

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

СОЛОДКИЙ СЕРГІЙ ПАВЛОВИЧ

УДК 621.793.74

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯМ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ**

Спеціальність: 05.03.06 – зрування та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Відновлення деталей машин” Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Пащенко Валерій Миколайович,
НТУУ “Київський політехнічний інститут”,
доцент кафедри Відновлення деталей машин”.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Борисов Юрій Сергійович,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, м. Київ,
завідувач відділу захисних покриттів;

доктор технічних наук
Петров Станіслав Володимирович,
Інститут газу НАН України, м. Київ,
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться “19” жовтня 2009 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.15 НТУУ “КПІ” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги 37, корпус 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці НТУУ “КПІ” за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги 37.

Автореферат розісланий “16” вересня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Головко Л. Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах постійного зростання вартості енергоносіїв та матеріалів природного походження, особливо металів, існує проблема підвищення ефективності процесу плазмового нанесення покриття.

Основними показниками ефективності процесу плазмового нанесення покриттів є якість покриття, продуктивність напилення, коефіцієнт використання матеріалу (КВМ). Підвищення КВМ сприяє зростанню продуктивності процесу і зниженню питомих енерговитрат на його проведення. КВМ корелює з якістю покриття.

КВМ, при газотермічному нанесенні покриттів не перевищує, як правило, 60 – 80 %. Основною причиною неефективного використання вихідних матеріалів (низьких значень КВМ) при плазмовому нанесенні покриття є неоднорідність умов нагрівання та прискорення матеріалу в межах високотемпературного газового струменя, яка, у свою чергу, є наслідком різко нерівномірного розподілу значень температур та швидкостей в об'ємі плазмового струменя і нераціонального розміщення твердої фази в межах гетерогенного потоку, особливо у випадку застосування розпилювачів із вихровою подачею плазмоутворювального газу.

Методи оперативного керування процесом нагрівання та прискорення вихідного матеріалу, що застосовуються на сьогодні, обмежуються зміною режимних параметрів процесу напилення і дозволяють впливати лише на загальний енергетичний рівень ведення процесу, практично не змінюючи просторових умов нагрівання і прискорення всього ансамблю частинок вихідного дисперсного матеріалу.

Виходячи з того, що високотемпературний газовий струмінь є продуктом взаємодії плазмоутворювального газу з електричною дугою, яка розміщена в межах дугового каналу генератора плазми, доцільним може бути використання магнітного керування положенням електричної дуги в плазмовому розпилювачі для впливу на просторове положення струменя плазми, який формується.

Враховуючи обмеженість літературних відомостей щодо застосування магнітного поля для керування просторовим положенням дуги в плазмотронах посередньої дії, проведення комплексу досліджень по виявленню взаємозв'язку між місцеположенням дугового розряду в дуговому каналі розпилювача та просторовим положенням струменя плазми поза межами розпилювача, а також впливу цих факторів на структуру плями напилення і показники ефективності процесу, є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана із виконанням планів фундаментальних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України „Розробка наукових основ процесів високотемпературної обробки поверхонь виробів з використанням комбінованих джерел енергії”, № держ. реєстрації 0102U002336, (2002–2004 рр.) та “Дослідження механізму формування та властивостей газотермічних покриттів з нанофазною складовою” № держ. реєстрації 0105U001064, (2005 – 2007 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є підвищення ефективності процесу плазмово-дугового нанесення покриттів електромагнітним керуванням взаємним просторовим положенням газової та твердої фаз гетерогенного потоку.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі задачі:

- встановити характерні причини зниження КВМ та провести аналіз шляхів його керування;
- довести принципову можливість магнітного керування просторовими параметрами високотемпературного газового потоку та дослідити взаємозв'язок місцеположення дуги в дуговому каналі із режимними параметрами роботи розпилювача та параметрами зовнішнього магнітного поля;
- дослідити вплив магнітного поля на форму плями напилення для характерних (за своїми магнітними характеристиками) груп матеріалів; визначити вплив гармонізації взаємного положення фаз гетерогенного потоку на значення КВМ;

– дослідити взаємозв'язок показників якості отриманих покриттів із структурою та формою фігури металізації; розробити принципи створення плазмових розпилювачів із магнітним керуванням просторовим положення високотемпературного газового струменя.

Об'єкт дослідження – процес плазмово-дугового порошкового напилення з використанням зовнішнього поперечного магнітного поля.

Предмет дослідження – параметри формування плазмових покриттів із зовнішнім електромагнітним впливом. Засоби підвищення КВМ, зниження пористості і збільшення міцності зчеплення покриттів з основою.

Методи дослідження. Теоретичні та прикладні розробки базуються на сучасних положеннях газотермічного нанесення покриттів, а також на використанні методів дослідження. В роботі виконувались експериментальні дослідження, що включали в себе знаходження коефіцієнта використання матеріалу за відомою методикою зважування; знаходження пористості покриття за методом гідростатичного зважування; знаходження міцності зчеплення покриття з основою за методом відривання конічного штифта; металографічний аналіз з використанням оптичної мікроскопії; знаходження мікротвердості покриттів; випробування покриттів до абразивного спрацювання за схемою зношування через абразивний прошарок.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат дисертації полягає у вирішенні актуального науково-практичного завдання – підвищення ефективності процесу плазмово-дугового нанесення покриттів. При цьому отримані нові наукові результати:

– вперше експериментально встановлено, що просторове положення струменя на виході плазмотрона з вихровою стабілізацією дуги відносно поперечних осей дугового каналу в умовах дії зовнішнього поперечного магнітного поля визначається просторовим положенням кінцевої ділянки стовпа та плями прив'язування дуги в дуговому каналі плазмотрона і залежить, в основному, від інтенсивності закручування вихідного плазмоутворювального газу, режимних параметрів горіння дуги, та напрямку індукції зовнішнього магнітного поля;

– доведено, що в плазмотронах з вихровою стабілізацією дуги в умовах дії зовнішнього поперечного магнітного поля, зміна параметра кручення k (відношення значення осьової складової швидкості газового струменя до значення тангенційної складової швидкості) від 2 до 0,3 переміщує, відносно поперечних осей дугового каналу, площину, в якій лежить кінцева ділянка стовпа та пляма прив'язування дуги в напрямку закручування плазмоутворювального газу на кут від 30° до 75° , відповідно, що призводить до зміщення площини відхилення струменя на виході розпилювача;

– встановлена залежність кута відхилення струменя плазми відносно повздовжньої осі дугового каналу від струму дуги, значення індукції магнітного поля і витрати плазмоутворювального газу. Показано, що кут відхилення збільшується із зростанням струму дуги і значенням індукції магнітного поля і зменшується при підвищенні витрати плазмоутворювального газу і, загалом, в дослідженому діапазоні зміни параметрів, не перевищує $(5 - 6)^\circ$ на сторону; показано, що залежність кута відхилення від значення магнітної індукції керуючого магнітного поля носить експоненціальний, а від струму дуги – екстремальний характер і практично не змінюється при досягненні значення індукції $44 - 55 \cdot 10^{-3}$ Тл;

– доведено, що суміщення площин подавання дисперсного матеріалу і відхилення плазмового струменя впливає на геометричні характеристики плями напилення, збільшуючи її площу в поперечному перетині на $(27 - 53) \%$, площу в плані на $(20 - 43) \%$ і об'єм на $(21 - 75) \%$ за рахунок зростання коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) у 1,3 – 1,5 рази (залежно від продуктивності напилення, гранулометричного складу дисперсної фази і фізико-хімічних властивостей матеріалу, що напилюється).

– показано, що існує прямий зв'язок між коефіцієнтом використання матеріалу при магнітному керуванні структурою гетерогенного потоку і якісними характеристиками покриття, зокрема пористістю матеріалу покриття та міцністю зчеплення покриття з основою: підвищення КВМ на $30 - 50 \%$ знижує пористість на $26 - 40 \%$ і підвищує міцність зчеплення покриття з основою на $23 - 52 \%$.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених досліджень був розроблений спосіб плазмово-дугового порошкового напилення із магнітними діями та технічне оснащення, що реалізує запропонований спосіб. Показано, що застосування зовнішнього поперечного магнітного поля призводить до підвищення КВМ і покращення якості отриманих покриттів. Покриття, що отримані запропонованим способом за рахунок збільшення міцності матеріалу покриття і міцності зчеплення його з основою мають у півтора – два рази меншу інтенсивність зношування при абразивному спрацюванні порівняно з покриттями, отриманими традиційним способом.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи, формулюванні мети і задач досліджень, розробці методики дослідження кута відхилення струменя низькотемпературної плазми, дослідження впливу параметрів процесу на цей показник, вивчення плям напилення. В дисертації узагальнені результати експериментальних досліджень, виконаних автором самостійно та спільно із співробітниками кафедри відновлення деталей машин НТУУ “КПІ”. Переважну більшість наукових результатів автором отримано самостійно. Здобувачу також належать загальні висновки дисертаційної роботи і положення, які виносяться на захист:

- результати досліджень та закономірності впливу режимних параметрів роботи розпилювача та параметрів зовнішнього поперечного магнітного поля на просторове положення струменя плазми, що генерується;
- принцип формування газопорошкового потоку із коригуванням взаємного положення твердої та газової фаз гетерогенного потоку магнітними діями на кінцеву ділянку дуги;
- результати досліджень і закономірності впливу режимних параметрів роботи розпилювача та параметрів зовнішнього поперечного магнітного поля на форму і структуру плями напилення плазмового розпилювача;
- результати експериментальних досліджень зв'язку КВМ із показниками якості отриманого покриття.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних і всеукраїнських конференціях: “Сучасні зварювальні і споріднені технології та їх роль у розвитку виробництва” (м. Миколаїв, 2003 р.), “Прогресивна техніка і технології – 2006” (м. Севастополь, 2006 р.), “Досконалість зварювання – комплексний підхід” (м. Київ, 2007 р.), “Зварювання та суміжні технології” (м. Київ, 2007 р.).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 5 статей в спеціалізованих виданнях, що увійшли до переліку ВАК України, 3 статті у матеріалах наукових конференцій, отримано 3 патенти України.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Роботу викладено на 196 сторінках, вона містить 91 рисунок і 30 таблиць. Список використаних джерел налічує 119 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання дисертації, її наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі за результатами аналізу опублікованих у наукових виданнях робіт досліджений сучасний стан проблеми щодо підвищення ефективності процесу плазмово-дугового напилення.

Наведені основні показники, які зумовлюють ефективність плазмово-дугового напилення (якість покриття, продуктивність напилення, коефіцієнт використання матеріалу). Виявлений комплексний узагальнюючий показник ефективності плазмового нанесення покриття – коефіцієнт використання матеріалу, який безпосередньо сприяє підвищенню ефективності процесу в цілому.

Проаналізовані причини недостатньо повного використання енергії робочого тіла і маси вихідного матеріалу при формуванні покриття та відомі технічні і технологічні засоби підвищення показників ефективності процесу напилення і шляхи керування потоком

високотемпературного газу, зокрема для плазмового наесення покриття. Розглянуто газодинамічні і механічні способи керування взаємним розміщенням газової і твердої фаз у гетерогенному потоці, як перспективні способи підвищення КВМ.

Проаналізовано застосування електромагнітних полів при плазмовому напиленні і у суміжних процесах.

Виявлена перспективність корегування взаємного просторового положення газової і дисперсної фаз гетерофазного потоку дією зовнішнього поперечного магнітного поля на електричну дугу плазмотрона з метою зміщення у просторі струменя низькотемпературної плазми (через перебудову температурних і швидкісних полів).

У другому розділі викладені методики дослідження, описане експериментальне обладнання, досліджені основні характеристики застосованої магнітної системи. Для вимірювання розподілу магнітної індукції в робочому зазорі електромагніта використовували вимірювач магнітної індукції марки 43 205 (діапазон вимірювання 0 – 100 мТл, похибка вимірювання 0,5 %). Для знаходження КВМ, за відомою методикою зважування, використовували лабораторні терези ВЛТ-1. Пористість в покриттях знаходилась за методикою гідростатичного зважування. Випробування покриттів на міцність зчеплення з основою здійснювались за методикою відрива конічного штифта, яка була реалізована на уніфікованому приладі із пристроєм, що дозволяє знаходити локальні значення міцності зчеплення покриття з основою вздовж нерухомої плями напилення. Для виявлення зміни в структурі покриттів проводили металографічний аналіз з використанням оптичного мікроскопа МИМ-8. Мікротвердість покриттів вимірювали за допомоги мікротвердоміра ПМТ-3. Випробування покриттів на зносостійкість до абразивного спрацювання реалізовувалось за схемою зношування через абразивний прошарок з використанням приладу ЛКИ-3 і лабораторних терезів ВЛТ-1.

В третьому розділі вивчались особливості процесу шунтування електричної дуги в дуговому каналі розпилювача лінійної схеми за відсутністю і при дії зовнішнього поперечного магнітного поля. На основі отриманих результатів проведена оцінка середньої довжини дуги l в широкому діапазоні зміни режимних параметрів (рис. 1). При використанні у якості плазмоутворювального газу повітря, струмі дуги плазмотрона 200 А і індукції магнітного поля ($34 - 55$) $\cdot 10^{-3}$ Тл середня довжина дуги становить 24 – 30 мм. Додавання вуглеводневого компонента змінює умови шунтування, що впливає на середню довжину дуги. Перехід на суміш повітря із 3 % об'ємними вуглеводневого газу (пропан-бутану) веде до збільшення середньої довжини дуги до 31–38 мм.

В загальному випадку, область шунтування і частина стовпа дуги в плазмотроні з автогазодинамічною стабілізацією довжини дуги у всьому дослідженому діапазоні струмів (155 – 300 А) розміщується в зоні достатньо високих значень магнітної індукції ЗППП (зовнішнього поперечного магнітного поля) ($(5 - 49) \cdot 10^{-3}$ Тл) (рис. 1).

Визначено, що середнє інтегральне значення довжини дуги залежить від вмісту вуглеводневого компонента у вихідній плазмоутворювальній суміші і збільшується при переході від повітря до багатих сумішей повітря з вуглеводнями. При роботі на суміші із коефіцієнтом витрати окислювача $b = 0,6$ максимум розподілу струму (для конструкції плазмового пристрою, що досліджується) зміщується практично на останні 2 – 3 калібри вихідного діаметра дугового каналу і знаходиться приблизно на рівні середини полюса керуючого електромагніта.

Наявність вихідного закручування газу, яке використовується для фіксації катодної плями на активній вставці термохімічного катода і стабілізації дуги на осі дуго-вого каналу вно-сить певні корек-тиви у місцеположення вихідної ділянки дуги при дії поперечного магнітного поля.

Зміна значення параметра кручення k (відношення значення осьової складової швидкості газового струменя до тангенційної складової швидкості) від 2 до 0,3, тобто зменшення співвідношення між осьовою та тангенційною складовими швидкості плазмоутворювального газу, в умовах дії поперечного магнітного поля переміщує площину, в якій лежить пляма прив'язування дуги, в напрямку закручування плазмоутворювального газу на кут від 30° до 75° , відповідно, відносно поперечних осей дугового каналу.

При зміні магнітної індукції в робочому зазорі електромагніта і режимних параметрів роботи (магнітна індукція змінюється в діапазоні $B=18 - 79 \times 10^{-3}$ Тл, струм дуги плазмотрона $I_0=130 - 200$ А, тиск плазмоутворювального газу $P_{nz}=0,3 - 0,5$ МПа), відбувається зміна кута відхилення плазмового струменя повітря β (рис.2, рис.3). Максимальний сумарний кут відхилення плазмового струменя (в обидві сторони від осі дугового каналу) сягає $11^\circ - 12^\circ$.

Кут відхилення плазмового струменя повітря зростає із збільшенням магнітної індукції в робочому зазорі електромагніта (рис.2), струму дуги плазмотрона (рис. 3, крива 1) і зменшується при підвищенні тиску плазмоутворювального газу (крива 2).

Перехід на суміш повітря і вуглеводневого газу в цілому не змінює характер залежності кута відхилення плазмового струменя β_s від режимних параметрів (рис. 4).

Запропоновано фізичну модель впливу ЗПМП на просторове положення електричної дуги та потоку низько-температурної плазми (рис. 5).

В початковий момент часу, при вмиканні магнітної системи виникає сила Ампера \vec{F}_A (в результаті взаємодії магнітного поля із струмом дуги), яка змушує зміщуватися частину стовпа електричної дуги в напрямку, перпендикулярному напрямку магнітної індукції ЗПМП.

У міру виходу стовпа дуги із центральної зони дугового каналу, яка співпадає із центром вихору, на дугу починають діяти додаткові сили, що виникають внаслідок наявності розподілу тисків в перерізі дугового каналу. Це, в першу чергу, аеродинамічна сила \vec{F}_Z , яка спричинена наявністю тангенційної складової швидкості плазмоутворювального газового потоку, а потім, відповідно, високотемпературного потоку газу. А також сила \vec{F}_V , яка спричинена наявністю градієнту тисків у напрямку від периферії до центру дугового каналу при стабілізації дуги в каналі розпилувача вихором.

Частина стовпа дуги, яка взаємодіє з магнітним полем, починає рухатись у напрямку результуючої двох сил \vec{F}_A та \vec{F}_Z . В момент, коли ця результуюча сила \vec{F}_R врівноважується силою, що виштовхує дугу до центру дугового каналу плазмотрона \vec{F}_V , рух дуги припиняється і вона займає певне стає положення в дуговому каналі.

Зменшення відстані до стінки вихідного електрода сприяє переважному шунтуванню дуги в цій зоні і фіксації приелектродної частини дуги на певній ділянці дугового каналу. Незважаючи на можливе деяке погіршення ресурсних характеристик вихідного електрода, фіксація плями прив'язування дуги сприяє покращанню стабільності параметрів струменя низькотемпературної плазми.

Просторове положення вихідної ділянки стовпа дуги і зони прив'язування анодної плями визначається напрямком магнітної індукції зовнішнього магнітного поля та напрямком початкового закручування плазмоутворювального газу і змінюється на протилежне, відносно поздовжньої осі дугового каналу, при зміні напрямку ЗПМП.

Внаслідок зміни положення електричної дуги під дією ЗПМП проходить суттєва перебудова температурних і швидкісних полів струменя плазми в сопловій частині дугового каналу – температурний і швидкісний максимуми зміщуються ближче до стінки каналу. При цьому значно потовщується прошарок відносно холодного газу з протилежного боку каналу. На рис. 6 схематично наведені етапи формування плазмового струменя при початковому несиметричному розміщенні температурного максимуму потоку високотемпературного газу на виході із дугового каналу розпилувача.

Таким чином, просторове відхилення плазмового струменя на виході із дугового каналу розпилувача є наслідком переміщення частини стовпа і приелектродної ділянки дуги під дією магнітного поля в межах поперечного перерізу дугового каналу. Нове асиметричне розміщення частини стовпа дуги і примусове прив'язування анодної плями на визначеній ділянці дугового каналу сприяє перебудові температурних і швидкісних полів потоку високотемпературного газу в межах дугового каналу, а витікання газового потоку із асиметричним температурним і

швидкісним полем викликає несиметричне його розширення на виході із соплового отвору (відхилення струменя газу від повздовжньої осі дугового каналу розпилювача).

Четвертий розділ присвячений дослідженню впливу зовнішнього магнітного поля на двофазний потік та форму «металізаційної фігури» для плазми повітря і суміші повітря із вуглеводневим газом, при зміні витрати і фракційного складу дисперсного матеріалу, що напилується. У загальному випадку, при зміні взаємного положення (порівняно із вихідними) газової та порошкової складових гетерогенного потоку суттєво зростає максимальна товщина плями напилування при збереженні, в цілому, ступеня зосередженості профілю. Аналіз плям напилування для різних типів матеріалів (діамагнітного, феромагнітного і складного складу) показав загальну тенденцію щодо зростання як їх площі, так і об'єму (табл.1).

Застосування ЗПМП постійного напрямку сприяє зростанню площі і об'єму плями напилування за рахунок просторового зміщення високотемпературної зони газового потоку у бік вихідного відхилення каналу масоперенесення дисперсного матеріалу. При цьому досягається гармонізація їх взаємного положення, що призводить до потрапляння більшої частини порошку в область високих температур і швидкостей потоку плазми. Як наслідок, спостерігається збільшення на (35 – 53)% площі плями напилування у поперечному перетині, площі в плані на (29 – 43) % і об'єму на (55 – 75) % (верхня межа діапазону збільшення розмірів плями напилування відповідає магнітному полю постійного напрямку).

При застосуванні знакозмінного ЗПМП, зміна розмірів плями напилування відбувається за рахунок циклічного переміщення об'єму високотемпературного газу відносно твердої фази, що сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі від газу до дисперсного матеріалу та інтенсифікує процес нагрівання порошку.

Таблиця 1.

Узагальнюючі дані щодо прирощення площі і об'єму плями напилування при ЗПМП

Грануляція порошку, мкм	Витрата порошку, кг/год.	Прирощення площі плями напилування у поперечному перетині, % *	Прирощення площі плями напилування у поперечному перетині, %**	Прирощення площі плями напилування у плані, % *	Прирощення площі плями напилування у плані, %**	Прирощення об'єму плями напилування, %*	Прирощення об'єму плями напилування, %**
63–100	2	37–53	19–31	31–43	22–24	61–75	28–33
	2,5	35–45	17–25	26–34	19–20	50–62	22–28
	3,5	31–35	14–17	20–15	14–15	49–51	14–22
	4	29–32	13–16	18–23	12–14	45–51	12–20
100–160	2	25–33	11–13	17–25	12–13	30–66	11–27
	2,5	23–33	10–14	15–19	7–10	28–59	8–25
	3,5	21–35	8–17	12–17	5–8	25–51	5–22
	4	19–36	7–18	11–16	4–7	24–48	4–21

*– при застосуванні магнітного поля постійного напрямку; ** – при застосуванні знакозмінного магнітного поля

При напилуванні порошку феромагнітного типу певні корективи у процес формування плями напилування вносить взаємодія поперечного магнітного поля з частинками вихідного матеріалу (за умови їх перебування в тепловому стані нижче точки Кюрі). Сила притягання до полюсів електромагніта розпушує вихідний потік дисперсного матеріалу, сприяє його рівномірному розміщенню в межах високотемпературного газового потоку.

Це підтверджується мак-симальним збільшенням площі плями напилення в попе-речному перетині і в плані, а також збільшенням об'єму плями напилення порівняно із випадком напилення діамаг-нітного матеріалу (рис. 7).

При застосуванні суміші повітря із вуглеводневим газом (пропан-бутаном) ефек-тивність впливу ЗПМП на продуктивність процесу напилення дещо знижується (порівняно з повітряною плазмою), що пояснюється суттєво більшими розмірами активної зони плазмового струменя продуктів згорання, в якій можливе нагрівання та прискорення дисперсного матеріалу і більшим, внаслідок цього, вихідним значенням показників ефективності процесу плазмового напилення.

У п'ятому розділі досліджено вплив ЗПМП на ефективність процесу нанесення покриття та показники якості покриття. У якості узагальнюючого показника, що безпосередньо впливає на ефективність процесу, вибраний КВМ. Змінними технологічними параметрами процесу були витрата і гранулометричний склад порошку, що напилюється (рис.8).

Використовуючі порошок феромагнітного типу наявна суттєва перевага у значеннях КВМ, в порівнянні із діамагнітним порошком (рис. 8,а,б), при застосуванні зовнішнього магнітного поля. Це можна пояснити тим, що до загальних факторів покращення процесу нагрівання порошку додається додатковий вплив зовнішнього магнітного поля на частинки дисперсного матеріалу.

При напиленні композиційного порошку (в умовах корегуючого магнітного поля) з'являється передумова більшої ймовірності проходження екзотермічної взаємодії компонентів в середині окремої частинки, що веде до підвищення інтенсивності її нагрівання, як наслідок, суттєве зростання КВМ в цілому (рис. 8, в).

При використанні суміші повітря і вуглеводневого газу покращуються питомі енергетичні характеристики плазмового струменя, що веде до достатньо високого КВМ при відсутності корегуючого магнітного поля і зменшує його вплив на цей показник (рис. 8, г).

В цілому, можна стверджувати про ефективність застосування при плазмовому напиленні корегуючого поперечного магнітного поля.

Встановлено, що напилення із магнітним керуванням процесом формування двофазного потоку призводить до зменшення пористості отриманого покриття, як у центрі плями напилення, так і на її периферії. (табл. 2, рис.9).

Таблиця 2.

Узагальнюючі дані щодо зменшення пористості в покритті при ЗПМП

Грануля-ція порошку, мкм	Витрата порошку, кг/год.	Зменшення загальної пористості по центру плями напилення, % *	Зменшення загальної пористості на периферії плями напилення, %*	Зменшення загальної пористості по центру плями напилення, %**	Зменшення загальної пористості на периферії плями напилення, %**
63 – 100	2,0	26–35	34–40	14–23	21–30
	2,5	24–32	31–37	11–18	17–24
	3,5	21–28	26–33	8–12	13–17
	4,0	20–27	24–32	7–10	11–15
100 – 160	2,0	16–17	17–21	8–9	10–12
	2,5	13–14	15–19	6–7	8–11
	3,5	8–12	11–17	4–5	6–9
	4,0	7–11	9–16	3–4	5–8

*– при застосуванні магнітного поля постійного напрямку; ** – при застосуванні знакозмінного магнітного поля

Це відбувається за рахунок підвищення загального температурного рівня в зоні обробки дисперсного матеріалу і вирівнювання умов нагрівання і прискорення всього комплексу частинок порошку, які були завантажені у плазмовий струмінь.

Жорстке узгодження просторового положення каналів масоперенесення газової та твердої фаз гетерогенного потоку, яке наявне при застосуванні ЗПМП постійного напрямку, дає, в загальному випадку, дещо кращі результати за значеннями пористості покриття, порівняно із знакозмінним магнітним полем. Вочевидь, інтенсифікація теплообміну при зміні положення газової фази відносно порошкової, не компенсує зниження інтегрального рівня температур в активній зоні плазмового струменя.

Збільшення витрати порошку вище певного критичного значення призводить до загального підвищення пористості покриття (рис.9, табл.2).

Встановлено, що при ЗПМП відбувається збільшення міцності зчеплення покриття з основою вздовж всієї плями напилення, а також, наявний взаємозв'язок витрати і грануляції порошку із зростанням міцності зчеплення покриття з основою (рис.10, табл.3).

Таблиця 3.

Узагальнюючі дані щодо збільшення міцності зчеплення покриття з основою при ЗПМП

Грануляція порошку, мкм	Витрата порошку, кг/год.	Прирощення міцності зчеплення (по центру плями напилення), % *	Прирощення міцності зчеплення (на периферії плями напилення), %*	Прирощення міцності зчеплення (по центру плями напилення), %**	Прирощення міцності зчеплення (на периферії плями напилення), %**
63 – 100	2,0	23–25	44–52	16–20	38–47
	2,5	21–23	42–50	14–18	36–44
	3,5	18–21	40–48	12–16	32–41
	4,0	17–20	39–47	11–15	31–39
100 – 160	2,0	16–23	37–56	10–17	27–46
	2,5	14–20	35–54	8–14	25–42
	3,5	12–16	33–51	6–11	23–39
	4,0	11–15	32–50	5–10	22–38

* – при застосуванні магнітного поля постійного напрямку; ** – при застосуванні знакозмінного магнітного поля

Металографічний аналіз покриттів доводить факт покращення структури покриттів, які були отримані при магнітному керуванні двофазного потоку в порівнянні із покриттями, що були отримані звичайним способом (рис. 11, 12).

При напиленні покриття із використанням керуючого магнітного поля (КМП) постійного напрямку ступінь деформації частинок значно більша, ніж частинок при напиленні звичайним способом. На мікрошліфах не спостерігається чітко вираженої границі між окремими затверділими частинками порошку, а також між основою і покриттям.

У покритті, яке отримане при КМП спостерігається менший градієнт по твердості (на відміну від покриттів, що отримані звичайним способом), це може свідчити про вирівнювання умов нагрівання і прискорення для більшого об'єму частинок порошку, що напилюється, зменшення імовірності утворення різноманітних складових в покритті.

Дослідження зносостійкості покриттів до абразивного спрацювання проводились на приладі ЛКІ-3. При навантаженні 15 кг і швидкості 30 м/хв. Зносостійкість покриттів збільшується у 1,4 – 1,9 рази в залежності від виду ЗПМП (знакозмінного та постійного напрямку), в порівнянні із покриттями, що було отримані звичайним способом (рис. 13).

В шостому розділі наведені результати вико-ристання і впровадження розробленої технології.

На кафедрі Від-новлення деталей машин НТУУ “КПІ” розроблена альтернативна технологія підвищення зносостійкості односторонніх і стрілочних лап культиватора плазмово-дуговим напиленням із КМП (рис. 14).

Розміри поверхонь, що підлягають зміцненню становлять: для односторонньої лапи культиватора – 175Ч20 мм; для стрільчастої лапи культиватора – 240Ч30 мм.

Використовували КМП постійного напрямку, для суміщення осей газової та дисперсної складових двофазного потоку. Магнітна індукція в робочому зазорі електромагніта складала $40\text{--}50 \times 10^{-3}$ Тл.

Додатково, для підвищення продуктивності і якості напилених покриттів був застосований модернізований пристрій для введення порошку.

Нова альтернативна технологія забезпечує зменшення собівартості одиниці площі покриття; економію порошкового матеріалу; підвищення продуктивності процесу; зменшення часу напилення пок-риття.

Новий спосіб також був запропонований для застосування в технології підвищення зносостійкості гостряків стрілочних переводів, як альтернатива зміцненню СВЧ.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що накладання на вихідну частину стовпа електричної дуги плазмотрона посередньої дії зовнішнього поперечного магнітного поля призводить до відхилення напрямку витікання високотемпературного газового струменя відносно повздовжньої осі дугового каналу в результаті виникнення суттєвої асиметрії розміщення дуги в межах дугового каналу.
2. Показано, що просторова, відносно поперечних осей дугового каналу, орієнтація площини, в якій спостерігається відхилення плазмового струменя, залежить від напрямку магнітного потоку зовнішнього магнітного поля i , в меншій мірі, від інтенсивності початкового закручування газового потоку.
3. Доведено, що область шунтування дуги у дослідженому діапазоні струму (155 – 300 А) розміщується в зоні достатньо високих (5 – 49 мТл) значень магнітної індукції керуючого зовнішнього магнітного поля (за умови розміщення магнітної системи в районі соплового отвору дугового каналу).
4. Встановлено, що зміна параметра кручення (відношення значення осьової складової швидкості потоку газу до тангенційної складової швидкості) від 2 до 0,3 переміщує на $30^\circ\text{--}75^\circ$ площину, в якій розміщується пляма прив'язування та радіальна ділянка стовпа дуги і здійснюється, в подальшому, відхилення потоку високотемпературного газу на виході із дугового каналу розпилювача.
5. Показано, що кут відхилення плазмового струменя відносно повздовжньої осі дугового каналу визначається параметрами режиму роботи генератора плазми і керуючої магнітної системи. Встановлено, що кут відхилення плазмового струменя β (в одну сторону від вихідного положення) зростає з підвищенням магнітної індукції в електромагніті (від 18 до 49×10^{-3} Тл) і струму дуги (від 130 до 200 А) і зменшується при підвищенні тиску плазмоутворювального газу (від 0,3 до 0,5 МПа). При цьому максимальний кут відхилення плазмового струменя повітряної плазми (в обидві сторони від осі дугового каналу) в дослідженому діапазоні зміни режимних параметрів сягає $11^\circ\text{--}12^\circ$.
6. Експериментально доведено, що перехід на плазмоутворювальну суміш повітря із вуглеводневим газом (пропан-бутаном) несуттєво зменшує кут відхилення плазмового струменя β , порівняно із плазмоутворювальним повітрям. Збільшення витрати пропан-бутану (від 0,2 до 0,3 м³/год) зменшує кут відхилення плазмового струменя на 15 %. Максимальний кут відхилення плазмового струменя суміші повітря із вуглеводневим газом (в обидві сторони від осі дугового каналу) у дослідженому діапазоні зміни режимних параметрів становить $10^\circ\text{--}11^\circ$.

7. Показано, що зовнішнє поперечне магнітне поле посередньо, через зміну просторового положення високотемпературного газового потоку відносно дисперсної складової, впливає на форму і розміри плями напилення при плазмово-дуговому нанесенні покриття.
8. Доведено, що суміщення площин подавання дисперсного матеріалу і відхилення плазмового струменя впливає на геометричні характеристики плями напилення, збільшуючи її площу у поперечному перетині на (15 – 41)%, площу в плані на (10 – 35) % і об'єм на (23 – 50) % за рахунок зростання коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) у 1,2 – 1,5 рази (залежно від продуктивності напилення, гранулометричного складу дисперсної фази і фізико-хімічних властивостей матеріалу, що напилюється).
9. Показано, що існує прямий зв'язок між коефіцієнтом використання матеріалу при магнітному керуванні структурою гетерогенного потоку і якісними характеристиками покриття, зокрема пористістю матеріалу покриття та міцністю зчеплення покриття з основою: підвищення КВМ на (25 – 50) % знижує пористість на (20 – 30) % і підвищує міцність зчеплення покриття з основою на (35 – 46) %.
10. Доведено, що при плазмовому порошковому напиленні із застосуванням керуючого магнітного поля як постійного напрямку, так і знакозмінного, відбувається зростання стійкості отриманого покриття до абразивного спрацювання (у конкретних випадках у 1,4 – 1,9 рази).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Пащенко В. М. Вплив вуглеводневого компонента на енергетичні характеристики плазмових розпилювачів, що працюють на сумішах повітря з вуглеводнями / В. Н. Пащенко, С. П. Солодкий // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2003. – №11. – С. 64–68.

Здобувач брав участь у підготовці та проведенні експериментальних досліджень впливу вуглеводневого компонента плазмоутворювальної суміші на енергетичні характеристики плазмового розпилювача.

2. Пащенко В. М. Дослідження впливу геометричних та режимних параметрів плазмотронів із комбінованим підведенням енергії на температурні та швидкісні поля плазмового струменя / В. М. Пащенко, С. П. Солодкий // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2005. – № 2. – С. 72–79.

Здобувачем удосконалено методику обробки результатів дослідження параметрів струменя плазмотронів із комбінованим підведенням енергії.

3. Пащенко В. Н. Магнитное управление потоками низкотемпературной плазмы в процессах нанесения газотермических покрытий / В. Н. Пащенко, С. П. Солодкий // Автоматическая сварка. – 2006. – № 6. – С. 53–55.

Здобувачем запропонована схема експериментальної установки, розроблена методика і проведені дослідження впливу режимних параметрів роботи розпилювача та параметрів зовнішнього магнітного поля на просторове положення потоку повітряної плазми, узагальнені результати експериментів.

4. Пащенко В. М. Підвищення ефективності процесу повітряно-плазмового нанесення покриттів магнітним керуванням газопорошковим потоком / В. Н. Пащенко, С. П. Солодкий // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 3. – С. 71–75.

Здобувачем досліджений вплив зовнішнього магнітного поля на коефіцієнт використання матеріалу та конфігурацію плями напилення.

5. Пащенко В. М. Проблеми ефективності захисних покриттів у інженерії поверхні машин та обладнання / В. М. Пащенко, В. Д. Кузнецов, С. П. Солодкий // Вісник національного технічного університету України “КПІ”. – 2006. – № 49. – С. 178–185.

Здобувачем досліджені особливості впливу зовнішнього поперечного поля на двофазні потоки з дисперсною складовою із матеріалів, що мають різні магнітні властивості; проведені експериментальні дослідження і узагальнені результати впливу зовнішнього магнітного поля на показники якості покриття в нерухомій плямі напилення.

6. Патент 70855 А Україна, МПК⁷ B05B7/22, H05H1/42. Спосіб введення порошку в плазмовий струмінь розпилювачів та пристрій для його реалізації / Кузнецов В. Д., Пащенко В. М., Солодкий С. П. заяв. 30.12.2003; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10.

7. Патент 34447 Україна, МПК⁸ B05B7/16, H05H1/26. Пристрій для формування газопорошкового потоку при плазмовому напиленні / Пащенко В. М., Кузнецов В. Д., Солодкий С. П., Свистун С. В. заяв. 18.03.2008; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.

8. Патент 34848 Україна, МПК⁸ B05B7/16, H05H1/26. Спосіб формування газопорошкового потоку при плазмовому напиленні / Пащенко В. М., Кузнецов В. Д., Солодкий С. П., Свистун С. В. заяв. 18.03.2008; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.

9. Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых научных работников, (Николаев, 28-31 октября 2003 г.) / УГМТУ.– Николаев: УГМТУ, 2003.–120 с.

10. Досконалість зварювання – комплексний підхід: тези доповідей Міжнародної науково – практичної конференції, (Київ, 15-17 травня 2007 р.) / НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 84 с.

11. Зварювання та суміжні технології: матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів, (Київ, 23-25 травня 2007 р.) / НАН України, ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2007. – 223 с.

АНОТАЦІЯ

Солодкий С. П. Підвищення ефективності плазмового напилення застосуванням електромагнітних дій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2009.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності процесу плазмового нанесення покриттів електромагнітним керуванням взаємним просторовим положенням газової та твердої фаз гетерогенного потоку.

Результатами проведених експериментальних досліджень доведена можливість керування просторовим положенням струменя низькотемпературної плазми в технологічних плазмотронах посередньої дії шляхом магнітного впливу на кінцеву ділянку дуги в каналі генератора плазми.

Встановлено, що існує прямий зв'язок між коефіцієнтом використання матеріалу при магнітному керуванні структурою гетерогенного потоку і якісними характеристиками покриття: збільшується міцність зчеплення покриття з основою та зменшується пористість.

Показано, що отримані покриття, за рахунок покращення структури і фізико-механічних характеристик, мають вищу стійкість до абразивного спрацювання порівняно з покриттями, що були отримані звичайним способом.

Ключові слова: плазмове напилення, струмінь низькотемпературної плазми, зовнішнє поперечне електромагнітне поле, коефіцієнт використання матеріалу, пористість покриття, міцність зчеплення покриття з основою, стійкість покриттів до абразивного спрацювання.

АННОТАЦИЯ

Солодкий С. П. Повышение эффективности плазменного напыления применением электромагнитных действий. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – сварка и родственные процессы и технологии. Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, 2009.

Диссертация посвящена повышению эффективности процесса плазменного нанесения покрытий электромагнитным управлением взаимным пространственным положением газовой и твердой фаз гетерогенного потока.

Результатами проведенных экспериментальных исследований доведена возможность управления пространственным положением струи низкотемпературной плазмы в технологических плазмотронах косвенного действия путем магнитного влияния на конечный участок дуги в канале генератора плазмы. Установлено, что пространственное положение струи на выходе канала относительно поперечных осей дугового канала зависит от распределения скоростей и температур потока плазмообразующего газа в зоне взаимодействия внешнего магнитного поля и электрической дуги, и определяется, в основном, интенсивностью закручивания исходного плазмообразующего газа, режимными параметрами горения дуги, и направлением индукции внешнего магнитного поля. Максимальный сумарный угол отклонения струи плазмы, при использовании плазмообразующего газа воздуха и воздуха с пропан-бутаном, в исследованном диапазоне изменения режимных параметров составляет $10^{\circ} - 12^{\circ}$. Доказано, что совмещение плоскостей подачи дисперсного материала и отклонение плазменной струи влияет на геометрические характеристики пятна напыления, увеличивая ее площадь в поперечном сечении на (35 – 53)%, площадь в плане на (29 – 43) % и объем на (55 – 75) % за счет увеличения коэффициента использования материала (КИМ) в 1,2 – 1,5 раза, в зависимости от продуктивности напыления, гранулометрического состава дисперсной фазы и физико-химических особенностей напыляемого материала.

Установлено, что существует прямая связь между коэффициентом использования материала при магнитном управлении структурой гетерогенного потока и качественными характеристиками покрытия: повышение КИМ на 1,3 – 1,5 % повышает прочность сцепления покрытия с основой на 23 – 52 % и уменьшает пористость на 26 – 40 %.

Показано, что полученные покрытия, за счет улучшения структуры и физико-механических характеристик, имеют в 1,4 – 1,9 раза большую стойкость к абразивному износу по сравнению с покрытиями, которые были получены обычным способом.

Ключевые слова: плазменное напыление, струя низкотемпературной плазмы, внешнее поперечное электромагнитное поле, коэффициент использования материала, пористость покрытия, прочность сцепления покрытия с основой, стойкость покрытий к абразивному износу.

ABSTRACT

Solodkiy S.P. The effectiveness raise of plasma spraying by electromagnetic action usage. – Manuscript.

The dissertation for getting an academic degree of Candidate of Science by the specialty 05.03.06 – welding and allied processes and technologies. The National technical university of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2009.

The dissertation is devoted to the process effectiveness raise of plasma coating by electromagnetic control through mutual spatial attitude of gas and solid phase of heterogeneous stream.

By the results of the conducted experimental researches it was proved a possibility to manage the jet spatial attitude of low temperature plasma in technological plasmotrons of indirect effect by the magnetic response at the arc tail end in plasma generator channel.

It is determined that there is a direct linkage between index of material usage under magnetic control of heterogeneous stream structure and qualitative characteristic of coating: adhesion strength increase of coating with basis and porosity reduction.

It is shown that the gained coatings, by the structure and physic-mechanical characteristics improvement, have the higher resistance against abrasive wear in comparison with coatings, gained in a general way.

Key words: plasma spraying, low temperature plasma jet, external cross electromagnetic field, material usage index, porous deposit, adhesion strength of coating with basis, coatings resistance against abrasive wear.