

## АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕТАЛІЗАЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

М. М. СТУДЕНТ<sup>1</sup>, С. І. МАРКОВИЧ<sup>2</sup>, В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ<sup>1</sup>,  
О. С. КАЛАХАН<sup>3</sup>, В. М. ЮСЬКІВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький;

<sup>3</sup> Львівський національний аграрний університет, Дубляни;

<sup>4</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено покриття, напилені електродуговим методом зі суцільних та порошкових дротів. Вивчено їх структуру, механічні та трибологічні характеристики. У покриттях із різнорідних дротів є краплини порошкового та суцільного дротів. Їх структура – це два різні каркаси із м'якої матриці суцільного (150...450 HV<sub>100</sub>) та твердої матриці із порошкового дротів (600...1000 HV<sub>100</sub>). В умовах граничного тертя пара порошкового дроту (Fe–Cr–B) + Св08 з контртілом із БрС-30 має найкращі трибологічні характеристики. Підвищена зносостійкість покриттів викликана великою кількістю оксидів заліза та бору. Проаналізовано властивості покриттів за граничного тертя. Коефіцієнт тертя для сталі зростає від 0,018 при 1 МПа та до 0,038 при 10 МПа. Це є на 50...70% вище, ніж для пари тертя покриття з електродних дротів Св08 та ПД (Fe–Cr–B) і БрС-30. Абразивна зносостійкість покриттів закріпленим абразивом з композиційних дротів зростає у 2,1 рази порівняно зі сталлю ШХ15.

**Ключові слова:** *електродугові покриття, композиційні покриття, порошкові дроти, коефіцієнт тертя, абразивна зносостійкість.*

The coatings sprayed by electric arc method made of solid and powder wires are investigated. Their structure, mechanical and tribological characteristics are studied. In the coatings made from different wires there are drops of powder and solid wires. The coating structure consists of two different frames made of a soft matrix of solid wire (150...450 HV<sub>100</sub>) and a hard matrix of powder wire (600...1000 HV<sub>100</sub>). Under conditions of boundary friction, the pair of powder wire (Fe–Cr–B) + Св08 with a counterbody of БрС-30 bronze has the best tribological characteristics. The improved wear resistance of coatings is caused by the large amount of oxygen, oxides of iron and boron. The properties of coatings under boundary friction are determined. The friction coefficient for steel increases from 0.018 for 1 МПа to 0.038 for 10 МПа, which is 50...70% higher than for the friction pair of the coating made of electrode wires Св08 and powder wire (Fe–Cr–B) and БрС-30 bronze. Abrasive resistance of coatings made of composite wires increases 2.1 times to compare with that of ШХ15 steel.

**Keywords:** *electric arc coatings, composite coatings, powder wires, abrasion coefficient, abrasion resistance.*

**Вступ.** Зростання цін на енергоносії та необхідність зниження техногенного навантаження на екологічну систему загострюють питання розроблення нових та вдосконалення існуючих технологій підвищення ресурсу роботи важконавантажених деталей машин. Поряд із традиційними – термічною та хіміко-термічною обробками та їх вдосконаленням, розробляють також нові технології підвищення

зносостійкості. Зокрема, дифузійне хромування [1, 2], азотування в тліючому розряді [3, 4], формування поверхневих покриттів [5–12] і нанокристалічних структур тощо. Окрім підвищення зносостійкості, вони також забезпечують зростання опору контактній втомі, захист від наводнювання та корозійно-ерозійного руйнування [4]. Вагоме місце серед них займає технологія газотермічного напилення [13, 14], що забезпечує одночасне відновлення зношених поверхонь та підвищує їх роботоздатність. Серед методів напилення електродугова металізація має від 3 до 8 разів меншу вартість порівняно з іншими методами та у 2–3 рази вищу продуктивність [15]. Використання порошкових дротів як електродних матеріалів сприяло розширенню областей застосування цієї технології [16, 17]. Однак низька адгезія, когезія та високий рівень напружень розтягу отриманих покриттів не дозволяє їх застосовувати за підвищених робочих навантажень. Для поліпшення механічних та трибологічних характеристик і створення нових композиційних покриттів (КП) запропоновано використовувати для напилення два дроти – порошковий (ПД) та суцільний (СД). Це дає змогу отримувати КП із твердими та м'якими ламелями. Мета роботи – визначити механічні та трибологічні характеристики електродугових покриттів (ЕДП) із різномірних дротів.

**Методики напилення та дослідження покриттів.** Електродугові покриття отримали за допомогою електродугового металізатора, за напруги – 30 V, струму – 150 A, тиску повітряного струменя – 0,6 МПа (рис. 1).

Рис. 1. Типова схема формування електродугових покриттів: 1 – катод, 2 – порошковий дріт, 3 – стиснене повітря, 4 – анод, 5 – покриття, 6 – основа, 7 – розплавлений метал, 8 – дуга, 9 – насадка.

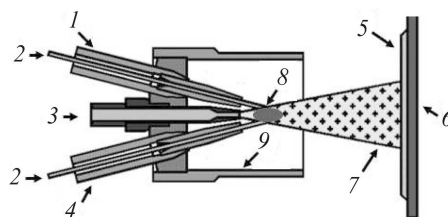


Fig. 1. Typical scheme of electric arc coatings formation: 1 – cathode, 2 – powder wire (PW), 3 – compressed air, 4 – anode, 5 – coating, 6 – base, 7 – molten metal, 8 – arc, 9 – nozzle.

Покриття напиляли на сталеві циліндричні зразки  $\varnothing 40$  та завтовшки 12 mm матеріалами з хімічним складом, наведеним у табл. 1. Коефіцієнт тертя визначали на установці СМЦ-2 за схемою “диск–колодка” з неперервним записом показів індукційного давача на електронний носій. Матеріал контртіла – бронза БрС-30. Навантаження змінювали з кроком 1 МПа від 1 до 10 МПа. Шлях тертя 1 km.

**Таблиця 1. Хімічний склад порошкових дротів (mass%)**

Тип дроту	Fe	C	Cr	B	Si	Mn	Інші
ПД1-АН-305	93,4	2,5	1,5	0,5	1,1	0,8	0,2
ПД2-АН-307	75,5	0,75	20	2,5	1,0	0,6	0,2
СД Св08	98,74	0,1	0,15	–	0,03	0,6	0,38
СД 65Г	97,13	0,7	0,25	–	0,37	1,2	0,35

Металографічні дослідження здійснювали на сканувальному електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP зі системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy. Фазовий склад поверхневих шарів досліджували за допомогою дифрактометра ДРОН-3М у  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні. Вивчали абразивне зношування під час тертя нежорстко закріпленими (вільними) абразивними частинками за допомогою випробувального пристрою (рис. 2a) з гумовим диском  $\varnothing 48\text{...}50$  mm і зав-

ширшки 13 mm. Параметри режиму тертя: навантаження  $P = 24 \text{ N}$ , частота обертання диска  $2,5 \text{ s}^{-1}$ . Висушений і розділений на фракції пісок  $\text{SiO}_2$  (розмір частинок піску у межах  $200 \dots 1000 \text{ }\mu\text{m}$ ) використовували як абразив. Його подавали до зони контакту гумового колеса зі зразком за допомогою дозувального пристрою.

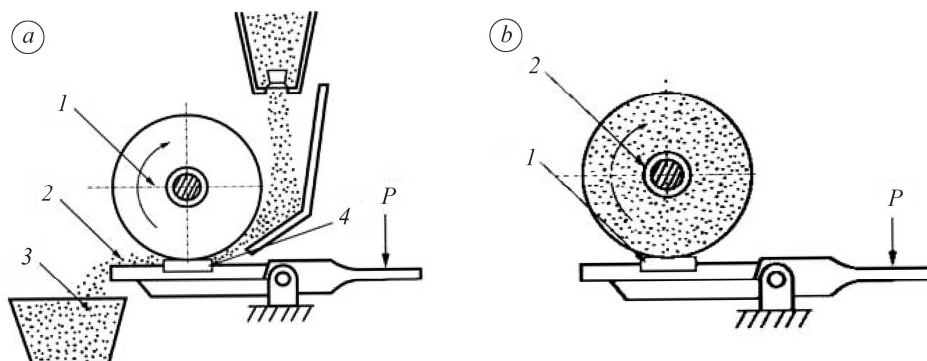


Рис. 2. Схеми випробування на абразивне зношування за використання вільного абразиву та навантаження  $P$ , kg (a: 1 – гумовий диск, 2 – пісок, 3 – ємність для абразиву, 4 – зразок) та жорстко закріпленого абразиву (b: 1 – зразок, 2 – абразивний круг).

Fig. 2. Schemes of tests for abrasive wear using free abrasive and load  $P$ , kg (a: 1 – rubber disc, 2 – sand, 3 – container for abrasive, 4 – sample) and rigidly fixed abrasive (b: 1 – sample, 2 – abrasive wheel).

Також досліджували опір зношуванню закріпленим абразивом за допомогою абразивного диска (рис. 2b)  $\varnothing 150 \text{ mm}$  і шириною 8 mm, виготовленого з електрорунду із розміром зерна  $250 \dots 315 \text{ }\mu\text{m}$ , частота обертання диска  $2,5 \text{ s}^{-1}$ , навантаження в зоні лінійного контакту 15 N. Зношування зразків оцінювали за втратою маси на електронній вазі KERN ABJ 220 4M з точністю до  $2 \cdot 10^{-4} \text{ g}$ .

Когезивну міцність покриттів визначали на трубчатих зразках (рис. 3), які складаються із двох половинок загальною довжиною 100 mm. Їх з'єднували між собою на оправці – болтом і гайкою. На поверхню зразків наносили покриття завтовшки 1 mm. Після цього зразки знімали з оправки і випробовували на розривній машині FPZ-10, фіксуючи зусилля в момент руйнування. Когезивну міцність визначали за відомою формулою:  $\sigma = P/S$ , де  $P$  – зафіксоване навантаження в моменту руйнування;  $S$  – площа напиленого покриття.

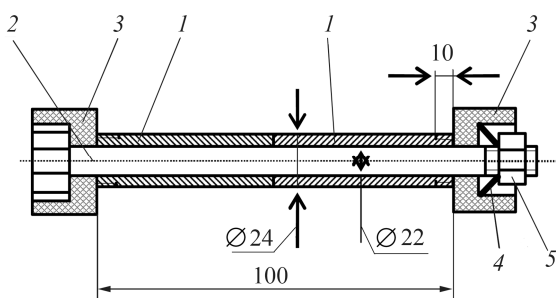


Рис. 3. Схема зразків для нанесення покриття для визначення його когезивної міцності: 1 – поверхні зразків для напилення покриття, 2 – штифт, 3 – захисні фланці, 4 – тарільчаста пружина, 5 – гайка.

Fig. 3. Scheme for spraying coating to determine the value of its cohesive strength: 1 – sample surface for spraying coatings, 2 – pin, 3 – protecting washer, 4 – disc spring, 5 – nut.

Розраховували напруження за методикою, розробленою для біметалевих кілець ( $\varnothing 60 \text{ mm}$ , висота 20 mm, товщина 4 mm) з повздовжнім розрізом, у яких відношення радіусів центральної лінії до радіальної товщини кільця не менше 10. На зовнішню поверхню кілець наносили ЕДП завтовшки 1 mm. Щоб визначити

напруження, враховували модулі пружності сталевого кільця-підкладки і напиленого шару – 70 МПа [15]. Розходження крайок заміряли штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05.

#### Структура та механічні характеристики покриттів з різномірних дротів.

За напилення покриттів із двох різномірних дротів на сталевій основі формується КП, яке має типову ламелярну будову. Розплавлені краплини, які формуються із розплаву СД та ПД, вдаряючись об поверхню сталеві основи, сильно сплющуються, кристалізуючись на ній у вигляді лусок-ламелей. Краплини, сформовані із розплаву електродних дротів – СД та ПД, не взаємодіють між собою у розплавленому стані. Тому структура покриття – це два різні каркаси із м'якої матриці краплин СД та твердої матриці із краплин ПД (рис. 4). Наявність у КП двох каркасів м'якої та твердої матриці зменшує напруження розтягу внаслідок пластичної деформації їх м'яких складових [17].

У структурі КП (рис. 4) чітко спостерігаємо дві групи ламелів, а саме ті, які після травлення набувають чорного кольору, мають мікротвердість 150...450 HV<sub>100</sub> і сформовані із краплин СД, та ті, які не травляться і мають більшу мікротвердість (500...1000 HV<sub>100</sub>) та вміст легувальних елементів хрому й бору. Останні сформовані із краплин ПД.



Рис. 4. Мікроструктура КП (×100).

Fig. 4. Microstructure of composite coatings (CC) (×100).

Таблиця 2. Механічні характеристики та фазовий склад покриттів з різномірних дротів

Композиційні покриття	ПД1 + Св08	ПД1 + 65Г	ПД2 + Св08	ПД2 + 65Г	ПД2 + ПД2
Міцність зчеплення $\sigma_{adh}$ , МПа	35...38	30...35	40...44	38...42	20...25
Міцність на розрив $\sigma_B$ , МПа	220	200	260	240	140
Максимальні колові напруження розтягу $\sigma_{circ}$ , МПа	70	100	70	100	250
Мікротвердість м'якої матриці (Св08, 65Г), HV <sub>100</sub>	150...300	300...450	150...300	300...450	300...420
Мікротвердість твердої матриці (ПД1, ПД2), HV <sub>100</sub>	500...700	50...700	600...1000	600...1000	600...1000
Фазовий склад покриттів	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, (FeCr) <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , сліди Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, (FeCr) <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , сліди Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>2</sub> B, FeB, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , сліди Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CrN, B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, FeB, Fe <sub>2</sub> B, сліди Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>2</sub> B, FeB, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , сліди Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CrN, B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що в ламелях, сформованих із ПД1 (табл. 1), є такі основні фази: твердий розчин Cr, Mn, Si у  $\alpha$ -Fe та  $\gamma$ -Fe, невелика кількість оксидів  $Fe_2O_3$  і сліди  $Cr_2O_3$  та  $V_2O_5$ .

У ламелях, сформованих із СД (табл. 1), основна фаза – це твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -Fe (для 65Г пересичений твердий розчин – мартенсит) і більша кількість оксиду заліза  $Fe_2O_3$  (табл. 2), ніж в ламелях із ПД1.

Рентгеноструктурним фазовим аналізом виявлено, що в ламелях, сформованих із ПД2, є такі основні фази: твердий розчин Cr, Mn, Si у  $\alpha$ -Fe та  $\gamma$ -Fe; невелика кількість боридів  $Fe_2B_3$  та  $FeB$ ; оксид заліза  $Fe_2O_3$  та сліди оксидів  $Cr_2O_3$ ,  $V_2O_5$ .

**Абразивна зносостійкість покриттів із різнорідних дротів. Випробування незакріпленим абразивом.** Встановлено, що зносостійкість КП, сформованих із СД + ПД за випробувань незакріпленим абразивом, є суттєво нижчою, ніж еталона – сталі ШХ15 (*HRC* 60) (рис. 5).

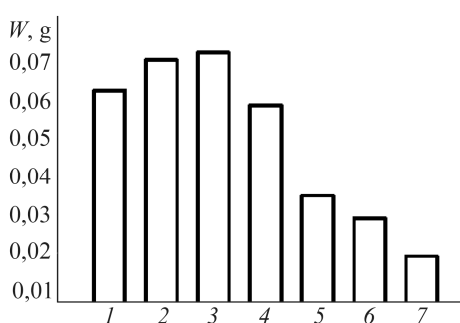


Рис. 5. Зношування зразків незакріпленим абразивом: 1 – ПД1 + Св08; 2 – ПД1 + 65Г; 3 – ПД2 + Св08; 4 – ПД2 + 65Г; 5 – сталь ШХ15; 6 – покриття з ПД2; 7 – покриття з ПД1 + ПД2.

Fig. 5. Wear of samples by non-fixed abrasive: 1 – PW1 + Св08; 2 – PW1 + 65Г; 3 – PW2 + Св08; 4 – PW2 + 65Г; 5 – ШХ15 steel; 6 – coating with PW2; 7 – coating with PW1 + PW2.

Невисока зносостійкість досліджуваних покриттів 1–4 зумовлена тим, що вони формуються із краплин розплавів ПД і СД. У них утворюються ламелі з мікротвердістю високою (500...1000  $HV_{100}$ ) із краплин розплаву ПД і низькою (180...300  $HV_{100}$ ) із краплин розплаву Св08.

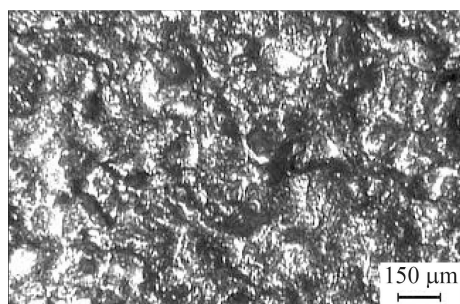


Рис. 6. Типова топографія поверхонь тертя КП ПД1 + 65Г після випробувань незакріпленим абразивом.

Fig. 6. Topography of friction surfaces of electrode wire coatings PW1 + 65Г after tests with non-fixed abrasive.

Також виявили ламелі з проміжною мікротвердістю – 315...400  $HV_{100}$ . Вони сформовані із краплин розплаву дроту 65Г. Хоча мікротвердість ламелів з дроту Св08 у покритті є суттєво меншою, ніж з 65Г, проте, як свідчить фазовий аналіз, краплини із дроту Св08 під час польоту до напилюваної поверхні сильно окиснюються. Водночас краплини зі сталі 65Г окиснюються менше, оскільки вуглець зі сталі вигоряє першим з поміж інших елементів і цим ефективно захищає краплину від окиснення. Тому у покриттях 3 та 4, сформованих зі СД Св08 та ПД2, кількість оксидів заліза досягає 15%, а їх мікротвердість становить ~ 700  $HV_{100}$ .

Під час випробувань незакріпленим абразивом насамперед зношуються м'які ламелі, утворені із дротів Св08 та 65Г, на що вказує рельєф покриття, де

острівці твердої фази виступають із матриці та цілими вириваються з неї (рис. 6). Що нерівномірніший рельєф покриття, то менша його зносостійкість.

Таким чином, покриття, що містить у своєму об'ємі  $\approx 40\text{...}50\%$  м'якої фази, не може чинити опору зношуванню за випробування незакріпленим абразивом, навіть якщо в структурі є друга фаза з достатньо високою мікротвердістю і окремі складові покриття містять спеціальні карбіди  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$  та бориди заліза  $\text{Fe}_2\text{B}$  з мікротвердістю  $> 1000 \text{HV}_{100}$ .

Зносостійкість сталі ШХ15 майже в два рази вища, ніж покриття із двох різнорідних дротів. Водночас покриття із ПД1 + ПД2 має ще вищу зносостійкість, ніж сталь ШХ15 за зношування незакріпленим абразивом.

**Зносостійкість покриттів під час випробування закріпленим абразивом.** Виявлено, що зносостійкість КП із СД + ПД є вищою, ніж сталі ШХ15 та покриття із ПД2 (рис. 7).

Рис. 7. Зношування зразків закріпленим абразивом: 1 – покриття з ПД1 + Св08; 2 – ПД1 + 65Г; 3 – ПД2 + Св08; 4 – ПД2 + 65Г; 5 – сталь ШХ15; 6 – покриття з ПД2; 7 – покриття з ПД1 + ПД2.

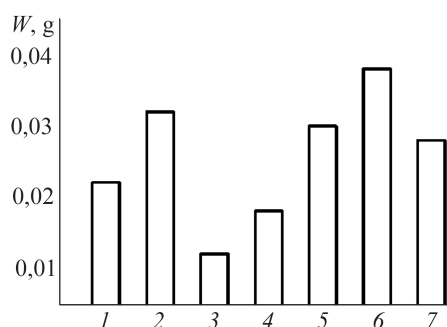


Fig. 7. Wear of samples by the fixed abrasive: 1 – coatings with PW1 + Св08; 2 – PW1 + 65Г; 3 – PW2 + Св08; 4 – PW2 + 65Г; 5 – ШХ15 steel; 6 – coating with PW2; 7 – coating with PW1 + PW2.

Встановлено, що серед досліджуваних електродугових КП вищу зносостійкість мають покриття, сформовані з ПД1 та дроту зі сталі Св08, ніж ПД1 та дроту зі сталі 65Г. Однак мікротвердість ламелів з дроту Св08 у покритті є суттєво нижчою ( $\sim 180\text{...}300 \text{HV}_{100}$ ), ніж ламелів із 65Г ( $\sim 450 \text{HV}_{100}$ ). Це зумовлено наявністю у покриттях з ПД1 + Св08 до 15% оксидів, які суттєво підвищують їх зносостійкість. Виявлено, що закріплений абразив зношує КП рівномірно через тверді структурні складові, які втілені у його м'яку матрицю та забезпечують рівномірне руйнування поверхні (рис. 8).

У два рази вищу зносостійкість, ніж у сталі ШХ15, має покриття, сформоване із електродних дротів ПД2 + Св08.

**Зносостійкість та вплив питомого навантаження на зміну коефіцієнта тертя покриттів у парі із бронзовою вкладкою за граничного тертя.** Покриття, сформовані з електродних дротів ПД + Св08, за тертя у парі з бронзою БрС-30

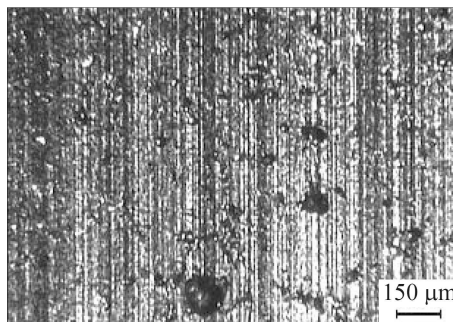


Рис. 8. Топографія поверхонь тертя КП з ПД2 + Св08 після випробувань закріпленим абразивом.

Fig. 8. Topography of friction surfaces of electrode wire coatings with PW2 + Св08 after tests with fixed abrasive.

мають низький коефіцієнт тертя ( $\sim 0,012$ ) за контактного навантаження до  $P = 5$  МПа. При 6 МПа коефіцієнт тертя зростає і залишається на рівні  $0,05 \dots 0,08$  за підвищення навантаження до 10 МПа. Покриття з однойменних пар ПД мають вищий коефіцієнт тертя за усіх досліджуваних умов навантажень.

Під час вивчення інтенсивності зношування КП в умовах тертя за граничного мащення встановили, що найкращі характеристики має покриття з ПД2 + Св08 (рис. 9).

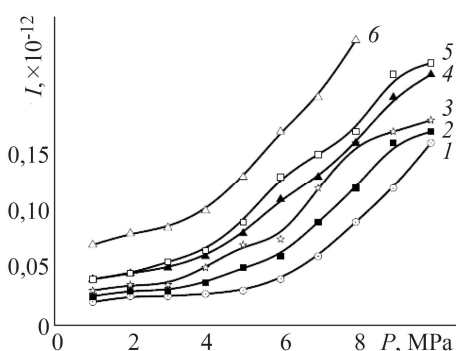


Рис. 9. Інтенсивність зношування КП за умов граничного мащення:  
1 – ПД2 + Св08; 2 – ПД2 + 65Г;  
3 – ПД1 + Св08; 4 – ПД1 + 65Г;  
5 – ПД2; 6 – сталь ШХ15.

Fig. 9. Wear intensity of CC under boundary friction: 1 – PW2 + Св08;  
2 – PW2 + 65Г; 3 – PW1 + Св08;  
4 – PW1 + 65Г; 5 – PW2; 6 – ШХ15 steel.

В умовах тертя за граничного мащення КП мають в 2–3 рази більшу зносостійкість, ніж сталь ШХ15. Висока зносостійкість покриттів зумовлена, насамперед, наявністю у них м'якої та твердої матриці з мікротвердостями  $H_{\mu} = 180 \dots 300 \text{ HV}_{100}$  (Св08) та  $H_{\mu} = 380 \dots 400 \text{ HV}_{100}$  (65Г), а також  $H_{\mu} = 600 \dots 700 \text{ HV}_{100}$  (ПД1) та  $H_{\mu} = 700 \dots 1000 \text{ HV}_{100}$  (ПД2) відповідно. Напруження розтягу, які виникають за напилення покриттів, релаксують у м'яку матрицю і тому під час їх шліфування не виникає мікротріщин. Присутність у покритті твердих фаз боридів, карбідів, а також легованого мартенситу, забезпечує високу зносостійкість КП, а велика кількість оксидів  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{V}_2\text{O}_5$  суттєво зменшує коефіцієнт тертя. Як свідчать експериментальні результати, кращі трибологічні характеристики мають КП, напилені з електродних дротів ПД1 + Св08 та ПД2 + Св08. Крім більшої кількості оксидів заліза у таких покриттях, м'які та пластичні краплини з дроту Св08 зменшують рівень напружень розтягу, сповільнюють зародження та ріст мікротріщин між ламелями, зменшують час припрацювання, об'ємну та локальну температуру в зоні контакту пари тертя.

### ВИСНОВКИ

Під час напилення покриттів із двох різнорідних дротів формується покриття із краплини порошкового та суцільного дротів, яке має типову ламелярну будову. Структура покриттів – це два різні каркаси – із краплин суцільного ( $150 \dots 450 \text{ HV}_{100}$ ) та порошкового дротів ( $600 \dots 1000 \text{ HV}_{100}$ ). Встановлено, що в умовах граничного мащення пара ПД2 + Св08 з контртілом із БрС-30 має найкращі трибологічні характеристики. Підвищена зносостійкість покриття зумовлена присутністю у ньому великої кількості кисню, оксидів заліза та бору, які забезпечують низький рівень коефіцієнта тертя. Водночас бориди  $\text{F}_2\text{B}$  підвищують інтенсивність зношування до  $I = (0,15 \dots 0,25) \cdot 10^{-12}$ . Встановлено, що в умовах абразивного зношування закріпленим абразивом зносостійкість КП у 2,1 рази вища, ніж покриттів із однойменних дротів, і в 1,4 рази вища, ніж у сталі ШХ15. Під час випробування незакріпленим абразивом зносостійкість композиційних покриттів є суттєво меншою, ніж покриттів із однойменних ПД, а також сталі ШХ15, тому використання КП у таких умовах недоцільне.

1. Kyryliv V., Kyryliv Ya., and Sas N. Formation of surface ultrafine grain structure and their physical and mechanical characteristics using vibration-centrifugal hardening // *Advances in Mater. Sci. and Eng.* – 2018. – 7 p. <https://doi.org/10.1155/2018/3152170>.
2. *Mechanical fabrication methods of nanostructured surfaces* / H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, and O. Zvirko // *Handbook of modern coating technologies. Fabrication methods and functional properties.* – Amsterdam: Elsevier, 2021. – P. 25–67. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06047-4>.
3. *Influence of hydrogen on the mechanical properties of steels with the surface nanostructure* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. Kyryliv, and O. Maksymiv // *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies.* – 2015. – **167**. – P. 457–465. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18543-9\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18543-9_32).
4. Kyryliv Y., Kyryliv V., and Sas N. Influence of surface ultrafine grain structure on cavitation erosion damage resistance // *Nanocomposites, Nanostructures, and their Applications.* – 2019. – **221**. – P. 97–107. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1_7).
5. *Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment* / V. M. Fedirko, A. G. Luk'yanenko, I. M. Pohrelyuk, and V. S. Trush // *Mater. Performance and Characterization.* – 2017. – **6**, № 4. – P. 642–655. doi:10.1520/MPC20160071.
6. *Topography, hardness, elastic modulus and wear resistance of nitride on titanium* / I. M. Pohrelyuk, J. Padgurskas, S. M. Lavrys, A. G. Luk'yanenko, V. S. Trush, R. Kreivaitis // *Proc. of Balttrib.* – 2017. – P. 41–46. doi:10.15544/balttrib.2017.09.
7. *Influence of oxynitriding on antifriction properties of Ti–6Al–4V titanium alloy* / I. M. Pohrelyuk, J. Padgurskas, O. V. Tkachuk, A. G. Luk'yanenko, V. S. Trush, and S. M. Lavrys // *J. of Friction and Wear.* – 2020. – **4**, № 41. – P. 333–337. doi:10.3103/S1068366620040108.
8. *Influence of thermochemical treatment on properties of tubes from Zr–1Nb alloy* / V. S. Trush, V. N. Fedirko, A. G. Luk'yanenko, M. A. Tikhonovsky, P. I. Stoev // *Problems of Atomic Sci. and Technol.* – 2018. – **2**, № 114. – P. 70–75.
9. *Fedirko V. N., Luk'yanenko A. G., and Trush V. S. Solid-solution hardening of the surface layer of titanium alloys. Part 1. Effect on mechanical properties* // *Metal Science and Heat Treatment.* – 2014. – **56**. – P. 368–373. doi:10.1007/s11041-014-9764-3.
10. *Properties of hydrogen saturated Zr–1% Nb alloy after thermochemical treatment* / V. S. Trush, V. N. Voyevodin, P. I. Stoev, V. N. Fedirko, A. G. Luk'yanenko, V. A. Panov, and M. A. Tikhonovsky // *Problems of Atomic Science and Technology.* – 2021. – **5**, № 135. – P. 84–87.
11. *Trush V. Effect oxidation and nitriding on the properties of zirconium alloys* // *Eastern-european J. of Enterprise Technologies.* – 2017. – **2**, № 11. – P. 34–42.
12. *The influence of size and speed of drops on the structure and properties of electric-arc sprayed coatings* / H. Pokhmurs'ka, M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnyts'kyi, and V. Posuvailo // *Proc. of the Int. Thermal Spray Conf.* – 2017. – № 2. – P. 1031–1034.
13. *Student M. M., Pokhmurs'ka H. V., and Zadorozhna K. R. Structure and wear resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo coatings obtained by supersonic flame spraying* // *Materials Science.* – 2018. – **54**, № 1. – P. 22–29.
14. *Evaluation of the mechanical properties of combined metal-oxide-ceramic layers on aluminum alloys* / M. M. Student, V. V. Shmyrko, M. D. Klapkiv, I. M. Lyasota, L. N. Dobrovol'ska // *Materials Science.* – 2014. – **50**, № 2. – P. 290–295.
15. *Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16t alloy* / M. M. Student, V. M. Dovhunya, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet'skyi // *Materials Science.* – 2017. – **53**, № 3. – P. 359–367.
16. *Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, and V. M. Hvozdet'skyi // *Materials Science.* – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.

Одержано 04.08.2021