# КОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ ПСЕВДОСПЛАВНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ МІДЬ–ЗАЛІЗО, ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ НАПИЛЕННЯМ

*Ю. С. БОРИСОВ, Н. В. ВІГІЛЯНСЬКА, К. В. ЯНЦЕВИЧ, І. А. ДЕМ'ЯНОВ*

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ*

Через зношування і корозію деталей збільшуються експлуатаційні витрати на різних підприємствах. Захистити їх можна шляхом електродугового напилення псевдосплавних захисних покриттів. Покриття отримано одночасним напиленням мідного та залізного дротів. Їх мікроструктуру досліджено за допомогою електронного мікроскопа, а фазовий склад – з використанням рентгенівської дифрактометрії. Виявлено, що таке покриття щільне і складається з ламелей міді та заліза з рівномірно розподіленими оксидними фазами $Cu_2O$, FeO. Його мікротвердість становить 2,1±0,7 GPa. Електрохімічні дослідження виконано в 3%-му розчині NaCl. Встановлено, що псевдосплавні покриття системи мідь–залізо товщиною 500 μm корозійнотривкі у цьому розчині.

**Ключові слова:** *псевдосплавне покриття, електродугове напилення, мікроструктура, мікротвердість, фазовий композит, корозійна тривкість.*

High wear and corrosion of parts lead to an increase in operating costs at various plants. These parts can be protected by the electric arc spraying of pseudoalloy protective coatings. The coating was obtained by simultaneous spraying of copper and iron wires. The microstructure was investigated with an electron microscope and the phase composition was assessed by X-ray diffractometry. The porosity and microhardness of the coating were also evaluated. It is shown that such coating has a dense structure and consists of Cu and Fe metallic lamellas together with homogenously distributed minor $Cu_2O$, FeO oxide phases. The microhardness of the coating is 2.1±0.7 GPa. An electrochemical test of the coating was performed in a 3% NaCl solution. It was found that the pseudoalloy coating of copper-iron system with a thickness of 500 μm have high corrosion resistance in this solution.

**Keywords:** *pseudoalloy coatings, electric arc spraying, microstructure, microhardness, phase composition, corrosion resistance.*

**Вступ.** Забезпечити корозійну тривкість деталей і конструкцій – актуально для різних галузей промисловості. Прямі втрати від корозії пов'язані з витратами на заміну конструкцій, обладнання, деталей машин, а також на антикорозійний захист, а непрямі – з простоюванням і ремонтом обладнання, усуненням наслідків виробничих аварій. Тому підвищуються вимоги до експлуатаційно-технічної надійності, довговічності та корозійної тривкості машин і металоконструкцій [1].

Під час виготовлення виробів машинобудування та металоконструкцій інженерних споруд економічно невигідно використовувати дорогі корозійнотривкі матеріали. Крім того, у багатьох випадках деталі експлуатують за підвищених навантажень, через що виникають додаткові вимоги до зносотривкості покриттів. Тому актуально розробити недорогі та прості технологічні способи, щоб сформувати високоефективні функціональні захисні шари та покриття. Найефективнішим

*Контактна особа*: К. В. ЯНЦЕВИЧ, e-mail: ycarolin@ukr.net

серед них є нанесення газотермічних захисних покриттів, що дасть можливість поліпшити експлуатаційні характеристики та підвищити ресурс роботи деталей та вузлів, а отже, збільшити міжремонтний період обладнання [2, 3].

Найпоширеніше сьогодні електродугове дротяне напилення корозійнотривких покриттів, яке економічне, високопродуктивне і використовує просте обладнання та недефіцитні матеріали [4]. Ним вдається формувати на робочій поверхні деталей покриття з поліпшеними властивостями (корозійнотривке, електро-, теплопровідне тощо) [5, 6]. До того ж можна одночасно розпилювати два різні за складом дроти, формуючи псевдосплавні покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками, оскільки поєднано властивості окремих компонентів [7–10].

Для корозійного захисту найчастіше застосовують електродугові покриття з алюмінію, цинку та псевдосплавні системи цинк–алюміній [9–11]. Однак такі покриття недостатньо стійкі під час роботи в екстремальних умовах (за граничного та сухого тертя, високих температур, значної механічної і теплової напруженості, впливу агресивного середовища) через низькі міцність і твердість. Тому активно досліджують стійкі до зношування та корозії псевдосплавні покриття систем Cu–Al, Fe–Al, Fe–Cu–Al [12–14]. Раніше встановили [15, 16], що покриття системи Cu–Fe, отримані електродуговим напиленням різнорідних дротів, володіють поліпшеними триботехнічними характеристиками та придатні на деталях, які експлуатуються в умовах сухого тертя ковзання. Тому досліджували їх корозійну тривкість.

**Методи випроб.** Покриття отримували електродуговим напиленням, одночасно розпилюючи дроти міді марки М1 та сталі Св08А суцільного перерізу діаметром 2 mm. Напилювали апаратом ЕМ-14М за таких технологічних параметрів процесу: швидкість подачі дротів 180 m/year; напруга на електродах 22 V; витрата розпилювального газу (стисненого повітря) 126 $m^3$/year; дистанція напилення 200 mm. Одержали псевдосплавні покриття з поліпшеними структурою та властивостями [14–16], які наносили на зразки зі сталі Ст.3 завтовшки 500 μm.

Для аналізу мікроструктури покриття використовували оптичний мікроскоп Neophot-32 з пристосуванням для цифрового фотографування. Пористість визначали, аналізуючи зображення за допомогою програми “Image-ProPlus”. Мікротвердість вимірювали приладом ПМТ-3. Фазовий склад покриття досліджували дифрактометром ДРОН-УМ-1. Електрохімічні властивості вивчали потенціостатичним методом з допомогою потенціостата П-5827М за швидкості розгортання 0,2 mV/s. Для дослідження електрохімічної тривкості використовували притискну електрохімічну комірку, яка забезпечувала доступ електроліту до покриття тільки з одного боку, через що зникала потреба перекривати неробочу зону зразка. Стаціонарні потенціали вимірювали відносно хлоридсрібного електрода та перераховували у водневу шкалу потенціалів, допоміжним електродом слугувала платина.

Електрохімічні дослідження виконували в 3%-му розчині NaCl на сталі Ст.3 без покриття та з ним при 18...20°C. Йони хлору (як сильні депасиватори) призводять до локальних руйнувань пасивної плівки, що може спричинити точкову (пітингову) корозію, а також перешкоджають її утворенню на поверхні металів.

За експериментальними результатами побудували катодну та анодну поляризаційні криві $E_{\text{corr}} = f(\lg i_{\text{corr}})$, де $E_{\text{corr}}$ – потенціал корозії (V), $i_{\text{corr}}$ – струм корозії (A/$cm^2$). Електрохімічні показники покриттів системи Cu–Fe визначали за поляризаційними кривими, знятими у 3%-му розчині NaCl. За значеннями струмів корозії розрахували її глибинний показник ($K_i$). Захисну дію покриттів оцінювали за коефіцієнтом гальмування корозії (γ) та ступенем захисту ($Z$) [17].

Для порівняння за тих же самих умов вивчали корозійну тривкість зразків зі сталі Ст.3 та нержавної марки 40Х13.

**Результати та їх обговорення.** Металографічні дослідження засвідчили, що покриття, отримане електродуговим напиленням за сумісного розпилення дротів міді та заліза, має ламелярну псевдосплавну структуру з рівномірно розподіленими шарами міді та заліза (рис. 1). У ньому відсутня відкрита або наскрізна пористість. Загальна внутрішня пористість складає 6,4±0,6%. Покриття щільно прилягає до сталевої основи, тріщин та дефектів на межі покриття–основа не виявили. Мікротвердість покриття становить 2130±700 MPa.

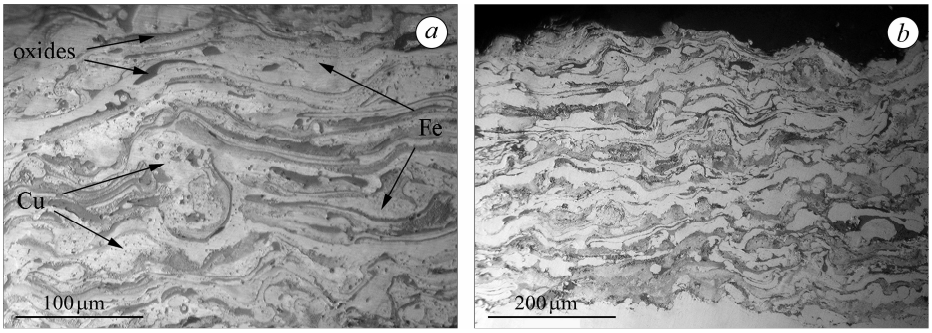


Рис. 1. Мікроструктура електродугового псевдосплавного покриття системи мідь–залізо за різного збільшення.

Fig. 1. Microstructure of electric arc pseudoalloy coating of copper–iron system under different magnifications.

За результатами рентгеноструктурного фазового аналізу (рис. 2) покриття складається з міді та заліза, а також їх оксидів $Cu_2O$ та FeO у вигляді щільних тонких прошарків, розміщених межами ламелей міді та заліза.

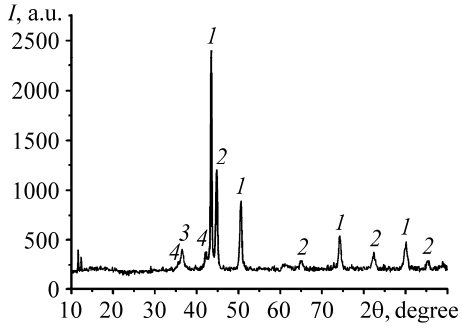


Рис. 2. Рентгенограма псевдосплавного покриття системи мідь–залізо: *1* – Cu; *2* – Fe; *3* – $Cu_2O$; *4* – FeO.

Fig. 2. XRD pattern of copper–iron pseudoalloy coating: *1* – Cu; *2* – Fe; *3* – $Cu_2O$; *4* – FeO.

Поляризаційні криві зразків з покриттям, одержані у 3%-му NaCl, подано на рис. 3, а потенціали $E_{corr}$ та струми $i_{corr}$ корозії – у таблиці. Виявили, що значення електродних потенціалів покриттів стабілізуються через 15...40 min. Корозія сталі Ст.3 без покриття і з ним відбувається з кисневою деполяризацією. На поляризаційних кривих ділянки пасивації відсутні, що свідчить про електрохімічно активне розчинення металів.

Електрохімічні дослідження засвідчили, що потенціал корозії зразків з покриттям позитивніший. Струм його корозії такий, як нержавної сталі 40Х13, та на порядок вищий, ніж для сталі Ст.3. Вочевидь, що висока корозійна тривкість обумовлена специфічністю структури покриття, де шари міді та заліза розділені оксидними прошарками, а також незначною його пористістю. Під час анодної

поляризації на поверхні покриття спочатку утворюються оксиди заліза, а потім, до збагачення поверхні міддю, – оксиди міді.

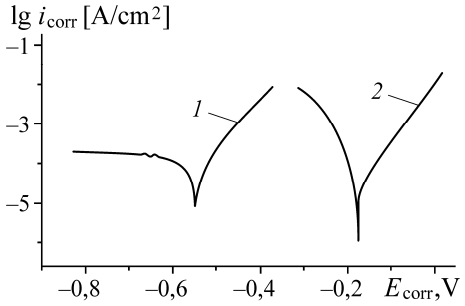


Рис. 3. Поляризаційні криві сталі Ст.3 (крива *1*) та псевдосплавного покриття системи мідь–залізо (крива *2*) у 3%-му розчині NaCl.

Fig. 3. Polarization curves of Steel 3 (curve *1*) and copper–iron pseudoalloy coating (curve *2*) in 3% NaCl solution.

**Результати електрохімічних випробувань сталей та зразків з покриттям системи мідь–залізо**

| Тип матеріалу | $E_{corr}$, V | $i_{corr}$, A/cm$^2$ | $K_i$, mm/year |
|---|---|---|---|
| Покриття Cu–Fe | –0,18 | $1{,}8 \cdot 10^{-6}$ | 0,02 |
| Сталь Ст.3 | –0,52 | $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ | 0,2932 |
| Сталь 40Х13 | –0,26 | $2 \cdot 10^{-6}$ | 0,0225 |

Псевдосплавне покриття гальмує швидкість корозії сталі Ст.3 у 14 разів і забезпечує ступінь захисту 93%. За десятибальною шкалою стійкості псевдосплавне покриття системи мідь–залізо можна віднести до “стійкого”, що відповідає четвертому балу [17]. Розраховані терміни служби вказують на можливість експлуатації покриттів у 3%-му NaCl упродовж 15 років. Візуально після електрохімічних випробувань не виявили руйнування або відшаровування покриття та слідів корозії на поверхні зразків (рис. 4).

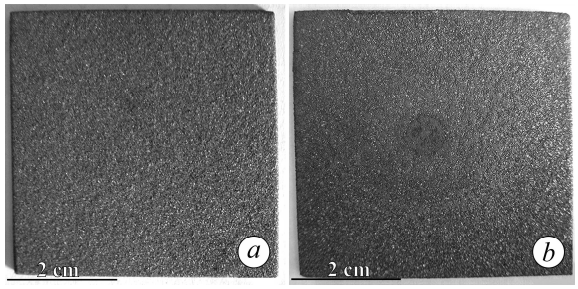


Рис. 4. Поверхня псевдосплавного покриття системи мідь–залізо до (*a*) та після (*b*) електрохімічних випробувань.

Fig. 4. Surface of the copper–iron pseudoalloy coating before (*a*) and after (*b*) electrochemical tests.

Корозійна тривкість покриття обумовлена специфічною ламелярною структурою. Зокрема, прошарки оксидів $Cu_2O$ та FeO, які формуються під час напилення, виступають у ролі захисних антикорозійних плівок на поверхні мідних та сталевих шарів, що підвищують корозійну тривкість покриття загалом. Отже, такі покриття можна використовувати для відновлення та зміцнення багатьох деталей, що працюють в агресивних середовищах.

**ВИСНОВКИ**

Досліджено структурно-фазовий стан та корозійну тривкість псевдосплавного покриття системи мідь–залізо, одержаного методом електродугового напилення. Виявлено, що воно має ламелярну структуру з рівномірним розподілом компонентів, щільне, без дефектів та відшарувань на межі поділу покриття–основа.

Покриття товщиною 500 μm корозійнотривке у 3%-му розчині NaCl. Після випробувань зразків слідів корозії та руйнування на поверхні покриття не зафіксовано. Корозійна тривкість у цьому середовищі така ж, як і нержавної сталі 40Х13. Тривкість сталі Ст.3 з покриттям підвищується у 14 разів, ступінь захисту від корозії складає 93%. За десятибальною шкалою стійкості покриття системи Cu–Fe віднесено до "стійких", що відповідає четвертому балу. Вони здатні захистити сталеву основу в сольовому середовищі, що містить хлорид-йони, та придатні для відновлення пошкоджених поверхонь деталей і їх захисту від абразивного зношування.


1. *Riskin J. and Khentov A.* Electrocorrosion and protection of metals. Second ed. – Amsterdam; Netherlands: Elsevier, 2019. – 420 p.
2. *Sadeghi E., Markocsan N., and Joshi Sh.* Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants. Part I: Effect of composition and microstructure // J. of Thermal Spray Techn. – 2019. – **28**. – P. 1749–1788.
3. *Fauchais P. L., Heberlein J. V. R., and Boulos M. I.* Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. – Springer, 2014. – 1622 p.
4. *Kumar S., Handa A., and Kumar R.* Overview of wire arc spray process: a review // J. of Composition Theory. – 2019. – **4**, № 6. – P. 900–907.
5. *Corrosion-mechanical* resistance of arc-sprayed coatings made from cored powders / M. Student, G. Veselivska, V. Gvozdeckii, M. Golovchuk, L. Dzyubyk, and Ya. Sirak // Ukrainian J. of Mech. Eng. and Mater. Sci. – 2018. – **4**, № 1. – P. 12–20.
6. *Study* of high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed coatings / S. Kant, M. Kumar, V. Chawla, and S. Singh // Materials Today: Proc. – 2020. – **21**, № 4. – P. 1741–1748.
7. *Development* of electric-arc pseudoalloy coatings for the strengthening of copper walls of molds / Yu. Borisov, N. Vigilianska, I. Demianov, and O. Grishchenko // Eastern-European J. of Enterprise Technol. – 2018. – **12**, № 3. – P. 6–14.
8. *Ismail N. S., Fadil N. A., and Bakar T. A.* Effect of stand-off distance on the microstructural, mechanical and physical properties of Al–Zn pseudo-alloy coating prepared via wire arc spray process // Malaysian J. of Microscopy. – 2022. – **18**, № 1. – P. 256–269.
9. *Засади* створення корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, Н. Червінська, А. Кондир // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Спецвип. № 9, т. 2. – С. 600–606.
10. *Pokhmurskyi V., Student M., and Gvozdeckii V.* Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures // J. of Thermal Spray Technol. – 2013. – **22**, № 5. – P. 808–819.
11. *Song J., Li Z., and Zhang D.* Corrosion behaviour of three kinds of arc sprayed coatings in soil // Int. J. of Electrochem. Sci. – 2019. – **14**. – P. 11596–11606.
12. *Yan F.-J., Li X.-G., and Sun W.* AlCu pseudo alloy coating material for electric power grounding grid // Corr. and Protection. – 2010. – № 4. – P. 318–320.
13. *Матвійшин Є. М.* Триботехнічні властивості електродугових металізаційних покриттів із псевдосплавів типу Fe–Cu–Al // Проблеми трибології. – 2013. – № 2. – С. 50–54.
14. *Electric* arc spraying of intermetalic Fe–Al coatings using different solid and powder wires / Yu. S. Borisov, A. L. Borisova, N. V. Vihilyanska, I. A. Demyanov, and O. M. Burlachenko // The Paton Welding J. – 2021. – № 3. – P. 16–21.
15. *Исследование* триботехнических характеристик электродуговых железо-медных покрытий с псевдосплавной структурой / Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов, А. П. Мурашов, А. П. Грищенко // Проблеми тертя та зношування. – 2018. – **78**, № 1. – С. 37–49.
16. *Исследование* влияния режимов электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавных покрытий / Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов, А. П. Грищенко, А. П. Мурашов // Автомат. сварка. – 2013. – № 12. – С. 11–17.
17. *Похмурський В. І., Хома М. С.* Корозійна втома металів та сплавів. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.


*Одержано 05.08.2022*