

PACS numbers: 61.05.cp, 68.37.Hk, 81.05.Ni, 81.15.Rs, 81.30.Bx

## **Дослідження процесу формування псевдостопних покриттів мідь–алюміній, одержаних методом електродугового напорошення різнорідних дротів**

Ю. С. Борисов, Н. В. Вігілянська, І. А. Дем'янов, О. П. Грищенко,  
А. П. Мурашов

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича, 11,  
03150 Київ, Україна*

Проведено дослідження процесу формування псевдостопних покриттів системи мідь–алюміній в умовах електродугового напорошення. За допомогою математичного планування експерименту одержано рівняння регресії, що відображають залежність середнього розміру частинок продуктів розпорошення дротів, вмісту оксидів і пористості покриттів від швидкості подачі дротів, напруги на електродах, витрати стисненого повітря та дистанції напорошення. Встановлено, що головними шляхами управління розміром частинок, які напорошують, у разі сумісного розпорошування дротів міді та алюмінію є зміна витрати стисненого повітря та тепловкладення в матеріали, що напорошують, і газовий струмінь. У результаті дослідження структури і фазового складу продуктів розпорошення виявлено, що у процесі сумісного розпорошення мідного й алюмінієвого дроту в результаті міжфазної взаємодії їхніх розтопів утворюються псевдостопні частинки, які є конгломератом міді–алюмінію. Аналіз результатів досліджень формування покриттів у разі розпорошування дротів міді та алюмінію показав, що на всьому обраному діапазоні параметрів електродугового напорошення формуються гетерогенні псевдостопні покриття,

---

Corresponding author: Nataliya Viktorivna Vigilianska  
E-mail: [pewinataliya@gmail.ua](mailto:pewinataliya@gmail.ua)

*E. O. Paton Electric Welding Institute, NAS of Ukraine,  
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: Yu. S. Borisov, N. V. Vigilianska, I. A. Demianov, O. P. Grishchenko, and A. P. Murashov, Investigation of Formation Process of Pseudoalloy Copper–Aluminium Coatings Obtained by Electric Arc Spraying Method of Dissimilar Wires, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 1: 63–78 (2022) (in Ukrainian).  
DOI: [10.15407/mfint.44.01.0063](https://doi.org/10.15407/mfint.44.01.0063)

що складаються з ламелей вихідних компонентів міді та алюмінію з наявністю оксидних прошарків міді. У покриттях виявлено також домішки інтерметалідних фаз  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  і  $\text{CuAl}_2$ , які утворюються під час формування шару покриття на основі. Вміст оксидів у покриттях лежить в межах 10–17% об., пористість покриттів складає 4–8% об. У результаті проведених досліджень встановлено шляхи управління структурою і, отже, властивостями псевдостопних покриттів мідь–алюміній шляхом зміни параметрів електродугового напорошення.

**Ключові слова:** електродугове напорошення, покриття, псевдостопна структура мідь–алюміній, продукти розпорошування, інтерметалідна фаза.

The investigation of the formation process of pseudoalloy coatings of the copper–aluminium system under the conditions of electric arc spraying is performed. Regression equations reflecting the dependence of the average particle size of the products of wire spraying, the content of oxides and porosity of the coatings on the wire feed rate, voltage at the electrodes, compressed air consumption and spraying distance are obtained using mathematical planning of the experiment. As determined, the main ways to control the size of the sprayed particles during the simultaneous spraying of copper and aluminium wires is to change the compressed air consumption and heat input into the sprayed materials and gas jet. As a result of studying the structure and phase composition of the spraying products, it is found that in the process of simultaneous spraying of copper and aluminium wires as a result of the interphase interaction of their melts pseudoalloy particles are formed, which are a conglomerate of copper–aluminium. Analysis of the study's results of coatings formation during the spraying of copper and aluminium wires show that heterogeneous pseudoalloy coatings are formed for the entire selected range of electric arc spraying parameters. The coatings consist of lamellas of the initial components of copper and aluminium with the presence of oxide layers of copper. The coatings also contain admixtures of the intermetallic phases  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  and  $\text{CuAl}_2$ , which are formed during the formation of the coating layer on the substrate. The content of oxides in the coatings is in the range of 10–17% vol., the porosity of the coatings is 4–8% vol. As a result of the performed investigation, the ways of controlling the structure and consequently the properties of pseudoalloy copper–aluminium coatings by changing the parameters of electric arc spraying are established.

**Key words:** electric arc spraying, coating, copper–aluminium pseudoalloy structure, spraying products, intermetallic phase.

*(Отримано 22 жовтня 2021 р.)*

## 1. ВСТУП

Покриття з псевдостопною структурою відносять до типу композиційних покриттів, що складаються з частинок різнорідних металів, які не утворюють стопів або хемічних сполук і зберігають свої індивідуальні властивості. Такі покриття можливо одержувати метода-

ми газотермічного напорошення (ГТН) [1]. Як матеріали для напорошення використовують порошки, які одержують методом плакування або механічного легування, механічні суміші компонентів (плазмове та газополуменеве напорошення), дроти суцільного перетину двох різнорідних матеріалів і порошкові дроти з металевою оболонкою та різними наповнювачами (електродугове напорошення) [2].

Найпоширенішими псевдостопними покриттями нині є покриття на основі міді, такі як Cu–Fe, Cu–Al, Cu–Pb та ін. [2, 3]. Як основний компонент псевдостопних покриттів використовують мідь з огляду на те, що її широко застосовують у промисловості, поряд з цим має недостатню стійкість для роботи в умовах підвищених температур і зношування.

Застосування як зміцнювальних компонентів таких псевдостопних покриттів заліза, алюмінію або інших матеріалів дозволяє підвищити високотемпературні властивості міцності, твердість і зносостійкість зі збереженням основних властивостей міді. Такі покриття переважно застосовують у промисловості як фрикційні та антифрикційні матеріали на робочих поверхнях деталей і конструкцій, що працюють в умовах зношення та корозії [4–6].

Найпоширенішим способом одержання псевдостопних покриттів серед методів газотермічного напорошення є технологія електродугового напорошення (ЕДН) з огляду на більш низьку вартість процесу нанесення, високу продуктивність, портативність устаткування та можливість нанесення покриттів на вироби складної форми [7]. Електродугове напорошення дає можливість створення псевдостопних покриттів з широким діапазоном поєднання компонентів.

У разі сумісного розпорошення за умови ЕДН металів, які не відрізняються помітною взаємною розчинністю, у структурі псевдостопних покриттів спостерігаються лише ламелі вихідних металів і їхні окиснені частинки [8]. У випадку сумісного розпорошення електродуговим методом металів, що відрізняються деякою взаємною розчинністю або здатних вступати в хемічну взаємодію в структурі псевдостопних покриттів, крім вихідних компонентів та їхніх оксидів, можуть утворюватися тверді розчини різної концентрації та інтерметалідні фази. Прикладом такого типу псевдостопних покриттів є системи залізо–алюміній [9, 10] і мідь–алюміній [11].

Проведені дослідження електродугових покриттів Cu–Al [12–14] показали, що покриття, одержані електродуговим розпорошенням дротів міді та алюмінію, мають ламелярну структуру, що складається з ламелей міді, алюмінію та інтерметалідних фаз  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ,  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$ ,  $\text{Cu}_6\text{Al}_3$ . У покриттях присутні також оксиди та пори, проте їхню кількість у даних роботах не наведено. Дослідження проводили для покриттів, одержаних електродуговим напорошенням з використанням одного режиму: струм дуги — 205–210 А, на-

пруга на електродах дуги — 26–28 В, тиск стисненого повітря — 4 атм, дистанція напорошення — 120–150 мм. У роботах відзначається, що для підвищення якості покриттів необхідно провести оптимізацію параметрів напорошення.

На сьогодні питання впливу умов процесу ЕДН на формування потоку частинок, що розпорошуються, та мікроструктуру одержуваних покриттів Cu–Al є невивченими. Тому метою цієї роботи є дослідження процесу формування псевдостопних покриттів системи Cu–Al в умовах електродугового напорошення.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження процесу формування псевдостопних покриттів мідь–алюміній, які одержують спільним розпорошенням різнорідних дротів, як матеріали використовували дріт міді марки М1  $\varnothing 2$  мм і алюмінієвий дріт марки А99. Нанесення покриттів проводили електродуговим металізатором ЕМ-14М. Для встановлення ступеня впливу умов розпорошення дротів на дисперсність частинок, що розпорошуються, та структуру псевдостопних покриттів Cu–Al використовували метод математичного планування експерименту з напівреплікою  $2^{4-1}$ .

За фактори процесу напорошення обрали такі параметри: швидкість подачі дротів  $W_{др}$ , м/год; напруга на електродах дуги  $U$ , В; витрата стисненого повітря  $V_r$ , м<sup>3</sup>/год; дистанція напорошення  $H$ , м. Граничні значення факторів, за яких спостерігається стабільний процес розпорошення дротів і формування покриттів, визначали експериментальним шляхом. У всіх випадках мідний дріт слугував анодом, алюмінієвий — катодом. Умови проведення експерименту зведено в матрицю планування (табл. 1). Для якісної оцінки умов процесу електродугового напорошення введені показники часу перебування розпорошених частинок в струмені ( $t$ ), відносного тепло-вкладення в дроти ( $IU/G_{др}$ ) і газовий струмінь ( $IU/V_r$ ).

Оскільки основним практичним призначенням псевдостопних покриттів є область триботехнічних матеріалів, то основними характеристиками цих покриттів є однорідність структури, ступінь окиснення та пористість, які залежать від дисперсності матеріалів, що розпорошуються. Тому за функції відгуку в матриці даного експерименту обрано середній розмір частинок, що розпорошуються, ступінь окиснення та пористість покриттів.

За результатами експерименту визначали коефіцієнти регресії та будували рівняння регресії, що описують ступінь впливу параметрів напорошення на розмір частинок, що розпорошуються, та структуру покриттів.

Для оцінки можливості взаємодії частинок в об'ємі струменя розпорошення проведено розрахунок умовної об'ємної концентрації

**ТАБЛИЦЯ 1.** Математичне планування експерименту з дослідження процесу ЕДН псевдостопних покриттів з використанням дротів Cu і Al.**TABLE 1.** Matrix of mathematical planning of experiment on research of electric arc spraying process of pseudoalloy coatings by using of Cu and Al wires.

№ досліджу	Параметри напорошення				$t, \text{с} \cdot 10^{-4}$	$IU/G_{\text{др}}, \text{МДж/кг}$	$IU/V_{\text{г}}, \text{МДж/м}^3$
	$W_{\text{др}}, \text{м/год}$	$U, \text{В}$	$V_{\text{г}}, \text{м}^3/\text{год}$	$H, \text{м}$			
1	260	48	126	0,2	1,6	2,7	0,21
2	260	48	108	0,06	0,6	2,7	0,24
3	260	22	126	0,06	0,5	1,3	0,09
4	260	22	108	0,2	1,9	1,3	0,11
5	180	48	126	0,06	0,5	2,1	0,11
6	180	48	108	0,2	1,9	2,1	0,13
7	180	22	126	0,2	1,6	1,0	0,05
8	180	22	108	0,06	0,6	1,0	0,06

частинок розтопу матеріалу в струмені напорошення  $\beta'$  та оцінено ймовірність зіткнення частинок у струмені за методикою, описаною в [15].

З метою дослідження характеру взаємодії, розмірів і структури частинок, що утворюються у разі розпорошування розтопів різноідних дротів міді та алюмінію, проби відбирали шляхом збору частинок у водяну ванну розміром, що встановлювали під струмінь матеріалу, що напорошується. В одержаному продукті розпорошення досліджували структуру, фазовий склад і розмір частинок. Для визначення розміру частинок продуктів розпорошення використовували лазерний аналізатор гранулометричного складу сухих порошків АСОД-300.

Формування шару покриття досліджували шляхом аналізу одиничних деформованих на основі частинок (сплетів). Напорошення сплетів проводили на пластини з полірованої неіржавкої сталі.

Визначення елементного складу розпорошених частинок і сплетів проводили методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM); дослідження структури розпорошених частинок і напорошених покриттів проводили на оптичному мікроскопі Neophot-32. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) виконували з використанням дифрактометра ДРОН-3 у випромінненні  $\text{CuK}_\alpha$  з графітовим монохроматором у разі крокового переміщення 0,1 градуса та часом експозиції у кожній точці 4°С з подальшою комп'ютерною обробкою одержаних цифрових даних. Визначення вмісту в покриттях оксидів і пор проводили методом аналізу зображень, який полягає у визначенні площі, що припадає на виявлені пори та оксиди, відносно всієї площі шліфа покриття за допомогою програми обробки зображень «Image-Pro Plus».

**ТАБЛИЦЯ 2.** Результати визначення середнього розміру розпорошених частинок  $d_q$ , вмісту оксидів MeO і пористості (П) псевдостопних покриттів Cu–Al.

**TABLE 2.** The results of determining the average size of the sprayed particles  $d_q$ , the content of oxides MeO and the porosity (П) of pseudoalloy coatings Cu–Al.

№ дослідю	$d_q$ , мкм	MeO, %	П, %
1	$44 \pm 3$	$17 \pm 1,9$	$4 \pm 1,3$
2	$49 \pm 2$	$12 \pm 0,9$	$7 \pm 1,7$
3	$47 \pm 3$	$10 \pm 1,0$	$4 \pm 0,9$
4	$59 \pm 5$	$16 \pm 2,6$	$8 \pm 1,0$
5	$52 \pm 4$	$14 \pm 2,1$	$5 \pm 1,3$
6	$56 \pm 4$	$12 \pm 1,8$	$6 \pm 1,4$
7	$52 \pm 4$	$17 \pm 1,8$	$6 \pm 1,5$
8	$55 \pm 4$	$10 \pm 1,6$	$5 \pm 0,9$

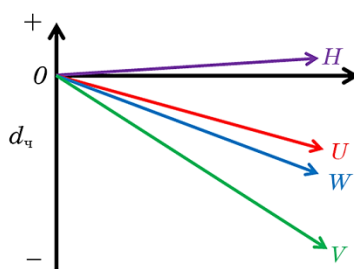
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати визначення середнього розміру розпорошених частинок  $d_q$ , вмісту оксидів MeO та пористості (П) псевдостопних покриттів наведено в табл. 2.

У результаті математичної обробки результатів вимірювання середнього розміру частинок одержано наступне рівняння регресії, що виражає залежність розміру частинок від умов розпорошення:

$$d_q = 103,9 - 0,05W - 0,12U - 0,33V + 0,014H.$$

За даним рівнянням регресії побудували графік трендів, що відображає інтенсивність впливу окремих параметрів процесу розпорошення на середній діаметр одержаних частинок (рис. 1).



**Рис. 1.** Вплив параметрів процесу електродугового напорошення на середній діаметр частинок продуктів розпорошення дротів Cu–Al.

**Fig. 1.** Influence of parameters of electric arc spraying process on the average particle diameter of Cu–Al wire spraying products.

Зіставлення характеру та інтенсивності впливу параметрів процесу напорошення на середній діаметр частинок (в обраній області експерименту) дозволяє зробити висновок, що на розмір розпорошених частинок найбільше впливає витрата стисненого повітря, збільшення якої веде до зниження їхнього середнього розміру. Згідно механізму утворення крапель у разі ЕДН зі збільшенням тиску розпорошуваного повітря стабільність розтопленого металу на кінцях дротів зменшується через зростання руйнівальних сил опору, які обумовлені більш високою швидкістю газу. Отже, час накопичення критичного об'єму розтопленого металу зменшується. Більш висока швидкість газу також ефективніше видаляє розтоплений метал.

Оскільки час утворення нестабільних крапель і час видалення крапель зменшуються зі збільшенням витрати газу, спостерігається зменшення діаметра частинок.

Збільшення прикладеної напруги та швидкості подачі дротів, що призводить до підвищення сили струму, збільшує енергію та температуру дуги, і, як наслідок, тепловкладення в матеріали та газовий струмінь. Більш високі температури та швидкості нагріву дозволяють розтопленому металу набувати більше перегріву перед видаленням краплі розтопу з кінців дротів, внаслідок чого зменшується поверхневий натяг і в'язкість рідкого металу, що веде до підвищення інтенсивності диспергування крапель розтопу. Кореляційна залежність розміру частинок від тепловкладення в дроті та газовий струмінь приведена на рис. 2.

Мінімальний розмір частинок 44 мкм одержано у разі розпорошування дротів Cu–Al у випадку поєднання максимальних значень тепловкладення у матеріали, що напорошуються, та витрати стисненого повітря (дослід № 1). Це пов'язано зі зниженням величини поверхневого натягу розтопу металів у випадку перегрівання частинок і підвищенням динамічного напору струменя. За зворотних причин сукупність мінімальних значень тепловкладення у матеріали, що напорошуються, і витрати стисненого повітря веде до формування частинок максимального розміру 55–59 мкм (досліди №№ 4, 6, 8).

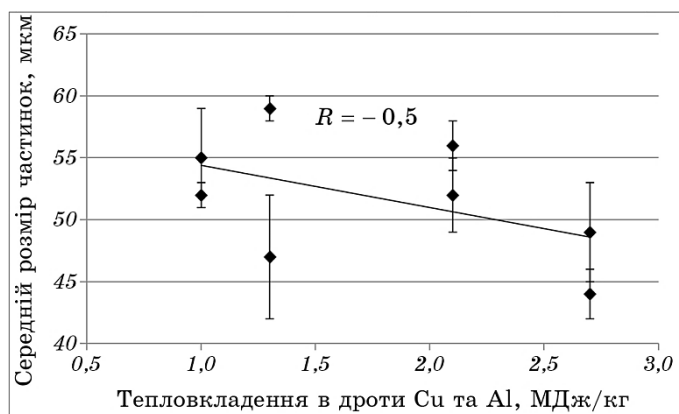
З огляду на заповненість струменя у разі електродугового напорошення, краплі розтопів, що утворилися у процесі руху в струмені можуть стикатися, що визначає можливість розвитку процесів міжфазної взаємодії з явищами взаємного змішування та утворення твердих розчинів і інтерметалідів в системі мідь–алюміній.

Згідно з розрахунком умовної об'ємної концентрації частинок розтопу матеріалу в струмені напорошення максимальна умовна концентрація  $\beta'_{\max}$  частинок розтопу матеріалу в струмені у разі напорошення покриттів Cu–Al, що спостерігається в привісній зоні, може досягати  $0,34 \cdot 10^{-4}$ .

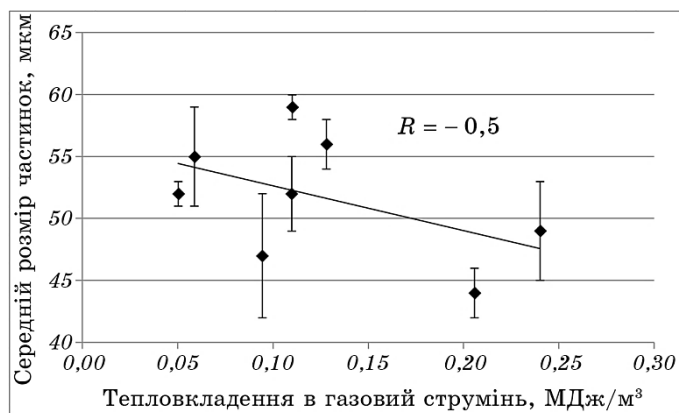
Розрахунок відношення середньої відстані між частинками в газовому струмені до їхнього розміру (за максимального розміру частинки, який зустрічається у разі сумісного розпорощення дротів Cu і Al — 140 мкм) дозволяє зробити висновок, що за концентрацій частинки розтопу матеріалу менших  $0,34 \cdot 10^{-4}$  процеси зіткнення та коагуляції частинки під час руху в об'ємі струменя мало ймовірні.

Хемічний склад продуктів розпорощення (рис. 3, табл. 3) свідчить про змішування потоку частинки матеріалів, що розпорощуються, з міжчастинковою взаємодією у процесі розпорощення, тому що в частинках міді відзначається наявність алюмінію і навпаки.

Аналіз мікроструктури частинки, одержаних сумісним розпоро-



а

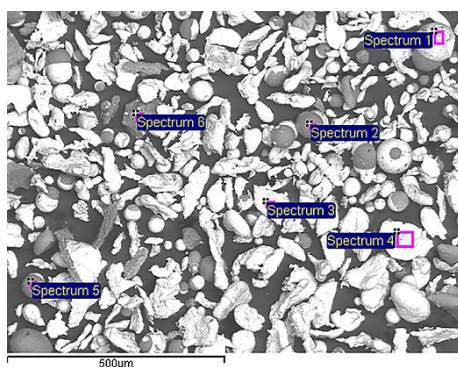


б

**Рис. 2.** Залежність розміру частинки від тепловкладення у дроти (а) та газ (б) у разі розпорощування дротів Cu–Al.

**Fig. 2.** Dependence of particle size on heat input into wires (a) and gas (b) at spraying of Cu–Al wires.





**Рис. 3.** Зовнішній вигляд продуктів сумісного розпорошення дротів Cu і Al.

**Fig. 3.** SEM photograph of products of simultaneous spraying of Cu and Al wires.

шенням дротів Cu і Al, також показав, що у процесі розпорошення за всіх технологічних режимів відбувається взаємодія частинок розтопів міді та алюмінію між собою. На рисунку 4 видно, що у продуктах розпорошення мідного й алюмінієвого дроту зустрічаються окремі частинки алюмінію, міді та сполуки мідь-алюміній. Частинки переважно мають сферичну та краплевидну форму.

Рентгенофазовий аналіз показав, що продукти розпорошення дротів Cu і Al складаються з частинок міді, алюмінію та оксиду міді  $\text{Cu}_2\text{O}$  (рис. 5).

Таким чином, виявлено, що у процесі розпорошення дротів Cu і Al відбувається міжчастинкова взаємодія розтопів з утворенням псевдостопних частинок мідь-алюміній. Розвиток процесу взаємодії частинок розтопів у разі розпорошування може протікати на по-

**ТАБЛИЦЯ 3.** Хемічний склад частинок продуктів розпорошення дротів Cu і Al.

**TABLE 3.** The chemical composition of the particles of spraying products of Cu and Al wires.

Хемічний склад, % мас.				
Точка на поверхні	Al	Cu	O	Всього
Spectrum 1	20,39	60,82	18,79	100
Spectrum 2	52,85	2,27	44,88	100
Spectrum 3	6,41	87,24	6,35	100
Spectrum 4	14,29	76,89	8,82	100
Spectrum 5	48,06	2,55	49,40	100
Spectrum 6	37,37	12,68	49,94	100

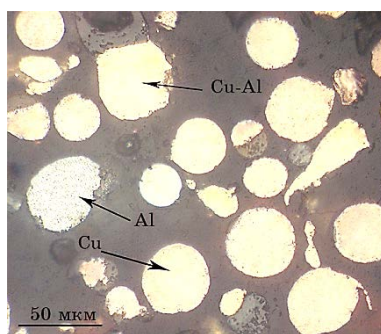


Рис. 4. Мікроструктура продуктів розпорошення дротів Cu і Al.

Fig. 4. Microstructure of Cu and Al wires spraying products.

чатковій стадії стоплення та відриву крапель з торців мідного й алюмінієвого дроту та у разі зіткнення частинок під час руху до основи за рахунок різниці (~ 2,5 рази) швидкостей польоту частинок міді та алюмінію, зумовленої різницею густини цих матеріалів.

Аналіз сплетів, одержаних у разі розпорошення дротів Cu і Al, показав (рис. 6), що за всіх режимів напорошення частинки мають форму диска, що говорить про те, що в момент зіткнення з основою вони перебували в повністю розтопленому стані, тобто, що вони не тверднуть під час польоту на дистанції напорошення (60–200 мм) з огляду на короткотривалість польоту (0,05–0,19 мс). Сплети після зіткнення з основою складаються з ділянок міді та алюмінію (табл. 4).

Одержані в даному діапазоні режимів електродугового напоро-

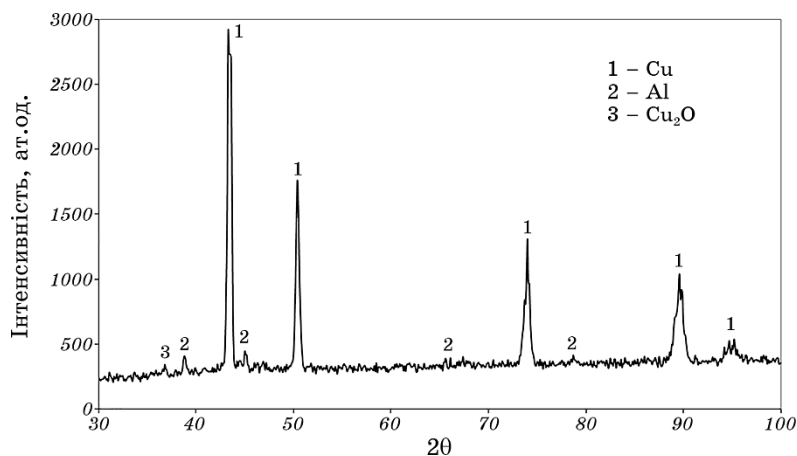


Рис. 5. Рентгенограма продуктів розпорошення дротів Cu і Al.

Fig. 5. X-ray diffraction of Cu and Al wires spraying products.

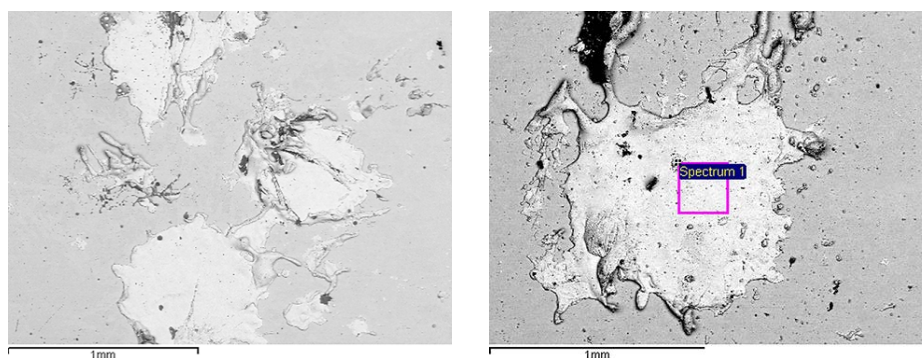


Рис. 6. Зображення сплетів, одержаних у разі розпорошення дротів Cu і Al.

Fig. 6. SEM photographs of splats obtained by spraying of Cu and Al wires.

шення псевдостопні покриття характеризуються гетерогенністю та вираженою ламелярністю структури (рис. 7).

За даними РСФА (рис. 8) покриття Cu–Al складаються з вихідних компонентів міді та алюмінію та оксиду міді  $\text{Cu}_2\text{O}$ . У покриттях присутні також інтерметалідні фази  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  і  $\text{CuAl}_2$ , яких не було виявлено в продукті розпорошення. Це говорить про те, що взаємодія компонентів міді та алюмінію з утворенням нових фаз відбувається у процесі формування шару покриття на основі. Виходячи з одержаних даних, можна зробити висновок, що процесом утворення інтерметалідних фаз у покриттях мідь–алюміній можна управляти за допомогою зміни швидкості охолодження частинок на основі, наприклад, нагрівання або охолодження основи або швидкості переміщення металізатора відносно основи.

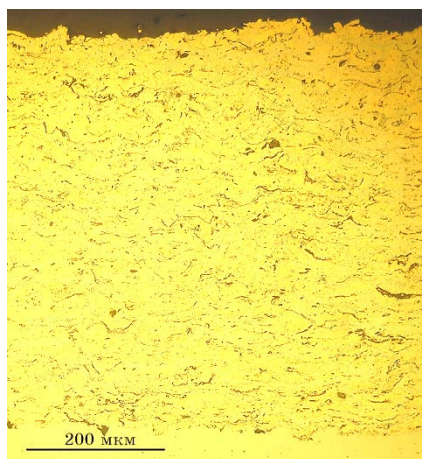
Вміст оксидів у покриттях, одержаних на обраних режимах напорошення, становить 10–17% об., пористість покриттів — 4–8% об. (табл. 2).

Рівняння регресії, що виражають залежність ступеня окиснення та пористості покриттів від режиму напорошення мають наступний вигляд:

ТАБЛИЦЯ 4. Хемічний склад сплетів, одержаних у разі розпорошення дротів Cu і Al.

TABLE 4. The chemical composition of splats obtained by spraying of Cu and Al wires.

Точка на поверхні	Хемічний склад, % мас.				Cu/Al, % об.
	Al	Cu	O	Всього	
Spectrum 1	4,5	93,2	2,3	100	86/14



**Рис. 7.** Мікроструктура псевдостопного покриття Cu–Al.

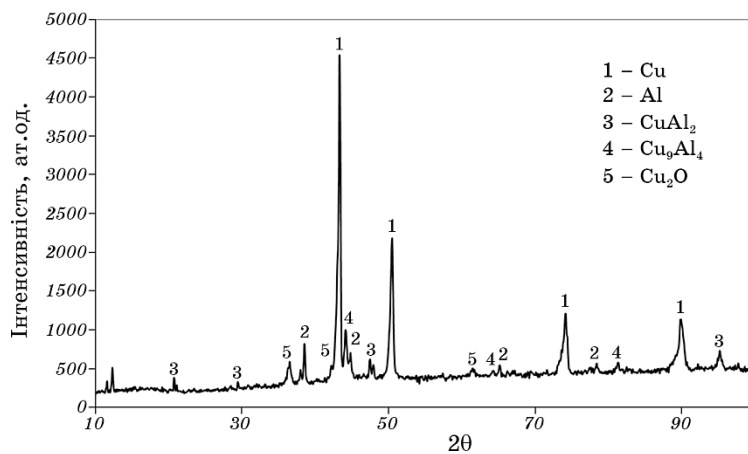
**Fig. 7.** Microstructure of Cu–Al pseudoalloy coating.

$$\text{MeO} (\%) = 5,3 + 0,006W + 0,019U + 0,111V + 0,029H,$$

$$\Pi (\%) = 15,95 + 0,003W - 0,01U - 0,097V + 0,005H.$$

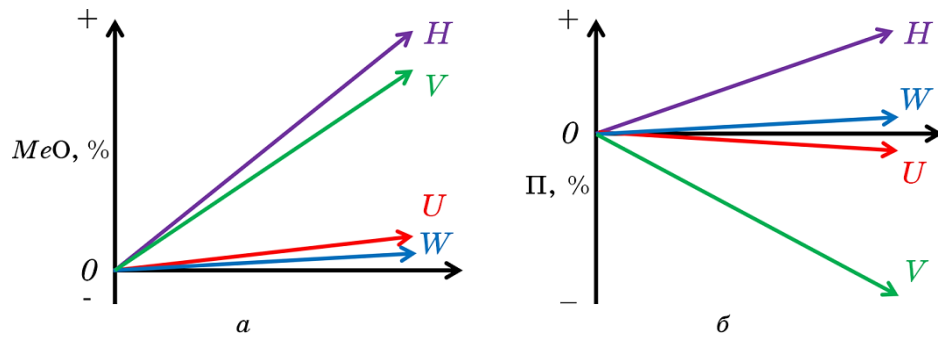
На рисунку 9 показано ступінь впливу факторів напорошення на вміст оксидів і пористість псевдостопних покриттів Cu–Al.

Як впливає з рівняння регресії на вміст оксидів в покриттях го-



**Рис. 8.** Рентгенограма псевдостопного покриття Cu–Al.

**Fig. 8.** X-ray diffraction of Cu–Al pseudoalloy coating.

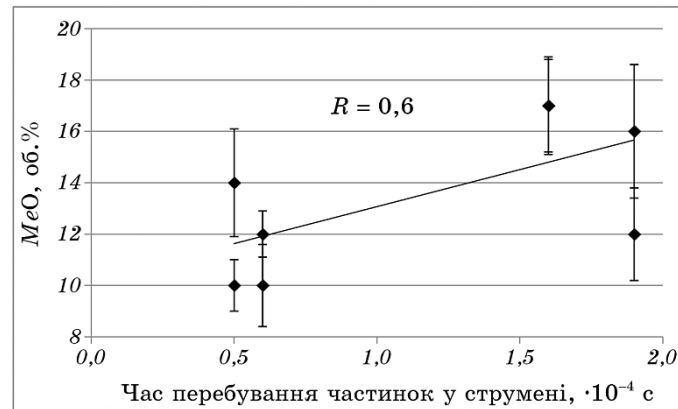


**Рис. 9.** Вплив параметрів процесу електродугового напорошення на вміст оксидів (а) і пористість (б) покриттів Cu-Al.

**Fig. 9.** Influence of parameters of electric arc spraying process on the content of oxides (a) and porosity (b) of Cu-Al coatings.

ловним чином впливають такі параметри процесу напорошення, як витрата стисненого повітря та дистанція напорошення.

Так, максимальний вміст оксидів виявлено в покриттях, напорошених за режимів з максимальною витратою стисненого повітря та максимальною дистанцією напорошення (досліди №№ 1, 7). Це пов'язано з тим, що підвищення витрати стисненого повітря веде до зменшення діаметра частинок, що розпоршуються у разі диспергування дотів, що призводить до їхнього інтенсивного окиснення за рахунок збільшення площі питомої поверхні металу.



**Рис. 10.** Залежність ступеня окислення покриттів від показника часу перебування частинок в струмені.

**Fig. 10.** Dependence of oxidation degree of coatings on the time of particles existence in the jet.

Збільшення дистанції напорошення веде своєю чергою до збільшення часу перебування частинок у струмені й розвитку процесу взаємодії частинок з киснем (рис. 10).

На величину пористості головним чином впливає витрата стисненого повітря, збільшення якої веде до підвищення швидкості польоту частинок, зниження розміру крапель, що розпорошуються, і, отже, до формування більш щільного покриття.

Збільшення дистанції напорошення веде до підвищення пористості покриттів Cu–Al, що пов'язано зі збільшенням часу перебування частинок у струмені та зниженням їхньої температури. Чим нижче температура частинок у момент зіткнення з основою, тим вище в'язкість розтопу та поверхневий натяг матеріалів і, отже, ступінь деформації (розтікання) частинок у разі формування шару зменшується, що і призводить до підвищення пористості покриттів.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. На підставі проведених досліджень впливу параметрів електродугового напорошення на розмір частинок, що розпорошуються, встановлено, що головними шляхами управління розміром частинок, що напорошуються, у разі сумісного розпорошення дротів міді та алюмінію є зміна витрати стисненого повітря та тепловкладення у дросли і газовий струмінь, які визначають динамічний напір струменя та ступінь нагрівання частинок розтопів. Під час розпорошення у випадку тепловкладення у напорошувани матеріали 2,7 МДж/кг і витрати стисненого повітря 126 м<sup>3</sup>/год утворюються частинки мінімального розміру (44 мкм), сукупність тепловкладення в напорошувани матеріали (1–2,1 МДж/кг) і витрати стисненого повітря 108 м<sup>3</sup>/год веде до формування частинок максимального і близького до максимального розмірів (55–59 мкм).

2. Виявлено, що у процесі електродугового напорошення покриттів з дротів міді та алюмінію міжчастинкова взаємодія частинок їхніх розтопів відбувається під час їх руху в розпорошувальному струмені, у результаті якої відбувається їх коагуляція з утворенням частинок псевдостопної структури, водночас утворення твердих розчинів й інтерметалідів не відбувається.

3. Псевдостопні покриття, одержані у разі напорошення системи Cu–Al, під час характеризуються вираженою гетерогенністю структури, що складається з вихідних матеріалів і їхніх оксидів. У покриттях присутні також домішки інтерметалідних фаз Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> і CuAl<sub>2</sub>, що утворюються під час формування шару покриття на поверхні основ.

4. Вміст оксидів у покриттях і пористість шару залежать головним чином від витрати стисненого повітря та дистанції напорошення. Максимальний вміст оксидів (17% об.) виявлено у покриттях у разі

напорошення з витратою стисненого повітря  $126 \text{ м}^3/\text{год}$  і дистанцією напорошення  $0,2 \text{ м}$ . За того ж поєднання цих параметрів формуються покриття з мінімальною пористістю (4% об.). Це пов'язано з підвищенням ступеня дисперсності матеріалу, що розпорошується, та тривалості перебування частинок у струмені.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, and M. I. Boulos, *Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part* (Boston: Springer US: 2014).
2. N. V. Vigilyanskaya, Yu. S. Borisov, and I. A. Demianov, *The Paton Welding J.*, **1**: 41 (2012).
3. М. А. Глебова, *Применение электродуговых покрытий из бронз и псевдосплавов для реновации и повышения ресурса узлов трения судовых машин и механизмов* (Автореф. дисс. ... канд. техн. наук) (Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций: 2008).
4. A. Limpichairanit, A. Watcharapasorn, S. Wirojanupatump, and S. Jiansirisomboon, *J. Microscopy Society of Thailand*, **4**, No. 2: 123 (2011).
5. Е. Н. Матвейшин, *Проблеми трибології*, **4**: 54 (2009).
6. С. М. Матвіїшин, *Проблеми трибології*, **2**: 50 (2013).
7. A. P. Abkenar, *Wire-Arc Spraying System: Particle Production, Transport, and Deposition* (Thesis of Dissert. for PhD Tech. Sci.) (Toronto: University of Toronto: 2007).
8. Yu. Borisov, N. Vigilianska, I. Demianov, and O. Grishchenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **3**, No. 12 (93): 6 (2018).
9. T. Chmielewski, P. Siwek, M. Chmielewski, A. Piątkowska, A. Grabias, and D. Golański, *Metals*, **8**, No. 12: 1059. (2018).
10. Yu. S. Borisov, A. L. Borisova, N. V. Vihilyanska, I. A. Demyanov, and O. M. Burlachenko, *The Paton Welding J.*, **3**: 17 (2021).
11. V. M. Gusev, A. G. Buklakov, A. S. Tyuftyaev, M. Kh. Gadzhiev, and A. V. Mordynskii, *Chemical and Petroleum Engineering*, **55**, Nos. 7–8: 675 (2019).
12. E. Altuncu, S. Iric, and F. Ustel, *Materials and Technology*, **46**, No. 2: 181 (2012).
13. Y. Ozbek, E. Altuncu, and F. Ustel, *METAL 2014: Proc. of 23<sup>rd</sup> Int. Conference on Metallurgy and Materials* (May 21–23, 2014) (Brno: 2014), p. 1023.
14. Y. Ozbek, E. Altuncu, and F. Ustel, *METAL 2014: Proc. of 23<sup>rd</sup> Int. Conference on Metallurgy and Materials* (May 21–23, 2014) (Brno: 2014), p. 958.
15. Yu. S. Borisov, N. V. Vigilyanskaya, I. A. Demianov, A. P. Grishchenko, and A. P. Murashov, *The Paton Welding J.*, **2**: 24 (2013).

## REFERENCES

1. P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, and M. I. Boulos, *Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part* (Boston: Springer US: 2014).
2. N. V. Vigilyanskaya, Yu. S. Borisov, and I. A. Demianov, *The Paton Welding*



- J.*, **1**: 41 (2012).
3. M. A. Glebova, *Primenenie Elektrodugovykh Pokrytiy iz Bronz i Pseudospлавov dlya Renovatsii i Povysheniya Resursa Uzlov Treniya Sudovykh Mashin i Mekhanizmov* [Application of Electric Arc Coatings Made of Bronzes and Pseudoalloys for Renovation and Increasing the Service Life of Friction Units of Ship Machines and Mechanisms] (Thesis of Dissert. for. Cand. Techn. Sci.) (Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy Gosudarstvennyy Universitet Vodnykh Kommunikatsiy: 2008) (in Russian).
  4. A. Limpichaipanit, A. Watcharapasorn, S. Wirojanupatump, and S. Jiansirisomboon, *J. Microscopy Society of Thailand*, **4**, No. 2: 123 (2011).
  5. E. N. Matveyshin, *Problemy Trybolohiyi*, **4**: 54 (2009) (in Russian).
  6. Ye. M. Matviyishyn, *Problemy Trybolohiyi*, **2**: 50 (2013) (in Ukrainian).
  7. A. P. Abkenar, *Wire-Arc Spraying System: Particle Production, Transport, and Deposition* (Thesis of Dissert. for PhD Tech. Sci.) (Toronto: University of Toronto: 2007).
  8. Yu. Borisov, N. Vigilianska, I. Demianov, and O. Grishchenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **3**, No. 12 (93): 6 (2018).
  9. T. Chmielewski, P. Siwek, M. Chmielewski, A. Piątkowska, A. Grabias, and D. Golański, *Metals*, **8**, No. 12: 1059. (2018).
  10. Yu. S. Borisov, A. L. Borisova, N. V. Vihilyanska, I. A. Demyanov, and O. M. Burlachenko, *The Paton Welding J.*, **3**: 17 (2021).
  11. V. M. Gusev, A. G. Buklakov, A. S. Tyufyaev, M. Kh. Gadzhiev, and A. V. Mordynskii, *Chemical and Petroleum Engineering*, **55**, Nos. 7–8: 675 (2019).
  12. E. Altuncu, S. Iric, and F. Ustel, *Materials and Technology*, **46**, No. 2: 181 (2012).
  13. Y. Ozbek, E. Altuncu, and F. Ustel, *METAL 2014: Proc. of 23<sup>rd</sup> Int. Conference on Metallurgy and Materials* (May 21–23, 2014) (Brno: 2014), p. 1023.
  14. Y. Ozbek, E. Altuncu, and F. Ustel, *METAL 2014: Proc. of 23<sup>rd</sup> Int. Conference on Metallurgy and Materials* (May 21–23, 2014) (Brno: 2014), p. 958.
  15. Yu. S. Borisov, N. V. Vigilyanskaya, I. A. Demianov, A. P. Grishchenko, and A. P. Murashov, *The Paton Welding J.*, **2**: 24 (2013).