

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ
НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ**

Изложены результаты экспериментальных исследований процесса дуговой цементации. Определены факторы, которые влияют на качество упрочненного слоя

**RESEARCH OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF ARC CEMENTATION
ON QUALITY INDICATORS OF THE STRENGTHENED LAYER**

It is stated results of experimental researches of process of arc cementation. Factors which influence quality of the strengthened layer are define

УДК 621.721

**НАПИЛЕННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ
ПЛАЗМОТРОНОМ В РЕЖИМІ ГЕНЕРАЦІЇ
ЛАМІНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО СТРУМЕНЯ**

І.В. Смирнов, канд. техн. наук, **А.В. Чорний**, асп.,
Б.Ю. Бакай, магістр

НТУ України "КПІ"

Проведено аналіз умов плазмового напилення порошкових матеріалів. Представлені вольт-амперні характеристики плазмотрону з виносним анодом та осцилограми напруги на дузі при різних витратах газу. Дослідження пористості напилених покриттів з застосуванням плакованих порошків свідчать про перспективність використання плазмотрону в режимі генерації ламінарного плазмового струменя.

Проблема. На даний час для плазмово-порошкового напилювання покриттів широкого поширення набули плазмотрони з турбулентним витіканням плазмових струменів, які поряд з відомими перевагами мають ряд недоліків. По-перше, турбулентний струмінь плазми, інтенсивно перемішуючись з холодною навколишньою атмосферою, швидко втрачає свою ентальпію. В результаті чого, довжина зони ефективного нагрівання порошку в поздовжньому напрямку зазвичай не перевищує 5–7 діаметрів сопла, що є недостатнім для ефективного нагріву і плавлення частинок керамічних тугоплавких порошків. По-друге, вказане перемішування, поряд з турбулентними пульсаціями струменя плазми,

© І.В. Смирнов, А.В. Чорний, Б.Ю. Бакай.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 94. 2010.

внаслідок великомасштабного шунтування дуги з частотою близько 1–5 кГц, призводять до різниць у швидкостях і температурах напилюваних частинок, що збільшує неоднорідність структури напилюваного покриття, зменшує його щільність і міцність зчеплення. По-третє, значні градієнти швидкості і температури турбулентного плазмового струменя в поперечних перетинах запиленого двофазного потоку, також призводить до збільшення ймовірності появи непропалених частинок в зоні формування покриття. Крім того, турбулентні потоки плазми характеризуються значним рівнем шуму до 120–130 дБ [1].

Напилені в таких умовах покриття, мають міцність зчеплення з основою до 20 МПа, пористість 8–10% і більше. При цьому витрати плазмоутворюючого газу складають 2,5–3,5 м³/год, а коефіцієнт використання порошкового матеріалу (КВМ) — 0,4–0,6. Такі характеристики покриттів не задовольняють в повній мірі сучасним техніко-економічним вимогам до захисних покриттів. Одним із шляхів подолання виникаючих при цьому проблем є створення ламінарного струменя великої протяжності на виході з сопла плазмотрона, в результаті чого істотно зменшується підмішування холодного газу в запилений струмінь і збільшується ступінь проплавлення керамічних порошоків. Генератори плазми даного типу є перспективними також для фінішної термообробки напилених покриттів (оплавлення) з метою зменшення і закриття пористості, а також збільшення адгезії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження і публікації, в яких розглядаються проблеми розробки та дослідження плазмотронів з ламінарним характером плазмового струменя представлені в працях В.В. Кудинова, Ю.С.Борисова та закордонних дослідників W. Pan, K. Cheng та ін. [2–5]. Так у праці W. Pan із співавт. [2] представлені результати моделювання ламінарних плазмових струменів аргону, показані суттєві відмінності між механізмами змішування з навколишнім повітрям струменями ламінарної і турбулентної плазми. В праці K. Cheng із співавт. [3] робиться висновок, що подібні плазмотрони відрізняються високою стабільністю роботи, збереженням заданого складу плазми та наявністю локальної термодинамічної рівноваги. Потужність ламінарних плазмотронів може коливатися в широких межах, від кіловат у разі мікроплазмового напилення до декількох десятків кіловат. В останні роки в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено плазматрон для мікроплазмового напилення, потужністю до 3 кВт, конструкція та параметри роботи якого забезпечують формування ламінарного плазмового струменя [4, 5]. При цьому забезпечується малий кут

розкриття ламінарного плазмового струменя $2-6^\circ$ замість $10-18^\circ$ для турбулентного, можливість нанесення покриттів на невеликі вироби та вироби з тонкими стінками без локального перегріву, низький рівень шуму 30–50 дБ.

Мета дослідження: розробка плазмотрона з ламінарним витіканням плазмового струменя і раціональних режимів напилення керамічних, плакованих порошків для покращення властивостей захисних покриттів на їх основі.

Результати дослідження. Аналізуючи технологічні режими, що, звичайно, застосовуються для напилення порошкових матеріалів, слід зазначити, що, як правило, потужність плазмотрона не перевищує 25 кВт при ККД від 10 до 70%, а в ряді випадків підвищення потужності призводить до зменшення ККД і особливо коефіцієнта використання енергії струменя.

При розробці плазмотрона прагнули отримати струмінь плазми, що має досить високі повну і питому ентальпії при порівняно невеликому струмі дуги до 100 А і малій витраті газу $\sim 0,3 \text{ м}^3/\text{год}$, що полегшує використання плазмотрона в звичайних заводських умовах і дослідницьких лабораторіях. При цьому за основу було взято малогабаритний універсальний плазмотрон для зварювання та наплавлення ПС-3, що серійно випускається в складі установки для плазмового зварювання і наплавлення типу УПНС-304 [6]. Варіанти компоновки плазмотрона ПС-3 наведені на рис. 1 [7].

Конструкція розробленого плазмотрона показана на рис. 2, конструктивною особливістю якого є виносний водоохолоджуваний мідний анод 1 [8]. Для стабілізації дугового розряду та захисту анода здійснюється додаткова подача захисного газу — аргону через сопло 4.

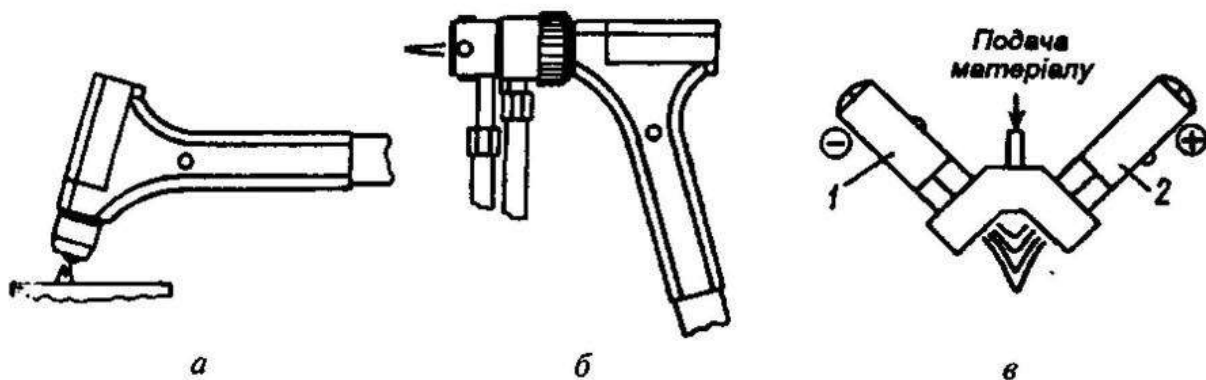


Рис. 1. Компоновка плазмотрона ПС-3 при зварюванні (а), напиленні (б) і при плазмовій обробці двома плазмотронами з винесеною дугою (в)

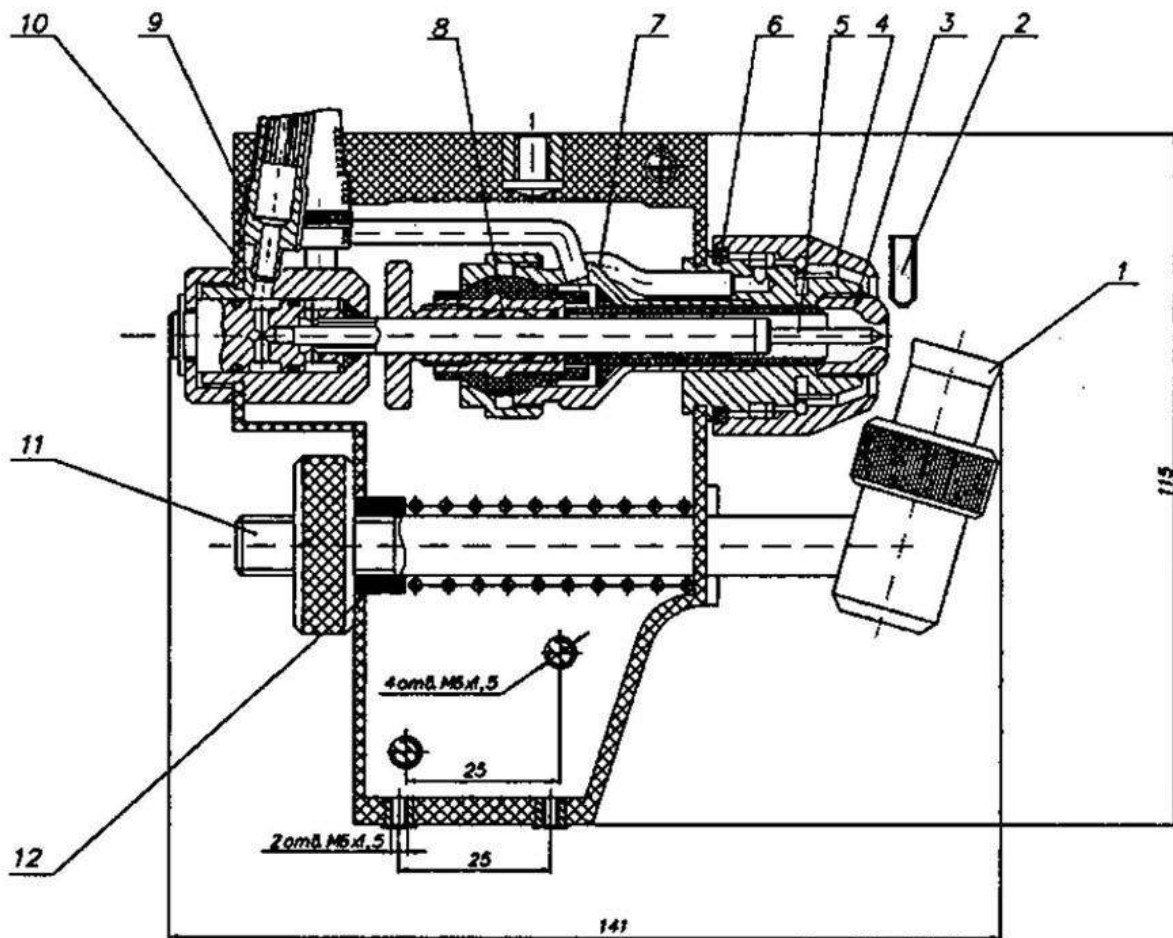


Рис. 2. Схема ламінарного плазмотрона з виносним анодом. Основні вузли: 1 — виносний анод; 2 — трубка для подачі порошку; 3 — сопло внутрішнє, що формує плазмовий струмінь; 4 — сопло обжимаюче; 5 — вольфрамовий електрод; 6, 11 — струмовідводи; 7 — канал для подачі плазмоутворюючого газу; 8 — механізм центрування електрода; 9 — канал для подачі охолоджувальної води; 10 — корпус плазмотрона; 12 — механізм переміщення аноду

Наявність захисної атмосфери в зоні напилювання дозволяє знизити ступінь окислення напилюваного матеріалу, що особливо важливо при напиленні плакованих порошків.

Струмінь аргонної плазми витікає в атмосферу повітря і має ламінарний характер течії, внаслідок чого можливе лише дифузійне змішування повітря з аргонном. Для зменшення дифузійного змішування повітря з аргонною плазмою здійснюється додатковий кільцевий обдув струменя плазми супутнім потоком аргону. З цією метою встановлювалося додаткове сопло, і подавався аргон з витратою близько $0,03 \text{ м}^3/\text{год}$, при якій довжина яскравої частини і ламінарної ділянки плазмового струменя максимальні. Струмінь плазми при цьому має строгу обертальну симетрію, стабільну в часі.

Таким чином, раціональні технологічні параметри плазмового струменя визначалися за максимальною довжиною яскравої частини струменя, що відповідало витраті плазмоутворюючого аргону $\sim 0,014$ м³/год і числу Рейнольдса 120, розрахованому за формулою [9]:

$$Re = \omega d / \nu, \quad (1)$$

де ω — швидкість плазмового струменя визначається з співвідношення (2), що описує його швидкісний напір плазми; d — діаметр сопла плазмотрона; ν — кінематична в'язкість газу (аргону).

$$\rho \omega^2 = \rho_0 \bar{v} \frac{4V_0}{3600\pi d^2}, \quad (2)$$

де ρ — дійсна густина плазмового струменя на зрізі сопла кг/м³; \bar{v} — відношення питомих об'ємів; ρ_0 — густина плазмоутворюючого газу при стандартних умовах; кг/м³; V_0 — витрата плазмоутворюючого газу, м³/год.

Процес наплення плазмотроном з виносним анодом в режимі генерації ламінарного плазмового струменя показано на рис. 3.

Технічні характеристики плазмотрона: робочий газ — аргон; робочий струм — 60–100 А; робоча напруга 3–50 В; потужність — до 5,0 кВт; витрати газу (м³/год): плазмоутворюючого — 0,06–0,3, захисного — 0,06–0,2; охолодження — аргон; продуктивність — 0,5–4 кг/год; коефіцієнт використання матеріалу — 0,6–0,8.

Вольт-амперна характеристика дуги в даному плазмотроні з виносним анодом, як показано на рис. 4, має зростаючий вид з крутизною близько 0,2 В/А, що дозволяє вести плазмове наплення в аргоні на струмах до 100 А при напрузі дуги порядку 40 В від серійних джерел дугового або плазмового зварювання на пологопадаючій ділянці зовнішньої характеристики без збільшення напруги холостого ходу і без баластного навантаження. Крім того, напруга на дузі зростає з збільшенням витрати газу, що свідчить про істотний вплив потоку газу на умови горіння електричної дуги.

Для дослідження стабільності горіння дуги використовувався цифровий осцилограф з технічними характеристиками: частотою дискретизації від 100 Гц до 200 КГц, входною напругою



Рис. 3. Загальний вигляд ламінарного плазмового струменя при напленні порошку.

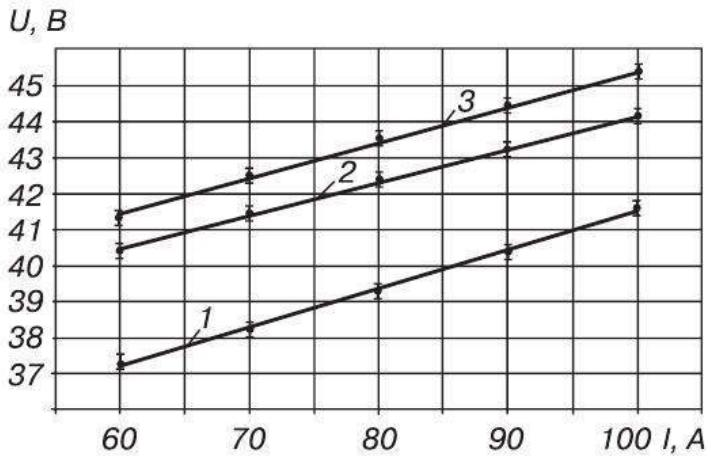
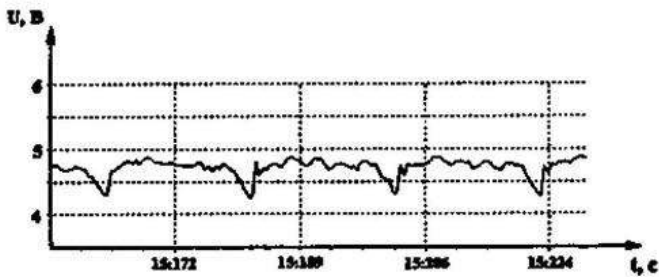
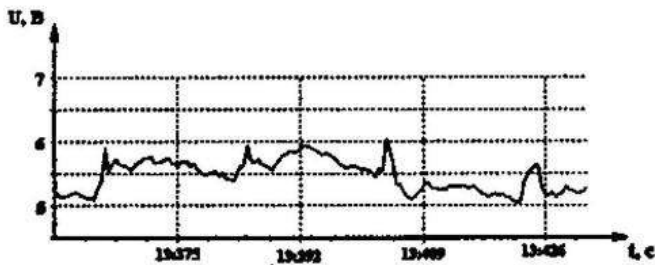


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики плазмотрона для різних витрат плазмоутворюючого газу: 1 — 0,1 м³/год; 2 — 0,14 м³/год, 3 — 0,18 м³/год

пологої форми з амплітудою 0,1 В і постійним значенням середньої напруги в періоді, що свідчить про стабільний стан горіння дуги. Така поведінка дугового розряду можлива при сталому розподілі у просторі аеродинамічних сил, які діють на дугу, та ламінарному характері течії плазмового струменя. Зі збільшенням витрат плазмоутворюючого газу



a



b

Рис. 5. Осцилограми напруги на дузі при витраті аргону 0,14 (a) та 0,18 м³/год (б)

від -20 В до $+20$ В, з розрядністю 10 біт та глибиною пам'яті 1126 відрахувань/канал.

Отримані осцилограми напруги дуги для ламінарного та турбулентного характеру течії струменя плазми при витратах плазмоутворюючого газу 0,14 м³/год та 0,18 м³/год наведені на рис. 5.

На осцилограмі (рис. 5a) спостерігаються високочастотні рівномірні пульсації

пологої форми з амплітудою 0,1 В і постійним значенням середньої напруги в періоді, що свідчить про стабільний стан горіння дуги. Така поведінка дугового розряду можлива при сталому розподілі у просторі аеродинамічних сил, які діють на дугу, та ламінарному характері течії плазмового струменя. Зі збільшенням витрат плазмоутворюючого газу до 0,18 м³/год на осцилограмі (рис. 5б) спостерігається загальне підвищення напруги дуги з наявністю зміни напруги за окремий частотний період, що пояснюється зміною форми та розмірів дуги, її шунтуванням. Тобто, можна зробити висновок про нестабільний характер горіння дугового розряду, та перехід плазмового струменя в турбулентний режим.

В якості порошоків для напилювання використовувався порошок оксиду алюмінію фракцією 40–60 мкм плакований двошаровими оболонками титану з алюмінієм і титану з міддю. Порошок плакували

іонно-плазмовим методом, перевагою якого є висока адгезія металевих оболонок до ядра, що особливо важливо при напиленні газотермічних покриттів. Склад, властивості і технологія плакування даного порошку детально описано в [10]. Застосування таких порошків для плазмового напилення підвищує комплекс фізико-механічних характеристик захисних покриттів зокрема, щільність та корозійну стійкість. Результати проведених досліджень отриманих покриттів на пористість представлені на рис. 6.

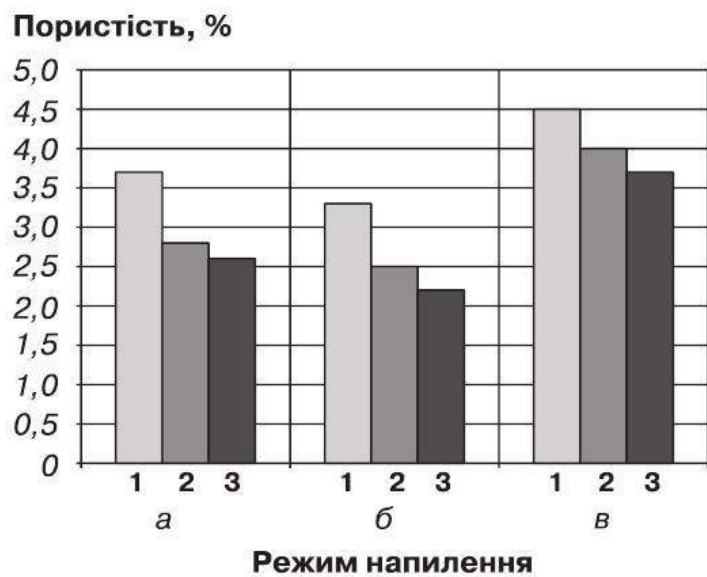


Рис. 6. Пористість плазмових покриттів на основі плакованих керамічних порошків при різних режимах напилення: *а* — витрати плазмоутворюючого газу 0,1 м³/год; *б, в* — 0,14 м³/год, 0,18 м³/год відповідно, струм дуги 80А; 1 — Al₂O₃; 2 — Al₂O₃/Ti/Al; 3 — Al₂O₃/Ti/Cu

Отримані дані з пористості свідчать про максимальне її зниження при режимі б), що відповідає витраті плазмоутворюючого газу 0,14 м³/год і найбільшій довжині струменя (рис. 6). Зі збільшенням витрат пористість покриттів зростала, особливо при використанні плакованих порошків, що обумовлюється фізико-хімічними процесами, що протікають на поверхні частинок порошку.

Таким чином, за рахунок технологічних та конструкційних особливостей (мала пляма напилення 3–6 мм, низький температурний вплив на оброблювану поверхню, покращені властивості напилюваних покриттів) розроблений плазмотрон може ефективно використовуватися для захисту та відновлення малогабаритних деталей або окремих робочих поверхонь, зокрема ушкоджених ділянок емалевих покриттів емностей для зберігання хімічних речовин.

Висновки.

1. Обґрунтовані режими напилення, які забезпечують ламінарний характер течії плазмового струменя з стабільним горінням дуги для плазмотрона з виносним анодом.

2. Напилення плакованих керамічних порошків ламінарним плазмовим струменем сприяє підвищенню щільності захисних покриттів на 25–30%.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. — М.: Металлургия, 1992. — 432 с.
2. Wenxia Pan, Xian Meng, Xi Chen, Chengkang Wu. Experimental Study on the Thermal Argon Plasma Generation and Jet Length Change Characteristics at Atmospheric Pressure // Plasma chemistry and plasma processing. — 2006. — № 26. — P. 335–345.
3. K. Cheng, Xi Chen, Wenxia Pan. Comparison of Laminar and Turbulent Thermal Plasma Jet Characteristics— A Modeling Study // Plasma chemistry and plasma processing. — 2006. — № 26. — P. 211–235.
4. Патент України 1848 В23К10/00 Плазмотрон для напылення покриттів / Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, А.А. Фомакин, К.А. Ющенко. — Опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.
5. Борисов Ю.С., Кислица А.Н., Войнарович С.Г. Особенности процесса микроплазменного напыления с использованием проволочных материалов // Автомат. сварка. — 2006. — № 4. — С. 26–31.
6. А.с. 880654 [СССР]. Соснин Н.А., Ермаков С.А. Горелка для плазменной обработки материалов. — Б.И., 1981, № 42.
7. Ермаков С.А., Соснин Н.А., Тополянский П.А. Напыление порошковых материалов универсальными плазмотронами с межэлектродными вставками // Порошковые, композиционные и текстурированные материалы. Сб. науч. тр. ЛПИ. — 1986. — № 417. — С. 99–102.
8. Патент U.S. 5733662A C23C4/12 Способ и устройство для термонапыления покрытия на подложку / Pogachev, Valery.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учеб. руководство: Для вузов. — 5-е изд., перераб и доп.—М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит-ры, 1991.— 600 с.
10. Копилов В.І., Смирнов В.І., Селіверстов І.А. Процеси іонно-плазмового плакування порошків для газотермічних покриттів // Наукові вісті НТУ України “Київський політехнічний інститут”. — 2009. — № 3 (65). — С. 11–20.

НАПЫЛЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМОТРОНОМ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЛАМИНАРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

Проведен анализ условий плазменного напыления порошковых металлов. Представлены вольт — амперные характеристики плазмотрона с выносным анодом и осциллограммы напряжения на дуге при различных расходах газа. Исследование пористости напыленных покрытий с применением плакированных порошков свидетельствуют о перспективности использования плазмотрона в режиме генерации ламинарной плазменной струи.

PLASMA SPRAYING OF POWDER MATERIAL IN LAMINAR PLASMA JET GENERATION MODE

Conditions of powder materials plasma spraying were analysed. Volt-ampere characteristic of plasmatron with remote anode and oscillogram of arc voltage with various gas flow were represented. Porosity of sprayed coating using clad powders research is evidence of perspective usage of plasmatron in laminar plasma jet generation mode.