

УДК 539.621: 621.82.09:

ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМБІНОВАНИХ МЕТАЛО-ОКСИДОКЕРАМІЧНИХ ШАРІВ НА ЛЕГКИХ СПЛАВАХ

М. М. СТУДЕНТ¹, В. М. ДОВГУНИК¹, М. Д. КЛАПКІВ¹,
В. М. ПОСУВАЙЛО¹, В. В. ШМИРКО¹, А. Р. КИЦЯ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Львів

Досліджено трибологічну поведінку комбінованих метало-оксидокерамічних шарів, синтезованих на електродугових покриттях зі суцільних електродних дротів у парі зі сталевим та бронзовим контртілами у серійному дизельному мастилі та з додатком незначної кількості гліцерину. Встановлено, що ефективність мастильної суміші не залежить від концентрації гліцерину, який бере участь лише в хімічних перетвореннях під час фрикційної взаємодії.

Ключові слова: плазмоелектролітне окисдування, комбіновані плазмоелектролітні шари, електродугова металізація, тертя та зношування, коефіцієнт тертя, вибіркового перенос.

Однією з технологій суттєвого підвищення зносотривкості легких сплавів є формування на поверхнях тертя метало-оксидокерамічних шарів плазмоелектролітним окисдуванням (ПЕО). Її застосовують для синтезу оксидокерамічних шарів на вентильних металах [1–9]. Для відновлення геометричних параметрів зношених поверхонь деталей, виготовлених із легких сплавів, а також підвищення зносотривкості нових виробів пропонуємо поєднати метод електродугової металізації (ЕДМ) з трансформацією сформованих електродугових покриттів (ЕДП) в оксидокерамічні шари.

Мета дослідження – вивчити трибологічну поведінку комбінованих метало-оксидокерамічних шарів у різних мастильних середовищах.

Методика вироб. Композиційні метало-оксидокерамічні шари синтезували на ЕДП, сформованих із електродних дротів (ЕД) зв Д16 та зв А97. Для цього використовували металізатор з модернізованою системою розпилення металоповітряної суміші [10]. Розмір частинок металу $\sim 50 \mu\text{m}$, а швидкість їх польоту $\sim 100 \text{ m/s}$. Режими формування ЕДП: напруга на дузі $U = 30 \dots 32 \text{ V}$, струм дуги $I = 100 \dots 120 \text{ A}$, тиск повітря $p = 0,6 \text{ MPa}$. Синтезували методом ПЕО в електроліті $3 \text{ g/l KOH} + 2 \text{ g/l Na}_2\text{SiO}_3$. Режими електролізу: густина катодного (I_c) та анодного (I_a) струмів 2 kA/m^2 . Мікроструктуру синтезованих покриттів вивчали на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP (Carl Zeiss) зі системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy. Мікротвердість поперечних шліфів визначали приладом ПМТ-3М під навантаженням 100 g .

Трибологічні дослідження за граничного тертя ковзання виконували за схемою “диск–колодка” на установці СМЦ-2 за контактних навантажень $2 \dots 14 \text{ MPa}$ з комп’ютерним записом даних. Швидкість ковзання $0,67 \text{ m/s}$. Зразки: диск – з композиційними метало-оксидокерамічними шарами (зовнішній діаметр $d = 42 \pm \pm 0,02 \text{ mm}$) та колодка – з гартованої сталі ШХ15 та бронзи БрС-30 з таким самим

внутрішнім діаметром. Диски виготовляли з прутків зі сплаву Д16Т (зовнішній діаметр 40 mm). Перед нанесенням ЕДП поверхні зразків піддавали дробиноструминній обробці. Поверхню сформованих покривів для надання правильної геометричної форми та необхідного розміру проточували. Після цього, робочі поверхні дисків з ЕДП піддавали ПЕО та шліфували алмазним кругом до діаметра $d = 42 \pm 0,02$ mm та шорсткості $R_a = 0,3$ μ m.

Співвідношення розмірів контактуючих площ у фрикційній парі 0,125. Робочі середовища: мастило М10Г2к, гліцерин (як модельне), мастило М10Г2к з додатком різних концентрацій гліцерину, мастило М10Г2к з додатком гліцерину та $FeCl_3$ для випробувань пари тертя оксидокерамічний шар–бронза БрС-30. Квантово-хімічні розрахунки термодинамічних параметрів розпаду асоціатів гліцерату в здійснювали за напівемпіричним методом РМ6, використовуючи програму Морас 2009.

Результати та їх обговорення. Мікроструктура покривів. Сформовані ЕДП зі суцільних ЕД мають типову ламелярну будову (рис. 1). ЕДМ забезпечує формування достатньо щільних та гомогенних покривів товщиною до 500 μ m. Адгезія між напиленим шаром та основою зі сплаву Д16Т $\sim 15...20$ МПа. Пористість не перевищує 3...4%. Мікротвердість 90...95 $HV_{0,1}$.

Комбіновані метало-оксидокерамічні шари, синтезовані на ЕДП, мають чіткі ділянки: технологічний шар на поверхні покриву після синтезу; синтезований оксидокерамічний шар; залишок неконвертованого ЕДП та підкладка (основа) (рис. 2).

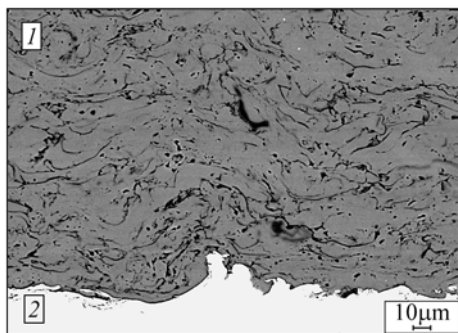


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Мікроструктура ЕДП із двох дротів зв Д16 (1) і сплав Д16Т (2).

Fig. 1. Arc sprayed coating microstructure formed from two electrode wires Д16 (1) and Д16Т alloy (2).

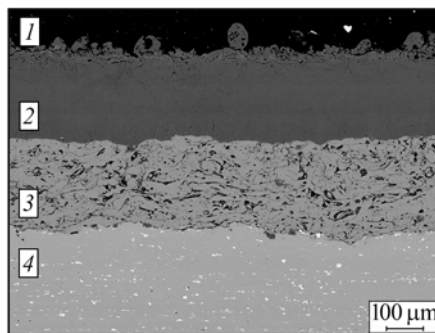


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Мікроструктура комбінованого оксидокерамічного шару, синтезованого на ЕДП із дротів зв Д16: 1, 2 – технологічний і синтезований шари; 3 – залишок нетрансформованого ЕДП; 4 – основа.

Fig. 2. The microstructure of combined oxide-ceramic layer synthesized on the arc sprayed coating from wires Д16: 1, 2 – technological and synthesized-ceramic layers; 3 – remains of nontransformed layer; 4 – the bulk material.

Товщину синтезованих шарів та їх мікроструктуру визначають режимами ПЕО (рис. 3). Зі зростанням співвідношення I_c/I_a від 1,0 до 1,5 збільшується загальна товщина оксидокерамічного шару (рис. 3) [11].

Мікротвердість ПЕО шарів залежить від їх фазового складу [12]. Найбільша властива покривам, синтезованим на сплав Д16Т ($HV_{0,1} = 1800...2000$ МПа), з максимальним вмістом фази $\alpha-Al_2O_3$ ($\sim 70\%$). Оксидокерамічні шари, синтезовані на ЕДП із дротів зв Д16, містять в основному фазу $\gamma-Al_2O_3$ (60%), тому їх мікротвердість становить 1400...1600 МПа (рис. 4). За однакових режимів оксидування

товщина шару, синтезованого на ЕДП, на $\sim 80 \mu\text{m}$ більша, ніж на сплаві Д16Т, оскільки оксидокерамічний шар синтезується не тільки на поверхні, але і в порах покриву.

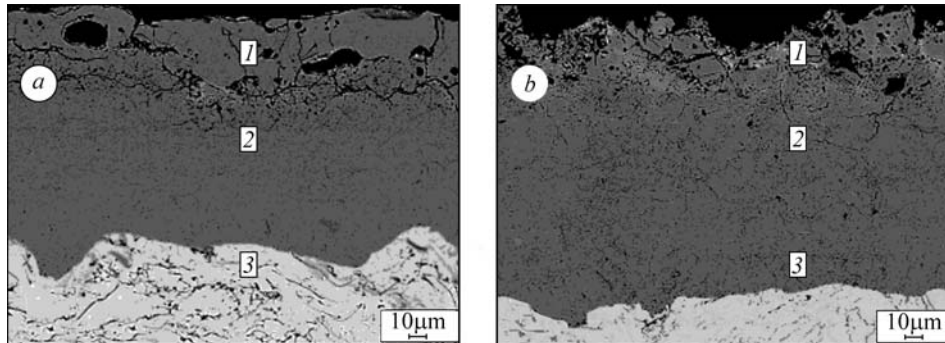


Рис. 3. Мікроструктура комбінованих оксидокерамічних шарів, синтезованих на ЕДП із дротів зв Д16. Густина струму 2 kA/m^2 ; $a - I_c/I_a = 1,0$; $b - 1,5$; 1 – зішліфований технологічний шар; 2 – оксидокерамічний; 3 – електродуговий покрив.

Fig. 3. The microstructure of combined oxide-ceramic layers synthesized on the arc sprayed coating from wires Д16. Current density 2 kA/m^2 ; $a - I_c/I_a = 1.0$; $b - 1.5$; 1 – grinded technological layer; 2 – oxide-ceramic layer; 3 – arc spread coating.

Рис. 4. Зміна мікротвердості оксидокерамічних шарів, синтезованих на сплаві Д16Т (1), на ЕДП із дротів зв Д16 (2).

Fig. 4. Microhardness changes of the oxide-ceramic layers synthesized on the Д16Т alloy (1) and on the arc sprayed coatings from electrode wires Д16 (2).

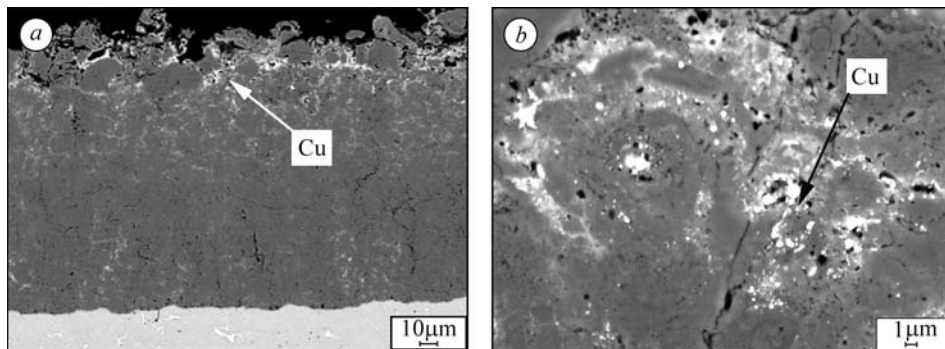
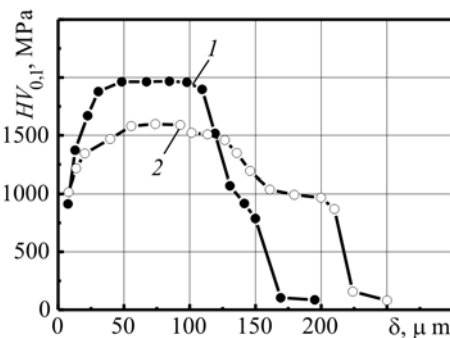


Рис. 5. Мікроструктура оксидокерамічного шару, синтезованого на ЕДП із дротів зв Д16: a – поперечний переріз; b – поверхня тертя.

Fig. 5. Microstructure of the oxide-ceramic layer synthesized on the arc sprayed coating from electrode wires Д16: a – cross-section; b – friction surface.

Електронно-мікроскопічними (ЕМ) дослідженнями структури ПЕО шарів виявлено сегрегацію міді (світлі вclusions на рис. 5). У розрядному каналі під

час ПЕО окиснюються і алюміній, і мідь. Але в плазмі атоми алюмінію є в надлишку, що призводить до відновлення оксидів міді алюмінієм, концентрація якої у покриві збільшується в напрямку до поверхні. Для порівняння вивчали структуру ПЕО шарів, синтезованих на ЕДП, сформовані з двох алюмінієвих дровів зв А97. Вони містять тільки оксиди алюмінію з незначним додатком кремнію, що потрапляє у покрив із електроліту (рис. 6).

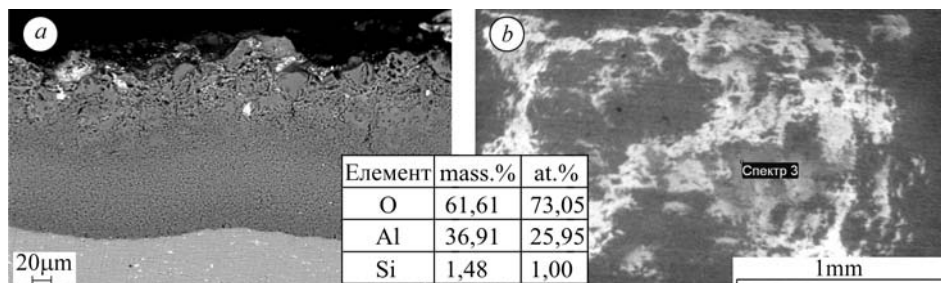


Рис. 6. Мікроструктура ПЕО шару, синтезованого на ЕДП із двох алюмінієвих дровів зв А97: *a* – поперечний переріз; *b* – поверхня тертя.

Fig. 6. Microstructure of the plasmaelectrolytical oxidation (PEO) layers synthesized on the arc sprayed coating from two alluminium wires A97: *a* – cross-section; *b* – friction surface.

Зносотривкість ПЕО шарів за граничного тертя. Знос комбінованих ПЕО шарів, синтезованих на ЕДП із дровів зв Д16 у парі зі сталлю ШХ15 в мастилі М10Г2к під навантаженням до 10 МПа за шляху тертя 20 км, є в межах похибки вимірювань $\pm 0,0002$ г. Аналогічні результати отримано і для контртіл. Надалі вимірювали тільки зміни коефіцієнта тертя та температури триборозігріву пар тертя (рис. 7, криві 3). Виявили, що з підвищенням навантаження понад 10 МПа вони різко зростають. Зокрема, при 12 МПа становлять відповідно 0,9 та 120°C. За вищих контактних навантажень не випробувували, оскільки можлива трибодеструкція мастила.

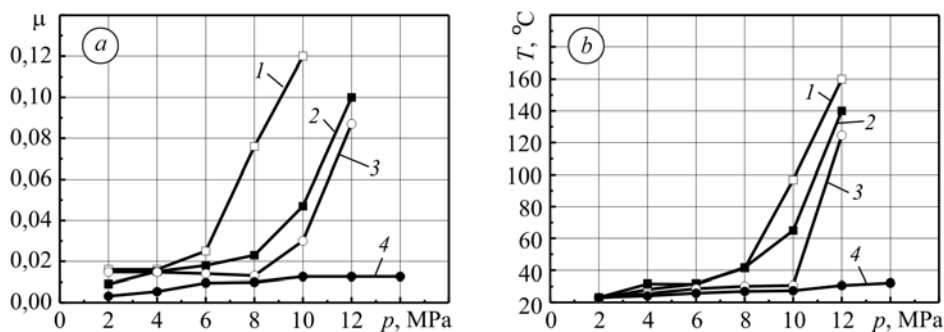
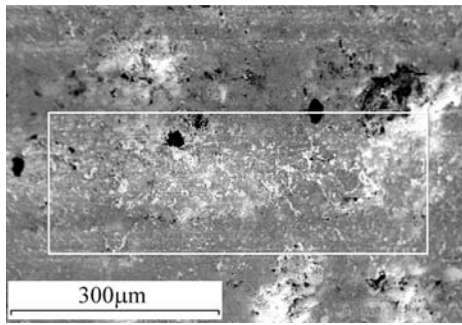


Рис. 7. Зміна коефіцієнтів тертя (*a*) та температури триборозігріву (*b*) у парах тертя сталь ШХ15–ПЕО шари, синтезовані на ЕДП з двох дровів зв А97 (1, 2) та зв Д16 (3, 4); 1, 3 – випробу в мастилі М10Г2к; 2, 4 – у мастилі М10Г2к з додатком 2,5% гліцерину.

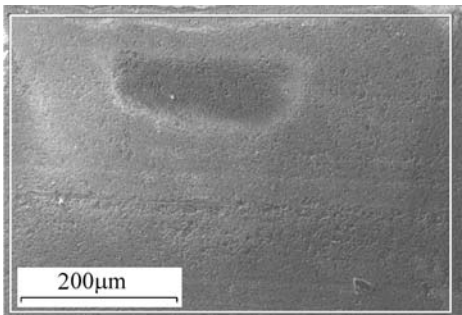
Fig. 7. Variation of friction coefficient (*a*) and temperature of triboheating-up (*b*) in friction couples: steel ШХ15–PEO layers synthesized on arc sprayed coating from two alluminium electrode wires A97 (1, 2) and from two electrode wires Д16 (3, 4); 1, 3 – М10Г2к mineral oil; 2, 4 – М10Г2к mineral oil with the addition of 2.5% glycerol.

Мастило М10Г2к як антифрикційний додаток містить дитіофосфат цинку і ефективно за контактних навантажень до 10 МПа (рис. 7). ЕМ дослідженнями поверхонь тертя після випробувань у ньому виявлено Zn, S, P та Ca (рис. 8), які забезпечують низький коефіцієнт тертя. За вищих навантажень коефіцієнт тертя та температура триборозігріву пар тертя різко зростають.



a

Елемент	mass. %	at. %
C	18,82	29,32
O	39,05	45,67
Mg	0,84	0,65
Al	25,02	17,35
Si	1,66	1,11
P	1,29	0,78
S	2,93	1,71
K	0,84	0,40
Ca	1,43	0,67
Cu	1,87	0,55
Zn	6,24	1,79



b

Елемент	mass. %	at. %
C	16,18	23,23
O	52,87	57,00
Na	0,35	0,26
Al	30,07	19,22
Si	0,10	0,06
P	0,23	0,13
S	0,12	0,06
Ca	0,08	0,03

Рис. 8. Мікроструктура поверхні тертя ПЕО шару на ЕДП із дротів зв Д16 (a) та зв А97 (b).

Fig. 8. Friction surface microstructure of PEO layers synthesized on the arc sprayed coating from electrode wires Д16 (a) and electrode wires А97 (b).

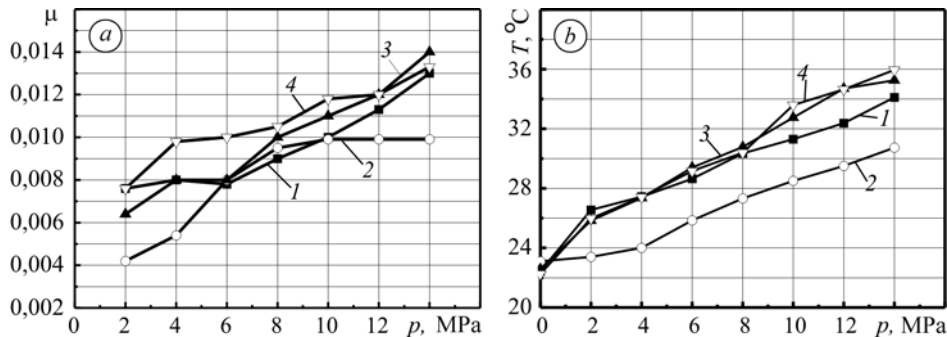


Рис. 9. Вплив концентрації гліцерину в мастилі М10Г2к на коефіцієнт тертя (a) та температуру триборозігріву (b) зразків: 1 – 100% гліцерину; 2 – 5; 3 – 2,5; 4 – 1%.

Fig. 9. Influence of glycerol concentration in M10Г2к mineral oil on friction coefficient (a) and temperature of triboheating-up (b) of specimens: 1 – 100% glycerol; 2 – 5; 3 – 2.5; 4 – 1%.

У структурі комбінованих ПЕО шарів, синтезованих на ЕДП із дротів зв Д16, виявлено сегрегацію міді (див. рис. 5). Якщо фрикційна пара містить мідь чи мідний сплав, то під час тертя в активному середовищі зі сталлю реалізується вибіркового перенос (ВП) [11, 12]. Щоб перевірити це, випробовували в гліцерині та мастильно-гліцериновій суміші (див. рис. 7). Виявили, що після додавання до мастила гліцерину коефіцієнт тертя зменшується вже за контактного навантаження 6 МПа і залишається на низькому рівні (менше 0,01) за навантажень до 14 МПа, а температура триборозігріву контактуючих пар не перевищує 30°C (рис. 7, крива 4).

Досліджували трибологічну поведінку пар тертя ПЕО шар–сталь ШХ15 у чистому гліцерині та в мастилі з додатком різних його концентрацій (1; 2,5 та 5 vol.%). Виявили, що для реалізації ВП достатня концентрація ~1 vol.%, однак, за вмістом 5 vol.% коефіцієнт тертя та температура мінімальні (рис. 9, криві 2). Кінетику їх зміни за навантаження 14 МПа ілюструє рис. 10. На етапі припрацювання вони дещо зростають, а після 1000 s випробувань набувають стабільних значень (~0,0075 та 29°C відповідно) аж до завершення експерименту.

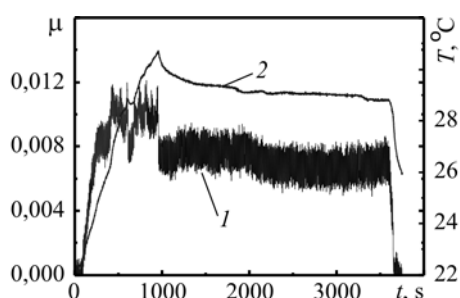
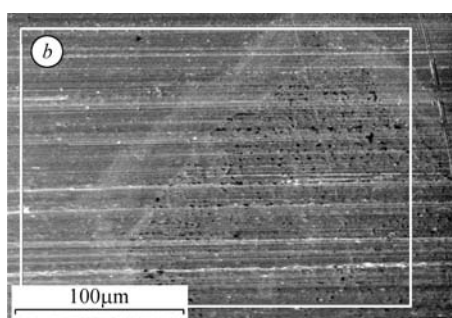
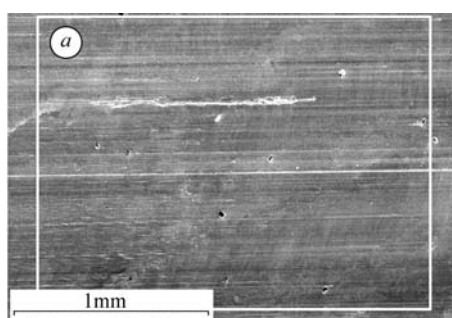


Рис. 10. Зміна коефіцієнта тертя (1) та температури триборозігріву (2) зразків з оксидокерамічним шаром, синтезованим на ЕДП з двох електродних дротів зв Д16 у парі зі сталлю в мастилі М10Г2к з додатком 5 vol.% гліцерину.

Fig. 10. Variation of friction coefficient (1) and temperature of triboheating-up (2) of specimens with oxide-ceramic layer synthesized on the arc sprayed coatings from two electrode wires Д16 in friction couple with steel in M10Г2к mineral oil with the addition of 5 vol.% glycerol.



Елемент	mass.%	at.%
C	7,04	25,96
O	0,00	0,00
Al	0,31	0,51
Cr	0,72	0,61
Fe	91,69	72,75
Cu	0,24	0,17

Елемент	mass.%	at.%
C	2,18	9,34
Al	0,26	0,49
Si	0,44	0,81
Cr	0,78	0,77
Fe	96,33	88,59

Рис. 11. ЕМ зображення сталльної поверхні після тертя у парі з ПЕО шаром, синтезованим на ЕДП із дротів зв Д16 (a) та зв А97 (b).

Fig. 11. EM images of steel surfaces after friction with PEO layers synthesized on the arc sprayed coatings from electrode wires Д16 (a) and А97 (b).

ЕМ дослідженнями поверхні сталевго контртіла після тертя виявлено відкладення міді (рис. 11a), що може свідчити про реалізацію ВП у парі тертя оксидокерамічний шар на ЕДП із дроту зв Д16–сталь у мастилі з додатком гліцерину. Для порівняння вивчали трибологічну поведінку ПЕО шарів, синтезованих на ЕДП з двох алюмінієвих дротів зв А97 (де мідь відсутня) (див. рис. 7, криві 1, 2), в мастилі з додатком гліцерину. Роботоздатність такої пари тертя за контактних

навантажень до 6 МПа дещо зростає, а за вищих коефіцієнт тертя та температура різко збільшуються.

Щоб перевірити визначальний вплив йонів заліза на реалізацію ВП, випробували пари тертя ПЕО шар–бронза, де вони відсутні. Робочі середовища та навантаження аналогічні. Фрикційні характеристики пар тертя високі (рис. 12). Отже, реалізувати ВП неможливо, оскільки для цього у зоні тертя необхідні йони окиснювачів Fe^{3+} [11, 12], які з переходом пари тертя у встановлений режим відновлюються до Fe^{2+} і в зоні контакту перебуватимуть лише вони. Тому до мастила М10Г2к додали суміш 2,5 vol.% водного розчину $FeCl_3$ у гліцерині. Виявили, що з додатком йонів окиснювачів пари тертя роботоздатні до навантаження 14 МПа (рис. 12, крива 4). Однак коефіцієнт тертя та температура дещо вищі, ніж у парі зі сталлю.

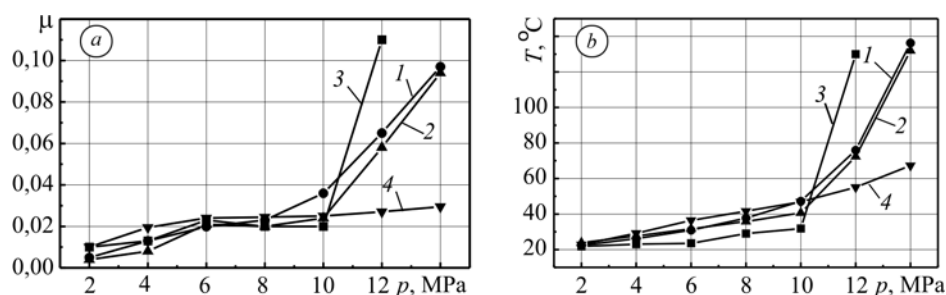


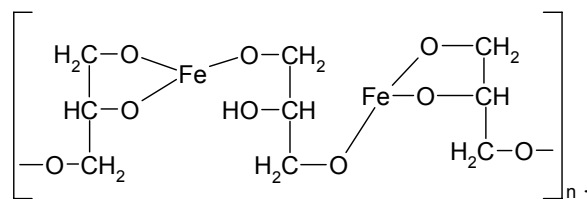
Рис. 12. Зміна коефіцієнта тертя (а) та температури триборозігріву (b) пар тертя ПЕО шари на ЕДП із дроту зв Д16–бронза БрС-30: 1 – мастило М10Г2к; 2 – гліцерин; 3 – мастило з додатком 2,5% гліцерину; 4 – з додатком 2,5% водного розчину $FeCl_3$ у гліцерині.

Fig. 12. Variation friction coefficient (a) and temperature of triboheating-up (b) in coupling PEO layers synthesized on the arc sprayed coatings Д16–bronze BrS-30: 1 – M10Г2k mineral oil; 2 – glycerol; 3 – M10Г2k mineral oil with the addition of 2.5% glycerol; 4 – M10Г2k mineral oil with the addition of 2.5% aqueous solution of $FeCl_3$ in glycerol.

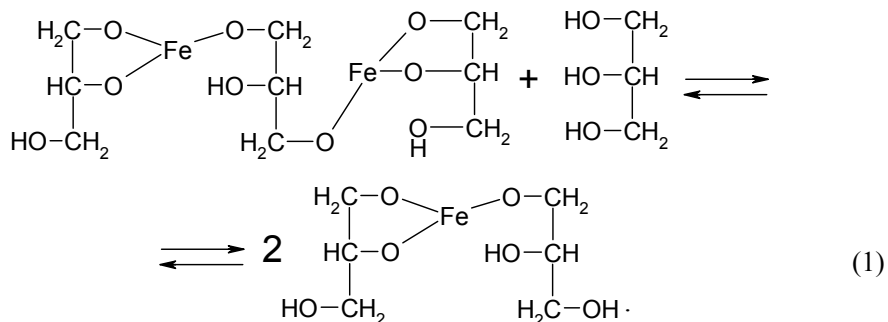
Проаналізуємо можливі трибохімічні реакції в парах тертя ПЕО шари–метал, оскільки під час фрикційної взаємодії відбуваються трибохімічні перетворення як за участі матеріалу поверхонь тертя, так і компонентів мастильної суміші. Вивчимо спочатку трибологічну поведінку пари тертя ПЕО шари, синтезовані на ЕДП з двох алюмінієвих дротів зв А97–сталь у мастилі та мастильно-гліцериновій суміші. Поверхня ПЕО шарів під час тертя хімічно та електрохімічно інертна. Мастило у суміші з гліцерином вважаємо інертним середовищем. Тому, трибохімічні перетворення протікатимуть лише на ювенільній поверхні контртіла та в об’ємі мастильної суміші за участі мікро- та наноабразивних частинок, відірваних від контактуючих поверхонь.

Трибохімічні реакції можливі тільки за участі гліцерину: залізо окиснюватиметься до оксидів та гідроксидів (II) та (III), які, взаємодіючи з гліцерином, утворюватимуть гліцерати заліза різного складу. Одночасно на ювенільній поверхні контртіла можлива і пряма взаємодія заліза та гліцерину внаслідок високої активності атомів заліза, а також низької кислотності гліцерину. На спряжених поверхнях може формуватися плівка гліцератів заліза, що опосередковано підтверджують експериментальні дані. З додаванням до мастила гліцерину (див. рис. 7) підвищуються максимально можливі навантаження в парах тертя ПЕО шари, синтезовані на ЕДП з електродних дротів зв А97–сталь. Електрохімічні перетворення, які можуть ініціювати ВП, тут не зафіксовано [11].

Оскільки, однозаміщені гліцерати заліза є гігроскопічними речовинами, здатними утворювати сольватні комплекси з будь-якими спиртами, то формування захисної плівки на поверхні сталі сприятимуть полімероподібні асоціати типу



З підвищенням температури триборозігріву до 70°C (див. рис. 7) коефіцієнт тертя зростає, що, ймовірно пов'язано із розкладанням захисної плівки внаслідок розпаду асоціату:



Для підтвердження такого припущення розраховували термодинамічні параметри утворення та розпаду асоціату гліцерату заліза, використовуючи програму Морас 2009 (табл. 1). Встановили, що термодинамічні параметри реакцій практично сумірні. Це означає, що вони легко протікатимуть як у прямому, так і зворотному напрямках. Модель реакцій та результати квантово-хімічних розрахунків досить наближені та не зовсім повно характеризують перетворення в системі під час тертя, через що потребують подальшого вивчення.

Таблиця 1. Результати квантово-хімічних розрахунків

		$T, ^\circ\text{C}$	25	45	65	85	105	125
Термодинамічні параметри	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	ΔH_f , kkal/mol	-141,8	-141,2	-140,7	-140,1	-139,5	-138,8
		ΔS_f , kal/(mol·K)	78,4	80,1	81,8	83,5	85,2	86,9
	$\text{FeC}_6\text{H}_{13}\text{O}_6$	ΔH_f , kkal/mol	-258,1	-257,0	-255,9	-254,8	-253,6	-252,3
		ΔS_f , kal/(mol·K)	107,7	111,0	114,3	117,6	120,9	124,1
	$\text{Fe}_2\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_9$	ΔH_f , kkal/mol	-368,5	-366,8	-364,9	-363,0	-361,0	-358,9
		ΔS_f , kal/(mol·K)	165,5	171,2	176,8	182,3	187,8	193,2
	реакції	ΔH_f , kkal/mol	-5,9	-6,0	-6,2	-6,5	-6,7	-6,9
		ΔS_f , kal/(mol·K)	-28,5	-29,3	-30,0	-30,6	-31,2	-31,9
		ΔF , kkal/mol	2,6	3,4	4,0	4,5	5,2	5,9

ΔH_f , ΔS_f – ентальпія та ентропія утворення сполук; ΔH , ΔS , ΔF – ентальпія, ентропія та енергія Гельмгольца реакції (1).

Розглянемо поведінку пари тертя ПЕО шари на ЕДП із дротів зв Д16–сталь у мастилі та мастильно-гліцериновій суміші. З додаванням до мастила гліцерину кардинально змінюються її трибологічні характеристики: коефіцієнт тертя ϵ на рівні $\sim 0,0075$, а температура $\sim 30^\circ\text{C}$ за навантаження 14 МПа і залишаються такими до завершення випробувань (див. рис. 7, криві 3, 4). Вирішальну роль тут відіграє гліцерин та сегрегація міді на поверхні ПЕО шару (див. рис. 8).

Ще інша поведінка пари тертя ПЕО шари на ЕДП із дротів зв Д16–бронза. Пряма взаємодія гліцерину з міддю неможлива. В такій реакційній суміші малорозчинні органокомплекси міді не утворюватимуться, а на бронзовій поверхні – захисна плівка. Тому, гліцерин суттєво не змінює поведінку таких пар тертя (рис. 12, криві 4).

Щоб перевірити твердження про визначальну роль йонів (Fe^{3+}) у реалізації ВП у композиції ПЕО шар на ЕДП із дротів зв Д16–бронза, досліджували їх вплив після додавання до мастильного середовища. Під час застосування такої композиції зростає максимально можливе контактне навантаження у парі тертя (рис. 12, криві 4), тобто йони (Fe^{3+}) після прикладання енергії ззовні (фрикційної взаємодії) реакційно здатні і можуть спричиняти розчинення міді на ювенільній поверхні за реакцією



Можливим є окиснення йонів Cu^+ киснем повітря до Cu^{2+} з подальшим утворенням гліцерату міді, або їх відновлення до Cu^0 на поверхнях тертя [11]. Водночас йони Fe^{2+} легко окиснюються до Fe^{3+} і можуть знову вступати в реакцію розчинення міді. Тому зрозуміло, чому в парі тертя оксидокерамічний шар, синтезований на ЕДП із дроту зв Д16–сталь, на поверхні якого сегрегується мідь (див. рис. 5), можливе ВП (табл. 2). Термодинамічно ці реакції ніби сумірні, але трибологічний ефект інший (див. рис. 7 і 12).

Таблиця 2. Термодинамічні параметри утворення гліцератів заліза та міді

Сполука	ΔH_f^0 , kkal/mol	ΔS_f^0 , kal/(mol·K)	ΔF_f^0 , kkal/mol
Гліцерат заліза	-258,2	107,3	-290,2
Гліцерат міді	-261,9	128,7	-300,2

Отже, йони заліза Fe^{3+} є каталізатором ВП в парах тертя, що містять мідь, зокрема, в парі оксидокерамічний шар, синтезований на ЕДП із дротів зв Д16–сталь.

ВИСНОВКИ

Під час синтезу ПЕО шарів на ЕДП із дротів зв Д16 відбувається їх легування міддю, концентрація якої вища в напрямку до поверхні. ПЕО шари, синтезовані на ЕДП із зв Д16 у парі зі сталлю у мастилі М10Г2к мають високі трибологічні характеристики за контактних навантажень до 10 МПа. З додаванням до мастила незначної кількості гліцерину ($\sim 1 \text{ vol.}\%$) поведінка пар тертя за контактних навантажень понад 10 МПа кардинально змінюється: коефіцієнт тертя та температура різко знижуються і реалізується вибіркового перенос. Під час тертя в парі з бронзою БрС-30 трибологічна поведінка ПЕО шарів інша. Гліцерин не змінює трибологічні параметри контактуючих пар за навантажень понад 10 МПа. Натомість, після додавання йонів окиснювачів (Fe^{3+}) як ініціаторів вибіркового переносу їх трибологічна поведінка зовсім інша.

РЕЗЮМЕ. Исследованы особенности трибологического поведения комбинированных металло-оксидокерамических слоев, синтезированных на электродуговых покрытиях, сформированных из сплошных электродных проволок, в паре со стальными и бронзовыми

ми контртелами в серийном дизельном масле и с добавками незначительного количества глицерина. Показано, что эффективность смазочной смеси не зависит от количества глицерина, который только участвует в химических превращениях при фрикционном взаимодействии.

SUMMARY. The tribological behavior of combined metal-oxide ceramic layers synthesized on arc sprayed coatings of solid electrode wires in friction pair steel and bronze riders in serial diesel mineral oil and with addition to it a small amount of glycerol were investigated. It was established that the effectiveness of lubricating mixture does not depend on the concentration of glycerol. The role of this additive is limited to its participation in chemical transformations under friction interaction.

1. *Abrasive wear corrosion properties and TEM analysis of Al₂O₃ coatings fabricated using plasma electrolysis* / X. Nie, E. I. Meletis, J. C. Jiang et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – **149**. – P. 245–251.
2. *Krishna L. R., Somaraju K. R., and Sundararajan G.* The tribological performance of ultra-hard ceramic composite coatings obtained through microarc oxidation // *Ibid.* – 2003. – **163–164**. – P. 484–490.
3. *Parfenov E. V., Yerokhin A. L., and Matthews A.* Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process // *Ibid.* – 2007. – **201**. – P. 8661–8670.
4. *Species separation during coating growth on aluminium by spark anodizing* / F. Monfort, E. Matykina, A. Berkani et al. // *Ibid.* – 2007. – **201**. – P. 8671–8676.
5. *Tailored aluminium oxide layers by bipolar current adjustment in the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) process* / F. Jaspard-Mecuson, T. Czerwiec, G. Henrion et al. // *Ibid.* – 2007. – **201**. – P. 8677–8682.
6. *Influence of electrolyte on corrosion properties of plasma electrolytic conversion coated magnesium alloys* / C. Blawert, V. Heitmann, W. Dietzel et al. // *Ibid.* – 2007. – **201**. – P. 8709–8714.
7. *Electrolytic plasma technology: Science and engineering. An overview* / P. Gupta, G. Tenhundfeld, E. O. Daigle, and D. Ryabkov // *Ibid.* – 2007. – **201**. – P. 8746–8760.
8. *TEM analysis and tribological properties of Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coatings on a magnesium engine AJ62 alloy* / P. Zhang, X. Nie, H. Hu, and Y. Liu // *Ibid.* – 2010. – **205**. – P. 1508–1514.
9. *Malayoglu U., Tekin K. C., and Shrestha S.* An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 aluminium alloy // *Mater. Sci. and Engng.* – 2011. – **528**. – P. 7451–7460.
10. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. – Львів: Вид. НАН України, 2005. – 192 с.
11. *Поляков А. А., Рузанов Ф. И.* Трение на основе самоорганизации. М.: Наука, 1992. – 135 с.
12. *Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения* / Под ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1982. – 308 с.

Одержано 08.12.2011