

УДК 622.276.054

**МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА КОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ
ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ**

*В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, М. М. СТУДЕНТ, І. М. ПОГРЕЛЮК,
О. З. СТУДЕНТ, Х. Р. ЗАДОРЖНА*

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено механічні властивості, хімічну мікрогетерогенність та корозійну тривкість у 3%-му водному розчині NaCl електродугових покриттів з порошкових дротів (ПД) з різним складом шихти. Встановлено, що покриття з ПД суттєво неоднорідні за хімічним складом проти отриманих зі суцільних дротів. Адже подрібнені повітряним струменем краплини розплаву ПД, з яких формується покриття, різняться за хімічним складом. Такий градієнт спричинений неповним розплавленням і змішуванням складників шихти та сталеві оболонки в дузі між торцями ПД під час електродугового напилювання покриттів. Запропоновано додавати до шихти ПД порошки, які забезпечили би в краплинах розплаву необхідну кількість хрому, бору та вуглецю. Зокрема, порошки ферохрому, карбіду бору (B_4C), ферохромбору, феросплавів ($FeSi$, $FeMn$) та самофлюсу ПГ-10Н-01, які підвищують гомогенність розплаву ПД та активізують утворення евтектик між складниками шихти ПД 90Х17РГС та ПД 90Х17РЗГС. Це забезпечить нижчу мікрогетерогенність та високу корозійну тривкість покриттів, яка наближатиметься до властивості нержавній сталі Х18Н9Т.

Ключові слова: *дугове напилювання, порошкові дроти, покриття, мікрогетерогенність, мікротвердість, корозійна тривкість.*

Mechanical properties, chemical microheterogeneity and corrosion resistance of arc sprayed coatings made of cored wires (CW) with different charge compositions in a 3% aqueous NaCl solution were studied. The CW coatings are characterized by high heterogeneity in chemical composition, which distinguishes them from coatings obtained by spraying with solid wires. The chemical composition of molten drops of CW, crushed by an air jet, and forming a coating, varies significantly. This gradient is caused by incomplete fusion and mixing of the components of the charge and the steel shell of the CWs in the arc between their ends during arc spraying of coatings. To ensure the required amount of chromium, boron, and carbon in the melt drops, it is suggested to add certain powders to the CW charge. In particular, the addition of various powders to the CW charge (namely ferrochrome, boron carbide (B_4C), boron ferrochrome, ferroalloys ($FeSi$, $FeMn$) and self-flux PG-10N-01) makes the CW melt more homogeneous and creates conditions for the formation of eutectic between the components charge in CWs 90Cr17BMnSi and 90Cr17B3MnSi. This made it possible to obtain arc sprayed coatings with less microheterogeneity and high corrosion resistance, close to the corresponding characteristics of Cr18Ni9T stainless steel.

Keywords: *arc spraying, cored wires, coatings, microheterogeneity, microhardness, corrosion resistance.*

Вступ. Газотермічні методи, особливо електродугове напилювання покриттів, застосовують у багатьох галузях промисловості, зокрема, для відновлення геометрії деталей машин після їх експлуатації, захисту від абразивного та газоабразивного зношування (і за кліматичних, і за технологічно обумовлених підвищених температур) [1–5].

Контактна особа: М. М. СТУДЕНТ, e-mail: student.phmi@gmail.com

Електродугові покриття (ЕДП), напилені порошковими дротами (ПД), хімічно гетерогенні, що відрізняє їх від ЕДП зі суцільних дротів. Це зумовлено різним хімічним складом краплин, що утворюються із розплаву ПД та переносяться струменем повітря до поверхні підкладки, формуючи на ній покриття. Їх гетерогенність спричинена неповним сплавленням шихти ПД зі сталеву оболонкою під час напилювання ЕДП. Зрозуміло, що гетерогенність впливатиме на фізико-механічні властивості ЕДП за різних експлуатаційних температур і, особливо відчутно, – за впливу корозивних середовищ.

Застосовуючи ПД, можна формувати ЕДП із високими експлуатаційними характеристиками [6–9] для відновлення геометрії зношених деталей машин [10–14], захисту робочих елементів і від абразивного (за кімнатних і підвищених температур) [15–19], і корозійно-абразивного зношування під час експлуатації в технологічних середовищах [20–25]. Водночас у корозивних середовищах через суттєву хімічну неоднорідність (особливо внаслідок зміни вмісту хрому від ламелі до ламелі покриття) в ЕДП виникають гальванічні пари, які сприяють корозійному пошкодженню. Тому важливо знизити хімічну гетерогенність ЕДП, сформованих розпиленням ПД, і з'ясувати, як впливає компонентний склад шихти ПД на хімічну гетерогенність ЕДП.

Методи випробувань. Для напилювання ЕДП використовували оригінальне устаткування, виготовлене у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України [1]. Вживали модельні ПД діаметром 1,8 mm з оболонкою зі сталі 20 та шихтою базових систем легування Fe–Cr–B та Fe–Cr–C–B. Параметри напилювання такі: напруга дуги 30 V, струм 150 A, дистанція напилювання 120 mm. На підкладку зі сталі 45 твердістю 300 HV_{0,3} наносили покриття завтовшки 1 mm. Сталеві зразки заздалегідь знежирювали, просушували та обробляли часточками корунду абразивно-струменевим методом.

Хімічну гетерогенність ЕДП оцінювали за коефіцієнтом мікрогетерогенності:

$$K_{mh} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n |c_{med} - c_i|}{n \times c_{med}} \right),$$

де n – кількість прямокутних ділянок площею $35 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ на поверхні покриття, у межах яких точковим мікрорентгенівським спектральним аналізом фіксували вміст кожного з елементів легування c_i в окремих ламелях та аналізом на виділеній площі – усереднений їх вміст c_{med} у ЕДП.

Залишкові напруження в покриттях визначали безпосередньо під час їх нанесення на бічну поверхню розрізаного сталевго кільця з поздовжнім розрізом, заміряючи переміщення його берегів. Когезивну міцність покриттів оцінювали за розтягу зразка, складеного з двох відрізків труби, торці яких стягували гвинтом, що проходив крізь внутрішній отвір в обох трубах. На їх бокову поверхню наносили покриття завтовшки 2...3 mm, тоді усували гвинт, яким стискали торці труб між собою і розтягували зразок аж до руйнування покриття [1]. Мікротвердість покриттів обчислювали як середнє значення 10–15 замірів на приладі ПМТ-3. Їх корозійно-електрохімічні властивості досліджували в 3%-му розчині NaCl за температури $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Характеристики корозійних процесів визначали у потенціодинамічному режимі, використовуючи вольтамперометричну систему СВА-1Б-М. Швидкість зміни потенціалу 2 mV/s. Вимірювали за триелектродною схемою: робочий електрод – напилене покриття на сталі 45, електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1, допоміжний – платиновий стрижень. За поляризаційними залежностями визначали густину струму корозії (i_{cor}) і її швидкість. Для електрохімічних досліджень робочу частину поверхні зразків обмежували циліндричними комітками з перерізом 2 cm^2 .

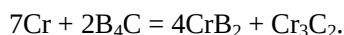
Вибір компонентів шихти ПД для мінімізації хімічної мікрогетерогенності ЕДП. Щоб забезпечити високу зносо- та корозійну тривкість ЕДП в агресивних середовищах, необхідно знизити їх хімічну мікрогетерогенність та досягти достатньо високого вмісту хрому (понад 12 wt%) у кожній ламелі. Для цього до шихти ПД додавали інгредієнти, які сприяли формуванню евтектик з низькою температурою плавлення, що давало можливість розчиняти такі тугоплавкі складники шихти ПД, як карбіди, бориди, тугоплавкі метали та сплави.

Для обґрунтування оптимального складу шихти ПД досліджували п'ять варіантів ПД з різним її вмістом (див. таблицю), додаючи тугоплавкі складники, що містили хром, бор, вуглець (хром, ферохром марки ФХ800, B_4C , ферохромбор марки ФХБ-2), і порошки феросплавів FeSi, FeMn та ПГ-10Н-01 (Ni–Cr–B–Si–C–Fe), які знижували температуру плавлення шихти (через утворення евтектик), гомогенізували склад розплаву ПД та зменшували мікрогетерогенність ЕДП (рис. 1). Відхилення вмісту хрому в ламелях від середнього у покритті становило 5...10%, що було достатнім для забезпечення його концентрації у кожній з них понад 12 wt%.

Механічні властивості електродугових покриттів із ПД з різним компонентним складом шихти

Характеристики ЕДП	Хімічний склад ПД (компонентний склад шихти)				
	№ 1, 90Х17Р2ГC (Cr + B_4C + FeSi + FeMn)	№ 2, 20Х16Р3Н2ГC (FeCrB ₂ + Cr + ПГ-10-Н-01)	№ 3, 90Х17РГC (FeCrB ₂ + ФХ + Cr + FeSi + FeMn)	№ 4, 90Х17Р3ГC (Cr + B_4C + FeSi + FeMn)	№ 5, Х17Р3ГC (FeCrB ₂ + Cr + FeSi + FeMn)
Середній вміст Cr у ламелях ЕДП, wt%	17,1	16,8	17,3	17,0	17,1
Коефіцієнт хімічної мікрогетерогенності K_{mh}	0,07	0,06	0,05	0,1	0,06
Залишкові напруження розтягу, МПа	43,6	41,9	76,9	66,8	61,7
Когезивна міцність, МПа	140	100	185	150	80
Мікротвердість $HV_{0,3}$	610	690	625	595	700

Щоб забезпечити високу твердість покриття, шихту ПД першого варіанта (див. таблицю) формували з порошків ферохромбору FeCrB₂, а другого – з хромбору CrB₂, який утворювався внаслідок взаємодії між компонентами шихти під час плавлення ПД та напильовання покриттів за реакцією



Додавання до шихти ПД карбіду бору (B_4C) не забезпечило достатньої твердості ЕДП (див. таблицю), напильних ПД № 1 та 4. Причиною цього вважали, те, що реагенти взаємодіяли згідно з вище наведеною реакцією не повністю, а отже, ці окремі часточки B_4C не брали участі у формуванні покриття. При цьому когезивна міцність таких покриттів достатньо висока. Встановили, що найвищу твердість мають ЕДП з ПД № 2 та 5, до шихти яких додавали 3 wt% бору у складі порошку ферохромбору ФХБ-2. Фазовий аналіз виявив у феритній структурі ЕДП

$C_{Si}, \text{wt\%}$

$C_B, \text{wt\%}$

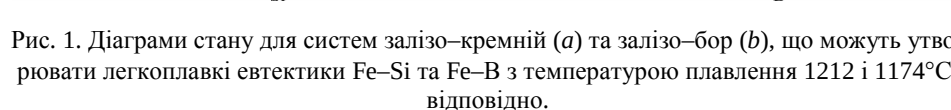
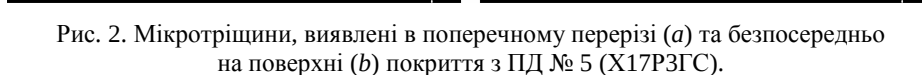


Fig. 1. State diagrams for systems iron-silicon (*a*) and iron-boron (*b*), which can form low-melting eutectics Fe-Si and Fe-B with time melting points of 1212 and 1174°C, respectively.



Середню твердість серед ЕДП мають покриття із ПД № 3. Мартенситно-аустенітна матрична фаза покриття, додатково зміцнена дрібнодисперсними вклюдженнями боридів FeCr_2B , забезпечила йому цю твердість. Такому покриттю властиві суттєво вища когезивна міцність (до 185 МПа) та значні залишкові напруження розтягу першого роду (76,9 МПа; див. таблицю). Під час кристалізації та охолодження краплин на холодній поверхні напилюваної деталі об'єм покриття зменшується, а масивніша основа чинить опір цьому, спричиняючи напруження

розтягу першого роду у поверхневих шарах ЕДП. Оскільки коефіцієнт термічного розширення мартенситу найнижчий, а аустеніту найвищий, то після утворення матричної фази мартенситу в ЕДП виникали лише незначні напруження розтягу. Такі ЕДП легше механічно обробляти за жорсткіших режимів шліфування без загрози їх відшаровування від підкладки чи виникнення в них тріщин. За наявності аустеніту залишкові колові напруження розтягу у покритті зростали.

Корозійна тривкість електродугових покриттів із розроблених ПД після попередньої експозиції в 3%-му розчині NaCl. Потенціодинамічним методом встановили закономірності взаємодії ЕДП, напилених ПД з різною шихтою із 3%-им розчином NaCl. Виявили, що за характером взаємодії усі аналізовані ЕДП з ПД лише дещо відрізнялися (рис. 3 і 4). Отже, попри відмінності ЕДП, отриманих з різних за хімічним складом ПД, їх електрохімічні параметри та характер розташування поляризаційних кривих особливо не змінювалися (рис. 3).

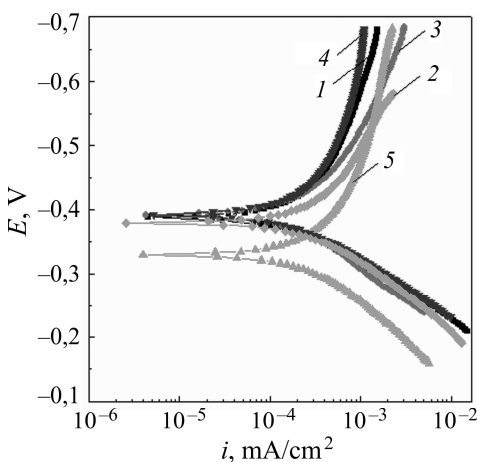


Рис. 3. Потенціодинамічні поляризаційні криві електродугових покриттів, напилених ПД різного складу (1 – ПД 90Х17Р2ГС; 2 – ПД 20Х16Р3Н2ГС; 3 – ПД 90Х17РГС; 4 – ПД 90Х17Р3ГС; 5 – ПД Х17Р3ГС), після попереднього витримування у 3-му розчині NaCl упродовж 1 h.

Fig. 3. Potentiodynamic polarization curves of arc sprayed coatings with cored wires of various compositions (1 – CW 90Cr17B2MnSi; 2 – CW 20Cr16B3Ni2MnSi; 3 – CW 90Cr17BMnSi; 4 – CW 90Cr19B3MnSi; 5 – CW Cr17B3Si), obtained after their preliminary exposure to a 3% NaCl aqueous solution for 1 h.

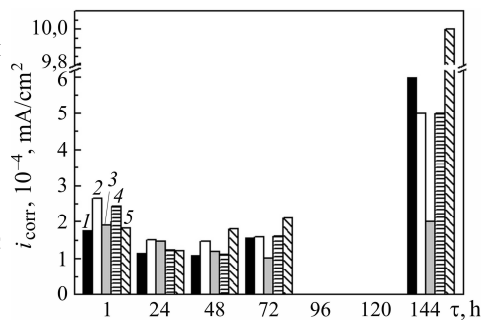
Зокрема, після витримування зразків з ЕВП в середовищі 1 h лише потенціал корозії, зафіксований для покриття з ПД № 3 з найвищим середнім вмістом хрому та найнижчим коефіцієнтом K_{mh} , суттєво змістився в бік негативніших значень проти таких для ЕДП, нанесеного ПД № 5. Потенціали корозії ЕДП, нанесених з ПД № 2 і 4 дещо позитивніші, ніж ЕДП з ПД № 3 (рис. 4). При цьому різниця за густиною струмів корозії усіх аналізованих ЕДП не перевищувала одного порядку. Послідовність розташування потенціодинамічних кривих для ЕДП з усіх аналізованих ПД після збільшення тривалості витримування зразків у 3%-му розчині NaCl (до 24 h) практично не змінилася. Водночас їх потенціал корозії змістився в бік негативніших значень на 0,3...0,4 V, порівняно із зафіксованим за експозиції 1 h (рис. 3), що зумовлено пористістю ЕДП.

За витримування у корозивному середовищі понад 72 h густина струму корозії зразків із ЕДП зростала, що свідчило про зниження корозійної тривкості через наскрізну поруватість. Адже за тривалої експозиції середовище могло проникати аж до сталеві основи і спричиняти підплівкову корозію з відшаруванням покриття від неї.

Зауважили, що частина хрому під час формування покриттів витрачалася на утворення боридів. Внаслідок цього концентрація хрому в твердому розчині окремих ламелей зменшувалася, що сприяло мікрогетерогенності покриттів через його різний вміст у них. Як наслідок з'являлась значна кількість гальванічних пар, що інтенсифікувало електрохімічну корозію, а з додаванням до шихти ПД 90Х17РГС та ПД 90Х17Р3ГС хрому, ферохрому, ферокремнію та феромарганцю вдалось мінімізувати хімічну мікрогетерогенність ЕДП, а отже, забезпечити високу корозійну тривкість, характерну нержавній сталі Х18Н9Т (10^{-4} mA/cm²).

Рис. 4. Вплив тривалості експозиції τ у 3% розчині NaCl на густину струмів корозії ($i_{\text{кор}}$), визначених за потенціодинамічними кривими для ЕДП з різних ПД (1 – 90X17P2ГС; 2 – 20X16P3H2ГС; 3 – 90X17PГС; 4 – 90X17P3ГС; 5 – X17P3ГС).

Fig. 4. Effect of exposure time τ in a 3% NaCl aqueous solution on the density of corrosion currents ($i_{\text{кор}}$), determined from potentiodynamic curves for arc sprayed coatings from various cored wires (1 – 90Cr17B2MnSi; 2 – 20Cr16B3Ni2MnSi; 3 – 90Cr17BMnSi; 4 – 90Cr17B3MnSi; 5 – Cr17B3MnSi).



ВИСНОВКИ

З додаванням до шихти ПД боровмісних компонентів – ферохромбору або суміші порошків Сг та В₄С – вдалося отримати електродугові покриття із високими твердістю та корозійною тривкістю, чим обґрунтовано можливість заміни ферохрому, пов’язану з дефіцитом його постачання. Для забезпечення повнішого сплавлення компонентів шихти ПД між собою та зі сталевією оболонкою запропоновано додавати до шихти ПД порошки феросплавів Fe–Mn, Fe–Si, які здатні взаємодіяти із її тугоплавкими складниками з утворенням легкоплавких евтектик. Обґрунтовано склад шихти ПД, що забезпечив ефективне зниження температури їх плавлення. Додаванням до шихти ПД на основі ферохромбору та ферохрому порошків ферокремнію, феромарганцю та сплаву ПГ-10Н-01 як самофлюсу забезпечено високу твердість ЕДП, знижено їх гетерогенність за вмістом хрому в різних ламелях, а отже, підвищено корозійну тривкість, яка наблизилась до властивості нержавній сталі.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.

1. Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions / M. Student, V. Hvozdetzkyi, T. Stupnytsky, O. Student, P. Marushchak, O. Prentkovskis, and P. Skačkauskas // Coatings. – 2022. – **12**. – 925 p. <https://doi.org/10.3390/coatings12070925>
2. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T. R. Stupnytskyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, and V. M. Hvozdetzkyi // Materials Science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172. DOI:10.1007/s11003-016-9939-8
3. Student M. M., Pokhmurs'ka H. V., and Zadorozhna Kh. R. Structure and wear resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo coatings obtained by supersonic flame spraying // Materials Science. – 2018. – **54**, № 5. – P. 22–29. DOI:10.1007/s11003-018-0152-9
4. Study of selected properties of thermally sprayed coatings containing WC and WB hard particles / J. Brezinová, A. Guzanová, D. Draganovská, P. O. Maruschak, M. Landová // Acta Mechanica et Automatica. – 2016. – **10**, № 4. – P. 296–299. DOI:10.1515/ama-2016-0046
5. Effect of the laser fusion of electrometallized coatings of the Fe–Cr–B–Al system on their corrosion resistance / H. Pokhmurs'ka, N. Chervins'ka, M. Student, and Kh. Zadorozhna // Materials Science. – 2006. – **42**, № 6. – P. 837–842. DOI:10.1007/s11003-006-0152-z
6. Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers-A review / K. Szymański, F. Hernas, G. Moskal, and H. Myalska // Surf. Coat. Technol. – 2015. – **268**. – P. 153–164. DOI:10.1016/j.surfcoat.2014.10.046
7. Methods for increasing the corrosion resistance of coatings deposited under a flux layer from high-chromium powder wires / Y. M. Kuskov, V. A. Zhdanov, I. O. Ryabtsev, M. M. Student, and H. H. Veselivska // Materials Science. – 2020. – **55**, № 5. – P. 710–715.

8. *Microstructural* characterization and wear properties of Fe-based amorphous-crystalline coating deposited by twin wire arc spraying / A. Arizmendi-Morquecho, A. Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, J. A. A. Martinez, G. V. Gutiérrez, K. J. M. Bello, and L. López // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2014. – Article number: ID 836739. <https://doi.org/10.1155/2014/836739>.
9. *Effect* of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings / M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. M. Hvozdet's'kyi, M. Y. Holovchuk, and M. S. Romaniv // *Materials Science.* – 2009. – **45**, № 4. – P. 481–489. DOI:10.1007/s11003-010-9205-4
10. *Restoration* and hardening of wearing parts of armored personnel carriers by electric arc spraying / S. K. Fomichev, V. N. Lopata, M. C. Ageev, and A. V. Vorona // *The 15th Int. Sci. Pract. Conf.: Quality, Standardization and Control – Theory and practice* (September 15–18, 2015, Odesa). – Kyiv: ATM of Ukraine. 2015. – P. 184–188.
11. *Village B., Rupprecht K., and Pokhmurskaya A.* Features of gas-thermal spraying with flux-cored wires // *Automatic Welding.* – 2011. – № 10. – P. 26–30.
12. *Properties* of coatings obtained by electric arc spraying for renovation of parts of machines and vehicle mechanisms / A. Lopata, M. Holovashchuk, L. Lopata, E. Solovuch, and S. Katerinich // *Problems of Tribology.* – 2022. – **27**. – P. 80–86.
13. *The effect* of compressed air pressure and stand-off distance on the twin wire arc spray (TWAS) coating for pump impeller from AISI 304 stainless steel / D. F. Fitriyana, Wahyu Caesarendra, S. Nugroho, G. D. Haryadi, M. A. Herawan, M. Rizal, and R. Ismail // *NAC 2019, Proc. 2nd Int. Conf. Nanomaterials and Advanced Composites, 2020.* – P. 119–130. DOI:10.1007/978-981-15-2294-9_11
14. *Royanov V., Zakharova I., and Lavrova E.* Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metalization // *Eastern-European J. of Enterprise Techn.* – 2017. – **6**, № 5(90). – C. 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118252>
15. *Borisov Y. and Vorzhyk N.* Composite flux cored wires for thermal spraying // *ITSC-1995*, (May 22–26, 1995, Kobe, Japan). – P. 1115–1118.
16. *Dallaire S. and Levert H.* Synthesis and deposition of TiB₂-containing materials by arc spraying // *Surf. and Coat. Technol.* – 1992. – **50**, № 3. – P. 241–248. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(92\)90007-W](https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90007-W)
17. *Effects* of powder size in cored wire on arc-sprayed metal-ceramic coatings / J. J. Fang, Z. X. Li, C. M. Qian, C. L. Ren, and J. W. Shi // *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions (ASM Int.)*. – 2007. – P. 365–370. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2007p0365>
18. *Fang J.-J., Li Z.-X., and Shi Y.-W.* Microstructure and properties of TiB₂-containing coatings prepared by arc spraying // *Appl. Surf. Sci.* – 2008. – 254(13). – P. 3849–3858. DOI:10.1016/j.apsusc.2007.12.034
19. *Study* on iron based arc spraying cored wire with TiC ceramic powders / D.-Y. He, F.-Y. Zhang, J.-M. Jiang, B.-Y. Fu, and X.-Y. Li // *ITSC 2007*. (May 14–16, 2007 Beijing, China). – P. 1145–1148. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2007p1145>
20. *Cored-wire* arc spray fabrication of novel aluminium-copper coatings for anti-corrosion/ fouling hybrid performances / L. Fang, J. Huang, Y. Liu, B. Zhang, and H. Li // *Surf. Coat. Technol.* – 2019. – 357(1). – P. 794–801. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.094>
21. *Corrosion* electrochemical behavior of arc sprayed Al coatings / Q. H. Song, Y. F. Zhang, Q. Li, Q. X. Li, C. Ju, Z. L. Wang, and J. J. Li // *J. Nanomaterials and Biostr.* – 2022. – **17**, № 3. – P. 825–837. <https://doi.org/10.15251/DJNB.2022.173.825>
22. *Performance* assessment of protective thermal spray coatings for lightweight Al brake rotor disks / D. Poirier, J.-G. Legoux, E. Irissou, D. Gallant, J. Jiang, T. Potter, and J. Boileau // *J. Therm. Spray Technol.* – 2019. – 28(2). – P. 291–304. DOI:10.1007/s11666-018-0805-0
23. *Thermal* arc spray overview / M. H. A. Malek, N. H. Saad, S. K. Abas, and N. M. Shah // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., Int. Conf. Manufact, Optimiz, Industr and Material Eng., MOIME 2013* (9–10 March 2013, Grand Hyatt, Bandung, Indonesia). – 2013. – **46**. – Article number: 012028. DOI:10.1088/1757-899X/46/1/012028
24. *Niranatlumpong P. and Koiprasert H.* Improved corrosion resistance of thermally sprayed coating via surface grinding and electroplating techniques // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – **201**, № 3–4. – P. 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.026>
25. *Corrosion* resistance of VC-FeCr and VC-FeCrCo coatings obtained by supersonic gas-flame spraying / M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, K. R. Zadorozhna, H. H. Veselivs'ka, V. M. Hvozdet's'kyi, and Y. Y. Sirak // *Materials Science.* – 2019. – **54**, № 4. – P. 535–541. DOI:10.1007/s11003-019-00214-1

Одержано 20.11.2023