

*Г. В. КАРАКУРКЧИ, К. Б. БОГДАНОВА, М. Д. САХНЕНКО, М. В. ВЕДЬ*

### **ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ПЕО НА МОРФОЛОГІЮ ТА МІЦНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРИТТІВ**

Встановлено закономірності зміни морфології та міцнісних характеристик оксидних покриттів для сплаву алюмінію АД-0 за умов різної тривалості плазмово-електролітичного оксидування в 1,0 М розчині лужного електроліту  $K_4P_2O_7$ . Змінення формувальної напруги має класичний вигляд – чотири етапи, на перших трьох з яких (доіскровий, іскровий, мікродуговий) поверхня сплаву поступово зміцнюється, а на четвертому (дуговий режим) показник мікротвердості знижується та стає нестабільним і відбувається відшарування покриття. Відповідно до проведеного експерименту найкраща комбінація властивостей ПЕО-покриття (мікротвердість  $H_V = 109,98$  кг/мм<sup>2</sup>, максимальна однорідність, відсутність шорсткості поверхні) досягається за умов початкової густини струму  $i = 5$  А/дм<sup>2</sup> з подальшим через 9 хв зниженням до  $i = 3$  А/дм<sup>2</sup> для підтримання процесу у мікродуговому режимі, загальна тривалість обробки 11-13 хв. При цьому твердість поверхні оксидного шару порівняно із незахищеним сплавом підвищується до чотирьох разів. Вивчення впливу температури і часу термообробки свідчить, що отримані оксидні покриття не рекомендуються використовувати як тверді та зносостійкі за температур вище 300 °С. Дослідження морфології поверхні зразків показало, що в процесі ПЕО утворюється дрібнозерниста структура, яка продовженням часу обробки має схильність до укрупнення та агломерації комірок. За тривалості оксидування 10 хв. сформоване оксидне покриття має світло-сіре забарвлення, його поверхня є рівномірною, що пояснюється інкорпорацією фосфатів з робочого розчину електроліту в дефектну структуру поверхні. Проте перехід до дугового режиму за тривалості оксидування понад 13 хв. призводить до появи істотної шорсткості та неоднорідності структури покриття. Сукупність виявлених факторів свідчить про перспективність напрямку дослідження, подальша робота буде спрямована на отримання оксидних покриттів із заданими функціональними властивостями для алюмінієвих сплавів в різних електролітах за мінімальної тривалості оксидування.

**Ключові слова:** плазмово-електролітичне оксидування, алюмінієвий сплав АД-0, мікротвердість покриття, морфологія поверхні.

*А. В. КАРАКУРКЧИ, Е. Б. БОГДАНОВА, Н. Д. САХНЕНКО, М. В. ВЕДЬ*

### **ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЭО НА МОРФОЛОГИЮ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ**

Установлены закономерности изменения морфологии и прочностных характеристик оксидных покрытий для сплава алюминия АД-0 в условиях различной продолжительности плазменно-электролитического оксидирования в 1,0 М растворе щелочного электролита  $K_4P_2O_7$ . Изменение формовочного напряжения имеет классический вид – четыре этапа, на первых трех (доискровой, искровой, микродуговой) происходит постепенное упрочнение поверхности сплава, а на четвертом (дуговом) показатель микротвердости снижается и становится нестабильным и происходит отслаивание покрытия. В соответствии с проведенным экспериментом лучшей комбинация свойств ПЭО-покрытия (микротвердость  $H_V = 109,98$  кг/мм<sup>2</sup>, максимальная однородность, отсутствие шероховатости поверхности) достигается при начальной плотности тока  $i = 5$  А/дм<sup>2</sup> с последующим через 9 мин снижением до  $i = 3$  А/дм<sup>2</sup> для поддержания процесса в микродуговом режиме, общая продолжительность обработки 11-13 мин. При этом твердость поверхности оксидного слоя по сравнению с незащищенным сплавом повышается до четырех раз. Изучение влияния температуры и времени термообработки свидетельствует, что полученные оксидные покрытия не рекомендуются использовать как твердые и износостойкие при температурах выше 300 °С. Исследование морфологии поверхности образцов показало, что в процессе ПЭО образуется мелкозернистая структура, которая с продолжением времени обработки имеет склонность к укрупнению и агломерации ячеек. При продолжительности оксидирования 10 мин. сформированное оксидное покрытие имеет светло-серую окраску, его поверхность равномерна, что объясняется инкорпорацией фосфатов из рабочего раствора электролита в дефектную структуру поверхности. Однако переход к дуговой режим при продолжительности оксидирования более 13 мин. приводит к появлению существенной шероховатости и неоднородности структуры покрытия. Совокупность выявленных факторов свидетельствует о перспективности направления исследования, дальнейшая работа будет направлена на получение оксидных покрытий с заданными функциональными свойствами для алюминиевых сплавов в различных электролитах при минимальном продолжительности оксидирования.

**Ключевые слова:** плазменно-электролитическое оксидирование, алюминиевый сплав АД-0, микротвердость покрытия, морфология поверхности.

*A. V. KARAKURKCHI, K. B. BOHDANOVA, M. D. SAKHNENKO, M. V. VED'*

### **EFFECT OF PEO DURATION ON MORPHOLOGY AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF COATINGS**

The patterns of changes in the morphology and strength characteristics of oxide coatings for the aluminum alloy AD-0 under conditions of different duration of plasma-electrolytic oxidation in a 1.0 M alkaline electrolyte  $K_4P_2O_7$  solution have been established. The changing of the molding voltage has a classic view – four stages, the first three (pre-spark, spark, microarc) contributes to the gradual hardening of the alloy surface, and at the fourth (arc) stage microhardness decreases and becomes instable, as well as delamination of the surface layer occurs. According to the experiment, the best combination of the PEO coating properties (microhardness  $H_V = 109.98$  kg/mm<sup>2</sup>, maximum homogeneity, no surface roughness) is reached at an initial current density of  $i = 5$  A/dm<sup>2</sup>, followed, in 9 minutes, reducing up to  $i = 3$  A/dm<sup>2</sup> to maintain the process in the microarc mode; the total duration of treatment is 11 – 13 min. In doing so the hardness of the oxide layer surface in comparison with the unprotected alloy increases up to four times. The study of the influence of temperature and heat treatment time indicates that the resulting oxide coatings are not recommended to be used as hard and wear-resistant at temperatures above 300 °C. The research of the surface morphology of the samples shows that in the process of PEO a fine-grained structure is formed, which with a prolonged processing time tends to enlarge and agglomerate the cells. With a 10 min. duration of oxidation the formed oxide coating has a light gray color, its surface is uniform, which is explained by the incorporation of phosphates from the working electrolyte solution into the defective structure of the surface. However, the transition to the arc mode with a duration of oxidation more than 13 min. leads to substantial roughness and heterogeneity of the coating structure. The aggregate of the identified factors indicates the prospect of the research direction, further work will be aimed at obtaining oxide coatings with desired functional properties for aluminum alloys in various electrolytes with a minimum duration of oxidation.

**Key words:** plasma-electrolytic oxidation, aluminum alloy AD-0, microhardness of the coating, surface morphology.

© Г.В. Каракуркчи, К.Б. Богданова, М.Д. Сахненко, М.В. Веды, 2019



**Вступ.** Розвиток промисловості на сучасному етапі диктує нові вимоги до конструкційних матеріалів, зокрема до матеріалів зі специфічними властивостями поверхонь: антикорозійними, зносостійкими, теплостійкими, трибологічними, феромагнітними тощо [1–3]. Інтерес до поверхневого модифікування зумовлений тим, що в більшості випадків саме характеристики поверхні у комбінації з властивостями матеріалу-основи визначають властивості в цілому. Крім того, з економічної точки зору, модифікування поверхні є більш привабливим у порівнянні зі способами зміни об'ємних характеристик. У зв'язку з цим актуальними на сьогоднішній день є розробки та вдосконалення високопродуктивних способів отримання багатофункціональних шарів та покриттів для захисту та зміцнення поверхні легких конструкційних матеріалів.

Важливим конструкційним матеріалом у машино-, приладобудуванні тощо є алюміній та його сплави. Проте ряд недоліків цього металу, зокрема висока хімічна активність, підвищена пластичність, мала міцність, обмежують застосування алюмінію. На повітрі поверхня основного металу (сплаву) вкрита природньою оксидною плівкою, товщина якої за звичайних атмосферних умов складає 0,005-0,2 мкм. Така плівка підвищує хімічну стійкість алюмінію (сплаву), проте не може слугувати надійним захистом проти корозії.

Для покращення характеристик алюмінієвих сплавів використовують різні види поверхневого зміцнення. Процес плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО) алюмінію знаходить виключно широке застосування не лише для захисту виробів від корозії, проте і від механічного зношування. Даний метод дозволяє отримувати багатофункціональне керамікоподібне покриття з високим рівнем механічних властивостей (твердість, зносостійкість тощо), а також високою теплостійкістю, стійкістю в хімічно активних середовищах. А саме ці властивості визначають надійність функціонування сплавів алюмінію в умовах підвищених навантажень. В залежності від умов нанесення товщина такої плівки може сягати до 400 мкм.

Відмінною особливістю ПЕО є участь в процесі формування покриття поверхневих іскрових або мікродугових електричних розрядів на межі розділу деталі, що піддають обробці, та водного розчину електроліту, результатом чого є ПЕО-покриття, склад яких представлений окисленими елементами металу (сплаву) і компонентів електроліту. Серед переваг обраного методу варто зазначити відсутність необхідності ретельної попередньої обробки поверхні металу, а також екологічність методу, високу мікротвердість і низьку поруватість отриманого покриття тощо [4–6].

Останнім часом спостерігається пошук інтересу до особливостей процесів ПЕО, про що свідчать чисельні роботи науковців [7–11]. Практичний і науковий інтерес представляє дослідження динаміки зміни мікротвердості отриманих ПЕО-покриттів в залежності від тривалості процесу оксидування – як одного з основних чинників отримання

високоміцних корозійно стійких покриттів.

Метою даної роботи є дослідження особливостей формування покриття на алюмінієвому сплаві АД-0 і зміна його міцнісних характеристик (зокрема мікротвердості) залежно від тривалості процесу ПЕО.

**Методика експерименту.** Як зразки використовували прямокутні пластини розміром 10 мм×35 мм×1 мм зі сплаву АД-0 (хімічний склад, мас. %: Fe ≤ 0,4, Si ≤ 0,25, Mn 0,05, Ti ≤ 0,05, Al min 99,5, Cu ≤ 0,05, Mg ≤ 0,05, Zn ≤ 0,07). Зразки попередньо обробляли механічною зачисткою (наждачним папером різної зернистості до досягнення параметру шорсткості Ra ~ 0,2 мкм), промивкою дистильованою водою та сушкою. Площа робочої поверхні складала S = 0,015 дм<sup>2</sup>. Як катод застосовували дріт з нержавіючої сталі марки 12x18н10т (хімічний склад, мас. %: C≤0,12, S ≤ 0,8, Mn≤2, Ni 9-11, S≤0,02, P≤0,035, Cr 17-19, Cu≤0,3, Ti 0,4-1,0, Fe ~ 67).

Для формування ПЕО-покриття використовували лужний електроліт 1,0 М К<sub>4</sub>Р<sub>2</sub>О<sub>7</sub>, значення рН робочого розчину складало 10 – 11.

Процес ПЕО проводили в термостатованій електрохімічній комірці за умови вимушеного охолодження до температури робочого розчину 20 – 25 °С, з використанням джерела струму Б5-50 (значення напруги до 300 В), густина струму при цьому становила 3-5 А/дм<sup>2</sup>. Максимальна тривалість обробки сплаву АД-0 складала 15 хв. Анодну поведінку дослідного алюмінієвого сплаву АД-0 в 1М розчині пірофосфату калію вивчали методом лінійної вольтамперометрії з використанням потенціостату ІРС - Pro М.

Морфологію та мікротвердість зразків визначали відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007 на приладі ПМТ-3 методом інденування алмазної піраміди з кутом при вершині 136° і подальшого розрахунку значення мікротвердості за розмірами відбитків діагоналей піраміди на поверхні зразка. Навантаження на інденатор складало 100 г, час витримування при вдавлюванні 6 с. Похибка дослідження мікротвердості за Віккерсом становить ± 5 % [12].

**Результати та їх обговорення.** Хронограма напруги ПЕО сплаву АД-0 у робочому електроліті має класичний вигляд та містить чотири характеристичні області (рис. 1). За густини струму 5 А/дм<sup>2</sup> початок іскріння відповідає U<sub>i</sub> = 50 – 60 В (напруга іскріння), а кінцева напруга формування покриття до виникнення дугових розрядів становить U<sub>ф</sub> = 86 – 89 В.

Дослідження змінення формуальної напруги показало, що початкове зростання напруги зі швидкістю 0,68 В/с відповідає утворенню бар'єрного шару оксиду алюмінію (рис. 1, ділянка I). При появі мікро-розрядів приблизно після 100 с обробки спостерігалось уповільнення зростання напруги, пов'язане із виникненням іскрових розрядів внаслідок пробою оксидного шару (рис. 1, ділянка II). Змінення нахилу на хронограмі напруги відповідає переходу з іскрового режиму в мікродуговий та формуванню основного за товщиною шару ПЕО-покриття.

Найбільш інтенсивне утворення шару покриття відбувається в мікродуговому режимі (рис. 1, ділянка

III). Це пояснюється реалізацією не тільки електрохімічного окиснення, а й термохімічних реакцій, що забезпечують включення компонентів електроліту до оксидного шару, що формується. Покриття, отримане за 780 с ПЕО, характеризується максимальним значенням мікротвердості  $H_V = 109,98 \text{ кг/мм}^2$ .

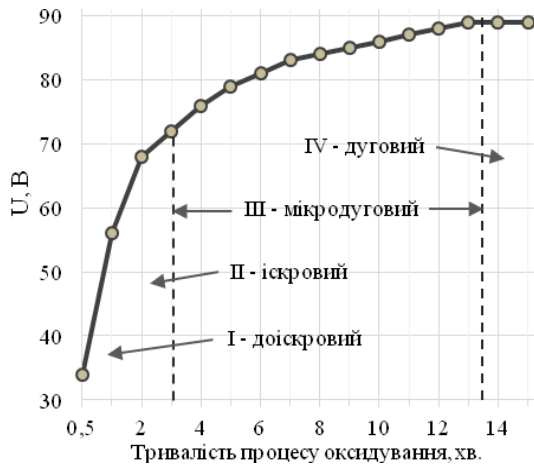


Рисунок 1 – Хронограма напруги формування покриття в розчині 1,0 М  $K_4P_2O_7$

За тривалості оксидування сплаву понад 13 хв. спостерігався перехід до дугового режиму – відбувалось укрупнення іскор із зменшенням їх кількості. При цьому подальшого зростання напруги не спостерігали, а механічні властивості покриття лише погіршувались і ставали нестабільними. Зокрема вимірювання мікротвердості покриття після оксидування понад 13 хв на різних ділянках робочої поверхні показало, що на одному і тому ж зразку відбитки

алмазного індентора становлять від 123 до 200 поділок, що відповідає значенням мікротвердості  $H_V = 50 - 109 \text{ кг/мм}^2$ .

На рис. 2 представлено модель утворених мікророзрядів [10, 13] та морфологію поверхні сплаву алюмінію АД-0 та в ході процесу ПЕО. На початковій стадії (до 1 хв.) мікророзряди відсутні і утворення бар'єрного шару оксиду алюмінію відбувається за механізмом електрохімічного окислення.

Оксидування тривалістю 5 хв. відповідає стадії утворення поруватого оксидного шару. На цьому етапі на всій поверхні зразка виникають дрібні швидко гаснучі іскрові розряди. Швидкість переміщення межі «електроліт-плазма» є малою. Утворене оксидне покриття має добре розвинену поверхню із дрібнозернистою комірчаною структурою.

Режим мікродугових розрядів відповідає терміну оксидування 10 хв та характеризується збільшенням товщини шару покриття. Через збільшення швидкості переміщення межі «електроліт-плазма» при досягненні поверхні плазмове утворення виходить за межі пори, утворюючи пухирець у поверхні покриття. Час горіння мікророзрядів збільшується разом із збільшенням товщини покриття. Дослідження поверхні зразка показало, що в процесі ПЕО дрібнозерниста структура покриття має схильність до укрупнення та агломерації комірок. За даної тривалості оксидування поверхня покриття є рівномірною, що можна пояснити інкорпорацією фосфатів з робочого розчину електроліту в дефектну структуру поверхні. Сформоване оксидне покриття має світло-сіре забарвлення.

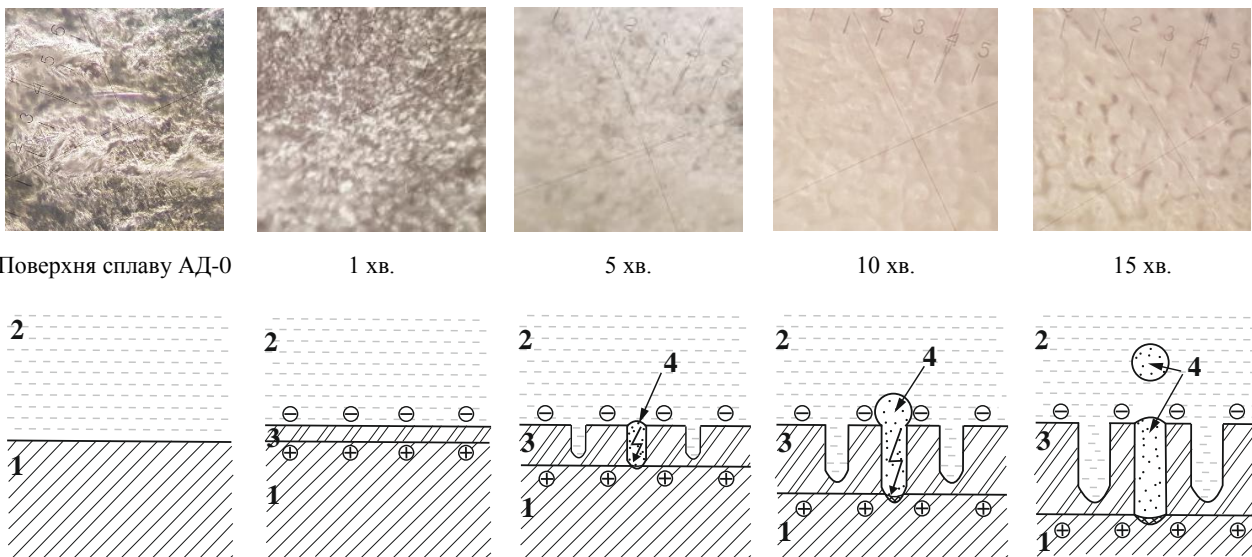


Рисунок 2 – Морфологічна зміна плазмових утворень в ході процесу ПЕО сплаву алюмінію АД-0 та покриття після обробки тривалістю 1, 5, 10, 15 хв. (збільшення  $\times 500$ ):

1 – метал, 2 – електроліт, 3 – покриття, 4 – плазмове утворення



Рисунок 3 – Приклад відшаровування поверхні ПЕО-покриття

За умови подальшого зростання товщини покриття (15 хв.) швидкість переміщення межі є настільки високою, що пухирець після виходу за межі пори розширяється дуже швидко і відривається від поверхні покриття. Це супроводжується характерним потріскуванням газових пухирців у мікророзрядних каналах. При цьому канал розряду залишається незаповненим і наступний пробій виникає на цьому ж місці, що пояснює зменшення кількості іскор. При переході до дугового режиму, що відповідає тривалості оксидування понад 13 хв, відбувається подальше укрупнення структурних елементів, проте поверхня покриття стає неоднорідною, має істотну шорсткість. У дуговому режимі процесу ПЕО відбувається руйнування поверхневого шару. При втисканні алмазного індентора у поверхню під дією навантаження, спостерігається «лущення» покриття навколо відбитка (рис. 3), що вірогідно свідчить про низьку адгезійну міцність та відшаровування покриття через руйнування дугами та збільшення поруватості.

На рис. 4 наведена залежність мікротвердості  $H_V$  від тривалості ПЕО-обробки. Коефіцієнт апроксимації для отриманої залежності становить  $R^2 = 0,9853$ , що свідчить про достовірність отриманих результатів. Зміна мікротвердості ПЕО-покриття із збільшенням часу оксидування корелює з даними хронограми напруги формування.

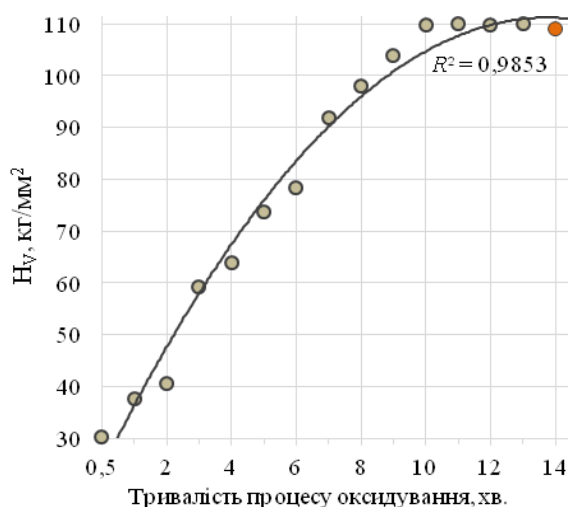


Рисунок 4 – Динаміка зростання мікротвердості покриття (за методом Віккерса) в залежності від тривалості оксидування

Три перші етапи формування покриття (доіскровий, іскровий і мікродуговий) характеризуються поступовим зростанням показника мікротвердості і мають практично лінійний характер. Графік залежності мікротвердості ПЕО-обробки від тривалості обробки має плато, що починається з 10 хв, і свідчить про припинення зростання показника міцності. В інтервалі оксидування 10 – 13 хв  $H_V$  залишається практично незмінним ( $109,90 - 109,98$  кг/мм<sup>2</sup>), а перехід до дугового режиму характеризується зменшенням і нестабільністю показника мікротвердості ( $50 \div 109$  кг/мм<sup>2</sup>).

Варто зазначити, що максимальний фактичний приріст маси покриття ( $\Delta m$ ) після оксидування є несуттєвим і складає  $0,002 - 0,003$  г. Це свідчить про рівновагу процесів формування (розчинення оксидного шару) та підтверджує кінетичні закономірності процесу ПЕО, встановлені раніше [14 – 17].

Також було досліджено вплив часу термічної обробки і температури на мікротвердість отриманих покриттів. Встановлено, що сушіння зразка в природних умовах (без нагрівання) впродовж однієї доби, а також сушка зразків за температури  $300$  °С впродовж 2,5 год. не впливають на показники мікротвердості. Проте прожарювання зразків з витримкою за максимальної температури  $500$  °С протягом 0,5 год. призводить до зменшення показника  $H_V$  майже на 45 %. При цьому за візуальною оцінкою зовнішній вигляд зразків не змінюється, а вага зразків залишається сталою. Таким чином, оксидне покриття, сформоване на сплаві АД-0 у розчині  $1,0$  М пірофосфату калію, не рекомендується використовувати як тверде та зносостійке за температур вище  $300$  °С.

Таким чином, ПЕО обробка сплаву алюмінію АД-0 протягом 10 – 13 хв дозволила збільшити мікротвердість поверхні майже в 4 рази. Відповідно до проведеної роботи найкраща комбінація властивостей ПЕО-покриття (мікротвердість  $H_V = 109,98$  кг/мм<sup>2</sup> з максимальною однорідністю і відсутністю шорсткості поверхні) досягається за умов початкової густини струму  $i = 5$  А/дм<sup>2</sup> з подальшим через 9 хв зниженням до  $i = 3$  А/дм<sup>2</sup> для підтримання перебігу процесу у мікродуговому режимі, загальна тривалість обробки 11 – 13 хв.

Проведені експериментальні дослідження підняли важливу проблему, направлену на вирішення недоліків оксидування алюмінієвих сплавів – неможливість отримання рівномірних, із заданою товщиною і функціональними властивостями покриттів. Продовження досліджень в цьому напрямі є перспективним, оскільки дозволить за мінімальної тривалості проведення ПЕО отримувати оксидні покриття із заданими функціональними властивостями на алюмінієвих сплавах у різних електролітах, а в подальшому і створити економічно ефективну серійну технологію.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень встановлена динаміка збільшення показника мікротвердості покриття залежно від тривалості ПЕО-обробки. Встановлено, що оксидування сплаву алюмінію АД-0 у розчині  $1,0$  М  $K_4P_2O_7$  протягом 11 –

13 хв дозволяє підвищити твердість поверхні до чотирьох разів ( $H_V = 109,98$  кг/мм<sup>2</sup>) порівняно із незахищеним сплавом. Морфологічні особливості отриманих оксидних покриттів полягають в утворенні дрібнозернистої комірчаної структури, яка зі збільшенням тривалості обробки поверхні стає більш однорідною. При переході до дугового режиму за тривалості оксидування понад 13 хв. покриття набуває шорсткості і характеризується нестабільністю показника мікротвердості (50 – 109 кг/мм<sup>2</sup>).

#### Список літератури

1. Руднев В. С. Применение плазменно-электролитического оксидирования для формирования функциональных многокомпонентных покрытий на металлах и сплавах / В. С. Руднев, И. В. Лукиянчук, М. С. Васильева [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 1-2. С. 439 – 443. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.439-443.
2. V. Belozero, O. Sobol, A. Mahatlova, V. Subbotina, Taha A. Tabaza, Ubeidulla F. Al-Qawabeha, Safwan M. Al-Qawabah. Effect of electrolysis regimes on the structure and properties of coatings on aluminum alloys formed by anode-cathode micro arc oxidation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 1, no. 12 (91), p. 43 – 47. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121744.
3. Dong H. Surface Engineering of Light Alloys. Aluminum, Magnesium and Titanium Alloys. UK, Woodhead Publishing Press., 2010. 680 p.
4. M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurkchi, T. Yu. Myrna. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety. *Functional materials*. 2017, vol. 24, no. 2, p. 303-310. <https://doi.org/10.15407/fm24.02.303>.
5. A. Karakurkchi, N. Sakhnenko, M. Ved', A. Galak, S. Petrukhin, Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 5/10, no. 89. pp. 12 – 18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109885.
6. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / под общ. ред. И. В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. Т. 2. 512 с.
7. Liu X., Wang S., Du N., Li X., Zhao Q. Evolution of the Three-Dimensional Structure and Growth Model of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 1060 Aluminum Alloy. *Coatings*. 2018, vol. 8(3), no. 105. [mdpi.com. https://doi.org/10.3390/coatings8030105](https://doi.org/10.3390/coatings8030105).
8. Егоркин В. С. Морфологические особенности и механические свойства покрытий, формируемых плазменным электролитическим оксидированием на сплаве алюминия AMg3 / В. С. Егоркин, И. Е. Вялый, С. Л. Синебрюхов [и др.] // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4 (37). С. 31 – 40.
9. Mosab Kaseem, Hae Woong Yang, Young Gun Ko. Toward a nearly defect-free coating via high-energy plasma sparks. *Scientific Reports*. 2017, vol. 7 (1). Article number: 2378. doi: 10.1038/s41598-017-02702-3.
10. Кучмин И. Б. Микродуговое анодирование алюминиевых сплавов в малоконцентрированном силикатно-щелочном электролите: дисс. ... канд. техн. наук: 02.00.05. Саратов, 2014. 120 с.
11. Пономарев И. С. Особенности процесса микродугового оксидирования алюминиевого сплава / И. С. Пономарев, Е. А. Кривonosova, А.И. Гончаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, Материаловедение. 2014. Т. 16., № 1. С. 56 – 63.
12. McCall J. Interpretive techniques for microstructural analysis. New York-London, Springer Science & Business Media Press., 2012. 202 p.
13. Нечаев Г. Г. Модель микроразрядов в процессе микродугового оксидирования / Г. Г. Нечаев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 1 (69). С. 107 – 112.
14. G. Sh. Yar-Mukhamedova, M. V. Ved', A. V. Karakurkchi and N. D. Sakhnenko, Mixed alumina and cobalt containing plasma electrolytic oxide coatings. *4th Global Conference on Polymer and*

*Composite Materials (PCM 2017), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. vol. 213, conf. 1, article number: 012020. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012020

15. T. Mi, B. Jiang, Z. Liu, L. Fan, J. Kan, X. Zhang, C. Wanga Self-Organization Kinetics of Microarc Oxidation: Nonequilibrium-State Electrode Reaction Kinetics. *Journal of The Electrochemical Society*. 2016, vol. 163, no 5, p. C184 – C197.
16. Сахненко Н. Д. Конверсионные и композиционные покрытия на сплавах титана: монография / Н. Д. Сахненко, М. В. Ведь, М. В. Майба. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. 176 с.
17. Паненко И.Н. Получение многофункциональных композиционных покрытий методом микродугового оксидирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.03. Новочеркасск, 2016. 275 с.

#### References (transliterated)

1. Rudnev V. S., Lukiyanchuk I. V., Vasil'eva M. S., Medkov M. A. Primenenie plazmenno-elektroliticheskogo oksidirovaniya dlya formirovaniya funkcional'nyh mnogokomponentnyh pokrytij na metallah i splavah [Application of plasma-electrolytic oxidation for formation of functional multicomponent coatings on metals and alloys]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Works of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2018. vol. 9, no. 1-2. pp. 439 – 443. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.439-443.
2. V. Belozero, O. Sobol, A. Mahatlova, V. Subbotina, Taha A. Tabaza, Ubeidulla F. Al-Qawabeha, Safwan M. Al-Qawabah. Effect of electrolysis regimes on the structure and properties of coatings on aluminum alloys formed by anode-cathode micro arc oxidation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 1, no. 12 (91), p. 43 – 47. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121744.
3. Dong H. Surface Engineering of Light Alloys. Aluminum, Magnesium and Titanium Alloys. UK, Woodhead Publishing Press., 2010. 680 p.
4. M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurkchi, T. Yu. Myrna. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety. *Functional materials*. 2017, vol. 24, no. 2, pp. 303-310. <https://doi.org/10.15407/fm24.02.303>.
5. A. Karakurkchi, N. Sakhnenko, M. Ved', A. Galak, S. Petrukhin, Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 5/10, no. 89. pp. 12 – 18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109885
6. *Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т.* I. V. Suminov (ed.) [Plasma-electrolytic modification of metals and alloys surface: in 2 vol.] Moscow, Tehnosfera Publ., 2011. vol. 2. 512 p.
7. Liu X., Wang S., Du N., Li X., Zhao Q. Evolution of the Three-Dimensional Structure and Growth Model of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 1060 Aluminum Alloy. *Coatings*. 2018, vol. 8(3), no. 105. [mdpi.com. https://doi.org/10.3390/coatings8030105](https://doi.org/10.3390/coatings8030105)
8. Egorkin V. S., Vyalyj I. E., Sinebryuhov S. L., Minaev A. N., Gnedkov S. V. Morfologicheskie osobennosti i mekhanicheskie svoystva pokrytij, formiruemyh plazmennym elektroliticheskim oksidirovaniem na splave alyuminia AMg3 [Morphological features and mechanical properties of coatings on AMg3 formed by plasma electrolytic oxidation]. *Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU* [FEFU: School of engineering bulletin]. 2018. no. 4 (37). pp. 31 – 40.
9. Mosab Kaseem, Hae Woong Yang, Young Gun Ko. Toward a nearly defect-free coating via high-energy plasma sparks. *Scientific Reports*. 2017, vol. 7 (1). Article number: 2378. doi: 10.1038/s41598-017-02702-3.
10. Kuchmin I. B. *Микродуговое анодирование алюминиевых сплавов в малоконцентрированном силикатно-щелочном электролите: дис. ... канд. техн. наук* 02.00.05 [Microarc anodizing of aluminum alloys in low concentrated silicate-alkaline electrolyte. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Saratov, 2014. 120 p.
11. Ponomarev I. S., Krivonosova E. A., Goncharov A.I. Osobennosti processa mikrodrugovogo oksidirovaniya alyuminievogo splava [Features of the process of microarc oxidation of aluminum alloy]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, Materialovedenie* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Engineering, Materials Science]. 2014. vol. 16., no 1. pp. 56 – 63.

12. McCall J. *Interpretive techniques for microstructural analysis*. New York-London, Springer Science & Business Media Press., 2012. 202 p.
13. Nechaev G. G. Model' mikrozaryadov v processe mikrodugovogo oksidirovaniya [A model in the microdischarge micro-arc oxidation]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University. Mechanical Engineering, Materials Science]. 2013. no. 1 (69). pp. 107 – 112.
14. G. Sh. Yar-Mukhamedova, M. V. Ved', A. V. Karakurkchi and N. D. Sakhnenko, Mixed alumina and cobalt containing plasma electrolytic oxide coatings. *4th Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2017), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. vol. 213, conf. 1, article number: 012020. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012020
15. T. Mi, B. Jiang, Z. Liu, L. Fan, J. Kan, X. Zhang, C. Wanga Self-Organization Kinetics of Microarc Oxidation: Nonequilibrium-State Electrode Reaction Kinetics. *Journal of The Electrochemical Society*. 2016, vol. 163, no 5, p. C184 – C197.
16. Sahnenko N. D., Ved' M. V., Majba M. V. *Konversionnye i kompozicionnye pokrytiya na splavah titana: monografiya* [Conversion and composition coatings on titanium alloys: monograph]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, 176 p.
17. Panenko I.N. *Poluchenie mnogofunkcional'nyh kompozicionnyh pokrytij metodom mikrodugovogo oksidirovaniya: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.03* [Production of multifunctional composite coatings using microarc oxidation. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Novocheerkassk, 2016. 275 p.

Надійшла (received) 18.08.19.

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Каракуркчі Ганна Володимирівна (Каракуркчи Анна Владимировна, Karakurkchi Ann)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», начальник навчального відділу Військового інституту танкових військ, Харків; тел.: (063) 417–35–44, e-mail: anyutikukr@gmail.com.

**Богданова Катерина Борисівна (Богданова Екатерина Борисовна, Bohdanova Kateryna)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри загальної та неорганічної хімії, Харків; тел.: (099) 264–56–10, e-mail: Catherine@i.ua.

**Сахненко Микола Дмитрович (Сахненко Николай Дмитриевич, Sakhnenko Nikolay)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії, Харків, тел.: (050) 289–89–97, e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

**Ведь Марина Віталіївна (Ведь Марина Витальевна, Ved' Maryna)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної та неорганічної хімії, Харків; тел.: (050) 161–80–36, e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua.