

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА**

**ВІГЛЯНСЬКА НАТАЛІЯ ВІКТОРІВНА**



**УДК 621.793.72**

**ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПИЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ З  
ПСЕВДОСПЛАВНОЮ СТРУКТУРОЮ НА ОСНОВІ МІДІ**

Спеціальність – 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Борисов Юрій Сергійович**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН  
України, завідувач відділом захисних покриттів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Студент Михайло Михайлович**  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка  
НАН України, м. Львів, провідний науковий співробітник  
відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні

доктор технічних наук, доцент  
**Пащенко Валерій Миколайович**  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут ім. І. Сікорського» МОН України,  
м. Київ, професор кафедри інженерії поверхні

Захист відбудеться «22» квітня 2020 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д.26.182.01, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
за адресою: 03150 м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту електрозварювання ім.  
Є.О. Патона НАН України за адресою: Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира  
Малевича, 11.

Автореферат розіслано «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д.26.182.01  
кандидат технічних наук



Є.В. Шаповалов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасним напрямком підвищення ефективності експлуатації та довговічності виробів і конструкцій є інженерія поверхні, яка об'єднує комплекс методів обробки, одним з яких є газотермічне напилення (ГТН) покриттів, яке являє собою отримання на поверхні виробів покриттів з нагрітих і прискорених частинок матеріалу. Серед методів ГТН найбільш широко практично поширеним (більше 20% ринку нанесення газотермічних покриттів) є електродугове напилення (ЕДН), завдяки простоті обладнання і низькій витратності технології.

Дослідження в області формування покриттів при електродуговому напиленні однорідних дротяних матеріалів проводилися такими вченими, як А.Ф. Троїцький, Д.Г. Вадівасов, В.О. Роянов, Ю.С. Коробов, а також рядом китайських і американських дослідників. Розроблено теоретичні основи процесу ЕДН при роботі на обладнанні з використанням нагріву електричною дугою однорідних дротів.

Останнім часом з'являються нові напрямки ЕДН, одним з яких є розпилення різнорідних дротів, що дозволяє формувати покриття з псевдосплавною структурою. Воно виникло на основі результатів розробки і виготовлення виробів з псевдосплавів методами порошкової металургії (ПМ). Псевдосплави є класом композиційних матеріалів, де комбінація різних металів в чистому їх вигляді надає їм комплекс унікальних експлуатаційних властивостей.

Перші псевдосплавні покриття, що одержуються шляхом спільного розпилення двох різнорідних дротів, були досліджені у Всесоюзному науково-дослідному інституті автогенної обробки металів в середині 20 століття і показали ефективність в якості зносостійких і корозійностійких матеріалів. Було проведено ряд окремих робіт з дослідження процесу ЕДН при розпиленні різнорідних дротів. Однак на сьогоднішній день залишаються нерозкритими загальні закономірності формування покриттів з використанням різнорідних дротів при ЕДН, не досліджена природа взаємодії матеріалів, що напилюються, при плавленні в дузі і в процесі диспергування розплаву струменем повітря. Недостатньо вивчений вплив умов електродугового напилення на структуру і властивості псевдосплавних покриттів. Тому системне дослідження особливостей формування структури псевдосплавних покриттів при ЕДН є актуальним завданням. Результати таких досліджень дозволять розробити принципи технології нанесення електродугових покриттів з керованими властивостями і розширити області їх застосування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася у відділі «Захисних покриттів» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона в рамках: науково-дослідної роботи: «Розробка газотермічних покриттів з псевдосплавів на основі міді для захисту плит кристалізаторів МБЛЗ». 73; 22/14-П 2008 р. (№ держреєстрації 0108U004191); програми "Ресурс", проект 7.1.4(7.1) 2010–2012 рр. «Розробити технологію зміцнення і відновлення вузьких стінок слябових кристалізаторів МБЛЗ нанесенням псевдосплавних покриттів електродуговим методом» (№ держреєстрації 0110U006252).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження особливостей процесу формування псевдосплавних покриттів, що одержуються електродуговим напиленням з використанням різнорідних дротяних матеріалів, розробка принципів технології електродугового напилення псевдосплавних покриттів.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести дослідження формування двофазного потоку при електродуговому напиленні різнорідних дротів і впливу режимів напилення на процес диспергування розплавів і характеристики частинок, що напилюються;
- визначити ступінь впливу технологічних параметрів процесу електродугового напилення на формування шару, структуру і властивості псевдосплавних покриттів;
- розробити основні принципи вибору матеріалів і технологічних параметрів електродугового напилення псевдосплавних покриттів.

**Об'єкт дослідження** – процес електродугового напилення псевдосплавних покриттів з використанням різнорідних дротяних матеріалів.

**Предмет дослідження** – вплив параметрів електродугового напилення з використанням різнорідних дротяних матеріалів на формування шару, склад, структуру та властивості псевдосплавних покриттів.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів роботи використовували метод математичного планування експерименту, металографічний аналіз, мікродюрOMETРІЮ, скануючу електронну мікроскопію (SEM), рентгенофазовий аналіз (РФА). Розмір частинок продуктів розпилення визначали за допомогою лазерного аналізатора гранулометричного складу порошків; міцність зчеплення покриттів з основою визначали за клейовою методикою. Оцінка зносостійкості покриттів була виконана за допомогою машини для випробувань на тертя і зношення за класичною схемою «диск-колодка».

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше встановлено кількісну залежність ступеня дисперсності розплавів продуктів розпилення різнорідних дротів Cu-Fe, Cu-Al від параметрів процесу електродугового розпилення. Показано, що найменший розмір частинок в системі мідь-залізо (52 мкм) і мідь-алюміній (44 мкм) досягається при поєднанні максимального тепловкладення в дроти (2,2 і 2,7 МДж/кг) і витрати стисненого повітря 126 м<sup>3</sup>/год.

2. Вперше виявлено можливість міжфазної взаємодії при зіткненні частинок розплавів компонентів псевдосплавного покриття в період руху до основи з утворенням композиційних частинок Cu-Fe, Cu-Al. Встановлено, що структура таких частинок визначається типом міжфазної взаємодії і відмінністю величин поверхневого натягу розплавів компонентів і має вигляд «оболонка-ядро» (Cu-Fe) або конгломерат розплавів (Cu-Al).

3. Показано, що в разі електродугового розпилення різнорідних дротів Cu-Fe при витраті повітря 108–126 м<sup>3</sup>/год полярність розташування компонентів в системі «катод-анод» істотно не впливає на розмір частинок диспергованих розплавів в зв'язку з реалізацією режиму струменевого розпилення дротів.

4. Вперше встановлено, що при електродуговому напиленні при підвищенні відносного тепловкладення в дроти міді і заліза до 1,5 МДж/кг і вище відбувається нагрів частинок міді до стану випаровування, який призводить до втрат міді в покритті до 20 об.%.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- на основі аналізу результатів проведених експериментів для отримання покриттів із заданими структурою і властивостями сформульовані основні

принципи технології ЕДН покриттів з псевдосплавною структурою в залежності від фізико-хімічних і теплофізичних властивостей металів, що використовуються;

– розроблені склади і технологія нанесення електродугових псевдосплавних покриттів на основі міді Cu-NiCr, Cu-порошковий дріт ПД(Fe-FeV), досліджені їх структура, властивості і проведена оцінка їх впливу на процес лиття заготовок, що дозволило рекомендувати розроблені покриття для зміцнення мідних стінок кристалізаторів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), які працюють в умовах зношення при підвищеній температурі;

– розроблено процес електродугового напилення псевдосплавного покриття Cu-ПД(Fe-FeV) для підвищення стійкості фрикційних дисків автоматичної коробки передач екскаватора фірми «Liebherr» (для фірми «Гідроконтінент», м.Київ). Проведено порівняння техніко-економічних показників ЕДН псевдосплавного покриття і виготовлення фрикційних накладок методом ПМ; показана економічна ефективність застосування ЕДН покриття Cu-ПД(Fe-FeV) в порівнянні з виготовленням фрикційних накладок методом ПМ за рахунок зниження витрат на електроенергію (~ в 17 разів) і трудовитрат (в 4 рази). Проведено випробування дисків з покриттями в промислових умовах, які показали (через 120 робочих годин) високу роботоздатність покриттів.

Розроблені автором склади псевдосплавних покриттів, технологія їх напилення і порошковий дріт з продуктами механохімічного синтезу захищені 3 патентами України.

**Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно поставлені завдання та визначено шляхи їх вирішення, проведено теоретичні та експериментальні дослідження, узагальнено результати, зроблено висновки.

Здобувачеві належить аналіз літературних джерел по розробці псевдосплавних матеріалів і газотермічного нанесення псевдосплавних покриттів [1]. Автором проведено дослідження впливу технологічних параметрів електродугового напилення на продукти диспергування різнорідних дротів [3, 12], структуру і властивості псевдосплавних покриттів [4, 14], дослідження триботехнічних характеристик електродугових залізо-мідних псевдосплавних покриттів [5].

Автором спільно з керівником роботи розроблені покриття з псевдосплавною структурою і технологія їх нанесення для захисту деталей і конструкцій в різних галузях промисловості [7–9, 11, 13], в тому числі для підвищення стійкості мідних кристалізаторів МБЛЗ [2, 6]; проведена попередня оцінка впливу псевдосплавних покриттів на теплові процеси в кристалізаторах [6, 10].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: V, VI, VII і VIII всеукраїнських науково-технічних конференціях молодих учених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Україна, смт. Ворзель, 2009 2011, 2013, 2015 рр.); Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє» (м. Київ, 2013).

**Публікації.** Результати дисертації представлені в 14 опублікованих роботах: 6 статей у спеціалізованих наукових журналах, з них 1 стаття у виданні України, яке включено в міжнародну наукометричну базу «Scopus», 5 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій, 3 патенти України на корисну модель.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків.

Загальний обсяг роботи – 163 сторінки машинописного тексту, список використаних джерел складається зі 114 найменувань і представлений на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність виконаної дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, представлені об'єкт і методи дослідження. Визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про їх апробацію та основні наукові роботи, опубліковані за темою дисертації із зазначенням особистого внеску автора. Наведено відомості про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі представлені результати аналізу літературних джерел за темою дисертаційної роботи.

Проаналізовано склади, методи отримання, властивості і області застосування псевдосплавів і псевдосплавних покриттів, наведено досвід дослідження процесу формування електродугових покриттів. Дані про практичне застосування псевдосплавних покриттів вказують на ефективність використання технології ЕДН для їх нанесення і застосування покриттів з псевдосплавною структурою для захисту поверхні виробів від зношення та корозії.

Проведено аналіз розробки теоретичних основ процесу формування покриттів в умовах ЕДН. Встановлено, що на процес плавлення дротів і формування шару покриття при ЕДН найбільше впливають густина, теплопровідність, теплоємність і температура плавлення матеріалу дроту, а розмір продуктів диспергування розплаву дротів залежить головним чином від коефіцієнта поверхневого натягу розплаву матеріалу. Врахування цих особливостей при виборі матеріалів і режимів ЕДН забезпечує стабільність процесу плавлення і розпилення різномірних дротів.

На підставі проведеного аналізу поставлена мета даної роботи і визначено завдання дослідження.

У другому розділі проведено вибір матеріалів для дослідження процесів формування псевдосплавних покриттів в умовах ЕДН при сумісному розпиленні двох різномірних дротів, наведені характеристики матеріалів і обладнання, описані методики проведення досліджень частинок, отриманих під час розпилення дротів, структури і властивостей отриманих покриттів.

Вибір систем псевдосплавів ґрунтувався на базі оцінки міжфазної взаємодії їх компонентів. В якості об'єктів дослідження були обрані системи Cu-Fe, Cu-Al і Cu-Mo. Згідно діаграм стану в системі Cu-Mo компоненти не взаємодіють між собою, в системі Cu-Fe можуть утворюватися обмежені тверді розчини, в системі Cu-Al – тверді розчини і сполуки. В якості основного компоненту була обрана мідь з огляду на те, вона широко використовується в промисловості, а з іншого боку має недостатню стійкість для роботи в умовах підвищених температур і зношення. Застосування в якості зміцнюючих компонентів псевдосплавних покриттів заліза, алюмінію або молібдену дозволить підвищити високотемпературні властивості міцності, твердості і зносостійкості зі збереженням основних властивостей міді.

Для напилення використовували дроти суцільного перерізу наступних марок: Cu – дріт марки М1; Fe – дріт марки Св08А; Al – дріт марки АМц, Мо – дріт марки МЧ.

Діаметр дротів Cu, Fe, Al становив 2 мм, дроту Мо – 1,6 мм. Експерименти проводили з використанням електродугового апарату ЕМ-14М (із закритою схемою сопла).

Для встановлення характеру взаємозв'язку між умовами розпилення дротів і властивостями псевдосплавних покриттів використовували метод математичного планування експерименту. Для цього була обрана матриця з восьми дослідів для чотирьохфакторного планування – напіврепліка  $2^{4-1}$ . В якості змінюваних параметрів (факторів) процесу нанесення були обрані: швидкість подачі дротів –  $W_{др}$ , м/год; напруга на електродах –  $U$ , В; витрата розпилюючого газу (стисненого повітря) –  $V_r$ , м<sup>3</sup>/год; дистанція напилення –  $H$ , м (табл. 1). Виходячи з результатів попередніх експериментів для систем псевдосплавів Cu-Fe і Cu-Al були обрані граничні фактори процесу напилення (табл. 2). У зв'язку з труднощами сумісного плавлення дротів міді і молібдену через істотну різницю в температурах плавлення цих матеріалів дослідження процесу ЕДН покриттів системи Cu-Mo проводили на одному режимі:  $W_{др}$  – 300 м/год;  $U$  – 48 В;  $V_r$  – 126 м<sup>3</sup>/год;  $H$  – 0,12 м. У всіх випадках мідний дріт підключався до позитивного полюса та служив у якості анода.

Таблиця 1 – Матриця планування експериментів (напіврепліка  $2^{4-1}$ )

№ дослідів	$W_{др}$ , м/год	$U$ , В	$V_r$ , м <sup>3</sup> /год	$H$ , м
1	+	+	+	+
2	+	+	–	–
3	+	–	+	–
4	+	–	–	+
5	–	+	+	–
6	–	+	–	+
7	–	–	+	+
8	–	–	–	–

Таблиця 2 – Граничні значення факторів процесу ЕДН для систем матеріалів, що напилюються

Фактор	Cu-Fe		Cu-Al	
	min –	max +	min –	max +
$W_{др}$ , м/год	180	300	180	260
$U$ , В	22	48	22	48
$V_r$ , м <sup>3</sup> /год	108	126	108	126
$H$ , м	0,06	0,2	0,06	0,2

Для визначення розміру частинок продуктів розпилення використовували лазерний аналізатор АСОД-300. Дослідження стану частинок матеріалу, сформованих в результаті зіткнення з основою, проводили з використанням сплет-тесту. При дослідженні продуктів розпилення і напилених покриттів використовували комплексну методику, що включає металографічний аналіз (Neophot-32), мікродюрометрію (ПМТ-3), СЕМ (скануючий електронний мікроскоп JSM-35 CF), рентгенофазовий аналіз (дефрактометр ДРОН-УМ-1). Для кількісного аналізу вмісту компонентів в покриттях, пор і кількості оксидів застосовували метод аналізу зображення за стандартом ASTM B-276. Міцність зчеплення покриттів з основою визначали за клейовою методикою згідно ASTM C633-79. Дослідження триботехнічних властивостей покриттів в умовах сухого тертя проводили за класичною схемою «диск-колодка».

Для оцінки впливу умов газодинаміки і теплообміну на ЕДН покриттів при розпиленні різнорідних дротів для опису процесу застосовано комплексні показники тепловкладення в матеріали, що напилюються ( $IU/G_{др}$ ), і газовий струмінь ( $IU/V_r$ ) (табл. 3).

Таблиця 3 – Показники тепловкладення в дрiт i газувий струмiнь

№ досліджу	Cu-Fe				Cu-Al			
	Витрата дротiв $G_{др}$ , кг/год		$U/G_{др}$ , МДж/кг	$U/V_{г}$ , МДж/м <sup>3</sup>	Витрата дротiв $G_{др}$ , кг/год		$U/G_{др}$ , МДж/кг	$U/V_{г}$ , МДж/м <sup>3</sup>
	Cu	Fe			Cu	Al		
1	8,4	7,4	2,2	0,27	7,3	2,2	2,7	0,21
2	8,4	7,4	2,2	0,32	7,3	2,2	2,7	0,24
3	8,4	7,4	1	0,13	7,3	2,2	1,3	0,09
4	8,4	7,4	1	0,15	7,3	2,2	1,3	0,11
5	5	4,4	1,5	0,11	5	1,5	2,1	0,11
6	5	4,4	1,5	0,13	5	1,5	2,1	0,13
7	5	4,4	0,7	0,05	5	1,5	1	0,05
8	5	4,4	0,7	0,06	5	1,5	1	0,06

У третьому розділі наведені дослідження впливу параметрів ЕДН на процес сумісного розпилення рiзнорiдних дротiв i характеристики частинок, що напилуються.

Результати визначення гранулометричного складу продуктів розпилення як однорiдних (Cu-Cu, Fe-Fe, Al-Al), так i рiзнорiдних (Cu-Fe, Cu-Al) дротiв представлені на рисунку 1.

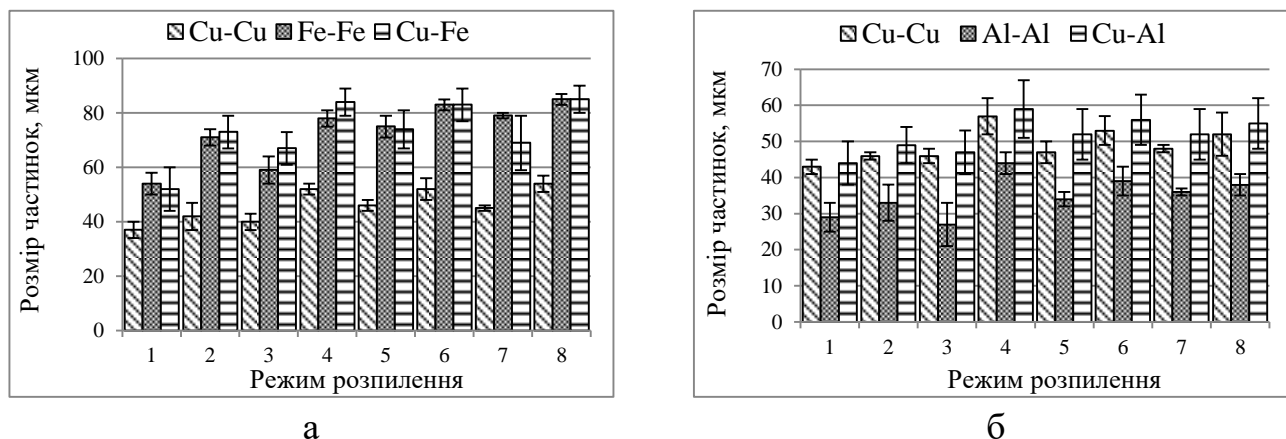


Рисунок 1 – Розмір частинок продуктів сумісного розпилення дротiв Cu-Fe (а), Cu-Al (б) i розпилення однакових дротiв Cu-Cu (а, б), Fe-Fe (а) i Al-Al (б)

З них випливає, що при розпиленні дротiв Cu, Fe i Al розмір частинок в порядку зростання в залежності від складу знаходиться в ряді  $Al < Cu < Fe$ , що відповідає зміні величини коефіцієнту поверхневого натягу розплавів цих металів ( $\sigma_{Al}=914$  мДж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_{Cu}=1351$  мДж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_{Fe}=1840$  мДж/м<sup>2</sup>). Це збігається з загальною закономірністю визначального впливу величини  $\sigma$  на розмір частинок, що утворюються при розпиленні розплаву металів, встановленою в роботах В.О. Роянова, Ю.С. Коробова та ін.

Аналіз гранулометричного складу продуктів розпилення рiзнорiдних дротiв показує, що у випадку системи Cu-Fe він наближений до розміру частинок Fe, отриманих при окремому розпиленні. У той же час фракція, яка відповідає за розміром частинкам Cu, в продукті Cu-Fe практично відсутня. Для встановлення причин цього явища було проведено аналіз структури частинок продуктів розпилення рiзнорiдних дротiв Cu-Fe, Cu-Al i Cu-Mo (рис. 2), який показав наявність як частинок окремих компонентів, так i частинок з двофазною структурою (рис. 2 а, б).



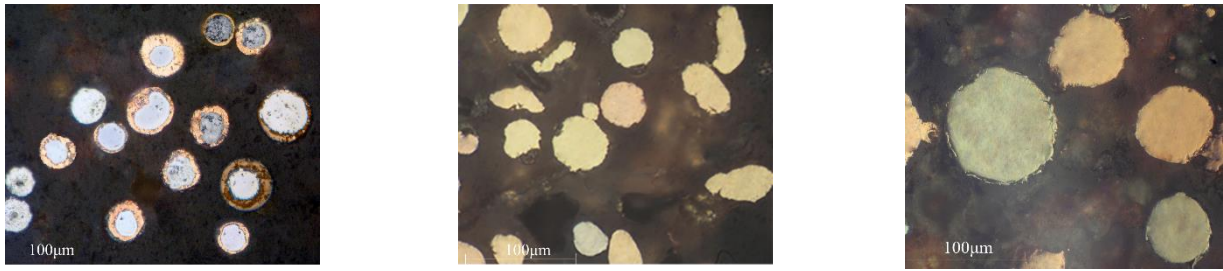


Рисунок 2 – Мікроструктура продуктів розпилення дротів: а – Cu і Fe, б – Cu і Al, в – Cu і Мо

Для оцінки механізму формування структури частинок, які утворилися, було виконано термодинамічний розрахунок процесу об'єднання двох частинок різних розплавів на прикладі системи Cu-Fe з утворенням двошочної структури типу «ядро-оболонка», що була виявлена на мікроструктурі розпилених частинок (рис. 2). Схема процесу взаємодії частинок розплавів Cu і Fe представлена на рисунку 3. Термодинамічну ймовірність типу розвитку процесу об'єднання частинок розплавів Cu і Fe в єдину Cu-Fe-частинку оцінювали по зміні величини вільної енергії поверхні в процесі об'єднання:  $\Delta F = F' - F$ , де  $F' = \sigma \cdot S$  – вільна енергія поверхні частинки після взаємодії,  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу матеріалів,  $S$  – площа поверхні частинки;  $F = F_{Cu} + F_{Fe}$  – сумарна енергія поверхні частинок Cu і Fe до взаємодії.

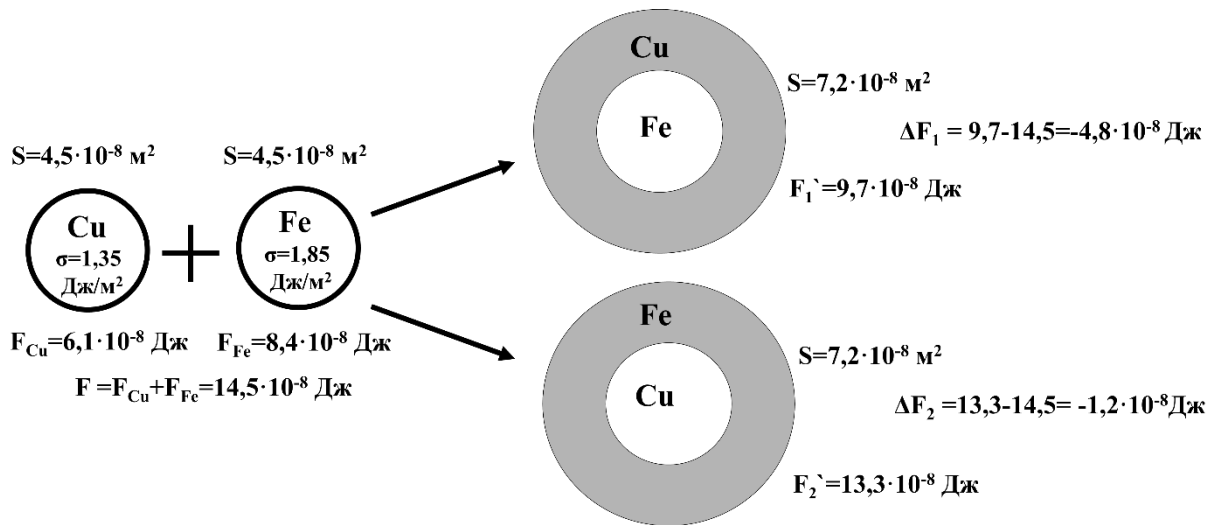


Рисунок 3 – Схема процесу взаємодії частинок розплавів Cu і Fe

При формуванні Cu-оболонки на Fe зміна вільної енергії системи становить  $\Delta F = -4,8 \cdot 10^{-8}$  Дж, у випадку захоплення розплавом Fe розплаву Cu –  $\Delta F = -1,2 \cdot 10^{-8}$  Дж (рис. 3). Результати даного розрахунку дозволяють зробити висновок, що найбільш вірогідний процес взаємодії частинок розплаву Cu і Fe буде протікати в напрямку формування оболонки міді на частинці заліза. Оцінка товщини Cu-оболонки на поверхні Fe-ядра, яка була розрахована за вимірним приростом розміру частинок Cu-Fe, показала, що вона становить 3–4 мкм.

Розвиток процесу такої взаємодії частинок розплавів розпилених різнорідних дротів може протікати як в зоні їх плавлення при реалізації струменевого розпилення дротів, так і при зіткненні частинок при русі до основи за рахунок

різниці швидкостей їх польоту (в системі Cu-Fe ~1,5 рази, в системі Cu-Al ~2,5 рази), яка обумовлена густиною матеріалів.

Міжчастинкова взаємодія при розпиленні дротів Cu-Al згідно мікроструктурі частинок отриманих продуктів розпилення (рис. 2б), відбувається з утворенням конгломератів розплавів Cu-Al.

У випадку системи Cu-Mo спостерігається тільки механічна суміш частинок Cu і Mo (рис. 2в) без ознак їх взаємодії, оскільки температура плавлення Mo перевищує температуру випаровування Cu.

Таким чином, було встановлено, що структура частинок, утворених в результаті взаємодії розплавів при розпиленні різнорідних дротів визначається типом міжфазної взаємодії і відмінністю величин поверхневого натягу розплавів компонентів.

Вплив параметрів ЕДН на розмір частинок продуктів розпилення різнорідних дротів Cu-Fe і Cu-Al відображено в рівняннях регресії:

$$d_{\text{ч}}(\text{Cu-Fe}) = 203,5 - 0,07 \cdot W - 0,22 \cdot U - 0,88 \cdot V - 0,02 \cdot H$$

$$d_{\text{ч}}(\text{Cu-Al}) = 103,9 - 0,05 \cdot W - 0,12 \cdot U - 0,33 \cdot V + 0,014 \cdot H$$

Аналіз рівнянь регресії показує (рис. 4), що на розмір продуктів розпилення найбільш впливає витрата стисненого повітря, збільшення якого веде до зниження їх розміру. Це пов'язано, згідно з механізмом утворення крапель при ЕДН, зі скороченням часу утворення крапель розплаву і збільшенням швидкості видалення розплавленого металу з кінців дротів, що обумовлено більш високою швидкістю газу.

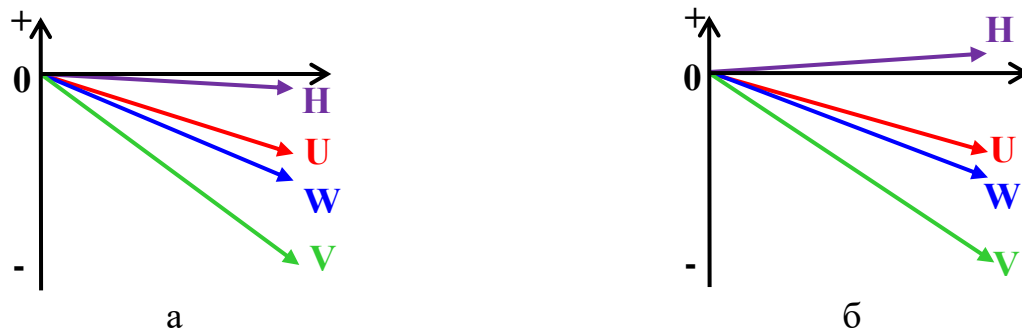


Рисунок 4 – Ступінь впливу факторів процесу розпилення різнорідних дротів на розмір частинок: а – Cu-Fe; б – Cu-Al

Збільшення напруги на електродах і швидкості подачі дротів (що призводить до підвищення струму дуги) також знижує розмір частинок, які розпилюються, що обумовлено підвищенням тепловкладення в напилювані матеріали і газовий струмінь (табл. 3), підвищенням температури розплавленого металу і, як наслідок, зниженням величини поверхневого натягу.

Як свідчить характер трендів, дистанція напилення в інтервалі 0,06–0,2 м суттєво не впливає на розмір частинок, які розпилюються.

На розмір частинок продуктів електродугового розпилення може впливати полярність дротів. Так, в експериментах, які було проведено N. Hussary, A. Pourmousa, було виявлено, що діаметр частинок, що утворюються при розпиленні анода, виявився майже в два рази більше діаметра частинок, отриманих під час розпилення катода. Ними відзначено також, що можна домогтися

однорідності розмірів частинок, які утворюються при розпиленні дротів різної полярності, шляхом збільшення витрати розпилюючого газу (з 25 до 75 м<sup>3</sup>/год).



Рисунок 5 – Розмір частинок, що отримані при сумісному розпиленні дротів Cu і Fe на різній полярності

Для експериментальної перевірки значимості полярності дротів, що розпилюються, в умовах даної роботи були проведені експерименти при розпиленні дротів Cu і Fe зі зміною полярності. Отримані результати (рис. 5) свідчать про наявність відносно незначної і нестабільної різниці в даних, які отримані при зміні полярності дротів в умовах використаних значень параметрів процесу електродугового розпилення дротів Cu-Fe, зокрема при витраті стисненого повітря в діапазоні 108–126 м<sup>3</sup>/год.

За даними рентгенофазового аналізу (рис. 6) продукти розпилення дротів всіх трьох досліджуваних систем (Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo) являють собою механічну суміш вихідних матеріалів і їх оксидів, що означає відсутність нових металевих фаз, тобто формування псевдосплавної структури з матеріалів вихідних дротів.

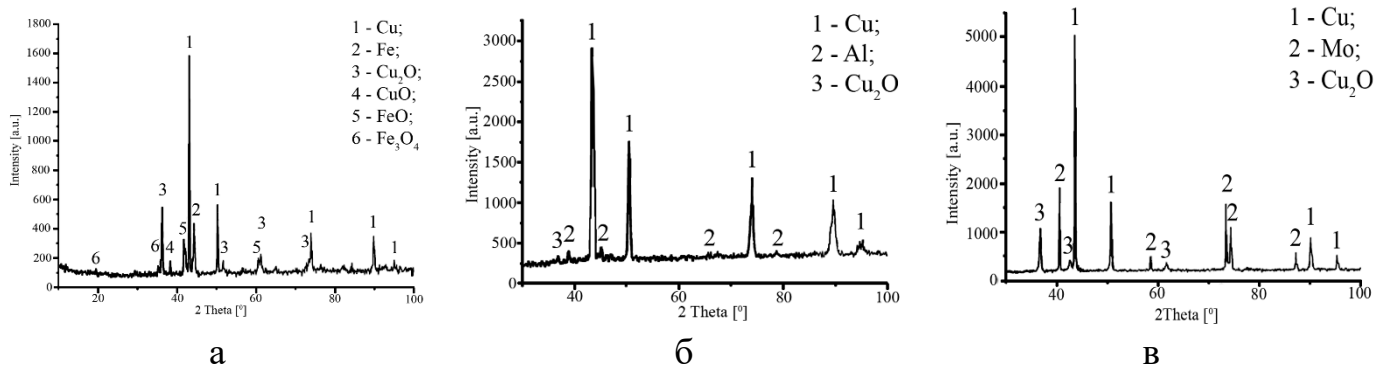


Рисунок 6 – Рентгенограми продуктів сумісного розпилення дротів: а – Cu-Fe; б – Cu-Al; в – Cu-Mo

Одним з важливих етапів експериментального дослідження процесу ГТН в даний час є вивчення зовнішнього вигляду і розмірів частинок покриттів, які утворюються в результаті ударної взаємодії частинок, що напилюються, з поверхнею основи – сплетів, які є одиничними елементами об'єму шару покриття, що формується. Їх вигляд (конфігурація) і розмір відображають умови нагріву і прискорення частинок в напилюючому газовому струмені.

Зовнішній вигляд сплетів (рис. 7), отриманих при даному діапазоні режимів напилення різномірних дротів (для всіх трьох досліджуваних систем), свідчить, що частинки в момент зіткнення з основою знаходяться в розплавленому стані, тобто не встигають затвердіти на дистанції напилення через короткочасність польоту.

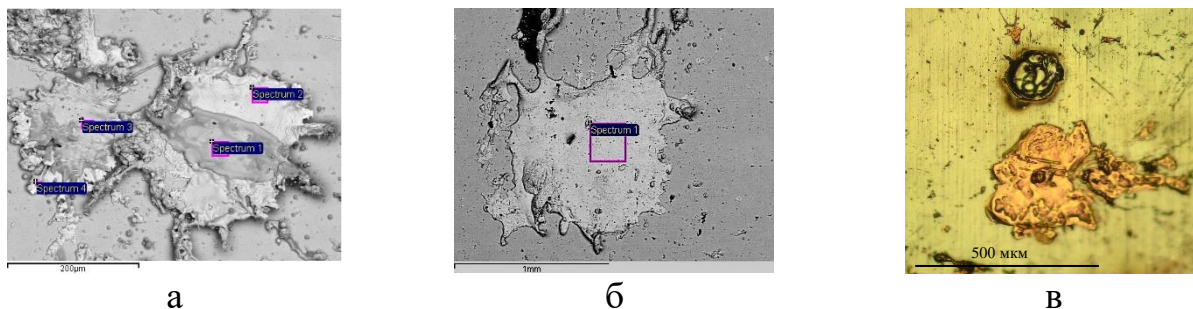


Рисунок 7 – Зовнішній вигляд сплетів, отриманих під час розпилення дротів: а – Cu-Fe; б – Cu-Al; в – Cu-Mo

Таблиця 4 – Хімічний склад сплетів, мас. %				
Cu-Fe				
Sp	Fe	Cu	Al	O
1	88,6	3,2	–	8,2
2	5,0	91,0	–	4,0
3	78,3	13,2	–	8,5
4	4,2	93,6	–	2,2
Cu-Al				
1	–	93,2	4,5	2,3

Хімічний склад сплетів, отриманих під час розпилення дротів Cu і Fe, Cu і Al (табл. 4), свідчить, що вони представляють собою двофазну структуру (складаються з ділянок Cu і Fe, Cu і Al), що підтверджує наявність продуктів міжфазної взаємодії.

Сплети молібдену мають менший діаметр (в 1,5–2 рази), ніж сплети міді, з огляду на те, що поверхневий натяг і в'язкість розплаву молібдену в 1,5 рази вище, ніж міді, і можливість розтікання сплетів молібдену по поверхні обмежена.

У четвертому розділі представлені дослідження мікроструктури, фазового складу і властивостей псевдосплавних покриттів.

Псевдосплавні покриття, що отримані сумісним розпиленням дротів Cu і Fe, Cu і Al, Cu і Mo при обраному діапазоні режимів напилення, мають гетерогенну структуру з вираженою ламелярністю (рис. 8).

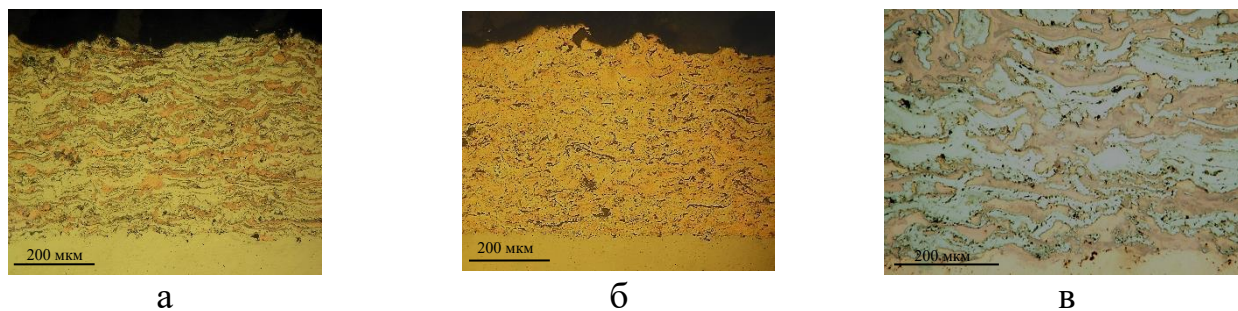


Рисунок 8 – Мікроструктура псевдосплавних покриттів: а – Cu-Fe (дослід 3), б – Cu-Al (дослід 6), в – Cu-Mo

Такий тип структур характерний для покриттів, сформованих з частинок, що знаходяться в момент зіткнення в рідкому стані і які володіють досить високою швидкістю, що узгоджується з результатами дослідження сплетів.

За даними РФА покриття Cu-Fe (рис. 9а) складаються з вихідних компонентів міді, заліза і їх оксидів ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$ ); покриття Cu-Mo (рис. 9в) – з міді, молібдену і оксиду міді ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). У покриттях Cu-Al (рис. 9б), крім вихідних компонентів міді, алюмінію і оксиду міді ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), присутні також домішки інтерметалідних фаз  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  і  $\text{CuAl}_2$ , яких не було виявлено в продуктах розпилення. Це свідчить про те, що перебіг процесів взаємодії компонентів міді і алюмінію з утворенням нових фаз відбувається під час формування шару покриття при взаємодії сплетів.



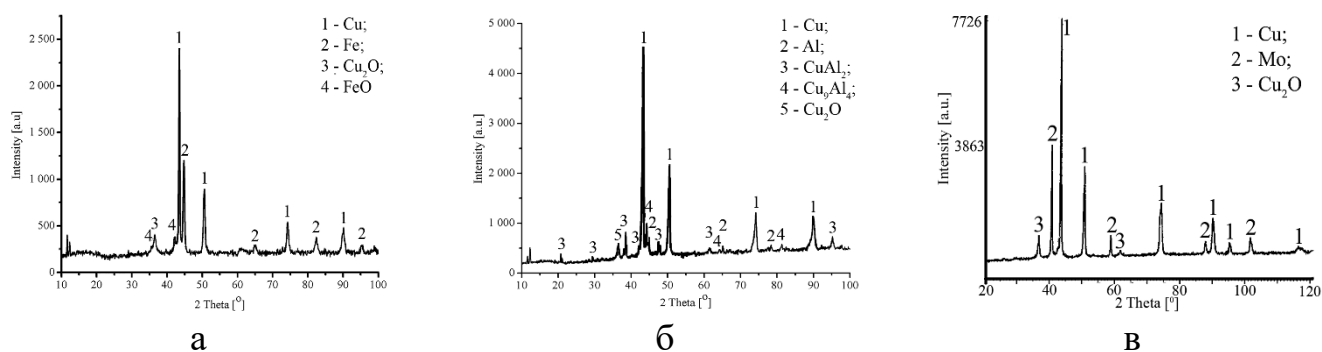


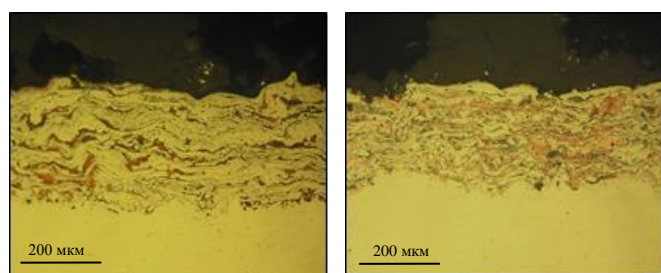
Рисунок 9 – Рентгенограми псевдосплавних покриттів:  
а – Cu-Fe; б – Cu-Al; в – Cu-Mo

Аналіз вмісту компонентів в покриттях Cu-Fe показав, що в результаті напилення відбувається зміна у відносному вмісті в покриттях міді і заліза. При ЕДН псевдосплавних покриттів з дротів Cu і Fe з тепловкладенням в дроти 1,5–2,2 МДж/кг вміст міді в покритті складає ~ 30 об.% (рис. 10а), а при 0,7–1,0 МДж/кг – зберігається на рівні 50 об.% (рис. 10б). Дане явище вочевидь пов'язано з тим, що в процесі напилення температура розплавлених частинок міді в залежності від умов ЕДН може досягати температури кипіння і призводити до її часткового випаровування.

Рівняння регресії, що відображає вплив чинників процесу напилення на вміст міді в покриттях Cu-Fe, має наступний вигляд:

$$\%Cu = 46,18 + 0,029 \cdot W - 0,63 \cdot U + 0,083 \cdot V - 0,004 \cdot H$$

З нього випливає (рис. 11), що найбільш дієвим шляхом збереження співвідношення вмісту компонентів в покритті Cu-Fe щодо вихідного є зменшення величини напруги на електродах. Це веде до зниження тепловкладення в напилювані матеріали і, як наслідок, до зменшення вигорання мідної складової.



а б

Рисунок 10 – Мікроструктура покриттів  
Cu-Fe з вмістом міді: а – 33об.%  
(дослід 2); б – 47об.% (дослід 7)

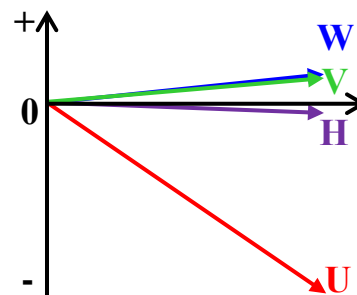


Рисунок 11 – Вплив параметрів процесу  
електродугового напилення на вміст  
міді в покриттях Cu-Fe

Встановлено, що максимальний вміст оксидів в покриттях Cu-Fe і Cu-Al (26–27% і 17%, відповідно) виявлено в покриттях при напиленні з максимальними витратами стисненого повітря (126 м<sup>3</sup>/год) і дистанцією напилення (0,2 м). Підвищення витрати стисненого повітря веде до зменшення діаметра частинок, що розпилюються, при диспергуванні дротів, що веде до збільшення розміру площі розвитку процесу окислення. Збільшення дистанції напилення веде в свою чергу до збільшення часу перебування частинок у струмені і розвитку процесу взаємодії частинок з киснем.

Мікротвердість (HV) покриттів Cu-Fe в залежності від режиму напилення змінюється в межах 1970–2450 МПа (рис. 12а), покриттів Cu-Al – 1970–2690 МПа (рис. 12б), HV покриття Cu-Mo становить  $1890 \pm 230$  МПа.

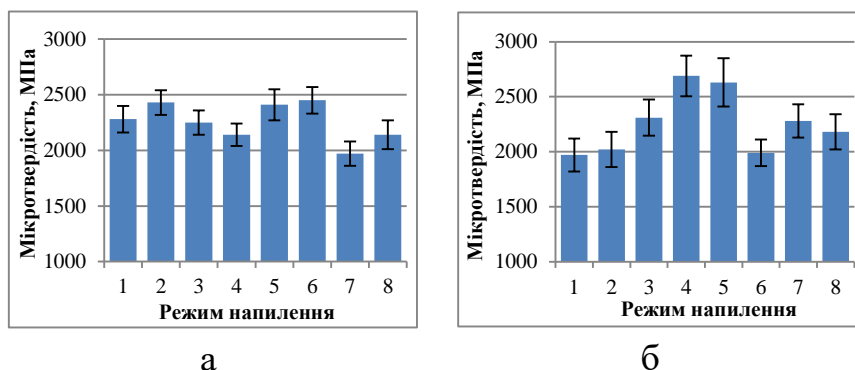


Рисунок 12 – Мікротвердість псевдосплавних покриттів: а – Cu-Fe; б – Cu-Al

Мікротвердість вище, ніж мідна, то при вмісті міді в покритті ~50 об% мікротвердість в середньому нижче на 13%, ніж при вмісті міді в покритті ~30 об%.

Мікротвердість покриттів Cu-Al знижується при збільшенні напруги і підвищується при збільшенні витрати стисненого повітря за рахунок зростання ступеня окислення покриттів ( $HV \text{ Cu}_2\text{O} \sim 2010$  МПа). Мікротвердість покриттів Cu-Al також підвищується відносно вихідних матеріалів міді ( $HV \text{ Cu} \sim 1100$  МПа) і алюмінію ( $HV \text{ Al} \sim 700$  МПа) за рахунок присутності в них інтерметалідних фаз  $\text{CuAl}_2$  і  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ , які утворюються при формуванні шару ( $HV \text{ CuAl}_2 \sim 4000$  МПа;  $HV \text{ Cu}_9\text{Al}_4 \sim 5000$  МПа).

Встановлено, що при всіх параметрах процесу напилення середня міцність зчеплення покриттів Cu-Fe зі сталеву основою при випробуваннях на відрив становить 20–25 МПа (при товщині покриття 200–500 мкм).

Результати триботехнічних випробувань в умовах сухого тертя ковзання в парі зі сталлю показали, що електродугові псевдосплавні покриття Cu-Fe характеризуються стійким значенням коефіцієнта тертя в процесі роботи, який складає 0,25–0,28. Встановлено, що зносостійкість покриттів із вмістом міді ~50 об.% в середньому в 2 рази перевищує зносостійкість покриттів із вмістом ~30 об.% міді, що пов'язано зі зниженням температури нагріву покриттів в процесі тертя через різницю коефіцієнтів теплопровідності Cu і Fe (397 і 78 Вт/м·град, відповідно), а також зменшенням площі контакту залізної складової поверхні тертя і подавленням процесів схоплювання.

**У п'ятому розділі** описано принципи технології ЕДН покриттів з псевдосплавною структурою.

На підставі узагальнення отриманих результатів досліджень сформульовано основні принципи вибору матеріалів і технологічних параметрів ЕДН покриттів з псевдосплавною структурою:

1. Постановка функціонального призначення псевдосплавного покриття, яке розробляється.
2. Вибір складу компонентів псевдосплавного покриття, що забезпечує оптимальну комбінацію їх функціональних властивостей, на основі аналізу діаграм стану компонентів і їх термомеханічної сумісності.
3. Вибір складу і діаметра дrotів, які розпилюються.

4. Експериментальна перевірка впливу параметрів ЕДН на дисперсність продуктів розпилення, структуру і властивості псевдосплавних покриттів з використанням методу математичного планування експерименту. Вибір оптимального режиму за показниками тепловкладення в газ і дріт для врахування їх впливу на склад покриття, яке формується, за рахунок можливих втрат компонентів при випаровуванні.

5. Оцінка відповідності властивостей покриттів вимогам технічного завдання і визначення витрат на нанесення одиниці покриття.

Для оцінки практичної значимості отриманих результатів роботи були розглянуті два напрями використання покриттів з псевдосплавною структурою на основі міді:

- розробка покриттів з підвищеною зносостійкістю при збереженні переваг міді, пов'язаних з такими службовими властивостями, як висока теплопровідність, електропровідність і ін.;

- застосування електродугового методу напилення для заміни технології ПМ при виготовленні фрикційних дисків з метою поліпшення техніко-економічних показників виробництва (зниження витрат виробництва і підвищення продуктивності праці).

У першому випадку виконано розробку покриттів для захисту стінок кристалізаторів МБЛЗ. З метою підвищення їх стійкості до абразивного зносу при 300–400°C за рахунок застосування псевдосплавного покриття на основі Cu в якості другого компонента покриття, що володіє зміцнюючим ефектом, були введені NiCr (80/20) і порошковий дріт ПД(Fe-FeB) (75/25). У випадку Cu-NiCr взаємодія компонентів, як і в випадку Cu-Fe, обмежується наявністю обмежених твердих розчинів.

Попередня розрахункова оцінка коефіцієнта теплопровідності і коефіцієнта термічного розширення (КТР) псевдосплавних покриттів Cu-NiCr, Cu-ПД(Fe-FeB) показала, що при вмісті міді в покриттях на рівні 50об.% теплопровідність покриттів складає 205 і 237 Вт/м·град, КТР – 14,8 і 14,4·10<sup>-6</sup>·1/град, відповідно. В результаті розрахунку напружень на границі покриття – мідна основа при роботі в умовах нагрівання до 400°C і охолодження до 20°C встановлено, що з покриттями 50Cu–50NiCr (об.%) і 50Cu–50(Fe-FeB) (об.%) вони будуть в 1,8 рази нижче, ніж в разі гальванічного нікелевого покриття, яке в даний час найбільш часто застосовується для зміцнення стінок кристалізаторів.

Аналіз впливу складу і товщини псевдосплавних покриттів на температуру стінки кристалізатора і тепловий потік показав, що псевдосплавні покриття Cu-NiCr, Cu-ПД(Fe-FeB) менше впливають на ці характеристики процесу лиття заготовки, ніж гальванічне нікелеве покриття, за рахунок їх високої теплопровідності, що може позитивно впливати на якість злитка.

Для напилення псевдосплавних покриттів з вмістом міді 50об.% використовували дроти Cu, NiCr і ПД(Fe-FeB) діаметром 2 мм. Спираючись на отримані результати проведених досліджень процесу формування псевдосплавних покриттів при ЕДН, напилення проводили з використанням значення тепловкладення в напилювані дроти 1,0 МДж/кг ( $W_{др}=300$  м/год,  $U=22$  В) і витрати стисненого повітря 126 м<sup>3</sup>/год для збереження вихідного співвідношення компонентів в покриттях і формування дрібнодисперсної структури. Дистанція напилення була обрана мінімальною (60 мм) для зниження часу перебування частинок в струмені і ступеня окислення покриттів.

Отримані покриття Cu-NiCr і Cu-ПД(Fe-FeB) мають гетерогенну ламелярну структуру і мають товщину до 6 мм (рис. 13). За даними РФА, покриття складаються

з вихідних компонентів (Cu, NiCr, Fe, FeB) і їх оксидів (CuO<sub>2</sub>, NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Мікротвердість покриттів складає Cu-NiCr – 1850 МПа, Cu-ПД(Fe-FeB) – 2490 МПа.

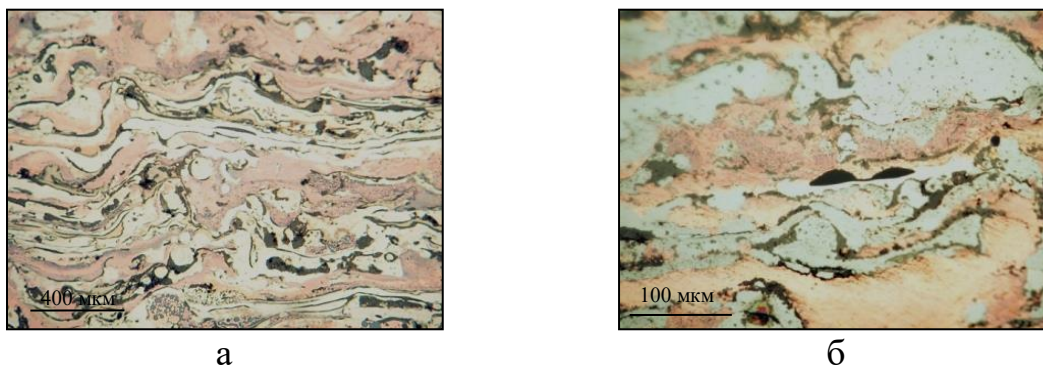


Рисунок 13 – Мікроструктура електродугових псевдосплавних покриттів на основі міді: а – Cu-NiCr; б – Cu-ПД(Fe-FeB)

За результатами проведених випробувань стійкість псевдосплавних покриттів Cu-NiCr і Cu-ПД(Fe-FeB) до зношування при температурі 350 °С перевищує чисту мідь в 4,5 і 22 рази, відповідно. Гаряча твердість покриття Cu-NiCr при 400°С перевищує твердість чистої міді в 3 рази, гальванічного нікелевого покриття – в 2 рази.

Таким чином, на підставі результатів проведених експериментів по електродуговому напиленню і дослідженню службових властивостей, розроблені псевдосплавні покриття Cu-NiCr, Cu-ПД(Fe-FeB) рекомендовані для нанесення на стінки кристаллизаторов МБЛЗ з очікуваним підвищенням стійкості в 2–5 разів.

Розрахунок техніко-економічних показників ЕДН покриття Cu-ПД(Fe-FeB) показав, що собівартість напилення покриття на фрикційний диск в 1,6–1,7 разів нижче виготовлення накладок методом ПМ за рахунок зниження витрат на електроенергію (в 17 разів) і трудовитрат (в 4 рази). Виходячи з цього, можна говорити про економічну ефективність застосування ЕДН псевдосплавних покриттів Cu-ПД(Fe-FeB) для підвищення стійкості фрикційних дисків, які є одними з найбільш затребуваних запасних частин для сучасних машин і механізмів.



Рисунок 14 – Фрикційний диск з псевдосплавним покриттям Cu-ПД(Fe-FeB)

Проведено напилення псевдосплавних покриттів Cu-ПД(Fe-FeB) на партію фрикційних дисків муфти коробки передач екскаватора фірми «Liebherr» (рис. 14). Експлуатаційні випробування дисків з покриттям на ТОВ «Гідроконтінент» (м. Київ) показали високу роботоздатність псевдосплавних покриттів (через 120 робочих годин) без необхідності регулювання зазору між дисками.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. З використанням методу математичного планування експерименту проведено комплекс досліджень по визначенню впливу технологічних параметрів процесу ЕДН покриттів з псевдосплавною структурою на розвиток процесів диспергування при розпилюванні пар дротів Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo, формування потоку частинок, що



напилюються, і шару покриття. Математичною обробкою отриманих результатів отримані рівняння регресії, що дозволило побудувати карти трендів, які відображають вплив параметрів напилення на показники процесу напилення та властивості покриттів.

2. Встановлено, що на розмір частинок розплавів, які утворюються, впливають матеріал дроту (Cu, Fe, Al), витрата стисненого повітря ( $V_r$ ) і показники питомого тепловкладення в напилювані дроти ( $IU/G_{др}$ ), які визначають динамічний натиск струменя і ступінь нагріву частинок розплавів. Максимальний розмір частинок продуктів розпилення склав 84–85 мкм у випадку системи Cu-Fe і 55–60 мкм для Cu-Al, а мінімальні розміри – 52 і 44 мкм відповідно.

3. Встановлено, що при електродуговому сумісному розпиленні дротів Cu і Fe в умовах витрати стисненого повітря 108–126 м<sup>3</sup>/год полярність дротів на розмір часток продуктів розпилення практично не впливає.

4. Вперше виявлено, що в умовах електродугового розпилення різнорідних дротів відбувається формування частинок з двофазною структурою з розплавів компонентів псевдосплавного покриття, яке є результатом міжфазної взаємодії суміші розплавів в об'ємі краплі. Розвиток такого процесу може відбуватися в області режиму струменевого розпилення різнорідних дротів, а також при зіткненні частинок розплавів окремих компонентів на стадії їх польоту до основи через різницю швидкостей, яка обумовлена розміром частинок і густиною їх матеріалів. Дослідження продукту розпилення системи Cu-Fe методами металографії і скануючої електронної мікроскопії показало, що він складається зі сферичних частинок, що мають структуру «Cu(оболонка) – Fe(ядро)». Для оцінки механізму формування подібної структури було використано метод термодинамічного аналізу. Він показав, що причина полягає в різниці величин коефіцієнта поверхневого натягу розплавів Cu і Fe. У разі системи Cu-Al частинки отриманого продукту розпилення мають вигляд конгломератів фаз компонентів.

5. Псевдосплавні покриття, отримані при напиленні систем Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo, характеризуються вираженою гетерогенністю структури, що складається з вихідних матеріалів і їх оксидів. У покриттях Cu-Al присутні також домішки інтерметалідних фаз  $Cu_9Al_4$  і  $CuAl_2$ , що утворюються при формуванні шару покриття.

6. Встановлено, що на вміст Cu в покриттях Cu-Fe впливає величина тепловкладення в матеріал ( $IU/G_{др}$ ), який розпилюється. Його збільшення з 0,7–1,0 МДж/кг до 1,5–2,2 МДж/кг призводить до зниження вмісту міді відносно сталі з 50 до 30 об.%, що пов'язано з її випаровуванням в процесі напилення.

7. Максимальний вміст оксидів в покриттях Cu-Fe, Cu-Al (26–27% і 17%, відповідно) виявлено в покриттях при напиленні з витратою стисненого повітря 126 м<sup>3</sup>/год і дистанції напилення 0,2 м, що пов'язано зі збільшенням дисперсності матеріалів, які розпилюються, і збільшенням часу взаємодії частинок з киснем.

8. Мікротвердість псевдосплавних покриттів Cu-Fe становить 2–2,5 ГПа, покриттів Cu-Al – 2–2,7 ГПа, і покриття Cu-Mo – 1,9 ГПа. Встановлено, що мікротвердість покриттів Cu-Fe залежить від співвідношення в них мідної та залізної складових, зважаючи на відмінність мікротвердості цих матеріалів. Мікротвердість покриттів Cu-Al знижується при збільшенні напруги на електродах і підвищується при збільшенні витрати стисненого повітря за рахунок зростання ступеня окислення покриттів і зменшення домішок інтерметалідних фаз.

9. Результати триботехнічних випробувань псевдосплавних покриттів Cu-Fe в умовах сухого тертя ковзання показали, що вони характеризуються стійким значенням коефіцієнта тертя в процесі роботи в умовах пари «гальмівна колодка – колесо», який складає 0,25–0,28. Встановлено, що зносостійкість покриттів з вмістом міді 50об.% в 2 рази перевищує зносостійкість покриттів з вмістом ~ 30об.% міді, що пов'язано зі зниженням температури нагріву покриттів в процесі тертя, а також зменшенням площі контакту залізної складової поверхні тертя і подавленням процесів схоплювання.

10. На підставі результатів досліджень визначено принципи технології ЕДН псевдосплавних покриттів з керованою структурою та властивостями, які полягають у виборі компонентів покриття з урахуванням їх термодинамічної та термомеханічної сумісності, а також в оптимізації параметрів напилення з використанням математичного планування експерименту.

11. Розроблено псевдосплавні покриття на основі міді (отримані сумісним розпиленням дроту Cu і NiCr, Cu і порошкового дроту ПД(Fe-FeB), які володіють зносостійкістю при підвищеній температурі (350°C), що перевищує стійкість чистої міді в 5 разів для покриття Cu-NiCr і 22 рази для покриття Cu-ПД(Fe-FeB), а також мають кращу інтенсивність відведення тепла від стінки кристалізатора МБЛЗ, ніж гальванічне нікелеве покриття.

12. Псевдосплавні покриття Cu-ПД(Fe-FeB) були нанесені на робочу поверхню дисків фрикційної муфти коробки передач екскаватора фірми «Liebherr», натурні випробування яких свідчать про високу роботоздатність покриття. Показана економічна ефективність застосування ЕДН покриття Cu-ПД(Fe-FeB) в порівнянні з виготовленням фрикційних накладок методом порошкової металургії за рахунок зниження витрат на електроенергію (~ в 17 разів) і трудовитрат (в 4 рази).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. **Вигилянская Н.В.**, Борисов Ю.С., Демьянов И.А. Газотермическое напыление псевдосплавных покрытий (Обзор). Автоматическая сварка. 2012. №1. С. 48–55.

2. Борисов Ю.С., Демьянов И.А., **Вигилянская Н.В.** Разработка технологии упрочнения и восстановления узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ путем нанесения псевдосплавных покрытий способом электродуговой металлизации / Проект 7.4.1: ЦПК НАН Украины «Проблемы ресурса и надежной эксплуатации конструкций и машин» // Сб. научн. статей по результатам исследований в 2010–2012 г.г. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2012. С. 377–380.

3. Исследование диспергирования разнородных проволочных материалов в процессе электродугового напыления / Ю.С. Борисов, **Н.В. Вигилянская**, И.А. Демьянов, А.П. Грищенко, А.П. Мурашов. Автоматическая сварка. 2013. №2. С.5-31.

4. 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. Автоматическая сварка. 2013. №12. С. 11-17.

5. 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. Проблеме тертя та зношування. 2018. №1 (78). С. 37–49.

6. Development of electric-arc pseudoalloy coatings for the strengthening of copper walls of molds / Yu. Borisov, **N. Vigiľianska**, I. Demianov, O. Grishchenko. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3, №12 (93). P. 6–14.

7. Патон Б. Є., Борисов Ю. С., Дем'янов І. А., Мурашов А. П., **Вігілянська Н. В.**, Грищенко О. П., Саєнко В. Я. Псевдосплавні покриття на основі міді та спосіб їх нанесення: пат. №55585 Україна: МПК С23С 4/12, С23С 4/04. №а201005325; заявл. 30.04.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. 3 с.

8. Патон Б. Є., Борисов Ю. С., Дем'янов І. А., Мурашов А. П., **Вігілянська Н. В.**, Грищенко О. П., Саєнко В. Я. Спосіб нанесення псевдосплавних покриттів на основі міді: пат. №58852 Україна: МПК С23С 4/12. № u201012034; заявл. 30.04.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. 2 с.

9. Борисов Ю. С., Дем'янов І. А., Рябцев І.О., **Вігілянська Н. В.**, Рупчев В.Л., Бурлаченко О.М. Порошковий дріт з продуктами механохімічного синтезу для газотермічного нанесення псевдосплавних покриттів: пат. №80853 Україна: МПК С23С 4/00. №u201215124; заявл. 28.12.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11. 3 с.

10. **Вигилянская Н. В.** Расчетная оценка влияния псевдосплавных покрытий на тепловые процессы в кристаллизаторах МНЛЗ. Зварювання та споріднені технології: матеріали V всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів (м. Київ, 27–29 травня 2009 р.). Київ, 2009. С. 78.

11. **Вигилянская Н. В.** Электродуговые Cu-содержащие покрытия с псевдосплавной структурой. Зварювання та споріднені технології: матеріали VI науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів (м. Київ, 25–27 травня 2011 р.). Київ, 2011. С. 86.

12. **Вигилянская Н. В.** Исследование процесса совместного распыления разнородных проволок в процессе электродугового напыления. Сварка и родственные технологии: материалы VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (г. Киев, 22–24 мая 2013 р.). Киев, 2013. С. 89.

13. Борисов Ю.С., Демьянов И.А., **Вигилянская Н.В.** Электродуговое напыление покрытий с псевдосплавной структурой. Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: сборник тезисов стендовых докладов Международной конференции (г. Киев, 25–26 ноября 2013г.). Киев, 2013. С.163.

14. **Вигилянская Н. В.** Исследование процесса формирования псевдосплавных покрытий при электродуговом напылении. Зварювання та споріднені технології: матеріали VIII міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів (сmt. Ворзель, Київська обл., 20–22 травня 2015 р.). Київ, 2015. С. 93.

## АНОТАЦІЯ

**Вігілянська Н.В. Електродугове напилення композиційних покриттів з псевдосплавною структурою на основі міді. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю – 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню процесу формування покриттів з псевдосплавною структурою в умовах електродугового напилення (ЕДН) з застосуванням різнорідних дротяних матеріалів.

Дослідження проводили з використанням систем Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo, що відрізняються за видами міжфазної взаємодії.

Для встановлення характеру взаємозв'язку між умовами напилення з процесом формування псевдосплавних покриттів використовували метод математичного планування експерименту. Встановлено закономірності зміни дисперсності частинок продуктів розпилення різнорідних дротів в залежності від режимів ЕДН, визначено ступінь впливу параметрів напилення на структуру і властивості псевдосплавних покриттів.

Встановлено, що в процесі перенесення до основи продуктів розпилення дротів Cu і Fe, Cu і Al, відбувається міжфазна взаємодія розплавлених крапель з утворенням частинок псевдосплавної структури.

В результаті ЕДН різнорідних дротів отримані покриття Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo з псевдосплавною структурою. Було виявлено, що в покриттях Cu-Fe в результаті напилення з тепловкладенням в дроти 1,5–2,2 МДж/кг відбувається зниження відносного вмісту міді в покритті за рахунок її випаровування. При формуванні шару покриття Cu-Al спостерігається поява продуктів взаємодії міді і алюмінію з утворенням інтерметалідних фаз.

Розроблено основні принципи технології ЕДН покриттів з псевдосплавною структурою. Запропоновано підходи до вибору складів псевдосплавних покриттів різного функціонального призначення.

На підставі проведених експериментів по ЕДН псевдосплавних покриттів Cu-NiCr, Cu-порошковий дріт ПД(Fe-FeV) і результатів дослідження властивостей, розроблені покриття рекомендовані використання з метою підвищення стійкості стінок кристалізаторів машин безперервного лиття заготовок.

Розроблені покриття Cu-ПД(Fe-FeV) успішно застосовуються для підвищення ресурсу роботи фрикційних дисків коробки передач екскаваторної техніки.

**Ключові слова:** електродугове напилення, різнорідні дротяні матеріали, псевдосплав, покриття, псевдосплавна структура, параметри напилення, властивості покриттів.

## АННОТАЦІЯ

**Вигилянская Н.В. Электродуговое напыление композиционных покрытий с псевдосплавной структурой на основе меди. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные процессы и технологии». Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, 2020.

Диссертация посвящена исследованию процесса формирования покрытий с псевдосплавной структурой в условиях электродугового напыления (ЭДН) с применением разнородных проволочных материалов.

Исследования проводили с использованием систем Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo, отличающихся по видам межфазного взаимодействия. Для определения типов

связей между компонентами псевдосплавных покрытий использованы диаграммы состояния выбранных систем псевдосплавов.

Для установления характера взаимосвязи между условиями напыления с процессом формирования псевдосплавных покрытий использовали метод математического планирования многофакторного эксперимента. В качестве изменяемых факторов процесса ЭДН были выбраны параметры скорости подачи проволоки, напряжения на электродах, расхода распыляющего газа (сжатого воздуха) и дистанции напыления.

Установлены закономерности изменения дисперсности частиц продуктов распыления разнородных проволок в зависимости от режимов ЭДН.

При исследовании формирования двухфазной струи при совместном распылении разнородных проволок, было установлено, что в процессе переноса к основе продуктов распыления проволок Cu и Fe, Cu и Al, происходит межфазное взаимодействие расплавленных капель с образованием частиц псевдосплавной структуры. При распылении проволок Cu и Mo взаимодействия частиц не происходит ввиду существенной разницы в температуре плавления этих материалов.

В результате ЭДН разнородных проволок получены покрытия Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo с псевдосплавной структурой, характеризующейся выраженной гетерогенностью и ламелярностью. Было обнаружено, что в покрытиях Cu-Fe в результате напыления с повышенным тепловложением в проволоки напыляемых материалов (1,5–2,2 МДж/кг) происходит снижение относительного содержания меди в покрытии за счет ее испарения. При формировании слоя покрытия Cu-Al наблюдается появление продуктов взаимодействия меди и алюминия с образованием интерметаллидных фаз. Покрытия Cu-Fe и Cu-Mo состоят из исходных компонентов и их оксидов.

Путем математической обработки результатов исследований получены регрессионные уравнения и определена степень влияния факторов напыления на комплекс характеристик псевдосплавных покрытий (структуру и свойства).

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны основные принципы технологии ЭДН покрытий с псевдосплавной структурой. Предложены подходы к выбору составов псевдосплавных покрытий различного функционального назначения. Основными критериями выбора составов таких покрытий является термодинамическая и термомеханическая совместимость компонентов.

Выполнена разработка покрытий для защиты стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). На основании проведенных экспериментов по электродуговому напылению псевдосплавных покрытий Cu-NiCr, Cu-порошковая проволока ПП(Fe-FeV) и результатов исследования свойств, разработанные покрытия рекомендованы для применения с целью повышения стойкости стенок кристаллизаторов МНЛЗ.

Показана экономическая эффективность применения псевдосплавных покрытий Cu-ПП(Fe-FeV) для повышения стойкости фрикционных дисков в сравнении с фрикционными накладками, получаемыми методами порошковой металлургии. Разработанные покрытия Cu-ПП(Fe-FeV) успешно применяются для

повышения ресурса работы фрикционных дисков коробки передач экскаваторной техники.

**Ключевые слова:** электродуговое напыление, разнородные проволочные материалы, псевдосплав, покрытие, псевдосплавная структура, параметры напыления, свойства покрытий.

## ABSTRACT

**Vigilianska N.V. Electric arc spraying of composite copper-based coatings with pseudoalloy structure. – Manuscript**

PhD thesis on specialty 05.03.06 «Welding and related process and technologies», E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the study of the process of coatings formation with a pseudoalloy structure in the conditions of electric arc spraying (EAS) using dissimilar wire materials.

The studies were carried out using Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo systems which have different types of interphase interaction of the components.

Method of mathematical planning of the experiment was used to study the character of the relationship between the spraying conditions and the process of pseudoalloy coatings formation. The regularities of the change in the dispersion of the products of dissimilar wires atomization depending on the EAS modes were established. The degree of influence of the spraying parameters on the structure and properties of pseudoalloy coatings was determined.

It was established that during the transfer of the atomization products of Cu and Fe, Cu and Al wires to the substrate interphase interaction of molten droplets occurs with the formation of particles of a pseudoalloy structure.

Coatings of Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Mo with a pseudoalloy structure were obtained as a result of EAS of dissimilar wires. It was found that the relative copper content in the Cu-Fe coatings is decreased due to its evaporation as a result of spraying with heat input in the wire of 1.5–2.2 MJ/kg. During the formation of the Cu-Al coating layer the appearance of the interaction products of copper and aluminum with the formation of intermetallic phases is observed.

The basic principles of EAS technology for production of the coatings with a pseudoalloy structure were developed. Approaches to the choice of compositions of pseudoalloy coatings for various functional purposes were proposed.

Based on the experiments of the of pseudoalloy coatings Cu-NiCr, Cu-flux-cored wire (FCW(Fe-FeB)) and the results of the study of its properties the developed coatings are recommended for application in order to increase the resistance of the walls of molds for continuous casting machines.

The developed Cu-FCW(Fe-FeB) coatings are successfully used to increase the service life of the friction discs of the excavator gearbox.

**Keywords:** electric arc spraying, dissimilar wire materials, pseudoalloy, coating, pseudoalloy structure, spraying parameters, coatings properties.

Підписано до друку 27.02.2020 р. Формат 60x80/16. Пап. офс. № 1. Офс. друк. Ум.друк.0,7.  
Ум.фарбо-відб.0,9. Тираж 110 прим. Зам. № 354  
ПОД ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 03150, Київ-150, вул. Антоновича,69