

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПЛАЗМОВІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГРАДІЄНТНИХ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВИМ НАПИЛЕННЯМ

В.М. Пащенко

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: vn.paschenko@ukr.net

Досліджений плазмовий пристрій для плазмово-порошкового напилення багатошарових, композиційних та градієнтних покриттів. Проведені експериментальні дослідження енергетичних характеристик дугового генератора плазми з криволінійним дуговим каналом при роботі на плазмоутворювальному повітрі з метою доведення принципової можливості його тривалої експлуатації з прийнятними енергетичними і ресурсними характеристиками. Показано, що втрати в елементи конструкції плазмотрона залежать від струму дуги та витрат плазмоутворювального газу, характер цієї залежності принципово не відрізняється від звичайних плазмотронів: з підвищенням струму втрати зростають і дещо знижуються при збільшенні витрати газу. Вольт-амперні характеристики генератора плазми спадні, проте наявність перегину дугового каналу як стабілізуючого довжину дуги фактору призводить до появи нейтральної ділянки ВАХ з певною тенденцією до зростання при збільшенні струму. При цьому обмежується діапазон стійкої роботи по струму дуги. Наведений варіант вдосконалення конструкції досліджуваного плазмотрона з розширенням його функціональних можливостей нанесення багатокомпонентних покриттів. Бібліогр. 8, рис. 7.

Ключові слова: плазмово-порошкове напилення, градієнтні покриття, багатошарові покриття, дуговий генератор плазми з криволінійним каналом, плазмоутворювальне повітря, вольт-амперні характеристики, коефіцієнт корисної дії, спеціалізований плазмовий пристрій

Вступ. Значна кількість деталей із покриттями металургійного, хімічного, авіаційного та іншого обладнання працюють за умов високих навантажень та різких коливань температури навколишнього середовища. При цьому штучно створені функціональні поверхневі шари виробів повинні зберігати свої властивості протягом всього терміну експлуатації. Хімічний склад і структура покриттів, а, відповідно, і фізико-механічні властивості матеріалу, з якого вони створені, можуть різко відрізнятися від властивостей матеріалу основи (наприклад, керамічні покриття на металевих основах). Часто виникає проблема порушення механічної цілісності системи «покриття-основа» через різку відміну коефіцієнтів термічного розширення матеріалів (КТР) основи і покриття. Достатньо широко використовуються також композиційні покриття різного функціонального призначення з металевими та керамічними складовими. Причому формування таких покриттів відбувається з компонентів, що окремо подаються в зону формування композиційного покриття.

Найбільш розповсюдженими методами створення поверхневих шарів такого типу на сьогодні є газотермічне порошкове напилення (зокрема, плазмове) та плазмово-порошкове наплавлення [1, 2].

Не втратила на сьогодні своєї актуальності також ідея створення «адіабатного» двигуна внутрішнього згоряння [3]. Створення керамічного дизеля з теплоізолюваною камерою згоряння (зва-

ного адіабатним) дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії двигуна у 1,5 рази та досягти питомої (на одиницю потужності) маси майже на 30 % менше ніж у традиційної конструкції. Такі двигуни можуть працювати на паливах широкофракційного і погіршеного складу, тобто є багатопаливними, оскільки висока температура стінок камери згоряння сприяє займанню важкозаймистих палив. У ході створення адіабатного двигуна поряд із застосуванням монолітних деталей із кераміки передбачається застосування металевих деталей з теплобар'єрними керамічними покриттями.

Найбільш часто в якості матеріалу теплобар'єрних покриттів (ТБП) використовуються оксиди цирконію та алюмінію, що обумовлено, в першу чергу, їх низькою теплопровідністю [4]. Робоча температура покриття із оксиду цирконію, стабілізованого Y_2O_3 , становить близько 1090 °С. Перспективними вважаються ТБП нового покоління на основі фосфату лантану та гексоалюмінату лантану. Ці матеріали можуть експлуатуватися при температурах 1100...1600 °С.

Теплобар'єрні покриття звичай складаються з двох шарів, що виконують різні функції. Верхній шар (керамічний) сприймає тепловий та ерозійний вплив газового потоку і, маючи низьку теплопровідність, знижує температуру деталі, яка захищається. Під керамічним шаром знаходиться жаростійкий шар, що захищає основу від окиснення і сприяє підвищенню міцності зчеплення кераміч-

ного шару з металом основи. Додаткове зниження теплопровідності керамічних покриттів може бути досягнуто їх багат шаровим нанесенням.

Застосування проміжного шару із металевого матеріалу частково вирішує проблему узгодження КТР матеріалів основи і функціонального покриття, але повне вирішення можливе лише у випадку поступового переходу від КТР матеріалу основи до КТР матеріалу верхнього шару покриття. Перехід може бути реалізований ступінчасто, збільшенням кількості перехідних шарів зі змінним значенням КТР [4, 5], або у вигляді покриття із плавною зміною фізичних властивостей матеріалу покриття у напрямку від основи до поверхні виробу. Такі покриття позиціонуються як градієнтні.

Створення градієнтного покриття можливе шляхом застосування вже готових сумішей основного функціонального покриття (керамічного) та матеріалу підшару [4, 5]. Такі готові суміші мають змінну пропорцію між компонентами. Спочатку наноситься шар покриття, що складається тільки із металеві компоненти, а потім наступні шари із готових сумішей, в яких вміст керамічної складової поступово збільшується. Самий верхній функціональний шар покриття містить тільки керамічну складову. Такий спосіб гарантує необхідне співвідношення між компонентами у кожному шарі, але потребує наявності кількох дозаторів-живильників (за кількістю шарів), що вмикаються послідовно, або перезавантаження порошком із новим співвідношенням компонентів одного дозатора (з обов'язковим очищенням від попереднього порошку).

Більш перспективним шляхом може бути використання комплексу обладнання, що містить таку кількість дозаторів, яка дорівнює кількості компонентів композиції у майбутньому покритті (у простішому випадку два) [6].

Робота таких дозаторів-живильників відбувається одночасно за певним алгоритмом, який визначає продуктивність роботи кожного. Керування (зміна співвідношення між компонентами у газопорошковому потоці) може здійснюватися у функції часу, якщо можливе точне визначення товщини шару, який наноситься, за продуктивністю дозатора та коефіцієнта використання матеріалу, або у функції кількості проходів, якщо відома товщина покриття, що отримується за один прохід. Керування можливе також у разі застосування апаратних засобів оперативного визначення товщини шару покриття, який формується. Реалізація алгоритму потребує наявності мікропроцесорного блоку керування, який має зворотний зв'язок із ходом процесу формування покриття.

Ще однією проблемою у ході реалізації технології нанесення градієнтних покриттів є організація процесу нагрівання вихідного матеріалу, який містить компоненти з різко відмінними фізичними властивостями. Враховуючи суттєву просторо-

ву неоднорідність температурних, концентраційних та швидкісних полів високотемпературного газового потоку, практично неможливо визначити одне місце введення компонентів вихідного матеріалу, яке б забезпечувало оптимальні умови нагрівання та прискорення як металеві, так і керамічної складової (не кажучи вже про захист матеріалу від небажаного впливу активних газів навколишнього середовища). Керамічна складова вихідного матеріалу потребує високої температури і порівняно тривалого часу перебування в активній зоні плазмового струменя. Металева – захисту від окиснення та обмеження процесу інтенсивного випаровування шляхом мінімізації часу перебування в зоні надвисоких температур.

Враховуючи, що найбільш поширеним способом введення вихідного матеріалу у плазмовий струмінь є введення його за межами конструкції генератора плазми, широких можливостей оптимізації умов нагрівання та прискорення порошку сучасні конструкції розпилювачів не надають. Введення вихідного матеріалу (для керамічної складової) під кутом безпосередньо у дуговий канал суттєво знижує надійність процесу через високу ймовірність налипання матеріалу на стінки дугового каналу і виникнення нештатних аварійних режимів роботи плазмотрона. До того ж, надійність конструкції зменшується через необхідність проходження порошкопроводом водяних сорочок охолодження теплонапружених елементів конструкції генератора плазми [6].

Співвісне з потоком плазми подавання вихідного матеріалу не представляється можливим через наявність центрального водоохолоджуваного електрода в дугових генераторах лінійної схеми [7].

Мета даної роботи полягає в тому, щоб на основі результатів експериментальних досліджень горіння дуги в криволінійних дугових каналах довести принципову можливість створення нового покоління плазмових пристроїв для нанесення покриттів складної конструкції – багат шарових та градієнтних із матеріалів з суттєво відмінними фізико-механічними властивостями.

Методика експериментів. Дослідження проводились на двохелектродному плазмотроні з дуговим каналом, який складається із кількох ділянок, що розміщені під кутом одна до одної. Просторова стабілізація дуги – вихрова.

В якості плазмоутворювальної речовини використовувалося повітря та суміш повітря з пропан-бутаном. Газова суміш готувалася попередньо і подавалася у генератор плазми вже з відомим співвідношенням компонентів.

Електричні параметри пристрою (напруга на дузі та струм дуги) вимірювались електронними та стрілочними приладами.

Втрати в елементи конструкції генератора плазми визначались шляхом вимірювання витрати охолоджувальної рідини та її температури на

вході та виході контурів охолодження відповідних вузлів. Температура вимірювалась за допомогою ртутних лабораторних термометрів з ціною поділки 0,1 °С.

Результати досліджень та їх обговорення. Відомі прямі способи відхилення потоку від осі дугового каналу шляхом застосування кутових сопел [7] дозволяють відхиляти струмінь на визначений кут за рахунок зміни напрямку витікання вже сформованого струменя. Такий спосіб має суттєвий недолік – відхилення плазмового потоку на стадії розвиненої турбулентної течії викликає різке зростання теплових втрат у стінку сопла у місці повороту струменя плазми, що погіршує енергетичні параметри плазмотрона і значно скорочує ресурс роботи вихідного електрода.

Цього недоліку можна позбутись, якщо плазмовий потік повернути ще на етапі його формування. Для цього дуговий канал виконують з двох частин, що стикаються між собою під деяким кутом. За цих умов більша частина основної ділянки дуги розміщена на вхідній, а менша частина основної ділянки дуги та її приелектродна ділянка на вихідній ділянці дугового каналу, під кутом до початкової та основної ділянок дуги [8].

Така організація горіння дуги дає змогу деякою мірою захистити стінки дугового каналу у місці зміни напрямку руху газового потоку від тепла нагрітої частини газу за допомогою збереженого на цьому етапі формування потоку плазми холодного прошарку газу між стінкою каналу та електричною дугою і не повністю сформованим плазмовим потоком.

На рис. 1 показаний варіант пристрою для реалізації описаного способу.

Вихідний електрод пристрою, у якому розміщується дуговий канал, складається з двох конструктивних одиниць, нерухомо з'єднаних між собою. Кожна характерна ділянка дугового каналу розміщена в межах своєї конструктивної одиниці і має

індивідуальну незалежну систему охолодження. Вхідній ділянці дугового каналу характерний порівняно невисокий рівень теплових втрат [7], тому вузол, в якому вона розміщена, може мати повітряне охолодження (природне або примусове). У межах цього ж вузла розміщений кутовий перехід вхідної ділянки дугового каналу до початкової ділянки вихідного дугового каналу та проходить порошкопровід.

Кінцева ділянка вихідного дугового каналу має, зазвичай, водяне охолодження. Для раціонального використання об'єму матеріалу і підвищення загального ресурсу вихідного електрода у вихідній частині вихідного електрода зроблений цілий ряд каналів, кожний з яких, за певних умов, може слугувати кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. За конкретних умов тільки один з каналів, у якого вхідний отвір співпадає з вихідним отвором початкової ділянки вихідного дугового каналу, слугує кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. Всі інші канали є резервними і послідовно задіюються до роботи при зміні положення вихідної частини вихідного електрода відносно його вхідної частини.

Експериментальні дослідження макету плазмового розпилювача, створеного за запропонованою схемою, показали технічну життєздатність конструкції у випадку роботи на типових для плазмового наплення струмових навантаженнях і використанні плазмоутворювальних сумішей системи N–O або N–O–C–H. Дослідження енергетичних характеристик проводилося на діючому макеті розпилювача (рис. 2).

Для живлення плазмотрона було застосовано тиристорне джерело струму типу АПР-402, яке стабілізує струм дуги у діапазоні 100...450 А при зміні робочої напруги від 100 до 250 В.

Катодний вузол і вихідна частина дугового каналу в межах анода мали пряме водяне охоло-

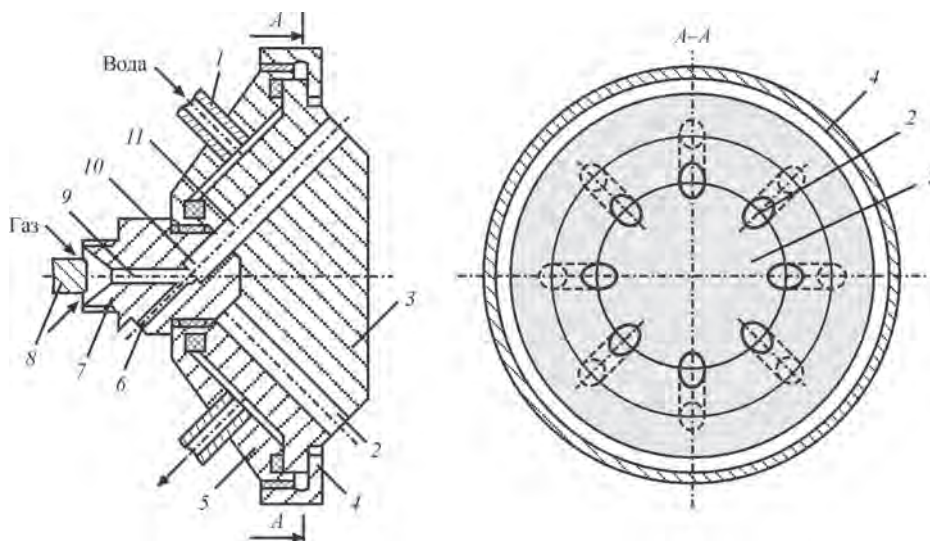


Рис. 1. Плазмотрон зі збірним дуговим каналом: 1 – штуцер; 2 – ділянки дугового каналу; 3 – вихідна частина аноду; 4 – накидна гайка; 5 – корпусна деталь; 6 – канал подавання порошку; 7 – вхідна частина аноду; 8 – катод; 9 – вхідна частина дугового каналу; 10 – початкова ділянка вихідної частини дугового каналу; 11 – кінцева ділянка вихідної частини дугового каналу

дження, а вхідна частина дугового каналу – природне повітряне охолодження.

Змінними режимними параметрами роботи плазмотрона були витрата плазмоутворювального повітря (тиск газу перед розпилювачем) та струм дуги.

Основні результати експериментальних досліджень наведені на рис. 3–5.

Значення напруги на дузі визначається струмом дуги і витратою (тиском) плазмоутворювального газу. Зі збільшенням витрати газу дуга подовжується і, відповідно, підвищується інтегральне значення падіння напруги на ній. Зі збільшенням струму дуга скорочується і падіння напруги стає меншим (рис. 3).

Характерною особливістю досліджуваного плазмотрона є наявність на струмі вище 170...180 А нейтральної ділянки статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) з тенденцією переходу її до зростаючої у разі збільшення струму дуги вище 220...230 А.

Вочевидь це є наслідком фіксації довжини дуги на повороті дугового каналу в деякому діапазоні зміни струму та витрати плазмоутворювального газу. Початок процесу стабілізації довжини дуги залежить від витрати плазмоутворювального газу – чим менша витрата, тим нижче порогове значення струму, при якому починається стабілізація довжини дуги.

Збільшення струму до рівня 270...300 А призводить до переходу у нештатний режим роботи генератора плазми, який характеризується стрибкоподібним скороченням дуги з втягуванням її у вузьку частину дугового каналу. Цьому режиму роботи плазмотрона характерні підвищені втрати енергії на початковій ділянці дугового каналу. А враховуючи, що ця ділянка має у конкретному випадку природне повітряне охолодження, це при-

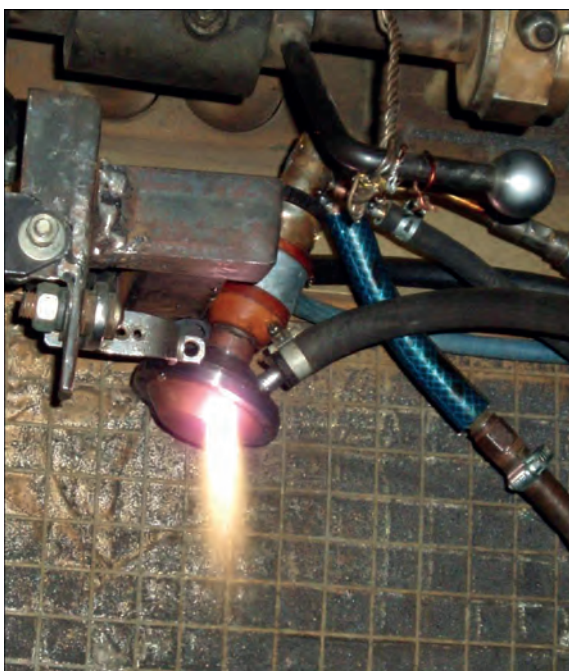


Рис. 2. Плазмотрон з криволінійним дуговим каналом

зведе до перегрівання матеріалу електрода та різкому прискоренню процесу його ерозії.

На рис. 4 наведено залежності втрат в анодний вузол плазмотрона від режимних параметрів роботи пристрою.

Втрати енергії у вхідну частину дугового каналу (ділянку з меншим діаметром) при штатних режимах роботи визначаються практично втратами тепла через випромінювання дуги, тому зменшуються зі зниженням струму і підвищенням витрати плазмоутворювального газу внаслідок зниження середньомасової температури плазми.

Втрати у вихідну частину дугового каналу визначаються, в основному, струмом дуги. Одночасно з підвищенням витрати плазмоутворювального газу, внаслідок потовщення прошарку холодного газу між дугою і стінкою дугового каналу та скорочення ділянки розвинутої турбулентної течії високотемпературного потоку газу в межах дугового

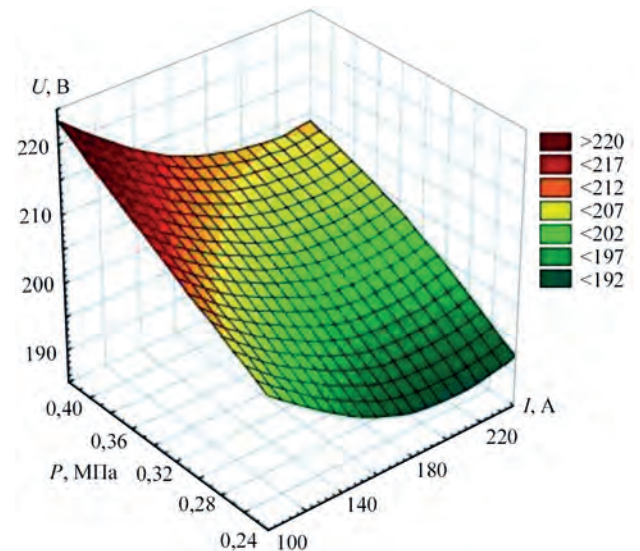


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики плазмового розпилювача

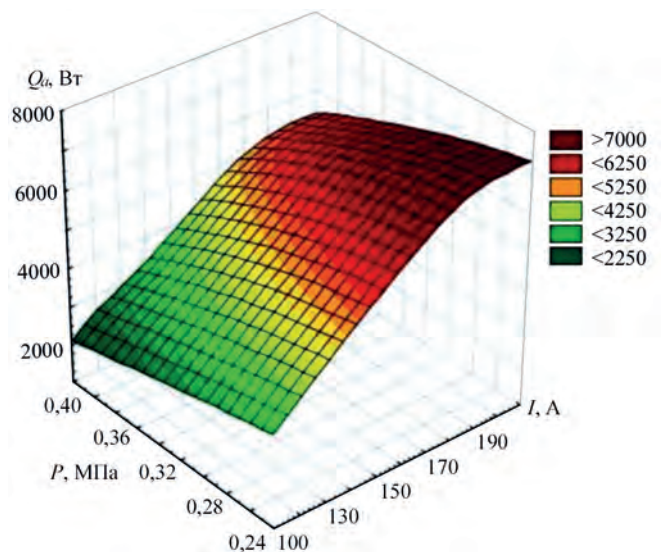


Рис. 4. Залежність втрат енергії в анодний вузол генератора плазми від струму дуги та тиску плазмоутворювального газу

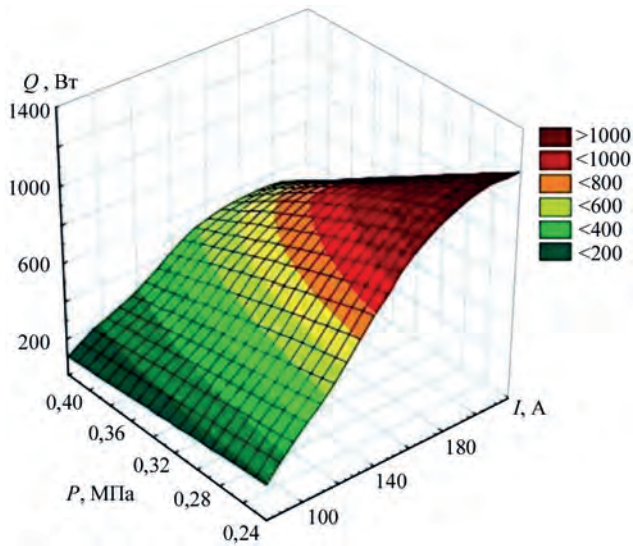


Рис. 5. Залежність втрат енергії в катодний вузол генератора плазми від струму дуги та тиску плазмоутворювального газу каналу, загальний рівень втрат у вихідний електрод дещо зменшується.

Втрати у катодний вузол зростають у міру зростання струму дуги за умови постійної витрати плазмоутворювального газу, і дещо зменшуються у разі підвищення його витрати (рис. 5). Збільшення витрати холодного плазмоутворювального газу інтенсифікує процес відведення тепла від елементів конструкції катодного вузла через інтенсивний обдув зовнішньої поверхні термохімічного катода та вузла його кріплення. За цих умов має місце рекуперація частини енергії електричної дуги, яка не втрачається, а використовується на попереднє підігрівання плазмоутворювального газу.

Тепловий коефіцієнт корисної дії плазмотрона (ККД), що розрахований за вимірними втратами енергії, в конкретному випадку має досить високі значення у всьому діапазоні зміни струму дуги. Хоча слід мати на увазі, що наявність у вихідному електроді ділянки з природнім повітряним охолодженням, втрати в яку не враховуються у розрахунках, дає дещо завищені значення розрахованого ККД (рис. 6).

Зі збільшенням струму дуги спостерігається зниження значення ККД, але, починаючи із значень струму 160...170 А, наявне уповільнення темпу падіння ККД та стабілізація його на рівні 0,76...0,8. Слід зазначити, що високі значення ККД 0,8...0,86 характерні для роботи плазмового генератора з підвищеною витратою плазмоутворювального газу. Такі режими роботи, зазвичай, не характерні процесам нанесення покриттів через низькі значення питомої енергії потоку високотемпературного газу.

У випадку використання плазмотрона як розпилювача дисперсного матеріалу із введенням порошку разом із транспортуючим газом співвісно з вихідною ділянкою дугового каналу, слід очікувати зміну умов горіння електричної дуги та харак-

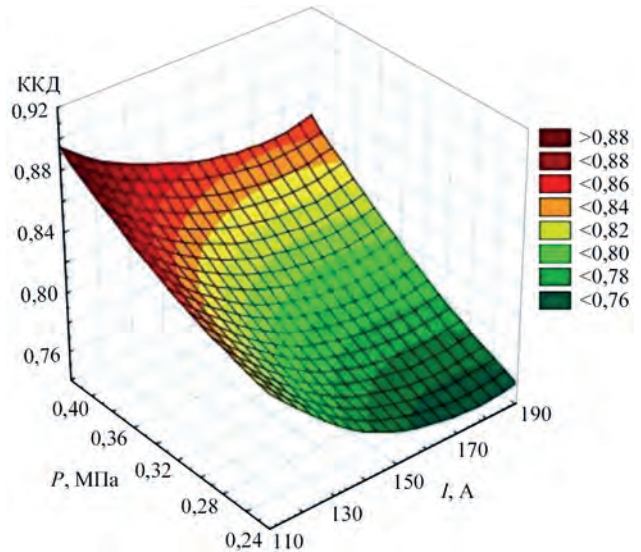


Рис. 6. Залежність ККД плазмотрона від струму дуги при різних значеннях тиску плазмоутворювального газу

теру теплообміну з робочими газами. Транспортуючий газ приймає активну участь у формуванні потоку плазми, бо подається в зону електричної дуги. Місцезаповнення плями прив'язування дуги у цьому випадку буде частково залежати також від витрати і складу транспортуючого газу. А форма і характер плями прив'язування дуги будуть певним чином залежати від складу транспортуючого газу з потенційною можливістю за певних умов переходу до дифузного прив'язування дуги.

Наявність у плазмотроні ділянки дугового каналу з повітряним охолодженням дає можливість прокладання порошкопроводу через анодний вузол без пересікання його сорочок охолодження (див. рис. 1). Однак практично реальними залишаються тільки два варіанти подавання компонентів композиційного матеріалу: у місці перегину дугового каналу (за умови застосування повітряного охолодження) та за межами дугового каналу на зрізі сопла розпилювача. Всі інші потребують пересікання сорочок охолодження електродів і відповідного ускладнення конструкції із втратою надійності пристрою. Це певним чином обмежує можливості оптимізації технології шляхом зміни місця введення у високотемпературний газовий потік окремих компонентів вихідного матеріалу з метою врахування їх фізичних та геометричних характеристик.

Подальше вдосконалення конструкції досліджуваного генератора плазми значною мірою вирішує згадану проблему і дозволяє створити спеціалізований плазмовий пристрій з широкими функціональними можливостями для нанесення багатошарових та градієнтних покриттів (рис. 7). Для цього у вихідному електроді (аноді) створюється конусоподібна порожнина, на поверхні якої розташовані входи каналів для подавання дисперсного матеріалу. Канали сполучаються з відповідними кінцевими ділянками дугового каналу, при-

чому розташування кожного каналу і місце його сполучання з дуговим каналом визначається важкістю плавлення матеріалу, що використовується, і може бути різним для наявних кінцевих ділянок вихідного дугового каналу (у конкретному випадку таких ділянок 8).

Показаний на рисунку пристрій для нанесення багатшарового композиційного покриття складається з трьох конструктивних одиниць, нерухомо з'єднаних між собою. Кожна характерна ділянка дугового каналу розміщена в межах своєї конструктивної одиниці і має індивідуальну незалежну систему охолодження. Вхідній ділянці дугового каналу характерний невисокий рівень теплових втрат, тому вузол, в якому вона розміщена, може мати (за певних умов) повітряне охолодження (природне або примусове). У межах цього ж вузла розміщений кутувий перехід вхідної ділянки дугового каналу до початкової ділянки вихідного дугового каналу та проходить порошкопровід. Кінцева ділянка вихідного дугового каналу має, зазвичай, водяне охолодження і розміщується під кутом до поздовжньої осі вихідної частини вихідного електрода. Для раціонального використання об'єму матеріалу і для підвищення загального ресурсу вихідного електрода у вихідній частині вихідного електрода зроблений цілий ряд каналів, кожний з яких, за певних умов, може слугувати кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. У конкретному випадку тільки один із каналів, у якого вхідний отвір співпадає з вихідним отвором початкової ділянки вихідного дугового каналу, слугує кінцевою ділянкою вихідного дугового каналу. Всі інші канали є резервними і послідовно задіюються до роботи при зміні положення вихідної частини вихідного електрода відносно його вхідної частини вихідного електрода. Можлива кількість каналів визначається конструктивно, з урахуванням обов'язкової наявності стінки

певної товщини між сусідніми каналами, необхідної для ефективного відведення тепла вглиб вихідного електрода. В торці вихідного електрода зроблена конусоподібна порожнина, на поверхні якої розміщені отвори. Отвори сполучаються з вихідними ділянками дугового каналу. Місце входу отворів у вихідні ділянки дугового каналу визначається з урахуванням температури плавлення конкретної компоненти композиційного матеріалу, з якого формується покриття. Тугоплавка компонента композиційного матеріалу може вводитись у районі переходу вхідної ділянки дугового каналу у початкову ділянку вихідного дугового каналу. Напрямок початкового руху частинок порошку і плазмового потоку співпадають, тому тугоплавка компонента не буде мати радіальної складової швидкості (відносно поздовжньої осі дугового каналу) і буде перебувати у високотемпературній зоні максимально можливого часу. Всі інші компоненти матеріалу покриття можуть вводитись через отвори, які розміщуються на різній відстані від зрізу сопла плазмового пристрою. Вибір каналу, який буде робочим, із всієї сукупності каналів, здійснюється виходячи із температури плавлення та розмірів другої компоненти композиційного матеріалу. Ці критерії визначають місцеположення сполучання порошкопроводу з дуговим каналом плазмового пристрою і, відповідно, вибір тієї чи іншої резервної ділянки.

Розміщення каналів для подавання порошку на поверхні внутрішньої центральної конусної порожнини не потребує перетинання сорочки охолодження вихідного електрода, бо водяне охолодження електрода відбувається тільки збоку його зовнішньої поверхні.

У разі переходу на напилення іншої композиції матеріалів можлива заміна каналу на один із резервних, який більш придатний для подавання нових компонент композиційного матеріалу. У ви-

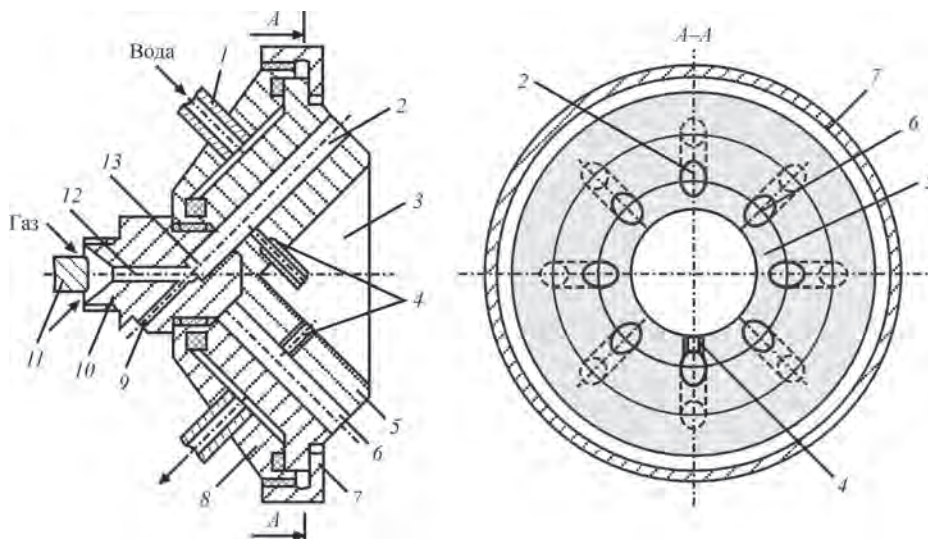


Рис. 7. Конструкція генератора плазми для нанесення багаткомпонентних покриттів: 1 – штуцер; 2 – кінцева ділянка вихідної частини дугового каналу; 3 – порожнина; 4, 9 – канали подавання порошку; 5 – вихідна частина аноду; 6 – ділянки дугового каналу; 7 – накидна гайка; 8 – корпусна деталь; 10 – вхідна частина аноду; 11 – катод; 12 – вхідна частина дугового каналу; 13 – початкова ділянка вихідної частини дугового каналу

падку тривалого наплення однієї композиції, резервні канали роблять ідентичними з точки зору місця розміщення порошкопроводу. У цьому випадку наявність резервних каналів дозволяє стабілізувати якість покриття і підвищити загальний ресурс пристрою. Для запобігання погіршення якості покриття та ефективності процесу наплення при зміні геометричних розмірів і конфігурації дугового каналу внаслідок ерозії матеріалу електрода, вихідні ділянки дугового каналу періодично замінюють.

Висновки

1. Застосування генераторів плазми з криволінійним дуговим каналом доцільне у випадку створення багатошарових композиційних покриттів із компонентами, що різко відрізняються за своїми фізико-механічними характеристиками.

2. Складна конфігурація дугового каналу дещо обмежує діапазон стійкої роботи генератора плазми по струму дуги і витраті плазмоутворювальної газової суміші.

3. Загальний характер залежностей енергетичних характеристик плазмотрона з криволінійним дуговим каналом від основних режимних параметрів ідентичний аналогічним залежностям для традиційних генераторів плазми із прямолінійним дуговим каналом.

4. Вплив режимів експлуатації генераторів плазми з криволінійним дуговим каналом на їх ресурсні характеристики потребує подальших досліджень з метою встановлення раціональних режимів експлуатації.

Список літератури

1. Сом А.И., Галагуз Б.А. (2020) Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов с раздельной подачей карбидов вольфрама и матричного сплава. *Автоматическая сварка*, **12**, 37–43.
2. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Грищенко А.П. и др. (2019) Структура и фазовый состав плазменных покрытий ZrB₂-SiC-AlN на поверхности композиционного материала C/C-SiC. *Там же*, **5**, 25–35.

3. Мацкерле Ю. (1987) *Современный экономичный автомобиль*. Пер. с чешск. В.Б. Иванова; Бенедиктов А.Р. (ред.). Москва, Машиностроение.
4. Борисова А.Л., Борисов Ю.С., Астахов Е.А. и др. (2012) Теплозащитные свойства газотермических покрытий, содержащих квазикристаллический сплав системы Al-Cu-Fe. *Автоматическая сварка*, **4**, 38–41.
5. Мацука Н.П., Громыка Г.Ф., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф. (2019) *Моделирование нестационарных тепловых процессов при формировании градиентных газотермических покрытий на основе самофлюсующегося сплава, модифицированного твердыми тугоплавкими соединениями под импульсным высокоэнергетическим воздействием*. Минск, Еругинские чтения-2019, сс. 88–89.
6. Зайцев О.В. (2008) *Розробка матеріалів для захисту деталей авіаційних двигунів від високотемпературної ерозії*: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01. Дніпропетровськ.
7. Пашченко В.М. (2018) *Дугові генератори в технології інженерії поверхні*. Харків, Мачулін.
8. *Пристрій для формування газопорошкового потоку при плазмовому напленні*. Україна пат. 42589 МПК (2009) B05B 7/00, H05H 1/00. № 200901606; заяв. 24.02.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13.

References

1. Som, A.I., Galaguz, B.A. (2020) Plasma transferred arc surfacing of composite alloys with separate feed of tungsten carbides and matrix alloy. *The Paton Welding J.*, **12**, 34-39.
2. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Grishchenko, A.P. et al. (2019) Structure and phase composition of ZrB₂-SiC-AlN plasma coatings on the surface of C/C-SiC. *The Paton Welding J.*, **5**, 18-27.
3. Matskerle, Yu. (1987) *Modern economy car*. Ed. by A.R. Benediktov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Borisova, A.L., Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A. et al. (2012) Heat-protecting properties of thermal spray coatings containing quasi-crystalline alloy of the Al-Cu-Fe system. *The Paton Welding J.*, **4**, 31-36.
5. Matsuka, N.P., Gromyka, G.F., Shevtsov, A.I., Iliyushchenko, A.F. (2019) *Modeling of nonstationary thermal processes in formation of gradient thermal coatings based on self-fluxing alloy modified with solid refractory compounds under pulsed high-energy action*. Минск, Еругинские Чтения-2019, 88–89 [in Russian].
6. Zajtsev, O.V. (2008) Development of materials for protection of aircraft engine parts from high-temperature erosion. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree, Dnipropetrovsk* [in Ukrainian].
7. Pashchenko, V.M. (2018) *Arc generators in surface engineering technologies*. Kharkiv, Machulin [in Ukrainian].
8. (2009) *Device for formation of gas-powder flow in plasma spraying*. Pat. Ukraine 42589. Int. Cl. B05B 7/00, H05H 1/00 No. 200901606; fill. 24.02.2009; publ. 10.07.2009 [in Ukrainian].

SPECIALIZED PLASMA DEVICES FOR PRODUCING GRADIENT COATINGS BY PLASMA POWDER SPRAYING

V.M. Pashchenko

NTUU «Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohi Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: vn.paschenko@ukr.net

A plasma device for plasma-powder spraying of multilayer, composite and gradient coatings was studied. Experimental studies of energy characteristics of plasma arc generator with curvilinear arc channel were performed at operation in plasma-generating air with the purpose of proving the principal possibility of its long-term service with acceptable energy and life characteristics. It is shown that losses into the plasmatron structure elements depend on arc current and plasma gas flow rate, and the nature of this dependence does not differ in principle from regular plasmatrons: the losses increase with current rise and somewhat decrease at increase of gas flow rate. Volt-ampere characteristics of plasma generator are drooping. However, the presence of arc channel bend as a factor stabilizing the arc length, leads to appearance of a neutral region of VAC with a certain tendency to increase at current rise. Here, the stable operation range is limited by arc current. A variant of improvement of the studied plasmatron design with widening of its functional possibilities of multicomponent coating deposition is given. 8 Ref., 7 Fig.

Key words: plasma-powder spraying, gradient coatings, multilayer coatings, plasma generator with a curvilinear channel, plasma-generating air, volt-ampere characteristics, efficiency, specialized plasma device

Надійшла до редакції 31.08.2022