Вх. № 475
24 03 2021

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора,
завідувача відділу концентрованих енергетичних впливів
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України
ЛИХОШВИ Валерія Петровича

на дисертаційну роботу **Дем'янова Олексія Івановича**
«Фізичні та металургійні процеси при плазмово-дуговому напилюванні покриттів плавким дротом-анодом», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «зварювання та споріднені процеси і технології» у спеціалізовану вчену раду Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України.

Актуальність теми дисертації. На сьогоднішній день існує досить багато задач захисту металевих конструкцій від корозії, відновлення деталей машин і механізмів, покращення механічних характеристик їх робочих поверхонь, які вирішуються за рахунок застосування технологій газотермічного напилення порошкових матеріалів. Однак, при застосуванні традиційних плазмових технологій порошкового напилення виникають певні труднощі в забезпеченню гарантованого нагріву в плазмовому струмені усіх часток порошку до температур плавлення, наявність непроплавлених часток в покриттях. Крім того, вартість порошків є вищою за вартість дротів і прутків, з яких їх розпилюють. Ці проблеми, як і низку інших, вирішує застосування при плазмо-дуговому напиленні плавкого дроту-аноду. Всебічний аналіз особливостей процесу плазмо-дугового розпилювання плавкого дроту-аноду із різних типів напилюваних матеріалів для розробки промислових технологій є досить актуальною задачею. Саме таку задачу пропонує розв'язати автор роботи. Ще одним аспектом актуальності представленої роботи є розв'язання завдання скорочення витрат ресурсів на нанесення функціональних покриттів із одночасним підвищенням їхньої якості.

З огляду на положення, викладені вище дисертантом (в авторефераті (А) на стор.1, у рукописі дисертації (Д) на стор.18-19 і 26-35) актуальність теми є обґрунтованою та не викликає сумнівів.

Обґрунтованість наукових положень. Обґрунтованість наукових результатів у дисертаційній роботі підтверджена проведеною автором низкою теоретичних та експериментальних досліджень, які отримані дисертантом в результаті кваліфікаційного їх виконання із застосуванням сучасних методик і обладнання спрямованих на підвищення ефективності використання плазмово-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом.

Базові наукові положення, на яких ґрунтується дослідження, автор формулює з посиланням на авторитетні наукові видання, що не викликає

сумніву у їх достовірності. В рамках дослідження проведено літературний аналіз існуючих методів газотермічного напилення покриттів, обрано технологічну схему та устаткування плазмово-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом з подальшим аналізом особливостей процесу і розробкою інноваційного обладнання і промислових технологій.

У роботі проведено імітаційне чисельне моделювання газо- та гідродинамічних процесів генерації плазмового струменю і перенесення ним розпилених часток дроту-аноду. Проведено експериментальні дослідження цих процесів із використанням інноваційного експериментального комплексу. Зіставлені отримані результати фізичного та імітаційного моделювання та отримана висока збіжність.

Результати дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних наукових конференціях та семінарах. Основні положення та результати дисертаційних досліджень пройшли апробацію на 9 міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях і семінарах (А, стор.5, Д, стор.11-13, 24-25).

Зазначене вище дозволяє зробити висновок, що ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи відповідає вимогам до кандидатських дисертацій.

Значення результатів роботи для науки і практики. Наукова та практична цінність отриманих результатів у роботі полягає у виконанні комплексу теоретичних досліджень процесу плазмово-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-аноду, формування структури та фізико-механічних властивостей покриттів в залежності від умов технології і типу дроту-аноду.

На підставі дослідження фізико-металургійних особливостей процесу плазмо-дугового напилювання покриттів плавким металевим дротом-анодом запропоновано ламінарізувати плазмовий струмінь за рахунок його стиснення зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами до 40 $м^3$/год, який сприяє підвищенню напруженості електричного поля, а також забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення. 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 коефіцієнте 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 м^3/год та витратою супутнього повітряного потоку до 35 м^3/год.

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) (А, стор.2-4, Д, стор.21-23, 156-160).

Повнота опублікованих результатів дисертації. Основні результати роботи Дем'янова О.І представлені в 22 наукових працях, у тому числі, 13 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, що входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS), 1 патент на корисну модель, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій. Усі сформульовані в дисертації наукові та практичні результати, положення і висновки повністю викладено в згаданих друкованих працях, які написані як особисто здобувачем, так і в співавторстві. З праць, опублікованих у співавторстві, у дисертації здобувач використав лише ті результати, що отримані ним самостійно (А, стор.16-18, Д, стор.9-13).

Результати дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Оцінка змісту роботи. Дисертація викладена на 174 сторінках, складається із вступу, п'яти основних розділів, основних висновків та списку використаних джерел зі 140 найменувань. Робота містить 87 рисунків, 22 таблиці.

У вступі до дисертаційної роботи висвітлена актуальність теми, сформульована мета та основні положення, які подаються на захист, обґрунтовані наукова новизна та практична цінність роботи, надана інформація про апробацію результатів і публікації за темою роботи (А, стор.5, Д, стор.18-25).

У першому розділі наведено аналіз особливостей плазмо-дугового розпилення рухомих дротів-анодів свідчать про високу ефективність цього процесу. Показано, що в ході низки досліджень визначено температури частинок при плазмовому напиленні струмопровідним дротом, запропоновано конструкції обладнання, досліджено поведінку плазмового струменю, розроблено математичні моделі для моделювання процесу. Також встановлена відсутність комплексних систематичних досліджень плазмового напилення металевими дротами-анодами, недостатнє вивчення таких важливих питань, як температура плазмового потоку з металевими частинками, вплив цього потоку

на оброблювану основу, формування напиленого матеріалу на поверхні, недоліки існуючих математичних досліджень. Розглянуто схеми процесів ГТН, проаналізовано їх переваги і недоліки, визначено перспективність застосування схеми плазмо-дугового розпилення рухомого дроту-аноду. На підставі аналізу літератури сформульовано мету і завдання роботи (А, стор.5-6, Д, стор.26-64).

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 мікрометалургійних процесів в двофазному плазмовому струмені при розпиленні дроту-аноду;
- вибір методик дослідження структур та властивостей отриманих покриттів.

Описана конструкція дослідної плазмово-дугової установки, апаратурно-програмні засоби якої 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. Вказано моделі і характеристики дослідного обладнання, а також хімічні склади матеріалів, які було застосовано в роботі (А, стор.6-7, Д, стор.65-84).

У третьому розділі описано математичне моделювання генерації плазмового струменю і диспергування дроту-аноду, що плавиться. Показано, що запропонована 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. Течія цівки розплаву з кінця дроту-аноду із достатньою точністю описується за допомогою квазіодномірної системи рівнянь Нав'є-Стокса, записаної з урахуванням сили в'язкого впливу на розплав з боку плазмового потоку. 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 проведено чисельний аналіз характеристик дозвукової турбулентної течії аргонової плазми, що генерується

плазмотроном із плавким дротом-анодом при різних режимах його роботи. Також встановлено, що підвищення напруженості електричного поля в межах плазмоформуючого 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 розрахована вольтамперна характеристика стовпа дуги.

Для перевірки математичного моделювання виконано експериментальне дослідження закономірностей протікання фізико-металургійних процесів при плазмово-дуговому розпилюванню плавкого дроту-аноду. Вивчено особливості плавлення анодної зони дроту, формування та дроблення крапель розплаву, визначено значення швидкості і температури частинок в потоці, їх розподіл за розмірами, вольт-амперні характеристики стовпа дуги в залежності від технлогічних параметрів процесу. Виявлено явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці. Візуалізовано процес формування розплаву, визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя.

Виявлено і пояснено аномальний ефект виникнення високошвидкісних сфероподібних яскравих розрядів навкруги поверхні розплавлених часток при плазмо-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду. Проведено порівняння розрахункових і виміряних значень розмірів, швидкостей і температур розпилених часток, а також характеристик плазмового струменю, яке показало, що точність математичного моделювання є не гіршою за 5-10% (А, стор.7-12, Д, стор.85-120).

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.

Підтверджено, що при збільшенні значень витрати G_2 супутнього захисного повітряного потоку від 0 до 20-40 $м^3$/год степінь вигоряння легуючих елементів (С, Mn) в процесі напилювання із стальних дротів марок 65Г, 70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. Встановлено, що при значеннях G_2 20-40 $м^3$/год значення вмісту кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги близькі до показників в напилених покриття, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покритті менший в середньому в 1,5-2 рази.

Встановлено, що 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. Механічні випробування напилених досліджуваних способом шарів показали можливість досягнення достатньо високих показників міцності їх зчеплення з основою при відриві по нормалі (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. Встановлена аналогічна тенденція впливу технологічного параметру G_2 на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні (А, стор.12-13, Д, стор.121-140).

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 конструюванні плазмотрону та промислового обладнання для нового покоління обладнання для плазмово-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 плазмово-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту.

Розроблено та впроваджено на підприємстві Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd, (КНР) технологічний процес плазмово-дугового напилювання мідним дротом-анодом антизадирних покриттів на різьбові з'єднання бурових та нафтовидобувних труб насосно-компресорних труб для захисту від схоплювання важко навантажених різьбових з'єднань «ніпель-муфта». 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 (А, стор.13-14, Д, стор.141-161).

Загальні висновки щодо дисертації. Дисертація Дем'янова О.І. є актуальною, завершеною комплексною науково-дослідною роботою, яка містить нові результати, що розкривають наукові та практичні досягнення. Дослідження виконувались із застосуванням ефективних методик та сучасного обладнання при проведенні фізико-математичного аналізу процесу плазмово-дугового напилювання металевим дротом-анодом та вивчення структури, властивостей, фазового та хімічного складу, фізико-механічних властивостей одержуваних покриттів. Приведені в роботі висновки, пропозиції та рекомендації безумовно мають наукову та практичну цінність (А, стор.14-16, Д, стор.162-163).

Матеріали дисертації опубліковані в достатній кількості фахових та

міжнародних наукових виданнях, тезах доповідей.

Автореферат правильно та з належною мірою повноти висвітлює загальну характеристику, зміст і висновки дисертації. Оформлення дисертації та автореферату відповідають вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій. Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають її меті.

Зауваження по роботі:

1. При опису результатів розрахунків недостатньо уваги поділено оптимізації міста розташування дроту-аноду в області зовнішньої течії дугової плазми і її взаємодії з потоком захисного газу ($Z1 \leq z \leq Z2$) та його кута нахилу відносно вісі, хоча розроблена фізико-математична модель це зробити дозволяє. При цьому експериментально (у розділі 4) показано, що процес активного дроблення крапель відбувається на відстані 40 мм від зрізу сопла плазмотрона.
2. Не визначено вплив дрібних часток розплаву, які з'явилися у процесі плавлення та розпилюванню плавкого дроту-аноду на зміни ступеню турбулізації течії аргонової плазми.
3. У розділу 3 спрогнозовано явище вторинного диспергування розплавлених частинок в потоці, однак по тексту ні зрозуміло це є шкідливо чи корисно, та як це буде використовуватися при розробці майбутніх технологій.
4. В роботі недостатньо пояснень та немає опису механізмів зменшення ступеню вигоряння легуючих елементів при збільшенні значень витрати супутнього захисного повітряного потоку (G2) в процесі напилювання із стальних дротів.
5. В роботі встановлена тенденція до пониження поруватості із підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку. Однак, на мій погляд, причини та механізми цього явища описано недостатньо глибоко.
6. В тексті зустрічаються незначні помилки, наприклад, деякі рисунки мають однакові позначення (с. 102), допущені окремі описки.

Зроблені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та достовірності основних результатів і висновків.

За темою та змістом дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології (технічні науки).

Висновок. Дисертаційна робота виконана на сучасному науковому рівні та є самостійним завершеним науковим дослідженням. За обсягом проведених досліджень, їх актуальністю, науковою новизною, значимістю і глибиною трактування отриманих наукових результатів дисертаційна робота Дем'янова Олексія Івановича на тему: «Фізичні та металургійні процеси при плазмово-дуговому напилюванні покриттів плавким дротом-анодом», відповідає вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології.

Офіційний опонент:
завідувач відділу концентрованих енергетичних впливів
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
НАН України,
доктор технічних наук, професор В.П. Лихошва

Національна академія наук України
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ
Ідентифікаційний код 05417153
м. Київ

Підпис В.П. Лихошви затверджую
Вчений секретар ФТІМС НАН України,
к. т. н. В. Л. Лахненко.