

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ЦИРКОНІЄВИХ ЧАСТИНОК ПРИ МІКРОПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЕННІ

С.М. Калюжний¹, В.В. Савицький¹, С.Г. Войнарович¹, О.М. Кислиця¹, З.Г. Файзраманов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: serg3319@ukr.net

²Східно-Казахстанський технічний університет ім. Д. Серикбаєва. 070004, Казахстан, м. Усть-Каменогорськ, вул. Протозанова, 69. E-mail: kanc_ekstu@mail.ru

У роботі проведено вимірювання та аналіз швидкості руху диспергованих частинок із цирконієвого дроту, введеного в дуговий проміжок мікроплазмового струменя залежно від технологічних параметрів процесу розпилення. З використанням оптичних цифрових пристроїв було встановлено, що в даних досліджуваних діапазонах режимних параметрів середня швидкість диспергованих цирконієвих частинок становить від $8 \pm 2,5$ до $28,7 \pm 4$ м/с. Установлено, що у разі комбінації мінімальних значень сили струму ($I = 16$ А), витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{\text{пл}} = 160$ л/год) та швидкості введення дроту ($V_{\text{др}} = 2,9$ м/хв), що розпилюється, забезпечується утворення частинок з максимальним діаметром 310 мкм і середньою швидкістю їх руху $8 \pm 2,5$ м/с. Застосування даних показників режимних параметрів при мікроплазмовому процесі розпилення цирконієвого дроту дозволить формувати покриття з розвинутою поверхнею та найбільш пористою структурою, які можуть практично застосовуватись на поверхнях ендопротезів безцементного фіксування. Бібліогр. 21, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: мікроплазмове покриття, цирконій, диспергація, швидкість частинок

Вступ. Формування покриттів з використанням високотемпературного плазмового струменя набуло широкого поширення в різних галузях промисловості. Успішність використання плазмового дротяного розпилення в промисловості підтверджується позитивними практичними результатами [1–3]. Завдяки високій продуктивності, простоті та технологічності плазмовий метод дає змогу розпилювати різного роду матеріали, такі як кераміка та метали, у вигляді порошків, шнурів і дротів.

Відмінною особливістю плазмового напилення із дроту від порошкових матеріалів полягає в тому, що гранулометричний склад напилюваних частинок, формується під час процесу диспергування дроту в плазмовому струмені. При цьому від розмірів диспергованих частинок буде залежати їх швидкість у момент удару об напилювану поверхню, внаслідок чого їх деформування впливатиме на структуру покриття [4]. Відомо, що найбільш щільні структури формуються частинками, які рухалися з достатньо високими швидкостями. Такі високі швидкості частинки можуть отримувати у випадку їхнього руху в струмені холодного газодинамічного, детонаційного, високошвидкісного газополуменевого та плазмового методу [5, 6].

При плазмовому напиленні з дроту процес диспергування відбувається за умови плавлення та відриву утвореної краплі розплаву з торця дроту,

що подається в плазмовий струмінь. Процес плавлення дроту залежить від декількох основних факторів, якими є теплофізичні властивості розпилюваного матеріалу та плазмового струменя. При цьому плазмовий струмінь повинен мати достатні не тільки теплові, але й динамічні властивості для забезпечення диспергування частинок із дроту [7]. Таким чином, процес диспергування частинок із дроту буде залежати від властивостей плазмового струменя, який впливатиме на їх розмір та швидкість руху. Розміри та швидкості руху диспергованих частинок будуть залежати від зміни теплофізичних та динамічних властивостей плазмового струменя в радіальному напрямку. Зокрема, від глибини введення дроту в плазмовий струмінь буде залежати в якій області відносно радіальної осі струменя розпочнеться процес його плавлення та формування краплі на його торці [8].

Одним з різновидів методів плазмового напилення, за допомогою якого одержують покриття розпиленням дротяних матеріалів, є метод мікроплазмового напилення (МПН). Особливістю даного методу є використання малопотужного мікроплазмотрона до 2,5 кВт. Його конструкційна відмінність полягає у виносному аноді, що дозволяє розпилювати дротяний матеріал, безпосередньо подаючи його у високотемпературну область мікроплазмового струменя, яким є дуговий проміжок перед анодною плямою та формуванням

Калюжний С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8132-3930>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>,
Войнарович С.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4329-9255>, Кислиця О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8894-4660>,
Файзраманов З.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3654-2368>

© С.М. Калюжний, В.В. Савицький, С.Г. Войнарович, О.М. Кислиця, З.Г. Файзраманов

поток диспергованих частинок із мінімальним кутом розкриття [9]. В якості плазмоутворюючого та захисного газу використовується аргон. При цьому застосування співвідносної подачі захисного газу під час наплення сприяє обтисканню мікроплазмового струменя з його стабілізацією та обмеженням підмішування атмосферних газів, що дозволяє мінімізувати процеси окислення розпилюваного матеріалу. За допомогою цього обладнання розпилюючи дротяні матеріали можна формувати різні функціональні покриття, зокрема й біосумісні [10].

На сьогодні дослідження руху частинок у високотемпературних газових потоках проводиться на комерційних установках DPV-2000, Accuraspray-g3, SprayWatch та інші [11]. Однак через їх високу вартість виникла потреба в розробці нових, більш доступних методів контролю за рухом диспергованих частинок у високотемпературних потоках. Дані методи засновані на використанні оптичних пристроїв і базуються на високошвидкісному фільмуванні для виявлення об'єктів спостереження з метою подальших вимірів їх параметрів [12]. Однією з найпоширеніших на практиці методик дослідження швидкоплинних процесів є оптико-електронна система, яка була успішно застосована Богдановичем і Доукуїною [13, 14]. Із застосуванням подібної методики процес руху диспергованих частинок у потоці плазмового струменя вивчено досить добре, але напрямок досліджень стосувався переважно схеми реалізації процесу з використанням високопотужних джерел плазмового струменя та подачі дроту для його розпилення за межі високотемпературного дугового проміжку [15]. При цьому практичні роботи щодо визначення залежності швидкості руху диспергованих частинок в плазмовому струмені від технологічних параметрів в умовах малопотужних плазмотронів до 3 кВт на сьогодні залишаються поза увагою дослідників. Тому велике значення для кращого розуміння перебігу процесу мікроплазмового дротяного розпилення має встановлення впливу технологічних параметрів на швидкість руху диспергованих частинок в умовах мікроплазмового струменя.

Таким чином, мета роботи полягала в експериментальному визначенні впливу режимних параметрів, таких як сила струму (I , А), витрата плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$, л/год), швидкість подачі дроту ($V_{др}$, м/хв) на швидкість руху диспергованих частинок, отриманих із Zr-дроту в умовах мікроплазмового струменя.

Матеріали, обладнання та методики проведення експерименту. Для планування експерименту із встановленням впливу параметрів режимів МПН Zr-дроту на швидкості руху диспергованих частинок був використаний метод багатофакторного математичного планування з матрицею 2³.

Швидкість подачі дроту встановлювали виходячи з того, що стабільний процес диспергування відбуватиметься за умови, коли тиск, створюваний мікроплазмовим струменем і маса краплі, утвореної на торці дроту, перевищуватиме силу поверхневого натягу її розплаву [16]. Тож стабільний процес диспергування дроту, введеного в мікроплазмовий струмінь, відбуватиметься за достатньої кількості теплоти (G_n), яка визначається шляхом розрахунків. При цьому необхідна кількість теплоти струменя буде залежати від одиниці введеного об'єму розпилюваного матеріалу, його діаметра та теплофізичних властивостей:

$$G_n = (c_p (T_n - T_0) + C) \rho_{др} 0,01 \pi /4, \quad (1)$$

де c_p – теплоємність розпилюваного матеріалу; T_n – температура плавлення розпилюваного матеріалу; T_0 – початкова температура дроту 273 К; C – теплота плавлення розпилюваного матеріалу; $\rho_{др}$ – щільність розпилюваного матеріалу; $d_{др}$ – діаметр дроту.

Для розрахунку швидкості подачі дроту, що забезпечує його стабільне диспергування в середовищі мікроплазмового струменя, використовувалася формула (2), представлена в роботі [17]:

$$V_{др} = \frac{\alpha F (T_c - T_{др})}{G_n}, \quad (2)$$

де $\alpha = 856$ – коефіцієнт теплопередачі; $F = 0,000472 \text{ м}^2$ – площа теплообміну дроту; T_c – температура струменя; $T_{др}$ – температура плавлення дроту.

Проведені розрахунки по встановленню стабільного процесу розпилення Zr-дроту діаметром 0,3 мм в умовах мікроплазмового струменя показали, що необхідно забезпечити кількість теплоти $G_n \approx 3,2 \cdot 10^2$ Дж для плавлення 1 см довжини дроту, за умови його швидкості подачі 3,86 м/хв. Процес розпилення Zr-дроту досліджували на установці МПН-004 згідно зі спланованою матрицею експерименту, представленою в таблиці.

Для визначення швидкості руху диспергованих частинок в потоці мікроплазмового струменя, залежно від параметрів режиму розпилення, була розроблена експериментально-розрахункова методика, яка полягала в отриманні серії фотознімків

Таблиця. Параметри режиму розпилення Zr-дроту методом МПН

Номер	Сила струму I , А	Витрата плазмоутворюючого газу $Q_{пл}$, л/год	Швидкість подачі дроту $V_{др}$, м/хв
1	26	240	4,8
2	26	240	2,9
3	26	160	2,9
4	26	160	4,8
5	16	240	2,9
6	16	240	4,8
7	16	160	4,8
8	16	160	2,9

треків диспергованих частинок з часом експозиції 250...1000 мкс (не менше ніж 80 кадрів для кожного режиму МПН). Тривалість спостереження складала 15 с для кожного режиму згідно з таблицею. За рухом диспергованих частинок у потоці

мікроплазмового струменя на ділянці 150 мм від зрізу сопла спостерігали з використанням цифрової камери асА1300-200um (Basler, Німеччина), яка розміщувалась на штативі в камері для розпилення (рис. 1).



Рис. 1. Експериментальний стенд для дослідження швидкості руху диспергованих частинок

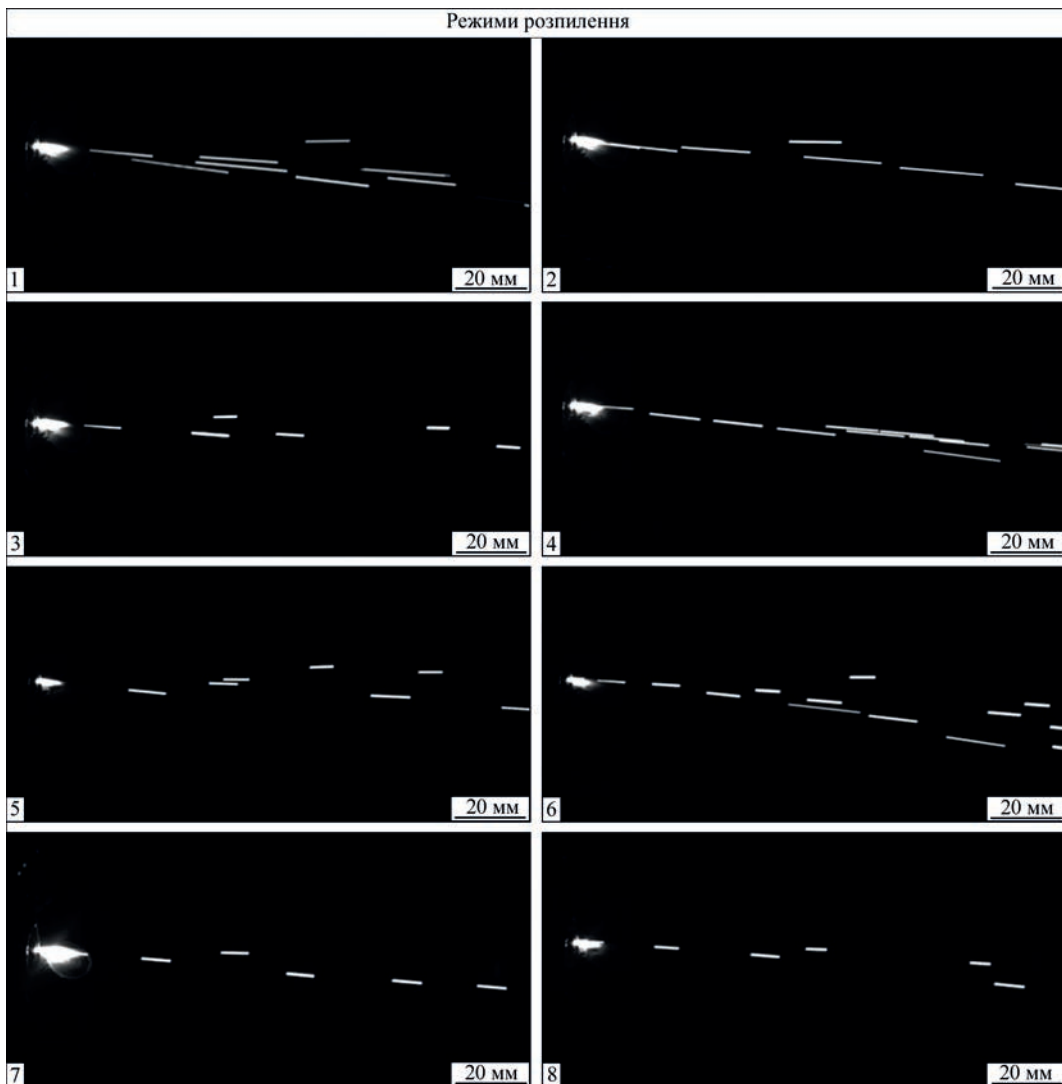


Рис. 2. Треки диспергованих частинок із Zr-дроту залежно від режиму МПН при часі експозиції 1 мс

Отримані серії зображень треків диспергованих частинок обробляли з використанням програмного забезпечення ImageJ (НИН, США), в якому проводили перетворення зображень для аналізу треків, з отриманням відповідного масиву статистичних даних їх довжини. Чим вища швидкість руху частинок, тим більша довжина треків на зображеннях. На основі даних про оптичне збільшення відеосистеми, розмір ділянки, на якій спостерігається рух частинок, час експозиції та довжину треку, можна розрахувати швидкість руху окремої частинки. З урахуванням описано-

го вище, проводилась обробка отриманого масиву даних на кількість співпадаючих треків диспергованих частинок і на основі аналізу гістограм швидкостей усіх зареєстрованих частинок за весь час встановлювали їхні середні швидкості руху в умовах мікроплазмового струменя відповідно до кожного режиму розпилення.

Результати дослідження та обговорення. У результаті проведення експерименту були отримані зображення диспергованих частинок, що світяться, у вигляді треків різної довжини (рис. 2), залежно від параметрів режиму МПН.

Обробка масиву даних із зображень треків диспергованих частинок дозволила встановити розподіл швидкостей їх руху в об'ємі мікроплазмового струменя та представити у вигляді гістограм (рис. 3). Аналіз гістограм (рис. 3) показав, що середня швидкість диспергованих частинок із Zr-дроту в мікроплазмовому струмені знаходиться в межах 28,7...8,0 м/с.

На основі аналізу отриманих результатів середніх швидкостей руху диспергованих частинок із Zr-дроту залежно від режиму МПН було встановлено, що швидкості руху частинок різняться, оскільки вони мають різні маси та геометричні розміри, які були визначені в попередніх наших дослідженнях [18]. Такі частинки мали сферичну форму, а їх середній діаметр (d_c) становив від 128 до 310 мкм. Дані співвідношення середньої швидкості та розміру диспергованих частинок залежно від параметрів режиму розпилення МПН представлена у вигляді гістограми на рис. 4.

Частинки з меншим розміром залишали довгі треки на зафіксованому кадрі й відповідно мали вищу швидкість руху (режими №№ 1, 2, 4, 6), а частинки з більшою масою рухалися з меншою швидкістю, що було зафіксовано у вигляді меншої довжини треку – режими №№ 3, 5, 7, 8 (рис. 2).

Відомо, що швидкість руху частинок $V_{\text{ч}}$ в потці плазмового струменя можна теоретично розрахувати, використовуючи рівняння (3) [19, с. 61].

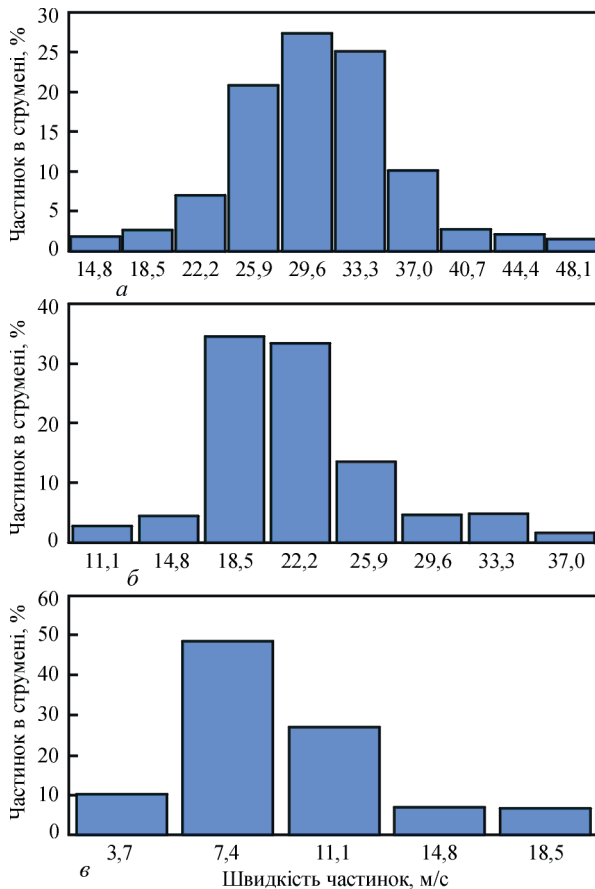


Рис. 3. Розподіл швидкостей диспергованих частинок в мікроплазмовому струмені відповідно до режиму розпилення: а – № 1; б – № 4, в – № 8

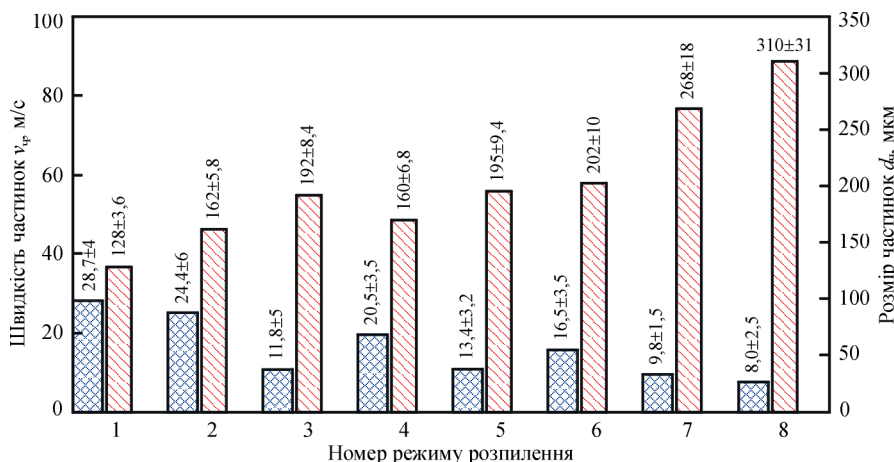


Рис. 4. Середні розміри та швидкості диспергованих частинок із Zr-дроту при різних режимах МПН

$$V_{\text{ч}} = V_{\text{г}} \sqrt{\frac{3 \rho_{\text{г}} C_d}{2 \rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}}} x \quad (3)$$

де $V_{\text{г}} = (350...175)$ м/с – швидкість газу; $\rho_{\text{г}} = 0,048$ кг/м³ – щільність плазми; $\rho_{\text{ч}} = 6510$ кг/м³ – щільність розпилюваного матеріалу (частинки); $d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки; $C_d = 0,5$ – коефіцієнт опору частинки; x – шлях, пройдений частинкою.

Теоретичний розрахунок швидкості руху диспергованих частинок (рівняння 3) показав, що для розмірів частинок в діапазоні від 128 до 310 мкм їх швидкості руху становлять від 28 до 9 м/с відповідно, що практично збігаються з експериментальними даними. Проте в розрахунку (3) не було враховано факторів теплофізичної, термодинамічної зміни властивостей струменя газу з можливим його розрідженням, вплив дисперсної фази та випаровування частинок, при цьому форма частинок приймалася за сферичну без коагуляції з рівномірним завантаженням потоку, а коефіцієнти рівняння $\rho_{\text{г}}$, C_d і $V_{\text{г}}$ були сталими. Тож розбіжність в експериментальних і теоретичних даних швидкості руху диспергованих частинок пояснюється зміною властивостей плазмового струменя в радіальному напрямку, а початок процесу перенесення розплаву металу з торця дроту та рух диспергованих частинок у струмені можливий у різних областях плазмового струменя [7], що не було враховано в теоретичному розрахунку.

Приведені в літературі дані показників швидкостей диспергованих частинок схожі з отриманими в нашому дослідженні. Так, в дослідженнях Кудінова були представлені залежності швидкості

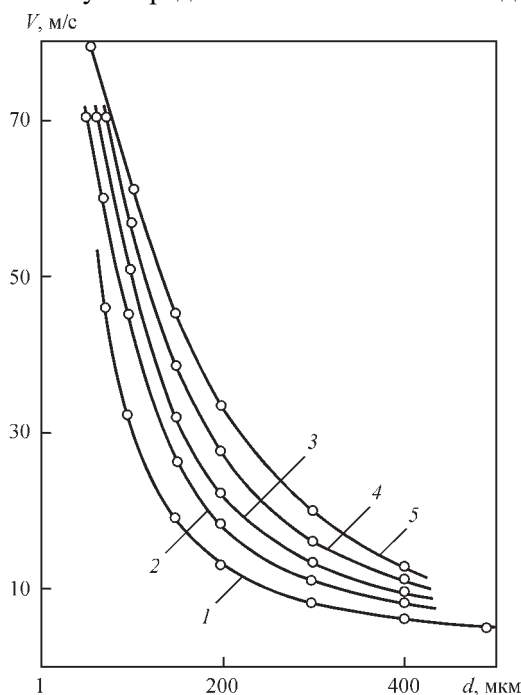


Рис. 5. Залежність осьової швидкості руху частинок ванадію при розпиленні дроту різною потужністю плазмотрона (1-2 кВт; 2-4; 3-6; 4-8; 5-10) від розмірів частинок [20]

руху диспергованих частинок у плазмовому струмені від їх діаметра (рис. 5), які свідчать, що при потужності плазмотрона в 2 кВт швидкість диспергованих частинок діаметром 100...300 мкм знаходиться в діапазоні від 30 до 8 м/с [20].

Проаналізувавши отримані дані середньої швидкості руху диспергованих частинок із Zr-дроту в мікроплазмовому струмені було встановлено, що вона обернено пропорційна їхнім геометричним розмірам і залежить від параметрів режиму розпилення МПН. Вплив технологічних параметрів МПН на швидкості руху диспергованих частинок із Zr-дроту в середовищі мікроплазмового струменя відображено в приведеному рівнянні регресії:

$$V_{\text{ч}}(\text{Zr}) = 0,94I + 0,10Q_{\text{пл}} + 2,36V_{\text{др}} - 32,79 \quad (4)$$

У разі малої швидкості подачі дроту формування крапель та прискорення диспергованих частинок відбуватиметься в периферійній області потоку мікроплазмового струменя, що характеризується мінімальною його швидкістю витoku та низькою в'язкістю. У такій області частинки розганятимуться до меншої швидкості, що спостерігається на режимах №№ 3, 5, 8 (рис. 4).

При зменшенні сили струму знижується температура мікроплазмового струменя. Своєю чергою зменшення витрат плазмоутворюючого газу призводить до зниження швидкості його витoku та до меншого динамічного тиску на краплю металу, внаслідок чого формуються частинки найбільшого розміру (310 мкм) із мінімальною швидкістю руху 8 м/с (режим № 8). В іншому випадку при збільшенні сили струму підвищується температура мікроплазмового струменя, яка впливає на перегрівання та зниження поверхневого натягу крапель розплаву металу, що в поєднанні з максимальною швидкістю витoku газу провокує до їхнього зривання з торця дроту через підвищений динамічний тиск. Такі поєднання факторів впливу дозволяють формувати частинки меншого розміру (128 мкм) і розганяти їх в струмені до максимальної швидкості руху 28,7 м/с, що спостерігається на режимі № 1 (рис. 4).

У результаті проведеного дослідження впливу режимних параметрів МПН на швидкості руху диспергованих частинок із Zr-дроту в середовищі мікроплазмового струменя встановлено, що за допомогою підбору технологічних параметрів можливо управляти швидкістю руху частинок розпилюваного матеріалу в межах 8...28,7 м/с. Найбільш вагомими факторами впливу в даному діапазоні досліджуваних параметрів є сила струму та витрати плазмоутворюючого газу, від яких значною мірою будуть залежати умови початку процесу формування краплі розплаву з наступною диспергацією.

Встановлені фактори впливу технологічних параметрів на швидкість руху цирконієвих частинок в мікроплазмовому струмені та їх залежність від геометричного розміру дозволяють краще розуміти цей процес, який у свою чергу забезпечить можливість прогнозування майбутніх властивостей покриття, що формується при МПН. Використання режиму № 8, який забезпечує формування частинок із найбільшим середнім розміром 310 ± 31 мкм та швидкістю руху до $8 \pm 2,5$ м/с, дозволить отримувати покриття з розвиненою морфологією поверхні та найбільш пористою структурою. Такі покриття знаходять практичне використання на ендопротезах безцементного фіксування, забезпечуючи об'єм для вrostання кісткової тканини внаслідок пористого простору на поверхні та в структурі покриття [21].

Висновки

1. Запропоновано розрахунково-експериментальну методику вимірювання швидкості руху диспергованих частинок з дротяних матеріалів, розпилених методом МПН, із використанням оптичної цифрової камери асА1300-200um (Basler, Німеччина) та програмного забезпечення ImageJ (NIH, США).

2. Проаналізовано вплив технологічних параметрів МПН у діапазоні зміни сили струму ($I = 16 \dots 26$ А), витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{\text{пл}} = 160 \dots 240$ л/год) і швидкості подачі дроту ($V_{\text{др}} = 2,9 \dots 4,8$ м/хв) на середні швидкості руху диспергованих частинок у мікроплазмовому струмені. Встановлено, що середні швидкості диспергованих частинок із Zr-дроту, поданого в дуговий проміжок мікроплазмового струменя, знаходяться в діапазоні від 8 до 28,7 м/с, а найбільш значущими технологічними факторами впливу є сила струму та витрата плазмоутворюючого газу.

3. На основі аналізу отриманих результатів середніх швидкостей руху диспергованих частинок із Zr-дроту показано, що швидкості руху частинок корелюють з їх масами та геометричними розмірами, при цьому середній діаметр частинок змінюється в межах 128...310 мкм. Встановлено, що найменша швидкість руху диспергованих частинок зі Zr-дроту складає 8 м/с та забезпечується при наступних технологічних параметрах: сила струму 16 А, витрати плазмоутворюючого газу 160 л/год і швидкість подачі дроту 2,9 м/хв, із формуванням частинок найбільшого діаметра – 310 мкм.

Список літератури

- Darut, G., Liao, H., Coddet, C. et al. (2015) Steel coating application for engine block bores by Plasma Transferred Wire Arc spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 268(25), 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.018>.
- O'Neil, N., Syed Kabir A. (2020) Pulsed Waterjet Roughening of Cast Iron and Aluminum Alloy for Automotive Engine Remanufacturing with Plasma Transferred Wire Arc Coating. *Coatings*, 10(9), 864. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10090864>.
- Zhang, J., Dulal Saha C., Jahed, H. (2021) Microstructure and mechanical properties of plasma transferred wire arc spray coating on aluminum cylinder bores. *Surface and Coatings Technology*, 426(25), 127757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127757>.
- Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. (2004) *Газотермическое напыление*. Балдаев Л.Х. (ред.), Москва, Маркет ДС.
- Kuzmin, V.I., Gulyaev, I.P., Sergachev, D.V. et al. (2021) Application of functional coatings by supersonic thermal plasma flows. *Journal of Physics Conference Series* 2131(5), 052053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052053>.
- Meeß, J., Anasenzl, M., Ossensbrink, R. et al. (2022) Influence of Particle Velocities on Adhesion Strength of Cold Spray Inner Diameter Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 2025–2038. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01439-4>.
- Краснов А.Н. Шаривкер С.Ю., Зильберберг В.Г. (1970) *Низкотемпературная плазма в металлургии*. Москва, Металлургия.
- Карп И.Н., Рудой А.П. (1991) Влияние скорости подачи стальной проволоки на диспергирование металла воздушной струей. *Автоматическая сварка*, 10, 36–38.
- Войнарлович С.Г., Алонцева Д.Л., Хожанов А.Р. и др. (2021) Влияние параметров микроплазменного напыления циркониевых покрытий на потери напыляемого материала и пористость покрытий. *Вестник «КазНАЕН». Серия физическая*, 79(4), 8296.
- Alontseva, D., Ghassemieh, E., Voinarovych, S. et al. (2020) Manufacturing and characterization of robot assisted microplasma multilayer coating of Titanium implants. *Johnson Matthey Technol Rev*, 64(2), 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320X15737283268284>.
- Mauer, G., Vaßen, R., Stöver, D. (2007) Comparison and Applications of DPV-2000 and Accuraspray-g3 diagnostic Systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(3), 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9047-2>.
- Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Попов В.А. и др. (2012) Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках. *Ползуновский вестник*, 2(1), 4–7.
- Докукина И.А. (2012) Исследование скорости движения дисперсных частиц в плазменном потоке. *Известия Самарского научного центра РАН*, 14(6), 143–149.
- Богданович В.И. Гришанов В.Н., Докукина И.А. и др. (2011) Высокоскоростная видеосъемка для контроля процессов и оборудования плазменного газотермического нанесения покрытий. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 1, 113–118.
- Gulyaev, I.P., Gulyaev, P.Yu., Korzhik, V.N. et al. (2015) Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying. *The Paton Welding J.*, 3-4, 36–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.04.04>.
- Борисов Ю.С. Кислица А.Н., Войнарлович С.Г. (2006) Особенности процесса микроплазменного напыления с использованием проволочных материалов. *Автоматическая сварка*, 4, 26–31.
- Полущенко В.С., Пузряков А.Ф. (1978) Определение максимальной скорости плавления проволоки в плазменной струе. *Тез. докл. VII Всесоюз. совещ. Теория и практика газотермического нанесения покрытий*, сс. 104–107.
- Voinarovych, S.G., Alontseva, D.L., Kyslytsia, O.N. et al. (2021) Fabrication and characterization of Zr microplasma sprayed coatings for medical applications. *Advances in materials science*, 2(68), 93–105. DOI: <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0013>.
- Ющенко К.А., Борисов Ю.С. Кузнецов В.Д. та ін. (2007) *Інженерія поверхні*. Київ, Наукова думка.
- Кудинов В.В. (1977) *Плазменные покрытия*. Москва, Наука.
- Гайко Г.В., Підгаєцький В.М., Сулима О.М. та ін. (2022) Інститут травматології та ортопедії НАН України. *Ревізійний стегновий компонент ендопротеза з безцементною фіксацією*. Україна, Пат. 150555.

References

- Darut, G., Liao, H., Coddet, C. et al. (2015) Steel coating application for engine block bores by Plasma Transferred Wire Arc spraying process. *Surf. and Coat. Technol.*, 268(25), 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.018>.
- O'Neil, N., Syed Kabir A. (2020) Pulsed waterjet roughening of cast iron and aluminum alloy for automotive engine remanufacturing with plasma transferred wire arc coating. *Coatings*, 10(9), 864. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10090864>.
- Zhang, J., Dulal Saha C., Jahed, H. (2021) Microstructure and mechanical properties of plasma transferred wire arc spray coating on aluminum cylinder bores. *Surf. and Coat. Technol.*, 426(25), 127757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127757>.
- Baldaev, L.Kh., Borisov, V.N., Vakhalin, V.A. (2004) *Thermal spraying*. Ed. by L.Kh. Baldaev. Moscow, Market DS [in Russian].
- Kuzmin, V.I., Gulyaev, I.P., Sergachev, D.V. et al. (2021) Application of functional coatings by supersonic thermal plasma flows. *J. of Physics Conf. Series* 2131(5), 052053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052053>.
- Meeß, J., Anasenzl, M., Ossenbrink, R. et al. (2022) Influence of Particle Velocities on Adhesion Strength of Cold Spray Inner Diameter Coatings. *J. Thermal Spray Technol.*, 31, 2025–2038. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01439-4>.
- Krasnov, A.N., Sharivker, S.Yu., Zilberberg, V.G. (1970) *Low-temperature plasma in metallurgy*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Karp, I.N., Rudoj, A.P. (1991) Influence of speed of steel wire feeding on dispersion of metal by air jet. *Avtomatich. Svarka*, 10, 36–38 [in Russian].
- Voinarovich, S.G., Alontseva, D.L., Khodzhanov, A.P. et al. (2021) Influence of parameters of microplasma spraying zirconium coatings on sprayed material losses and porosity of coatings. *Vestnik KazNAEN. Seriya Fizicheskaya*, 79(4), 8296.
- Alontseva, D., Ghassemieh, E., Voinarovych, S. et al. (2020) Manufacturing and characterization of robot assisted microplasma multilayer coating of Titanium implants. *Johnson Matthey Technol Rev*, 64(2), 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320X15737283268284>.
- Mauer, G., Vaßen, R., Stöver, D. (2007) Comparison and Applications of DPV-2000 and Accuraspray-g3 diagnostic Systems. *J. Thermal Spray Technol.*, 16(3), 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9047-2>.
- Gulyaev, P.Yu., Dolmatov, A.V., Popov, V.A. et al. (2012) Methods of optical diagnostics of particles in high-temperature flows. *Polzunovskiy Vestnik*, 2/1, 4–7 [in Russian].
- Dokukina, I.A. (2012) Study of movement speed of dispersion particles in plasma flow. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*, 14(6), 143–149 [in Russian].
- Bogdanovich, V.I., Grishanov, V.N., Dokukina, I.A. et al. (2011) High-speed video filming for control of process and equipment of plasma thermal spraying of coatings. *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 1, 113–118 [in Russian].
- Gulyaev, I.P., Gulyaev, P.Yu., Korzhik, V.N. et al. (2015) Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying. *The Paton Welding J.*, 3-4, 36–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.04.04>.
- Borisov, Yu.S., Kislitsa, A.N., Voinarovich, S.G. (2006) Peculiarities of the process of microplasma wire spraying. *The Paton Welding J.*, 4, 21–25.
- Polushchenko, V.S., Puzryakov, A.F. (1978) Determination of maximal speed of wire melting in plasma jet. In: *Abstr. of Papers of 7th All-Union Meet. on Theory and Practice of Thermal Coating Deposition*, 104–107 [in Russian].
- Voinarovych, S.G., Alontseva, D.L., Kyslytsya, O.N. et al. (2021) Fabrication and characterization of Zr microplasma sprayed coatings for medical applications. *Advances in Materials Sci.*, 2(68), 93–105. DOI: <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0013>.
- Yushchenko, K.A., Borysov, Yu.S., Kuznetsov, V.D. et al. (2007) *Surface engineering*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Kudinov, V.V. (1977) *Plasma coatings*. Moscow, Nauka [in Russian].
- Gaiko, G.V., Pidgaetskyi, V.M., Sulyma, O.M. et al. (2022) *Revision hip component of endoprosthesis with cement-free fixation*. Ukraine Pat. 150555 Institute of Traumatology and Orthopedics, NANU [in Ukrainian].

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF VELOCITY OF ZIRCONIUM PARTICLES IN MICROPLASMA SPRAYING

S.M. Kalyuzhny¹, V.V. Savytsky¹, S.G. Voinarovych¹, O.M. Kyslytsya¹, Z.G. Fayzramanov²¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.E-mail: serg3319@ukr.net²D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. 69 Protosanov Str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.E-mail: kanc_ekstu@mail.ru

In the work the measurement and analysis of the velocity of dispersed particles from the zirconium wire introduced into the arc gap of the microplasma jet were performed depending on the technological parameters of the spraying process. Using optical digital devices, it was found that in the mentioned studied ranges of the mode parameters, the average velocity of dispersed zirconium particles ranges from 8 ± 2.5 to 28.7 ± 4 m/s. It was established that in the case of a combination of minimum values of current ($I = 16$ A), the flow rate of plasma-forming gas ($Q_{pl} = 160$ l/h) and the sprayed wire feed rate ($V_w = 2.9$ m/min), the formation of particles with a maximum diameter of 310 μ m and an average velocity of 8 ± 2.5 m/s is provided. The use of the mentioned values of the mode parameters in the microplasma process of zirconium wire spraying will allow forming a coating with a developed surface and the most porous structure, which can be practically applied on the surfaces of endoprostheses with a cementless fixation. 21 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: microplasma coating, zirconium, dispersion, particles velocity

Надійшла до редакції 16.03.2023



Міжнародна спеціалізована виставка
Енергозберігаюче обладнання та альтернативні джерела енергії
«ISTWE»

21–22 вересня 2023 р.

Національний комплекс «Експоцентр України» - ВДНГ

<https://vdng.ua>