

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

П Е Т Р О В
Станіслав Володимирович

УДК 621.793

АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАНЕСЕННЯ
ПОКРИТТІВ ТА ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ
У ГАЗОПОВІТРЯНІЙ ПЛАЗМІ

05.03.06 —

технологія та обладнання для зварювання і споріднених процесів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 1996

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті газу НАН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Корж В.М.;
доктор технічних наук, професор
Роянов В.О.;
доктор технічних наук, професор
Дзюба В.Л.

Провідна організація: Інститут електрозварювання
ім.Є.О.Патона НАН України

Захист відбудеться "16" грудня 1996 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.10 по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут", корпус 23, аудиторія 323.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці університету.

Відгук на автореферат (1 примірник, затверджений печаткою) прохання направляти за адресою: 252056, м.Київ-56, проспект Перемоги, 37, КПІ-213.

Автореферат розіслано "1" листопада 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради _____ Коршенко Є.О.

ЛІННБ України ім.В.Стефаніка



00753764 (W)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ. Переведення економіки на шлях інтенсивного розвитку передбачає активне використання концентрованих, у тому числі плазмових, джерел енергії, розробку на їх основі вискоелективних технологій, що сприяють підвищенню надійності і довговічності машин та механізмів за умови економії металів. За останні 15 - 20 років, поряд з тенденцією до промислового застосування плазмових процесів, значно зріс обсяг технологічних досліджень. Це зумовлено рядом властивостей низькотемпературної плазми, використання яких дає можливість значно підвищити ефективність відомих процесів і створити нові. Процеси плазмового напилення і різання досить поширені у промисловості. Значно менше застосовується плазмове гартування. Серед методів г.зотермічного напилення (ГТН) покриттів найуніверсальнішим є плазмовий. Прискорення розвитку технології ГТН в останні роки зумовлено переходом до високошвидкісних методів напилення. У хронологічній послідовності це детонаційне, високоенергетичне плазмове Metco-8M, газополуменеве надзвукове HVOF, а з кінця 80-х років - плазмове надзвукове "Plazjet". Надзвукове плазмове напилення "Plazjet" характеризується найвищою продуктивністю і найкращою якістю покриттів, одержаних напиленням у відкритій атмосфері.

Особливе місце серед плазмових процесів обробки матеріалів займають розроблені автором процеси з використанням плазми продуктів згоряння повітря з горючим вуглеводневим газом. Завдяки ряду унікальних властивостей такої плазми (високі теплоємність і теплопровідність, легкість регулювання окислювально-відновлювального потенціалу, недефіцитність і мала відносна вартість) процеси на її основі дедалі більше привертають увагу дослідників і промисловості.

Тенденція зростання випуску нової апаратури і виробництва деталей із захисними покриттями у світі в доступному для огляду майбутньому збережеться. Тому розробка нових вискоелективних конкурентоздатних на зовнішньому ринку технологій та статкування можлива лише на новій науковій базі.

МЕТА РОБОТИ - розробка наукових основ створення вискоелективної плазмово-дугової апаратури, удосконалення процесів газотермічного напилення, обробка матеріалів і одержання вискоякісних покриттів з використанням газоповітряних сумішей.

Комплекс розв'язуваних завдань охоплював 1) дослідження закономірностей процесів стабілізації електричній дузі, що продувається газоповітряною сумішшю змінного складу, на електродах

плазмотрону, системі плазмотрон-джерело електроживлення, потоці плазми, у тому числі з дисперсною фазою, в умовах дозвукової і надзвукової течії, формування покриттів, взаємодії плазми продуктів згорання з виробом; 2) розрахунково-проектні роботи по створенню нової апаратури; 3) дослідно-промислово перевірку; 4) впровадження розроблених устаткування та технологій у різних галузях народного господарства; 5) участь в постановці нової апаратури у серійне виробництво.

НАУКОВА НОВИЗНА роботи полягає в обґрунтуванні і розвиненні дисертантом нового наукового напрямку технології газотермічного наплення та обробки матеріалів з використанням недифіцитних газових сумішей, що відкриває нові шляхи до розв'язання великої народно-господарської проблеми, яка пов'язана із збільшенням стійкості деталей і конструкцій, розширенням кола завдань, розв'язуваних методами газотермічного наплення, плазмового гартування.

Під час виконання дисертаційної роботи автором одержано такі наукові результати:

- описано і обґрунтовано основні енерготехнологічні положення високопродуктивного процесу нанесення щільних (пористість 0-2 %), добре зчеплених з основою ($\sigma_{\text{ч}}=80...150$ МПа) покриттів з відтворюваними властивостями;

- сформульовано, розв'язано теоретично і апробовано експериментально ряд завдань оптимального формування плазмового струменя продуктів згорання, його взаємодії з дисперсною фазою;

- виявлено основні закономірності поведінки електричної дуги у потоці продуктів згорання, досліджено характеристики плазмотронів з протяжною стабілізованою газовим вихором електричною дугою;

- розроблено підхід активного цілеспрямованого впливу на характеристики різних ділянок протяжної стабілізованої дуги, що горить у продувному газоповітряною сумішшю каналі;

- досліджено роботу електродів плазмотрона, який працює на газоповітряній суміші, визначено умови підвищення їх стійкості;

- відкрито нове явище різкого контрагування катодної опірної плями дуги, виявлено тенденцію формування дифузної прив'язки на аноді;

- обґрунтовано теоретично і доведено експериментально ефективність використання в технологіях плазмового та електродугового наплення слабконедорозширеного надзвукового струменя, що витікає із звукового сопла;

- встановлено механізм, досліджено теоретично та експериментально низькочастотні автоколивання, що виникають у системі плазмотрон - джерело електроживлення, яке містить у силовому колі ємності та індуктивності;

- показано, що в умовах надзвукового плазмового напилення у відкритій атмосфері безпористі покриття можна одержати двома способами: за рахунок підвищення швидкості розплавлених дисперсних частинок у момент контакту з основою, або за рахунок створення умов пролонгованого взаємного термічного впливу частинок під час формування покриття (в разі використання плазми продуктів згоряння перший спосіб - найкращий);

- розроблено принципово нові апаратурні вирішення і конструкції електродугових пристроїв, що базуються на вперше вивчених явищах.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ дисертації полягає в широкомасштабній заміні дефіцитних і дорогих інертних газів, які використовуються в процесі плазмового напилення, на дешеву і доступну суміш повітря з горючим вуглеводневим газом (метаном, пропан-бутаном) на основі організації серійного випуску апаратури спочатку "Україна", а потім "Київ-7". Відмова від інертних газів відіграє вирішальну роль у збільшенні продуктивності установок і переході до надзвукових швидкостей (саме ці два чинники визначають основні тенденції світового розвитку процесу газотермічного напилення) у зв'язку з істотним зростанням потужності установок і витрати плазмотвірних газів.

Іншою обставиною, яка забезпечує конкурентоздатність і пріоритет даної розробки на світовому ринку технологій, є високий рівень основних показників процесу та якості покриттів, одержаних з використанням надзвукових потоків.

Сукупність добутих результатів забезпечила створення принципово нової вискоелективної плазмово-дугової апаратури: установки для надзвукового плазмового напилення, установки надзвукової електродугової металізації, спрощеної плазмової установки, у тому числі багатопостової, апаратури високошвидкісного поверхневого плазмового гартування.

Створено матеріальну базу для розв'язання технологічних завдань з використанням плазмових потоків у плазмохімії, металургії, машинобудуванні та інших галузях.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Окремі плазмові установки і технологічні процеси впроваджено на 21 підприємстві різних галузей, 10 з яких працюють і сьогодні: Уралмаш м.Катеринбург (напилення

покриттів, стійких проти спрацювання на штоки бурових насосів), з-д ВО "імені Орджонікідзе" м.Челябінськ (напилення стійких покриттів і плазмове заточування лемешів); Метизний з-д м.Магнітогорськ (напилення стійких покриттів на деталі волочильного устаткування), АТ "Туркменнафта" м.Небіт-Даг (напилення стійких покриттів на деталі бурових машин), Мосенерго м.Москва (напилення алюмокерамічного покриття для захисту теплопроводів від корозії), Комунарський металургійний комбінат м.Алчевськ (напилення захисних покриттів), Автотранс м.Тираспіль (відновлення автомобільних колінвалів), АТ "Сурфколита" м.Каунас (відновлення автомобільних і тепловозних колінвалів), ВЧД-1 м.Київ (плазмове гартування колісних пар), Локомотивне депо Львів-Захід м.Львів (плазмове гартування колісних пар).

Першим великим практичним результатом, який розв'язав проблеми на рівні галузі, була розробка спільно з Комунарським відділом зварювання ДонНДІчормету серійної установки для плазмового напилення потужністю 120 кВт "Україна". На початку 80-х років на металургійних заводах України впроваджено шість таких установок.

Наступним етапом стала розробка спільно з ІЕЗ ім. Є.О.Патона АН УРСР та ВНДІавтогенмаш м.Москва блочно-модульної установки для плазмового напилення потужністю 80 кВт "Київ-7". Серійне виробництво таких установок у кількості 100-300 шт на рік було організовано з 1985 р. на Барнаульському апаратурно-механічному заводі. Випуск апаратів "Київ-7" припинено в 1991 р. у зв'язку з розривом господарських зв'язків.

В останні роки спільно з ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України розроблено установку для надзвукового плазмового напилення потужністю 160 кВт "Київ-7С".

Розроблено спеціалізовані установки високошвидкісного плазмового гартування та надзвукової електродугової металізації для комплектування лінії по відновлюванню колінвалів.

НА ЗАХИСТ ВІНОСЯТЬСЯ:

- концепція застосування плазми продуктів згоряння, генеруємої плазмотроном з більш подовженою, ніж самовстановлювальна, електричною дугою, у процесах високопродуктивного напилення та обробки матеріалів;

- комплекс фізичних та математичних моделей процесів генерування потоку плазми продуктів згоряння і взаємодії такої плазми з оброблюваним матеріалом;

- теорія і практика до та надзвукових плазмотронів для напилення, що працюють на газоповітряній суміші змінного складу.

методи активного цілеспрямованого впливу на характеристики різних ділянок подовженої електричної дуги в таких плазмотронах:

- теоретичні та експериментальні дослідження автоколивань у системі плазмотрон - джерело електроживлення на базі індуктивно-ємнісного перетворювача;

- положення про використання для напilenня надзвукового слабконедорожженого струменя плазми продуктів згоряння, що витікає із звукового сопла;

- результати експериментальних досліджень впливу умов напilenня у плазмі продуктів згоряння на властивості покриттів.

- принципи побудови високоефективної електродугової апаратури і розробки технологій напilenня та обробки матеріалів з використанням газоповітряних сумішей.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Матеріали дисертації доповідалися на 7 міжнародних, 19 всесоюзних і 10 регіональних, галузевих та міжгалузевих конференціях, симпозіумах, нарадах та семінарах, основними з яких є: Міжнародні конференції в Лондоні (1989 р.), Анахаймі (1993 р.), Аахені (1993 р.), Кобі (1995 р.), Києві (1990, 1991 рр.), Москві (1990 р.); Всесоюзні конференції по генераторах низькотемпературної плазми: Алма-Ата (1977 р.), Новосибірськ (1980, 1989 рр.), Каунас (1986 р.); Всесоюзна конференція "Фізика низькотемпературної плазми", Мінськ (1979 р.); Всесоюзний симпозіум по плазмохімії, Москва (1979 р.); наради "Теорія і практика газотермічного нанесення покриттів", Дмитрів (1978, 1983, 1985, 1989, 1992 рр.), Рига (1980 р.); Всесоюзна конференція "Порошкова металурія", Свердловськ (1989 р.); галузеві конференції "Плазмотехнологія", Запоріжжя (1990, 1992 рр.); VI міжнародна науково-технічна конференція "Нові конструктивні сталі і сплави", Запоріжжя (1995 р.); галузеві конференції "Нові матеріали і ресурсозберігаючі технології", Пенза (1990, 1991 рр.); наради "Композиційні покриття", Житомир (1981, 1985, 1987, 1991 рр.).

ПУБЛІКАЦІЇ. Зміст роботи з вичерпною повнотою викладено в монографії, брошурі, 72 наукових статтях та доповідях, по темі дисертації одержано 20 авторських свідоцтв та патентів.

СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ РОБОТИ. Дисертація складається з вступу, 9 розділів, заключного розділу у вигляді формулювання загальних висновків, списку літератури з 253 назв, додатків. Робота містить 261 сторінку машинописного тексту, 112 рисунків, 32 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначено науково-технічну проблему, розв'язанню якої присвячено дисертацію, сформульовано мету роботи, обґрунтовано актуальність проблеми, зазначено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено основні положення, які виносяться на захист.

У розділі 1 дано оцінку і виконано аналіз першочергових завдань удосконалення технології та устаткування газотермічного нанесення покриттів.

Розглянуто істотно важливі для даної роботи результати наукових досліджень Ю.С.Борисова, І.М.Карпа, А.Л.Борисової, Ю.О.Харламова, М.Ф.Жукова, Б.О.Урюкова, В.В.Кудінова та ін.

В розділі 2 розглянуто особливості плазми продуктів згоряння вуглеводневого газу з повітрям. Практика плазмового напилення та обробка матеріалів висувають широкий спектр вимог до плазмотвірного середовища. Первинну інформацію про можливу комбінацію параметрів плазми, які впливають на електричні, теплові та динамічні властивості, дає аналіз результатів розрахунку термодинамічних властивостей використовуваних газів. Вибір роду плазмотвірного газу визначає електричні і теплові характеристики плазмотрона, теплофізичні і динамічні властивості плазмового струменя, його хімічну активність. Окислювально-відновлювальні і переносні властивості плазми продуктів згоряння визначаються її складом. Найінтенсивніша зміна концентрацій виникає в інтервалі температур 3000 - 4000 К за рахунок реакцій

$\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{O}$; $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H} + \text{O}$; $\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{O}$
і 6000-8000 К: $\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{O}$; $\text{N}_2 \rightleftharpoons \text{N} + \text{N}$.

Величини питомих енерговкладів під час напилення більшості матеріалів становлять 5-10 кВт·год/м³. Відповідно до верхньої межі питомої енергії (10 кВт·год/м³) середньомасова температура плазми різних середовищ змінюється в широких межах: від 3900 К для плазми Н₂О до (6,5...7)·10³ К плазми продуктів згоряння і 13400 К для плазми Аг. Плазма продуктів згоряння характеризується низьким темпом зниження температури під час відбирання тепла у широкому інтервалі температур 3000-4000 К і 6000-8000 К (200 К на 1 кВт·год/м³) за рахунок дисоціативно-рекомбінаційних процесів. Наприклад, азотна плазма в інтервалі 3000-4000 К швидко знижує температуру при відведенні тепла (~2200 К на 1 кВт·год/м³). Аналогічна ситуація має місце в разі розведення плазми повітрям.

Основні особливості поведінки плазми молекулярного газу в нерівноважних умовах пов'язані з коливально-поступовою нерівноважністю, яка може становити кілька тисяч градусів. У такій ситуації можливі умови, коли ефект другої в'язкості обертається (друга

або об'ємна в'язкість стає від'ємною). Це призводить не до затухання звуку, генерованого власною турбулентністю та пульсаціями параметрів дуги, а до його нарощування. Ефективне підсилення звуку за рахунок обертання ефекту другої в'язкості відбудеться на частотах 10^4 - 10^5 Гц.

Порівняння енергії звуку ΔE , одержаної з оцінкових формул релаксаційної в'язкості, з тепловою енергією плазми $E_{пл}$ дає

$$\frac{\Delta E}{E_{пл}} = 4\pi^2 \frac{n_M T_K - T}{n_s T} (\omega\tau)^2 \left| 1 - \frac{T_K - T}{T} \cdot \frac{a}{T^{1/3}} \right|$$

беручи відношення концентрації молекул n_M до концентрації атомів n_s , $n_M/n_s \sim 1$, ступінь нерівноважності $(T_K - T)/T \sim 1/10$, добуток частоти звуку ω на час релаксації τ $\omega\tau \sim 10^1$ і $\left| 1 - \frac{T_K - T}{3T} \cdot \frac{a}{T^{1/3}} \right| \sim 1$, матимемо $\Delta E/E_{пл} \sim 4^0$.

Інтенсивні звукові хвилі, які виникають і підсилюються на одній ділянці течії, а поглинаються на іншій (нижче по потоку), можуть вплинути на гідродинамічні параметри течії і електрофізичні властивості розряду. Наприклад, якщо забезпечити активну дисипацію надлишкової звукової енергії у прианодній частині розряду, можна одержати висхідну вольт-амперну характеристику з великим позитивним диференціальним опором, забезпечити формування дифузної прив'язки розряду.

Розділ 3 присвячено дослідженням плазмотронів для наплення покриттів та обробки металів.

Під час хімічних реакцій у камері плазмотрона, що працює на газоповітряній суміші, мають місце звичайні для всіх плазмотронів явища - шунтування, дрейф параметрів дуги, різні нестійкості та пробій. Кількісні співвідношення змінюються. Найпростіше підтримання необхідного рівня параметрів здійснюється в плазмотроні з уступом (рис. 1, а). Виявлені і досліджені особливості поведінки дуги в каналах складного профілю дали можливість розробити ряд принципіально нових конструкцій плазмотронів (рис. 1, б-е). У плазмотроні (рис. 1, б) зростає ефективність впливу на напруженість електричного поля, що дає можливість формувати ВАХ з великим позитивним диференціальним опором, де $R_d = dU/dI$ досягає 6 Ом. На рис. 1, в-е наведено конструктивні вирішення, що забезпечують активний вплив на потік плазми у прианодній частині стовпа дуги. Високі експлуатаційні якості досягаються в плазмотроні з одиначною металевою міжелектродною вставкою (МЕВ) (рис. 1, г-е).

Вольт амперні і теплові характеристики плазмотронів, які працюють на метаноповітряній (пропан-бутан-повітряній суміші), залежать від їх конструктивних особливостей і геометричних

співвідношень дугового каналу, їм властиві особливості, зумовлені родом плазмотвірного газу. Робота з вмістом метану 50% і вище ($\alpha < 0,1$) супроводиться сажоутворенням. З додаванням метану напруга на дузі зростає на 20-30%. Темп зростання напруги із зміною вмісту метану у суміші залежить від місця його введення в дуговий розряд. Приріст напруги значно більший в разі додавання метану до газу (повітря, аргону, азоту) на обдування катода, ніж у суміші з основним плазмотвірним повітрям, яке вдувається в дуговий канал між соплом та анодом. Додавання метану до повітря зумовлює зміну диференціального опору дуги в робочому діапазоні струмів. ВАХ плазмотрона зміщується вгору і стає положитішою. Може змінитися знак диференціального опору і ВАХ стане падаючою. Для метано-повітряної плазмотвірної суміші порівняно з повітрям збільшується область стійкої роботи по струму на 20-30%. Зміщення анодної опорної плями із збільшенням струму дуги в канал меншого перерізу у плазмотроні з уступом виникає при більшому значенні струму. Додавання горючого газу до повітря зумовлює збільшення теплових втрат в елементи плазмотрона (рис. 2). При цьому область максимуму теплових втрат і мінімум ККД припадає на діапазон $0,8 < \alpha < 1,3$. Із зменшенням довжини анода залежність втрат від α послаблюється. ККД плазмотрона із збільшенням вмісту горючого газу зростає, оскільки приріст потужності за рахунок збільшення напруги на дузі з надлишком компенсує втрати. Із збільшенням струму дуги чи зниженням витрати плазмотвірної суміші, відповідно з підвищенням ентальпії плазми, послаблюється залежність втрат від α . Теплові втрати в катод із збільшенням вмісту горючого газу в суміші з повітрям зростають на 10-15%, а в МЕВ на малій довжині 1-3 калібру знижуються. Із збільшенням довжини вид характеристик залежить від плазмодинамічної ситуації. Вид ВАХ великою мірою залежить від форми дугового каналу (рис. 3).

У плазмотронах (рис. 1, г, е) при надкритичному перепаді тисків на сопло-аноді критичні параметри досягаються вище за течією від зрізу сопла $x/d_2 \sim 0,4$, а розгін до надзвукової швидкості проходить у вільному струмені за соплом. На газодинамічну структуру надзвукового потоку найсильніше впливає α . З додаванням горючого газу до повітря емісійна плівка катода насичується вуглецем, вміст кисню в ній знижується, істотно змінюється структура, мікротвердість збільшується. Змінюється характер поведінки плями дуги на поверхні електрода. Встановлено, що дуга на суміші може працювати в двох режимах. Перший - з плямою на півці розплаву, за типом повітряної дуги. Другий - з різко контрагованою плямою в режимі самовідновлення з газової фази.

При цьому можлива тривала робота як на першому, так і на другому режимах. Ерозія мідного анода інтенсифікується за рахунок окислення міді в зоні прив'язки опорної плями дуги. Відсутність окислення міді у плазмі продуктів згорання і зміна характеру прив'язки дуги на аноді, коли значна частина струму замикається через дифузний розряд, забезпечують на практиці високу стійкість сопла-анода, досягає 500 год.

У р о з д і л і 4 розв'язуються задачі надійного запуску і стійкої спільної роботи плазмотрона для наплення з джерелом електроживлення, виконаним за комбінованою двоканальною схемою передачі потужності в навантаження.

Зовнішня характеристика джерела і статична ВАХ плазмотрона погоджені лише в обмеженій зоні поблизу робочої точки. Перехідний процес виходу на режим супроводжується збільшенням довжини дуги, а отже зміщенням ВАХ. Якщо в початковий момент напруга на дузі опиниться за зоною стабілізації струму джерелом електроживлення, відбудеться різке збільшення струму, що значно перевищує допустимий, і плазмотрон вийде з ладу. Швидкість перехідного процесу по електричних колах виявляється вищою, ніж газодинамічні процеси встановлення робочої довжини дуги. З метою надійного запуску плазмотрона розроблені схеми автоматичного виходу його на робочий режим.

Виявлено, що в системі ІЕП-плазмотрон виникають автоколивання у точці з від'ємним диференціальним опором дуги. У випрямлених цапрузі та струмі дуги з'являється гармонійна змінна складова синусоїдальної чи близької до неї форми. Змінні складові струму і напруги завжди перебувають у протифазі. Зміна нахилу ВАХ дуги у робочій точці, збільшення абсолютного значення від'ємного диференціального опору, спричиняє збільшення амплітуди коливань. Зростання амплітуди змінної складової струму дуги призводить до відхилення форми коливань від синусоїдної. Частота коливань змінювалася від 19 до 29 Гц залежно від індуктивності дроселя в колі випрямленого струму і статичного опору дуги в робочій точці. В разі виникнення коливань має місце амплітудна модуляція струмів у колах і напруг на елементах ІЕП. Насичення дроселів і трансформаторів зумовлює спотворення лише форми кривих струмів і напруг на змінній стороні джерела, а на встановлення низькочастотних коливань не впливає. Часова розгортка усіх струмів і напруг на змінній стороні джерела незалежно від форми кривої містить гармонійні обвідні на обох напівперіодах, як показано на рис. 4. Частота автоколивань f_a тут явно не присутня, але пов'язана з частотою обвідної f_0 (для досліджуваного випадку) простим співвідношенням: $f_a \pm f_0 = 25$. Тут знак плюс - на частотах $f_a < 25$ Гц; знак мінус - на частотах $f_a > 25$ Гц.

Нелінійні властивості опору навантаження виявляються на змінній стороні джерела для амплітуди струмів і напруг, оскільки нелінійний елемент знаходиться у колі випрямленого струму. Для миттєвих значень навантаження поводить себе як звичайний опір втрат.

Аналіз багатофазних електричних кіл ІЕП виконано на основі однофазного еквівалента, поданого у вигляді чотирьохполосника, із застосуванням методу комплексних амплітуд. Трифазна Т-подібна схема ІЕП з нелінійним активним навантаженням зведена до однофазного еквівалента, як це зроблено на рис. 5.

Аналітично визначено умови, за яких система втрачає стійкість і виникають періодичні стаціонарні коливання. У рівняннях рівноваги схем для однофазних еквівалентів (рис. 5) шукані струми і напруги символізуються комплексними функціями $I_m e^{j\omega_c t}$, $U_m e^{j\omega_c t}$. Комплексні амплітуди струму і напруги дорівнюють відповідно: $I_m = I_m(t) e^{j(\omega_c t + \varphi)}$; $U_m = U_m(t) e^{j\varphi}$, де $I_m(t)$, $U_m(t)$ - шукані функції амплітуди від часу. Рівняння рівноваги схеми рис. 5 зводиться до нелінійних диференціальних рівнянь з малою нелінійною частиною і комплексними коефіцієнтами. Для їх аналізу застосовують метод малого параметра.

$$\frac{d^2 \tilde{i}_{a3}}{dt^2} + j\omega_c K \frac{d\tilde{i}_{a3}}{dt} - \omega_c^2 \tilde{i}_{a3} - \omega_c^2 \tilde{i}_{a2} = -\mu \left[\omega_c \left(1 + \frac{3A\tilde{i}_{a3}^2 - B}{r} \right) \frac{d\tilde{i}_{a3}}{dt} + j\omega_c^2 \left(1 + \frac{A\tilde{i}_{a3}^2 - B}{r} \right) \tilde{i}_{a3} \right];$$

$$\frac{d^2 \tilde{i}_{a2}}{dt^2} + (j2\omega_c + Q) \frac{d\tilde{i}_{a2}}{dt} + (j\omega_c Q - \omega_c^2) \tilde{i}_{a2} + \frac{d^2 \tilde{i}_{a2}}{dt^2} + (j2\omega_c + Q) \frac{d\tilde{i}_{a2}}{dt} + (j\omega_c Q - \omega_c^2) \tilde{i}_{a2} + \omega_c^2 \tilde{i}_{a2} = 0,$$

$$\text{де } r = r_1 + r_{11}, \quad \frac{r}{L} = Q_1, \quad \frac{2L + L_{11}}{L + L_{11}} = K, \quad \frac{1}{C(L + L_{11})} = \omega_c^2,$$

$$\mu = \frac{r}{\omega_c(L + L_{11})} - \text{малий параметр, характеризує затухання контуру.}$$

Розв'язання такої системи має вигляд:

$$\tilde{i}_{a3} = I_3 e^{j\omega_c t}$$

$$\tilde{i}_{a2} = I_2 e^{j\omega_c t}$$

Амплітуда автоколивань, що не дорівнює нулю, для Т-подібної схеми існує при від'ємному еквівалентному опорі контура у робочій точці $\partial U_{11} / \partial I_{11} + r_{11} + r_1 < 0$, а для Т-подібної схеми автоколивання виникають у діапазоні $\partial U_{11} / \partial I_{11} < 0$, $|\partial U_{11} / \partial I_{11}| < r$. Зміна магнітної та електростатичної енергії системи дорівнює потужності втрат у системі. Протягом частини періоду з результуючим від'ємним опором контура відбувається поповнення коливальної енергії, а з додатним опором її розсіювання. Автоколивання в навантаженні за випрямним мостом проходять по змінній складовій постійного струму. В елементах

коливального контуру (ємкості, індуктивності), що запасують енергію у трьох фазах амплітуди змінних струмів і напруг з частотою мережі $f_0=50$ Гц модулюються на частоті ω_0 за законом:

$$i = (I_m + I_0 \sin \omega_0 t) \sin(\omega_0 t + \varphi + \psi);$$

$$u = (U_m + U_0 \sin \omega_0 t) \sin(\omega_0 t + \varphi);$$

Розмітуванню системи сприяє також синхронна зміна витрати газу при варіаціях струму дуги, що призводить до коливань гідравлічного опору дугового каналу. У динаміці це збільшує абсолютне значення від'ємного диференціального опору. Тому в системі, поряд з від'ємним диференціальним опором по статичній ВАХ дузі виникає додатний зворотний зв'язок по електро- і газодинамічному каналах.

У розділі 5 наведено результати досліджень плазмового струменя і його впливу на дисперсну фазу. Параметри плазмового струменя продуктів згоряння залежать від конструктивного виконання плазмотрона, вкладуваної електричної потужності, складу та витрати вихідної суміші плазмотвірного газу.

Порівняння температур, визначених розрахунком з експериментально визначених значень ентальпій, показує, що повітряно-плазмовий струмінь більше розігрітий у межах початкової ділянки, ніж паливно-повітряний; темп зниження температури повітряної плазми за межами початкової ділянки вищий, а абсолютні значення температур нижчі, ніж паливно-повітряної. Паливно-повітряний плазмовий факел має значно рівномірніший температурний профіль по перерізу (рис. 6), що пояснюється більшим кутом його розкриття порівняно з повітряним струменем і виділенням тепла від догорання палива, а також теплоти дисоціації.

Показовою є залежність осьової температури від вмісту природного газу у суміші, виміряна на зрізі сопла плазмотрона і відстані $5 \cdot 10^{-2}$ м (рис. 7). На зрізі сопла додавання природного газу спричиняє падіння температури, а на відстані $5 \cdot 10^{-2}$ м температура, навпаки, підвищується. Відбувається перерозподіл температури вздовж струменя. Збільшення довжини зони нагрівання приблизно пропорціональне величині $(1 + P_{\text{газ}})^2$, де $P_{\text{газ}}$ - частка природного газу у вихідній газоповітряній суміші. На рис. 8 наведено розподіл параметрів у струмені плазмотрона ПУН-1 установки "Київ-7" (а - температур, б - швидкостей).

Для складних плазмових струменів (повітря і продукти згоряння) профілі швидкісного напору і потоку надлишкової ентальпії зберігають свою універсальність на основній ділянці (середньоквадратичні відхилення не перевищують 5%) і можуть бути описані універсальним профілем Шліхтинга. Профілі швидкості також є універсальними, а для

температури не універсальні, що зумовлено законом зміни складу за рахунок хімічних реакцій.

Досить важливо для технології, що плазма продуктів згоряння за інших однакових умов має вищі переносні властивості. Так, на відстані 50 мм від зрізу сопла теплопровідність плазми продуктів згоряння поблизу осі становить $\lambda=0,6$ Вт/м·град, а теплопровідність повітряної тільки 0,35 Вт/м·град. Використання надзвукових струменів плазми продуктів згоряння вуглеводневого газу з повітрям відкриває нові можливості створення ефективної технології наплення захисних покриттів. Розрахунок надзвукового потоку виконано методом послідовних наближень.

Із збільшенням потужності витрата плазмотвірного газу падає і практично не залежить від складу плазмотвірної суміші. Рівень і темп зростання середньомасових температур і швидкості у критичному перерізі залежить від надлишкового тиску, вмісту газу у суміші з повітрям, вкладаваної потужності (рис. 9). Надзвуковий плазмовий струмінь продуктів згоряння одержано в плазмотроні для наплення потужністю до 180 кВт з одиначною металевію міжелектродною вставкою (МВВ) і звуковим соплом (рис. 1, г).

Специфікою взаємодії плазмового струменя продуктів згоряння з напилуванію порошком є підвищення ефективності на 30-50 % нагріву матеріалу і поліпшення рівномірності прогрівання частинок незалежно від траєкторії їх польоту. Основну роль у підвищенні ефективності нагрівання дисперсних частинок у надзвуковому плазмовому струмені відіграє протяжність зони нагрівання. Звідси впливає доцільність використання слабконедорозширеного надзвукового високоентальпійного плазмового струменя. Збільшення протяжності початкової ділянки струменя, на якій ще проявляється хвильова структура, досягається за рахунок зниження розсіювання енергії в турбулентному пограншарі і виходу випромінювання. У реальних умовах транспортована плазмою дисперсна фаза за фракційним складом може істотно відрізнитися від вихідного порошку. Зміни виникають в результаті взаємовпливу між частинками, подрібнення і міжфазного масообміну. Ці явища можуть значно впливати на кінцевий результат процесу.

Розроблено модель подрібнення та коагуляції полідисперсного порошку, яка ґрунтується на континуальному підході.

Характер і наслідок подрібнення визначається параметрами We , L_p , M , Bo , Re , кількісною характеристикою швидкості навантаження

$$G = (d/d\tau)We.$$

де $\bar{\tau} = \tau/\tau_k$, τ - час, $\tau_k = 0,83(\rho \cdot d^3/\sigma)^{1/2}$ - період власних коливань краплі.

Розроблена загальна математична модель руху, нагрівання, подрібнення і коагуляції крапель в одномірному потоці. Під час описування залежності стану дисперсного потоку від розмірів крапель використано метод Лагранжа. Безперервні процеси коагуляції і подрібнення частинок у потоці під час дискретного розбиття на фракції описуються функціями:

$$\frac{dr_i}{dx}; \frac{dg_i}{dx}; \frac{dV_i}{dx}; \frac{dE_i}{dx}; \frac{dT_i}{dx}$$

Із врахуванням переходу маси, імпульсу та енергії під час подрібнення i -ої фракції у більш дрібні $j < i$ нові значення масової розхідної концентрації g_j^H , швидкості V_j^H , температури T_j^H , енергії E_j^H визначаються на основі розподілу $m_j = 1_j / \sum_{j=1}^n 1_j$ (1_j - маса уламків фракції

f) із співвідношення

$$g_j^H = g_j + g_i m_j;$$

$$V_j^H = (V_j g_j + V_i g_i m_j) / g_j^H;$$

$$E_j^H = (E_j g_j + E_i g_i m_j) / g_j^H;$$

$$T_j^H = \left(E_j^H - \frac{1}{2} (V_j^H)^2 \right) C_j^H; C_j^H = C_j / T_j^H.$$

Залежність стану дисперсного потоку, який рухається з великим ковзанням у плазмі, від розміру розплавлених крапель наведено на рис. 10. Така залежність у загальному вигляді характерна практично для всіх матеріалів за умови, що швидкості частинок усіх фракцій на момент плавлення рівні. Рівень швидкості частинок напиленого матеріалу в момент контакту з основою є одним з головних факторів, що впливають на фізико-механічні характеристики покриття. Якщо висока швидкість, як правило, бажана, то необхідний ступінь розігрівання частинки залежить від поставлених завдань. Вибір оптимальних режимів напилення, з рештою, зводиться до відшукування максимально можливих швидкостей за умови найповнішого і найрівномірнішого розплавлення всіх частинок порошкового матеріалу без перегріву.

Швидкості частинок різних матеріалів на відстані 250 мм від зрізу сопла надзвукового плазмотрона залежно від вкладаваної потужності витрати плазмотвірного газу наведено на рис. 11.

Напилення з використанням надзвукового струменя плазми характеризується малим кутом розкриття двофазного потоку (5-7°) через зниження пульсаційного розсіювання дисперсних частинок і практично відсутністю розкиду швидкостей.

У розділі 6 розглянуто особливості порошкового напилення у плазмі продуктів згорання і властивості покриттів. Співвідношення газ-повітря у вихідній плазмотвірній суміші - важливий фактор, що впливає

на параметри процесу напилення і властивості покриттів. Додавання горючого вуглеводневого газу до повітря у всіх випадках незалежно від потужності (досліджено діапазон 20-160 кВт) в умовах дозвукового і надзвукового плазмового напилення різних порошкових матеріалів (металів, оксидної кераміки, карбідів) веде до збільшення коефіцієнта використання матеріалів (КВМ).

Вплив складу плазмотвірного газу на процес напилення кераміки показовий на прикладі Al_2O_3 . В разі напилення з $\alpha=\infty$ залежність КВМ від витрати має екстремальний характер. При цьому з підвищенням струму дуги плазмотрона КВМ зростає, а його максимум зміщується в бік великих витрат (рис. 12, а). Якщо взяти за основу оптимальну витрату повітря при фіксованому струмі дуги, коли досягнуто максимального КВМ, і додавати горючий газ (метан чи пропан-бутан), то КВМ зростатиме. Він досягне максимуму при $\alpha=0,9$, а потім при подальшому збільшенні частки горючого газу в суміші почне монотонно знижуватися (рис. 12, б). Максимальний КВМ за умови $\alpha=0,9$ буде при більшій витраті плазмотвірного газу, ніж за умови $\alpha=\infty$. Додавання горючого газу веде до збільшення КВМ на 15-20 % і дає можливість застосувати крупніший порошок. Висока тепловіддача до частинок порошку і крапці розгінні властивості плазми продуктів згоряння порівняно з повітряною чи азотною вимагають коригувати час перебування частинок порошку у високотемпературній зоні, причому оптимальне нагрівання забезпечується при вищих швидкостях. Для цього необхідно збільшувати витрату газу або зменшувати діаметр сопла. Підвищена швидкість частинок і рівномірне їх прогрівання по всьому перерізу забезпечують підвищення щільності покриття і його зчеплення з основою. Пористість покриттів, нанесених у плазмі продуктів згоряння, може регулюватися у широких межах, проте радикальне зниження пористості газотермічних покриттів досягається з використанням високошвидкісних методів напилення. Як показали дослідження, залежність КВМ і пористості від гранулометричного стану порошку, потужності плазмотрона і витрати плазмотвірного газу корелюють між собою дії, які ведуть до підвищення КВМ, сприяють зниженню пористості і навпаки.

Покриття з нержавіючої сталі X18H10, напилене з використанням надзвукового плазмового струменя продуктів згоряння, характеризується високою щільністю (пористість $\sim 0,5$ %), особливо в місцях з'єднання з основою. Мінімальна пористість покриттів з порошку ВК-25 (виробництво ВНДІТС м.Москва) в умовах надзвукового плазмового напилення становить $\sim 3,5$ % при продуктивності 27 кг/год. Із зниженням продуктивності до 4,5 кг/год вона збільшується в 2-2,5 рази. Міцність зчеплення покриття ВК-25 з

основою із Ст.3 досягає 150 МПа. Використовуючи порошок WC-12Co фірми Stark Company, надзвуковим плазмовим напиленням одержано покриття з нульовою пористістю, у якого рентгенограми покриття і порошку повністю збігаються.

Властивості покриттів залежать від методу напилення. Властивості хромових покриттів, напилених різними методами, наведено в табл.1.

Таблиця 1

Метод напилення	Газополум'яне, $O_2 + C_3H_8$	Плазмове, $Ar + H_2$	Детонаційне, $O_2 + C_2H_2$	Плазмове надзвукове, повітря + CH_4
Мікротвердість, МПа	3000 - 4000	5000 - 5500	5400 - 6000	7000 - 8000
Пористість, %	6-12	4-6	2	1

Використання суміші повітря з метаном або пропан-бутаном у процесах плазмового нанесення покриттів дає можливість одержувати контрольовані атмосфери в зоні розігріву і руху частинок порошку. Так, робота з $\alpha=0,8...0,9$ забезпечує зниження окисленості залізних порошків на 20-30 %. При напиленні порошку Si вміст кисню у покритті за рахунок додавання 10 % метану знижується з 2,5 до 1,5 %. Самофлюсуючі порошки нечутливі до α . Вигорання вуглецю у Cr_3C_2 від додавання горючого газу знижується. Під час проходження через плазму Cr_3C_2 частково переходить в Cr_7C_3 . Аналіз шліфів напилених покриттів свідчить про те, що їх структурою і властивостями можна ефективно керувати, змінюючи склад плазмотвірного газу. У цілому плазма продуктів згоряння не є надійним захистом напиленого матеріалу від окислення. Додавання до повітря вуглеводнів лише досить ефективно сприяє послабленню негативного впливу атмосферного кисню на властивості покриттів. Окислення напиленого матеріалу дуже залежить від часу контакту дисперсних частинок з активною навколишньою атмосферою. Тому процентний вміст кисню в покритті помітно збільшується із збільшенням дистанції напилення і зменшується з підвищенням швидкості польоту частинок порошку. Порівняння властивостей покриттів, одержаних на різних установках, однозначно свідчить про помітну перевагу використання надзвукових плазмових потоків.

Випробування на опір проти абразивного спрацювання і тертя ковзання покриттів із сплавів CrO_5 , CrO_8 , ПГ-Ж1, які аморфізуються, довели, що метод надзвукового плазмового напилення забезпечує найвищі показники порівняно з детонаційним, плазмовими дозвуковими методами. Результати електрохімічних випробувань на корозійну стійкість також показали перевагу плазмового надзвукового

напилення. Досягнуті поліпшення службових властивостей покриттів із сплавів CrO_5 , CrO_8 , ПГ-ЖІ пояснюються підвищенням щільності, міцності покриттів та збільшенням ступеня їх аморфізації. Корозійна стійкість покриттів чітко корелює з їх структурою, зокрема з об'ємним вмістом аморфної фази. Покриття із сплаву CrO_8 , нанесене надзвуковим методом, характеризується в 3 та 11 раз меншою щільністю струму корозії порівняно з покриттями, нанесеними на установці "Київ-7" і в аргон-водневій плазмі.

У розділі 7 висвітлено питання електродугової металізації у високошвидкісному потоці продуктів згоряння. Параметри витікання розпилювального газу і електро-газодинамічна ситуація у зоні плавлення дротин під час електродугової металізації визначають процеси диспергування й розгону частинок розплавленого металу і, отже, якість покриття. Досліджено взаємодію газового потоку з дугою та електродами в умовах, коли напрям потоку збігається з віссю одного з електродів. Дуга і обдуваючий потік взаємозв'язані. Прогрітій дугою газ прямує вниз по потоку, стабілізуючи просторове положення дуги. Вісесеметричний дуговий розряд у співвісному потоці описується виразами типу рівняння пограничного шару. Нагрівання газу в дузі веде до відтоку маси з нагрітого шару, а динамічний шар іонізованого газу завжди менший від теплового, тобто поля розподілу швидкостей у перерізі дуги розміщуються всередині теплових полів. Значно впливають на дугу, що має осьову симетрію, власне магнітне поле. Воно, по-перше, створює силу, яка спрямована до осі і стискує стовп дуги, тим самим збільшуючи тиск всередині дуги. По-друге, взаємодія радіальної складової струму дуги з власним магнітним полем спричиняє появу приелектродних струменів газу, що забезпечує приріст їх швидкості і додаткове залучення газу в розряд.

Результати розрахунків параметрів потоку на осі стовпа дуги свідчать про те, що використання високошвидкісного потоку продуктів згоряння метану як розпилюючого газу замість повітря технологічно більш бажане. Зменшення поперечних розмірів дуги зумовлює зменшення збурення обдувного потоку. У разі приблизно рівного електромагнітного прискорюючого впливу дуги на газ середня швидкість потоку, а також динамічний напір у межах шару іонізованого газу, зростають за умови використання продуктів згоряння більш як у 2 рази. Завдяки підвищенню в'язкості обдувного газу і зниженню її в дузі (за рахунок зменшення температури дуги, що горить у потоці продуктів згоряння метану), поліпшується передача імпульсу від обдувного потоку в плазму дуги і послаблюється її гальмування. Необхідні параметри потоку горючого газу можна забезпечити, застосовуючи циліндричне сопло. При надкритичному перепаді тисків критичний переріз зміщується у глиб сопла, на його зрізі зведена швидкість досягає

$M=1,2...1,3 \cdot 3$ порівняння критерію Re для обдування потоку з Re у зоні плавлення дротин впливає, що в дузі виникає ламінаризація течії за рахунок підвищення кінематичної в'язкості розпилювального газу.

Найважливішим фактором процесу електродугової металізації є диспергування розплавленого дугою металу дротин. Поряд з впливом сил електродинамічного і термічного походження, на винесення розплавленого металу з електродів і подрібнення крапель, в основному, впливає швидкісний напір потоку. Середній розмір частинок, що утворюються, визначається числом Вебера We^* . Приймавши $We^*=22$, середній розмір сталених частинок при швидкості розпилювального потоку $M=1...1,4$ виявляється рівним: $d_s=0,42...0,33$ мм для $\alpha=\infty$; $d_s=0,18...0,12$ мм для $\alpha=1$.

Прискорення частинок у разі використання як розпилювального газу продуктів згоряння метану ($\alpha=1$) істотно інтенсифікується як за рахунок зменшення їх діаметра, так і за рахунок збільшення динамічного напору, тобто прискорення зростає порівняно з повітрям більш як у 4 рази.

Новий підхід до розробки електродугових металізаторів ґрунтується на використанні стабілізованої електричної дуги, яка поздовжньо обдувається надзвуковим потоком продуктів згоряння. Металізатор (рис. 13) містить камеру згоряння із звуковим соплом, уздовж осі якого від автономного механізму подається центральна дретина. Бокова дретина подається із зовнішньої сторони під кутом $40-50^\circ$ до осьової. Точка їх зустрічі розміщується на відстані $0,5-1$ калібру від зрізу сопла. Нерівнозначні умови плавлення дротин зумовлюють різницю швидкостей їх подачі. Швидкість плавлення бокової дротини незалежно від полярності прикладеної напруги і струму дуги завжди вища від центральної. Задавальною є центральна дретина. Вона визначає рівень струму дуги.

Дослідження, виконані з використанням нержавіючого (12X18N10T), вуглецевого, алюмінієвого, мідного, порошкового (ПП-ММ-2, ПП-АН 301) дротів свідчить про те, що показники якості покриттів, одержаних з використанням надзвукового металізатора на продуктах згоряння, в $1,5-2$ рази вищі порівняно з тисючими металізаторами. У табл. 2 наведено властивості покриттів з дроту ПП-АН 301, струм дуги ≈ 180 А, продуктивність - $9,5$ кг/год. Морфологічні дослідження та їх комп'ютерна обробка свідчать про поліпшення структури покриттів. Помітно знижується розмір пор (до $2-4$ мкм) і вміст оксидів, підвищується в $2-7$ раз ступінь розпилювання частинок.

Таблиця 2

Вміст CN_2 у суміші, %	Дистанція напилення, мм	Швидкість частинок, м/с	Міцність зчеплення, МПа	Порис- тість, %
8	300	110	54	3,2
12	300	90	50	2,2
12	150	120	55	3,6

Дослідження газодинамічної структури надзвукового потоку продуктів згорання, що формуються у приладі (рис. 13), металопотоку за зоною плавлення дротин свідчать про те, що стрибок ущільнення, завдяки поздовжній дузі перед боковою дротиною не утворюється, в області газодинамічної тіні (10-12 діаметрів дротини) має місце струменева течія розплаву з наступним диспергуванням нижче по потоку. З цього випливає доцільність використання слабконедорозширеного дальнобійного надзвукового струменя і зниження діаметра бокової дротини. Нижня межа її діаметра визначається пружністю матеріалу.

У розділі 8 наведено результати досліджень по плазовому гартуванню і різанню. Глибина нагрівання до температури аустенітного перетворення для даної сталі визначається швидкістю відносного переміщення деталі та плазмотрона і характером залежності інтенсивності теплового впливу від часу. Режимні параметри процесу гартування визначені з розв'язання рівняння нестационарної теплопровідності з відповідними крайовими умовами. У випадку поверхневого гартування (товщина прогріваного шару значно менша за характерний розмір оброблюваної деталі) застосовано аналітичне рішення для напівобмеженого тіла з граничними умовами III роду на поверхні. Співвідношення температур на поверхні і на глибині X не може бути довільним, а визначається умовами нагрівання (рис. 14). З переходом до швидкісних методів нагрівання співвідношення температури на поверхні і в глибині збільшується, і можливий інтервал співвідношення температур розширюється. У разі заданих температур, властивостей матеріалу та умов нагрівання існує однозначний зв'язок між часом взаємодії і глибиною прогрівання до заданої температури.

Залежність глибини прогрівання до $T=850^\circ\text{C}$ від коефіцієнта теплопередачі α може бути апроксимована залежністю

$$\sigma_{11} = 1,73 \cdot 10^3 \frac{(T_{\text{ср}} - T_{\text{ср}})^{-1,44}}{\alpha}, \text{ мм}$$

де $T_{\text{ср}}$ - середня температура гріючого середовища, а $T_{\text{ср}}$ - середня температура вибору (К), що нагрівається у шарі завтовшки σ_{11} .

Для забезпечення нагрівання до температури поверхні, що дорівнює температурі плавлення, відносна швидкість переміщення апроксимується залежністю

$$V_0 = 4,28 \cdot 10^{-6} / l_{11} (T_{\text{св}} - T_{\text{ср}})^{0,48} \alpha^2, \text{ м/с}$$

де l_{11} - довжина зони нагрівання.

Точність формул $\pm 10\%$, можна застосовувати для попередньої оцінки.

На рис. 15 наведено залежності глибини прогріваного до 850°C шару та швидкості переміщення виробу відносно нагрівника залежно від інтенсивності теплопередачі. Температура поверхні в усіх випадках дорівнювала температурі плавлення. Для забезпечення нагрівання до температури поверхні, що дорівнює температурі плавлення, відносна швидкість переміщення має бути не менша, ніж наведено на рис. 15. Її значення залежить від усередненої температури плазмового струменя, довжини зони нагрівання і коефіцієнта тепловіддачі, пропорціональне довжині зони нагрівання, збільшується з підвищенням температури і зростанням коефіцієнта теплопередачі. Інтенсивність нагрівання поверхні плазмовим струменем визначається температурним напором і коефіцієнтом тепловіддачі. Ці параметри регулюються струменем дуги плазмотрона, витратою і складом плазмотвірного газу, відстанню від зрізу сопла плазмотрона до нагріваної поверхні. Додавання горючого газу до повітря і використання пульсуючої плазми відчутно інтенсифікують нагрівання, дають можливість підвищити швидкість гартування в 1,5-2 рази. Багаторазового (5-10 раз) підвищення щільності теплового потоку можна досягти під час гартування з малих дистанцій у межах початкової ділянки плазмового струменя за рахунок утворення несамостійного дифузного розряду між соплом-анодом плазмотрона і деталлю. Формування такого розряду в плазмі продуктів згоряння полегшується порівняно з повітрям і інертними газами. Нагрівання поверхні під гартування плазмою продуктів згоряння забезпечує досить глибоке прожарювання за умови високої швидкості. На рис. 16 наведено залежності мікротвердості від глибини гартування для швидкостей 9; 6,7; 4,7 та 3,3 см/с, потужність плазмотрона - 70 кВт, діаметр сопла анода - 14 мм, витрата плазмотвірного газу - 5 м³/год, коефіцієнт надлишку повітря (окислювача) $\alpha=0,9$; охолодна рідина - вода при 20°C . Завдяки високошвидкісному нагріванню під гартування, розмір зерна знижується на 1-2 бали (ГОСТ 5639-82). Залежно від вмісту вуглецю у сталі Л53 змінюється максимальна твердість загартованого шару. При вмісті вуглецю 0,4% досягнуто загартування на 60-65 HRC, при 0,6% вуглецю - 67-70 HRC. Структура - дрібногочастий мартенсит.

Використання плазмотрона з дугою прямої дії у поточному виробництві, як правило, зумовлює необхідність його роботи у циклічному режимі (пауза - робота) з періодичністю від одиниць до десятків секунд. Якщо ж до того необхідно забезпечити високу продуктивність, то плазмотрон має працювати на граничному

струмовому навантаженні. Розроблено дводуговий плазмотрон з порожнистими мідними електродами, що забезпечує безперервне горіння слабкоструменевої чергової дуги непрямої дії, автоматичне вмикання силової дуги прямої дії з підходом оброблюваного виробу під сопло плазмотрона, її вимикання і т.д. У такому плазмотроні чергова дуга непрямої дії має падаючі ВАХ. Ресурс сопла визначається рівнем струму і характером прив'язки чергової дуги. Вона може бути контрагованою, коли дуга біля поверхні сопла стягується у пляму, або розсіяною. Роботоздатність дводугового плазмотрона забезпечується за рахунок надійності вмикання силової дуги, яка виключає подвійне дугоутворення, її вимикання без обриву чергової дуги. Зниження питомої ерозії порожнистого електрода на робочому режимі досягається за рахунок часткового відведення газу через отвір у торці електрода, що веде приблизно до двократного збільшення пристінкової швидкості газу. Під час роботи на повітрі ерозія порожнистого електрода значною мірою визначається окисленням міді. Його можна позбутися, додаючи до повітря метан або пропан-бутан.

У розділі 9 описано принципи побудови електродугової апаратури і розробки технологій з використанням газоповітряних сумішей. Розвинутий автором підхід ідеологічно базується на використанні як плазмотвірного газу суміші повітря з горючим вуглеводневим газом (метаном, пропан-бутаном) і стабілізованої протяжної електричної дуги з фіксованою середньою довжиною, апаратурно - плазмотрона з одиночною міжелектродною вставкою (МЄВ). Ділянками активної локальної дії на протяжну електричну дугу в плазмотроні для наплення є прикатодна і прианодна її частини. Стовп дуги тут відіграє пасивну роль, забезпечуючи лише нагрівання газу. Довжина дугового каналу може змінюватись від 1 до 12 калібрів залежно від необхідної потужності. При номінальному струмі дуги 300 А електрична потужність становитиме відповідно 35 і 135 кВт. На малих довжинах МЄВ 1-2 калібру, коли втрачає теплоту у стінку каналу визначаються лише випромінюванням дуги (від додавання вуглеводневого газу до повітря вони знижуються), доцільно організувати рекуперативне охолодження МЄВ плазмотвірним газом. ККД плазмотрона при цьому досягає 90 %. Додавання горючого вуглеводневого газу до повітря на обдування катода зумовлює підвищення напруги на дузі на 25-30 % і зниження стійкості катода без вжиття спеціальних заходів приблизно на таку саму величину. Проблема підвищення стійкості катода і стабілізації параметрів прикатодної частини розряду у газоповітряній суміші розв'язується на стадії запуску плазмотрона створенням оптимальної структури газового вихору, інтенсифікацією охолодження катода. Запуск плазмотрона з термохімічним катодом на газоповітряній суміші має відбуватися так,

щоб виключити краплине виведення матеріалу активної вставки катода, вигорання мідної обойми, виникнення подвійної дуги. Перехідні процеси виходу плазмотрона на робочий режим мають забезпечити послідовне тривале стабільне горіння розряду. У разі виконання цих умов протягом тривалої роботи плазмотрона дуга не заглиблюється в кратер катода через випаровування матеріалу активної вставки, а тому відсутній дрейф дуги. Це один з основних факторів збереження відтворюваних у часі параметрів плазмового струменя. У прианодній частині дуги суміщуються процеси керування формуванням плазмового струменя з необхідними параметрами і забезпечення стабільності її генерування протягом тривалого (не менш як робоча зміна) періоду.

Найефективнішим з усіх відомих прийомів руйнування стабілізованої дуги і швидкого заповнення профілю температур, швидкостей у каналі, є вдування газу в зазор МEB-анод з протикрученням відносно основного плазмотвірного у кількості 30-50 % від сумарної витрати. Додавання CH_4 у прианодній частині поліпшує всі показники. Локалізація зони прив'язки розряду завершується на відстані 2 калібрів, а остаточно заповнення профілю -

3 калібрів. Істотне (на порядок) зниження ерозії анода внаслідок відсутності окислення міді і формування дифузної прив'язки дуги на аноді у плазмі продуктів згоряння забезпечує збереження геометрії сопла у процесі роботи. Це відіграє вирішальну роль для практичного використання надзвукового плазмотрона.

Виявлений ефект формування висхідної ділянки на вольт-амперній характеристиці з великим позитивним диференціальним опором $R_p = \partial U / \partial I \sim 2$ у плазмотроні із складною геометрією дугового каналу в прианодній частині розряду дає можливість по-новому розробити плазмову апаратуру. Заміна складних перетворювачів на просте й надійне джерело електроживлення з жорсткою зовнішньою характеристикою забезпечує 100 %-не використання встановленої потужності, максимально можливі енергетичні показники $\cos \phi = 1$, ККД 98 %, можливість побудови багатопостових систем, коли від одного джерела живляться два і більше плазмотронів.

Розрахунково-теоретичні та експериментальні дослідження встановили можливість тривалого (понад 30 год) стабільного генерування протяжного слабконедорозширеного надзвукового плазмового струменя продуктів згоряння, що забезпечує високопродуктивне напильнення якісних покриттів з усіх груп матеріалів, з використанням звукового сопла. Бокове вдування напилюваного порошку у надзвуковий плазмовий струмінь можливе в області газодинамічної критики (на відстані близько 0,6 калібру від зрізу сопла) або в першу "бочку".

Реалізовано новий підхід до побудови апаратури для електродугового розпилювання дротин. Він ґрунтується на використанні розміщеної вздовж осі потоку електричної дуги, що горить між двома подаючими дротинами - центральною та бічною і поздовжньо продувається. Як розпилювальний газ використовують надзвуковий ($M=1,1...1,3$) потік гарячих продуктів згоряння. Ці нові заходи забезпечують високу стабільність горіння дуги, відповідно до плавлення дротин, підвищення швидкості частинок приблизно до 150 м/с, зниження їх розмірів до 100-180 мкм, що забезпечує поліпшення якості покриттів. Технологічні особливості напilenня покриттів у плазмі продуктів згоряння пов'язані з її теплофізичними властивостями. Добре заповнений профіль температур і швидкостей у плазмовому струмені продуктів згоряння, протяжна високотемпературна зона сприяє ефективному і рівномірному прогріванню її розгону всіх частинок порошку незалежно від траєкторії їх польоту. Зв'язування кисню продуктами неповного згоряння забезпечує певний захист напиленого матеріалу від окислення у польоті. Високий запас тепла у плазмовому струмені передбачає найефективніше використання плазми продуктів згоряння у процесах, де ефективне нагрівання виробу є доцільним: напilenня з оплавленням, плазмове гартування. Оптимальна дистанція напilenня лежить у межах 200-300 мм. У випадках, коли слід уникати перегрівання виробів і покриття, використовують додаткове охолодження: повітряне, вуглекислотне, водяне спреєрне, крапельно-повітряне.

У процесах дозвукового плазмового напilenня переважає подрібнення частинок порошку розміром понад 50 мкм. З використанням надзвукових потоків у ряді випадків переважає коагуляція, коли на основі у покритті зустрічаються частинки, які розміром значно перевищують частинки вихідного порошку. Процес надзвукового плазмового напilenня чутливий до фракційного складу напиленого порошку. Щоб мати високоякісні покриття, слід використовувати вузьку фракцію з розміром частинок 20-40 мкм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Як плазмотвірне середовище для технологічних потреб широко застосована високоентальпійна недефіцитна хімічно активна газоповітряна плазма. Розроблено теоретичні основи створення високоефективних апаратури і технологічних процесів з її використанням, впровадження яких у народне господарство дало великий ефект.

2. Показано, що добавляння вуглеводнів до плазмотвірного повітря істотно змінює властивості стабілізованої електричної дуги, характеристики плазмотронів і генерованого плазмового струменя, а також умов теплової і газодинамічної взаємодії струменя з оброблюваним матеріалом. При цьому:

- підвищується напруга електричного поля, інтенсифікується на 20-30 % відбір тепла від дуги;

- на початковій ділянці дуги, яка горить у каналі (1-2 калібру), що продувається, втрачає тепло в стінку, які визначаються радіаційним теплообміном, знижуються від додавання CH_4 до повітря на 10-15 %; на довжині каналу понад 10-12 калібрів нагрівання газу не виникає у зв'язку із зростанням конвективної складової втрат;

- ділянка з розвиненою турбулентною течією характеризується наявністю максимуму втрат тепла в стінку каналу в діапазоні $\alpha=0,6...1,4$ і середньомасовій температурі $T=3000...4000$ К;

- добавка CH_4 до повітря веде до заповнення поперечних профілів ентальпії і температур у плазмовому струмені. На основній ділянці струменя профілі швидкісного напору і надлишкової ентальпії універсальні, а температури - неуніверсальні. Зона нагрівання дисперсного матеріалу у плазмі продуктів згоряння при $\alpha=0,9$ збільшується на 40-50 %;

- у плазмовому струмені реалізуються умови коагуляції і аеродинамічного подрібнення дисперсних частинок. Встановлено аналітичні залежності, необхідні для розрахунку еволюції полідисперсного матеріалу у плазмовому струмені.

3. Показано, що при наявності коливально-поступової нерівноваги в плазмодинаміці необхідно враховувати ефекти, пов'язані з другою в'язкістю. На локальній ділянці потоку плазми можливі умови, коли ефект другої в'язкості повертається і зумовлює нарощування звукової хвилі, яка впливає на електричну дугу; підвищується напруга електричного поля, формується висхідна вольт-амперна характеристика, контрагований розряд переходить у дифузний.

4. Для плазмового напilenня найбажаніший слабконедорозширений ($P/P_{*}=1-2$) надзвуковий струмінь, що витікає із звукового сопла, в якому критичні параметри досягаються на відстані 0,4-0,5 калібру вище за течією від зрізу сопла.

5. Вивчено приелектродні процеси. Знайдено ефект різкого контрагування катодної опорної плями дуги на термохімічному катоді, що горить у газоповітряній суміші. Знайдено умови тривалого існування розряду у плазмі продуктів згоряння в умовах різкого контрагування дуги на катоді. Ерозійні характеристики мідного аноду при $\alpha < 0,9$ поліпшуються приблизно в 10^2 раз.

6. Запропоновано методику розрахунку динамічної стійкості системи, що містить джерело електроживлення на базі багатофазного індуктивно-емісійного перегворювача - плазмотрон постійного струму на основі однофазних еквівалентів. Показано, що у зв'язку з втратою стійкості виникають автоколивання, які модулюють по амплітуді струму в колах і падіння напруги на елементах схеми ІЕП. Має місце обмін енергією між індуктивностями та місткостями трифазного ІЕП, до коливального контуру якого входить дуга плазмотрона, що перетворює енергію постійного струму в коливальну при від'ємному диференціальному опорі дуги по статичній ВАХ.

7. Розвинуто новий підхід до створення установок: а) плазмового напильника підвищеної потужності. Його оснований на використанні плазмотронів з подовженою до 10 калібрів одиночною металеву міжелектродною вставкою; б) електродугової металізації. Базується на використанні стабілізованої електричної дуги, що горить уздовж осі надзвукового потоку продуктів згорання між центральною та боковою дроселями; в) спрощених плазмових. Базуються на формуванні в плазмотроні із складною геометрією дугового каналу висхідної вольт-амперної характеристики з великим позитивним диференціальним опором до 2 Ом. Умови динамічної і статичної стійкості забезпечуються під час роботи від джерела напруги. Можлива побудова багатопостових систем.

8. Вивчено технологічні особливості процесу напилення у плазмі продуктів згорання і властивості покриттів з різних матеріалів. Показано, що радикальним засобом поліпшення службових властивостей газотермічних покриттів є перехід до надзвукових швидкостей.

9. На основі досліджень особливостей теплообміну плазмового струменя продуктів згорання з перешкодою розроблено процес високошвидкісного поверхневого плазмового гартування. При швидкості 2 см/с забезпечується глибина загартування 3 мм, ширина дзеркала зміцненої зони 30 мм. Наявність між загартованою зоною і незміцненою основою м'якої зони відпуску сприяє підвищенню тріщиностійкості.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газоздушное напиление.
- Киев: Наукова думка, - 495 с.

2. Карп И.Н., Горбатов И.Н., Репкин Ю.Д., Петров С.В. Плазменное напыление порошковых материалов в продуктах сгорания углеводородов. Препринт 91 - № 4, АН УССР, ИПМ. - 24 с.

3. Карп И.Н., Гринченко Н.Н., Корнилов А.В., Кристофович Б.Г., Петров С.В. Исследование электрического разряда в пламенах и продуктах сгорания природного газа // Топливо-плазменные горелки. - Киев: Наукова думка, 1977. - С. 20-26.

4. Петров С.В., Кривцун И.В., Губаревич В.Н., Кабан В.П. Анализ автоколебательной системы на базе ИЕП-плазмотрон постоянного тока // Техническая электродинамика. - Киев: Наукова думка, 1980, № 5. - С. 43-49.

5. Карп И.Н., Гринченко Н.Н., Петров С.В. Плазменное напыление с применением плазмотронов повышенной мощности // Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов. - Свердловск: УПИ, 1980. - С. 55-71.

6. Карп И.Н., Гринченко Н.Н., Петров С.В. Особенности сжигания природного газа в электрической дуге // Теория и практика сжигания газа. - Ленинград: Недра, 1981. - С. 279-284.

7. Петров С.В. Некоторые особенности работы индуктивно-емкостного преобразователя с плазмотроном постоянного тока // Техническая электродинамика. - Киев: Наукова думка, 1981. - № 1. - С. 53-58.

8. Шехтер С.Я., Карп И.Н., Гринченко Н.Н., Петров С.В. Опытнo-промышленная плазменная установка для напыления покрытий // Сварочное производство. - 1982. - № 8. - 41 с.

9. Карп И.Н., Пашенко В.Н., Петров С.В., Гринченко Н.Н. Универсальная плазменная установка для напыления // Сварочное производство. - 1984. - № 6. - С. 38-39.

10. Karp I.N., Petrov S.V. High-efficiency combustion product plasma spraying // The 12-th International conference. - London: UK, 4-9 June. - 1989. - V 2. - P. 72-1, 72-9.

11. Карп И.Н., Максимович Н.Б., Петров С.В. Газоплазменное напыление в сверхзвуковом потоке // Химическая технология. - 1989. - № 4. - С. 42-47.

12. Петров С.В., Марцевой Е.П., Коваль С.Н. Высокоскоростная плазменная закалка // Плазмотехнология. - Киев: Наукова думка, 1989. - С. 68-76.

13. Карп И.Н., Петров С.В., Эсбиян Э.М., Сааков А.Г. Интенсификация процесса плазменного напыления // Теплотехнические вопросы применения низкотемпературной плазмы. - Магнитогорск: МГМИ, 1989. - С. 97-109.

14. Петров С.В., Марцевой Е.П. Состояние дисперсной фазы в плазме продуктов сгорания метана // Химическая технология. - 1990. - № 4. - С. 32-37.

15. Петров С.В., Кесова Е.Е. Термодинамический анализ процессов на электродах газозвуковых плазмотронов // Химическая технология. - 1990. - № 5. - С. 38-42.

16. Карп И.Н., Петров С.В. Новое оборудование для плазменного упрочнения // Энергетик. - 1990. - № 8. - С. 16-18.

17. Петров С.В., Сааков А.Г. Напыление порошковых покрытий на основе Ni и Al_2O_3 в плазме продуктов сгорания углеводородного газа // Порошковая металлургия. - 1990. - № 11. - С. 58-62.

18. Jushtshenko K., Karp I., Borissov V., Petrov S., Martsevoi E., Saakov A., Borissova A. Gas Thermal spraying with supersonic airgas plasma jet: equipment and coating properties // Joint Symposium: Electron beam and Thermal spraying processes for production of materials and coatings. - Kiev: June, 1990. - P. 29-39.

19. Kovalchenko M., Alfintseva R., Paustovsky A., Petrov S., Kurinnaya T. Effect of laser Treatment on protective properties of The dry plated coating // Thermal processing of materials. Int. Congress. Moscow, December, - 1990. - P. 39-49.

20. Карп И.Н., Петров С.В., Рудой А.П. Электродуговая металлизация в высокоскоростном потоке продуктов сгорания метана // Автоматическая сварка. - 1991. - № 1. - С. 62-65.

21. Карп И.Н., Петров С.В., Рудой А.П. Установка для электродуговой металлизации в сверхзвуковом потоке продуктов сгорания природного газа // Сварочное производство. - 1991. - № 2. - С. 22-23.

22. Петров С.В., Сааков А.Г. Поведение термохимического катода в смеси воздуха с углеводородным газом // Сварочное производство. - 1991. - № 2. - С. 31-32.

23. Петров С.В., Коваль С.Н. Работа двухдугового плазмотрона // Сварочное производство. - 1991. - № 3. - С. 37-39.

24. Петров С.В., Котляров О.Л., Миронова М.В. Описание дробления дисперсных частиц в плазменной струе // Химическая технология. - 1991. - № 3. С. 46-49.

25. Петров С.В., Марцевой Е.П. Генерация сверхзвуковой струи плазмы продуктов сгорания // Химическая технология. - 1991. - № 4. - С. 59-64.

26. Алфинцева Р.А., Петров С.В., Паустовский А.В., Куринная Т.В. Проблемы в области создания и обработки защитных газотермических покрытий // Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением. Мат. III международной

научно-техн. конф. (Киев, окт. 1990). - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1991. - С. 99-103.

27. Петров С.В., Барановский Н.А., Рудой А.П. Плазменное распыление проволоки // Проблемы спецэлектрометаллургии. - 1991. - № 1. - С. 73-78.

28. Петров С.В., Дымченко В.Г., Сааков А.Г. Особенности воздушно-газового плазменного напыления эмалей на поверхности строительных конструкций // Строительные материалы, изделия и санитарная техника. - Киев: Будивельник, 1991, вып. 14. - С. 35-39.

29. Петров С.В., Котляров О.Л., Миронова М.В. Поведение полидисперсного порошка в плазменной струе // Химическая технология. - 1992. - № 1. - С. 44-49.

30. Петров С.В. Технология и оборудование для нанесения покрытий в газозвуковой плазме // Сварочное производство. - 1992. - № 6. - С. 2-5.

31. Karp I., Petrov S., Borissov Y., Yushenko K., Borissova A., Chernenko Y. Effect of supersonic air-gas plasma spraying conditions on deposition efficiency and coating properties // Thermal Spraying Conference (3-5 March 1993. - Aachen). - P. 54-57.

32. Karp I., Petrov S., Rudoy A., Arjakin A. Electric Arc Spraying in Supersonic Stream // Proceeding of the 1993 National Thermal Spray Conference Anaheim, CA, 7-11 June 1993. - P. 195-198.

33. Алфинцева Р.А., Евтушенко О.В., Петров С.В., Чёрнега С.М. Повышение износостойкости газотермических покрытий термической обработкой // Защитные покрытия на металлах. - 1993. - Вып. 27. - С. 55-58.

34. Петров С.В., Синьковский С.А. Напыление композиционного порошка TiC-Ni-Cu-P в плазме продуктов сгорания // Порошковая металлургия. - 1993. - № 8-10. - С. 43-47.

35. Борисов Ю.С., Петров С.В. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автоматическая сварка. - 1995. - № 1. - С. 41-44.

36. Борисова А.Л., Борисов Ю.С., Петров С.В. и др. Влияние условий плазменного напыления на структуру покрытий из сплава Fe-Mo-Cr-Ni-B // Автоматическая сварка. - 1995. - № 7. - С. 28-34.

37. Патон Б.Е., Дудко Д.А., Петров С.В., Сааков А.Г. Высокотемпературное плазменное нанесение антикоррозионных покрытий // Строительство трубопровода. - 1995, ноябрь-декабрь. - С. 9-13.

38. Петров С.В., Мальнев В.Н. О возможности использования звуковых волн для управления плазмой // Сб. Высокотемпературные технологии с горением. - Изд. ИПЭ НАН Украины, - 1995. - С. 145-155.

39. Фень Е.К., Петров С.В., Алфимцева Р.А. Физико-механические свойства покрытий из композиционных материалов, полученных сверхзвуковой плазмой // Сб. Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наукова думка, 1994, вып. 28. - С. 61-63.

40. Karp I., Petrov S., Paschenko V. New Plasma Spray Apparatus // NTSC-94. 20-24 June 1994, Boston, Mass. - P. 124-130.

41. Karp I., Petrov S., Rudoy A., Komisarenko A. The Spraying of Coating by Supersonic Metallization // NTSC-94. 20-24 June 1994. Boston, Mass. - P. 240-245.

42. Borissova A., Borissov Yu., Petrov S., Murashev A., Novak P. Structure and Properties of Coatings by Supersonic Air-Gas Plasma Spraying // ITSC-95. 22-26 May 1995. Kobe, Japan. - P. 211-216.

43. Карп И.Н., Петров С.В., Гринченко Н.Н. Плазмотроны со сложной геометрией дугового канала // Тр. VIII Всес. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. - Новосибирск, 1980. - С. 84-87.

44. Карп И.Н., Петров С.В. Электрический пробой в плазмотроне с металлической нейтральной вставкой // Тр. X Всес. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. - Каунас, 1986, ч. 1. - С. 151-152.

45. Петров С.В., Сааков А.Г. Нанесение покрытий в плазме продуктов сгорания // Тр. XVI Всес. конф. по порошковой металлургии. - Свердловск, 1989, ч. IV. - С. 35-36.

46. Карп И.Н., Петров С.В., Гололобов О.И. Сверхзвуковой плазмотрон на продуктах сгорания // Тр. XI Всес. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. - Новосибирск, 1989, ч. 1. - С. 20-21.

47. Карп И.Н., Петров С.В. Работа катода в атмосфере продуктов сгорания // Материалы VIII Всес. конф. "Физика низкотемпературной плазмы". - Минск, 1991, ч. 1. - С. 130-131.

Розроблені технічні рішення на засоби та пристрої захищені:

- авторськими свідоцтвами СРСР №№: 710113, 835308, 865106, 886710, 942564, 952363, 1088403, 1088642, 1179905, 1319386, 1340566, 1480743, 1507194, 1605430;

- патентами України №№: 898, 1180, 1181, 1182;

- патентами Росії №№: 1628328, 1802973.

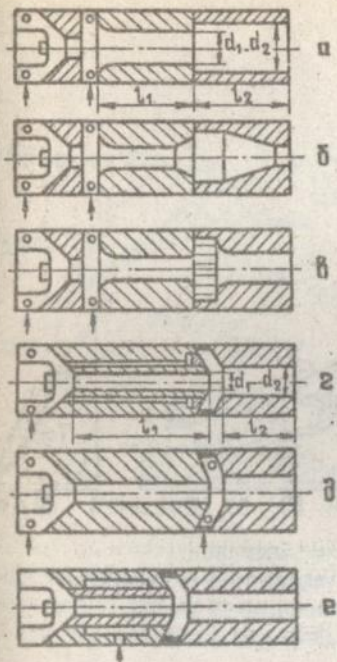


Рис. 1. Схеми плазмотронів.



Рис. 2. Теплові характеристики плазмотрона (рис. 1. а).

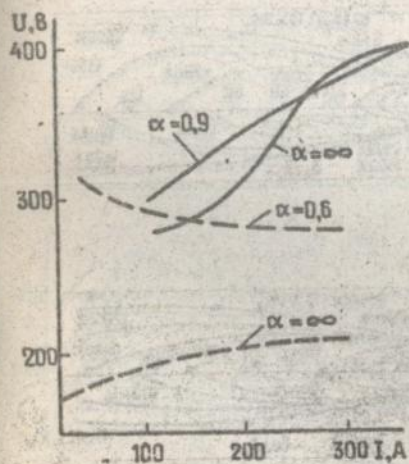
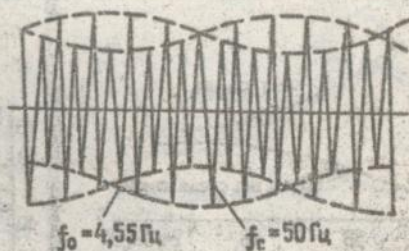


Рис. 3. ВАХ плазмотронів із складною геометрією дугового каналу (—), ПУН-1 (-----).

Рис. 4. Часова розгортка коливань струмів і напруг на елементах нергульованого ІЕП. Частота автоколивань $f_a = 20,45$ Гц.

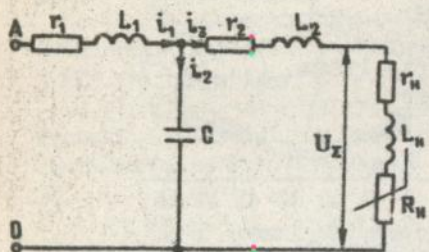


Рис.5. Эквивалентна схема заміщення нерегульованого ІЕП.

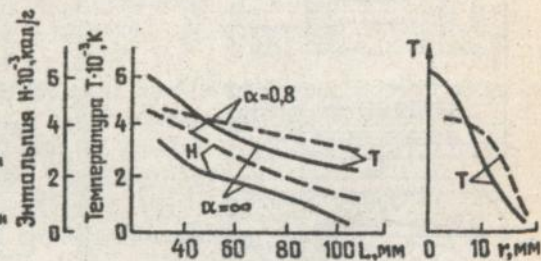


Рис.6. Розподіл ентальпії і температур по довжині та перерізу струменя на відстані 20 мм від зрізу сопла: $P=85$ кВт, $G=6$ г/с, $\alpha=0.8$.

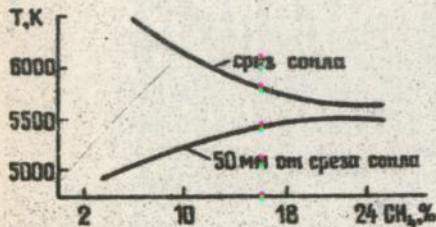


Рис.7. Залежність температури на осі струменя від вмісту CH_4 у суміші.

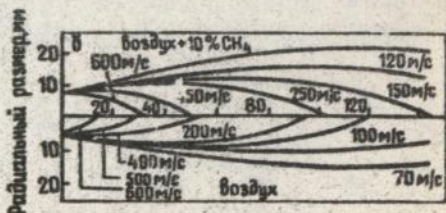
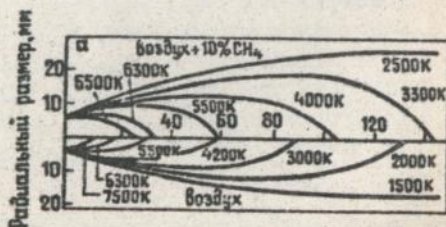


Рис.8. Розподіл параметрів у струмені плазмотрона ПУН-1.

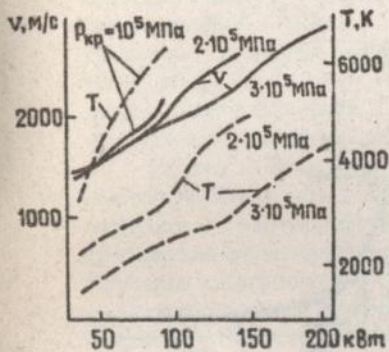


Рис.9. Залежність параметрів надзвукових плазмових струменів від потужності плазмотрона і тиску в критичному перерізі.

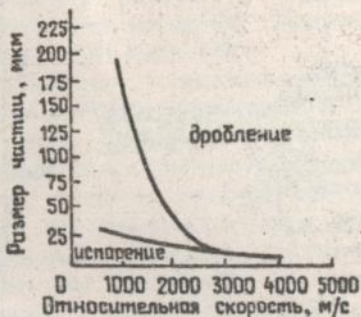


Рис.10. Стан дисперсної фази у плазмі продуктів згоряння.

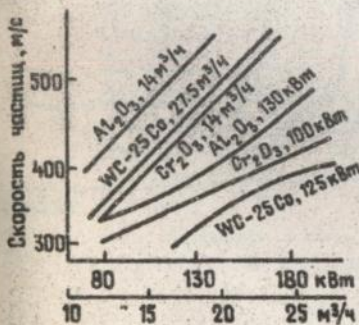


Рис.11. Швидкість частинок.

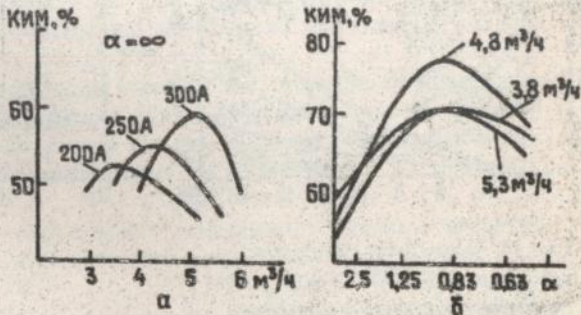


Рис.12. Залежність КИМ Al_2O_3 від витрати (а) та вмісту горючого газу в суміші (б).

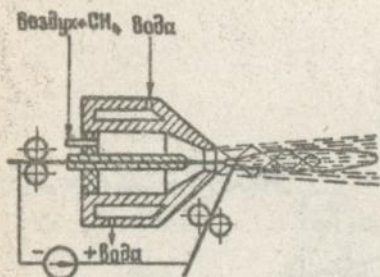


Рис. 13. Схема надзвукового электродугового металлизатора.

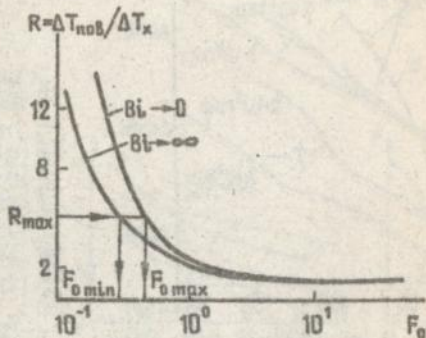


Рис. 14. Залежність співвідношення температур на поверхні і глибині (R) від безрозмірного часу (F_0 - критерій Фур'є) для $0 < Bi < \alpha$.

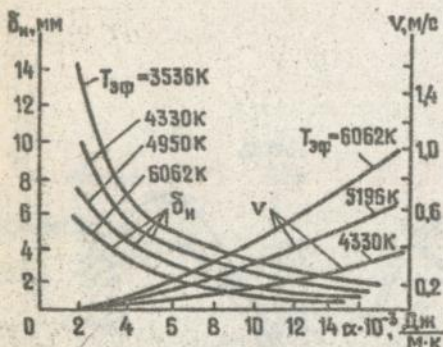


Рис. 15. Залежність глибини нагрівання до 850°C і швидкості V переміщення виробу відносно плазмотрона від інтенсивності теплопередачі. Вихідна температура виробу 300 K .

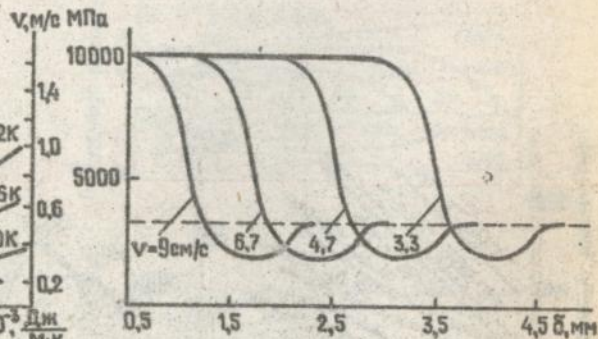


Рис. 16. Розподіл мікротвердості по глибині залежно від швидкості гартування.

АННОТАЦІЯ

Петров С.В. Аппаратурно-технологічні основи газотермічного нанесення покриттів і обробки матеріалів в газоздушній плазмі.

Рукопис. Дисертація на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 - "Технология и оборудование для сварки и родственных процессов". Национальный технический университет Украины (КПИ). Киев. 1996.

Работа посвящена комплексному исследованию процессов генерирования плазмы продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом, взаимодействия такой плазмы с материалами, формирования покрытий из порошковых и проволочных материалов. Изучены электрические, тепловые и технологические характеристики до и сверхзвуковых плазмотронов для напыления в плазме продуктов сгорания. Сформулированы основные принципы проектирования плазменно-дуговой аппаратуры для напыления и разработки технологий обработки материалов в плазме продуктов сгорания. Результаты исследований опубликованы в 74 научных работах и 20 авторских свидетельствах и патентах.

ABSTRACT

Petrov S.V. The apparatus and technological principles of thermal spraying and treatment of materials in gas-air plasma. Manuscript.

A. dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in speciality 05.03.06 - Technology and Equipment for Welding and Related Processes. National Technical University of Ukraine (KPI). Kyev. 1996.

The objective of this research was to investigate processes of generating of combustion product plasma, interaction with materials, coating deposition from powder and wire. An investigation was conducted to define the basic electric, energy and technological parameters of sub and supersonic plasmatrons for spraying. Relation-chips between technological parameters of plasma spraying and structure and properties of coatings are obtained. The main principles of plasma apparatus and technological thermal spraying in gas-air plasma are also discussed. The results of this study are published in 74 scientific papers and 20 patents.

Ключові слова: газотермічне напилення, плазма, продукти згоряння, покриття, міцність зчеплення, пористість

Підп. до друку 24.10.96, Формат 60x84/16. Пап офс. № 2. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 1,86. Ум. фарбс-відб. 2,09. Обл.-вид. арк. 1,93.
Тираж 100 прим. Зам. 6-257.

ІЕЗ ім. Е.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.
ВОП ІЕЗ ім. Е.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.

111581

AB 35.962