

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О.ПАТОНА**

ДЕМ'ЯНОВ ОЛЕКСІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 621.793.74

**«ФІЗИЧНІ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ
НАПИЛЮВАННІ ПОКРИТТІВ ПЛАВКИМ ДРОТОМ-АНОДОМ»**

Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший дослідник
Коржик Володимир Миколайович,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України,
завідувач відділу електротермічних процесів обробки
матеріалів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Пашенко Валерій Миколайович, професор кафедри смарт
технологій з'єднань та інженерії поверхонь Інституту
матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
Національного технічного університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН
України

доктор технічних наук, професор,
Лихошва Валерій Петрович, завідувач відділу
концентрованих енергетичних впливів Фізико-технологічного
інституту металів та сплавів НАН України.

Захист відбудеться « 7 » квітня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної
академії наук України, за адресою: 030165, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, корпус
4, ауд. 1005.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона Національної академії наук України за адресою: 030165, м. Київ, вул.
Казимира Малевича, 11, корпус 4.

Автореферат розісланий « 5 » березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д.26.182.01
кандидат технічних наук



Є.В. Шаповалов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку науки і техніки часто виникає потреба в нанесенні функціональних покриттів із заданими властивостями без небезпеки виникнення залишкових деформацій або напружень. Прикладами можуть бути: потреба у відновленні габаритних деталей типу вісь або вал, із достатньо незначною (0,1...0,5 мм на діаметр) виробкою посадочних місць, підвищення ресурсу роботи пар тертя за рахунок збільшення зносостійкості їх складових, зменшення витрат палива за рахунок покращення коефіцієнту тертя ковзання певних деталей двигунів внутрішнього згоряння тощо.

Зазвичай в таких випадках застосовують технології газотермічного нанесення покриттів і в першу чергу – плазмове напилення. В традиційних технологіях плазмового напилення в якості напилюваного матеріалу використовують в основному порошки. Недоліком порошкового напилювання є труднощі в забезпеченню гарантованого нагріву в плазмовому струмені усіх часток порошку до температур плавлення, наявність непроплавлених часток в покриттях, складності в управлінні їх якістю. Цю проблему, як і низку інших, вирішує застосування при плазмо-дуговому напиленні плавкого дроту-аноду. В роботах Биковського О.Г., Борисова Ю.С., Лаптевої Г.М., Зеленіна В.И., Кавуненко П.М. виконано дослідження фракційного складу частинок при розпиленні струмоведучого дроту при плазмово-дуговому напилюванні, характеру змочування основи рідким розплавом, в залежності від стану поверхні, термічну взаємодію напилених частинок при співударянні, тощо. Однак в цих роботах відсутній системний аналіз мікрометалургійних процесів при плазмо-дуговому розпилюванню плавкого дроту-аноду із різних типів напилюваних матеріалів, протікання процесів тепло- і масопереносу вивчення особливостей впливу основних технологічних параметрів процесу на структуру та властивості отриманих покриттів. Крім того, відсутнє сучасне обладнання для реалізації даного процесу, що стримує його широке застосування.

Необхідність вирішення зазначених проблем є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках Державних науково-технічних програм (№ ДР 0105U001947 2004-2006 рр.) «Розробка наукових основ процесу плазмово-дугового нагріву із рухомим анодом для обробки матеріалів та надання їм наперед заданих властивостей», (№ ДР 0107U002286 2007-2011 рр.) «Дослідження взаємодії теплових, масообмінних, електромагнітних і магнітогідродинамічних явищ в системі «електродний дріт-крапля-стовп дуги» з метою прогнозування закономірностей процесів і переносу крапель електродного матеріалу та його властивостей при зварюванні плавким електродом», (№ ДР 0114U003557 2014-2015рр.) «Методи контролю температури та швидкості часток конденсованої фази в процесі плазмово-дугового напилювання», (№ ДР 0115U006700 2015рр.) «Розробка конструкції плазмотрону для гібридного плазмового зварювання плавким електродом з осьовою подачею електродного дроту», (№ ДР 0113U000352 2011-2015рр.) «Розробка процесу високопродуктивного надзвукового плазмово-дугового напилювання металокерамічних (керметних) покриттів, в тому числі з наноструктурними складовими, із підвищеними функціональними властивостями»,

(№ ДР 0120U103885 2019-2020) «Спільні дослідження фізико-металургійної взаємодії нанорозмірних порошоків з розплавами при отриманні зварювальних алюмінієвих дротів»

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – розробка та промислове впровадження технологій і обладнання нанесення покриттів широкого призначення із підвищеними показниками щільності та зчеплення з основою шляхом застосування процесів плазмово-дугового розпилювання компактного металевого дроту-аноду із різних типів сталей і сплавів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Виконати аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку технологій плазмо-дугового напилювання покриттів, провести вибір технологічної схеми досліджуваного процесу, початкових умов для проведення теоретичних та експериментальних досліджень
2. Розробити методики розрахункових та фізичних експериментів по дослідженню процесів тепло- і масопереносу в плазмовому потоці, виконати комплекс теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей зміни вольт-амперних характеристик та особливостей протікання мікрометалургійних процесів при плазмо-дуговому напилюванні зовнішнім плавким дротом-анодом.
3. Дослідити фізико-металургійні особливості при плавленні та розпиленні дроту-аноду, в тому числі утворення і диспергування плівки розплаву на торці дроту-аноду при плазмо-дуговому розпиленні.
4. Вивчити закономірності впливу основних технологічних параметрів процесу плазмо-дугового напилювання на фізико-металургійні умови формування структури і властивостей покриттів.
5. Розробити та впровадити рекомендацій з конструювання обладнання для плазмо-дугового напилювання при виготовленні зразка серійної установки та напівавтоматичної лінії плазмо-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту.
6. Розробити рекомендації з вибору оптимальних технологічних режимів одержання покриттів широкого призначення, впровадити технології для підвищення ресурсу бурових та нафтовидобувних різбових ділянок насосо-компресорних труб і контактних поверхонь сталевих струмопідводів.

Об'єкт дослідження – технологія плазмо-дугового напилювання покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом.

Предмет дослідження – мікрометалургійні процеси в двофазному плазмовому струмені при плазмо-дуговому напилювання металевих покриттів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи було застосовано такі сучасні методи дослідження, як математичне моделювання, а також аналітичні та чисельні методи дослідження фізичних явищ, які супроводжують фізико-металургійні процеси плазмо-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом; оптичні, термографічні та спектральні методи дослідження плавлення дроту-аноду і поведінки двофазного плазмо-порошкового струменю; оптичне і механічне вимірювання геометричних параметрів напилених шарів; металографічні дослідження отриманих структур за допомогою оптичної та електронної мікроскопії, а також

рентгенофазового аналізу; мікродюрometrічний аналіз; трибологічні дослідження властивостей напилених покриттів методом вимірювання зносостійкості в умовах тертя з обмеженою долею мастила; дослідження міцності зчеплення нанесених покриттів з основою (адгезії). У випадках вимірювання зносостійкості, адгезії і мікротвердості для підвищення достовірності одержувані показники усереднювати за кількома (від 3 до 10) зразкам.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на забезпечення потрібних для якості та функціональних характеристик поверхонь деталей при плазмо-дуговому напиленні металевих покриттів плавким дротом-анодом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) досліджено та проаналізовано мікрометалургічні процеси, що відбуваються в двофазному плазмовому струмені при розпиленні зовнішнього плавкого дроту-аноду за допомогою створеного експериментального комплексу, який базується на інтеграції оригінальної тепловізійної системи із інноваційною дослідною плазмо-дуговою установкою та програмним забезпеченням яке здійснює автоматичну обробку інформації від високошвидкісної відеокамери і цифрового спектрометра та системи управління технологічним параметрами;
- 2) в результаті теоретичних та експериментальних досліджень встановлено закономірності розподілу і шляхи управління такими параметрами процесу плазмо-дугового напилювання зовнішнім плавким дротом-анодом, як швидкість і температура плазми, напруженість електричного поля, вольт-амперні характеристики стовпа дуги, концентрація аргону в плазмовому струмені, в залежності від режимів роботи плазмотрона та основних технологічних факторів (витрати плазмоутворюючого газу, сили струму, витрати високошвидкісного супутнього повітряного потоку навкруг двофазного запиленого плазмового струменя);
- 3) в результаті теоретичних та експериментальних досліджень проаналізовано та візуалізовано процеси формування шару розплаву на торці дроту-аноду при плазмо-дуговому розпиленні, зриву металевих крапель діаметром 500...700 мкм та виявлено процеси їх вторинної диспергації до діаметрів 40...150 мкм, а також встановлені закономірності зміни швидкості і температури частинок вздовж довжини плазмового струменя;
- 4) виявлено ефект виникнення високошвидкісних (4 км/с) сфероподібних яскравих розрядів розміром до 5 мм навкруг поверхні розплавлених часток при плазмо-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду, який можна пояснити явищем термоемісії електронів навколо краплі вольфраму із підвищеною температурою плавлення (3700 К);
- 5) встановлена тенденція зменшення степеню вигорання легуючих елементів та пористості напилених покриттів із підвищенням значень витрати кільцевого високошвидкісного супутнього повітряного потоку навкруг двофазного запиленого плазмового струменя G_2 від 0 до 20-40 м³/год, при цьому при напилюванні сталевих дротів марок 65Г, 70, Св-08 степінь вигорання легуючих елементів (С, Мп) знижується в на 30-40%, пористість до 0,5-2,5%, а при

напилюванні дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63 при значеннях G_2 35 м³/год отримані безпористі покриття.

- б) встановлено, що параметр витрати кільцевого повітряного потоку, супутнього плазмовому струменю, є одним із основних, який суттєво впливає на показник міцності зчеплення напилених покриттів з основою: ріст значень G_2 від 0 до 20-40 м³/год при незмінних інших технологічних параметрах приводить до росту цього показника на 30-50%.

Практичне значення одержаних результатів. Встановлені в роботі закономірності процесу плазмо-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом, а також вимоги до умов їх реалізації, дозволили створити рекомендацій з конструювання обладнання, яке забезпечує на поверхні виробів одержання функціональних покриттів потрібних характеристик і якості. Практична цінність роботи міститься в наступному:

- 1) за результатами лабораторних випробувань на зносостійкість і ходових випробувань напилених деталей двигунів внутрішнього згоряння, зокрема деталей типу «вал», встановлено придатність розроблених технологічних процесів до промислового впровадження;
- 2) реалізована схема плазмового напилення із використанням в якості аноду струмопровідного дроту забезпечує більш ефективно управління параметрами плазмового струменю, підвищує коефіцієнт корисної дії нагріву матеріалів у плазмі, знижує теплове навантаження на анод;
- 3) за рахунок стиснення і захисту турбулентного струменю аргонної плазми супутнім надзвуковим ламінарним потоком стисненого повітря досягається істотне збільшення його протяжності, звуження, а також захист від окислення крапель рідкого металу, що мінімізує наявність окислів у напилених шарах;
- 4) розпилення металевого дроту-аноду, що подається із швидкістю 5-7 м/хв, струмом 160-200 А дозволяє вести процес плазмо-дугового напилювання із коефіцієнтом використання матеріалу понад 70%, що значно підвищує економічність даного процесу;
- 5) розроблені рекомендації по конструюванню плазмотрону та плазмо-дугового обладнання дозволили виготовити зразок серійної установки та напівавтоматичної лінії плазмо-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту
- б) отриманню безпористих мідних покриттів із підвищеною міцністю зчеплення з основою дозволило їх використовувати для захисту від захоплювання важко навантажених різьбових з'єднань бурових та нафтовидобувних насосно-компресорних труб, а також для створення контактів і в якості проміжного шару для отримання паяних з'єднань на алюмінієвих і сталевих виробах і деталях.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі особисто автором: проаналізовано та вивчено наукову літературу з теми дисертації; проведено фізичне та комп'ютерне моделювання, взята участь в проведенні технологічних і металографічних досліджень, проведено механічні випробування напилених покриттів (на відрив, на тертя, на корозію).

Дисертаційна робота виконана у відділі електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під

керівництвом докт. техн. наук, ст.н.с., завідувача відділом електротермічних процесів обробки матеріалів ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України Коржика В. М. Робота є результатом самостійних досліджень дисертанта.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на наступних національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах, та презентувались у збірках наукових праць:

- міжнародна науково-технічна конференція «Nanotechnology and Nanomaterials», Lviv, 6-29 August, 2020;
- міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020», КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020;
- VI наукова конференція «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» НАНСИС-2019, Київ, 4-6 грудня 2019;
- сьома міжнародна конференція «Математичне моделювання і інформаційні технології в зварюванні і споріднених процесах», Одеса, 2014;
- десята промислова конференція "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях", п. Славське, Карпати, 18-22 лютого 2010;
- міжнародна науково-практична конференція «Персп. техн., матер. и оборудование в литейной индустрии», ФТІМС, Київ, 2010;
- міжнародна конференція «Сварка и родственные технологии в третье тысячелетие», Київ, 24-26 листопада 2008;
- VII міжнародна науково-технічна конференція «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии», Гродно, Білорусь, 27-28 вересня 2007.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 23 наукових праць, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави), 1 патент, 9 тез доповідей у збірках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 174 сторінках, складається із вступу, шести основних розділів, основних висновків, додатку та списку використаних джерел зі 140 найменувань. Робота містить 87 рисунків, 22 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження, встановлено предмет та об'єкт дослідження, вказано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, сформульовані основні положення, що винесені на захист.

У першому розділі наведено аналіз сучасного стану використання технологій газотермічного напилення (ГТН). Показано щорічне зростання на 8-15% обсягу застосування даних технологій в світовій промисловості. Обсяг ринку ГТН в Північній Америці і Японії щорічно складає більше одного мільярда доларів. В останні роки ГТН отримує інтенсивний розвиток в Китаї та Індії. Проте цей розвиток стримується низкою факторів, як от низькі значення коефіцієнтів використання потужності плазмового струменя і матеріалів, що напиляють, висока вартість цих

матеріалів, відсутність в ряді випадків технологічних узагальнень та рекомендацій тощо. Використання процесу плазмо-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом може сприяти усуненню більшості з таких стримуючих факторів за рахунок застосування дротів. Крім того, цей процес характеризується підвищеним коефіцієнтом використання потужності плазмового струменя через задіяне в ньому анодне розпилення. Все це зробило актуальною задачу дослідження особливостей плазмо-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом, розробку нового обладнання для реалізації вказаної технології, а також дозволило сформулювати мету і завдання роботи.

Другий розділ присвячено опису розробки методики виконання досліджень, що включає:

- вибір схеми процесу, розробка методики та початкових умов для чисельних та реальних експериментів по дослідженню процесів тепло-, і масопереносу в плазмовому потоці, вибір математичних моделей для теоретичного дослідження плазмових потоків;
- створення інноваційного експериментального комплексу для досліджень мікрOMETALургійних процесів в двофазному плазмовому струмені при розпиленні дроту-аноду;
- вибір методик дослідження структур та властивостей отриманих покриттів.

Експериментальний комплекс для досліджень мікрOMETALургійних процесів включає оригінальну систему відеофіксації процесу напилення, інтегровану в нову дослідну плазмо-дугову установку із робочим струмом 160-300 А (рис.1а). В системі відеофіксації процесу напилення використано інноваційний тепловізійний модуль, в якому застосовано новий підхід з інтеграції обробки інформації від високошвидкісної камери HD1-1312-1082-G2 (Photon-Focus, Швейцарія) і цифрового спектрометра LR1-T (ASEQ Instruments, Канада) (рис.1в).

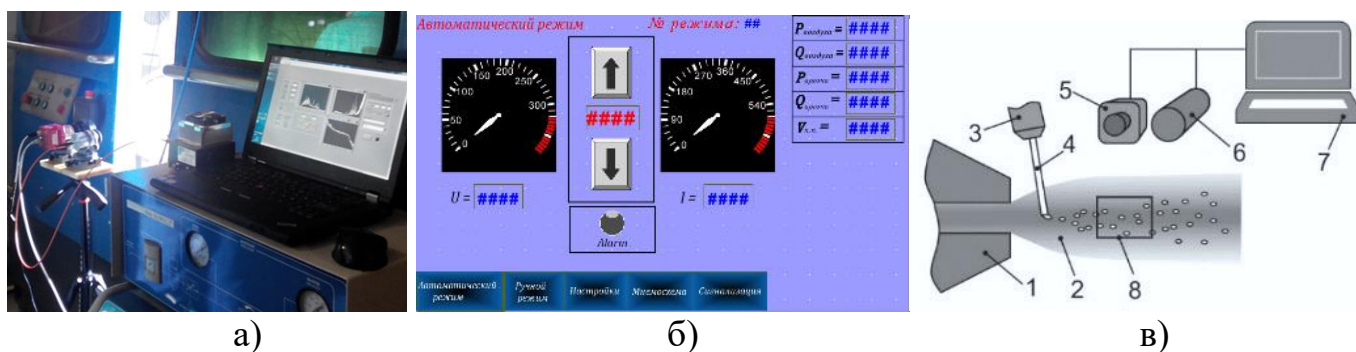


Рисунок 1 Загальний вигляд лабораторного стану (а) меню апаратурно-програмних засобів для автоматичної реєстрації та обробки даних параметрів процесу(б) і структура систем и відеофіксації та візуалізації процесу плазмо-дугового розпилення розплаву на торці дроту-аноду (в): 1 – плазмотрон, 2 – плазмовий струмінь, 3 – мундштук, 4 – дріт, що розпилюється, 5 – камера, 6 – фотоспектрометр, 7 – комп'ютер, 8 – вимірювальний об'єм.

Для інтеграції даного модуля в середовищі MATLAB розроблено М-клас об'єктів aSpectr, які представляють його у вигляді віртуального приладу з широким набором функціональних можливостей при часу експозиції спектрометра 10...100 мс.

Вимірювання температури проводилося по тепловому випромінюванню розплавлених часток (неперервний спектр) в діапазоні 550...600 нм, вільного від власного випромінювання плазми (лінійний спектр). Для визначення температурного розподілу напилюваних часток використовували новий підхід, суть якого полягає в реєстрації за допомогою фотоспектрометра сумарного випромінювання ансамблю частинок, які пролетіли вимірювальний об'єм за час експозиції приладу, з подальшим відновленням температурного розподілу часток математичним способом.

Апаратурно-програмні засоби дослідної плазмо-дугової установки дозволяють здійснювати автоматичну реєстрацію та обробку даних параметрів процесу, в тому числі таких, як струм дуги, напруга на дузі, тиск та витрата плазмоутворюючого газу (аргону), тиск та витрата повітря для створення супутнього потоку, частота обертання приводу подачі дроту, тощо.

В якості дослідних матеріалів для напилювання використовували дроти діаметром 1,2 – 2.0 мм із металів і сплавів в широкому інтервалі значень температури плавлення (650-3420°C): із вольфраму, нікелю, ніхрому Х20Н80, нержавіючої та вуглецевих сталей марок 20, 65Г, Ст70, У8, міді М2, алюмінієвого сплаву АМг63.

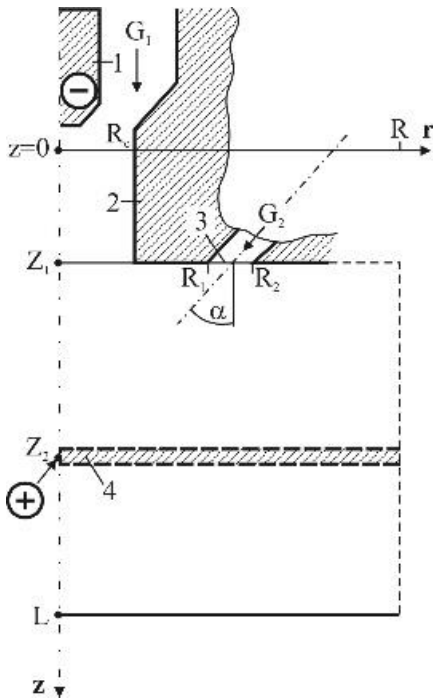
Рентгеноструктурні дослідження проводили на дифрактометрах Дрон-2.0 і Дрон-3.0. Металографічні дослідження протравлених зразків із покриттями здійснювали на оптичних мікроскопах МІМ-7, МІМ-8, Neophot-23 при збільшенні до $\times 1000$. Мікротвердість вимірювали на приладі LECO М-400, а також на оптичному мікроскопі POLIVAR із приставкою DORAMET-1000, при навантаженні 20-200 г. Мікрорентгеноспектральний аналіз виконували на устаткуванні «Калибакс SX-50» з діаметром зонда 1 мкм, а також на рентгенівському мікроаналізаторі «Superprobe» при збільшенні до 3600.

Для оцінки міцності зчеплення покриттів із основою використовували величину руйнівного напруження в композиції «покриття - основа» при нормальному відриві, визначену за методикою «конусного штифта». Тріботехнічні випробування покриттів проводили в умовах з обмеженим змащенням і без змащення по схемах «диск із покриттям – колодка (чавун СЧ-20, сталь 40Х, мідноасбестовий сплав, сталь 45)», «циліндр (чавун СЧНМД) – кільце (покриття)», «площина (Ст20 після цементації) – покриття».

У третьому розділі описано математичне моделювання генерації плазмового струменю і диспергування дроту-аноду, що плавиться. При побудові фізико-математичної моделі вважали, що тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис.2), через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою $G_1 = 2\pi \int_0^{R_c} \rho u r dr$ і протікає весь струм дуги $I = 2\pi E \int_0^{R_c(z)} \sigma r dr$. За початок

розрахункової ділянки прийняли площину $z = 0$, яка знаходиться на певній відстані від робочого торця катоду. Це дозволяє вважати потік дугової плазми в цій площині осісиметричним і одновимірним у напрямку осі OZ . Захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ осісиметричним потоком під кутом α до осі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку

розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається безструмовий інерційний рух газу.



плазми:

Рисунок 2. Схема розрахункової області: 1 – катод; 2 – сопло плазмотрону, 3 – канал супутнього газового потоку, що обдуває плазмовий струмінь, із витратою G_2 ; 4 – дріт-анод.

В плазмо-дуговому процесі розрахункову ділянку поділено на три області: 1 – область течії дугової плазми всередині сопла плазмотрону ($0 \leq z < Z_1$); 2 – область зовнішньої течії дугової плазми і її взаємодії з потоком захисного газу ($Z_1 \leq z \leq Z_2$); 3 – область інерційного руху без струмової плазми ($z > Z_2$).

Система магнітогідродинамічних (МГД) рівнянь у наближенні турбулентного граничного шару для середніх по часу значень температури і швидкості

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\eta} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p + \mu_0 \frac{H^2}{2} \right); \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\chi} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - \psi. \quad (3)$$

Тут: T – середня температура плазми; $\bar{v} = (\rho v + \rho' v') / \rho$, де v – середня радіальна швидкість, ρ – середня густина плазми, ρ' і v' – пульсації густини і радіальної швидкості; u – середня аксіальна швидкість плазми; p – тиск, який в межах плазмформуєчого каналу визначається як $p = p_{ext} - \int_z^{Z_1} \frac{dp_c}{dz} dz + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr$, а на відкритій

ділянці розряду ($z > Z_1$) $p = p_{ext} + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr$; $C_p(T, p)$ – питома теплоємність при

постійному тиску; σ – питома електропровідність плазми; $\psi(T, p)$ – об'ємна густина потужності власного випромінювання; $\bar{\eta}$ і $\bar{\chi}$ – повні коефіцієнти динамічної в'язкості та теплопровідності плазми, що являють собою суми молекулярної і турбулентної в'язкості и теплопровідності відповідно; E – осьова складова напруженості електричного поля; μ_0 – універсальна магнітна постійна; $H = \frac{1}{r} E \int_0^r \sigma r dr$ – азимутальна

складова магнітного поля струму дуги.

Система МГД рівнянь разом зі супутніми співвідношеннями, k - ε моделлю турбулентності і граничними умовами повністю визначає теплові та газодинамічні характеристики турбулентного потоку плазми, як на дуговій, так і на інерційній ділянці течії. Ці рівняння складають основу уніфікованої математичної моделі, придатної для розрахунку просторових розподілів температури і швидкості

дозвукових турбулентних плазмових потоків, які генеруються у нашому випадку плазмотроном з частково відкритою дугою при наявності супутнього газового потоку, який обдуває плазмову дугу.

За допомогою розробленої фізико-математичної моделі та програмного забезпечення для її комп'ютерної реалізації був проведений чисельний аналіз характеристик дозвукової турбулентної течії аргонової плазми, що генерується плазмотроном із плавким дротом-анодом при різних режимах його роботи (рис.3-4). Також встановлено, що підвищення напруженості електричного поля в межах плазмoформуючого каналу є наслідком того, що за обраних значень радіуса каналу, струму дуги та витрат плазмоутворюючого газу напруженість поля поблизу катода є меншою, ніж в асимптотичній області каналу.

В розглянутому діапазоні струмів розрахункова вольтамперна характеристика стовпа дуги є зростаючою, причому швидкість зростання U зі збільшенням I істотно залежить від витрати плазмоутворюючого газу.

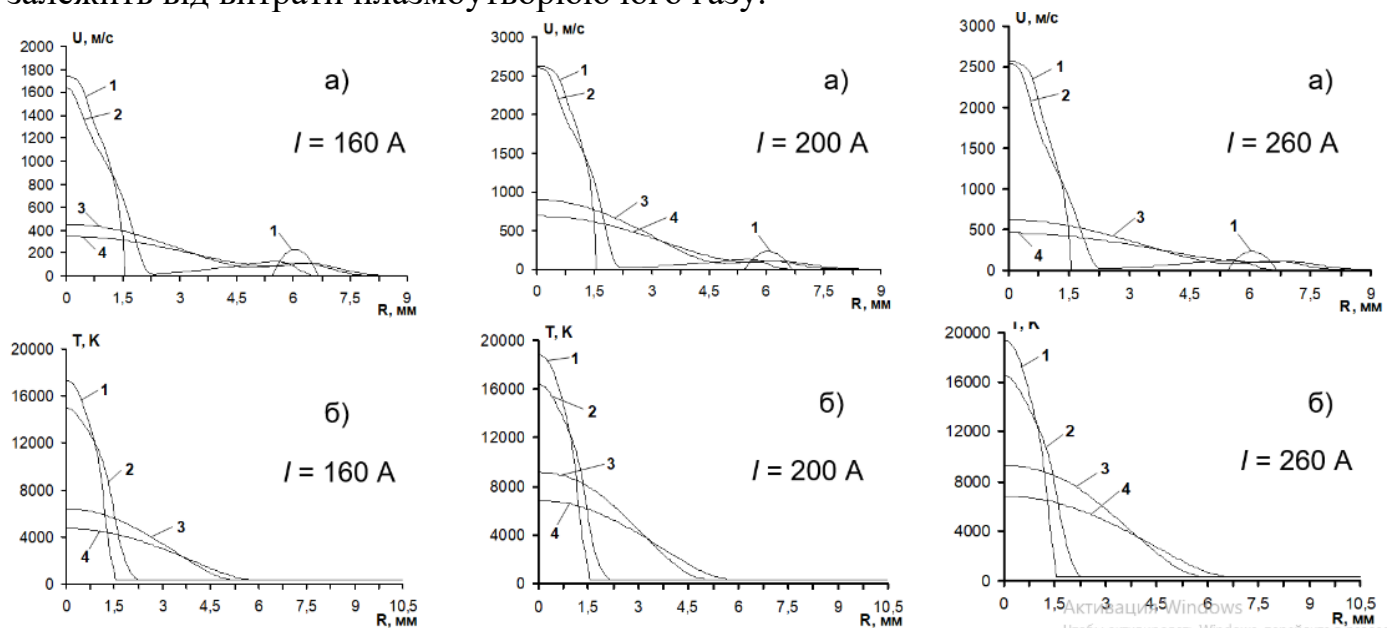


Рисунок 3 Радіальні розподіли швидкості (а) і температури (б) плазми при $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$ і $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$ в областях: 1 – зріз сопла ($z = 3 \text{ мм}$); 2 – область дроту-аноду ($z = 9,3 \text{ мм}$); 3 – $z = 150 \text{ мм}$; 4 – $z = 250 \text{ мм}$.

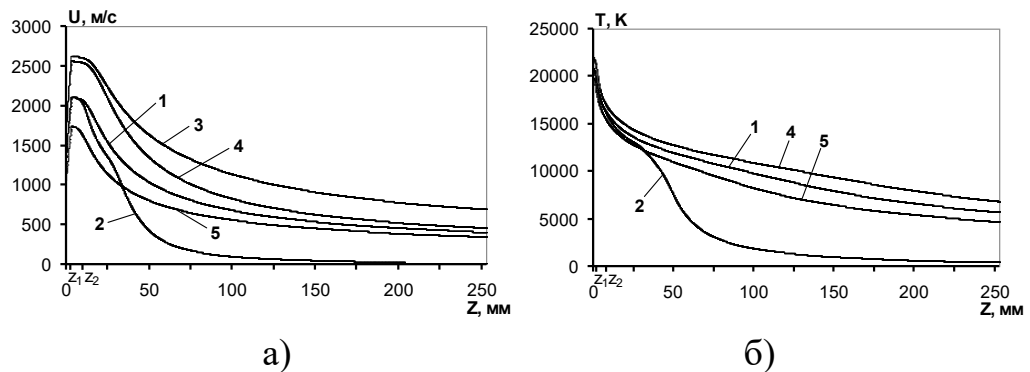


Рисунок 4 Поздовжні зміни швидкості (а) і температури (б) плазми на осі струменя за різних режимів роботи плазмотрона: 1 – $I = 200 \text{ А}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; 2 – $I = 200 \text{ А}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 0 \text{ м}^3/\text{год}$; 3 – $I = 200 \text{ А}$, $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; 4 – $I = 260 \text{ А}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; 5 – $I = 160 \text{ А}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$.

Течія цівки розплаву з кінця дроту-аноду із достатньою точністю описується за допомогою квазіоднорічної системи рівнянь Нав'є-Стокса, записаної з урахуванням сили в'язкого впливу на розплав з боку плазмового потоку:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + 3\nu_w \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(h^2 \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2 \cdot \tau_p(v)}{h \cdot \rho_w}, \quad -L_d < z < 0, \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(vF)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

де $v=v(z,t)$ – аксіальна компонента швидкості течії розплаву; $p=2\sigma K+p_{ext}$ – капілярний тиск; $K=0,5(K_1+K_2)$, $K_1=d\theta/ds$, $K_2=h^{-1}\sin\theta$, $\frac{dz}{ds}=\sin\theta$, $\frac{dh}{ds}=\cos\theta$; $h=h(z,t)$ – радіус поперечного перерізу струменя; $F(z,t)=\pi h^2(z,t)$ – площа поперечного перерізу струменя;

$$\tau_p(v) = \frac{\bar{v}_{ext}^2(\tilde{v}_m)}{\left(\frac{1}{kar} \cdot \ln(Ey^+)\right)^2} \cdot \rho_p = \frac{\bar{v}_{ext}^2(\tilde{v}_m) \cdot \rho_p}{396,71}$$

– напруження тертя в плазмі на обтічній поверхні; ρ_w , ν_w – щільність і кінематична в'язкість матеріалу дроту при температурі плавлення; L_d – довжина струменя; $\bar{v}_{ext}(\tilde{v}_m)=v_{ext}-\tilde{v}_m$ – швидкість течії незбуреного струменя плазми поблизу торця дроту v_{ext} відносно швидкості течії розплаву \tilde{v}_m , ρ_p – щільність плазми; $kar \approx 0,41$ – постійна Кармана; $E=8,8$ – ступінь шорсткості стінки; $y^+=400$. Поставлена задача була розв'язана чисельно, методом кінцевих різниць. Отримані в результаті наведені на рис.5-6.

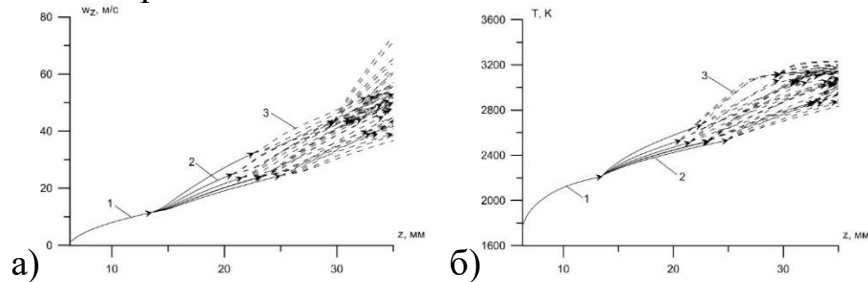


Рисунок 5 Зміна швидкості руху (а) і середньої температури (б) вихідної розплавленої частинки, а також її фрагментів, що утворилися в результаті дроблення, при русі вздовж дистанції напилювання: 1 – вихідна крапля ($w_0 = 1,31$ м/с, $d_0 = 670$ мкм); 2 – фрагменти вихідної краплі; 3 – вторинні фрагменти, утворені при наступних дробленнях.

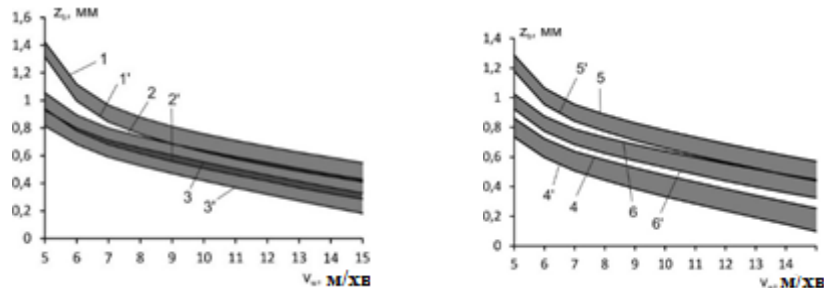


Рисунок 6 Вплив швидкості подачі дроту на положення щодо осі плазмового струменя L_p (1-6) і товщину утримуваного на торці рідкого прошарку $L_p - L_b$ (1'-6') при різних параметрах режиму напилення: 1, 1' – дріт $\varnothing 1,2$ мм; 2, 2' – $\varnothing 1,4$ мм; 3, 3' – $\varnothing 1,6$ мм; 4, 4' – струм дуги 160 А, 5, 5' – 240 А; 6, 6' – витрати Ar 1,5 м³/год.

Для перевірки математичного моделювання виконано експериментальне дослідження закономірностей протікання фізико-металургійних процесів при плазмо-дуговому розпилюванні плавкого дроту-аноду. Вивчено особливості плавлення анодної зони дроту (рис.7,а), формування та дроблення крапель розплаву (рис.7,б-г), визначено значення швидкості і температури частинок в потоці (рис.8,а), їх розподіл за розмірами (рис.8,б), вольт-амперні характеристики стовпа дуги в залежності від технологічних параметрів процесу. Виявлено явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці розміром 500...700 мкм при відриві від торця дроту-аноду до розмірів 40...150 мкм при підвищенні швидкості потоку до 150...300 м/с. Візуалізовано процес формування розплаву (рис.7), визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя.

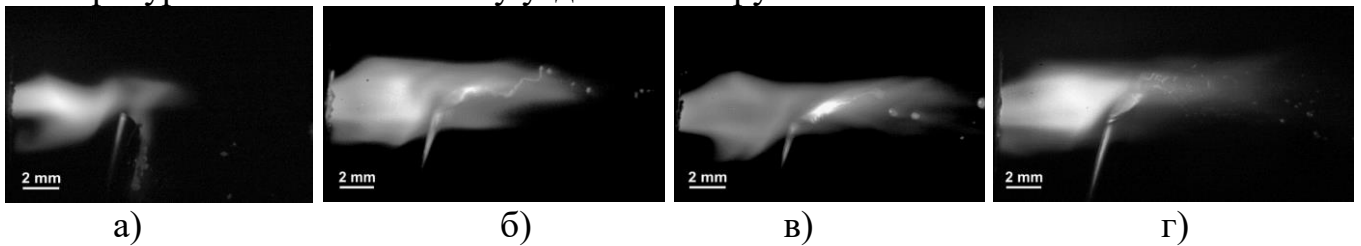


Рисунок 7 Візуалізація процесу формування крапель розплаву при напиленні сталевого дроту $\varnothing 1,6$ мм: а) – запалювання дуги (260 А); б) – струминна течія розплаву (260 А); в) – формування великих крапель (220 А); г) – розпил дрібних крапель розплаву (300 А).

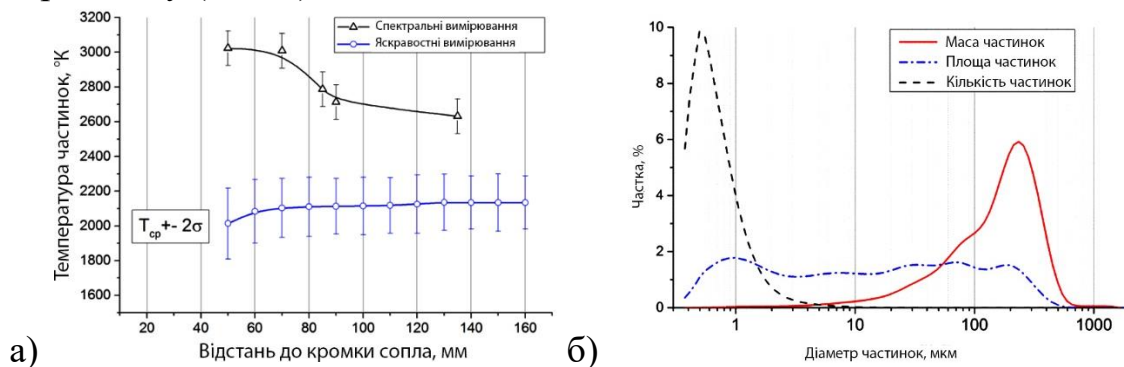


Рисунок 8 Результати досліджень гетерофазного плазмового потоку: а) – вимірювання температури ($I=220$ А); б) – розподіл часток матеріалу за розмірами.

Виявлено ефект виникнення високошвидкісних (4 км/с) сфероподібних яскравих розрядів розміром до 5 мм навкруг поверхні розплавлених часток при плазмо-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду (рис.9).

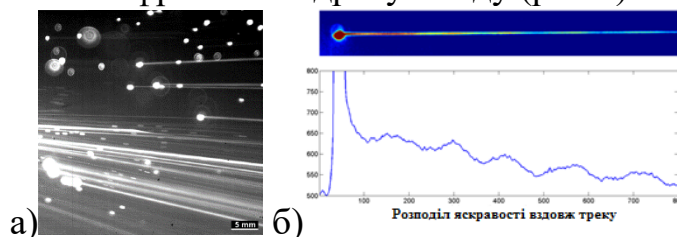


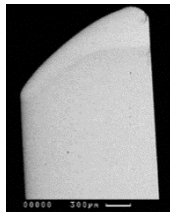
Рисунок 9 Високошвидкісні розряди на поверхні крапель вольфраму на відстані 7-10 мм від зрізу сопла плазмотрона: а) – загальний вигляд струменя; б) – індивідуальна частка і розподіл яскравості вздовж треку.

Даний ефект, згідно рівняння Річардсона-Дешмана, можна пояснити явищем значного росту термоємності електронів навколо краплі вольфраму із підвищеною температурою плавлення (3700 К), внаслідок чого навколо частки формується сфероподібна зона просторового поділу зарядів (електронна хмара), що сприяє підвищенню електропровідності плазми, додатковій іонізації плазми і приводить до генерування вторинних газових розрядів типу «корона» і «стрімер».

Порівняння розрахункових і вимірних значень розмірів, швидкостей і температур розпилених часток, а також характеристик плазмового струменю показали, що точність розрахунків є не гіршою за 5-10%.

В четвертому розділі описано результати дослідження впливу фізико-металургійних особливостей процесу отримання покриттів та їх структуру і властивості. Для вибраних типів матеріалів встановлено особливості форми, мікроструктури і хімічного складу й склад торця дроту-аноду після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового напилювання, в порівнянні із отриманими покриттями.

Струмінь дугової плазми в міжелектродному проміжку



Показано, що зона плавлення і термічного впливу плазмової дуги на торець дроту-аноду шириною в середньому 0,6-1,2 мм має клиноподібну форму, утворену із двох сегментів, які обмежені лініями, близькими до евольвенти, дзеркально оберненої до плазмової дуги (рис. 10).

Рисунок 10 Типова макроструктура торця дроту-аноду після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового напилювання.

Підтверджено, що при збільшенні значень витрати G_2 супутнього захисного повітряного потоку від 0 до 40 м³/год ступінь вигорання легуючих елементів (С, Мп, Мг) в процесі напилювання зі сталевих дротів марок 65Г, Ст70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. При напилюванні дроту із нержавіючої сталі вміст таких легуючих елементів, як Ni, Мо, W в покритті, в порівнянні із їх вмістом в напилюваному дроті, залишається практично незмінним. Встановлено, що при значеннях G_2 20-40 м³/год значення вмісту кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами із підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80 (Ni-20 мас.% Cr-основа), АМг 63 (Mg-6,3мас%; Mn-0,65мас.%; Zr-0,25 мас.%, Al-основа) близькі до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покриттях менший в середньому в 1,5-2 рази.

Напилені покриття мають щільну шарувату структуру, характерну для плазмових покриттів. Значення поруватості в основному знаходиться в межах 0,5-2,5%. Встановлена тенденція до пониження цього показника із підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку. При значеннях $G_2 = 20-40$ м³/год, одночасно із оптимізацією таких параметрів, як сила струму, витрата і тиск плазмоутворюючого

газу, дистанція напилювання, тощо, отримано безпороваті покриття при напилювання дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63 (рис.11). Товщина ламелей в покритті в середньому складає 8-30 мкм, границі між ламелями бездефектні (рис.11,б,в). Це опосередковано свідчить про формування металургійного зв'язку між ними і реалізацію сукупності процесів мікрозварювання між раніше затверділими шарами в покритті та розплавленими частками, що були напилені.

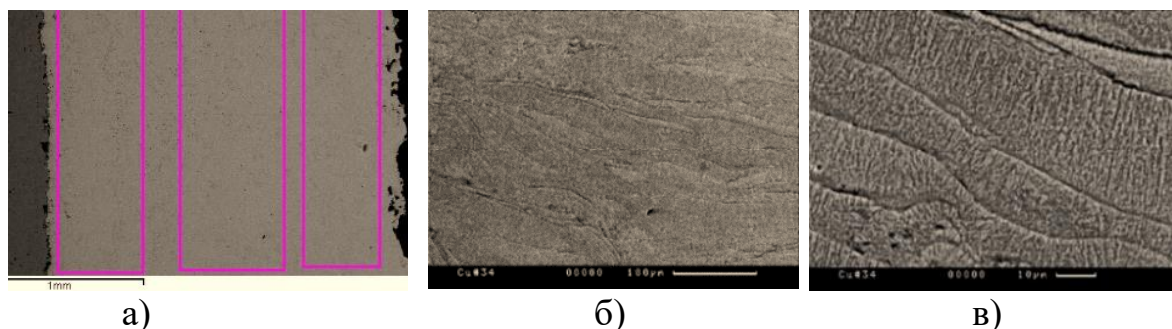


Рисунок 11 Макро- (а) і мікроструктура (б,в) безпороватого покриття із мідного дроту марки М2 (б, в – після травлення).

Механічні випробування напилених досліджуваних способом шарів показали можливість досягнення достатньо високих показників міцності їх зчеплення з основою при відриві по нормалі $B_{b.s.}$ (до 60-70 МПа). Встановлено, що параметр витрати G_2 повітряного потоку, супутнього плазмовому струменю, є одним із основних, який суттєво впливає на цей показник. Так, наприклад, при збільшенні G_2 від 0 до 40 м³/год при незмінних інших технологічних параметрах значення $B_{b.s.}$ зростають на 30-50%. Встановлена аналогічна тенденція впливу технологічного параметру G_2 на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні.

Встановлений зв'язок між підвищенням показника міцності $B_{b.s.}$ і інших властивостей покриттів, отриманих в досліджуваному процесі, із ростом коефіцієнта використання напилюваного матеріалу (КВМ).

В п'ятому розділі надано рекомендації з конструювання обладнання і вибору режимів, а також описано промислове впровадження розроблених технологічних процесів одержання покриттів.

Розроблені рекомендації по конструюванню плазмотрону та нового промислового покоління обладнання для плазмо-дугового напилювання покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом, які були впроваджені в ТОВ Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР» (Україна) при виготовленні зразка серійної установки ППН-1 та напівавтоматичної лінії плазмо-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту (рис.12).



Рисунок 12 Зовнішній вигляд промислового плазмотрону (а) та напівавтоматичної лінії (б) і процесу плазмо-дугового напилювання покриттів на деталі типу «вал» рухомого складу залізничного транспорту.

В якості критерію оптимізації технологічних параметрів для розробки промислової технології вибрано коефіцієнт використання матеріалу (КВМ). Вибір раціональних режимів плазмо-дугового напилення покриттів із вибраних типів дротів здійснювали при умові досягнення показника $КВМ \geq 72\%$.

Розроблений та впроваджений на підприємстві Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd, (КНР) технологічний процес плазмо-дугового напилювання мідним дротом-анодом антизадирних покриттів на різьбові з'єднання бурових, нафтовидобувних та насосно-компресорних труб для захисту від схоплювання важко навантажених різьбових з'єднань «ніпель-муфта». Таке покриття також забезпечує герметичність різьбових з'єднань і не допускає потрапляння в них агресивного корозійного середовища, що дозволяє забезпечити збільшення кількості циклів згвинчування – розгвинчування при спуско-підйомних операціях до 50. Також на даному підприємстві впроваджено технологічні процеси нанесення мідних покриттів для контактів та проміжного шару, для отримання паяних з'єднань на алюмінієвих і сталевих виробах і деталях (зокрема, обміднення шин, струмопідводів і поверхонь заземлення).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Виконано комплекс теоретичних досліджень процесу плазмо-дугового напилення плавким зовнішнім металевим дротом-анодом із використанням фізико-математичних моделей процесів тепло- і масопереносу в електродуговій зоні та турбулентному плазмовому струмені, базованих на магнітогідродинамічних (МГД) рівняннях у наближенні турбулентного граничного шару. Виявлені закономірності плавлення та розпилення дроту-анода, закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей покриттів в залежності від умов технології і типу дроту-анода.

2. На підставі дослідження фізико-металургійних особливостей процесу плазмо-дугового напилювання покриттів плавким металевим дротом-анодом запропоновано ламіналізувати плазмовий струмінь за рахунок його стиснення зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами до $40 \text{ м}^3/\text{год}$, який сприяє підвищенню напруженості електричного поля, а також забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення.

3. Встановлено, що вольтамперна характеристика стовпа дуги при плазмо-дуговому напилюванні плавким металевим дротом-анодом є зростаючою і істотно залежить від витрати плазмоутворюючого газу, причому в діапазоні струмів $I=160\dots 260$ А швидкість зростання U збільшується зі збільшенням I .

4. Визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя, здійснена візуалізація процесу формування розплаву на торці дроту-аноду. Виявлено явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці розміром $600\dots 750$ мкм при відриві від торця дроту-аноду до розмірів $40\dots 150$ мкм при підвищенні швидкості потоку до $150\dots 200$ м/с.

5. Порівняння результатів розрахунків, виконаних по створеним фізико-математичним моделям, із результатами фізичних експериментів, підтвердили, що розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищують 5-10%.

6. Виявлено аномальний ефект виникнення високошвидкісних (4 км/с) сфероподібних яскравих розрядів розміром до 5 мм навкруг поверхні розплавлених часток при плазмо-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду (сфероподібна зона просторового поділу зарядів і додаткової іонізації плазми), який пояснюється явищем значного росту термоемісії електронів навколо високотемпературної краплі вольфраму.

7. Підтверджено, що при збільшенні значень витрати супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 20-40 м³/год степінь вигорання легуючих елементів (С, Mn, Mg) в процесі напилювання із сталевих дротів марок 65Г, Ст70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. При цьому вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами з підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80, АМг 63 близький до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покриттях менший в середньому в 1,5-2 рази.

8. Встановлена тенденція до пониження поруватості напилених покриттів з підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку G_2 і досягнення значень цього параметру в межах 0,5-2,5%, а при $G_2 = 35-40$ м³/год отримано безпоруваті покриття при напилюванні дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63.

9. Встановлено, що параметр витрати G_2 повітряного потоку, супутнього плазмовому струменю, суттєво впливає на міцність зчеплення покриттів з основою. Показано, що шляхом оптимізації технологічних параметрів значення даного показника при відриві покриттів по нормалі досягає до 60-70 МПа. Виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні при росту G_2 від 0 до 35-40 м³/год.

10. Розроблено рекомендації по вибору раціональних технологічних режимів, що дозволяють одержувати металеві покриття товщиною до 5 мм і більше із пониженою поруватістю (1-2%) і міцністю зчеплення з основою до 60-70 МПа при коефіцієнті використанні матеріалу до 72% плазмо-дуговим напилюванням плавким дротом-анодом діаметром 1,2-1,6 мм, що подається із швидкістю 7-12 м/хв при струмах 160...260 А, із використанням в якості плазмоутворюючого газу аргону із витратами 1,0-1,5 м³/год та витратою супутнього повітряного потоку до 35 м³/год.

11. Виконано промислове впровадження отриманих результатів досліджень та розробок в Україні (напівавтоматична лінія плазмо-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу залізничного транспорту) і в КНР (різьбові з'єднання бурових та нафтовидобувних труб і контактні площадки, Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Харламов М.Ю. Об уточнении математической модели электрической дуги в плазмотроне с внешней токоведущей проволокой / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., **Демьянов А.И.** Петров С.В. // Автоматическая сварка, №1, 2009. – С. 53-56. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

2. Бороненко М.П. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления / Бороненко М.П., Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю., **Демьянов А.И.** // Фундаментальные исследования, №10 (часть 6), 2013. – С. 1194-1199. *Дисертантом розглянуто існуючі методи контролю температури і швидкості частинок в струменю дугової плазми.*

3. Бороненко М.П. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы в струях плазменно-дугового напыления / Бороненко М.П., Гуляев И.П., **Демьянов А.И.**, Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю. // Фундаментальные исследования, №11 (часть 10), 2014. – С. 2135-2140. *Дисертантом проведено моделювання температури і швидкості частинок в струменю плазми.*

4. Boronenko M.P. Estimate of Dispersed Phase Velocity and Temperature in Plasma-Arc Spraying Jets / Boronenko M.P., Gulyaev I.P., Gulyaev P.Y., **Demianov O.I.**, Dolmatov A.I., Iordan V.I., Korzhik V.N., Krivtsun I.V., Kharlamov M.Yu. // *Fundamental Research.* – 2014. - 11(10) - P. 2135-2140. *Дисертантом проведено оцінювання температури і швидкості частинок в струменю дугової плазми.*

5. Kharlamov M. Yu. Simulation of Motion, Heating, and Breakup of Molten Metal Droplets in the Plasma Jet at Plasma-Arc Spraying / Kharlamov M. Yu., Krivtsun I. V., **Demianov O.I.** // J. Therm. Spray Technol, V.24(4), 2015. – P. 659–670. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

6. Gulyaev I.P. Experimental Study of the Plasma-Arc Wire Spraying Process / Gulyaev I.P., Gulyaev P.Y., Korzhik V.N., Dolmatov A.V., Iordan V.I., Krivtsun I.V., **Demianov O.I.**, M.Yu. Kharlamov // Paton Weld. Journal, V.3-4, 2015. – P. 36-41. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

7. Гуляев И.П. Экспериментальное исследование процесса плазменно–дугового проволочного напыления / Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В., **Демьянов А.И.**, Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю. // Автоматическая сварка, №3-4, 2015. – С. 37-43. *Дисертантом проведено експериментальні дослідження.*

8. Харламов М.Ю. Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазмотроном с проволокой-анодом / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Петров С.В., **Демьянов А.И.** // Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины

И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 398-401. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

9. Харламов М.Ю. Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазмотроном с проволокой-анодом / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Петров С.В., **Демьянов А.И.** // Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 401-408. *Дисертантом досліджено потоки супутнього газу і дугової плазми.*

10. Харламов М.Ю. Уточненная математическая модель электрической дуги в плазмотроне с внешней токоведущей проволокой / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., **Демьянов А.И.**, Петров С.В. // Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 408-413. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

11. Kharlamov M.Yu. Simulation of motion, heating, and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-rcspraying / Kharlamov M.Yu., Krivtsun I.V., Korzhyk V.N., Ryabovolyuk Y.V., **Demianov O.I.** // Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 511-523. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

12. Щерецький В.О. Вплив сумісного модифікування скандієм та цирконієм на ливарні властивості алюмінієвих сплавів системи Al–Mg–Cu / Щерецький В.О., Jianglong Yi, Чайка А.А., **Дем'янов О.І.** // Processy lit'â, Том 141, №3, 2020. *Дисертантом досліджено вплив скандію на алюмінієві сплави.*

13. Застосування багатоскладового композиційного матеріалу з металевою матрицею як матеріалу для виготовлення електродів живлення апаратів газотермічного напилення / Щерецький В.О., Затуловський В.А. **Демьянов А.И.** // Пат. України №61439 UA, МПК6 С22С 1/10, С22С 21/00, С22В 21/00. *Дисертантом проведено дослідження для перевірки патенту.*

14. Коржик В.Н. Нанесение газотермических покрытий на корпусные детали компьютерной техники для обеспечения экологии рабочего места и конфиденциальности информации / Коржик В.Н., Маринский Г.С., Чернец А.В., **Демьянов А.И.** // Тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии». – Гродно. Беларусь, 27-28 сентября 2007 г. *Дисертантом проведено технологічні дослідження і обрано режими нанесення покриттів.*

15. Кривцун И.В. Математическое моделирование турбулентных пароплазменных потоков / Кривцун И.В., Харламов М.Ю., Коржик В.Н., **Демьянов А.И.**, С.В.Петров, Г.С.Маринский // Тезисы докладов Международной конференции «Сварка и родственные технологии в третье тысячелетие». – Киев, 24-26 ноября 2008 г. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

16. Коржик В.Н. Нанесение газотермических покрытий на корпусные детали компьютерной техники и приборов для обеспечения конфиденциальности информации и экологии рабочего места / Коржик В.Н., Мурашов А.П., Демьянов А.И., Петров С.В., Харламов М.Ю. // Десятая Промышленная конференция "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях". - п. Славское, Карпаты, 18-22 февраля 2010 г. *Дисертантом проведено технологічні дослідження і обрано режими нанесення покриттів.*

17. Затуловский А.С. Литейная технология получения алюмоматричных износостойких дисперснонаполненных композиционных материалов и покрытий из них / Затуловский А.С., Щерецкий В.А. Демьянов А.И. // Матер. Межд. научно-практ. конференции «Персп. техн., матер и оборудование в литейной индустрии». – Киев, ФТИМС, 2010. *Дисертантом проведено технологічні дослідження з нанесення покриттів з композиційних матеріалів.*

18. Кривцун И.В. Разработка физико-математической модели турбулентных паро-плазменных потоков / Кривцун И.В., Харламов М.Ю., Коржик В.Н., Демьянов А.И., Маринский Г.С. // Десятая Промышленная конференция, "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях". - п. Славское, Карпаты, 18-22 февраля 2010 г. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

19. Харламов М.Ю. Моделирование процессов плазменно-дугового распыления проволочных материалов / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Демьянов А.И. // Седьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»— 2014.— С. 31-33. *Дисертантом сформульовано початкові умови для математичного моделювання.*

20. Jianglong Yi. Применение наноразмерных карбидов для получения сварочных проволок на основе алюминия / Jianglong Yi, Щерецкий В.А., Дем'янов О.І. // Тези VI Наукової конференції «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» НАНСИС-2019 4-6 грудня 2019, Київ ISBN 978-966-02-9004-4. *Дисертантом обрано і застосовано нанорозмірні карбіди.*

21. Коржик В.М. Застосування нанорозмірних компонентів в присаджувальних матеріалах для зварювання алюмінієвих сплавів / Коржик В.М., Jianglong Yi, Щерецький В.О., Дем'янов О.І. // Тези конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020» КПІ ім. Ігоря Сікорського. *Дисертантом обрано і застосовано нанорозмірні компоненти.*

22. Shcheretskyi V.O. Compatibility of the non-metallic structure modifiers nanoscale particles with common filler alloys of aluminum welding / Shcheretskyi V.O., Demianov O.I., Yi Jianglong // Book of abstracts International research conference "Nanotechnology and Nanomaterials" NANO-2020 Lviv, 6-29 August, 2020. ISBN: 978-966-97587-3-6. *Дисертантом обрано і застосовано неметалеві модифікатори структури нанорозмірних частинок.*

АНОТАЦІЯ

Дем'янов О.І. Фізичні та металургійні процеси при плазмово-дуговому напилюванні покриттів плавким дротом-анодом. -Рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені технології. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці фізико-математичних моделей процесів тепло- і масопереносу в електродуговій зоні та турбулентному плазмовому струмені при плазмо-дуговому розпиленні металевго дроту-аноду та їх дослідній перевірці. Встановлено, що після формування розплаву на дроті-аноді відбувається зрив металевих крапель діаметром 500...700 мкм та їх подальше дроблення до діаметрів 40...150 мкм в плазмовому струмені. Також проведено вимірювання швидкості і температури частинок вздовж довжини струменя. Запропоновано управління характеристиками плазмового струменя за рахунок його стиснення зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами від 16 до 40 м³/год, який підвищує напруженість електричного поля і забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення. Розроблено рекомендації по вибору оптимізованих технологічних режимів, що дозволяють одержувати металеві покриття товщиною до 5 мм і більше із пониженою поруватістю (1-2%), а також безпоруваті покриття із міцністю зчеплення з основою близько 60-70 МПа при коефіцієнті використанні матеріалу до 72% плазмо-дуговим напилюванням дротом-анодом діаметром 1,0-1,6 мм, що плавиться при струмах 160...260 А, із використанням в якості плазмоутворюючого газу із витратами 1,0-1,5 м³/год. Також створено рекомендації по конструюванню обладнання і режимам його функціонування. Доведено високий рівень зносостійкості нанесених покриттів в умовах тертя ковзання. Виконано низку промислових впроваджень на промислових підприємствах України і КНР.

Ключові слова: плазмо-дугове напилювання, плавкий дріт-анод, хімічний склад, плазмовий струмінь, крапля розплаву, вольт-амперна характеристика, використання матеріалу, напилене покриття, структура, властивості, зносостійкість, міцність зчеплення.

АННОТАЦИЯ

Демьянов А.И. Физические и металлургические процессы при плазменно-дуговом напылении покрытий плавящийся проволокой-анодом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – сварка и родственные технологии. – Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, 2021.

Диссертация посвящена разработке физико-математических моделей процессов тепло- и массопереноса в электродуговой зоне и турбулентной плазменной струе при плазменно-дуговом распылении металлической проволоки-анода и их экспериментальной проверке. Установлено, что после формирования расплава на проволоке-аноде происходит срыв металлических капель диаметром 500...700 мкм и их дальнейшее дробление до диаметров 40...150 мкм в плазменной струе. Также проведено измерение скорости и температуры частиц вдоль длины струи. Предложено управление характеристиками плазменной струи за счет ее сжатия внешним высокоскоростным воздушным потоком с расходами от 16 до 40 м³/ч, который повышает напряженность электрического поля и обеспечивает защиту расплавленных капель металла от окисления. Разработаны рекомендации по выбору

оптимизированных технологических режимов, позволяющие получать металлические покрытия толщиной до 5 мм и более с пониженной пористостью (1-2%), а также беспористые покрытия с прочностью сцепления с основой до 60-70 МПа при коэффициенте использования материала до 72% плазменно-дуговым напылением проволокой-анодом $\varnothing 1,0-1,6$ мм, плавящейся при токах 160...260 А, с использованием в качестве плазмообразующего газа аргона с расходом 1,0-1,5 м³/ч. Также созданы рекомендации по конструированию оборудования и режимам его функционирования. Доказан высокий уровень износостойкости нанесенных покрытий в условиях трения скольжения. Выполнен ряд промышленных внедрений на промышленных предприятиях Украины и КНР.

Ключевые слова: плазменно-дуговое напыление, плавящаяся проволока-анод, химический состав, плазменная струя, капля расплава, вольтамперная характеристика, использование материала, напыленное покрытие, структура, свойства, износостойкость, прочность сцепления.

ANNOTATION

Demianov O. Physical and metallurgical processes in plasma-arc spraying of coatings with fusible wire-anode. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.06 - welding and related technologies. – The Paton Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Scientific bases of the process of plasma-arc sputtering with a moving wire-anode in the form of: a set of physical and mathematical models of heat and mass transfer processes in the electric arc zone and turbulent plasma jet, basic and magnetohydrodynamic (MHD) equations in the turbulent limit approximation; regularities of melting and spraying of moving metal wire-anode; regularities of formation of structure and physical and mechanical properties of coverings depending on conditions of technology and structure of a wire anode. Based on the study of physical and metallurgical features of the process of plasma-arc sputtering of coatings with fusible metal wire-anode, it is proposed to laminarize the plasma jet by compressing it with external high-velocity air flow from 16 to 40 м³/h, which increases the electric field strength. Reliable protection of molten metal droplets from oxidation. It is established that the current-voltage characteristic of the arc column during plasma-arc spraying with fusible metal wire-anode is increasing and significantly depends on the consumption of plasma-forming gas, and in the current range $I = 160...260$ А the growth rate U increases with increasing I . melt on the anode wire is the failure of metal droplets with a diameter of 500...700 μm and their subsequent crushing to diameters of 40...150 μm in the plasma jet. Recommendations for the choice of optimized technological modes are developed, which allow to obtain metal coatings up to 5 mm thick and more with reduced porosity (1-2%) and adhesion strength to the base of about 40-50 МПа at a material utilization factor of up to 72% by plasma-arc wire spraying. -anode with a diameter of 1.0-1.6 mm, melting at currents of 160...260 А, using as plasma-forming gas argon or air-gas mixture with a flow rate of 1.0-1.5 м³/h. By studying the temperature of formation of liquid metal droplets and the rate of their transfer to the treated surface during plasma-arc spraying of coatings with fusible metal wire-anode, recommendations for the design of equipment and modes of its operation are created. Comparison of the results of calculations performed

on the created physical and mathematical models with the results of physical experiments, showed that the accuracy of calculations is not worse than 5-10%. This result is acceptable and indicates the adequacy of the simulation. As a result of wear resistance tests it is confirmed that the technology of plasma-arc spraying with a moving wire-anode and the flow of associated shielding gas provides a high level of wear resistance of the applied coatings under sliding friction, in particular can exceed the wear resistance of the base up to 3-4 times. Industrial implementation (at Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd, PRC) of plasma-arc spraying with metal wire-anode in technologies of repair, restoration and increase of resource of threaded sections of pump-compressor pipes and contact surfaces of steel power supplies is performed. It is established that the coatings applied according to the developed technologies ensure the tightness of threaded joints, prevent the ingress of aggressive corrosive environment, increase the number of cycles "screwing - unscrewing" during lowering and lifting operations up to 50 cycles.

Keywords: plasma arc spraying, fusible wire anode, chemical composition, plasma jet, melt drop, volt-ampere characteristic, material use, sprayed coating, structure, properties, wear resistance, adhesion strength.

Підписано до друку 24.02.2021 р. Формат 60x80/16. Пап. офс. № 1. Офс. друк. Ум.друк.0,7.
Ум.фарбо-відб.0,9. Тираж 110 прим. Зам. № 378

ПОД ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 03150, Київ-150, вул. Антоновича,69