МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

На правах рукопису

УДК 621.791.927.6+621.793

ПАЩЕНКО ВАЛЕРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

**ГЕНЕРУВАННЯ ПОТОКІВ ПЛАЗМИ СКЛАДНИХ ГАЗОВИХ СИСТЕМ ТА КЕРУВАННЯ ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНО-ПРОСТОРОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ В ПРОЦЕСАХ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

дисертація на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Науковий консультант

д.т.н., проф. Кузнецов В. Д.

**Київ - 2015**

**ЗМІСТ**

**Вступ**……………………………………………………………........................ 4

**1. Аналіз проблеми генерації та керування параметрами дугової**

**низькотемпературної плазми складних газових систем** ………… 14

1.1. Засоби генерації потоків низькотемпературної плазми…………… 14

1.2. Плазмові струмені, їх параметри та розподіл у просторі……… 23

1.3. Керування енергетичними та просторовими

характеристиками плазмових струменів ...……………………..... 29

**2. Розробка та дослідження плазмових генераторів на складних**

**газових сумішах для процесів плазмового нанесення покриття**…..… 51

2.1. Процеси перетворення енергії в плазмових генераторах

із комбінованим підведенням енергії …………….……………... 51

2.2. Дослідження енергетичних параметрів генераторів

газоповітряної низькотемпературної плазми …………………… 71

2.3. Вплив вуглеводневого компонента на енергетичні

характеристики плазмових розпилювачів………………………… 92

**3. Плазмові середовища складних газових сумішей**

**системи N-О-С-H** …………...…………………………………………….. 104

3.1. Термодинамічний аналіз плазми газових сумішей

системи N-О-С-H………………………………………………… 104

3.2. Експериментальні дослідження плазмових потоків складних

газових систем………………………………………………...…. 118

3.2.1. Установка для дослідження плазмових струменів та

енергетичних характеристик генераторів плазми на

2

складних плазмоутворювальних сумішах …………… 118

3.2.2. Методика експериментального дослідження

параметрів плазмових струменів системи N-О-С-H ....…. 122

3.3. Результати експериментальних досліджень струменів плазми ... 131

3.4. Закономірності просторового розподілу енергетичних

параметрів плазмових струменів газових систем N-O

та N-O-C-H………………………………………………………... 142

3.5. Математичне моделювання потоків плазми складних

газових сумішей системи N-О та N-О-C-H ………………….……. 149

**4. Керування параметрами струменів низькотемпературної**

**плазми складних газових сумішей** …………….…………………………. 177

4.1. Керування параметрами плазмового струменя зміною

хімічного складу транспортуючого газу……………………….. 183

4.2. Керування співвідношенням компонентів плазмового

струменя системи N-O-C-H та їх розподілом в об’ємі

робочого тіла………………………..………………………….. 187

4.3. Керування просторовим положенням плазмового струменя

застосуванням зовнішнього магнітного поля ………………… 191

4.4. Керування електричною дугою та плазмовим струменем

зміною принципової схеми генератора плазми та

конфігурації дугового каналу…………………………………… 220

**5. Технічні та технологічні засади керування параметрами**

**газопорошкових потоків у процесах нанесення покриття**………… 238

5.1. Основні принципи конструювання та розробка промислово-

дослідних зразків плазмових пристроїв на активних газах

для нанесення покриттів ……..…………………………………. 238

5.1.1. Плазмові генератори на активних газах

системи N-O-C-H…………………………………………. 238

3

5.1.2. Способи та пристрої формування газопорошкового

потоку в процесах плазмового напилення ……………… 244

5.2. Практична реалізація технологій плазмового напилення із

магнітним впливом на процес …………………………………… 255

5.3. Застосування модифікованих середовищ системи N-О-C-H

в процесах нанесення покриття…………………………………… 282

5.4. Синтез нових сполук у структурі газотермічного покриття

застосуванням складних газових систем N-О-С-H……………. 287

**Загальні висновки**………………………………………………………….. 310

**Список літератури**…………………………………………………..……… 314

4

**ВСТУП**

**Актуальність теми.** Прогрес промислового виробництва значною мірою забезпечується застосуванням досягнень сучасних областей науки і техніки, невід’ємною частиною яких, на сьогодні, є інженерія поверхні. Нові можливості управління властивостями поверхні, які реалізуються завдяки застосуванню її методів, дозволяють розширити діапазон функціональних властивостей поверхонь, надати їм нові, недосяжні досі характеристики, задовольнити постійно зростаючі вимоги до режимів та умов експлуатації машин і конструкцій.

Одними із базових напрямків інженерії поверхні є плазмові методи обробки поверхонь і матеріалів і, зокрема, плазмове нанесення покриття. Ефективність застосування плазмових методів обробки значною мірою залежить від можливості керування енергетичними, фізико-хімічними і просторовими характеристиками плазмового струменя – робочого інструмента всіх плазмових технологій. Повною мірою ці можливості можуть бути реалізовані лише за умови комплексної цілеспрямованої дії на об’єкт керування.

Перспективним кроком до досягнення згаданих цілей є використання складних плазмоутворювальних газових сумішей із одночасним коригуванням просторового розміщення і структури створених плазмових потоків. Результати досліджень, виконаних в Інституті газу НАН України під керівництвом акад. І .М. Карпа, доводять доцільність і високу ефективність використання складних газових систем N-О-С-H на основі сумішей повітря із вуглеводневими газами для генерації потоків низькотемпературної плазми технологічного призначення. Прогрес у застосуванні таких плазмоутворювальних газових систем, особливо в умовах загальної тенденції розвитку ресурсо- енергозберігаючих виробництв, потребує подальших

5

теоретичних і експериментальних досліджень характеристик плазмових струменів, встановлення зв’язку між параметрами створених плазмових потоків та умовами їх генерації, розробки методів керування параметрами потоків плазми з метою підвищення продуктивності і ефективності технологічних плазмових процесів, створення нових, більш досконалих пристроїв для генерації плазми складних газових сумішей.

Узагальнення і розвиток уявлень щодо основних принципів формування плазмових потоків складних газових систем та встановлення закономірностей впливу на параметри потоків плазми та двофазних потоків у процесах нанесення плазмових покриттів є актуальною науково-технічною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась в НТУУ «КПІ» відповідно до планів фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт Міносвіти і науки України «Розробка наукових основ процесів високотемпературної обробки поверхонь виробів з використанням комбінованих джерел енергії» (№ ДР 0102U002336, 2002 – 2004 рр.), «Дослідження механізму формування та властивостей газотермічних покриттів з нанофазною складовою» (№ ДР 0105U001064, 2005 – 2007 рр.), «Дослідження механізму з’єднання матеріалів в умовах керованої високоенергетичної плазмохімічної обробки поверхонь» (№ ДР 0108U000572, 2008 – 2009 рр.), «Дослідження та розробка технологічних засад підвищення ефективності плазмового нанесення покриттів із застосуванням магнітних дій (№ ДР 0110U002414, 2010 – 2011 рр.), «Технологічні процеси нанесення покриттів із модифікацією поверхонь виробів потоками компресійної плазми» (№ ДР 0112U000687, 2012 – 2013 рр.),

**Мета роботи і задачі дослідження**. Мета роботи полягала у розробці науково-технологічних основ керування енергетичними, просторовими та концентраційними параметрами потоків низькотемпературної плазми в

6

процесах інженерії поверхні, зокрема нанесення покриттів та обробки дисперсних матеріалів, вдосконалення існуючих та розробка нових методів керування, створення принципів побудови та дослідних зразків керованих пристроїв для реалізації вказаних процесів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- провести аналіз відомих методів керування параметрами потоків низькотемпературної плазми, впорядкувати їх та класифікувати;

- виконати дослідження реальних потоків дугової плазми системи N-О-С-H з метою встановлення закономірностей впливу режимних параметрів генерації, вихідного складу компонентів та конструктивних характеристик генераторів плазми на процес формування температурних, швидкісних та концентраційних полів струменя плазми;

- виявити вплив компонентів газового плазмоутворювального середовища на процеси перетворення енергії в плазмових генераторах та їх енергетичні характеристики;

- дослідити вплив транспортуючого газу в процесах нанесення покриттів на енергетичні та концентраційні характеристики плазмових потоків;

- дослідити процеси впливу зовнішніх електромагнітних полів на енергетично-просторові характеристики потоків низькотемпературної плазми;

- розробити методи впливу на показники якості процесу плазмового нанесення покриття через керування параметрами робочого тіла;

- розробити конструкції інтегрованих плазмових пристроїв, здатних в широких межах змінювати енергетичні, концентраційні та просторові параметри потоків плазми; дослідити їх технологічні можливості та практичне застосування в процесі напилення плазмових покриттів.

**Об’єкт та предмет дослідження**. *Об’єктом дослідження* є процеси генерації низькотемпературної плазми та технологій з її використанням –

7

плазмове нанесення покриттів та плазмова обробка матеріалів.

*Предмет дослідження* – закономірності взаємозв’язку параметрів плазмового струменя із режимними характеристиками його генерації і зовнішніми керуючими чинниками – електромагнітними полями та умовами формування потоку плазми, а також зв’язок параметрів плазми із показниками ефективності плазмових технологій.

**Методи дослідження**. Для розв’язання поставлених задач і отримання основних результатів дисертаційної роботи використовувались теоретичні та експериментальні методи дослідження. Експериментальні дослідження конструкцій плазмових генераторів та потоків плазми, які вони генерують, проведені у лабораторних умовах на установках зі стабілізованими параметрами генерації плазми. Визначення параметрів струменів проводилось за допомогою зондових методик вимірювання локальних значень ентальпії, складу та швидкості руху високотемпературного газового середовища. Хімічний склад газових систем визначався із застосуванням методів хроматографії. Енергетичні характеристики генераторів плазми та плазмових струменів досліджувались із використанням методів прямого вимірювання параметрів та калориметрування. Термодинамічний аналіз газових систем здійснювався за допомогою пакету прикладних програм моделювання хімічної і фазової рівноваги в умовах високих температур «ТERRA», а моделювання процесу генерації потоків плазми – сучасних чисельних методів математичного моделювання. Систематизація отриманих результатів, аналіз і обробка даних та побудова графічних залежностей проведена з використанням системи статистичного аналізу даних STATISTICA 7.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у встановленні закономірностей впливу на енергетичні та концентраційні характеристики плазмових потоків складних систем через зміну режимних параметрів генерації плазми та застосування зовнішніх керуючих дій, обґрунтуванні

8

методів та способів впливу на ці характеристики.

У дисертації вперше:

1 Встановлені основні принципи керування структурою та параметрами плазмових потоків в процесах нанесення покриття зміною складу газової системи із цільовим введенням додаткової енергії горючого газу та відновних компонентів, що спричиняє підвищення до 40 % значень температури та ентальпії із одночасним зростанням швидкості потоку газу у поперечному перерізі струменя на дистанціях нагрівання до (20 – 25) калібрів вихідного діаметра сопла.

2. Експериментально встановлені та критеріально формалізовані залежності енергетичних характеристик генераторів плазми системи N-О-С-H від їх режимних та геометричних параметрів для збіднених сумішей повітря та вуглеводнів. Доведено, що через зміну умов існування дугового розряду при додаванні (0,3 – 1) % об’ємних вуглеводневого компонента до плазмоутворювального повітря (α = (15 – 20)) відбувається стрибкоподібне підвищення напруги на дузі і, відповідно, потужності плазмового розпилювача.

3. Експериментально встановлені та критеріально формалізовані залежності, які пов’язують параметри генерації плазми із характеристиками температурних та швидкісних полів струменів плазми системи N-О-С-H для всіх характерних діапазонів вмісту вуглеводневого компонента. Встановлено, що вміст вуглеводневого компонента у плазмоутворювальній суміші суттєво впливає на профілі ентальпії та температури отриманого струменя плазми і значно менше на профілі швидкості. Перехід від складної суміші негорючих молекулярних газів до суміші із горючим компонентом за рахунок зростання потужності генератора та перебудови структури струменя забезпечує на «багатих» сумішах розширення діапазону досяжних значень питомої енергії струменя у (1,5 – 1,6) рази та збільшення об’єму його високотемпературної зони у (4 – 5) разів.

9

4. Доведено, що ефективним шляхом впливу на енергетичні та концентраційні характеристики плазмового струменя у технологіях нанесення покриттів є гармонізація хімічного складу системи «плазма-транспортуючий газ». Експериментально встановлено, що у випадку використання плазми, яка генерується із сумішей вуглеводневих газів із повітрям (α < 1), застосування транспортуючого вуглеводневого газу підвищує швидкість потоку на (5 – 7) %, причому локальне падіння температури не перевищує (3 – 5) % Вміст кисню знижується практично до нуля на осі струменя і вдвічі за перерізом на відстані 5 мм від осі (на дистанції вимірювання) разом зі зростанням вмісту відновних компонентів Н2 та СО – у (10 – 100) разів залежно від положення точки вимірювання відносно осі струменя.

5. Доведена можливість керування просторовим положенням плазмового струменя дією зовнішнього магнітного поля на електричну дугу. Встановлено, що сумарний кут відхилення струменя відносно поздовжньої осі дугового каналу у разі застосування поперечного поля, залежно від параметрів зовнішнього магнітного поля та умов генерації плазми, становить (6о – 12о). Застосування обертального магнітного поля через інтенсифікацію процесів теплообміну забезпечує зростання на (15 – 20) % інтегрального значення напруги на дузі (загальної потужності дугового розряду) і, як наслідок, збільшення об’єму високотемпературної зони плазмового струменя, причому залежність об’єму плазмового струменя від частоти обертання зовнішнього поля носить екстремальний характер.

6. Доведено, що застосування магнітного впливу в процесі формування газопорошкового потоку дозволяє здійснити гармонізацію взаємного положення твердої та газової фаз потоку, відхиляючи останню відносно поздовжньої осі розпилювача. За умови застосування поперечного магнітного поля суміщення каналів передавання газової та твердої фаз проявляється у збільшенні на (14 – 31) % лінійних розмірів плями

10

напилення та її симетризації у плані, а також збільшення її максимальної товщини на (13 – 37) % і, відповідно, об’єму напиленого матеріалу у (1,1 – 1,6) рази та підвищення коефіцієнта використання матеріалу (до 20 %).

7. Отримали подальший розвиток уявлення про механізм перетворення вхідних потоків енергії у плазмотронах із комбінованим підведенням енергії у енергію плазмового струменя. Показано, що передавання енергії горючого газу незалежно від його вмісту в плазмоутворювальній суміші проходить із втратою не більше (4 – 15) % від вихідного рівня енергії горючого газу, що вноситься (верхня межа діапазону відповідає збідненим сумішам).

**Практичне значення отриманих результатів**. На основі аналізу структури та параметрів струменів плазми плазмотронів на складних газових сумішах запропоновані технічні та технологічні рішення, що дозволяють ефективно обробляти матеріали з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей (зокрема, в процесах нанесення покриттів).

Сформульовані основні вимоги та принципи конструювання плазмових пристроїв для генерації потоків низькотемпературної плазми системи N-О-С-H, які враховують особливості застосованих плазмоутворювальних газових сумішей.

Використовуючи результати досліджень енергетичних характеристик прототипів плазмових генераторів, розроблені та виготовлені зразки плазмотронів, які спроможні в широкому діапазоні зміни режимних параметрів генерувати потоки низькотемпературної плазми і змінювати їх енергетично-просторові характеристики.

Запропоновані способи формування гетерофазних потоків під час плазмового нанесення покриттів та пристрої для їх реалізації, які базуються на зовнішніх впливах на процес формування потоків через застосування магнітних полів, введення додаткових потоків енергії разом із матеріалом, що обробляється, профілювання дугового каналу.

11

Вдосконалені існуючі та розроблені нові методики досліджень енергетичних параметрів генераторів плазми та плазмових потоків складного складу.

**Особистий внесок здобувача**. Особистий внесок автора у дисертаційній роботі полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи; формулюванні мети і задач дослідження; розробці наукових основ керування енергетично-просторовими характеристиками потоків газоповітряної плазми; створенні нових і вдосконаленні існуючих методик та узагальнення результатів експериментальних досліджень високотемпературних потоків; розробці нових методів керування параметрами гетерофазних потоків та пристроїв для

генерації плазмових потоків. Внесок автора був визначальним у проведенні експериментальних досліджень процесів генерації плазми, виконаних самостійно та спільно із співробітниками кафедри інженерії поверхні НТУУ «КПІ». Переважну більшість наукових результатів автором отримано самостійно. Здобувачу також належать загальні висновки та положення, які виносяться на захист:

- закономірності впливу режимних та розмірних характеристик генераторів плазми на їх енергетичні параметри в умовах застосування плазмоутворювальних сумішей систем N-O та N-О-С-H і кількісні співвідношення, які можуть бути використані для енергетичної та ресурсної оптимізації роботи генератора плазми;

- закономірності впливу умов генерації на енергетичні параметри створених струменів плазми та кількісні співвідношення, які встановлюють взаємозв’язок основних режимних параметрів із просторовим розподілом полів температури, швидкості та концентрації компонентів плазми;

- закономірності впливу вмісту вуглеводневого компонента на процес генерації плазми та механізм формування потоків газоповітряної плазми у випадку високих значень коефіцієнта витрати окиснювача (надлишок окиснювача), який базується на припущенні нерівномірного розподілу

12

компонентів плазмоутворювальної суміші у межах дугового каналу;

- закономірності впливу транспортуючого газу на сформований плазмовий потік та висновок про доцільність узгодження складу транспортуючого газу в процесах нанесення покриття із хімічним складом плазмоутворювальної суміші для виключення негативного впливу холодного газу на просторовий розподіл енергетичних параметрів струменя плазми, внесення додаткової енергії та керування хімічним складом середовища в зоні обробки матеріалів;

- висновок про доцільність застосування зовнішніх магнітних полів з метою впливу на процес формування плазмових та двофазних потоків в технологіях інженерії поверхні.

**Апробація результатів дисертації**. Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися: на Всесоюзній конференції «Перспективы применения плазменной техники и технологии в машиностроении и металлургии» (Челябінськ, Росія, 1992), XII науково-технічній конференції «Теория и практика газотермического нанесения покрытий» (Дмитров, Росія, 1992), NTSC-94 (Бостон, США, 1994), Міжнародній науково-методичній конференції «Современные проблемы развития сварочного производства и совершенствования подготовки кадров» (Маріуполь, 1996), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва (Київ, 1998), І Українській науково-технічній конференції «Сучасні технології та обладнання в газотермічних процесах відновлення та утилізації деталей машин і конструкцій» (Київ, 1999), Міжнародній конференції «Сварка и родственные технологии 2002. История. Достижения. Перспективы. Бенардосовские чтения», (Київ, 2002), Міжнародній науково-технічній конференції «Машиностроение и техносфера ХХІ века» (Севастополь, 2002, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011), Міжнародній конференції «Современные сварочные и родственные технологии и их роль в

13

развитии производства» (Миколаїв, 2003), VII Міжнародній конференції «Прогресивна техніка і технологія – 2006» (Севастополь, 2006), Міжнародній науково-практичній конференції «Инвенции. Инновации. Инвестиции» (Минск, 2012), Міжнародних науково-технічних конференціях «Досконалість зварювання – комплексний підхід» (2007, 2012, 2014), VII науково-технічній конференції «Сварка и родственные технологи» (Київ, 2013), Всеукраїнській науково-технічній конференції присвяченій 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова (Миколаїв, 2014).

**Публікації**. За темою дисертації опубліковано 60 робіт, у тому числі 2 монографії, 31 статей у наукових фахових виданнях, збірниках наукових праць, 15 тез доповідей у матеріалах конференцій, 12 охоронних документів на інтелектуальну власність.

**ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

Вирішено важливу науково-технічну проблему підвищення ефективності процесів плазмового нанесення покриттів через науково обґрунтоване застосування плазми складних газових систем, розвиток відомих і обґрунтування нових методів керування енергетичними-просторовими параметрами струменів плазми, створення та експериментальне дослідження характеристик прототипів обладнання, яке реалізує запропоновані методи, створення інженерних методик розрахунку геометричних та енергетичних параметрів плазмових пристроїв.

1. Встановлені основні принципи керування структурою та параметрами плазмових потоків в процесах нанесення покриттів зміною складу газової системи із цільовим введенням додаткової енергії горючого газу та відновних компонентів, що спричиняє підвищення до 40 % значень температури та ентальпії із одночасним зростанням швидкості газу у поперечному перерізі струменя на дистанціях нагрівання до (20 – 25) калібрів вихідного діаметра сопла.

2. Доведено, що передавання енергії горючого газу у всьому діапазоні зміни його вмісту в плазмоутворювальній суміші проходить із втратою не більше (4 – 15) % від вихідного рівня енергії горючого газу, що вноситься (верхня межа діапазону відповідає збідненим сумішам).

3. Експериментально встановлені та критеріально формалізовані залежності енергетичних характеристик генераторів плазми системи N-О-С-H від їх режимних та геометричних параметрів для збіднених сумішей повітря та вуглеводнів. Доведено, що через зміну умов існування дугового розряду при додаванні (0,3 – 1) % об’ємних вуглеводневого компонента до плазмоутворювального повітря (α = (15 – 20)) відбувається стрибкоподібне

311

підвищення напруги на дузі і, відповідно, потужності плазмового розпилювача.

4. Експериментально встановлені та критеріально формалізовані залежності, які пов’язують параметри генерації плазми із характеристиками температурних та швидкісних полів струменів плазми системи N-О-С-H для всіх характерних діапазонів вмісту вуглеводневого компонента. Встановлено, що кількість вуглеводневого компонента у плазмоутворювальній суміші суттєво впливає на профілі ентальпії та температури отриманого струменя плазми і значно менше на профілі швидкості. Перехід від складної суміші негорючих молекулярних газів до суміші із горючим компонентом за рахунок зростання потужності генератора та перебудови структури струменя забезпечує на «багатих» сумішах розширення діапазону досяжних значень питомої енергії струменя у (1,5 – 1,7) рази та збільшення об’єму його високотемпературної зони у (4 – 5) разів;

5. Доведено, що перспективним шляхом впливу на енергетичні та концентраційні характеристики плазмового струменя у технологіях нанесення покриттів є оптимізація хімічного складу системи «плазма-транспортуючий газ». Експериментально встановлено, що у випадку використання плазми, яка генерується із сумішей вуглеводневих газів із повітрям (α < 1), застосування транспортуючого вуглеводневого газу внаслідок його дисоціації зі збільшенням об’єму продуктів і відсутності реакцій окиснення продуктів дисоціації підвищують швидкість потоку на (5 – 7) %, причому локальне падіння температури не перевищує (3 – 5) %.

6. Експериментально встановлений факт різкого зменшення вмісту кисню в об’ємі факела при використанні в якості транспортуючого вуглеводневого газу – практично до нуля на осі струменя і вдвічі за перерізом на відстані 5 мм від осі (на дистанції вимірювання). За рахунок локального зниження α, значно (у (10 – 100) разів, залежно від положення відносно осі

312

струменя точки вимірювання), підвищується вміст відновних компонентів Н2 та СО;

7. Доведена можливість керування просторовим положенням плазмового струменя дією зовнішнього магнітного поля на частину стовпа та приелектродну ділянку дуги. Встановлено, що кут відхилення струменя та його положення відносно поздовжньої осі дугового каналу у разі застосування поперечного поля залежить від параметрів зовнішнього магнітного поля та умов генерації плазми і у дослідженому діапазоні зміни режимних параметрів становить (6о – 12о).

8. Зовнішнє обертальне магнітне поле через інтенсифікацію теплообміну дуги із плазмоутворювальним газом забезпечує зростання на (15 – 20) % інтегрального значення напруги на дузі (загальної потужності дугового розряду) і, як наслідок, збільшення об’єму високотемпературної зони плазмового струменя. Об’єм залежить від взаємних напрямків обертання зовнішнього магнітного поля і початкового закручування плазмоутворювального газу і максимальний у разі їх неспівпадання. Залежність об’єму плазмового струменя від частоти обертання зовнішнього поля носить екстремальний характер.

9. Магнітний вплив в процесі формування газопорошкового потоку дозволяє здійснити гармонізацію взаємного положення твердої та газової фаз потоку, відхиляючи останню відносно поздовжньої осі розпилювача. За умови застосування поперечного магнітного поля суміщення каналів передавання газової та твердої фаз проявляється у збільшенні на (14 – 31) % лінійних розмірів плями напилення у плані та її максимальної товщини на (13 – 37) % і, відповідно, збільшення об’єму напиленого матеріалу у (1,1 – 1,6) рази. Наслідком збільшення об’єму напиленого матеріалу є підвищення коефіцієнта використання матеріалу (до 20 %) та зменшення загальної пористості покриття у всьому об’ємі плями напилення. У разі напилення феромагнітних матеріалів застосування зовнішнього магнітного поля

313

дозволяє значно (у деяких випадках до (1,5 – 1,7) разів) збільшити загальний об’єм напиленого матеріалу із одночасною симетризацією форми плями напилення та збільшенням її площі.

10. На основі проведених досліджень розроблені генератори плазми в діапазоні потужностей від 20 кВт до 100 кВт з оптимізованою конфігурацією дугового каналу, що характеризуються підвищеними енергетичними характеристиками та надійністю, а також магнітні системи для корекції просторового положення та розмірів потоку плазми.