

УДК 621.762:621.763

**Н.Ю. Імбірович, В.М. Посувайло, С.П. Шимчук,  
О.Ю. Повстяной, С.І. Остап'юк**

## **Трибологічна характеристика плазмoeлектролітно-оксидованих покриттів на сплавах ASTM B265 та 2024**

**Імбірович Наталія Юрївна** – кандидат технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет, Луцьк, imbirovychnatalia@gmail.com

**Посувайло Володимир Миколайович** – кандидат технічних наук, ст. наук. співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, posuvaylo@ipm.lviv.ua;

**Шимчук Сергій Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет, Луцьк, s.shimchuk@lntu.edu.ua;

**Повстяной Олександр Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет, Луцьк, povstjanoj@ukr.net

**Остап'юк Сергій Іванович** – асистент, Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Бойко, м. Тернопіль, serost@ukr.net

*Досліджено вплив режимів синтезу на зносостійкість плазмoeлектролітно-оксидованих покриттів, синтезованих методом плазмо-електролітного оксидування, на титановому сплаві ASTM B265 та алюмінієвому сплаві 2024. Проведено мікроструктурний аналіз синтезованих покриттів після трибологічних випробувань. Виявлено, що найвищий опір зносу має покриття на титановому сплаві, отримане за наступного режиму синтезу: 10 г/л КОН + 15 г/л р.с.,  $I_a/I_c = 1 \text{ A/дм}^2$ ,  $\tau = 30 \text{ хв}$ . Встановлено, що найкращою зносостійкістю характеризуються покриття на сплаві алюмінію, які синтезовані за віддалі між електродами 0,1 м.*

***Ключові слова:** оксидокерамічне покриття, синтез, плазмoeлектролітне оксидування, титановий сплав, алюмінієвий сплав, тертя, зносостійкість.*

### **ВСТУП**

Титанові та алюмінієві сплави широко використовуються у виробництві завдяки поєднанню низької густини та корозійної стійкості. Проте, обмежене їх застосування обумовлене низькими механічними та трибологічними властивостями, які часто не задовольняють умовам сучасного виробництва, яке вимагає використання матеріалів, що працюють в сильно навантажених контактах. Одним із способів підвищення твердості та зносостійкості таких сплавів є плазмoeлектролітне оксидування (ПЕО). У попередніх дослідженнях було показано, що метод ПЕО дозволяє створювати покриття з низьким коефіцієнтом теплового розширення, високою твердістю, корозійною стійкістю, термостійкістю, унікальною зносостійкістю в умовах дії агресивних середовищ та абразивів, нечутливістю до магнітного поля та ін. [1, 2]. Перевагою такого методу підвищення фізико-механічних властивостей вентильних металів є можливість модифікувати синтезовані покриття різними елементами через додавання їх в електроліт.

Зазвичай ПЕО проводиться в електролітній ванні з додаванням лужного електроліту з джерелом живлення 300...1000 V за постійного, імпульсного однополярного струму. Таке використання поляризації напруги викликає електрохімічне вивільнення газу, що спостерігається у вигляді бульбашок, що виходять на поверхню металу. Спочатку на аноді відбувається окислення

поверхні, яке відбувається аналогічно анодуванню. Окисна плівка, яка росте, за досягнення критичного струму ( $\approx 300$  V) руйнується внаслідок інжекції електронів із валентної зони в зону провідності і на поверхні з'являються мікророзряди, в яких проходять плазмохімічні реакції синтезу оксиду. Внаслідок росту покриття поява мікророзрядів змінюється. У роботі [3] досліджено вплив мікророзрядів на ріст покриття, а також встановлено їх діаметр та густину. В працях [4, 5] описано властивості оксидокерамічних покриттів, синтезованих в лужних електролітах на сплавах титану, алюмінію та магнію. З огляду на те, що первинні оксиди утворюються за високих температур впливає, що при охолодженні, коли згасає іскровий пробій, вони формуються у вигляді оксидокерамічних шарів, а у роботах [6, 7, 8] досліджували їх фазовий склад. У залежності від марки (хімічного складу) Al – сплавів отримують оксидокерамічні шари з різним вмістом  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\eta$  – фаз, що визначає в подальшому їх функціональні властивості, зокрема кількісний вміст  $\alpha$ -фази визначає твердість та зносостійкість цих шарів [9, 10-12]. Аналогічно для титанового сплаву функціональні властивості синтезованих оксидокераміці задає вміст рутилу та анатазу в ній [13].

Мета даної роботи – дослідити зносостійкість оксидокерамічних покриттів, синтезованих на сплавах ASTM B265 та 2024, за різних схем тертя: реверсивно-поступальному русі та ковзання, а також встановлення залежності впливу режимів синтезу на трибологічні властивості синтезованих ОКП.

### ОБ'ЄКТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є титановий сплав ASTM B265 та алюмінієвий сплав 2024. Для досліджень були використані дві методики синтезу. Для проведення аналізу впливу віддалі між робочим та допоміжним електродами на властивості ОКП, синтезованого на сплаві 2024, було сконструйовано циліндричну електролітну ванну з пластику довжиною 5 м, радіусом 0,1 м. У одній з сторін був розміщений допоміжний електрод із нержавіючої сталі X18H10T розміром  $10 \times 12 \times 1$  см. Робочий електрод із алюмінієвого сплаву 2024 з розмірами  $15 \times 20 \times 3$  мм розміщували на відстані 0,05 м – 0,25 м. На електроди подавалися електричні імпульси анодної і катодної напруги. Сумарна напруга між електродами вимірювалася тестером магнітоелектричної системи типу Ц4315 у режимі вимірювань змінної напруги. Загальна схема подачі електричних імпульсів і вимірювання електричних параметрів подана на рис. 1. Формування анодно-іскрового покриття на сплаві ASTM B265 здійснювали за гальваностатичного режиму (анодного та анодно-катодного) на установці (рис. 2). Силовий блок забезпечував підйом амплітудної напруги для анодного, півперіоду до 800 В, а для катодного 400 В за фіксованих у конкретному процесі середніх анодного ( $I_a$ ) і катодного ( $I_c$ ) струмах. Катодом була ванна з нержавіючої сталі 12X18H9T. Густина струму становила  $10 \dots 30$  А/дм<sup>2</sup>, а співвідношення катодного до анодного струмів змінювалось у діапазоні від 1 до 1,5. За допомогою вольтметрів і амперметрів реєстрували залежність у часі амплітудних значень анодної ( $U_a$ ) і катодної ( $U_c$ ) напруги і значення струмів.

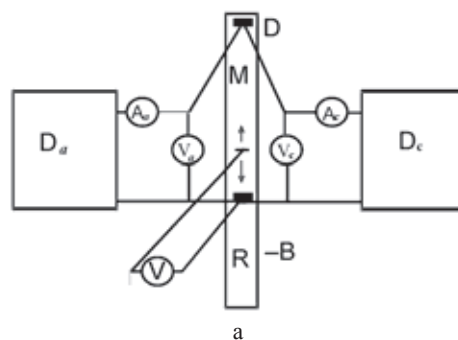


Рис. 1. Установка для ПЕО

Робочими електролітами були розчини 3г/л КОН+1 г/л рідкого скла (р.с.); 5 г/л КОН + 5 г/л рідкого скла; 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла та 3 г/л КОН + +2 г/л рідкого скла + 3 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>. Всі електроліти виконувались на основі дистильованої води. Співвідношення густин струму катодного до анодного становило для першого зразка  $I_a/I_c = 0,08$  А/дм<sup>2</sup> 0,75 А/дм<sup>2</sup> та 1,5 А/дм<sup>2</sup>. Синтез оксидокерамічних покриттів здійснювали протягом 120 хв для сплаву 2024 та 20 хв для сплаву ASTM B265. При дослідженні впливу складу електроліту останній змінювали згідно з умовами проведення експерименту. Після закінчення процесу зразки промивали проточною і дистильованою водами, сушили і аналізували.

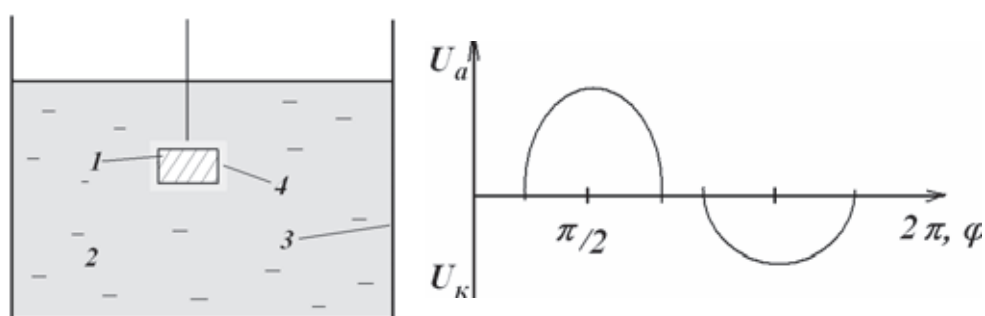


Рис. 2. Принципова схема реалізації ПЕО і епюри напруг:  
1 – зразок; 2 – електроліт; 3 – електролітна ванна; 4 – іскрові розряди

Експерименти на тертя реверсивно-поступальним рухом на зразках з титанового сплаву проводили на установці (рис. 3) конструкції Фізико-механічного інституту НАН України. Принцип роботи установки передбачає реверсивне тертя зразка за його зворотно-поступального руху стосовно контртіла. На повзуні кривошипно-шатунного механізму закріплюється плоский зразок 1. Зразок навантажується силою  $F$  важками 2 від 0,2 до 1,5 кг через вертикальний стержень, на торці якого закріплюється плоске контртіло 3. Кривошипно-шатунний механізм приводиться в рух за допомогою електродвигуна 4. Зношення матеріалу відбувається з площі поверхні контакту зразка 0,8 см<sup>2</sup>, площа поверхні контакту зразка становила 0,8 см<sup>2</sup>. Матеріал контртіла – сплав 2024 з покриттям Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> товщиною 150 мкм та мікротвердістю 1500 МПа, сформованим в електролітній плазмі. Режими випробувань прийняті наступними: швидкість тертя 30 мм/с; шлях тертя  $L = 240 \dots 1512$  м; контактний тиск  $p = 0,78; 0,99; 1,17; 1,19; 1,49; 1,74; 1,75$  МПа. Експерименти проводили при сухому терті, втрату маси зразка визначали зважуванням на аналітичній вазі з точністю до 10<sup>-4</sup> г.

Випробування на тертя з рухом ковзання на зразках з алюмінієвого сплаву проводились на машині тертя ПТЛК(ор). Швидкість тертя ковзання становила 0,3 м/с і підтримувалась постійною. Шорсткість поверхні контрзразка, виготовленого зі сталі ШХ15, було доведено алмазними пастами до значення 0,02 мкм по параметру Ra, що контролювалось на лазерному мікроскопі–профілометрі ЛМП. Контактне осьове навантаження визначалось за формулою Герца і становило 400 N. Критерієм лінійного зносу було прийнято середню глибину доріжки тертя на нерухомому зразку з досліджуваним покриттям, що вимірювалось на профілографі – профілометрі “Калібр М – 201”. Шлях тертя становив для першого, другого та третього слідів 500 м, для четвертого – 1000 м (рис. 2). Сумарно шлях тертя рівний 2500 м.

## II. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроструктурні дослідження проводили на мікрошліфах, виготовлених зі зразків після експериментальних досліджень, з використанням мікроскопа Мікротех ММП – 14Ц та МИМ-10.

Наявність оксидокерамічного покриття (ОКП) суттєво знижує швидкість зношування при сухому терті  $V_f$  титанового сплаву (рис. 4, табл. 1).

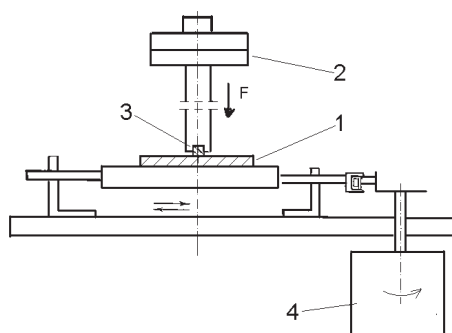


Рис. 3. Схема установки для випробувань на зношування реверсивним тертям

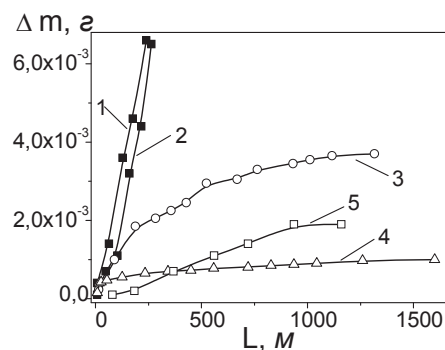


Рис. 4. Кінетика зношування сплаву ASTM B265 (1, 2) та його ОКП (3, 4, 5): нумерація кривих відповідає номерам режимів обробки, що приведені в табл. 1

Таблиця 1

Швидкість зношування сплаву ASTM B265 та його ОКП за різних режимів ПЕО

№	Склад електроліту КОН+рідке скло, г/л	Густина струмів $I_c/I_a$ , А/дм <sup>2</sup>	Час $\tau$ , хв	Навантаження $p$ , МПа	Швидкість зношування, $V_f$ , $\times 10^{-3}$ мг/м
1	–	–	–	1,74	26,72
2	–	–	–	0,99	25,00
3	5+5	1	45	1,49	4,70
4	10+15	1	30	1,48	1,50
5	5+5	1,5	30	1,75	1,63

Так  $V_f$  титанового сплаву без ОКП в 5...18 разів більша швидкості зношування синтезованої оксидокераміки. Зміна складу електроліту від 5 г/л КОН + 5 г/л р.с. (режим 3) до 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. (режим 4) дає можливість зменшити швидкість зношування в три рази. Так як тривалість процесу синтезу дає змогу впливати на товщину покриття [13], то ОКП, синтезований за режимом 3 має більшу товщину, і відповідно довший процес припрацювання.

Однак, підвищення густини струму в електроліті меншої концентрації до 10/15 А/дм<sup>2</sup> дає можливість зменшити швидкість зношування і за найбільшого навантаження 1,75 МПа (режими 3 та 5). На рис. 5 зображені фотографії титанового сплаву (а), який пройшов випробування на зносостійкість, та оксидокерамічного покриття на ньому (б, в).

Відомо, що титанові сплави мають здатність до схоплювання, тому в процесі тертя з'являються "задири" (рис. 5, а), що обмежує їх використання в вузлах тертя. Виходячи з аналізу загального вигляду оксидокерамічного покриття на титановому сплаві до (рис. 5, б) та після досліджень на тертя (рис. 5, в) слідує, що в даному випадку на початку процесу тертя відбувається припрацювання покриття, під час якого швидко зношується верхній, нестехіометричний шар оксиду (анатаз), який забиває пори на поверхні покриття, після чого він стає гладким, а зношування практично припиняється.

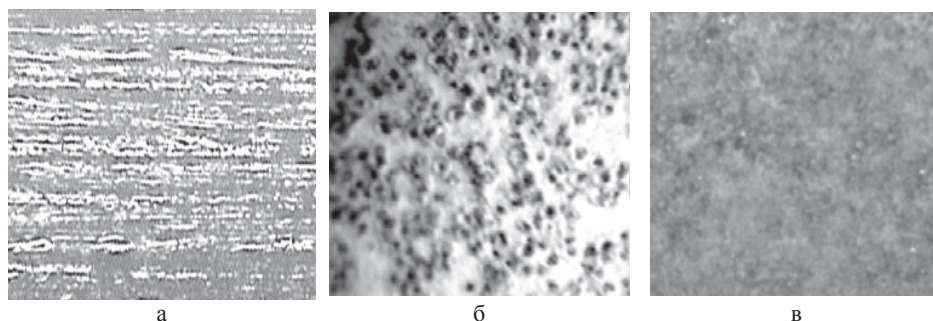


Рис. 5. Титановий сплав після випробувань на зносостійкість (а); ОКП до (б) та після (в) випробувань на тертя

Традиційно найбільш поширеним контактом у техніці вважається лінійний. Тому, використовуючи саме цей вид контакту, у роботі [14–15] було висвітлено розроблену методику випробувань мастил, що дає можливість коректної діагностики мастильної здатності матеріалів. Це досягається перш за все за допомогою поетапного випробування. Нами було модернізовано цю методику та адаптовано до умов сухого тертя. Виявлено, що на першому етапі на поверхні тертя контртіла напрацьовуються вторинні структури (початкова стадія припрацювання). На другому і третьому етапах оцінюється стабільність напрацьованих вторинних структур за критерієм величини лінійного зносу. На четвертому етапі оцінюються напрацьовані вторинні структури у часі, при значному шляху тертя, та зносостійкість оцінюваних покриттів.

В результаті випробувань досліджуваних зразків, виготовлених з синтезованого сплаву 2024, були отримані сліди зносу, які зображені на рис. 6.

Нами встановлено, що відстань між електродами ( $a$ ) впливає і на інтенсивність зношування ( $E_f$ ) оксидокерамічного покриття (табл. 2).



Рис. 6. Сліди зносу ОКП на сплаві 2024 після випробувань на тертя

Таблиця. 2

Інтенсивність тертя ОКП залежно від пройденого шляху  $a$

Інтенсивність тертя $I$ , мкм			Пройдений шлях $L$ , м
$a=0,05$ м	$a=0,1$ м	$a=0,25$ м	
0,05	0,1	0,25	500
11,4	12,9	12,5	
23,4	25	26,2	1000
33,7	34,4	37,5	1500
47,2	40	51	2500

В ході експерименту було встановлено інтенсивність зношування оксидо-керамічного покриття на кожній стадії (табл. 3). Так, на стадії початкового припрацювання (рис. 7, стадія I)  $E_f$  є найбільшим для оксидокераміки, синтезованої за відстані 0,05 м. Отже, тут швидше напрацюються вторинні структури на контртілі. Ця ділянка є прямолінійною для трьох досліджуваних зразків.

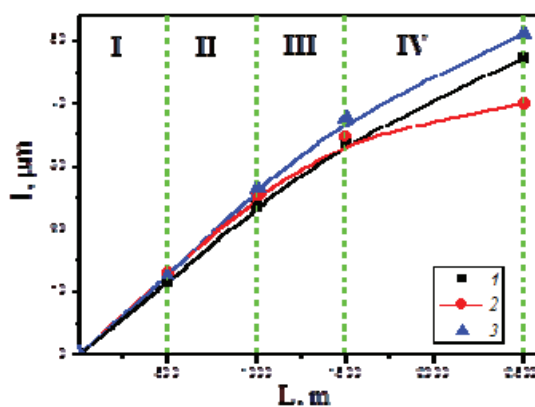


Рис. 7. Інтенсивність зношування I ОКП на сплаві 2024 від пройдені відстані L

Таблиця 3

Швидкість зношування ОКП, синтезованому на сплаві 2024 за різних відстаней від електрода на різних стадіях

№ зразка	Швидкість зношування ОКП $E_f$ мкм/м			
	Стадії тертя			
	I	II	III	IV
1 (a=0,05 м)	0,0228	0,024	0,0206	0,0135
2 (a=0,1 м)	0,0258	0,0242	0,0188	0,0056
3 (a=0,25 м)	0,025	0,0274	0,0226	0,0135

Стабільність напрацьованих вторинних структур, яка оцінюється за II та III ділянками кривих, є неоднозначною. Так, для ОКП, синтезованого на відстані від електрода 0,1 м, утворені структури є не стабільними і змінюються в часі (крива 2, рис. 7), що не можна сказати про дві інші криві, кут нахилу яких практично не змінюється протягом наступних 1000 м.

На IV стадії можна оцінити зносостійкість досліджуваних покриттів. Тут всі криві змінюють кут нахилу (ділянка IV, рис. 7).

Як видно з проведених досліджень  $E_f$  однакова для покриттів на алюмінієвому сплаві, синтезованому на відстані 0,05 м та 0,25 м і складає 0,0135 мкм/м, в той час, як для покриття, сформованого на відстані 0,1 м вона менша в 2 рази і рівна 0,0056 мкм/м.

На рис. 8 представлені мікроструктури сплаву ASTM B265 з ОКП, синтезованим за різних режимів. В електроліті складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла + 3 г/л  $(CaOH)_2$  за співвідношення  $I_a/I_c=1,5$  А/дм<sup>2</sup> протягом 20 хв утворюється покриття, зображене на рис. 8, а. Мікроструктура ОКП, синтезованого в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла за співвідношення  $I_a/I_c=1$  А/дм<sup>2</sup> протягом 30 хв представлено на рис. 8, б.

Нерівномірне розповсюдження плазмових згустків на поверхні зразка в процесі синтезу призводить до нерівної границі розподілу метал-покриття (рис. 8, а) на відміну від ОКП, синтезованого в електроліті без додавання гідроксиду кальцію, де іскріння відбувалось на поверхні рівномірно (рис. 8, б, в).



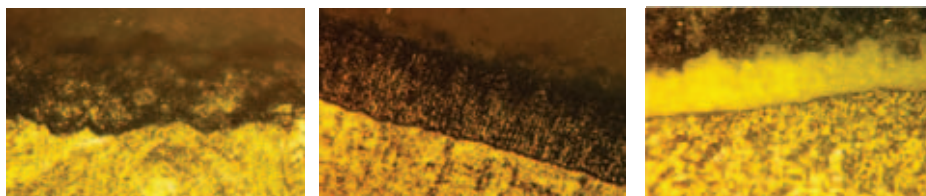


Рис. 8. ОКП на сплаві ASTM B265 після випробувань на зносостійкість:

- а – режим синтезу: 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла + 3 г/л  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;  
 $I_a/I_c = 1,5 \text{ А/дм}^2$ ;  $\tau = 20 \text{ хв}$  ( $\times 100$ );  
 б – режим синтезу: 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла;  $I_a/I_c = 1 \text{ А/дм}^2$ ;  $\tau = 30 \text{ хв}$  ( $\times 200$ );  
 в – режим синтезу: 5 г/л КОН + 5 г/л рідкого скла;  $I_a/I_c = 1 \text{ А/дм}^2$ ;  $\tau = 30 \text{ хв}$  ( $\times 200$ ).

Мікроструктури ОКП, синтезованих на сплаві 2024 за різних відстаней представлено на рис.9. З проведених досліджень видно, що в ОКП, синтезованих на відстані між електродами 0,05 м та 0,25 м після трибологічних випробувань виділяється мідь, причому, по-різному. В покритті, яке утворилось за найменшої віддалі між електродами  $\text{Cu}$  виділяється у вигляді дрібних кулястих включень (рис. 9, а).

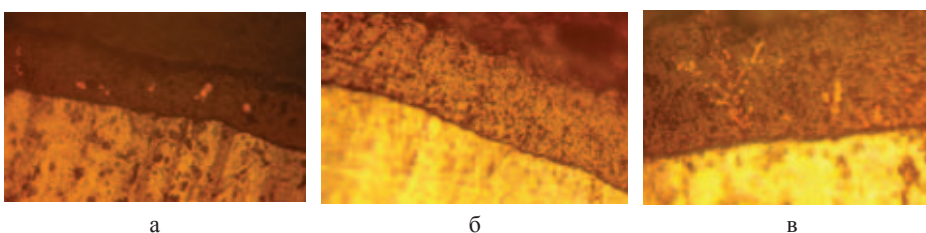


Рис. 9. ОКП на сплаві 2024 після випробувань на зносостійкість відповідно режиму синтезу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла;  $I_a/I_c = 1 \text{ А/дм}^2$ ;  $\tau = 120 \text{ хв}$  за різних віддалей між електродами: а – 0,01 м ( $\times 400$ ); б – 0,1 м ( $\times 200$ ); в – 0,25 м ( $\times 400$ )

Повітряно, у вигляді дендритів, розташовуються такі виділення в покритті, яке синтезується в міжелектродному проміжку 0,25 м (рис. 9, в). ОКП, синтезоване за віддалі між електродами 0,1 м не містить виділень міді після випробувань на зносостійкість (рис. 9, б).

## ВИСНОВКИ

Отже, в даній роботі встановлено, що всі ОКП на титановому та алюмінієвому сплавах підвищують їх трибологічні властивості. Так, виявлено, що ОКП на сплаві ASTM B265 має найвищу зносостійкість за режиму: 10 г/л КОН + +15 г/л р.с.,  $I_a/I_c = 1 \text{ А/дм}^2$ ,  $\tau = 30 \text{ хв}$ . Підвищення опору зносу за присутності ОКП на титановому сплаві можна пояснити існуванням на його поверхні нестійкого крихкого, нестехіометричного оксиду, який в процесі тертя забиває поверхневі пори, виконуючи роль мастила, внаслідок чого зношування поверхні за реверсивно-поступального руху практично припиняється і складає  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}$ , що більше, як в 10 разів менше порівняно з основним металом.

Підвищення трибологічних властивостей спостерігається і для ОКП, синтезованих на сплаві 2024 за різних віддалей між електродами. Однак, найкращі результати отримали для покриття, яке отримали за міжелектродної віддалі 0,1 м. Швидкість зношування в цьому випадку становить 0,0056 мкм/м, що в два рази менше від швидкості зношування ОКП, синтезованих за віддалей 0,05 м та 0,25 м. Провівши мікроструктурний аналіз таких покриттів після

випробувань, зробили припущення, що вочевидь негативний вплив на трибологічні властивості оксидокераміки має присутність виділень міді в покритті, яка має кулясту та дендритоподібну форму.

*Исследовано влияние режимов синтеза на износостойкость оксидокерамических покрытий, синтезированных методом плазменно-электролитного оксидирования на титановом сплаве ASTM B265 и алюминиевом сплаве 2024. Проведен микроструктурный анализ синтезированных покрытий после трибологических испытаний. Установлено, что высокое сопротивление износу имеет покрытие на титановом сплаве, полученное при следующем режиме синтеза: 10 г/л KOH + 15 г/л жидкого стекла,  $I_a / I_c = 1 \text{ A} / \text{дм}^2$ ,  $\tau = 30$  мин. Определено, что наилучшей износостойкостью характеризуются покрытия на сплаве алюминия, которые синтезированы по расстоянию между электродами 0,1 м.*

**Ключевые слова:** оксидокерамические покрытия, синтез, плазмоэлектролитное оксидирование, титановый сплав, алюминиевый сплав, трение, износостойкость.

*The influence of synthesis modes on the wear resistance of oxidoceramic coatings synthesized by the plasma electrolyte oxidation method on the ASTM B265 titanium alloy and 2024 aluminum alloy was investigated. It was found that the highest wear resistance has a coating on the titanium alloy obtained by the following synthesis mode: 10 g / l KOH + 15 g / l liquid glass,  $I_a / I_c = 1 \text{ A} / \text{dm}^2$ ,  $\tau = 30$  min. It is found that the best wear resistance is characterized by coatings on aluminum alloy, which are synthesized at a distance between the electrodes of 0,1 m.*

**Key words:** oxide ceramic coating (OCC), synthesis, plasma electrolyte oxidation, titanium alloy, aluminum alloy, friction, wear resistance.

1. М.Д. Клапків. Плазмоелектролітне оксидування легких сплавів і напилених шарів / М.Д. Клапків, Н.Ю. Імбірович, В.М. Посувайло, С.І. Остап'юк // Наукові нотатки – Луцьк.– 2011. В.31. С. 151–155.
2. Імбірович Н.Ю. Властивості оксидокерамічних покриттів на магнієвих та титанових сплавах, синтезованих в електролітній плазмі / Н.Ю. Імбірович, М.Д. Клапків, В.М. Посувайло, О.Ю.Повстяной // Порошкова металургія. – 2015. – № 1/2. – С.54-60.
3. A.L. Yerokhin et al. Spatial characteristics of discharge phenomena in plasma electrolytic oxidation of aluminium alloy / A.L. Yerokhin a, L.O. Snizhko, N.L. Gurevinab, A. Leylanda, A. Pilkingtona, A. Matthews / Surface and Coatings Technology 177–178 (2004) 779–783.
4. LA Snizhko, OA Kalinichenko, DA Misnyankin: Synthesis of calcium phosphates on titanium. Surface Engineering and Applied Electrochemistry 52(3), 257-262 (2016)
5. Oksana Banakh, Lyubov Snizhko, Tony Journot, ...: The Influence of the Electrolyte Nature and PEO Process Parameters on Properties of Anodized Ti-15Mo Alloy Intended for Biomedical Applications. Metals 8(5) 370 (2018)
6. T. Paulmier, J.M. Bell, P.M. Fredericks. Development of a novel cathodic plasma/electrolytic deposition technique. Part 2: Physico-chemical analysis of the plasma discharge//Surface & Coatings Technology 201 (2007) 8771–8781.
7. Клапків М. Д., Чучмарьов О. С., Сидор П. Я., Посувайло В. М. Термодинаміка взаємодії алюмінію, магнію та цирконію з компонентами електролітної плазми //Фіз.-хім.механіка матеріалів.-2000.-№1.-С.56-65.
8. J.A. Curran, T.W. Clyne Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium//Surface & Coatings Technology 199 (2005) 168– 176.
9. Nykyforchyn H.M., Klaviv M.D., Posuvailo V.M. Properties of oxide – ceramic coating on aluminium alloys synthesized in electrolyte plasma// International Conference on Advanced Materials ICAM'97, Strasbourg, France/Surface and coatings technology Elsevier.1998.- P.219-221.
10. A.L. Yerokhin, T.A. Shatrov, V. Samsonov, P. Shashkov, A. Pilkington, A. Leyland, A. Matthews. Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process//Surface & Coatings Technology 199 (2005) 150– 157.



11. *J.A. Curran*, H. Kalkanç, Yu. Magurova, T.W. Clyne. Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 8683–8687.
12. *R. Arrabal*, E. Matykina, T. Hashimoto, P. Skeldon, G.E. Thompson. Characterization of AC PEO coatings on magnesium alloys // *Surface & Coatings Technology*. – 203. – 2009. – P. 2207–2220.
13. Клапків М., Посувайло В., Стельмахович Б., Повстяна Н., Остап'юк С. Фазовий склад плазмоелектрохімічних оксидокерамічних покриттів. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спец. вип.* – 2006. – Т.5. – С.750 -755.
14. *Stelmakh A.U.*, Sidorenko O.Yu., Kostjukin R.E. Method of identification of fuel oil and lubricants on antiwear and antifriction properties, taking into account real conditions of their work // *Technological systems*. - 2002. - No. 3. - P. 96 - 101.
15. *Aksenov O.F.*, Stelmakh O.U., Shimchuk S.P., Koba V.P., Jamal Ibrahim Mens-ur. Methodology for determining anti-trapping properties of lubricants by criteria of tribo characteristics of secondary structures formed in them // *Bulletin of NAU*. - 2006. - P. 62 - 64.