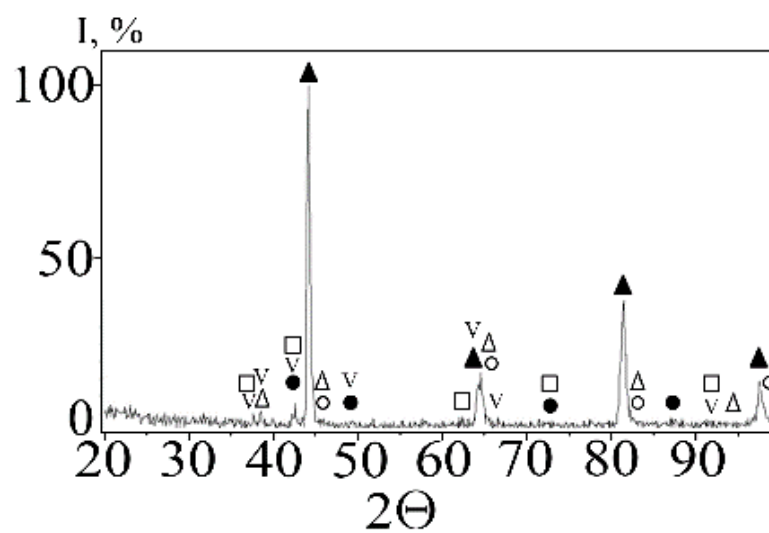


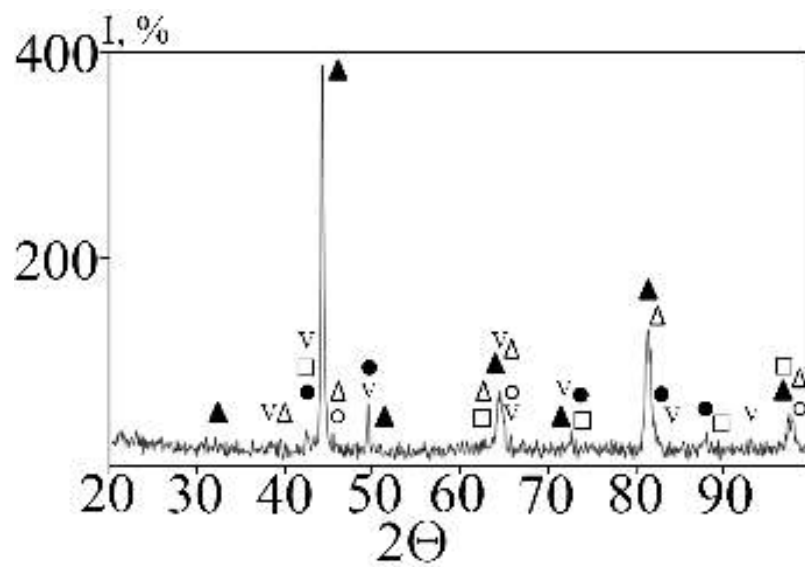
Рис. 4.8. Дослідження мікроструктури складу покриттів, отриманих методом плазово-дугового напилення з використанням Fe-Al порошкового дроту: а – мікроструктура покриття режим № 1; б – мікроструктура покриття режим № 2; в – мікроструктура покриття режим № 3; г – мікроструктура покриття режим № 4; д – мікроструктура покриття режим № 5; е – мікроструктура покриття режим № 6; є – мікроструктура покриття режим № 7; ж – мікроструктура покриття режим № 8



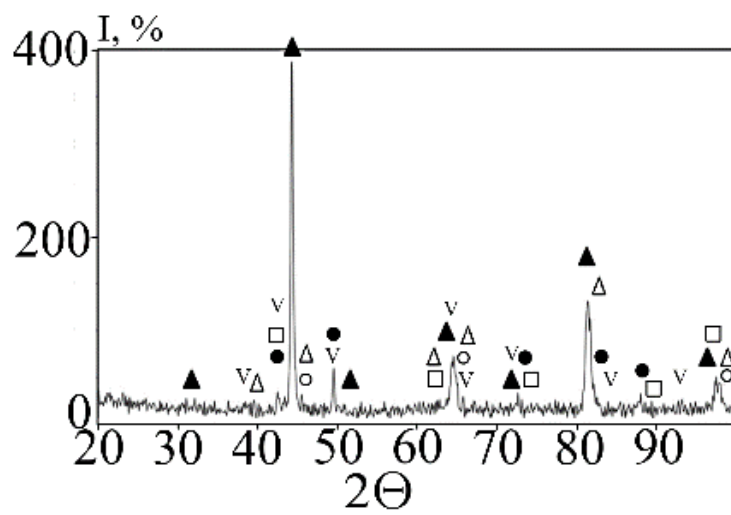
a)



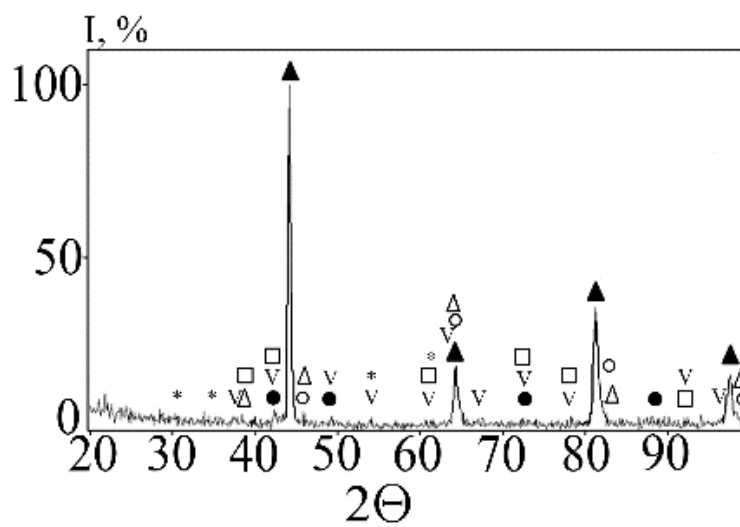
b)



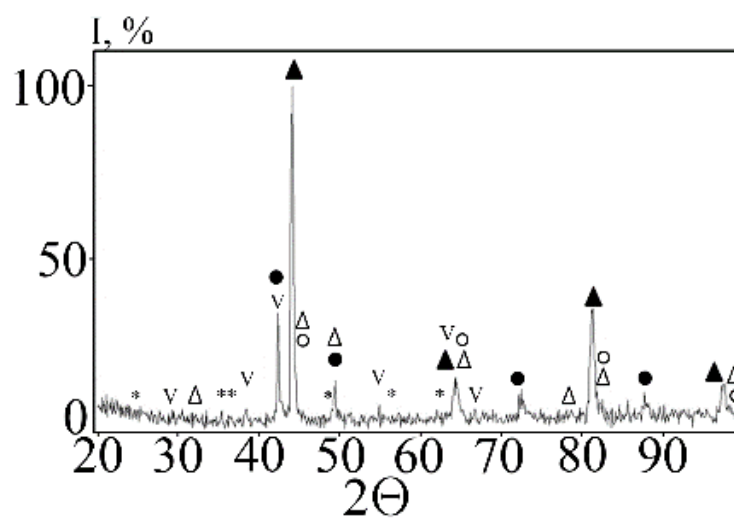
B)



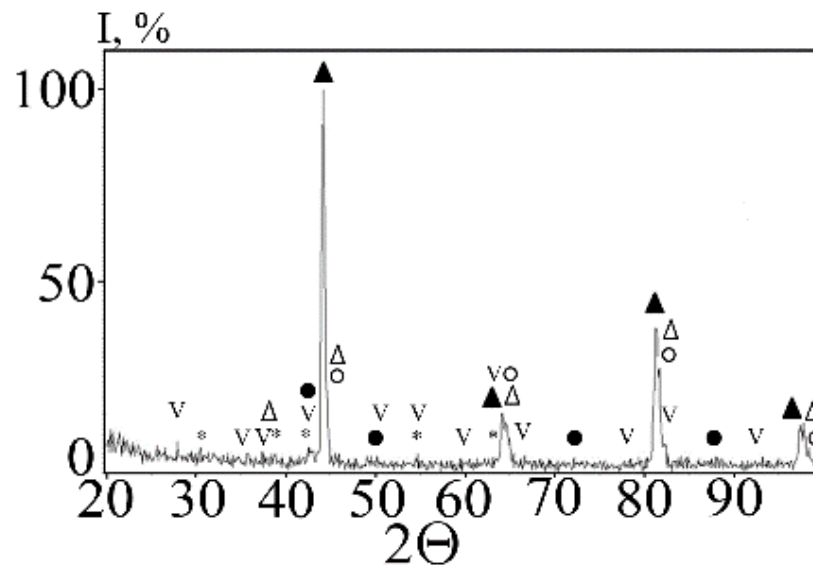
г)



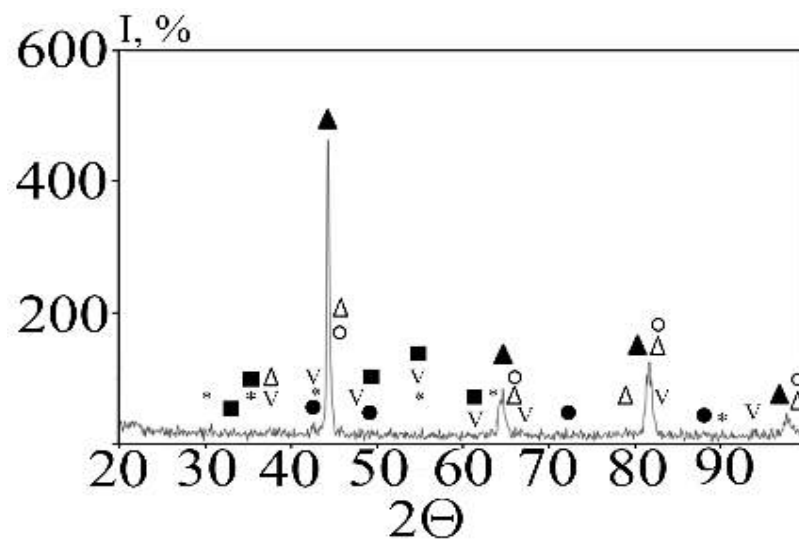
д)



е)



е)



ж)

Рис. 4.9. Рентгенограми покриттів, отриманих методом плазмово-дугового напилення з використанням Fe-Al порошкового дроту: а – рентгенограма покриття № 1; б – рентгенограма покриття № 2; в – рентгенограма покриття № 3; г – рентгенограма покриття № 4; д – рентгенограма покриття № 5; е – рентгенограма покриття № 6; є – рентгенограма покриття № 7; ж – рентгенограма покриття № 8

На рис. 4.10 та у табл. 4.11 наведено дані РСМА аналізу покриттів, отриманих методом ПДН порошкового дроту Fe-Al.

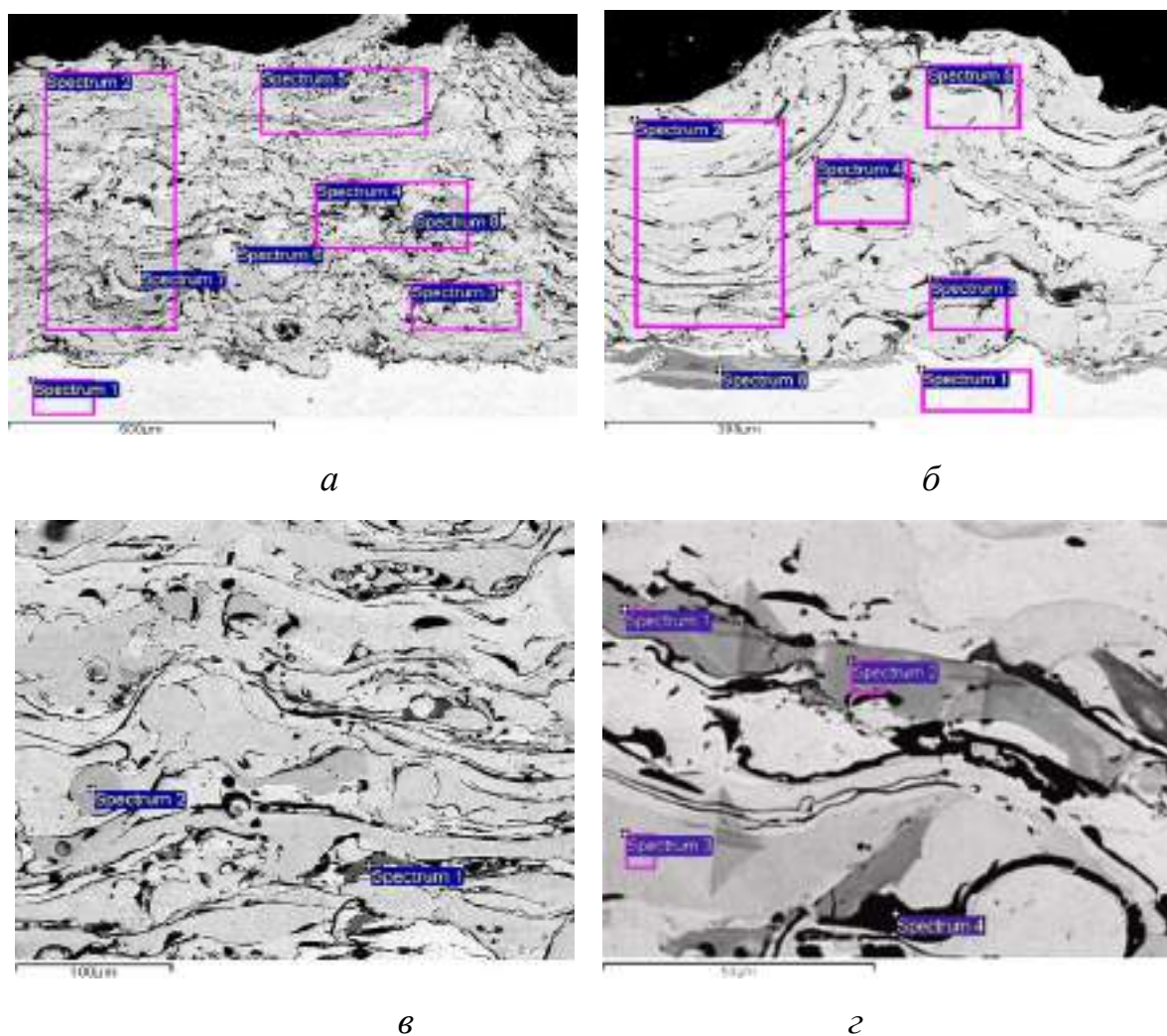


Рис. 4.10. Електронні мікрофотографії типових ділянок покриттів FeAl, виготовлених методом плазмово-дугового напилення порошкового дроту Fe-Al (хімічний склад спектрів див. табл. 4): *а* - тверді розчини алюмінію в залізі (спектр 6, 8); *б* - оксид заліза складу FeO (спектр 6); *в* – місця розташування оксидних фаз (спектр 1); *г* - оксид алюмінію Al₂O₃ (спектр 4)

Таблиця 4.11. Результати РСМА покриттів FeAl

№ спектру	Тип спектру ^{*)}	Рис. 4.10	Хімічний склад, мас. %					Головна фаза
			Fe	Al	O	Mn	Загальний	
1	1	а	98.24	–	1.23	0.53	100	Основа
2	1	а	80.98	14.4	4.62	–	100	Fe ₃ Al
3	1	а	80.08	12.98	6.93	–	100	Fe ₃ Al

4	1	a	79.17	14.47	6.36	–	100	Fe ₃ Al
5	1	a	81.45	13.25	5.3	–	100	Fe ₃ Al
6	2	a	94.76	4.28	0.96	–	100	Fe(Al)
7	2	a	81.62	17.23	1.15	–	100	Fe ₃ Al
8	2	a	89.38	9.19	1.43	–	100	Fe(Al)
1	1	б	99.27	–	–	0.73	100	Основа
2	1	б	87.58	12.42	–	–	100	Fe ₃ Al
3	1	б	84.98	15.02	–	–	100	Fe ₃ Al
4	1	б	85.66	14.34	–	–	100	Fe ₃ Al
5	1	б	87.36	12.64	–	–	100	Fe ₃ Al
6	2	б	75.94	–	23.53	0.52	100	FeO
1	2	в	63.23	5.13	31.64	–	100	Суміш оксидів Al та Fe
2	2	в	77.27	21.25	1.48	–	100	Fe ₃ Al+Al
1	2	г	72.61	27.39	–	–	100	Fe ₃ Al+Al
2	2	г	72.23	27.77	–	–	100	Fe ₃ Al+Al
3	2	г	83.08	16.92	–	–	100	Fe ₃ Al
4	2	г	2.29	52.73	44.98	–	100	Al ₂ O ₃

*) 1 – сканування ділянки з усередненням вмісту елементів по всій товщині;

2 – вимірювання окремих структурних компонентів електронним зондом

Було виконано дослідження впливу параметрів процесу на мікротвердість та пористість Fe-Al покриттів. Зведені результати аналізу фазового складу, пористості та мікротвердості наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12. Характеристики структури та властивостей Fe-Al покриттів, отриманих методом плазмово-дугового напилення

№ експерименту	Режим розпилення $h/Q_{\text{год}}/I/W_{\text{пр}}$	Мікротвердість, $HV_{0.05}$, МПа		Фазовий склад	Пористість, об.%
		$H_{\mu}^{\text{сер.}}$	$H_{\mu}^{\text{макс}}$		
1	150/40/180/ 4.8	2930±848	6795	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al сліди FeO,	3.5
2	220/40/180/ 4.8	3058±721	9887	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al сліди FeO,	3–4
3	150/45/180/ 4.8	2742±514	3575	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al, Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ , сліди FeO, Fe ₂ O ₃ (α:γ>2)	2–2.5
4	220/45/18/4. 8	2927±552	13100	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al, Fe ₃ O ₄ , сліди of Al ₂ O ₃ , FeO,	2–2.5
5	150/40/230/ 6.0	3024±761	4635	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al, сліди Al ₂ O ₃ , FeO, Fe ₃ O ₄	1.5
6	220/40/230/ 6.0	2888±766	4418	Fe ₃ Al, γ-Fe, α-Fe, Al, Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ (γ>>α)	2–3
7	150/45/230/ 6.0	2930±656	4221	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al, Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃	2
8	220/45/230/ 6.0	2723±880	5807	Fe ₃ Al, α-Fe, γ-Fe, Al, Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	2

Для встановлення якісного впливу обраних параметрів на мікротвердість (HV) було проведено регресійний аналіз експериментальних даних та отримано рівняння регресії для двох експериментальних блоків, що відрізняються струмом дуги – 180 А та 230 А та швидкістю подачі дроту – 4,8 та 6,0. м/хв.

Блок 1 – 180/4,8: $HV^{\prime}=3851 + 2,3h-32Q$.

Блок 2 – 230/6,0: $HV^{\prime\prime}=4435 - 2,4h-26Q$.

У табл. 4.13 наведено порівняння експериментальних та розрахункових значень мікротвердості покриттів напилених при різних режимах процесу ПДН.

Таблиця 4.13. Результати експериментів ПДН Fe-Al покриттів

№ експерименту	HV, МПа			№ експерименту	HV, МПа		
	Експ.	Розр.	Δ		Експ.	Розр.	Δ
1	2930	2916	-14	5	3024	-3035	+11
2	3058	3077	+19	6	2888	+2867	-21
3	2742	2756	+14	7	2930	-2905	-25
4	2927	2917	-10	8	2723	2737	+14
Σ	11657	11666	-	Σ	11565	11544	-
Середній	2914	2916	+33- 24	Середній	2891	2886	+25-40

Проведені дослідження дозволяють визначити вплив технологічних параметрів процесу на мікротвердість та пористість покриття, що формується в процесі плазово-дугового напилення. Показано, що різниця між експериментальними та розрахунковими даними становить не більше 1 %.

На відміну від експериментів [88], де в процесі електродугового напилення інтерметалідне покриття утворювалось після термообробки, ПДН порошкового дроту дозволило отримати інтерметалідне покриття без виконання цієї операції. Це стає можливим завдяки тому що при плавленні порошкового дроту сталева оболонка та наповнювач із порошку алюмінію взаємодіють при нагріванні з екзотермічним ефектом синтезу інтерметаліду Fe_3Al . Також використання процесу ПДН для формування інтерметалідних шарів дозволяє значно зменшити кількість оксидів та кількість

непрореагованого заліза та алюмінію у покритті. Це досягається за рахунок того, що плавлення та диспергування матеріалу дроту здійснюється в інертній аргонівій плазмі, що призводить до мінімального окиснення часток в процесі напилення. На відміну від [89-91], де процес нанесення покриттів пов'язаний зі значними витратами на закупівлю матеріалів, процес ПДН характеризується більш низькою собівартістю процесу. Показано, що використання більш економних матеріалів (дротів замість спеціалізованих порошків) та джерел нагріву (електричної дуги замість газових сумішей), дає можливість формувати якісні інтерметалідні покриття. Механічні, зносостійкі та корозійні характеристики таких покриттів відповідають характеристикам покриттів, нанесеними високошвидкісними газополумєневими методами та детонаційними напиленням.

Для встановлення закономірності впливу технологічних параметрів процесу ПДН на структуру та властивості отриманих покриттів було використано метод математичного планування експерименту із застосуванням повного факторного експерименту 2^3 . Аналіз рівнянь регресії (Блок 1, Блок 2) показав різницю, як впливає відстань розпилення, яка змінює свій знак при зміні струму. Це пов'язано з утворенням більш дрібнодисперсного потоку напилених частинок, повною взаємодією компонентів порошкового дроту під час напилення дроту при збільшенні струму дуги. Також при цьому збільшенні підведення тепла в газовий струмінь ($I/Q_{\text{пов}}$ зростає від $4,0 \div 4,5$ до $5,11 \div 5,75$) призводить до перегріву частинок і утворення оксидних фаз (Al_2O_3 , Fe_3O_4 , Fe_2O_3).

Результати порівняльного аналізу дослідження мікроструктури покриттів (рис. 4.8) показали, що в умовах блоку 180/4.8 утворилися покриття з високою мікронеоднорідністю та пористістю. Структура покриттів, отриманих в умовах блоку 230/6.0, щільна, однорідна, дрібнодисперсна.

Для подальшого розгляду були відібрані покриття, отримані в експериментах 5, 7 і 8. При нанесенні покриттів в цих умовах постійною

характеристикою процесу була питоме тепловкладення дуги у одиницю напиленого матеріалу – 2,35 кВт·год/м, що характеризує стадію плавлення дроту в зоні дуги. Другий показник, що характеризує нагрівання частинок напилюваного матеріалу, пов'язаний з температурою газового струменя. Його оцінка може бути проведена шляхом розрахунку тепловкладення на одиницю об'єму газу $I \cdot U / Q_{\text{пов}}$; для експерименту 5 це значення становить 0,345 кВт·год/м³, для експериментів 7 і 8 воно становить 0,307 кВт·год/м³. За характеристику процесу розпилення з урахуванням тривалості перебування частинок в об'ємі струменя прийнято співвідношення дистанції напилення та витрати газу, яке пов'язане між собою наступним співвідношенням – $h / Q_{\text{пов}}$. Значення цієї характеристики дорівнює 3,75 (дослід 5); 3,3 (дослід 7); та 4,9 (дослід 8) відповідно.

Таким чином, експеримент 5 можна охарактеризувати умовами підвищення теплової активності плазмового струменя при малій відстані розпилення 150 мм. В умовах експерименту 7 має місце менше надходження тепла в струмінь у поєднанні з довшим часом перебування частинок у ньому через збільшення швидкості струменя, що обмежує ступінь нагрівання розпиленних частинок. Під час експерименту 8 більший час перебування частинок у струмені у поєднанні зі зниженням термічної активності струменя створює умови для розвитку процесів окислення напилюваного матеріалу.

За результатами РСФА встановлено, що у всіх зразках основною фазою є інтерметалід типу Fe_3Al . Ці результати підтверджують дані, отримані методом скануючої електронної мікроскопії в поєднанні з РСМА (рис. 4.10, табл. 4.11). Вміст алюмінію, отриманий у зразках скануванням п'яти-семи ділянок різного розміру, усереднений по всій площі поперечного перерізу покриття, знаходився в межах області однорідності інтерметаліду Fe_3Al . Аналіз окремих структурних компонентів покриття, виконаний за допомогою електронного зонда розміром 1,5 мкм, виявив тверді розчини алюмінію в залізі (спектр 6, 8; рис. 4.10, а). Також було виявлено оксид алюмінію Al_2O_3 (спектр 4, рис. 4.10, з) та оксид заліза складу FeO (спектр 6, рис. 4.10, б).

Характерно, що оксидні фази в основному розташовані на границях ламелей та між покриттям та основою (спектри 1, рис. 4.10, в і табл. 4.11, рис. 4.9, б).

РСФА (табл. 4.12) показав наявність оксиду алюмінію в усіх зразках та невеликий вміст оксиду заліза в покриттях, проте є відмінності в їх якісному складі. Так, у зразках № 1 і № 2 виявлено FeO оксид заліза (вюстит), який утворюється на поверхні заліза при температурах 700 і 800 °С. В інших випадках основною оксидною фазою був Fe₃O₄ (магнетит) – найбільш стабільне залізокисневе з'єднання. Сліди Fe₂O₃ (гематит) виявлені лише у зразку № 8 (максимальні значення всіх експериментальних параметрів). Fe₂O₃ утворюється при окисленні заліза при температурах 600–900 °С. Тут Fe₃O₄ і FeO присутні під плівкою Fe₂O₃. У покритті, поряд з Fe₂O₃ виявлено сліди Fe₃O₄. Залізо присутнє у всіх зразках (насправді, як показало РСМА, це тверді розчини алюмінію в залізі) у вигляді двох модифікацій α і γ. При цьому вміст α-Fe у всіх зразках, крім № 6, у 1,5–5 разів вищий, ніж у γ-Fe. Лише у зразках № 6, навпаки, вміст γ-Fe майже в 7 разів перевищує вміст α-Fe. При цьому кількість непрореагованого заліза, подібного до алюмінію, у всіх зразках незначна.

Також слід звернути увагу на забарвлення окремих структурних компонентів покриття, а саме на найсвітліші ділянки – можна їх ідентифікувати як тверді розчини алюмінію в залізі. При цьому сірий колір характерний для інтерметаліду Fe₃Al, а темний, що має найбільшу мікротвердість, – для оксидних фаз.

Таким чином, за результатами проведеної роботи встановлено, що найбільш сприятливим для формування FeAl в умовах ПДН при напиленні Fe-Al порошкового дроту слід вважати такий режим:

Струм – 230А;

Витрата повітря – 40 м³/год;

Дистанція напилення – 150 мм;

Швидкість подачі дроту – 6 м/хв.

У цих умовах формувалось покриття, що складається з основної фази Fe_3Al і твердих розчинів Al в Fe зі слідами оксидів з пористістю 1,5 об. % і мікротвердістю 3024 ± 761 МПа.

4.4. Властивості інтерметалідних покриттів на основі Fe_3Al , отриманих плазово-дуговим розпиленням струмопровідного порошкового дроту

Досліджено покриття FeAl , отримані на режимах 5, 7 і 8, з метою визначення їх термостійкості, зносостійкості (абразивної, газоабразивної) і корозійної стійкості. Вимірювали термостійкість покриттів, відокремлених від основи, де основною фазою є інтерметалід Fe_3Al (рис. 4.11).

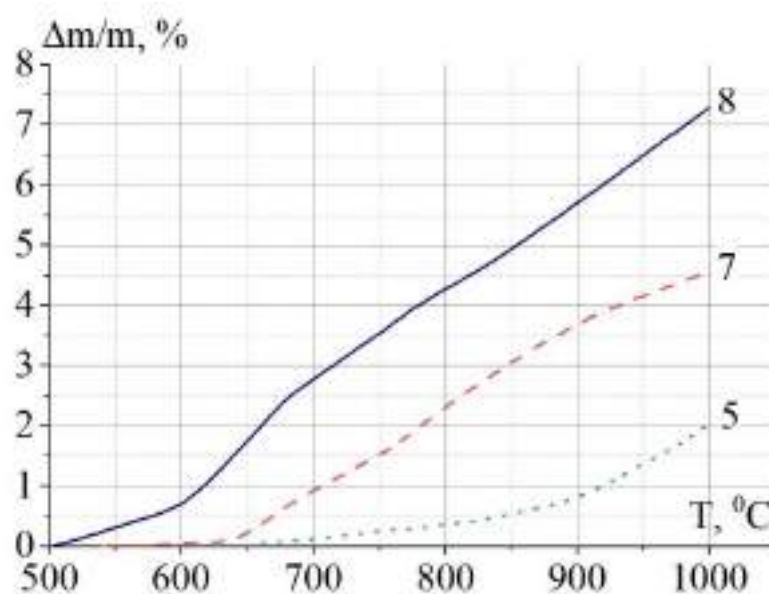


Рис. 4.11. Залежність зміни маси зразка від температури випробувань для покриттів, отриманих методом плазово-дугового напилення (режими 5, 7, 8), відокремлених від основи

Випробування покриттів на газоабразивну зносостійкість проводили при кімнатній температурі та нагріванні до 550 °C. Дані, отримані на зразках

зі сталі S235 для порівняння зносостійкості покриттів. Абразивну зносостійкість досліджували при терті об нежорстко закріплені абразивні частинки. Згідно цих даних будувались наступні графічні залежності – рис. 4.12, 4.13.

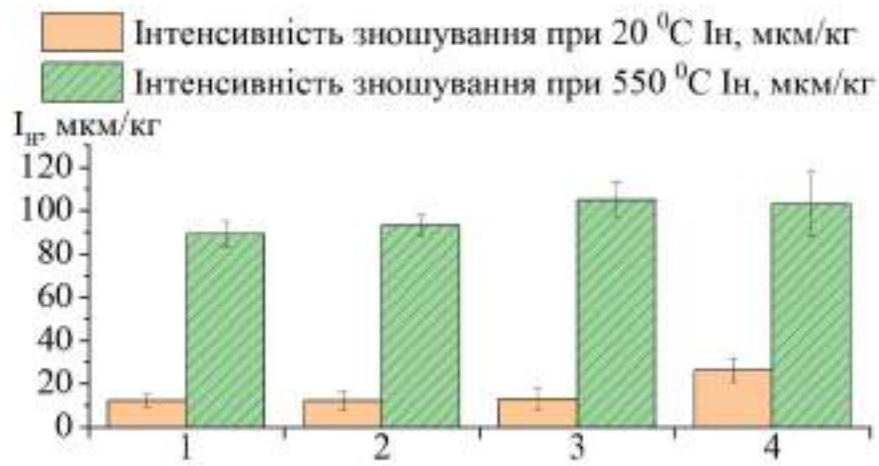


Рис. 4.12. Інтенсивність газоабразивного зношування покриттів напилених методом плазмово-дугового напилення, де: 1 - покриття Fe₃Al (режим № 5); 2 – покриття Fe₃Al (режим № 7); 3 – покриття Fe₃Al (режим № 8); 4 – сталь S235

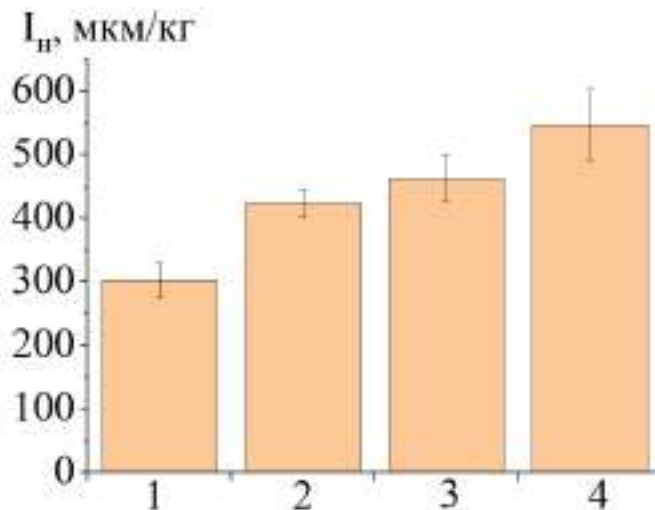


Рис. 4.13. Інтенсивність абразивного зношування покриттів напилених методом плазмово-дугового напилення, де: 1 – покриття Fe₃Al (режим № 5); 2 – покриття Fe₃Al (режим № 7); 3 – покриття Fe₃Al (режим № 8); 4 – сталь S235

Результати досліджень електрохімічних властивостей плазово-дугових покриттів наведено у табл. 4.14.

Таблиця 4.14. Результати електрохімічних випробувань FeAl покриттів, виготовлених з порошкового дроту методом ПДН

№ режиму	Товщина покриття, мкм	Режим напilenня			3 % NaCl		0.5 M H ₂ SO ₄	
		I, А	Q _{пов.} , м ³ /год	h, мм	Eс, В	I, А/см ²	Eс, В	I, А/см ²
5	600–700	230	40	150	–0.52	2.5 · 10 ^{–6}	–0.34	2.7 · 10 ^{–5}
7	400	230	45	220	–0.54	3.12 · 10 ^{–6}	–0.33	3.0 · 10 ^{–5}
8	400	230	45	150	–0.55	2.3 · 10 ^{–6}	–0.32	2.0 · 10 ^{–5}

На основі цих даних (табл. 4.14) було розраховано опір і розрахунковий термін служби покриттів Fe-Al в 3 % розчинах NaCl (табл. 4.15), та в 0,5 % H₂SO₄ (табл. 4.16).

Таблиця 4.15. Опір і розрахунковий термін служби покриттів FeAl в 3 % NaCl, виготовлених з порошкового дроту методом ПДН

№ режими	i, А/см ²	W, г/м ² год	P, мм/р	Бал корозійної стійкості	Група стійкості	Термін служби, років
5	2.5 · 10 ^{–6}	0.026	0.030	4	Стійкий	16.7
7	3.12 · 10 ^{–6}	0.033	0.037	4	Стійкий	15.1
8	2.3 · 10 ^{–6}	0.024	0.028	4	Стійкий	15.9

Таблиця 4.16. Опір і розрахунковий ресурс Fe-Al покриттів, виготовлених з порошкового дроту методом ПДН в 0,5 % H₂SO₄

№ режими	i, А/см ²	W, г/м ² год	P, мм/р	Бал корозійної стійкості	Група стійкості	Термін служби, років
5	2.7 · 10 ^{–5}	0.28	0.31	6	Низька стійкість	1.7
7	3.0 · 10 ^{–5}	0.31	0.34	6	Низька стійкість	1.6
8	2.0 · 10 ^{–5}	0.20	0.23	5	Стійкий	2.2

Вимірювання термостійкості покриттів, відокремлених від основи, де основною фазою є інтерметалід Fe_3Al показало значний вплив співвідношення інтерметалідної та оксидної фаз на температуру початку та інтенсивність процесу окиснення покриття (табл. 4.12, рис. 4.11). Порівнюючи криві окиснення, можна помітити збільшення температур початку окиснення залежно від фазового складу при переході від режиму напилення зразка № 8 до режиму напилення зразка № 5. Інтенсивність окиснення покриттів також суттєво відрізняється в залежності від режимів і фазового складу покриттів. Так, для зразка №8 з максимальними значеннями всіх експериментальних параметрів інтенсивність окиснення зростає у всьому діапазоні температур.

Випробування на газоабразивну зносостійкість при кімнатній температурі показали, що зносостійкість покриттів з Fe-Al порошкового дроту, отриманих методом ПДН, перевищує стійкість сталі S235 в середньому у 2 рази. Стійкість до абразивного зносу покриттів ПДН з порошкових дротів на основі Fe-Al в 1,8 рази вище, ніж у сталі S235.

При дослідженні електрохімічних властивостей плазово-дугових покриттів густина струму корозії (A/cm^2) у 3 % NaCl зменшилася з $3,12 \cdot 10^{-6}$ до $2,3 \cdot 10^{-6}$; у 0,5 % розчині H_2SO_4 вона знизилася з $3,0 \cdot 10^{-5}$ до $2,0 \cdot 10^{-5}$ (табл. 4.14). Отримані результати корозійних випробувань інтерметалідних покриттів (табл. 4.15, 4.16) свідчать про те, що всі покриття, досліджені в цих середовищах, належать до групи «стійких». Ці покриття мають бали корозійної стійкості 4 і 5, з показником глибокої корозії 0,23–0,34 (мм/р). Розрахунковий термін служби цих покриттів складає, відповідно, 15,9-16,7 років в середовищі водного 3 % розчину NaCl і 1,6-2,2 роки в середовищі водного 0,5 % розчину H_2SO_4 .

4.5 Висновки до розділу

1. Вперше виявлена можливість отримання сферичних гранул інтерметалідів з основними фазами Fe_3Al і FeAl та середніми розмірами в діапазоні 115-144 мкм шляхом плазово-дугового розпилення порошкового дроту, який складається зі сталевою оболонки та наповнювачу із порошку алюмінію.

2. Досліжено мікроструктуру, мікротвердість і фазовий склад плазово-дугових покриттів напилених порошковим дротом Fe-Al, який складається зі сталеві оболонки і наповнювачу із порошку алюмінію. З'ясовано, що в процесі напилення утворюються щільні покриття з пористістю менше 1,5 об. % та мікротвердістю 3024 ± 761 МПа, де основною фазою є інтерметалід Fe_3Al .

3. Визначено експлуатаційні характеристики плазово-дугових покриттів з порошкових дротів на основі Fe-Al. Тріботехнічні випробування показали високу стійкість зазначених покриттів до абразивного зносу, яка в 1,8 рази вище, ніж у сталі S235. Результати корозійних випробувань показали високу стійкість таких покриттів в середовищах 3 % розчину NaCl і водного 0,5 % розчину H_2SO_4 , при цьому розрахунковий термін служби цих покриттів в зазначених середовищах може складати до 17 та до 2,5 років відповідно.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНИХ ГРАНУЛ І НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ СТРУМОПРОВІДНИХ ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1 Оцінка енергоефективності процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів

Досліджено енергоефективність процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту на прикладі дроту з технічного титану, що відповідає марці ERTi-2, США (аналог марки BT1-0 ГОСТ 19807-91) діаметром 1,6 мм (табл. 5.1).

Розрахунки процесів нагріву та плавлення дроту проводили за наближеним методом розрахунку В.В. Кудінова [31]. При цьому були прийняті наступні припущення:

- анодна пляма, яка розташовується на дроті викликає випаровування 2 % (мас.) від ваги витраченого дроту (на основі експериментальних досліджень з'ясовано, що при розпиленні нейтрального дроту у воду вага зібраного порошку на 4 % (мас.) менше ваги розпиленого порошку, а при розпиленні струмопровідного дроту ця величина складала ≈ 6 % (мас.).

- температура рідких капель у місці формування розплаву на торці дроту дорівнює температурі плавлення металу (температуру часток в зоні формування розплаву вимірювали оптичним пірометром, з'ясовано що їх температура перевищує температуру плавлення металу на 200-300 °С, тому цим перегрівом нехтували і вважали, що дріт у зоні розпилення нагрівається до температури плавлення);

- коефіцієнт загальної тепловіддачі від газу до дроту визначали виходячи з режиму нагріву та швидкості плавлення нейтрального дроту (при

цьому режим нагріву дроту встановлювали таким чином, щоб середньомасова температура плазми при розпиленні нейтрального дроту дорівнювала середньомасовій температурі плазми при розпиленні струмопровідного дроту).

Було розраховано загальний баланс потужності на «дроті-аноді», що нагрівається плазмовою дугою:

$$q_T + q_e + q_{дж} = q_{пл} + q_{вип}, \quad (5.1)$$

де q_T – потужність, що передається дроту за рахунок променистого та конвективного теплообміну зі струменем газу; q_e – потужність, що передається дроту від електронів; $q_{дж}$ – потужність, що виділяється у вильоті дроту при проходженні струму; $q_{пл} + q_{вип}$ – потужність, що витрачається на нагрів, плавлення та випаровування дроту.

Середньомасову температуру газу в сопловому каналі плазмотрону було розраховано за наступною формулою [31]:

$$T_{Ar} = \frac{I[U - (U_k + U_a)]}{\pi d_c \alpha_c l_d} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi d_c \alpha_c l_d}{c_p \theta}} \right) \quad (5.2)$$

де I – струм, А; U – напруга дуги; d_c – діаметр сопла, м; v – витрата аргону (масова швидкість, кг/с; l_d – довжина дуги, м; $U_k + U_a$ – сума катодного й анодного падіння напруги, що дорівнює 7 В; α_c – коефіцієнт теплообміну між газом та каналом сопла, $\alpha_c = 8,38 \cdot 10^2$ Вт/м²·°К; c_p – питома теплоємність аргону, яка у інтервалі температур 8000...12000 можна вважати постійною і рівною $c_p = 11,3 \cdot 10^2$ Дж/кг·°К.

Для випадку розпилення струмопровідного дроту струм дуги складав $I = 250$ А, напруга дуги $U = 65$ В, витрата аргону (масова швидкість) $v = 1,49 \cdot 10^{-3}$ кг/с, діаметр сопла $d_c = 3$ мм, довжині сопла 2 мм, довжині дуги $l_d = 7$ мм (рис. 5.1) плазмовий струмінь розплавляє $V_{пл} = 3,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с титанового дроту марки Ti Grade 2 діаметром $d_{др} 1,6$ мм.

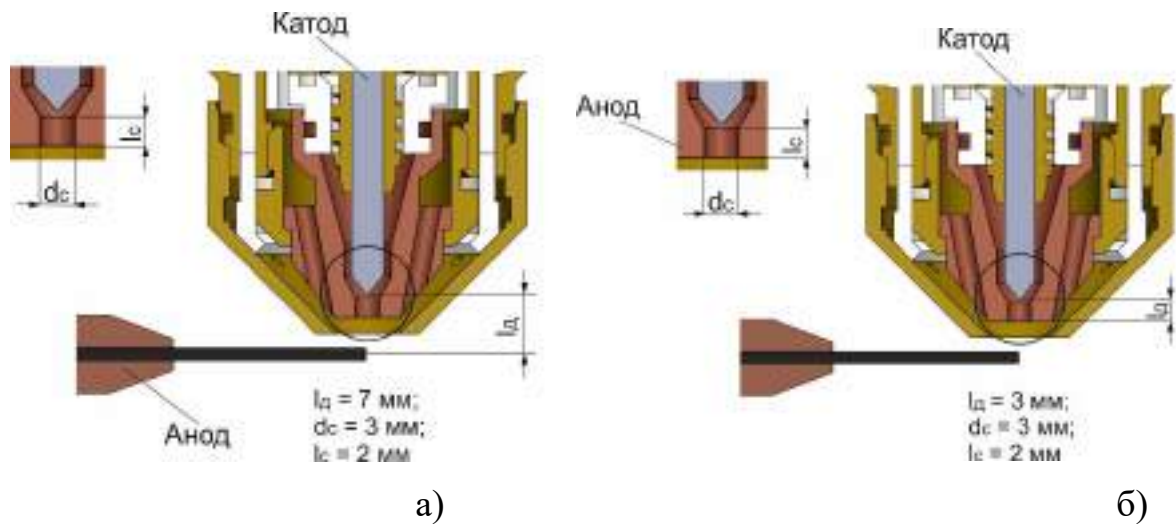


Рис. 5.1. Конструктивні параметри плазмотрону: а – при розпиленні струмопровідного дроту; б – при розпиленні нейтрального дроту

Для випадку розпилення нейтрального дроту відмінними параметрами були: струм дуги $I = 380 \text{ А}$, напруга дуги $U = 45 \text{ В}$ та її довжина $l_d = 3 \text{ мм}$ (рис. 5.1). Це забезпечило отримання однакової середньомасової температури аргонної плазми для обох випадків, і відповідно однакову потужність, що передається від плазми до дроту. Згідно з експериментальними даними прийнято, що при такому режимі роботи плазмовий струмінь розплавляє $V_{\text{пл}} = 4 \text{ кг/год} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ нейтрального титанового дроту марки ERTi-2 діаметром $d_{\text{др}} 1,6 \text{ мм}$

Для знаходження потужності, що передається титановому дроту за рахунок теплообміну зі струменем газу при плавленні нейтрального дроту автори запропонували наступну емпіричну формулу: $q_T = V_{\text{пл}} \cdot (\lambda + H) = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot (3,58 \cdot 10^5 + 3,15 \cdot 10^5) = 741 \text{ Вт}$

де $V_{\text{пл}}$ - швидкість плавлення нейтрального титанового дроту $V_{\text{пл}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; λ - теплота плавлення титану $\lambda = 3,58 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ (табл. 5.1); H - ентальпія титану (при нагріванні від 298 °К до 1945 °К) $H = 3,15 \cdot 10^5 \text{ Дж/Кг}$ (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Термодинамічні та теплофізичні властивості титану технічного ERTi-2 (марки BT1-0) [92]

№	Властивість	Значення
1	Температура плавлення $T_{пл}$, °К	1945
2	Температура кипіння $T_{кип}$, °К	3560
3	Теплота плавлення λ , Дж/кг	$3,58 \cdot 10^5$
4	Теплота випаровування $L_{вип}$, Дж/кг	$8,97 \cdot 10^6$
5	Теплоємність титану C_p (при 1945 °К), Дж/кг °К	989,2
6	Ентальпія титану H при нагріванні від 298 °К до 1945 °К (рідкий титан), Дж/Кг	$3,15 \cdot 10^5$

Результати, отримані авторами на основі експериментальних досліджень [31], показали, що теплообмін між газом та дротом виникає на ділянці $d_c/2$ (рис. 5.2), де дріт нагрівається від кімнатної температури до температури плавлення металу $T_{пл}$. При цьому автори зробили припущення що, дріт на ділянці $d_c/2$ має середню температуру $T_{др} = T_{пл}/2$.

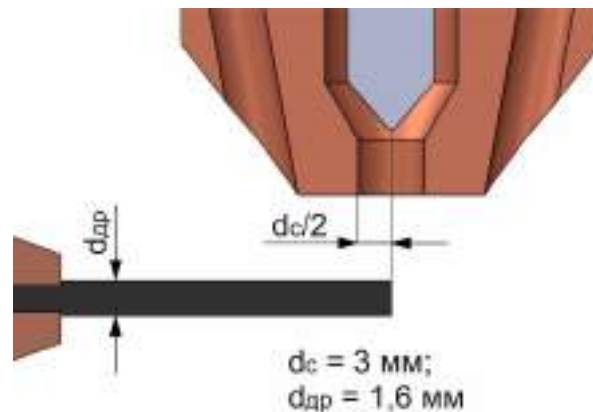


Рис. 5.2. Конструктивні параметри плазмотрону при визначенні поверхні теплообміну зі струменем газу

Тоді, потужність що передається дроту за рахунок теплообміну зі струменем газу визначається:

$$q_T = F \cdot \alpha_T (T_{Ar} - T_{др}), \quad (5.3)$$

де F – площа поверхневого теплообміну, m^2 ; α_T – коефіцієнт повної тепловіддачі від газу до дроту, $Вт/м^2$; T_{Ar} – середньомасова температура аргонної плазми, °К; $T_{др}$ – температура дроту, °К.

Площа поверхневого теплообміну визначається:

$$F = \frac{\pi d_{др}^2}{4} + \pi \cdot d_{др} \cdot \frac{d_c}{2}, \quad (5.4)$$

де $d_{др}$ – діаметр дроту, який дорівнює 1,6·мм; d_c – діаметр сопла, дорівнює 3·мм.

Потужність, що передається дроту від електронів визначається:

$$q_e = I \cdot (U_{a(Ar)} + \varphi), \quad (5.5)$$

де I – струм, що протікає через дріт, А; $U_{a(Ar)}$ – величини анодного падіння напруги для металу дроту у аргоні 2,5 В; φ – робота виходу електронів для металу аноду, 3,9 В.

$$q_{дж} = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (5.6)$$

де I – струм, що протікає через дріт, А; ρ – електричний опір провідника зі струмом, для титану дорівнює $\rho = 1,68 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; l – довжина провідника (відстань від місця токопідводу), $l = 10$ мм; S – площа його поперечного перерізу дроту діаметром 1,6 мм, $S = 2,6 \cdot 10^{-6}$ м².

Оскільки при розпиленні струмопровідного дроту випаровується 2 % від загальної маси порошку знайшли швидкість випаровування титану $V_{вип} = V_{пл} \cdot \%_{вип} = 6,6 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Для знаходження потужності що витрачається на випаровування матеріалу дроту автори запропонували наступну емпіричну формулу: $q_{вип} = V_{вип} \cdot L_{вип} = 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot 8,97 \cdot 10^6 = 592$ Дж.

де $V_{вип}$ – швидкість випаровування титану при розпиленні струмопровідного дроту $V_{вип} = 6,6 \cdot 10^{-5}$ кг/с; $L_{вип}$ – теплота випаровування, $L_{вип} = 8,97 \cdot 10^6$ Дж/кг (табл. 5.1).

Загальна кількість теплоти, що вкладається у дріт в процесі плазмово-дугового розпилення визначається за наступною формулою:

$$q_{заг} = \eta \cdot I \cdot U, \quad (5.7)$$

Було розраховано внесок кожної складової у загальний баланс потужності на «дроті-аноді» із титану при потужності дуги 16 кВт, результати розрахунків зведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Загальний баланс потужності на «дроті-аноді»

Статті балансу	Потужність, Вт	Відносна величина балансу, %
<i>Отримувана потужність</i>		
Дроту від електронів.....	1600	~58
Дроту при теплообміні зі струменем плазми.....	741	~27
Дроту при протіканні струму.....	403	~15
Загалом:.....	2744	100
<i>Потужність, що витрачається</i>		
На нагрів і плавлення дроту.....	2172	~79
На випаровування дроту.....	572	~21
Загалом:.....	2744	100

У випадку нагрівання плазмовою дугою нейтрального титанового дроту, к.к.д. дорівнює:

$$\eta = \frac{741}{380 \cdot 45} \approx 4 \%$$

Для випадку розпилення струмопровідного титанового дроту:

$$\eta = \frac{2744}{250 \cdot 65} \approx 17 \%$$

Проведені експериментальні дослідження показали, що продуктивність способу плазмово-дугового розпилення струмопровідного титанового дроту 1,6 мм марки Ti Grade 2 в діапазоні споживаної потужності плазмотрону 15-20 кВт знаходиться на рівні 10-12 кг/годину. Продуктивність способу плазмового розпилення нейтрального дроту 3,2 мм марки Ti-6Al-4V згідно з літературними даними може складати ~2,5 кг/год при потужності плазмотрону ~ 28 кВт [93] та до 5 кг/год при потужності до 90 кВт [94]. Також, слід зазначити, що для PREP технології плазмової сферодизації прутків із сплаву марки Ti-6Al-4 діаметром 75 мм продуктивність процесу складає ~12,5 кг/год при споживаній потужності ~ 38 кВт [95].

Також слід зауважити, що показник питомих енерговитрат (кВт·год/кг порошку) для отримання 1 кг титанового порошку за технологією плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту складає 1,5-1,7 кВт·год/кг, що є значно нижчим показником у порівнянні з іншими промисловими

технологіями плазмового розпилення – розпиленням нейтрального дроту, де значення показника питомих енерговитрат можуть варіювати в широких межах в залежності від характеристик обладнання та становити 11 кВт·год/кг (при потужності плазмотрону 28 кВт) або 18 кВт·год/кг (при загальній потужності трьох плазмотронів 90 кВт). Для технології PREP, питома споживана потужність для отримання 1 кг титанового порошку становить біля 3 кВт·год/кг. При цьому потрібно врахувати, що дослідження в даній роботі приводили на прикладі титанового дроту діаметром 1,6 мм.

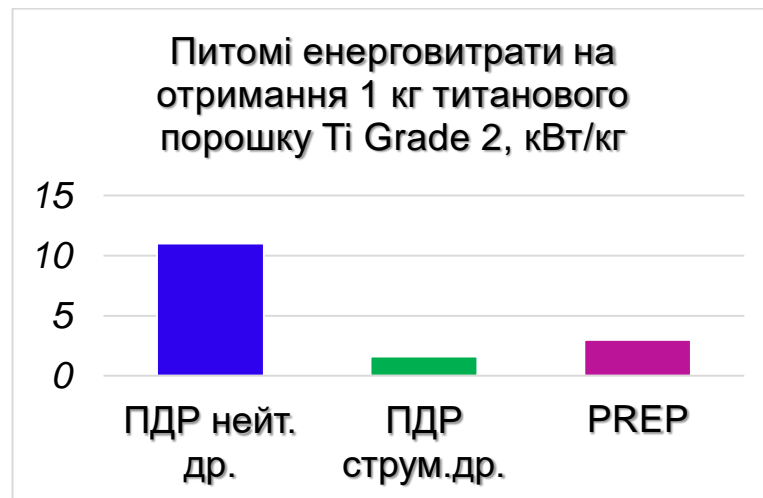


Рис. 5.3. Питомі енерговитрати на отримання 1 кг сферичного титанового порошку Ti Grade 2 для різних технологій плазмової сферодизації

Таким чином, процес плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту-аноду характеризується в 4,25 рази більш високими значеннями коефіцієнту корисної дії в порівнянні із плазмово-дуговим розпилення нейтрального присадкового дроту, що істотно впливає на продуктивність процесу, максимальні значення якої можуть досягати 12 кг/год для споживаної потужності 20 кВт. Подальше підвищення продуктивності даного процесу досягається збільшенням електричної потужності джерел живлення і плазмотрону обладнання для плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів.

Розрахунки показують, що при підвищенні потужності даного обладнання від 15-20 кВт (як в даних дослідження) до 40 кВт можна

очікувати збільшення показника продуктивності процесу до 18-20 кг/годину. В цілому, можливості плазмового обладнання дозволяють підвищувати потужність до 100-120 кВт, що дозволяє використовувати для розпилення, як дроти, так і прутки діаметрами 3-6 мм і вище, і ще в більшій мірі збільшувати показник продуктивності процесу отримання сферичних титанових порошків.

5.2 Розробка обладнання і практичних технологій плазмово-дугового розпилення струмопровідних матеріалів

5.2.1 Розробка дослідно-промислового плазмотрону підвищеної потужності для плазмово-дугового розпилення і нанесення покриттів із струмопровідних дротів

Опираючись на результати попередніх розробок промислових варіантів плазмотронів для плазмово-дугового напилення було спроектовано вдосконалений плазмотрон «PLAZER 50-W» для плазмово-дугового розпилення та нанесення покриттів на зовнішні і внутрішні поверхні (діаметром більше 70 мм).

Оптимізація конструкції плазмотрону полягала у отриманні більш дрібнодисперсної фракції продуктів розпилення, що утворюються при плавленні і розпиленні струмопровідного дроту. Це дозволяє отримувати більш щільні покриття при напиленні і використовувати цей плазмотрон для сферодизації струмопровідних дротів (у т.ч. порошкових, де важливо досягати повної металургійної взаємодії металевої оболонки і наповнювачу) з отриманням гранул <100 мкм більше 50 % від загальної маси порошку і досягається за рахунок збільшення тепловкладення у дріт та підвищення швидкості витікання і температурних характеристик плазмового струменя. Тому оптимізація конструктивних параметрів плазмотрону полягала у наступному:

- збільшення струмового навантаження досягається за рахунок проектування системи отворів та штуцерів, які дозволяє здійснювати ефективне водяне охолодження соплової частини, катодного і анодного вузлів (це дозволило використовувати значення струму на рівні 400-500 А у порівнянні з прототипом, де за рахунок використання повітряного охолодження цей показник не може перевищувати 300 А). Також конструкція з водяним охолодженням дозволяє використовувати у якості плазмоутворюючого газу гелій або суміші на його основі, що у свою чергу інтенсифікує процеси нагріву, плавлення, диспергування і сферодизації струмопровідних дротів;

- оптимізації геометрії газорозрядної камери за рахунок зміни співвідношень довжини соплового каналу l_c к його діаметру d_c (l_c/d_c) з 1,0 до 1,4 збільшується швидкість витікання плазмового струменя з 560 до 650 м/с (згідно розрахункам у CFD програмному продукті) та побудови сферичної розширюючої ділянки на виході з сопла (по типу сопла Лавалю), яке забезпечує отримання більш рівномірної температури і електричної щільності плазми та протяжності плазмового струменя, що у свою чергу інтенсифікує процеси сферодизації та забезпечує більше прискорення часток. Також була розроблена система обдуву плазмового струменя супутнім потоком газу у зоні формування конусу розпилення, яка складається з 10 отворів діаметром 2 мм, які забезпечують ламінарне витікання потоку супутнього газу (у порівнянні з прототипом, де потік супутнього газу витікає через кільцевий зазор з переважно турбулентним характером витікання струменя). Це також забезпечує збільшення протяжності високошвидкісної, високотемпературної зони плазмового струменя, зменшення кута розкриття конусу розпилення та отримання оптимального складу дисперсної фази;

- завдяки невеликим габаритам плазмотрону є можливість його застосовувати для напилення внутрішніх поверхонь діаметром більше 70 мм та для сферодизації струмопровідних дротів у камерах розпилення (у т.ч. малогабаритних).

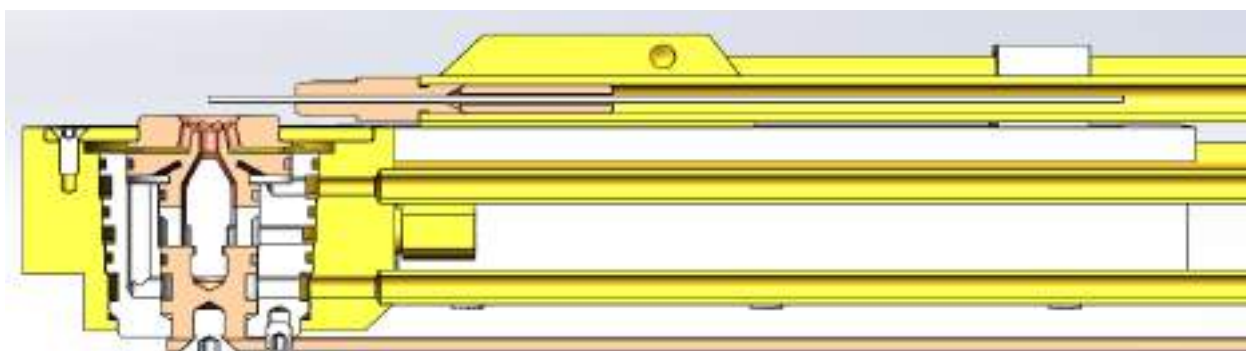
Зовнішній вигляд, конструкція плазмотрону та його характеристики наведено на рис. 5.4, та у табл. 5.3.



а)



б)



в)

Рис. 5.4. Зовнішній вигляд і комп'ютерна 3D модель спроектованого плазмотрона для плазово-дугового напилення: а – його зовнішній вигляд; б – зовнішній вигляд у зборі з анодним вузлом та кріпленням до маніпулятора; в – 3D модель газоразрядної камери

Таблиця 5.3. Технічні характеристики серійного «PLAZER 30-W» та розробленого «PLAZER 50-W» плазмотронів

Параметр	Значення	
	«PLAZER 30-W»	«PLAZER 50-W»
Максимальний струм, А	300	500
Максимальна напруга, В	80	120
Витрата супутнього газу, м ³ /год.	30-60	15-30
Витрата плазмоутворюючого газу, м ³ /год.	1-3	1-3
Тип плазмоутворюючого газу	Аргон	Аргон, гелій та їх суміші
Діаметр сопла мм	3	3
Габарити ДхШхВ, мм	90x70x175	250x60x50
Вага, кг	1,5	1,5
Тип охолодження	повітряне	водяне

Було виконано дослідження гранулометричного складу продуктів розпилення при наступних параметрах процесу (табл. 5.4).

Таблиця 5.4. Параметри режиму плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту AISI 304 діаметром 1,6 мм

Марка плазмотрону	Параметр					
	Сила струму, А	Напруга дуги, В	Витрата аргону, л/хв.	Витрата повітря, м ³ /год.	Відстань катод-анод, мм	Швидкість подачі дроту, м/хв.
PLAZER 30-W	235	80	50	48	10	10,0
PLAZER 50-W	235	85	50	30	10	10,5

Аналіз гранулометричного складу продуктів розпилення показав (рис. 5.5), що при розпиленні на серійному плазмотроні «PLAZER 30-W» основною фракцією порошку (90 % від загальної маси порошку) є фракція 63-250 мкм, а для плазмотрону «PLAZER 50-W» 63-160 мкм. При цьому для розробленого плазмотрону характерна відсутність фракції 250-315 мкм, а доля фракції 160-200 мкм не перевищує 2 % мас. (для прототипу цей показник складає 20 %).

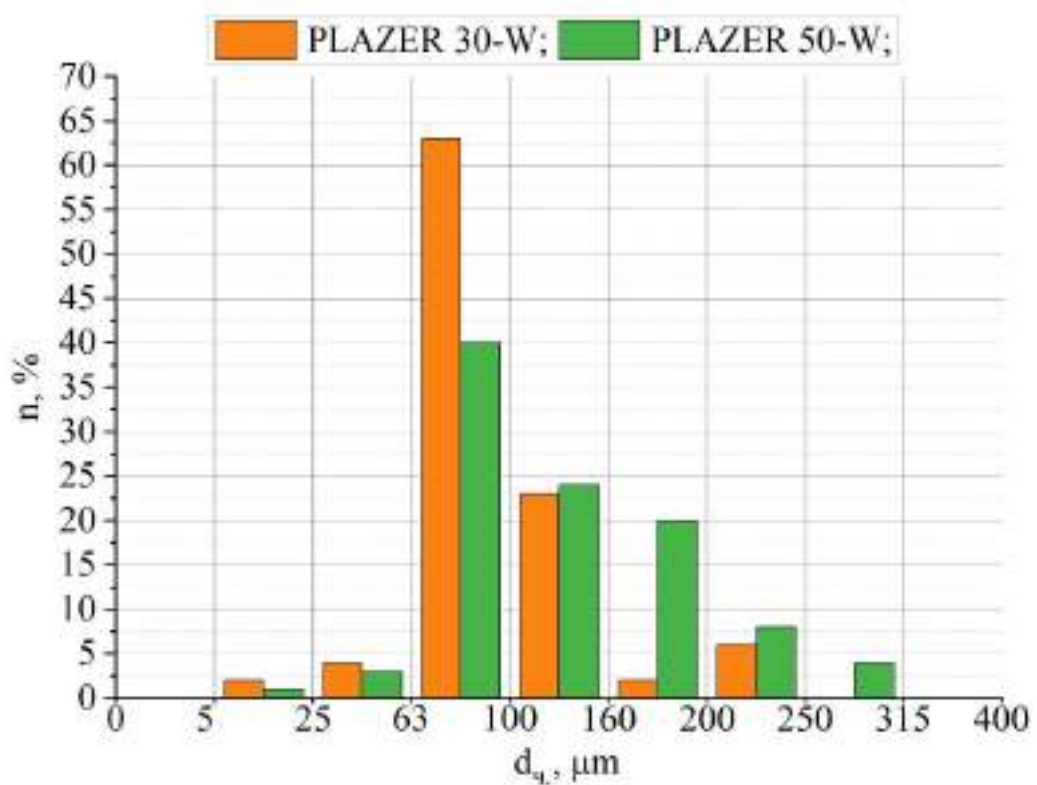


Рис. 5.5. Розподіл гранулометричного складу гранул, отриманих з допомогою розробленого плазматрону «PLAZER 50-W» та плазматрону попередньої модифікації «PLAZER 30-W»

Було розраховано середні розміри розпилюваних часток, ці розрахунки показали, що розроблена конструкція газорозрядної камери плазматрону сприяє зменшенню цього показника з 134 до 99 мкм. Це повинно сприяти отриманню більш однорідної, мілкодисперсної ламелярної структури покриття.

На цих параметрах режиму було напилено покриття з струмопровідного компактного дроту з нержавіючої сталі марки AISI 304 $d=1,6$ мм. На рис. 5.6 наведено порівняння мікроструктури покриттів, напилених на прототипі і розробленому плазматроні при однакових режимах розпилення.



а)

б)

Рис. 5.6. Мікроструктура покриття із нержавіючого дроту AISI 304 напиленого на серійному плазмотроні «PLAZER 30-W» (а) та на розробленому плазмотроні «PLAZER 50-W» (б)

Аналіз мікроструктури покриття, напиленого на новому плазмотроні показав, що у даному випадку покриття напилене на розробленому плазмотроні є однорідним, з пористістю близькою до 2 % об. При цьому у структурі покриття майже відсутні округлі сферичні нерозплавлені частки, товщина ламелей зменшилась з 25 мкм до 15 мкм.

Отримані результати були апробовані при напиленні внутрішньої циліндричної поверхні ($d_{\text{вн}}=95$ мм) струмопровідним порошковим дротом марки ПП-НП-100Х15Н2Г2Р (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Зовнішній вигляд двофазного запиленого струменя (зліва) та процесу напилення внутрішньої циліндричної поверхні ($d_{\text{вн}}=95$ мм) струмопровідним порошковим дротом ПП-НП-100Х15Н2Г2Р

Дослідження форми часток дисперсної фази показало, що загалом гранули мають правильну сферичну форму (рис. 6), при цьому коефіцієнт сферичності складає $S = 0,82$. При цьому доля гранул неправильної форми, не перевищує $\sim 2\%$ (мас.).

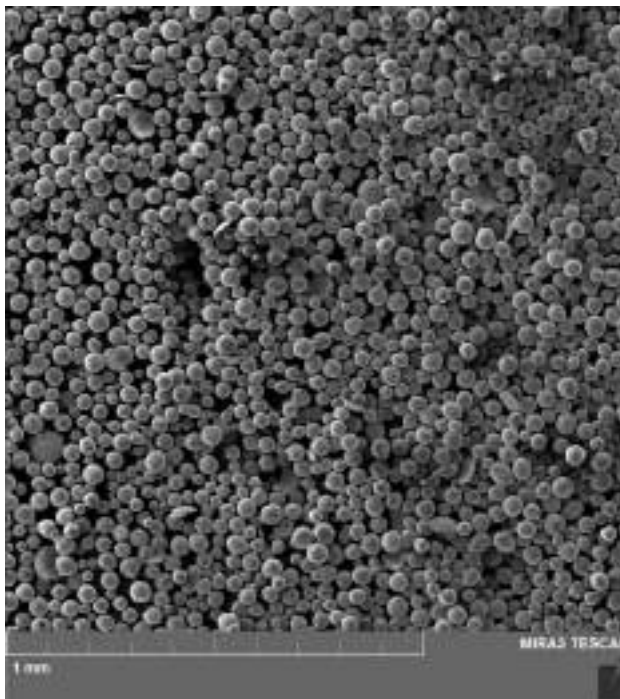


Рис. 5.8. Морфологія гранул із нержавіючої сталі AISI304 фракції 20-100 мкм, отриманих при плазово-дуговому розпиленні дроту діаметром 1,6 мм

5.2.2 Плазово-дугове розпилення струмопровідних дротів на оберненій полярності (дріт – катод)

У попередніх розділах було досліджено процеси, що протікають при плазово-дуговому розпиленні «дроту-аноду», проте існує значний науковий інтерес щодо дослідження процесу розпилення струмопровідного «дроту-катода». Це викликано наступними особливостями зазначеного процесу:

- електрична потужність даного способу може досягати 200 кВт за рахунок «витягування» дуги у порожніні мідного електроду [96], що дає змогу розпилювати широку номенклатури матеріалів (суцільні та порошкові дроти, прутки та ін.);

- конструкція плазмотрону дозволяє формувати надзвуковий плазмовий струмінь, що значно інтенсифікує процеси диспергування та підвищує кількість виробленої дрібнодисперсної (<80 мкм) фракції порошку [97];

- досягається низька швидкість ерозії електроду (0,01 нг / С при 40 кВт), який не має обмежень щодо кількості його запусків у роботу, що також значно підвищує ресурс роботи плазмового обладнання [98];

– тепловий к.к.д. плазмотрону з мідним порожнім електродом знаходиться на рівні 0,80 – 0,85 при цьому потужність, що передається виробу плазмовим потоком $P_{\text{п}}$ при однакових режимах роботи в 1,2 - 1,5 рази більше, ніж на прямій полярності [99].

Було розроблено плазмотрон з використанням підходів напрацьованих при розробці плазмотронів для різання на оберненій полярності [96] (рис. 5.9) під задачі розпилення струмопровідного «дроту-катоду». На розробленому плазмотроні виконано розпилення дроту діаметром 1,6 мм із низьковуглецевої сталі ER70S-6 на наступному режимі: струмі 240 А; робочій напрузі на дузі 320 В; витраті плазмоутворюючого газу 5,0 м³/год.; швидкості подачі дроту 12 м/хв.

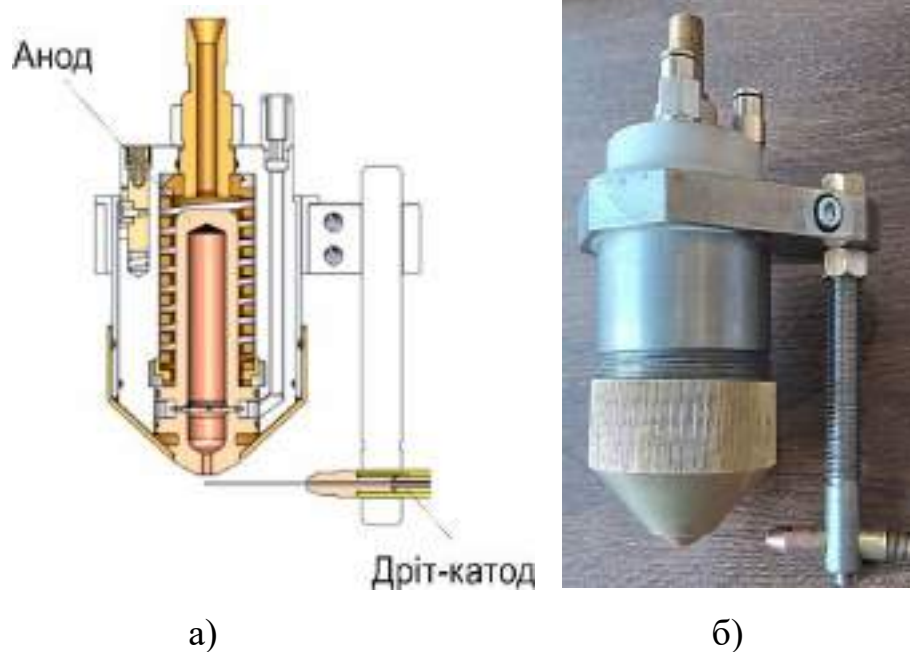


Рис. 5.9. 3Д модель плазмотрону для розпилення на оберненій полярності (а) та його зовнішній вигляд (б)

Аналіз гранулометричного складу гранул (рис. 5.10), отриманих при розпиленні струмопровідного дроту показав, що для заданого режиму розпилення дроту з низьковуглецевої сталі основною фракцією є фракція 25-315 мкм, яка складає 90 % від загальної маси гранул, кількість фракції <25 мкм та 315-630 мкм знаходиться на досить низькому рівні і не перевищує 10 %. Доля фракції <160 мкм досягає майже 50 % від загальної маси гранул.

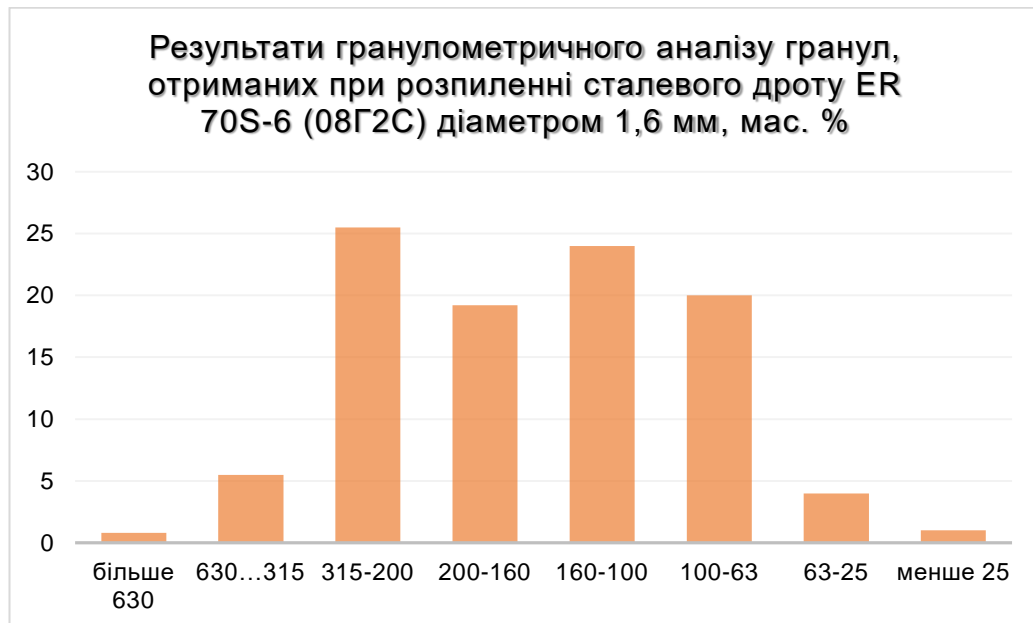


Рис. 5.10. Розподіл гранулометричного складу гранул, отриманих в процесі плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі на оберненій полярності

Аналіз морфології отриманих гранул показав, що більшість часток має правильну сферичну форму (рис. 5.11) з високим коефіцієнтом сферичності, який складає в середньому $S = 0,7-0,8$. При цьому, в загальній масі отриманих сферичних гранул доля сателітів та поодиноких часток неправильної форми складає біля 3-5 % мас.



Рис. 5.11. Морфологія сферичних гранул, отриманих в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі на оберненій полярності

5.3 Розробка установки нового покоління для нанесення покриттів плазмово-дуговим напленням струмопровідних дротів

Результати досліджень викладених у попередніх розділах дають основу для створення установки нового покоління для плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів. Особливістю цієї установки є використання нового плазмотрону для роботи на потужностях до 50 кВт, що викликає необхідність керування і контролю великою кількістю параметрів у режимі реального часу і потребує значної автоматизації технологічного процесу розпилення. Для цього було створено спеціалізовану систему керування установкою, яка включає у себе вимірювальну, пускорегулюючу, сигнальну апаратуру, у тому числі програмувальний контролер і сенсорну панель.

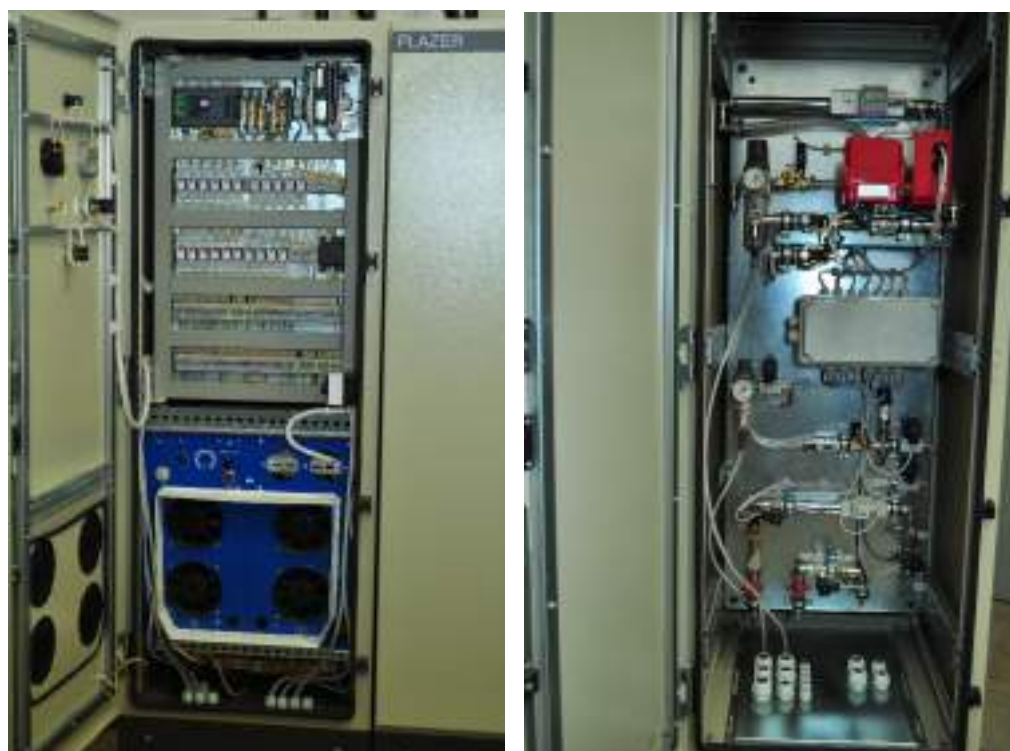
Система керування виконана на базі програмно-логічного контролерного комплексу (ПЛК). Програмне забезпечення містить у собі всі

функції керування, настроювання, індикації й аварійної сигналізації режимів роботи установки. ПЛК, виконує роль виконавчого обчислювального пристрою, який на основі отриманих даних від системи моніторингу відпрацьовує коригування параметрів процесу розпилення та коригує алгоритм роботи обладнання, змінюючи силу струму, витрат газів, швидкості подачі дроту тощо.

Вікна інтерфейсу головної системи управління (мобільного пульта управління) наведено на рис. 5.12, (в). Вони поділяються на 5 основних вікон. *Вікно автоматичного керування (Auto mode)*. Тут оператор задає мінімум основних технологічних параметрів, режим управління (зовнішній пуск/стоп, або локальний), і може запускати роботу обладнання. За управління циклом технологічного процесу повністю відповідає автоматизоване програмне забезпечення, яке відпрацьовує процес відповідно до заздалегідь прописаних алгоритмів циклограми. Зліва також наведено індикацію та виведення основних показників системи вимірювання сигналів (струм, напруги, витрати та тиску газів, температура контурів, цифровий стан датчиків, клапанів тощо). *Вікно ручного керування (Hand mode)*. Тут є можливість гнучкого керування за допомогою прямого впливу оператора на кожен вузол обладнання під контролем самого оператора. Ручне керування рекомендується проводити лише кваліфікованим фахівцем. *Вікно завдання налаштувань обладнання (Options)*. Тут є можливість задавати гнучкі налаштування обладнання, такі як межі сигналів, за якими спрацьовує система стеження за аварійними ситуаціями, також стартові, кінцеві та перехідні значення технологічних параметрів, тимчасові затримки, час реагування та спрацьовування при аварійних відключеннях та інші тонкі технологічні налаштування. *Вікно аварійних повідомлень (Alarms)*. Це вікно служить для виведення повідомлень, у разі виникнення аварійних ситуацій, які на основі останньої виміряної інформації дають зрозуміти оператору причину виникнення аварійної зупинки (це може бути недостатня витрата газів, тиску газів, занадто більший або маленький струм/напруга, перегрів

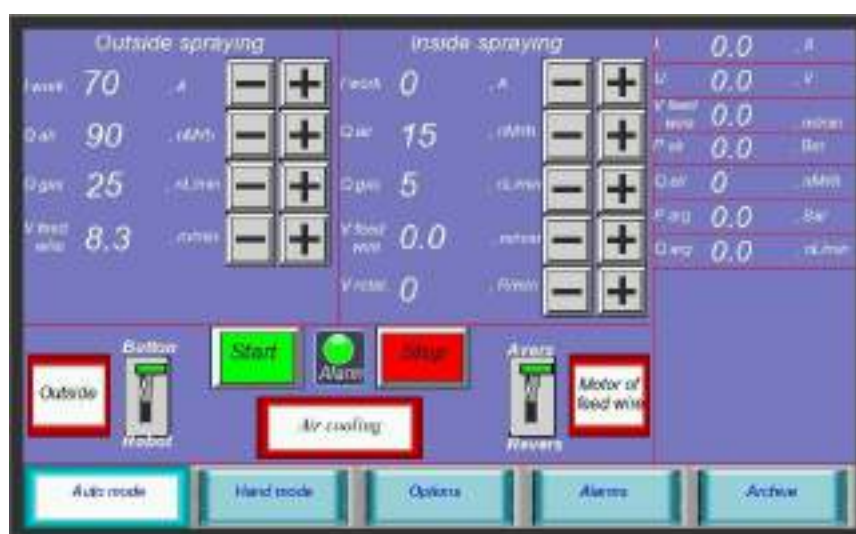
обладнання, тощо). У разі усунення причини аварії, помилку можна сбросити та заново запустити технологічний процес. *Вікно архіву даних (Archive)*. У цьому вікні відбуватиметься автоматичний запис та зберігання показань датчиків обладнання. Всі параметри пишуться на флеш-карту, і мають можливість бути експортованими на персональний комп'ютер для зберігання та аналізу даних.

Також відмінною особливістю зазначеного обладнання є покращений ергономічний дизайн і інтерфейс керування установкою, адаптований під процеси плазмово-дугового напилення зовнішніх і внутрішніх поверхонь та сферодизації дротів (рис. 5.12, в). Розроблена пневмо-гідравлічна схема (рис. 5.12, б) у поєднанні з модернізованою конструкції плазмотрону дозволяє використовувати гелій та суміші на його основі у якості плазмоутворюючого газу. Передбачена можливість подачі горючих газів в супутній газовий струмінь з метою зменшення ступеню окиснення часток для певного ряду матеріалів (за рахунок створення відновлюваної атмосфери). Також для підвищення продуктивності процесу з метою збільшення його енергоефективності (при використанні більших діаметрів дротів - 2,0...3,2 мм) були проведені роботи по підвищенню струмового навантаження на зазначеному обладнанні, з цією метою було модернізовано вузол охолодження тиристорів (були підібрані та встановлені більш потужні вентилятори), що дозволяє підвищити діапазон регулювання струмом з 380 до 500 А.



а)

б)



в)

Рис. 5.12. Зовнішній вигляд шафи керування процесом плазмово-дугового напилення струмопровідних дrotів, де: а, б – електрична частина та блок газової підготовки відповідно; в – інтерфейс панелі введення технологічних параметрів процесу

Установка такого типу (рис. 5.13) була експортована в Китай (див. Додаток А) на підприємство «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» і

використовується для напилення струмопровідним порошковим дротом труб поверхонь нагріву сміттєспалювального обладнання (розділ 5.5.2).

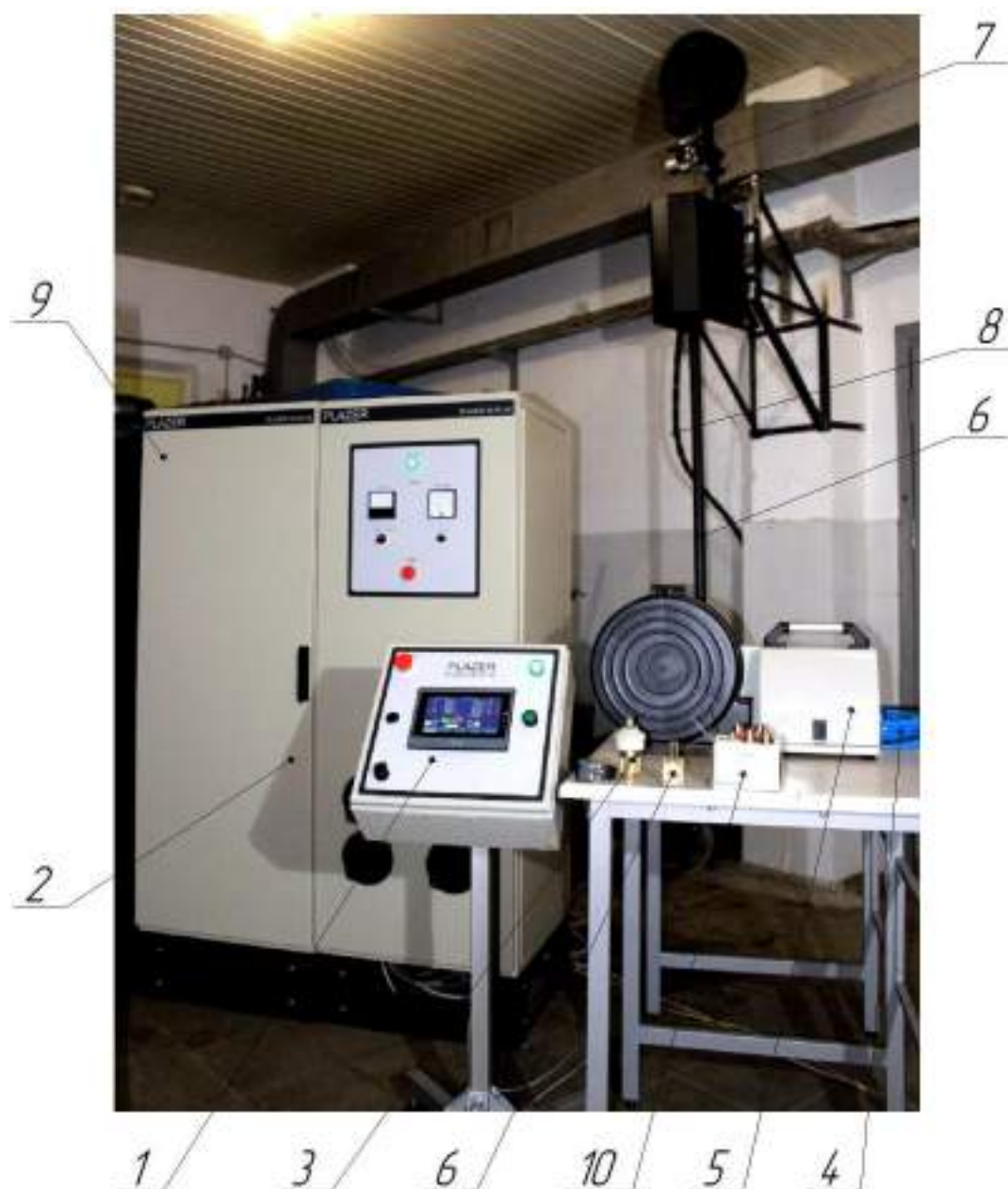


Рис. 5.13. Основні вузли установки для нанесення покриттів плазмово-дуговим напиленням струмопровідних дротів, де: 1 - система керування з програмованим контролером та сенсорною панеллю; 2 - спеціалізоване інверторне джерело електроживлення; 3 - блок плазмотрону для напилення на зовнішні поверхні; 4 - кабель – шланговий пакет плазмотрону для напилення на зовнішні поверхні; 5 - система подачі дроту для напилення на зовнішні поверхні; 6 - головка для напилення на внутрішні поверхні; 7 - система подачі дроту для напилення на внутрішні поверхні; 8 - кабель –

шланговий пакет плазмотрону для напилення на внутрішні поверхні; 9 - блок підпалу дуги плазмотрону; 10 - комплект запасних частин.

Технічні характеристики установки наведено у табл. 5.5

Таблиця 5.5. Технічні характеристики установки «PLAZER 50-PL-W»

Параметри	Значення
Споживання енергії, кВа не більше	50
Напруга мережі живлення трифазного змінного струму частотою 50 Гц, В	380
Напруга холостого ходу, В	160
Діапазон регулювання робочого струму, А	100 – 500
Діапазон регулювання робочої напруги, В	30 – 100
Найбільша тривалість включення, ПВ%	100
Витрата повітря при тиску 0,6 МПа, нм ³ /год	50
Витрата аргону або гелію при тиску 0,1 МПа, нм ³ /год	2
Швидкість подачі дроту, м/хв	5 – 15
Охолодження плазмотрона	водяне
Ресурс сопла і катода плазмотрона, годин машинного часу, не менше	100
Габаритні розміри, мм: - джерела електроживлення - шафи управління	501 x 478 x 503 605 x 605 x 1600

5.4 Розробка дослідно-промислового обладнання для отримання сферичних гранул плазово-дуговим розпиленням струмопровідних дрових матеріалів

Процес отримання сферичних гранул при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних дровів можна поділити на наступні стадії (рис. 5.14): I стадія - плавлення дроту та формування рідкого прошарку на його торці; II стадія – зрив та диспергування розплаву у плазовому струмені; III стадія - сферодизація розплавлених частинок, їх твердіння та охолодження [18].

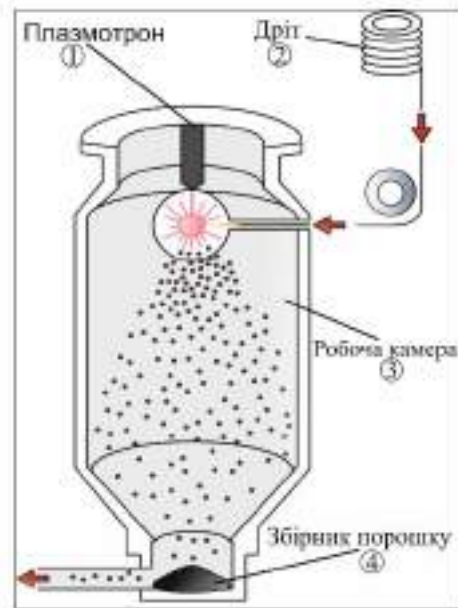


Рис. 5.14. Технологічна схема процесу плазмово-дугової сферодизації гранул

На I стадії відбувається плавлення дроту за рахунок нагрівання торця дроту теплотою електричної дуги і тепла, що виділяється під час протікання струму через провідник, це призводить до формування прошарку рідкого металу, що стікає у краплю на торці дроту. Для II стадії характерне зривання та диспергування розплаву з торця дроту. При цьому розміри цього прошарку значною мірою визначають тип механізму подальшого каплеутворення. На III стадії дрібнодисперсні краплі (10~300 мкм), що утворюються в процесі розпилення, сферодизуються під впливом сили поверхневого натягу, кристалізуються в процесі вільного падіння всередині камери розпилення та осідають на дні бункера для збору гранул.

Узагальнення даних, наведених у літературних джерелах, дозволяє запропонувати наступний підхід до проектування та виготовлення обладнання для плазмово-дугового розпилення, яке повинно забезпечувати перебіг наступних процесів (рис. 5.15), а також задовольняти низки експлуатаційних та технологічних вимог.

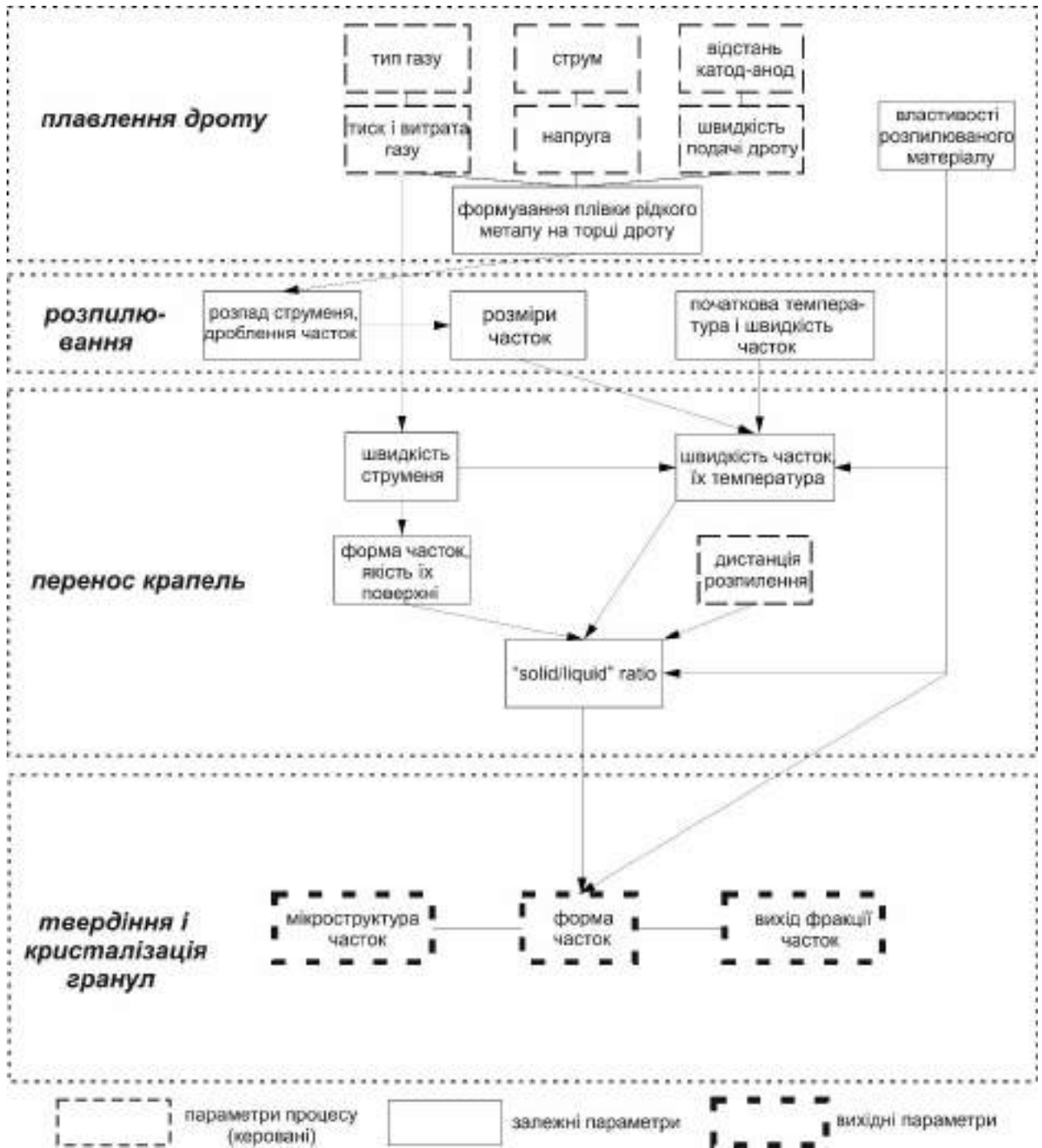


Рис. 5.15. Основні стадії процесу плазмово-дугового розпилення

До таких вимог слід віднести:

- розробка модульної, рухомої конструкції установки плазмово-дугового розпилення, яка повинна забезпечувати її зручне обслуговування, переналадження та транспортування;

- можливість регулювання параметрів процесу розпилення в широких межах, що дозволить одержати гранули з заданим гранулометричним складом та структурою;
- наявність високого ступеня автоматизації процесу розпилення для виробництва якісних гранул;
- забезпечення надійності та безпеки обладнання в процесі експлуатації;
- забезпечення високої продуктивності (10 кг/год. і більше).



Рис. 5.16. Зовнішній вигляд установки для отримання гранул за технологією плазмово-дугового розпилення

Проте, у процесі отримання високоякісних сферичних гранул існує можливість спікання частинок у збірнику і утворення конгломератів часток неправильної форми.

Такий факт можна пояснити тим, що частки, маючи високу швидкість і не встигнувши закристалізуватися, досягають бункеру для збору гранул. Такі частки утворюють конгломерати, що призводить до бракуванню продукції. Традиційно спікання у збірнику усувається збільшенням довжини прольоту

частинок, що значно збільшує габарити обладнання. Відомо, що регулюючи висоту камери розпилення, можна запобігти утворенню конгломератів з частинок, що спеклися на дні збірника та часток іррегулярної форми і контролювати властивості одержуваних порошків. Проте, у більшості випадків це вимагає використання великогабаритного обладнання, де висота камери розпилення може досягати 10...15 м (рис. 5.17), що складно реалізувати, наприклад, для лабораторних умов, коли розміри приміщення обмежені його висотою, також сюди слід віднести труднощі з обслуговуванням цієї установки.



Рис. 5.17. Зовнішній вигляд обладнання, що використовується компанією AP&C (Канада) для отримання сферичних гранул за допомогою технології плазмового розпилення дротових матеріалів [100]

Окрім цього, при проектуванні камер розпилення є необхідність створення системи управління швидкостями охолодження розпилюваних часток, для одержання порошку з необхідними механічними властивостями.

Тому для зменшення довжини прольоту частинок пропонується використати зустрічний потік газу [19]. Під протипотоком розуміють

створення потоку із середовища, спрямованого назустріч руху частинок (рис. 5.18).

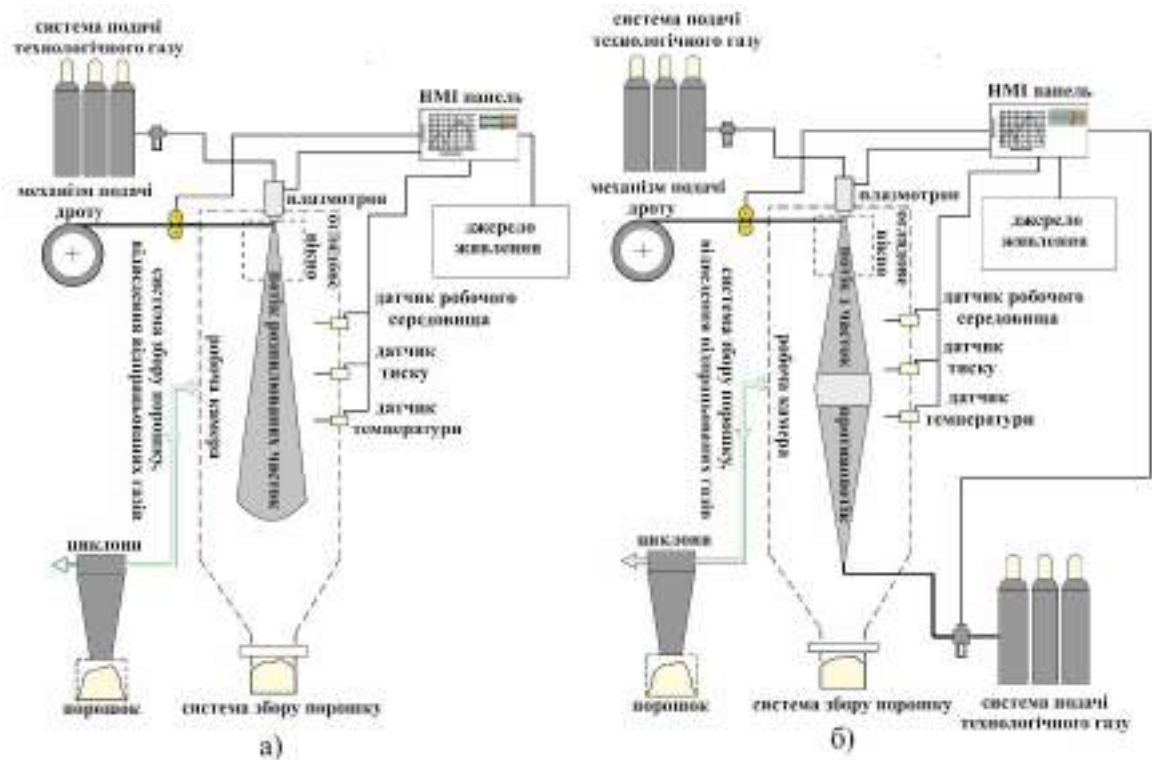


Рис. 5.18. Технологічна схема процесу плазмово-дугового розпилення у камерах без (а) та із зустрічним потоком газу (б)

Створення протипотоку забезпечує зменшення швидкості частинок (їх гальмування) та збільшення інтенсивності теплообміну частинок із середовищем. Регулювання процесів руху та теплообміну частинок запобігає створенню конгломератів частинок і дозволяє контролювати властивості одержуваних гранул. Тому доцільним є вивчення впливу протипотоку газу на гальмування розплавлених частинок та зміну інтенсивності охолодження частинок. Експериментальне визначення процесів гальмування та охолодження нагрітих частинок у потоці газу дуже складне та затратне. Тому оцінка впливу зустрічного потоку газу на процеси охолодження та гальмування металевих частинок при плазмово-дуговому розпиленні було виконано за допомогою методів математичного моделювання згідно з методикою наведеною у розділі 3.1.

Для здійснення управління та контролю швидкісними та температурними характеристиками часток було запропоновано застосування

протипотоку газу спрямованого назустріч розпилюваним часткам, підбрані його оптимальні швидкості витікання. Протипоток дозволяє здійснювати обробку у камерах розпилення, які мають довжину не більше 3 м за рахунок інтенсифікації процесів гальмування часток, збільшити швидкість теплообміну між середовищем та частками, що можна побачити по нахилу графіка (рис. 5.19-5.20).

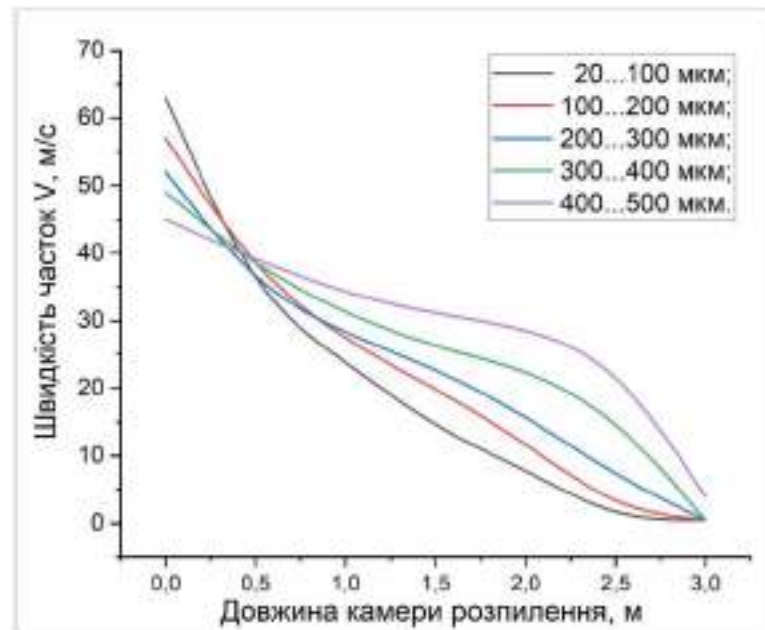


Рис. 5.19. Графік зміни швидкостей часток по довжині камери розпилення при використанні протипотоку

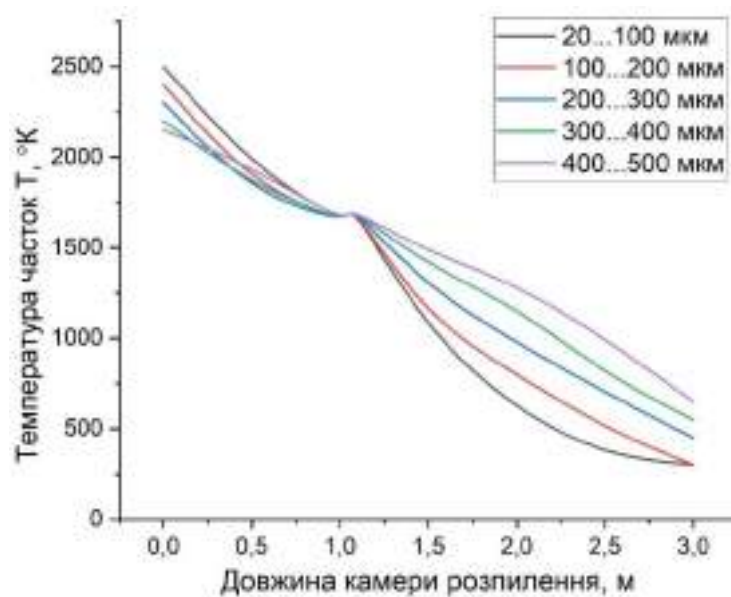


Рис. 5.20. Графік зміни температур часток по довжині камери розпилення при використанні протипотоку

Без протипотоку частка на виході з камери розпилення перебуває у частково розплавленому стані та має високі швидкості (рис. 3.27-3.28), що призводить до її деформування при зіткненні зі стінкою збірника порошку, при дії зустрічного потоку за цей же час відбувається її затвердіння.

По принципу дії камери з протипотоком схожі на реактори з псевдозрідженим шаром. Залежно від швидкості та фізичних властивостей часток та зустрічного потоку газу псевдозріджуваний шар знаходиться в одному із зазначених станів: «фільтрація», «кипіння» чи «винесення». Так для крупних часток (300...500 мкм) при оптимальних швидкостях протипотоку (≈ 30 м/с) характерними режимами обробки є «фільтрація» або «кипіння», коли має місце рівновага між силою тяжіння і швидкістю часток та швидкістю зустрічного потоку газу, що дозволяє ефективно гальмувати та охолоджувати крупні частки порошку, які згодом осідають на дні збірника камери розпилення. Проте при швидкості протипотоку яка є оптимальною для крупних часток для часток менших розмірів (20...300 мкм) режим обробки типу «фільтрація» або «кипіння» змінюється на «винесення», що пов'язано з тим, що швидкість протипотоку газу починає значно перевищувати критичну швидкість обробки, що призводить до того що частки виносяться з шару течією зустрічного газу, в зону, де вони попадають до системи фільтрації установки (циклон та відцентровий вентилятор), де у подальшому відбувається їх фільтрація та збір.

Також, враховуючи вищеперелічене, слід зазначити, що зменшення швидкості часток та інтенсифікація їх охолодження можливі за рахунок зменшення їх фракційного складу. Проте ця обставина вимагає розробки та вивчення нових технологічних прийомів зменшення розмірів розпилюваних часток, що є метою подальших досліджень.

На основі цих даних розроблена і виготовлена наступна установка. Отримання металевих гранул на ній засноване на методі плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротових матеріалів, які вводяться в плазмовий струмінь, де відбувається їх плавлення, диспергування, сферодизація та

подальша кристалізація в ході вільного падіння у внутрішній порожнині установки.

Вихідним матеріалом для отримання гранул служать компактні та порошкові дроти діаметром 1,0...2,2 мм. Ця установка дозволяє отримувати гранули дисперсністю в інтервалі 25...315 мкм.

Процес одержання гранул ведеться у наступній послідовності. Камера, де відбувається розпилення дроту, заповнюється інертним газом (аргоном) для створення всередині контрольованої атмосфери. Дріт, який попередньо пройшов термічну обробку за допомогою механізму подавання подається на зріз сопла плазмотрона в камеру через систему герметичних кабельних введів, де він нагрівається до температури плавлення і розпилюється плазмовим струменем. Краплі розплаву, що відірвалися з торця дроту, переміщуються в інертному середовищі, утворюють гранули, які потім потрапляють в приймальний бункер. Продувка повітря, відведення відпрацьованих газів та збирання дрібних частинок здійснюється через отвір у нижній частині камери, з'єданого послідовно із системою циклонів та вентилятором.

Для усунення злипання частинок на дні збірника передбачена подача зустрічного потоку холодного газу, що дозволяє значно зменшити габарити обладнання (висота камери зменшується до 3 м), керувати хімічним складом і структурою частинок, що розпилюються, в широких межах. Камера забезпечена розвиненими пристроями контролю робочого середовища – датчиками температури, тиску та газовим аналізатором.

Газова система (ГС) призначена для заповнення інертним середовищем порожнин камери, подачі в плазмотрон плазмоутворюючого та супутнього газу, а також створення зустрічного потоку холодного газу. Система управління (СУ) установки побудована з урахуванням програмованого логічного контролера (ПЛК) з НМІ панеллю. Вона забезпечує виконання наступних функцій:

- програмне керування механізмом подачі дроту;

- програмне управління енергетичними характеристиками плазмотрону;
- збирання та введення в ПЛК інформації від датчиків;
- встановлення заданих цифрових значень регульованих параметрів з НМІ панелі оператора та відтворення на моніторі цифрової інформації щодо кожного з контрольованих датчиків;
- подання на панелі графічних об'єктів (мнемосхем) та функціональних об'єктів, що дозволяють оператору змінювати режими керування та безпосередньо з панелі втручатися в роботу СУ, коригуючи перебіг процесу розпилення;
- підготовку установки до роботи, включаючи продування повітря, контроль тиску газу при заповненні камери та ін.

На цій установці була проведена серія експериментів з розпилення компактних і порошкових дротів різних складів.



Рис. 5.21. Зовнішній вигляд процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідного компактного дроту AISI 304 в камері розпилення у атмосфері аргону



а)

б)

Рис. 5.22. Морфологія гранул фракції 20-100 мкм, отриманих за технологією плазово-дугового розпилення компактного дроту AISI 304 на повітрі (а) та у атмосфері аргону (б)

Згідно з отриманими даними була розроблена конструкторська документація і виготовлено відповідне обладнання, виконано підбір технологічних та конструктивних параметрів обладнання для плазово-дугової сферодизації, яке дозволяє отримувати якісні гранули з параметрами сферичності на рівні $S = 0,75 \dots 0,85$ (рис. 5.22(б)).

5.5 Приклади практичного застосування технологій плазово-дугового розпилення струмопровідних дрових матеріалів

5.5.1. Застосування технології плазово-дугового розпилення струмопровідних дротів для формування прошарків при отриманні зварних біметалічних з'єднань «титан-сталь»

Біметалічні матеріали застосовуються в сучасній промисловості для полегшення ваги конструкцій, локальної зміни механічних характеристик, захисту від корозії та ін. Одним з різновидів біметалічних матеріалів є листи сталі, плаковані титаном. Завдання отримання нероз'ємних з'єднань таких листів з використанням зварювальних технологій утруднене через небезпеку утворення інтерметалідних фаз (ІМФ) [101]. Існує ціла низка технологічних рішень, що дозволяють уникнути цього явища. Одним із найбільш перспективних підходів є зварювання з використанням перехідних або бар'єрних шарів [102]. Однак такий підхід не завжди забезпечує повну відсутність інтерметалідів через можливість повторного переплаву бар'єрного шару при наплавленні наступних шарів металу (наприклад, сталі). Актуальною є задача створення таких технологічних прийомів, які дозволять

здійснювати зварювання листів біметалу «титан – сталь» без утворення ІМФ.

Варіантом подолання проблем утворення ІМФ, використання складних технологічних прийомів та обладнання, застосування коштовних матеріалів, є створення з'єднань Ti із Fe із застосуванням технології плазмово-дугового напилення для отримання бар'єрного прошарку при температурі, наближеної до нормальної. Матеріал цього прошарку може бути таким же або подібним до того, що наплавлятимуть поверх із застосуванням певної традиційної технології наплавлення.

Бар'єрні покриття наносили плазмово-дуговим напилюванням струмопровідного дроту-аноду ER70S-6 діаметром 1.6 мм. Схема і візуалізація даного процесу наведено на рис. 5.23. Для нанесення бар'єрних покриттів використовували установку високошвидкісного плазмово-дугового напилення PLAZER 30PL-W струмопровідним дротом-анодом.

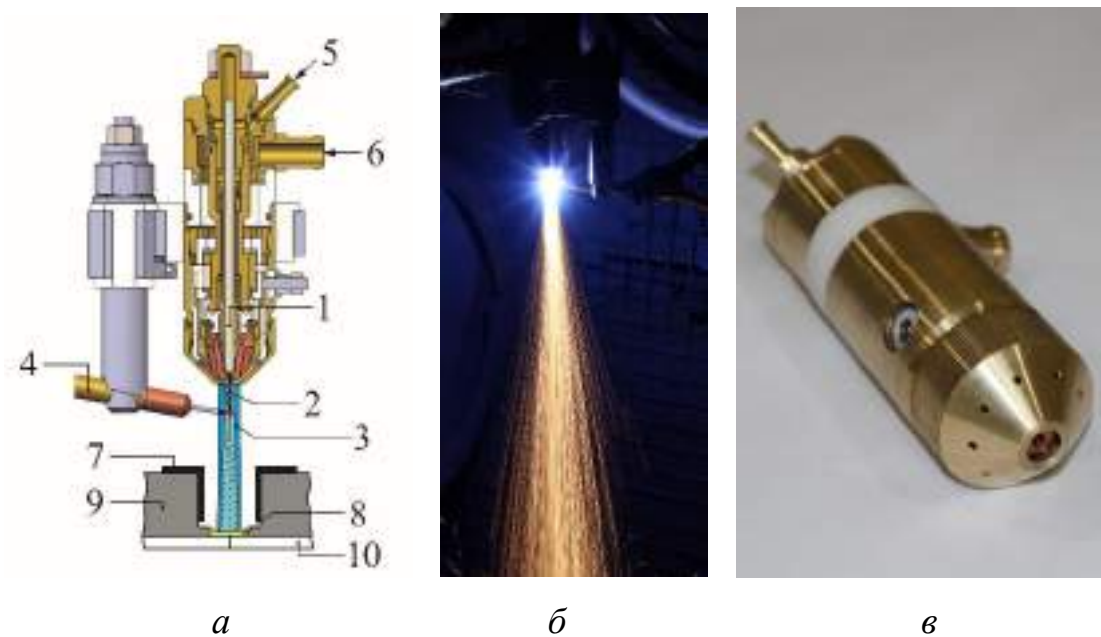


Рис. 5.23. Плазмово-дугове напилювання струмопровідним сталевим дротом бар'єрного покриття: *а* – схема процесу; *б* – візуалізація процесу; *в* – зовнішній вигляд плазмотрону; 1 – катод; 2 – електрична дуга; 3 – обтискуючий струмінь; 4 – дріт-анод; 5 – подача плазмоутворюючого газу; 6 – подача супутнього газу; 7 – захисний екран; 8 – покриття; 9 – сталь; 10 – титан.

Типовий вигляд сталевих покриття, отриманого плазмово-дугового напилення струмопровідного дроту-аноду ER70S-6 ($\text{\O}1.6$ мм) на титан, у виконаній під зварювання розробці біметалевих крайок, наведено на рис. 5.24. При зіткненні сталевих частинок з титановою підкладкою розплавлення та перемішування ділянок металів не спостерігалось. Рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) показав відсутність ІМФ на межі напиленого шару та титану (рис. 5.25, табл. 5.6). В ході наступних експериментів поверх напиленого сталевих шару виконували наплавлення сталевим дротом або порошком заліза.

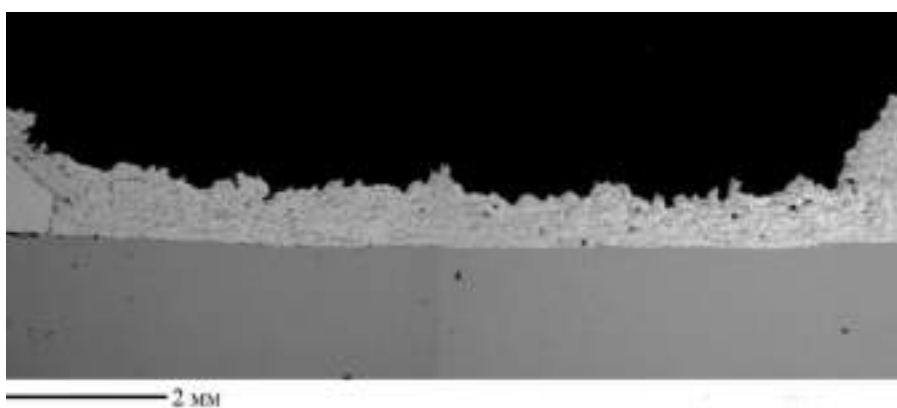


Рис. 5.24. Загальний вигляд поперечного перетину зразку, одержаного плазмово-дуговим напиленням дроту ER70S-6 на титан

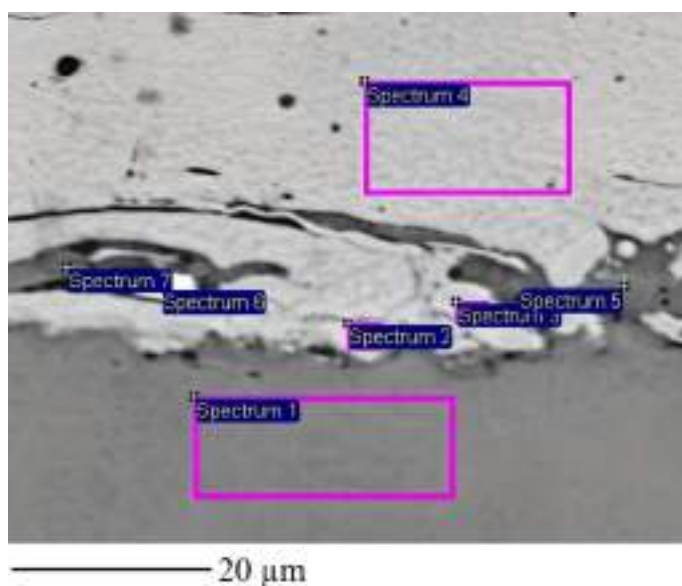


Рис. 5.25. Локальні ділянки визначення вмісту елементів в перехідній зоні Ti-Fe методом РСМА після плазмово-дугового напилення сталевих дроту-аноду ER70S-6 на титан Ti Grade 2

Таблиця 5.6. Вміст елементів (в мас.%) у локальних ділянках плазмово-дугового напилення сталевго дроту-аноду ER70S-6 на титан Grade2 (рис. 5.23), визначений методом рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА)

Spectrum	O	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Total
Spectrum 1	–	0,42	–	99,58	–	–	–	100
Spectrum 2	–	–	–	1,88	0,64	97,47	–	100
Spectrum 3	–	–	–	1,48	0,87	97,65	–	100
Spectrum 4	–	–	0,59	0,65	1,37	97,39	–	100
Spectrum 5	21,81	–	0,41	0,84	0,83	76,1	–	100
Spectrum 6	–	–	–	13,92	–	80,19	5,89	100
Spectrum 7	27,68	–	–	0,77	–	71,55	–	100

Подальше плазмове наплавлення виконувалось з мінімізацією енерговкладень зі значеннями погонної енергії 200...250 Дж/мм. За рахунок цього спостерігається зменшення товщини інтерметалідного прошарку перехідної зони між напиленим покриттям та титаном (на межі розділу титан-сталь) після наплавлення на покриття сталевго дроту або залізного порошку – до 50–60 мкм. Рентгеноспектральний мікроаналіз показав (табл. 5.7), що цей прошарок має наступний вміст елементів (мас. %): 70,55 Ti – 28,49 Fe – 0,34 Mn.

Таблиця 5.7. Хімічний склад ділянок з'єднання, отриманого плазмовим наплавленням дроту ER70S-6 на сталеве покриття, нанесене на титан плазмово-дуговим напиленням струмопровідного дроту ER70S-6 (рис. 5.24, б)

Spectrum	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Total
Spectrum 1	–	0,66	–	1,12	98,22	100
Spectrum 2	0,32	0,3	70,55	0,34	28,49	100
Spectrum 3	0,35	0,07	99,48	0,1	–	100

Такий вміст приблизно відповідає складу сполуки титану із залізом FeTi₂. При цьому утворення даного прошарку не приводить до виникнення тріщин і інших дефектів (рис. 5.26), що дозволяє рекомендувати дане технологічне рішення для отримання стикових зварних з'єднань біметалевих пластин «титан-сталь».

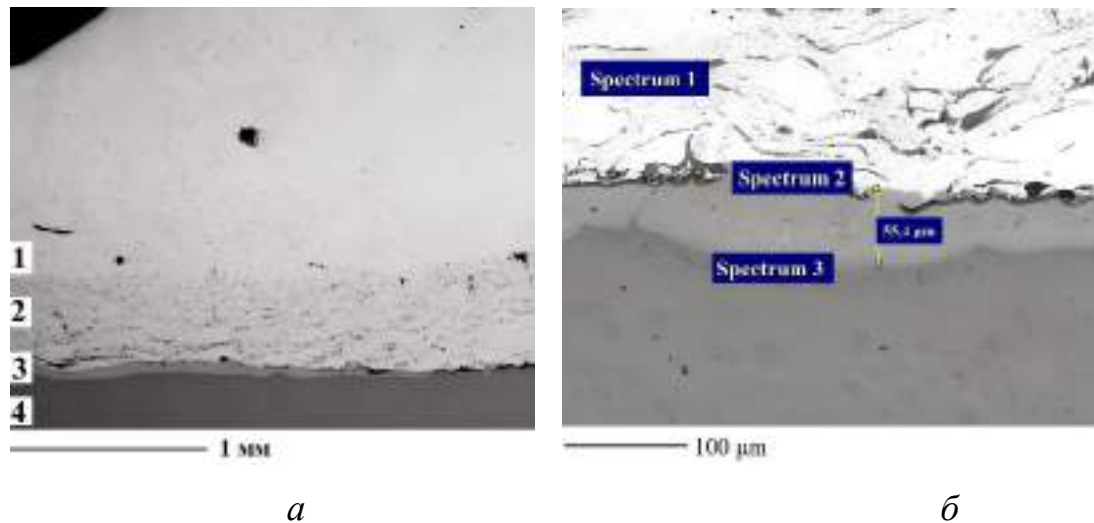


Рис. 5.26. З'єднання, отримане плазмовим наплавленням сталевго дроту ER70S-6 на покриття, нанесене на титан плазмово-дуговим напиленням струмопровідного дроту ER70S-6: *а* – макроструктура; 1 – наплавлений шар; 2 – напилене покриття; 3 – перехідна зона, що утворилася в процесі наплавлення; 4 – титанова основа; *б* – мікроструктура

Показані на рис. 5.26 структури окремих ділянок з'єднання «титан – сталь» демонструють загальну тенденцію формування бездефектного з'єднання. При його утворенні не відбувається відшаровування покриття, нанесеного плазмово-дуговим напиленням, а наплавлений сталевий шар не зміщується з титаном. Більш детально результати даних досліджень описані в роботі [103].

5.5.2. Застосування інтерметалідних покриттів на основі Fe-Al, для підвищення довговічності поверхонь нагріву труб сміттєспалювального обладнання

У попередніх розділах роботи показано, що інтерметалідні покриття на основі Fe_3Al і $FeAl$, отримані плазмово-дуговим напиленням струмопровідного порошкового дроту зі сталевї оболонки і наповнювачем з порошку алюмінію мають високу жаростійкість при 600-1000°C, корозійну стійкість, що дозволяє їх розглядати як перспективний матеріал для захисту

та підвищення зносостійкості деталей та механізмів, які працюють у важких умовах експлуатації.

У порівнянні з трубами поверхонь нагріву енергетичних котлоагрегатів, що використовують вугілля як паливо, такі поверхні в печах сміттєспалювальних заводів працюють у більш жорстких умовах, відчуваючи поєднання різних видів корозійних впливів, у поєднанні із золаобразивним зносом [104]. А саме: корозія Cl (спалювання синтетичних смол, таких як полівінілхлорид (ПВХ), синтетичний каучук, штучна шкіра та пінопласт тощо, що призводить до утворення HCl, Cl₂ та хлоридів металів KCl, NaCl, ZnCl₂, PbCl₂), газофазна корозія, яка безпосередньо викликана високотемпературною хлорною атмосферою сміттєспалювального заводу - це окислювально-відновна реакційна корозія.

У рамках співробітництва ІЕЗ ім. Е.О.Патона НАНУ з компанією та підприємством «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (КНР) були проведені роботи з вивчення можливості застосування технології плазмово-дугового напилення відповідного порошкового дроту Fe₃Al, розробленого та дослідженого у цій дисертаційній роботі, для захисту труб пароперегрівачів сміттєспалювального обладнання. Умови експлуатації пароперегрівачів – температура диму 700°C та вище, а температура стінок труб – близько 485°C та вище. Корозійним середовищем в основному є хлористий водень, хлористі сполуки та сполуки лужних металів, що містяться в димових газах. Труби, пароперегрівачів, вироблених даним підприємством, на ряди вузлів сміттєспалювальних установок з'єднуються в плоску панель, що становить єдину поверхню нагріву (рис. 5.27).



Рис. 5.27. Зовнішній вигляд поверхні нагріву пароперегрівача сміттєспалювального обладнання, що виробляється підприємством «Poupin Special Welding Technology Co., Ltd» (КНР)

В компанії «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (КНР) за допомогою установки Plazer 30 PL-W на труби з нержавіючої сталі AISI 310S наносили двошарове покриття товщиною 0,6 мм (рис. 5.28), що складається з внутрішнього шару товщиною близько 0,35 мм, напиленого порошковим дротом інтегрального складу Fe_3Al і поверхневий шар, товщиною близько 0,25 мм, напилений із застосуванням компактного дроту з нікель-хромового сплаву Inconel 625 (Ni-Cr-Mo-Nb-Mn-Si). Завдання нанесення двошарового покриття полягало у забезпеченні надійного корозійного захисту труб з одночасною економією дорогого нікель-хромового сплаву Inconel 625. Напилене двошарове покриття мало практично безпористу структуру, водночас компанія «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (КНР) проводила додаткову операцію – його поверхневу обробку неорганічним герметиком (інформацію про його склад не передано).



Рис. 5.28. Процес плазмово-дугового напилення струмопровідних дротів на трубу поверхні нагріву компанії «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (КНР) для підприємства «Pourin Special Welding Technology Co., Ltd» (КНР)

Результати промислових випробувань напилених труб пароперегрівачів із описаним покриттям, були проведені на підприємстві «Pourin Special Welding Technology Co., Ltd» (КНР) – виробнику сміттєспалювального обладнання. Підтверджена принципова можливість їх застосування для захисту труб пароперегрівачів сміттєспалювального обладнання. Так, величина корозії труб з нержавіючої сталі 310SS в умовах роботи труб пароперегрівачів сміттєспалювального обладнання при температурі диму близько 700°C і вище і температурі стінок труб близько 485°C становить 2 мм на рік. Нанесення зазначеного двошарового покриття прогнозовано дозволить зменшити величину корозії до значень 0,4 мм на рік.

Довідка про впровадження технології розробленої технології плазмово-дугового напилення струмопровідними дротами на підприємстві «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (КНР) наведено у Додатку Б.

5.5.3. Аналіз перспективності застосування інтерметалідних сферичних гранул, отриманих плазмово-дуговою сферодизацією порошкових дротів для 3D друку і ГП

У попередніх розділах роботи показано, що за допомогою технології плазмово-дугового розпилення струмопровідного порошкового дроту можна отримувати інтерметалідні гранули, хімічний і фазовий склад яких відповідає інтерметалідам типу Fe_3Al і $FeAl$. При цьому слід зауважити, що технологія виготовлення порошкових дротів є досить гнучкою та дозволяє застосовувати широку номенклатуру матеріалів для їх виготовлення (металеві оболонки зі сталі, титану, нікелю та ін.).

У роботах [105-108], показано, що існує нагальна потреба у розробці та виготовленні сферичних інтерметалідних гранул для застосування у області 3D друку металевих виробів, що обумовлено винятковими властивостями цих матеріалів. Тому адитивні технології потребують виготовлення спеціалізованих сферичних бездефектних гранул з високими технологічними і механічними характеристиками, що є предметом даного дослідження і більш описано у розділі 1.

Аналіз результатів досліджень гранулометричного складу інтерметалідних гранул, отриманих плазмово-дуговим розпиленням струмопровідного порошкового дроту Fe-Al показав, що вони представляють собою сферичні гранули переважно в інтервалі розмірів 25-250 мкм. Доля основних фракцій такого отриманого порошку, які відповідають вимогам різних методів 3D друку, складає:

- 45-106 мкм, яка складає 44,5 % від загальної маси порошку (EBM);
- 45-140 мкм, яка складає 72,0 % від загальної маси порошку (DMLS);
- 106-250 яка складає 53,5 % від загальної маси порошку (HP).

Дослідження форми гранул показало, що загалом частки мають правильну сферичну форму з коефіцієнтом сферичності $S_{сф} = 0,75-0,85$ при невеликій кількості дефектних часток (< 3 % мас.).

Отримані результати підтверджують перспективність використання технології плазмово-дугової сферодизації струмопровідних порошкових дротів з нікелевою, титановою або сталеву оболонкою та наповнювачем з порошку алюмінію для отримання сферичних гранул інтерметалідного типу для 3D друку методами прямого лазерного плавлення, електронно-променевого плавлення, а також за допомогою методів порошкової металургії.

5.6 Висновки до розділу

1. Розроблено новий дослідно-промисловий плазмотрон підвищеної потужності для плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів. Нова конструкція газорозрядної камери сприяє зменшенню середнього розміру розпилюваних часток з 134 до 99 мкм (у порівнянні з прототипом при однаковій потужності дуги) при цьому кількість фракції <100 мкм збільшується з 48 до 72 % мас. Це дозволяє його рекомендувати для використання для напилення щільних функціональних покриттів (в т.ч. на внутрішні поверхні діаметром >70 мм) та для сферодизації струмопровідних дротів.

2. Розроблено дослідно-промислову установку для плазмово-дугової сферодизації струмопровідних дрових матеріалів з камерою з захисною атмосферою із газовою протитечією, яка дозволяє отримувати гранули 20...315 мкм з коефіцієнтом сферичності на рівні 0,73...0,83.

3. Підтверджена можливість отримання сферичних гранул, в яких доля основної фракції 25-315 мкм складає до 90 % мас., а коефіцієнт сферичності може досягати 0,83 за допомогою технології плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів за схемою «дріт-катод» при використанні плазмотрону з пустотілим мідним анодом.

4. Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) при організації промислового виробництва плазмово-дугової установки «PLAZER 50-PL-W», укомплектованої, як плазмотроном із повітряним охолодженням потужністю до 30 кВт, так і новим плазмотроном із водяним охолодженням потужністю 50 кВт, а також інтелектуальною системою автоматичного управління з можливістю керування у режимі реального часу широким спектром технологічних параметрів.

5. Розроблено технологію нанесення сталевих або залізних прошарків методами плазмово-дугового напилювання сталевого дроту при формування стикових з'єднань при зварюванні біметалевих пластин «титан – сталь» методами плавлення.

6. Розроблено і впроваджено технологію нанесення двошарового покриття на труби пароперегрівачів обладнання сміттєспалювального заводу «Pourin Special Welding Technology Co., Ltd» (КНР), яка прогнозовано дозволить підвищити довговічність зазначеного обладнання до 5 разів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено закономірності впливу технологічних і конструктивних параметрів плазмотрону на гранулометричний склад гранул, отриманих в процесі плазмово-дугового розпилення компактних і порошкових дротів діаметром 1,0-1,6 мм по схемі «дріт-анод». З'ясовано, що регулюючи такі параметри, як сила струму, швидкість подачі дроту, витрата плазмоутворюючого та супутнього газів та зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами можна отримувати гранули, середній діаметр яких лежить в інтервалі 70-190 мкм, при цьому при застосуванні дроту діаметром 1,0 мм кількість фракції гранул <70 мкм досягає до 70 мас. %.

2. З'ясовано, що обдування турбулентного струменя аргонної плазми кільцевим ламінарним потоком холодного газу є одним із ключових параметрів, які мають найбільший вплив на дисперсність розпилюваних часток, так лише за рахунок збільшення витрати супутнього газу з 36 до 60 м³/год. можливо зменшити середній діаметр часток на 22 % з 167 до 129 мкм, при цьому доля часток із розмірами менше 100 мкм збільшується з 32 до 41 % мас.

3. Виявлено тенденцію до збільшення коефіцієнту сферичності гранул фракції 20-100 мкм при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних компактних дротів з 0,67 до 0,83 при підвищенні сили струму з 150 до 290 А при використанні аргону у якості плазмоутворюючого газу, при цьому, в порівнянні із аргонном, використання плазмоутворюючого газу - гелію дозволяє отримати вказані максимальні значення коефіцієнту сферичності при менших на 18-20 % значеннях електричної потужності дуги.

4. З'ясовано, що при розпиленні в атмосфері аргону сферодизуються гранули правильної форми з коефіцієнтом сферичності $S = 0,81$, при розпиленні дроту у повітряній атмосфері (твердіння у воді) коефіцієнт сферичності гранул складає $S = 0,71$, а у повітряній атмосфері і подальшому твердінні на повітрі $S = 0,63$.

5. Встановлено особливості диспергування дровових матеріалів різного хімічного складу. З'ясовано, що при постійній потужності плазмової дуги

найменші розміри розпилюваних гранул (121 та 125 мкм), були отримані для матеріалів, які мають найменші значення сили поверхневого натягу (для Cu та Al відповідно).

6. Виявлено особливості металургійної взаємодії сталеві оболонки і наповнювачу із порошку алюмінію при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних порошкових дротів типу Fe-Al. З'ясовано, що в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідного порошкового дроту, який складається із сталеві оболонки і наповнювача із порошку алюмінію, при підвищенні сили струму від 180 до 270 А середній розмір розплавленої зони (металургійної взаємодії оболонки і наповнювачу) на торці дроту зменшується у 4,25 рази, а середній вміст (у атом. %) алюмінію і заліза в утвореному розплаві змінюється від 25% і 75% до 48% і 52% відповідно.

7. Вперше виявлена можливість отримання сферичних гранул інтерметалідів з основними фазами Fe_3Al і $FeAl$ та середніми розмірами в діапазоні 115-144 мкм шляхом плазмово-дугового розпилення порошкового дроту, який складається зі сталеві оболонки та наповнювачу із порошку алюмінію.

8. Досліджено мікроструктуру, мікротвердість і фазовий склад плазмово-дугових покриттів напилених порошковим дротом Fe-Al, який складається зі сталеві оболонки і наповнювачу із порошку алюмінію. З'ясовано, що в процесі напилення утворюються щільні покриття з пористістю менше 1,5 об. % та мікротвердістю 3024 ± 761 МПа, де основною фазою є інтерметалід Fe_3Al .

9. Визначено експлуатаційні характеристики плазмово-дугових покриттів отриманих з порошкових дротів на основі Fe-Al. Тріботехнічні випробування показали високу стійкість зазначених покриттів до абразивного зносу, яка в 1,8 рази вище, ніж у сталі S235. Результати корозійних випробувань показали високу стійкість таких покриттів в середовищах 3 % розчину NaCl і водного 0,5 % розчину H_2SO_4 , при цьому розрахунковий термін служби цих покриттів в зазначених середовищах може складати до 17 та до 2,5 років відповідно.

10. Розроблено новий промисловий плазмотрон із вдосконаленою конструкцією газорозрядної камерита покращеними масо-габаритними

характеристиками, який забезпечує можливість роботи при підвищених струмових навантаженнях (до 500 А), більшу дисперсність розплених гранул та нанесення покриттів на внутрішні поверхні діаметром більше 70 мм із підвищеним показниками їх якості.

11. Розроблено дослідно-промислову установку для плазмово-дугової сферодизації струмопровідних дротових матеріалів з камерою з захисною атмосферою із газовою протитечією, яка дозволяє отримувати гранули 20...315 мкм з коефіцієнтом сферичності на рівні 0,73...0,83.

12. За допомогою технології плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів за схемою «дріт-катод» при використанні плазмотрону з пустотілим мідним анодом отримано сферичні гранули, в яких доля основної фракції 25-315 мкм складає до 90 % мас., а коефіцієнт сферичності може досягати 0,83.

13. Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) при організації промислового виробництва плазмово-дугової установки «PLAZER 50-PL-W», укомплектованої, як плазмотроном із повітряним охолодженням потужністю до 30 кВт, так і новим плазмотроном із водяним охолодженням потужністю 50 кВт, а також інтелектуальною системою автоматичного управління з можливістю керування у режимі реального часу широким спектром технологічних параметрів.

14. Розроблено технологію нанесення сталевих або залізних прошарків методами плазмово-дугового напилювання сталевого дроту при формування стикових з'єднань при зварюванні біметалевих пластин «титан – сталь» методами плавлення.

15. Розроблено і впроваджено дослідно-промислову технологію нанесення двошарового покриття на труби пароперегрівачів обладнання сміттєспалювального заводу «Pourin Special Welding Technology Co., Ltd» (КНР), яка прогнозовано дозволить підвищити довговічність зазначеного обладнання до 5 разів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кислицин В.М. Зарубежный опыт. Обзор мирового рынка термического напыления и тенденции развития исследований в странах ЕС. *Автоматическая сварка*. 2013. № 08. С. 59-61.
2. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д., Колисниченко О.В. Сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного и HVOF устройств для газотермического напыления покрытий. *Физическая инженерия поверхности*. 2009. Т. 7, № 1-2. С. 39-45.
3. Колисниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Товбин Р. Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автоматическая сварка*. 2017. № 10. С. 28-34.
4. Шолкин С.Е., Юрков М.А. Создание управляемой наноструктуры в покрытии, полученном методами газотермического напыления. *Вопросы материаловедения*. 2010. №2 (62) С. 68 – 74.
5. Yenni D., McGill W., Lyle J. (1961) Electric arc spraying. United States Patent 2982845.
6. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука. 1977. 184 с.
7. Bobzin K., Cook D., Kowalsky K. Thermal spraying of cylinder bores with the PTWA internal coating system. *Proceedings of the ASME Internal Engine Combustion Engine Division Fall 2007 Technical Conference ICEF07*. 2007. P. 1-8.
8. Кудинов В.В. Нанесение тугоплавких покрытий дуговой плазмой. *Технология машиностроения*. 1962. № 21. С. 41-45.
9. Коржик В.Н., Короб М.Ф. Механизированная линия PLAZER 30PL-W для плазменно-дугового проволочного напыления покрытий на крупногабаритные детали типа «вал». *Сварщик*. 2012. № 4. С. 13-15.
10. Patent WO 2019/014780 A1 METHOD FOR COST-EFFECTIVE PRODUCTION OF ULTRAFINE SPHERICAL POWDERS AT LARGE SCALE USING THRUSTER-ASSISTED PLASMA ATOMIZATION.
11. Kang I.J., Park H.J., Cho C.H., Kim J.H., Kim H.K., Kim I.K., Park S.J. Development of a plasma and gas hybrid atomization system for the production of

metal powder materials. *Journal of the Korean Physical Society*. 2021. V. 79. P. 1141-1150. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40042-021-00341-6>

12. Катц Н.В., Антошин Е.В., Вадивасов Д.Г., Вольперт Г.Д., Камионский Л.М. Металлизация распылением. М.: «Машиностроение». 1966. 200 с.

13. Катц Н.В. Восстановление деталей текстильных машин металлизацией. М.: «Легкая индустрия». 1968. 191 с.

14. Вахалин В.А., Масленков С.Б., Кудинов В.В. Процесс плавления и распыления материала электродов при электродуговой металлизации. *Физика и химия обработки материалов*. 1981. № 3. С. 58-63.

15. Петров С.В., Коржик В.Н. Установка Plazer15-SA для дугового сверхзвукового напыления. *Сварщик*. 2011. № 11. С. 17–22.

16. Коржик В.Н. Сверхзвуковое электродуговое напыление ответственных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. *Автоматическая сварка*. 2016. № 9. С. 20–28.

17. Коробов Ю.С., Прядко А.С. Активированная дуговая металлизация – новый шаг в защите деталей от износа и коррозии. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2005. № 10. С. 38-40.

18. Коробов Ю.С. Восстановление деталей методом активированной дуговой металлизации. *Автомобильная промышленность*. 2000. № 1. С. 23-24.

19. Борисов Ю.С., Кислица А.Н. Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов. *Автоматическая сварка*. 2002. № 3. С. 54-55.

20. Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н. Особенности процесса микроплазменного напыления из проволочных материалов. *Автоматическая сварка*. 2006. № 6. С. 26-31.

21. Гайко Г.В., Бруско А.Т., Підгаєцький В.М., Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н. Експериментально-біомеханічне та морфологічне обґрунтування пористого титанового та титан-гідроксиапатитного покриття для безцементного ендопротеза кульшового суглоба. *Вісник ортопедії, травматології та протезування*. 2005. № 4. С. 13-20.

22. Sun P., Fang Z., Zhang Y. et al. Review of the Methods for the Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *JOM*. 2017. V.69. P. 1853–1860. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
23. Fang Z., Paramore J., Sun P., Ravi Chandran K., et al. Powder metallurgy of titanium – past, present, and future. *International Materials Reviews*. 2018. V. 63:7. P. 407-459. DOI:<https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1366003>
24. Kim K.T., Yang H.C. Densification behavior of titanium alloy powder under hot isostatic pressing. *Powder Metallurgy*. 2013. V. 44:1. 41-47. DOI:<https://doi.org/10.1179/003258901666158>
25. Янко Т.В., Овчинников А.В., Коржик В.Н. и др. Технологическая схема получения порошков титановых сплавов авиационного назначения для 3Д-печати. *Технологические системы*. 2018. № 4. С. 36-41. DOI:<https://doi.org/10.29010/085.7>
26. Kim Y. et al. Microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed Ti–6Al–4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 603. P. 207-212. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.022>
27. Yim S., Bian H., Aoyagi K., Yamanaka K. Spreading behavior of Ti-48Al-2Cr-2Nb powders in powder bed fusion additive manufacturing process: Experimental and discrete element method study. *Additive Manufacturing*. 2021. V.73. P. 337-353. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102489>
28. Chen G., Zhao S., Tan P., Wang J. et al. A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*. 2018. V.333. P. 38-46. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>
29. Nie Y., Tang J., Teng J., Ye X. et al. Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process (PREP). *Advanced Powder Technology*. 2020. V. 31. P. 2912-2920. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.018>
30. Smirnov S.A., Kirsankin A.A., Kalaida, T.A. Properties of the Spherical Titanium VT1-00 Powder Fabricated by Plasma Atomization of a Wire. *Russ. Metall.* 2022 V. 4. P. 741–745. DOI:<https://doi.org/10.1134/S0036029522070126>
31. Кудинов В.В. Нагрев токоведущей проволоки сжатой дугой. *Сварочное производство*. 1966. №. 4. С. 11-13.

32. Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas. Fundamental and applications. *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*, Plenum Press. New York. 1994. 452 p.

33. H. Fukanuma, Renzhong Huang, Y. Tanaka, Y. Uesugi. An Improved Local Thermal Equilibrium Model of DC Arc Plasma Torch. 2011. № 39 (10). P. 1974-1982. DOI:<https://doi.org/10.1109/TPS.2011.2163828>

34. Liao H., Gu S., Yin S., Guo Z. Three-dimensional simulation of an argon–hydrogen DC non-transferred arc plasma torch. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. № 80. P. 644-652. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.059>

35. Paik S., Huang P.C., Heberleinand J., Pfender E. Determination of the arc-root position in a DC plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1993. № 13. P. 379–397. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF01465872>

36. Ragaller K. Investigations on Instabilities of Electric Arcs. *Zeitschrift für Naturforschung A*. 1974. № 29a. P. 556-567.

37. Niemeyer L., Ragaller K. Development of Turbulence by the Interaction of Gas Flow with Plasmas. *Zeitschrift für Naturforschung A*. 1973. № 28a. P. 1281-1289. DOI:<https://doi.org/10.1515/zna-1973-0807>

38. Launder B., Spalding D. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. V. 3. P. 269-289. DOI:[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)

39. Kharlamov M.Yu., Korzhik V.N., Krivtsun I.V. Formation of liquid metal film at the tip of wire-anode in plasma-arc spraying. *The Paton Welding Journal*. 2011. № 12. P. 2-6.

40. Korobov Yu.S. Estimation of forces affecting the spray metal in electric arc metallising. *The Paton Welding Journal*. 2004. № 7. P. 21-25.

41. Boronenkov V.N., Korobov Yu. S. Kinetics of interaction of spray metal with oxygen during electric arc metallising. *Svarochnoe Proizvodstvo*. № 7. P. 30-36.

42. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука. 1987. 464 с.

43. Харламов М., Кривцун И., Коржик В. Численное моделирование движения, нагрева и дробления частиц, формирующихся при

диспергировании проволоки в условиях плазменно-дугового напыления. Сборник трудов VI международной конференции: «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». 2012. С. 147-156.

44. Kharlamov M., Krivtsun I, Korzhyk V. Formation of liquid metal film at the tip of wire-anode in plasma-arc spraying. *The Paton Welding Journal*. 2011. № 12. P. 2-6. DOI:<https://doi.org/10.15407/tpwj2011.12.07>

45. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Нигматулин Р.И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газовых взвешях. *Механика жидкости и газа*. Т.16. Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР. 1981. С. 209-287.

46. Erdman C.A., Pilch M., Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop. *Int. J. Multiphase Flow*. 1987. № 13. P. 741-757.

47. Gulyaev I., Dolmatov A., Kharlamov M., Krivtsun I., Korzhyk V. Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2015. V. 24. P. 1566-1573. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11666-015-0356-6>

48. Dudi A., Rashed K., Riyan Z. et al. Numerical simulations on supersonic gas atomization of liquid metal droplets. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2014. DOI:<https://doi.org/10.7567/JJAP.53.05HA09>

49. Zeoli N., Gu S. Numerical modelling of droplet break-up for gas atomization. *Computational Materials Science*. 2006. V. 38. P. 282-292. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2006.02.012>

50. Kharlamov M., Krivtsun I, Korzhyk V., Demyanov O. Simulation of motion, heating and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-arc spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2015. V. 24. P. 659-670. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11666-015-0216-4>

51. Taylor Analogy Breakup (TAB) Model. DOI:<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node274.html>

52. O'Rourke P., Amsden A. The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup. *SAE Technical Paper 872089*. 1987. 12 p. DOI:<https://doi.org/10.4271/872089>

53. Pialat X., Simonin O., Villedieu P. A hybrid Eulerian–Lagrangian method to simulate the dispersed phase in turbulent gas-particle flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 2007. V. 33. P. 766-788. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.02.003>
54. Lamb H. *Hydrodynamics*/ New York, 6th Edition. Dover Publications. 1945. 738 p.
55. Zahari N., Zawawi M., Sidek L., Mohamad D. et al. Introduction of discrete phase model (DPM) in fluid flow: A review. *AIP Conference Proceedings 2030*. 2018. 8 p. DOI:<https://doi.org/10.1063/1.5066875>
56. Boulos M., Fauchais P., Vardelle A., Pfender E. Fundamentals of plasma particle momentum and heat transfer. *Plasma Spraying: Theory and Applications*. 1993. P. 3-57. DOI:https://doi.org/10.1142/9789814354479_0001
57. Chyou Y.P., Pfender E. Behavior of particulates in thermal plasma flows. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1989. № 9. P. 45-71.
58. Ranz W., Marshall W. Evaporation from drops. Part I and Part II. *Chem. Eng. ProgProg*. 1952. V. 48. P. 173-180.
59. Murphy A.B., Arundelli C.J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1994. № 14(4). P.451-490. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF01570207>
60. Murphy A.B. Thermal plasmas in gas mixtures. *Journal of Physics D Applied Physics*. № 34(20). P.151. DOI:<https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/20/201>
61. Deng C., Long H. et al. Numerical simulation and experimental study of Ar-H₂ DC atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2019. № 371. P. 312-321. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.053>
62. Стуков Н., Шицын Ю., Белинин Д. Регулирование размера частиц порошков при плазменном распылении пруткового материала. *Вестник ИГТУ*. 2011. № 3. С. 117-121.
63. Bykovskiy O., Lapteva A., Mischenko S., Pasko N. Heat content and structure of particles in plasma spraying with a current-conducting wire. *Welding International*. 2015. V. 30(5). P. 383-388. DOI:<https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1090168>

64. Rusev G., Rusev A., Ovsyannikov V., Bykovsky O., Pasko A. Effect of mode parameters of plasma spraying using current-carrying wire on fractional composition of sprayed particles. *The Paton Welding Journal*. 2013. № 1. P. 44-46. DOI:<https://doi.org/10.15407/tpwj2013.01.02>

65. Сытников Н.Н. Влияние скорости подачи стальной проволоки на характер распыления металла плазменной струей. *Автоматическая сварка*. 1987. № 8. С. 63-64.

66. Карп И.Н., Рудой А.В. Влияние скорости подачи стальной проволоки на диспергирование металла воздушной струей. *Автоматическая сварка*. 1991. № 10. С. 36-38.

67. Бобров Г.В., Привезенцев В.И., Умнова Л.В. Образование частиц при плавлении проволоки в плазменном потоке. *Порошковая металлургия*. 1965. № 1. С. 79-86.

68. Краснов А.Н. Плазменное распыление вольфрама. *Порошковая металлургия*. 1965. № 3. С. 1-5.

69. Краснов А.Н. Плазменное распыление молибдена. *Порошковая металлургия*. 1965. № 1. С. 1-5.

70. Gulyaev I., Gulyaev P., Korzhyk V., Dolmatov A., Krivtsun I., Kharlamov M. Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying. *The Paton Welding Journal*. 2015. № 3-4. P. 36-41. DOI:<https://doi.org/10.15407/tpwj2015.03.04>

71. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Харламов М.Ю., Yuhui Yao, Дем'янов О.І., Строгонов Д.В., Щерецький В.О. Вплив супутнього обтискаючого потоку на структуру і властивості покриття при плазово-дуговому напилюванні плавким струмопровідним дротом-анодом. *Автоматичне зварювання*. 2022. № 2. С. 1-8.

72. Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н. Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазмотроном с проволокой-анодом. *Автоматическая сварка*. 2008. № 6. С. 19-24.

73. Петруничев В.А., Титков В.В. К механизму плазменного распыления проволоки. *Физика и химия обработки материалов*. 1977. № 1. С. 14-16.

74. Лыков П.А., Байтимеров Р.М., Сафонов Е.В., Шульц А.О. Моделирование процесса распыления расплава в газовой струе. *Вестник ЮУрГУ*. 2013. № 2. С. 148-154.

75. Milkowska-Piszczek K., Korolczuk-Hejnak M. An Analysis of The Influence of Viscosity on The Numerical Simulation of Temperature Distribution, as Demonstrated by the CC Process. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. V. 58. P. 1267-1274. DOI:<https://doi.org/10.2478/amm-2013-0146>

76. Jönsson, P.G., Eagar, T.W. & Szekely, J. Heat and metal transfer in gas metal arc welding using argon and helium. *Metall Mater Trans*. 1995. V. 26. P. 383–395. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF02660980> 1995

77. Traidia A., Roger F., Chidley A., Schroeder J., Marlaud T. Effect of Helium-Argon Mixtures on the Heat Transfer and Fluid Flow in Gas Tungsten Arc Welding. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2011. V. 5. P. 1053-1058. DOI:<https://doi.org/10.5281/zenodo.1059787> 49 2011, 1053-1058

78. Pakpoom J., Poopat B. Effect of Helium Addition in Argon Shielding Gas on Metal Transfer Behavior in Gas Metal Arc Welding of Aluminum. *Key Engineering Materials*. 2013. V. 545. P. 219–224. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.545.219>

79. Губенко Б.Г. Структурная неоднородность электрометаллизационных покрытий из стали 65Г. *Автоматическая сварка*. 1990. № 6. С. 19-23.

80. Dietrich S., Wunderer M., Huissel A., Zaeh M. A New Approach for a Flexible Powder Production for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2016. V.6. P. 88-95. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.012>

81. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.

82. Zhou K., Wang H., Chang J., Wei B. Experimental study of surface tension, specific heat and thermal diffusivity of liquid and solid titanium. *Chemical Physics Letters*. 2015. V. 639. P. 105-108. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2015.09.014>.

83. Gancarz T., Jourdan J., Gasior W., Henein H. Physicochemical properties of Al, Al-Mg and Al-Mg-Zn alloys. *Journal of Molecular Liquids*. 2018. V. 249. P. 470-476. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.061>
84. Li Z., Mukai K., Zeze M. et al. Determination of the surface tension of liquid stainless steel. *J. Mater Sci*. 2005. V. 40. P. 2191–2195. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10853-005-1931-x>.
85. Harrison D., Yan D., Blairs S. The surface tension of liquid copper. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1977. V. 9. P. 1111-1119. DOI:[https://doi.org/10.1016/0021-9614\(77\)90112-4](https://doi.org/10.1016/0021-9614(77)90112-4)
86. Xiao F., Liu L., Yang R. et al. Surface tension of molten Ni-(Cr, Co, W) alloys and segregation of elements. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008. V. 18. P. 1184-1188. DOI:[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60202-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60202-2)
87. Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. Сварка порошковой проволокой. К.: Наукова думка. 1972. 223 с.
88. Борисов Ю.С. та ін. Електродугове напилення інтерметалідних Fe-Al покриттів із використанням різнорідних суцільних та порошкових дротів. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 3. С. 17–21.
89. Deevi S.C. Advanced Intermetallic Iron Aluminide Coatings for High Temperature Applications. *Progress in Materials Science*. 2020. V. 118. P. 112. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100769>.
90. Pougoum F. et al. Study of corrosion and tribocorrosion of Fe₃Al-based duplex PVD/HVOF coatings against alumina in NaCl solution. *Surface and Coatings Technology*. 2019. V. 357. P. 774-783. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.060>
91. Enayati M.H., Karimzadeh F., Jafari M. et al. Microstructural and wear characteristics of HVOF-sprayed nanocrystalline NiAl coating. *Wear*. 2014. V. 309. P. 192–199. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.10.015>
92. Desai P.D. Thermodynamic properties of titanium. *Int J Thermophys*. 1987. V.8. P. 781–794. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF00500794>
93. Yin Z., Yu D., Zhang Q. et al. Experimental and Numerical Analysis of a Reverse-polarity Plasma Torch for Plasma Atomization. *Plasma Chem Plasma*

Process. 2021. V. 41. – P. 1471–1495. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>

94. Producing the most spherical, pure titanium powders. DOI:https://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2019/09/Project_Producing-the-Most-Spherical-Pure-Titanium-Powders.pdf

95. Large-Scale PREP System. (SLPA-H). DOI:<https://prep-system.com/slpa-h/>

96. Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н. и др. Моделирование характеристик плазмы сжатой дуги при воздушно-плазменной резке на прямой и обратной полярности. *Автоматическая сварка.* 2015. № 10. С. 11-19.

97. Yin Z., Yu D., Zhang Q. et al. Experimental and Numerical Analysis of a Reverse-polarity Plasma Torch for Plasma Atomization. *Plasma Chem Plasma Process.* 2021. V. 41. P. 1471–1495. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>

98. Liu F., Yu D., Zhang Q., Liu Y., Yao J. Experimental and numerical analysis of a novel reverse-polarity plasma torch with transferred arc hot-wall nozzle for atmospheric plasma spraying of YSZ coatings. *Surface and Coatings Technology.* 2023. V. 459. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129413>

99. Шицын Ю.Д., Белинин Д.С., Кучев П.С., Неулыбин С.Д. Особенности теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.* 2014. № 2. С. 42-50.

100. AP&C Powder Metallurgy. GE Additive company. DOI:<https://www.advancedpowders.com>

101. Pasang T., Pramana S., Kracum M. et al. Characterisation of Intermetallic Phases in Fusion Welded Commercially Pure Titanium and Stainless Steel 304. *Metals.* 2018. V. 8. P. 863-875. DOI:<https://doi.org/10.3390/met8110863>

102. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Ganushchak O., Shcheretskiy V., Peleshenko S., Konoreva O., Demianov O., Fialko N., Kvasnytskyi V. Analysis of metallurgical interaction during arc building of barrier layers on titanium to

prevent formation of intermetallic in titanium-steel joints. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. V. 5/12 (113). P. 69-82. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240154>

103. Korzhyk V., Khaskin V., Ganushchak O. et al. Features of structure formation when depositing steel (iron) on titanium with plasma-sprayed coatings in the technology of obtaining butt joining of bimetallic plates «titanium-steel». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. V.2. № 12 (122). P. 6-16. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275510>

104. Лебедев И.К. К вопросу о физической природе золотого износа в котельных установках. *Известия Томского политехнического университета*. 1952. № 69. С. 79-90.

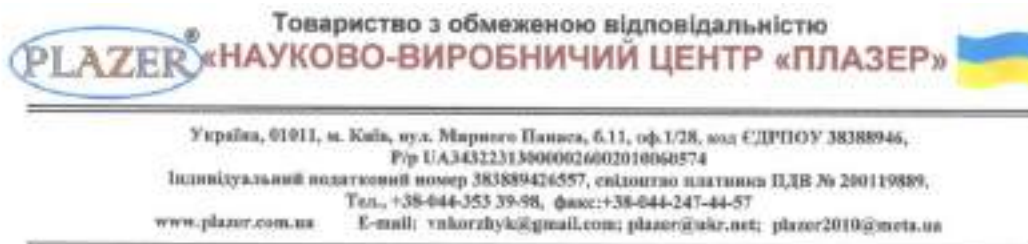
105. Dilip J., Miyanaji H., Lassell A. et al. A novel method to fabricate TiAl intermetallic alloy 3D parts using additive manufacturing. *Defence Technology*. 2017. V. 13. P. 72-76. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.08.001>

106. Müller M., Heinen B., Riede M., Lopez E., Brückner F., Leyens C. Additive Manufacturing of β -NiAl by Means of Laser Metal Deposition of Pre-Alloyed and Elemental Powders. *Materials*. 2021. V. 14. 2246. DOI:<https://doi.org/10.3390/ma14092246>

107. Shishkovsky I., Missemer F., Kakovkina N., Smurov I. Intermetallics Synthesis in the Fe–Al System via Layer by Layer 3D Laser Cladding. *Crystals*. 2013. V. 3. P. 517-529. DOI:<https://doi.org/10.3390/cryst3040517>

108. Shen C., Pan Z., Ma Y. et al. Fabrication of iron-rich Fe–Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*. 2015. V. 7. P. 20-26. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.001>

ДОДАТОК А



№017-03 від 5 березня 2023 р.

ДОВІДКА про впровадження результатів дисертаційної роботи Строгонова Д.В.

В рамках співробітництва між ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР» та Інститутом електрозварювання ім Є.О.Патона НАН України протягом 2019-2021 років, на нашому підприємстві впроваджено результати наукові і практичні результати дисертаційної роботи Строгонова Д.В. «Сферодизація крапель-дисперсних часток і формування структури гранул і покриттів при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних дровових матеріалів» при розробці і організації виробництва промислового обладнання – установки плазово-дугового напилення PLAZER-30PL-W (рис. 1). Технічні характеристики установки наведено у табл. 1.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи Строгонова Д.В., які були впроваджені при виготовленні вищезазначеного обладнання наступні:

- розроблено нову конструкцію плазмотрону з водяним охолодженням катодного і анодного вузлів, яка дозволила підвищити ресурс роботи його внутрішніх деталей при струмах до 500 А (у порівнянні з прототипом, де конструкція плазмотрону з повітряним охолодженням обмежувала його застосування при струмах більше 300 А);
- розроблено малогабаритну конструкцію плазмотрону, де окрім застосування при напиленні зовнішніх поверхонь передбачена можливість напилення внутрішніх поверхонь діаметром більше 70 мм;
- оптимізовано технологію плазово-дугового напилення струмопровідних дровів, де у якості плазмотворюючого газу замість аргону використовується його суміш с гелієм, що сприяє зменшенню розмірів дисперсної фази і призводить до формування щільних покриттів з пористістю <1% об. Виконано відповідні доопрацювання до пневматичної схеми обладнання (газових магістралей) та схем керування процесом, що дозволяє застосовувати вищеперелічені гази для напилення;
- розроблено покращений ергономічний дизайн і інтерфейс керування установкою, адаптований під процеси плазово-дугового напилення зовнішніх і внутрішніх поверхонь.

Один комплекс вказаного обладнання було експортовано в КНР на підприємство «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» для використання в виробничих процесах відновлення та підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів за допомогою технології плазово-дугового напилення струмопровідних спеціальних порошкових та компактних високолегованих дровів.



Рисунок 1. Зовнішній вигляд напівавтоматичної установки «PLAZER 50-PL-W» для плазмово-дугового напилування струмопровідним дротом-анодом

Таблиця 1.

**Технічні характеристики
напівавтоматичної лінії «PLAZER 50-PL-W»**

Параметри	Значення
Споживання енергії, кВа не більше	50
Напруга мережі живлення трифазного змінного струму частотою 50 Гц, В	380
Напруга холостого ходу, В	160
Діапазон регулювання робочого струму, А	100 – 500
Діапазон регулювання робочої напруги, В	30 – 100
Найбільша тривалість включення, ПВ%	100
Витрата повітря при тиску 0,6 МПа, $\text{м}^3/\text{год}$.	50
Витрата аргону при тиску 0,1 МПа, $\text{м}^3/\text{год}$.	2
Швидкість подачі дроту, м/хв.	5 – 15
Охолодження плазмотрона	водяне
Ресурс сопла і катода плазмотрона, годин машинного часу, не менше	100
Габаритні розміри, мм: - джерела електроживлення - шафи управління	501 x 478 x 503 605 x 605 x 1600

Директор ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР»



Михайло КОРОБ

ДОДАТОК Б

ZIBO KNC PETROLEUM EQUIPMENT Co.Ltd
 No.41 Wenshao Road, Linzi, Zibo City, Shandong Province, China
 Tel: 0086-0533-7770931; Fax: 0086-0533-6075057

CERTIFICATE
About implementation
of the results of scientific research

This document confirms the results of cooperation between the company «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (PRC) and E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine in the course of 2020-2022 on the implementation of the technology of deposition a two-layer coating (Fe₃Al+Inconel 625) to protect the pipes of steam superheaters of waste incineration equipment, developed with the participation of an employee of E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (responsible performer – Strohoov Dmytro).

To carry out operational tests of coatings, using this technology at the enterprise «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd» (PRC) using the «PLAZER 50-PL-W» equipment (manufacturer «R&D Center PLAZER, LLC» Ukraine) on stainless steel pipes AISI 310S was sprayed with a two-layer coating with a thickness of 0,6 mm (Table 1), consisting of an inner layer with a thickness of about 0,35 mm, sprayed with a flux-cored wire with a diameter of 1,8 mm with an integral composition of Fe₃Al* intermetallic and a surface layer with a thickness of about 0,25 mm, sprayed using a compact wire with a diameter of 1,6 mm from the nickel-chromium alloy Inconel 625 (the chemical composition of the wire is given in Table 2). After spraying the two-layer coating, it was treated with an inorganic sealant (using the technology of «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd»).

Operational tests of pipe fragments of steam superheaters of the equipment with the specified coatings were carried out at the company «Pourin Special Welding Technology Co., Ltd» (PRC) - a manufacturer of waste incineration equipment.

Table 1. Parameters of the spraying process

No layer	Grade	Current, A	Arc voltage, B	Argon flow rate, nl/min.	Air flow rate, m ³ /h.	Distance cathode-anode	Wire feed speed, m/min.
1	Fe ₃ Al	220	80	40	48	10	12,5
2	Inconel 625	235	75	40	48	10	13,5

Table 2. Chemical composition of Inconel 625 nickel alloy wire

Grade	Mass fraction of elements, %					
	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Ti
<i>Inconel 625</i>	67,4 ± 0,3	18,9 ± 0,3	8,56 ± 0,10	3,34 ± 0,06	1,57 ± 0,19	0,23 ± 0,17

Note: 86Fe+14Al wt.% flux-cored wire consists of AISI 1008 low carbon steel sheath and powder filler (aluminum).

The results of tests of sprayed pipes with the described coating under the conditions of operation of waste incineration equipment during the disposal of solid household waste at the enterprise «Pourin Special Welding Technology Co., Ltd» (PRC) confirmed the effectiveness of the use of these coatings to protect the pipes of steam superheaters of waste incineration equipment. The application of such protective coatings on the pipes of superheaters of waste incineration equipment made of AISI 310S stainless steel made it possible to reduce the intensity of their corrosion from 2 mm to 0,4-0,6 mm per year under operating conditions at a smoke temperature of about 700°C and at a pipe wall temperature of about 485°C.

Director:



An Dong
30 January 2023.