

<sup>1</sup>О. Й. Мажейка, канд. техн. наук, проф.,

<sup>1</sup>С. І. Маркович, канд. техн. наук, доц.,

<sup>1</sup>Ю. В. Рябоволик, асп.,

<sup>2</sup>М. М. Студент, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ, ПРИДАТНИХ ДО ОБРОБКИ ЛЕЗОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

<sup>1</sup>Кіровоградський національний технічний університет

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка

*Досліджено структуру і трибологічні характеристики електродугових покриттів, придатних до обробки лезовим інструментом. Визначено ступінь вигорання легувальних елементів у покриттях при розпиленні дротів, проведено спектральний аналіз складових покриття та досліджено характер зміни коефіцієнта тертя у разі зміни навантаження.*

**Постановка проблеми.** Створення внутрішніх покриттів, які б поєднували високу зносостійкість з придатністю до обробки лезовим інструментом є досить актуальним завданням. Це обумовлено як складністю механічної обробки внутрішніх поверхонь корпусних деталей машин, так і високими вимогами до їх трибологічних характеристик [1; 2].

Для одержання покриттів з необхідними властивостями були розроблені порошкові дроти на основі феросплавів двох груп: при розпиленні порошкових дротів першої групи у покритті реалізується карбідне зміцнення, а при розпиленні дротів другої групи у покриттях реалізується зміцнення за рахунок мартенситного перетворення [3; 4].

**Мета дослідження.** Визначення трибологічних характеристик композиційних покриттів в умовах граничного тертя за різних питомих навантажень.

**Методика досліджень.** Електродугові покриття наносили електрометалізатором ЕМ-14 шляхом розпилення порошкових дротів діаметром 1,8 мм. Як шихтові матеріали використовували ферохром ФХ-800, ГОСТ 4757-8, ферокремній ФС-65 (ГОСТ 1415-78),

феромарганець ФМн-05 (ГОСТ 4755–80), феромолібден ФМО-60 (ГОСТ 4756–77), алюмінієвий порошок ПА-40. Оболонку дроту товщиною 0,4 мм виготовляли зі стрічки шириною 10 мм із сталі 08 кп [4]. Коефіцієнт заповнення дроту становив 22–23 %. Режими нанесення покриттів: напруга дуги 32–33 В, струм дуги 150 А. Розпилювальний газ – повітря, тиск повітряного струменя 0,6 МПа. Віддал від дуги до зразка – 100 мм.

Структуру і хімічний склад покриттів та аналіз поверхонь тертя зразків після випробувань досліджували на електронному мікроскопі EVO-40 XVP (Carl Zeiss) із системою мікροаналізу EVO-4XVP. Мікротвердість визначали на твердомірі ПМТ-3.

Трибологічні дослідження проводили на установці СМЦ-2 за схемою диск–колодка за граничного тертя. Контактне навантаження 4–20 МПа, швидкість ковзання 0,67 м/с. Мاستило – М10Г2К (ГОСТ 8584–78). Матеріал колодки – бронза Бр С-30 та сплав на алюмінієвій основі АМО. Покриття наносили на зразки у вигляді диска (матеріал – сталь 45, HRC 28-30) діаметром 40 мм та шириною 10 мм і шліфували до робочої товщини 1 мм. Еталон зносостійкості – сталь ШХ-15 HRC-62. Фазовий склад покриттів у вихідному стані та його зміну вивчали на дифрактометрі ДРОН-3 з комп'ютерним записом дифрактограм (випромінювання  $\text{CuK}_\alpha$ ,  $U = 32$  кВ,  $I = 15$  мА). Крок сканування –  $0,05^\circ$ .

**Структура покриттів мартенситного типу зміцнення 1.** Електродугові покриття з порошкового дроту 1 мають типову ламелярну будову. Краплини, з яких формується покриття при напыленні на металеву поверхню, розділені між собою тонкими плівками з оксидів (рис. 1). Ці плівки особливо чітко проявляються на фото у вторинних електронах, оскільки вони мають малу питому вагу і тому проявляються у вигляді чорних ниток між ламелями покриття (рис. 2). Великі оксидні вкраплення у покритті розміром до 100 мкм формуються у вигляді окремих компактних зерен (рис. 1). За наявності у шихті порошкового дроту порошку алюмінію ці оксидні вкраплення складаються з оксиду алюмінію з невеликими домішками кремнію, хрому, марганцю або заліза. Крім оксидних вкраплення з оксиду алюмінію, трапляються великі оксидні вкраплення на основі оксиду заліза, легованого незначною кількістю алюмінію, молібдену, хрому та кремнію.

Характерною особливістю структури напилених покриттів є пори. Крупні пори мають у поперечнику до 70 мкм (рис. 1 та 2). Спектральний аналіз дна цих пор показує незначне окиснення матричного сплаву покриття рис. 2 (спектр 2).

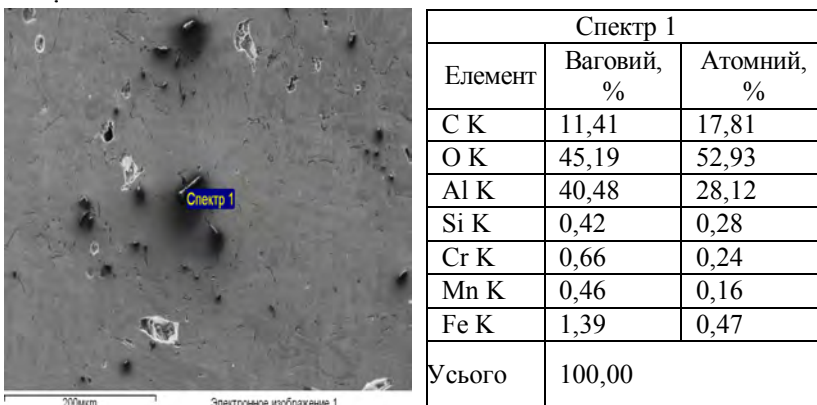


Рис. 1. Структура та результати спектрального аналізу спектра 1 покриття 1 у відбитих електронах

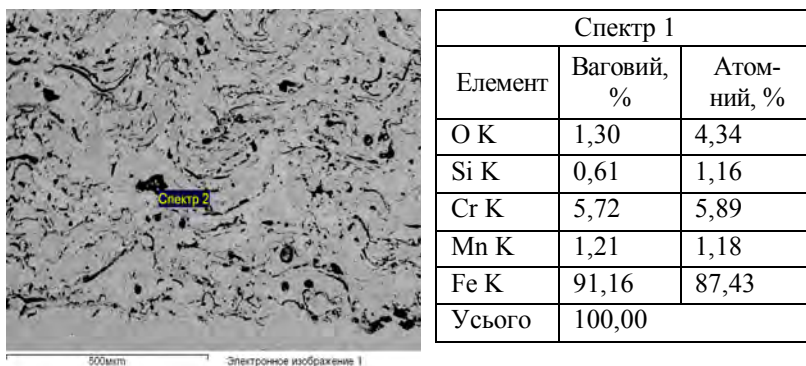


Рис. 2. Структура та результати спектрального аналізу спектра 2 покриття 1 у відбитих електронах

Спектральний аналіз ламелей різних зон напиленого покриття встановлено середній ступінь його гетерогенності. Так, уміст алюмінію (у масових частках) коливається в межах 1,8–2,2 %, хрому 5,2–6,4%,

кремнію 2,1–3,0 %, марганцю 0,8–1,6 %, молібдену 1,7–2,4%. Окремих частинок карбідів хрому або молібдену в покритті не виявлено. Це свідчить про те, що при плавленні порошкового дроту шихтові матеріали, зокрема феросплави хрому, марганцю, кремнію та молібдену, добре змочуються та повністю розчиняються в розплаві оболонки (маловуглецева сталь), утворюючи гетерогенний розплав.

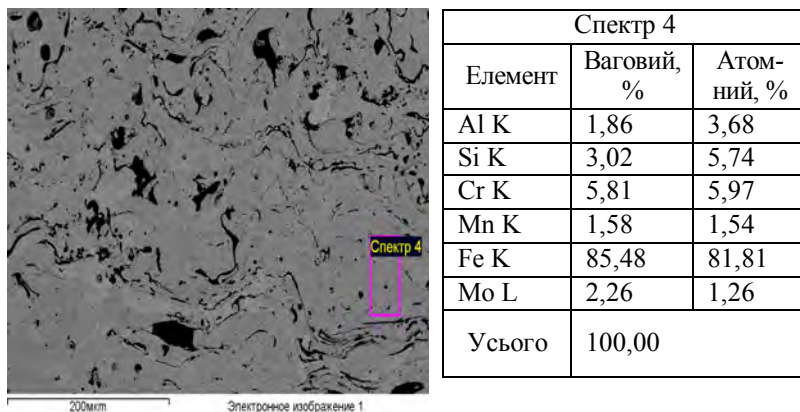


Рис. 3. Структура та результати спектрального аналізу спектра 4 покриття 1 у відбитих електронах

Розподіл елементів у покритті підтверджує середній ступінь гетерогенності покриття. Так, одиничні концентраційні піки вуглецю в покритті (рис. 4, а) свідчать про задовільне розчинення шихтових матеріалів у розплаві сталльної оболонки при напиленні покриття. Також одинічні концентраційні піки алюмінію підтверджують наявність великої концентрації алюмінію в оксидних фазах покриття, що розташовані по межах ламелей покриття.

Хром досить рівномірно розподілений у покритті, лише в оксидних фазах його майже немає (рис.4, в).

**Структура покриттів карбідного типу зміцнення 2.** Структура покриття з ПД 2 також має характерну ламелярну будову (рис. 5).

Середній вміст алюмінію у покритті становить 15,3 %, хрому 3.18%, кисню 3,05% (див. рис. 1). У структурі покриття містяться великі оксидні вкраплення легованого оксиду заліза алюмінієм та хромом розміром до 70 мкм та дрібніші оксидні вкраплення оксиду алюмінію легованого залізом у поперечнику до 30 мкм.

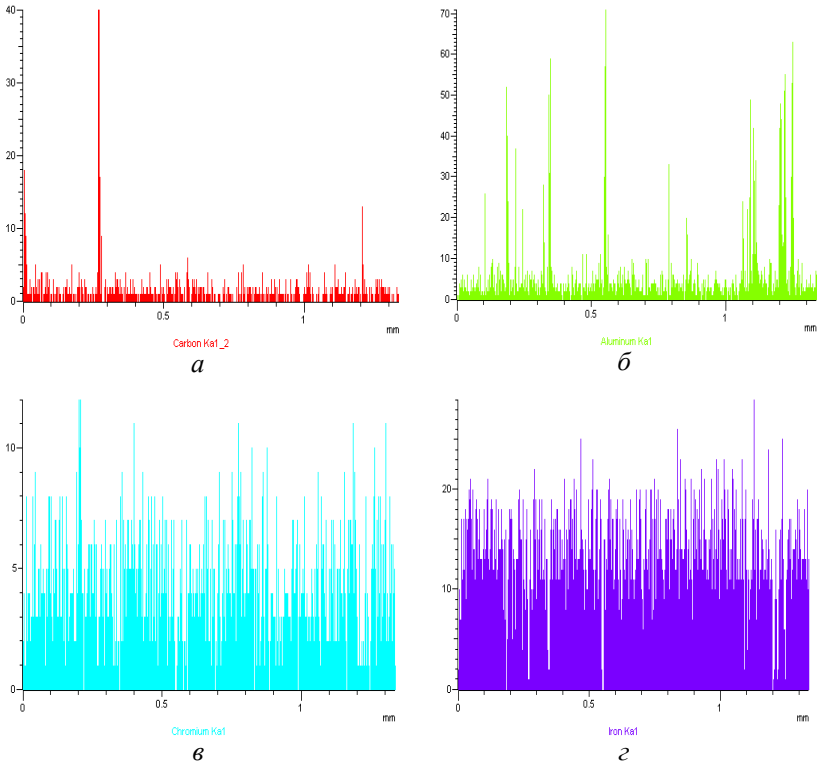
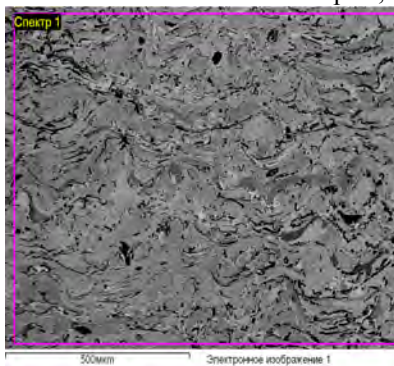
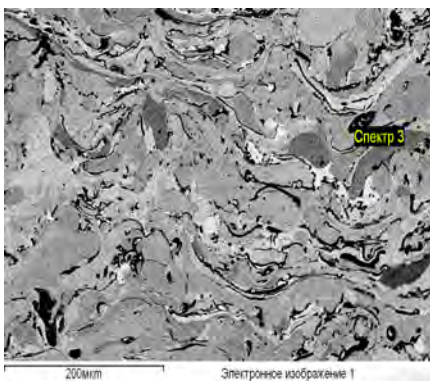


Рис.4. Розподіл елементів у покритті з ПД 1: *а* – вуглець; *б*– алюміній; *в* – хром; *г* – залізо



Спектр 1		
Елемент	Ваговий, %	Атомний, %
O	3,05	8,56
Al	15,30	25,50
Cr	3,18	2,75
Fe	78,48	63,19
Усього	100,00	

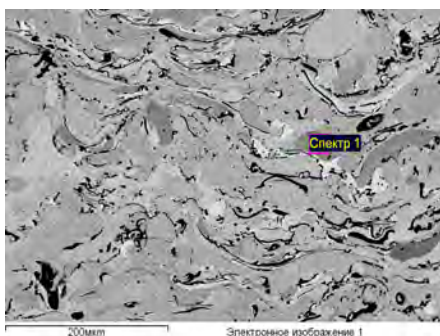
Рис. 5. Структура та результати спектрального аналізу спектра 1 покриття 2 у відбитих електронах



Спектр 3		
Элемент	Ваговий, %	Атомний, %
O	9,71	26,00
Al	5,70	9,05
Cr	1,72	1,42
Fe	82,86	63,54
Усього	100,00	

Рис.6. Структура та результати спектрального аналізу спектра 3 покриття 2 у відбитих електронах

Гетерогенність матричної фази покриття є високою, оскільки в окремих ламелях покриття вміст алюмінію становить 23 %, а в інших – 5% (рис. 6, 7) .



Спектр 3		
Элемент	Ваговий, %	Атомний, %
Al	22.89	37.95
Cr	4.77	4.11
Fe	72.34	57.95
Усього	100.00	

Рис. 7. Структура та результати спектрального аналізу спектру 1 покриття 2 у відбитих електронах

Розподіл елементів по покритті показує наявність сильних піків вуглецю (рис. 8, а), що свідчить про наявність у покритті залишків ферохрому, який вводиться в шихту порошкового дроту і не розчинився у розплаві оболонки.

Наявність сильних піків кисню у структурі покриття (рис. 8, б) свідчить про те, що кожна ламель покриття оточена тонкими оксидними плівками алюмінію.

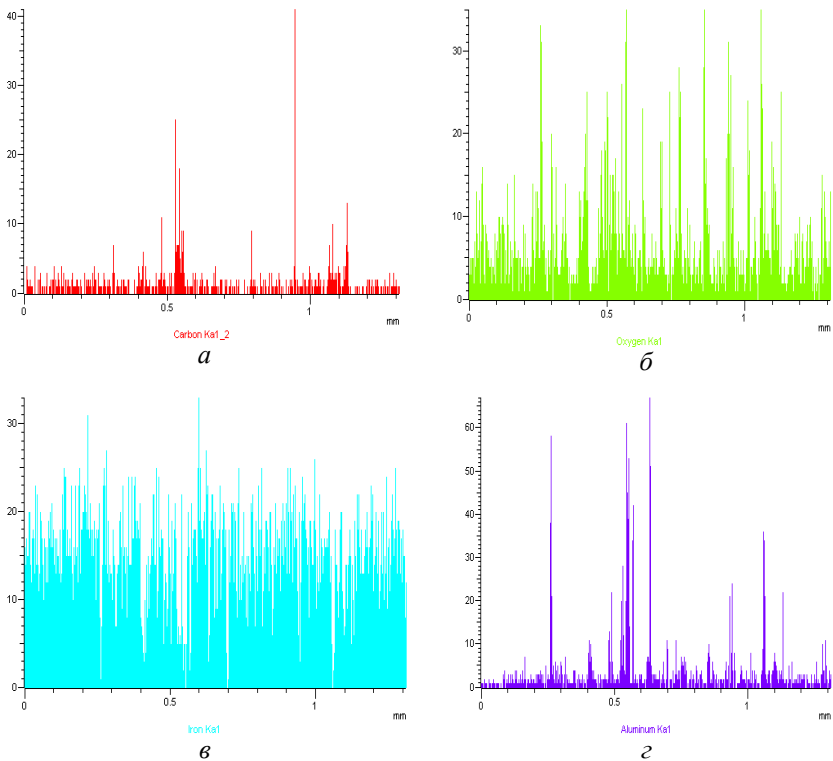


Рис. 8. Розподіл елементів у покритті з ПД 2: *а* – вуглець; *б*– оксиди; *в* – залізо; *г* – алюміній

Розподіл алюмінію корелює з розподілом кисню. Очевидно що піки найбільшого вмісту алюмінію відповідають розміщенню оксидів алюмінію у структурі покриття.

Результатами мікроаналізу встановлено незначні втрати легувальних елементів у покритті порівняно з розрахунковими табл. 1. Втрати легувальних елементів у покриттях зумовлені насамперед випаровуванням у процесі плавлення порошкового дроту. Згідно з проведеними дослідженнями температура краплин під час електродугового розпилення порошкових дротів сягає 2200–2400 °С і за такої температури інтенсивно кипить як алюміній, так і хром.

Крім того, втрати легувальних елементів можуть бути при ударі розплавлених краплин об напилювану поверхню. Однак, як

правило, повітряний потік, який формується паралельно до поверхні напилюваної деталі при напиленні покриття, відхиляє дрібні краплини в бік і вони не попадають на деталь. Такі краплини мають дуже мало легувальних елементів. Тому їх втрати незначні.

Таблиця 1

**Уміст легувальних елементів у порошковому дроті та покритті 1  
(у масових частках)**

Уміст елементів, %	Cr	Al	Mo	Si	Mn
Розрахунковий у ПД, %	4,2	2	2	2,5	1,5
Установлено мікроаналізом у покритті, %	4,0	1,95	1,95	2,4	1,4

Таблиця 2

**Уміст легувальних елементів у порошковому дроті та покритті 1  
(у масових частках)**

Уміст елементів, %	Cr	Al
Розрахунковий у ПД, %	3,5	16
Установлено мікроаналізом у покритті, %	3,3	15,3

Таблиця 3

**Коефіцієнт тертя покриттів в парі з контргілом бронза БРС-30**

Питоме навантаження, МПа	Покриття 1	Покриття 2	Сталь ШХ-15 HRC-62
	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт тертя
4	0,03	0,05	0,05
8	0,02	0,05	0,05
12	0,018	0,045	0,04
16	0,018	0,05	0,035
20	0,020	0,09	0,025

**Результати дослідження трибологічних характеристик покриттів.** Значення коефіцієнта тертя для досліджуваних покриттів показують, що покриття 1 має суттєво менший коефіцієнт тертя при всіх досліджених питомих навантаженнях (табл. 3). Низький коефіцієнт тертя для покриття 1 зумовлено насамперед високою гомогенністю покриття, низьким рівнем залишкових напружень та відсутністю мікротріщин у покритті. Додаток молібдену у шихту порошкового дроту також сприяє зменшенню коефіцієнта тертя. Наявність у структурі покриття оксидних фаз на основі заліза, які мають високі трибологічні характеристики та можуть служити твер-



дим мастилом в процесі тертя, також зменшують значення коефіцієнта тертя. У покритті 2 оксидні фази сформовані на основі оксиду алюмінію, який в умовах тертя в мастилі може поводити себе як додатковий абразив. Для покриття 1 з підвищенням питомого навантаження коефіцієнт тертя знижується, тоді як для покриття 2 такого не спостерігається.

Таблиця 4

**Коефіцієнт тертя покриттів у парі з контртілом–алюмінієво-оловянистий сплав**

Питоме навантаження, МПа	Покриття 1	Покриття 2	Сталь ШХ-15 HRC-62
	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт тертя
4	0,018	0,020	0,015
8	0,015	0,019	0,015
12	0,015	0,025	0,016
16	0,015	0,025	0,016
20	0,015	0,03	0,017

Заміна бронзового контртіла на алюмінієво-оловянистий сплав приводить до зменшення коефіцієнта тертя як для покриття 1, так і для покриття 2 (табл. 4). Якщо для покриття 1 виявлено незначне зменшення коефіцієнта тертя зі зростанням питомого навантаження, то для покриття 2 навпаки спостерігається незначне підвищення значення коефіцієнта тертя.

На відміну від бронзового контртіла контртіло з алюмінієво-оловянистого сплаву має суттєво меншу твердість, легше проходить стадію притирання, в нього формується більша площа реального контакту між покриттям та контртілом і як наслідок – реальне питоме навантаження набагато менше ніж розрахункове.

Результати випробовувань показали що покриття 1 за навантажень до 20 МПа має коефіцієнт тертя на рівні зі сталлю ШХ-15.

**Висновки:**

1. При напиленні електродугових покриттів їх порошкових дротів за стандартних режимів напилення не спостерігається значного вигорання хрому та алюмінію в покритті.
2. Структура покриття 1 доволі гомогенна з незначним розкидом легувальних елементів у ламелях покриття. Структура покриття 2 є суттєво гетерогенною зі значним розкидом значень концентрацій легувальних елементів у покритті.

3. У структурі покриттів наявні два типи оксидних фаз: великі до 70 мкм у поперечнику – оксиди заліза, леговані хромом та алюмінієм, дрібніші – до 30 мкм у поперечнику оксиди алюмінію, леговані залізом.

4. Розроблені електродугові покриття мають високі трибологічні характеристики та можуть працювати в умовах граничного тертя до питомого навантаження 16–20 МПа.

#### Список літератури

1. *Рахмилевич З.З.* Компресорные установки в химической промышленности. / З.З. Рахмилевич, Е.Н. Мыслицкий, С.А. Хачатурян.– М.: Химия, 1977.– 253 с.

2. *Кречмер Э.* Напыление металлов, керамики и пластмасс.– М.: Машиностроение.1966. – 432 с.

3. *Мажейка О.Й.* Розроблення електродугових покриттів з порошкових дрітків для відновлення внутрішніх поверхонь деталей машин / О.Й. Мажейка, С.І. Маркович, Ю.В. Рябоволик, М.М. Студент // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 49. – Т.2. – С.112 – 117.

4. *Пат. 42414 У Україна*, МПК(2009) В23К 35/24. Порошковий дріт для одержання відновних електродугових покриттів, придатних для обробки лезовим інструментом./ В.І Похмурський, М.М. Студент, С.І. Маркович, О.Й. Мажейко, Ю.В.Рябоволик.

УДК 621.891

*Мажейка А.И., Маркович С.И., Рябоволик Ю.В., Студент М.М.* **Исследование микроструктуры и трибологических характеристик электродуговых покрытий, пригодных к обработке лезвийным инструментом** // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 52. – С.168–177.

Исследованы структура и трибологические характеристики электродуговых покрытий, пригодных к обработке лезвийным инструментом. Определена степень выгорания легирующих элементов в покрытиях при распылении проволоки, проведен спектральный анализ составляющих покрытия и исследован характер изменения коэффициента трения при изменении нагрузки.

Рис. 8, табл. 4, список літ. 4 найм.

**Research of microstructure and tribotechnic descriptions of elektroarc coverages, suitable to treatment a toolpiece.**

Research of structure and tribotechnic descriptions of elektroarc coverages, suitable to treatment a toolpiece is conducted in the article. Certainly degree of burning down of alloying elements in coverages at dispersion, the spectrology of constituents of coverage is conducted and character of change of coefficient friction is investigational at the change of loading.

Стаття надійшла до редакції 28.10.09.