

ВПЛИВ СУПУТНЬОГО ОБТИСКАЮЧОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТЯ ПРИ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОМУ НАПИЛЮВАННІ ПЛАВКИМ СТРУМОПРОВІДНИМ ДРОТОМ

В.М. Коржик¹, В.Ю. Хаскін¹, М.Ю. Харламов¹, Yao Yuhui², О.І. Дем'янов¹, Д.В. Строгонов¹,
В.О. Щерецький¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, (China), E-mail: 514929948@qq.com

Стаття присвячена дослідженням технологічних особливостей плазмово-дугового напилювання плавким струмопровідним дротом-анодом. Актуальність застосування такого процесу пов'язана з можливістю напилювання безпосередньо розпилюванням дротів без необхідності виготовлення з них порошкових матеріалів. Було проведено експериментальну перевірку результатів математичного прогнозування впливу кільцевого захисного потоку стисненого повітря, супутнього запиленому плазмовому струменю, на результати плазмово-дугового напилювання компактних дротів-анодів. Встановлено ключову роль збільшення витрат цього потоку понад 20 м³/год у покращенні формування та якості покриттів, що напилюють. При напилених покриттів з компактних дротів поруватість знижувалася із підвищенням значень витрат супутнього повітряного потоку G_2 і досягненням значень цього параметра в межах 0,5...2,5 %. Проведені експерименти дозволили отримати безпоруваті покриття при напилюванні дротів з міді М2, ніхрому Х20Н80, нікелю НП1, алюміній-магнієвого сплаву АМг63. Дослідження результатів цих експериментів показали, що при збільшенні значень витрат супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 40 м³/год вигорання легуючих елементів (С, Мп) в процесі напилювання із сталевих дротів марок 65Г і 70 зменшується в середньому на 30...40 %. Збільшення параметра витрат G_2 повітряного потоку, супутнього запиленому плазмовому струменю, впливає на підвищення міцності зчеплення і зносостійкості покриттів. Так, при $G_2 = 20...40$ м³/год міцність зчеплення при відриві покриттів зі сталі 70 по нормалі досягає до 60...70 МПа, а покриттів з міді М2 – 40...55 МПа. Зносостійкість покриттів в умовах граничного тертя та стійкості при кавітаційному зношуванні при збільшенні G_2 від 0 до 40 м³/год підвищується, що проявляється у зменшенні такого зношування з 1,35 до 0,32 мг/хв. Бібліогр. 13, рис. 9.

Ключові слова: плазмово-дугове напилювання, компактні дроти-анооди, супутній потік, коефіцієнт використання матеріалу, міцність зчеплення покриття, зносостійкість

Вступ. На сьогоднішній день існує певна кількість перспективних промислових технологій нанесення функціональних покриттів [1]. У тому числі застосовують такі, що дозволяють розпилювати металеві компактні та порошкові дроти плазмово-дуговим способом. При застосуванні такого процесу відбувається дугове плавлення дроту з утворенням крапель рідкого металу в атмосфері аргону [2]. Для плазмово-дугового напилення плавкими дротами аргоніву дугу, яка горить між вольфрамовим катодом і дротом, обдувають інтенсивним супутнім повітряним потоком. Потік аргону, що обдуває дугу, подається крізь плазмотворююче сопло з невеликими витратами. У проміжок між плазмотворюючим і захисним соплами подається повітря із значними витратами [3]. Особливостями такого процесу є те, що плавлення і розпилення матеріалу дроту відбувається в захисній атмосфері аргону, а дроблення розплаву і розгін дисперсних частинок – у плазмовому струмені, обтиснутому супутнім по-

током повітря, що витікає з кільцевого зазору між соплами плазмотрона. В результаті забезпечуються мінімальні втрати на випаровування матеріалу дроту і оптимальний фракційний склад розпиленої дисперсної фази, досягнення частинками напилюваного матеріалу навколосвукової швидкості в момент зустрічі з основою, висока об'ємна концентрація напилюваних частинок і мінімальний кут розкриття запиленого плазмового потоку [4]. Проте виникає загроза насичення розплавленого матеріалу дроту киснем і азотом повітря через введення його у зону дії електричної дуги, яке може викликати збурення захисного потоку повітря і проникнення повітря у високотемпературну дугу. Також на розплавлені краплі металу впливають умови захисту запиленого струменю плазми на робочій відстані між плазмотроном і поверхнею, що напилюють [5]. Внаслідок цього хімічний склад осаджуваного покриття може значно відрізнитися від складу дроту, що подається в дугу. Для усунення

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Щерецький В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-8561-4444>, Харламов М.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-3755-814X>, Дем'янов О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-7184-3839>, Строгонов – Д.В. <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>
© В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, В.О. Щерецький, М.Ю. Харламов, О.І. Дем'янов, Д.В. Строгонов, 2022

цього явища необхідно створити надійний захист не лише зони плавлення дроту, а й всього запиленого струменю плазми. Розв'язання цієї проблеми, а також покращення експлуатаційних характеристик покриттів, що наносяться описаним способом, і міцності їх зчеплення з основою, є актуальним завданням.

Мета роботи – дослідити вплив супутнього запиленому плазмовому струменю потоку захисного газу на процес плазмово-дугового напильовання плавким дротом-анодом і на експлуатаційні характеристики покриттів, що наносяться за допомогою цього процесу.

Теоретичний аналіз впливу супутнього потоку на характеристики плазмового потоку. Для досягнення поставленої мети розв'язувалися наступні завдання: аналіз розрахункового моделювання процесу і впливу на його характеристики величини витрат супутнього газового потоку, експериментальні дослідження впливу супутнього потоку захисного газу на коефіцієнт використання матеріалу, а також на такі експлуатаційні характеристики покриття, як пористість, міцність зчеплення з основою, зносостійкість.

Згідно технологічної схеми процесу плазмово-дугового напильовання дротом-анодом тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис. 1), через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою G_1 і протікає весь струм дуги I . За початок розрахункової ділянки приймали площину $z = 0$, вважаючи, що вона знаходиться на деякій відстані від робочого торця катода. Це дозволило на першому етапі виключити з розгляду прикатодні процеси та вважати потік дугової плазми в цій площині вісесиметричним і одновимірним у напрямку осі OZ , тим самим, коректно задати вхід-

ні граничні умови. Вважається, що захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ вісесиметричним потоком під кутом α до вісі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається безструмовий інерційний рух газу.

При теоретичному аналізі процесів нагрівання та руху газу при плазмово-дуговому розпиленні дроту-анодом розрахункову ділянку можна умовно розділити на три області (рис. 1): 1 – область течії дугової плазми всередині сопла плазмотрону ($0 \leq z < Z_1$); 2 – область зовнішньої течії дугової плазми її взаємодії з потоком захисного газу ($Z_1 \leq z \leq Z_2$); 3 – область інерційного руху без струмової плазми ($z > Z_2$).

Для математичного опису процесів, які протікають при формуванні і витіканні плазмового струменя з сопла плазмотрону, приймали такі припущення:

- плазмова система, що розглядається, має циліндричну симетрію, а процеси, які відбуваються, вважаються стаціонарними;
- захисний газ подається вісесиметричним потоком через кільцевий канал;
- течія захисного газу в каналі вважається ламінарною і описується модельними залежностями;
- плазма знаходиться в стані локальної термодинамічної рівноваги, власне випромінювання плазми – об'ємне;
- основним механізмом нагрівання плазми є джоулеві тепловиділення (роботою сил тиску і в'язкою дисипацією можна знехтувати), а перенесення енергії в стовпі відбувається за рахунок те-

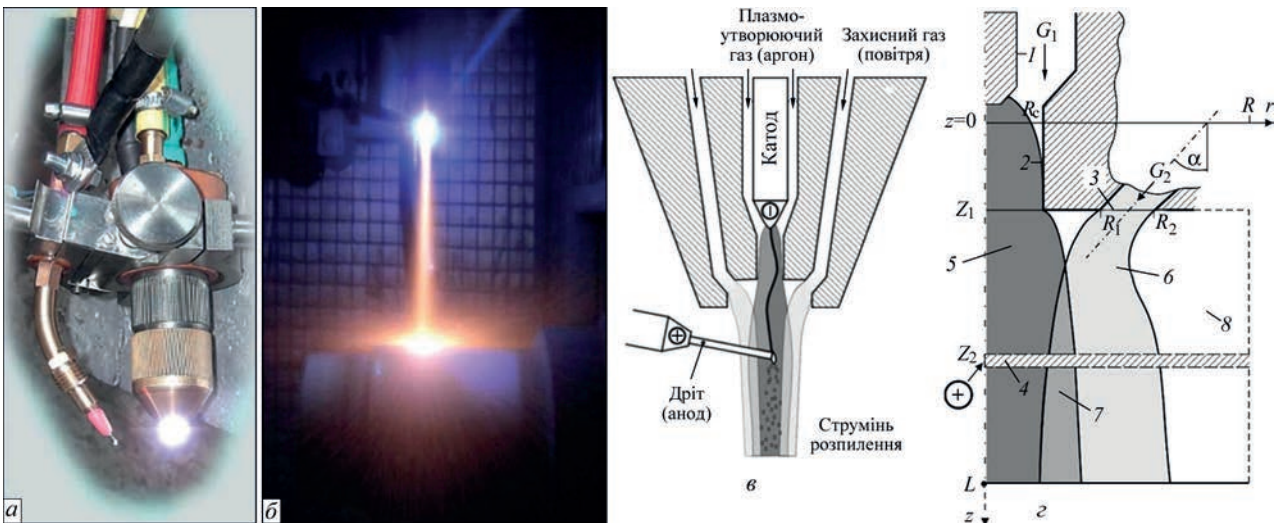


Рис. 1. Зовнішній вигляд плазмотрону (а), візуалізація (б) і технологічна схема процесу (в) та схема розрахункової математичної моделі нагрівання та руху газу при плазмово-дуговому напильованні покриттів струмопровідним дротом-анодом: 1 – катод; 2 – сопло; 3 – канал подачі газу обдування; 4 – дріт-анод; 5 – дугова плазма; 6 – газ обдування (супутній газовий потік); 7 – зона змішування; 8 – зовнішнє газове середовище

плопровідності та конвекції (природна конвекція в рахунок не приймається);

– течія плазми в'язка, дозвукова, режим течії турбулентний;

– зовнішні магнітні поля відсутні.

При побудові фізико-математичної моделі вважали, що тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис. 1), через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою $G_1 = 2\pi \int_0^{R_c} \rho u r dr$ і протікає

весь струм дуги $I = 2\pi E \int_0^{R_c(z)} \sigma r dr$. За початок розрахункової ділянки прийняли площину $z = 0$, яка знаходиться на певній відстані від робочого торця катоду. Це дозволяє вважати потік дугової плазми в цій площині вісесиметричним і одновимірним у напрямку вісі OZ . Захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ вісесиметричним потоком під кутом α до вісі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається безструмовий інерційний рух газу.

Система магнітогідродинамічних (МГД) рівнянь у наближенні турбулентного граничного шару для середніх по часу значень температури і швидкості плазми [3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \bar{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\eta} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p + \mu_0 \frac{H^2}{2} \right); \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\chi} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{j^2}{\sigma} - \psi, \quad (3)$$

де T – середня температура плазми; $\bar{v} = (\rho v + \rho' v') / \rho$, де v – середня радіальна швидкість, r – середня густина плазми, r' і v' – пульсації густини і радіальної швидкості; u – середня аксіальна швидкість плазми; p – тиск, який в межах плазмofормуючого каналу визначається як

$$p = p_{ext} - \int_z^{Z_1} \frac{dp_c}{dz} dz + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr,$$

а на відкритій ділянці розряду ($z > Z_1$) $p = p_{ext} + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr$;

$C_p(T, p)$ – питома теплоємність при постійному тиску; s – питома електропровідність плазми; j – вектор щільності електричного струму; $\psi(T, p)$ – об'ємна густина потужності власного випромінювання; $\bar{\eta}$ і $\bar{\chi}$ – повні коефіцієнти динамічної в'язкості та теплопровідності плазми, що являють

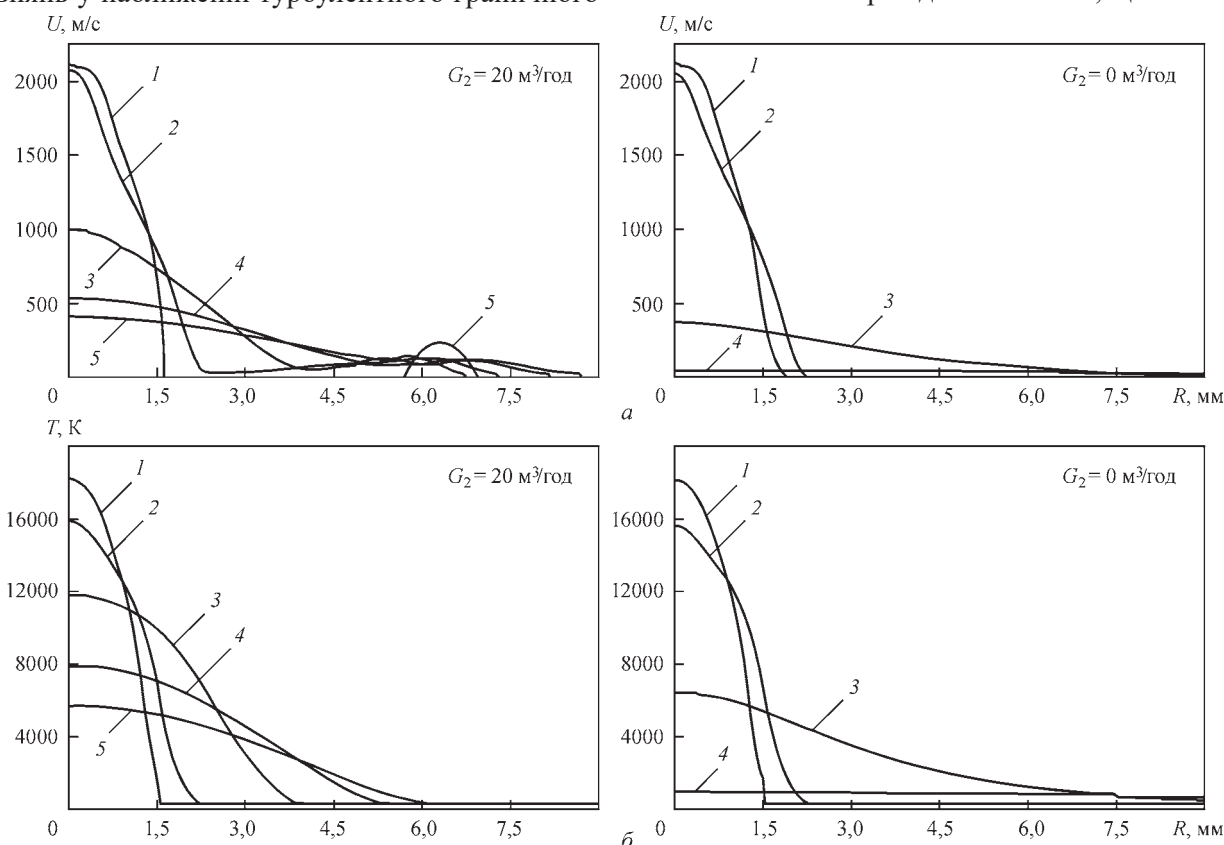


Рис. 2. Радіальні розподіли швидкості (а) і температури (б) плазми при $I = 200$ А і $G_1 = 1$ м³/год в областях [3, 4]: 1 – зріз сопла ($z = 3$ мм); 2 – область дроту-аноду ($z = 9,3$ мм); 3 – $z = 150$ мм; 4 – $z = 250$ мм

собою суми молекулярної і турбулентної в'язкості і теплопровідності відповідно; μ_0 – універсальна магнітна постійна; $H = \frac{1}{r} E \int_0^r \sigma r dr$ – азимутальна складова магнітного поля струму дуги.

Система МГД рівнянь разом із супутніми співвідношеннями, *k-ε* моделлю турбулентності і граничними умовами повністю визначає теплові та газодинамічні характеристики турбулентного потоку плазми як на дуговій, так і на інерційній ділянці течії. Ці рівняння складають основу уніфікованої математичної моделі, придатної для розрахунку просторових розподілів температури і швидкості дозвукових турбулентних плазмових потоків, які генеруються у нашому випадку плазмотроном з частково відкритою дугою при наявності супутнього газового потоку, який обдуває плазмову дугу.

За допомогою розробленої фізико-математичної моделі та програмного забезпечення для її комп'ютерної реалізації був проведений чисельний аналіз характеристик дозвукової турбулентної течії аргонної плазми, що генерується плазмотроном із плавким дротом-анодом при різних режимах його роботи (рис. 2, 3). Даний аналіз показав, що рівень витрат G_2 газового потоку, супутнього запиленому плазмовому, досить вагомо впливає на швидкість u і температуру T останнього. Із збільшенням величини G_2 величини u і T зростають прямо пропорційно. Доцільно використовувати супутній потік газу з витратами $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$ і більше.

В результаті чисельних досліджень в роботах [3, 4] встановлено, що обдування плазмового струменя супутнім потоком холодного газу перешкоджає його розширенню і суттєво збільшує його протяжність. Так, на відстані близько 50 мм від зрізу сопла плазмотрона ширина ядра плазмового потоку, що не обдувається захисним газом, приблизно в 2 рази перевищує аналогічний показник для струменя, що обдувається [3]. Концентрація аргону у високотемпературному ядрі плазмового стру-

меня, який обдувається захисним супутнім газом, лишається високою на значних відстанях (близько 0,5 на відстані 150 мм від зрізу сопла) [4]. В результаті плазмовий струмінь, що обдувається, значно довше зберігає свій імпульс та енергію і практично не змішується з супутнім газом.

Отже, з наведених в роботах [3, 4] чисельних розрахунків видно, що технологічний прийом застосування супутнього потоку, що обтискає плазмовий струмінь, суттєво впливає на характеристики запиленого плазмового струменя. Для всебічної оцінки доцільності застосування цього прийому в процесі плазмово-дугового напилення дротами-анодами необхідно більш повно дослідити його вплив як на розподіл температури і швидкості плазми, так і на структуру і властивості напилених покриттів із різних типів дровових матеріалів.

Методика експерименту. Технологічні експерименти з визначення впливу супутнього потоку на експлуатаційні властивості одержуваних покриттів проводили виходячи з наведених вище розрахункових рекомендацій. Для цього було розроблено лабораторний стенд на базі установки Plazer 30PL-W (модернізованої серійної установки УН-126) [6], яка була доукомплектована обладнанням для досліджень мікрOMETALURGIYINIH процесів, що включало тепловізійну та оригінальну відеооптичну систему фіксації процесу напилення [7–10]. В якості основи, що напилювали, використовували вуглецеву сталь марки сталь 20 (ГОСТ 16523-97). На пластини з цієї сталі напилювали компактні дроти діаметром 1,2...1,6 мм зі сталі 70 (ГОСТ 103-2006), 65Г (ГОСТ 103-2006), 18Х15Н3М (ГОСТ 103-2006), ніхрому Х20Н80 (ГОСТ 12766.1-90), міді М2 (ГОСТ 859-2001) і алюмінієвого сплаву АМг63 (ГОСТ 4784-97). Дріт з технічного нікелю НП1 (ГОСТ 492-2006) напилювали на високоміцний чавун із шаровим графітом ВЧ 35 (ГОСТ 7293-85).

Для оцінки міцності зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$ із основою використовували величину руйнівного напруження в композиції «покриття–основа» при

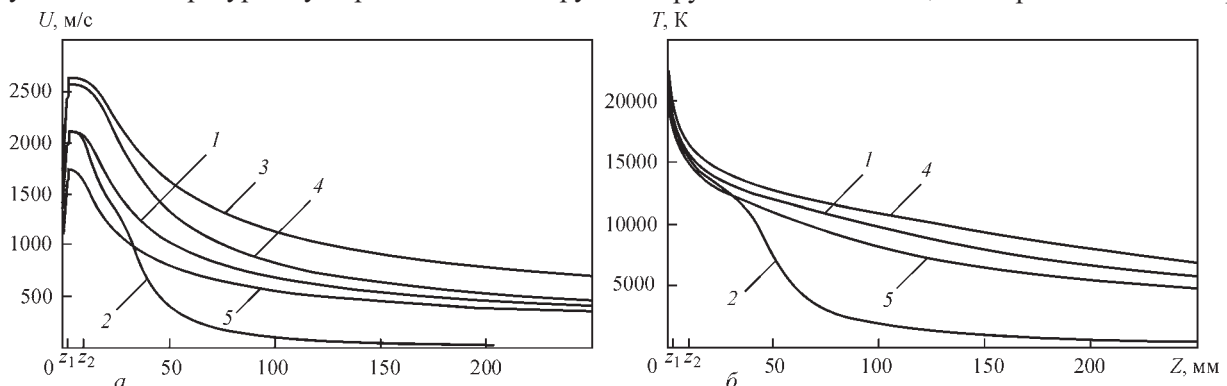


Рис. 3. Поздовжні зміни швидкості (а) і температури (б) плазми на вісі струменя за різних режимів роботи плазмотрона [3, 4]: 1 – $I = 200 \text{ A}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; 2 – $I = 200 \text{ A}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 0 \text{ м}^3/\text{год}$; 3 – $I = 200 \text{ A}$, $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; 4 – $I = 260 \text{ A}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$; 5 – $I = 160 \text{ A}$, $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$

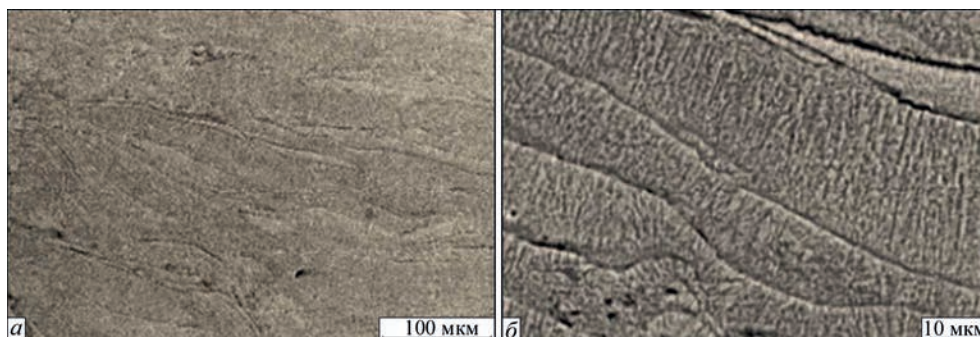


Рис. 4. Мікроструктура безпоруватого покриття із мідного дроту марки М2: а – до; б – після травлення

нормальному відриві, визначену за методикою «конусного штифта» [11]. Тріботехнічні випробування покриттів проводили за допомогою машини тертя 2070 СМТ-1 в умовах з обмеженим змащенням і без змащення по схемах «диск із покриттям – колодка (чавун СЧ-20, сталь 40Х, мідноазбестовий сплав, сталь 45)», «циліндр (чавун СЧНМД) – кільце (покриття)», «площина (сталь 20 – після цементації, бронза, СЧ-20) – покриття»; «диск – площина» (методика Амслера), а також при зворотньо-поступальному русі з амплітудою 61 мм, $V = 0,023$ м/с, $P = 11$ МПа [12]. Металографічні дослідження покриттів здійснювали на оптичних мікроскопах МІМ-7, МІМ-8, Neophot-23 при збільшенні до $\times 1000$. Склад речовин для травлення і режими травлення полірованих зразків вибирали відповідно до рекомендацій [13].

Стійкість при кавітаційному зношуванні визначали методом магнітострикційної вібрації. Зразки для випробувань готували відповідно до вимог стандарту ASTM G32-10. Випробування проводили при частоті $20 \pm 0,1$ кГц, амплітуді 55 ± 3 мкм і потужності ультразвукового генератора 500 Вт. В якості випробувального розчину використовувалася вода.

Аналіз експериментальних результатів. В якості супутнього захисного газу з витратами G_2 від 0 до 40 м³/год використовували стиснене повітря. Спочатку визначили вплив величини витрат G_2 на параметри технологічного режиму напилювання, зокрема, на коефіцієнт використання матеріалу (КВМ). Для цього змінювали величину G_2 , лишаючи інші параметри постійними: витрата плазмоутворюючого газу (аргону) $G_1 = 1,5$ м³/год; струм дуги $I = 200$ А; дистанція напилювання 160 мм; дріт-анод зі сталі 70 (діаметром 1,6 мм). Величину КВМ визначали за формулою: $\text{КВМ} = (m_c/m_w) \cdot 100$ %, де m_c – маса напиленого покриття, нанесеного за задану одиницю часу; m_w – маса дроту-аноду, розпиленого за задану одиницю часу. Було встановлено, що із збільшенням величини G_2 від 0 до 20 м³/год КВМ також поступово збільшується від 52 до 72 %. При $G_2 \geq 20$ м³/год КВМ перестає зростати і лишається стабільним – порядку 72 %.

За результатами подальшого проведення експериментів встановлено, що при збільшенні значень витрат G_2 від 0 до 40 м³/год ступінь вигорання легуючих елементів (С, Мn) в процесі напилювання із сталевого дроту 70 зменшується в середньому на 30...40 % порівняно із початковим хімічним складом цього дроту. При напилюванні дроту із нержавіючої сталі 18Х15Н3М вміст таких легуючих елементів, як Ni, Мо, W в покритті, в порівнянні з їх вмістом в напилюваному дроті, лишається практично незмінним. Встановлено, що при значеннях $G_2 = 20...40$ м³/год вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами із підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80 і АМг63, близькі до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покритті менший в середньому в 1,5...2,0 рази.

Напилені покриття, отримані плазмово-дуговим розпиленням мідного дроту-аноду марки М2, мають щільну шарувату структуру, характерну для плазмових покриттів (рис. 4). Значення поруватості в основному знаходиться в межах 0,5...2,5 %. Встановлена тенденція до пониження цього показника із підвищенням значень витрат супутнього повітряного потоку. При значеннях $G_2 = 20...40$ м³/год, одночасно з оптимізацією таких параметрів як сила струму, витрата і тиск плазмоутворюючого газу, дистанція напилювання тощо, отримано безпоруваті покриття при напилюванні дротів із міді М2 (рис. 4), нержавіючої сталі (рис. 5), ніхрому, нікелю (рис. 6), алюміній-магнієвого сплаву АМг63.

Товщина ламелей в покритті в середньому складає 8...30 мкм, границі між ламелями бездефектні (рис. 5). Це непрямо свідчить про формування металургійного зв'язку між ними і реалізацію сукупності процесів мікрозварювання між раніш затверділими шарами в покритті та напилюваними розплавленими частками. Формування такого зв'язку є можливим лише за умов підвищення швидкості запиленого плазмового струменю при його пришвидшенні супутнім потоком. Ще одним проявом ефективності впливу

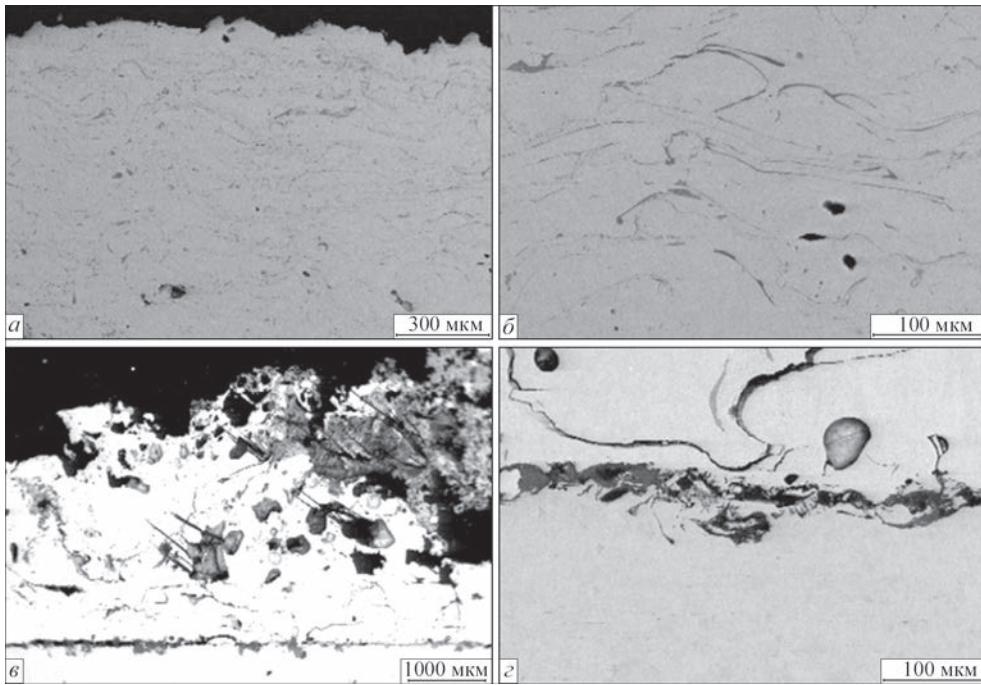


Рис. 5. Мікроструктури шарів покриттів, одержаних плазмово-дуговим розпиленням рухомого дроту-аноду з нержавіючої сталі 18X15H3M, при витратах обтискаючого плазму супутнього повітряного потоку $G_2 = 40 \text{ м}^3/\text{год}$ (а, б) і $G_2 = 5 \text{ м}^3/\text{год}$ (в, г)

супутнього потоку на процес плазмово-дугового напилювання є мінімізація утворення пор в одержаних шарах, яка чітко простежується при порівнянні результатів напилювання із різними витратами G_2 супутнього повітряного потоку (рис. 6).

При визначенні за штировою методикою міцності зчеплення напилених досліджуваним плазмово-дуговим способом покриттів з основою встановлено, що на величину цього показника впливають витрати G_2 супутнього повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона. Приклад впливу витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$, отриманих плазмово-дуговим напилюванням дротів (діаметром 1,6 мм) зі сталі 70 і міді М2 (відрив по нормалі, основа – сталь 20) наведено на рис. 7.

На міцність зчеплення напилених покриттів з основою впливає також сила струму I плазмової дуги. При плазмово-дуговому напиленні дроту

зі сталі 70 із підвищенням сили струму міцність зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$ (відрив по нормалі, основа – сталь 20) спочатку зростала, а під кінець дещо зменшувалася. Напилювання при цьому проводили із наступними параметрами режиму: витрата плазмоутворюючого газу (аргону) $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$; витрата супутнього повітряного потоку, $G_2 = 40 \text{ м}^3/\text{год}$; дистанція напилювання 160 мм. Порівняння впливу на міцність зчеплення з основою параметрів G_1 і G_2 показало, що останній є більш вагомим.

Встановлено, що технологічний параметр витрати G_2 супутнього кільцевого повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона, впливає на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкість при кавітаційному зношуванні. Так, наприклад, виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкість при кавітаційному зношуванні при зростанні G_2

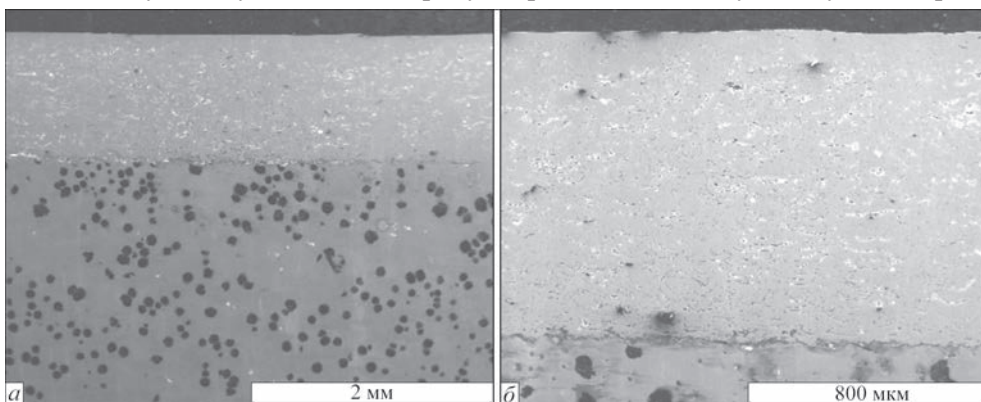


Рис. 6. Безпористе покриття, отримане плазмово-дуговим напилюванням нікелевого дроту НП1 (основа – високоміцний чавун із шаровим графітом ВЧ 35)

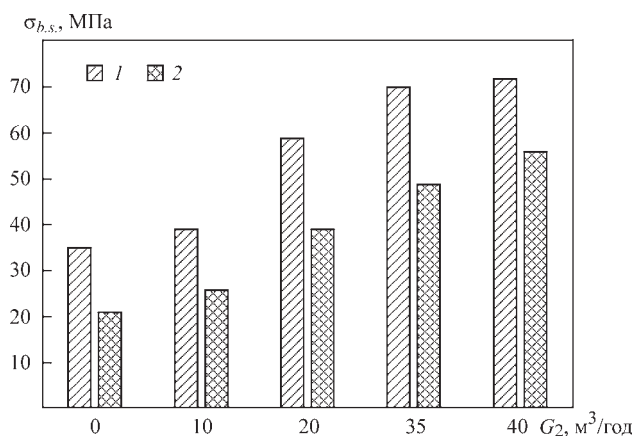


Рис. 7. Вплив витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність $\sigma_{b,s}$ зчеплення покриттів із основою (сталь 20): 1 – сталь 70; 2 – мідь М2

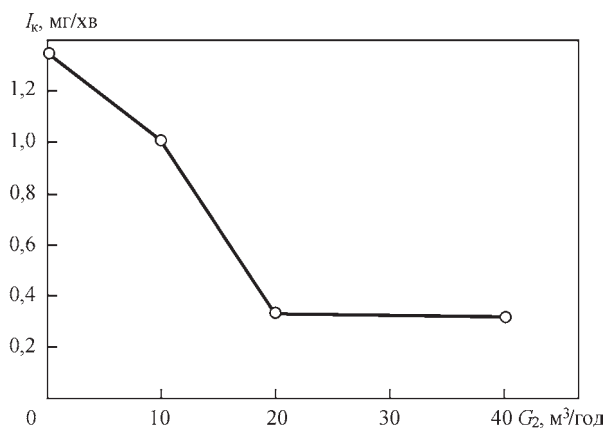


Рис. 8. Зміна інтенсивності кавітаційного зношування I_k залежно від витрат супутнього потоку G_2

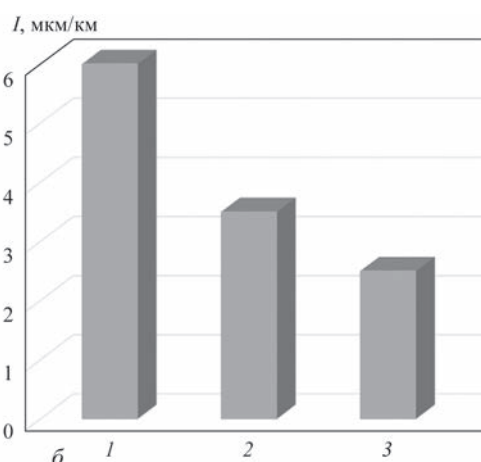
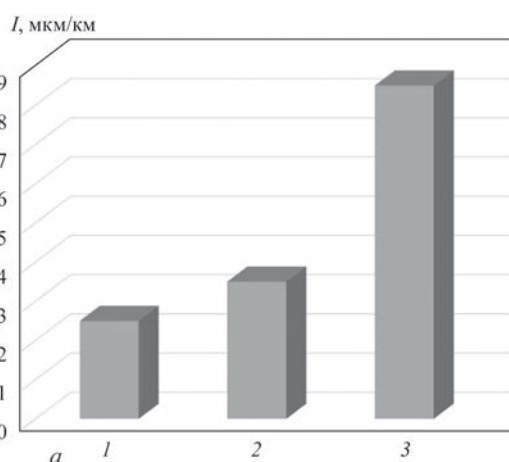


Рис. 9. Інтенсивність зношування I плазмово-дугових покриттів, одержаних розпиленням дротів-анодів (контртіло – сталь 40Х; навантаження $P = 10$ МПа; швидкість $V = 1$ м/с; змащування – масло НС20, 30 крапель/хв; машина тертя 2070 СМТ-1): а – із сталей 65Г (1) і 70 (2) при $G_2 = 20$ м³/год у порівнянні зі сталлю 20 після цементації (3); б – із сталі 70 при витратах супутнього потоку: $G_2 = 5$ м³/год (1); 20 (2); 40 (3)

від 0 до 35...40 м³/год (рис. 8). Це можна пояснити підвищенням адгезійної міцності між шарами покриттів при збільшенні G_2 .

Проведення триботехнічних випробувань покриттів, нанесених плазмово-дуговим розпиленням компактних металевих дротів-анодів, показало позитивний вплив збільшення витрат G_2 супутнього потоку. За умов виконання тертя з обмеженим змащенням по схемах «диск із покриттям – колодка сталь 40Х» було встановлено, що нанесені при $G_2 = 20$ м³/год покриття з дротів зі сталей 65Г і 70 мають стійкість на 60...75 % більшу за сталь 20 у стані після цементації (рис. 9, а). При зменшенні витрат супутнього потоку ($G_2 = 5$ м³/год) зносостійкість покриттів зменшується, а при збільшенні ($G_2 = 40$ м³/год) – зростає (рис. 9, б).

Висновки

1. Дослідна перевірка результатів математичного прогнозування впливу кільцевого захисного потоку стисненого повітря, супутнього запиленому плазмовому струменю, на результати плазмово-дугового напилювання компактних дротів-анодів

показала ключову роль збільшення витрат цього потоку понад 20 м³/год у покращенні формування та якості покриттів, що напилюють.

2. Встановлена тенденція до зниження поруваності напилених покриттів з підвищенням значень витрат супутнього повітряного потоку G_2 і досягнення значень цього параметру в межах 0,5...2,5 %, а при $G_2 = 35...40$ м³/год. Отримано безпоруваті покриття при напилюванні дротів з міді М2, ніхром Х20Н80, нікелю НП1, алюміній-магнієвого сплаву АМг63.

3. Підтверджено, що при збільшенні значень витрат супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 20...40 м³/год вигорання легуючих елементів (С, Мn) в процесі напилювання із сталевих дротів марок 65Г і 70 зменшується в середньому на 30...40 %. При цьому вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких матеріалів дротів із елементами з підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80 і АМг63, близькі до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дро-

ту М2 цей показник в покритті менший в середньому в 1,5...2,0 рази.

4. Встановлено вплив збільшення параметру витрат G_2 повітряного потоку, супутнього запиленому плазмовому струменю, на підвищення міцності зчеплення і зносостійкості покриттів. Показано, що при $G_2 = 20...40$ м³/год міцність зчеплення при відриві покриттів зі сталі 70 по нормалі досягає до 60...70 МПа, а покриттів з міді М2 – 40...55 МПа. Виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та стійкості при кавітаційному зношуванні при зростанні G_2 від 0 до 35...40 м³/год.

Список літератури/References

- Babiak, Z., Wenz, T., Engl, L. (2006) Fundamentals of Thermal Spraying, Flame and Arc Spraying. *Modern Surface Technology*, CHAPTER 8, 119–136. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527608818.ch8>
- Kawaguchi, Y., Miyazaki, F., Yamasaki, M. et al. (2017). Coating Qualities Deposited Using Three Different Thermal Spray Technologies in Relation with Temperatures and Velocities of Spray Droplets. *Coatings*, 7, 27, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings7020027>
- Харламов М.Ю., Кривцун І.В., Коржик В.Н. и др. (2007) Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазматроном с проволокой-анодом. *Автоматическая сварка*, 12, 14–20.
Kharlamov, M.Yu., Krivtun, I.V., Korzhik, V.N. et al. (2007) Mathematical model of arc plasma generated by plasmatron with anode wire. *The Paton Welding J.*, 12, 9-14.
- Харламов М.Ю., Кривцун І.В., Коржик В.Н., и др. (2008) Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазматроном с проволокой-анодом. *Там же*, 6, 19–24.
Kharlamov, M.Yu., Krivtun, I.V., Korzhik, V.N. et al. (2008) Effect of the type of concurrent gas flow on characteristics of the arc plasma generated by plasmatron with anode wire. *The Paton Welding J.*, 6, 14-18.
- Ab, O. (2015) Atmospheric plasma spray process and associated spraying jet. *International Conference on Thermal Spraying*, 77, 012008, 35–42.
- Коржик В.Н., Короб М.Ф. (2012) Механизированная линия Plazer 30PL-W для плазменно-дугового проволочного напыления покрытий на крупногабаритные детали типа «вал». *Сварщик*, 4, 86, 13–15.
Korzhik, V.N., Korob, M.F. (2012) Mechanized line Plazer 30PL-W for plasma-arc wire spraying of coatings on large-sized parts of “shaft” type. *Svarshchik*, 4(86), 13–15 [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.
- Gulyaev, I., Dolmatov, A., Kharlamov, M. et al. (2015) Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(11), 1566–1573.
- Dolmatov, A.V., Gulyaev, I.P., Gulyaev, P.Yu., Jordan, V.I. (2016) Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 110, 012057, 1–6.
- Dolmatov, A.V., Gulyaev, I.P., Jordan, V.I. (2015) The optical control system of dispersed phase properties in thermal spray process. *Ibid*, 81, 012041. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/81/1/012041>
- Лунев В.М., Немашкало О.В. (2010) Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения. *Физическая инженерия поверхности*, 8, 1, 64–71.
Lunev, V.M., Nemashkalo, O.V. (2010) Adhesion characteristics of coatings and methods of their measurement. *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, 8(1), 64–71 [in Russian].
- Ashok Kumar, R.T., Nagendra, I.J., Uvaraj, Naik (2021) A Study on Tribological Behavior of Thermally Sprayed Coatings. *Journal of Advancements in Material Engineering*, 6, 1, 1–11.
- Коваленко В.С. (1981) *Металлографические реактивы. Справочник*. Москва, Металлургия.
Kovalenko, V.S. (1981) *Metallographic reagents. In: Refer. book*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

INFLUENCE OF ACCOMPANYING COMPRESSING AIR FLOW ON THE COATING STRUCTURE AND PROPERTIES IN PLASMA-ARC SPRAYING BY CONSUMABLE CURRENT-CONDUCTING WIRE

V.M. Korzhyk¹, V.Yu. Khaskin¹, M.Yu. Kharlamov¹, Yao Yuhui², O.I. Demianov¹, D.V. Stroganov¹, V.O. Shcheretskiy¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, (China), E-mail: 514929948@qq.com

The paper is devoted to studying the technological features of plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire-anode. The relevance of applying such a process is related to the possibility of spraying directly by atomization of wires without the need to make powders from them. Experimental verification of the results of mathematical prediction of the influence of annular protective flow of compressed air, accompanying the particle-loaded plasma jet, on the results of plasma-arc spraying by compact wire anodes was performed. The key role of increasing this flow rate above 20 m³/h for improvement of the spray-deposited coating formation and quality was established. In spraying of coatings from compact wires porosity decreased with increase of the values of flow rates of accompanying air flow G_2 , and achievement of this parameter values within 0.5...2.5 %. Conducted experiments allow producing porefree coatings in spraying with wires from M2 copper, Kh20N80 nichrome, NP1 nickel, AMg63 aluminium-magnesium alloy. Studying these experimental results showed that at increase of the rate of accompanying protective air flow G_2 from 0 to 40 m³/h, the loss of alloying elements (C, Mn) during spraying by steels wires of 65G and 70 grades decreases by 30...40 % on average. Increase of the parameter of rate G_2 of the air flow accompanying the particle-loaded plasma jet influences improvement of the coating adhesion strength and wear resistance. So, at $G_2 = 20...40$ m³/h the adhesion strength at tearing off of coatings from steel 70 along the normal reaches 60...70 МПа, and that of coatings from M2 copper is 40...55 МПа. Wear resistance of coatings under the conditions of boundary friction and resistance at cavitation wear increases at G_2 increase from 0 to 40 m³/h, which is manifested in reduction of such wear from 1.35 to 0.32 mg/min. 13 Ref., 9 Fig.

Keywords: plasma-arc spraying, compact wires-anodes, accompanying flow, material utilization factor, coating adhesion strength, wear resistance

Надійшла до редакції 10.12.2021