

PACS numbers: 52.77.Dq, 61.43.Gt, 62.20.Qp, 81.15.Pq, 81.16.Pr, 81.40.Pq, 82.45.Xy

Структура та властивості ПЕО-покриттів, одержаних на стопі Д16Т за різних електричних параметрів і попереднього ультразвукового ударного оброблення

Б. М. Мордюк, Л. Я. Роп'як*, В. С. Витвицький*, Н. О. Піскун,
В. Ю. Малінін

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15,
76019 Івано-Франківськ, Україна*

Проведено модифікування поверхні алюмінійового стопу Д16Т за допомогою плазово-електролітичного оксидування (ПЕО) за різних величин густини струму i та швидкості подачі електроліту v . З огляду на максимальну мікротвердість і мінімальне зношування ПЕО-покриття визначено оптимальні параметри процесу ($i = 4 \text{ А/дм}^2$ і $v = 80 \text{ см/с}$). Із цими параметрами проведено комбіноване оброблення поверхні стопу Д16Т із попереднім ультразвуковим ударним обробленням (УЗУО) та фінішним ПЕО. Методом растрової електронної мікроскопії досліджено загальну поруватість, розмір пор і їхній розподіл по товщині ПЕО-покриттів у залежності від величин густини застосованого струму, швидкості подачі електроліту й УЗУО.

Corresponding author: Bohdan Mykolayovych Mordyuk
E-mail: mordyuk@imp.kiev.ua

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine
*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska Str., UA-76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Citation: B. M. Mordyuk, L. Ya. Rop'yak, V. S. Vytvyts'kyi, N. O. Piskun, and V. Yu. Malinin, Structure and Properties of Plasma–Electrolytic-Oxidation Coatings Obtained on Д16Т Alloy under Different Electrical Parameters and Prior Ultrasonic Impact Treatment, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**, No. 9: 989–1002 (2025). DOI: [10.15407/mfint.47.09.0989](https://doi.org/10.15407/mfint.47.09.0989)

© Publisher PH 'Akademperiodyka' of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

Показано, що зростання мікротвердості HV ($\cong 22$ ГПа) та зменшення зношування W ($\cong 0,18$ г) УЗУО + ПЕО-покриття склали $\cong 3\text{--}5\%$ в порівнянні з ПЕО без УЗУО, що пов'язане зі зменшенням поруватості поверхневого шару покриття товщиною у 40 мкм (у 3,5 рази) та шару біля інтерфейсу між покриттям і поверхнею зразка Д16Т (у 4,5 рази), а також зменшенням розмірів і більш рівномірним розподілом пор по товщині покриття.

Ключові слова: плазмове-електролітичне оксидування, ультразвукове ударне оброблення, покриття, поруватість, мікротвердість, зношування.

The surface of the aluminium Д16Т alloy is modified using plasma-electrolytic oxidation (PEO) at different current densities i and electrolyte-flow rates v . Taking the maximum microhardness and minimum wear of the PEO coating into account, the optimal process parameters are determined ($i = 4$ А/дм² and $v = 80$ cm/s). With these parameters, a combined surface treatment of the Д16Т alloy is carried out with preliminary ultrasonic impact treatment (UIT) and finishing PEO. The total porosity, pore size, and their distribution over the thickness of the PEO coatings are investigated using the scanning electron microscopy method, depending on the applied current densities, electrolyte feed rates, and UIT. As shown, the increase in microhardness HV ($\cong 22$ GPa) and the decrease in wear W ($\cong 0.18$ g) of the UIT + PEO coating amount to $\cong 3\text{--}5\%$ as compared to those for the PEO coating produced without UIT. This is associated with a decrease in the porosity of the coating-surface layer of 40 μ m thick (by 3.5 times) and the layer near the interface between the coating and the Д16Т-alloy specimen surface (by 4.5 times), as well as a decrease in the size and more uniform arrangement of pores.

Key words: plasma-electrolytic oxidation, ultrasonic impact treatment, coating, porosity, microhardness, wear.

(Отримано 18 серпня 2025 р.; остаточн. варіант — 19 серпня 2025 р.)

1. ВСТУП

Алюмінійові стопи та композити на їхній основі перебувають серед найважливіших конструкційних матеріалів завдяки їхній високій питомій міцності. Достатня пластичність і невисока температура топлення уможливають виготовляти вироби як традиційними методами «віднімання», так і сучасними адитивними методами тривимірного друку [1]. Перелік галузей їхнього застосування є доволі широким: від аерокосмічної, автомобільної та судноплавної до будівельної та пакувальної промисловостей. Однак актуальною залишається задача підвищення довговічності виробів і конструкцій із алюмінієвих стопів, вирішення якої часто пов'язане із модифікуванням поверхні.

Серед низки методів модифікування поверхні можна виділити інтенсивну деформацію поверхневих шарів виробів і конструкцій

за допомогою оброблення тертям спеціального інструменту [2], дробоструминного, лазерного або ультразвукового ударного оброблення [3–6], формування поверхневих композитів, зміцнених порошками металів [7], карбідів і оксидів [8–10] або квазикристалів [11, 12], задля підвищення опору зношуванню [7, 9–11] та втомі [3, 12], а також нанесення покриттів задля захисту поверхні від корозії та зношування [13–19] і задля гальмування підростання тріщиноподібних дефектів [20–22]. Загалом модифікування поверхні деталей і виробів забезпечує подовжений експлуатаційний ресурс конструкцій і споруд.

Серед сучасних методів покривання слід виділити метод плазмове-електролітичного оксидування (ПЕО) — передову технологію, яка дає змогу вирощувати стійкі щодо корозії та зношування керамічні покриття на поверхнях низки металів вентильної групи (Al, Mg, Ti та їхні стопи) [23–26], а також є однією з екологічно чистих та економічно ефективних технологій [27]. За умов високої напруги між деталлю та електродою, внаслідок перебігу плазмохімічних реакцій у розрядних каналах за високих температур утворюються дисперсні оксиди, що забезпечують сформованому покриттю високу твердість, зносостійкість і жаротривкість. Однак технологічний процес ПЕО має бути оптимізованим з урахуванням специфіки залежно від обраної марки деформованого алюмінійового стопу та залежно від галузі застосування й бажаних експлуатаційних властивостей деталей, покритих обволікальними керамічними покриттями.

Нещодавні роботи засвідчили доцільність комбінованого застосування пластичного деформування та нанесення оксидних покриттів. Такий підхід виявився ефективним для підвищення стійкості поверхні титанових [28–30] і алюмінійових [31, 32] стопів. Поєднання оброблення дробом і наступного ПЕО забезпечує значну стійкість щодо корозії та збільшення терміну служби в умовах звичайної втоми та корозійної втоми, тим самим відкриваючи нові можливості для застосування в аерокосмічній галузі. Разом із тим, через підвищену шерсткість поверхні після дробоструминного оброблення необхідно застосовувати проміжне шліфування для поліпшення структури та властивостей ПЕО-покриття. Цієї операції можна уникнути, якщо достатньо низьку шерсткість буде сформовано за умов поверхневого модифікування. Доволі низьку шерсткість модифікованої поверхні формує ультразвукове ударне оброблення за умови застосування відповідних режимів [33]. Крім того, важливим також є істотне подрібнення зернової структури поверхневого шару, оскільки наявність більшої кількості меж зерен загалом сприяє пришвидшеному формуванню оксидної плівки [6]. Тому застосування попереднього модифікування поверхні ультразвуковим ударним обробленням і наступного плазмове-електролітичного оксидування може бути перспективним із огляду на поліпшення

структури та властивостей сформованого ПЕО-покриття.

Метою даної роботи є експериментальне визначення оптимальних параметрів процесу плазмово-електролітичного оксидування стопу Д16Т (2024) з урахуванням мікроструктури, мікротвердості та зносостійкості сформованого ПЕО-покриття, а також виявлення впливу попереднього ультразвукового ударного оброблення на якість одержаного ПЕО-покриття.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджували зразки деформованого алюмінійового стопу Д16Т, який належить до стопів системи Al–Cu–Mg і має достатньо високі механічні властивості порівняно з іншими алюмінієвими стопами, а вироби з нього широко використовуються в промисловості та побуті. Зразки попередньо зазнавали гартування від температури у 495–505°C і природнього старіння за кімнатної температури. Хімічний склад стопу наведено у табл. 1.

Попереднє модифікування поверхні здійснювалося ультразвуковим ударним обробленням (УЗУО) за нормального прикладення ударного навантаження на установці УЗГ-300, яка складається з ультразвукового генератора частотою у 21 кГц і потужністю у 0,6 кВт, вібратора зі ступінчастим концентратором і бойка із загартованої криці ШХ15 [35]. Амплітуда торця концентратора складала $A = 15$ мкм. За рахунок періодичного контакту бойка з торцем концентратора боек отримує імпульс сили та кінетичну енергію, яка витрачається на деформування поверхневих шарів зразка. Тривалість оброблення складала 120 с. У процесі навантаження зразок отримував $\cong 10^5$ ударів. Після механічного оброблення одержана шерсткість поверхні склала $Ra = 0,8\text{--}1,1$ мкм.

ПЕО проводили на пристрої, який дає змогу формувати оксидні покриття на деталях у проточному електроліті. Установка містить джерело живлення змінного струму (напругою до 1000 В), систему мірювання значень напруги та струму в катодному та анодному періодах, а також систему циркуляції електроліту, змінні електрохімічні комірки з електродами з неіржавійної криці, систему охолодження електроліту та систему витяжної вентиляції. Використову-

ТАБЛИЦЯ 1. Хімічний склад стопу Д16Т [34].

TABLE 1. Chemical composition of D16T alloy [34].

Масова частка елементу, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Інші	Al
0,5	0,5	3,8–4,9	0,3–0,9	1,2–1,8	0,25	0,1	0,15	0,15	решта

вали силікат-лужний електроліт на водній основі, що містив гідроксид Калію (KOH) і силікат Натрію (Na_2SiO_3). Технологічні режими формування покриття наведено в [25]. Товщина сформованого робочого шару оксидного покриття становила $\cong 300$ мкм. Одержано серію ПЕО-покриттів за різних параметрів процесу оксидування, а саме, силу струму змінювали в межах $2\text{--}8$ А/дм², а швидкість подачі електроліту — в межах $40\text{--}120$ см/с.

Проведено експериментальне дослідження механічних властивостей, а саме, мікротвердості на приладі ПМТ-3 із навантаженням на Віккерсів індентор у 100 г впродовж 10 с, а також опору зношуванню з застосуванням стенду УМТ-1 для дослідження пар тертя під час зворотно-поступального руху. Величину втрати ваги внаслідок зношування зразків визначали гравіметричним методом — зважуванням випробуваних зразків на аналітичних терезах ВЛР-200-М (точність — $0,1$ мг) до та після випробування на зношування. Перед кожним зважуванням зразки ретельно протирали етиловим спиртом і сушили. Мікроструктуру покриттів досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа TESCAN Vega3 SBH. Параметри поруватості покриттів оцінювали, аналізуючи РЕМ-зображення мікроструктури за допомогою програми ImagePro-32, яка уможлиблювала оцінювати розподіл пор за розмірами та частку їх у певних частинах покриттів на різній віддалі від інтерфейсу (поверхні зразка Д16Т).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що структура та властивості одержаного ПЕО-покриття залежать від перебігу мікродугових розрядів і параметрів численних електричних пробоїв оксидної плівки, яка формується за високої напруги між деталлю та електродою. Очевидно, що перебіг вказаних процесів залежить від електричних параметрів, а саме, напруги та сили прикладеного струму. Крім того, виникнення рухомих мікродугових розрядів на усій поверхні зразка веде до нагрівання деталі й електроліту, що також може позначатися на структурі сформованого покриття. Тому на першому етапі досліджено вплив швидкості подачі електроліту в робочу камеру, що забезпечує певну сталу температуру електроліту та зразка в процесі ПЕО.

На рисунку 1 показано результати експериментального дослідження мікротвердості HV ПЕО-покриттів, одержаних за різних величин сили струму та швидкості подачі електроліту. Видно, що незалежно від швидкості подачі електроліту зміни HV мають немонотонний характер із зростанням застосованої в процесі ПЕО сили струму. Для кожної із використаних величин швидкості подачі електроліту v фіксуються максимальні значення HV , що уможливило обрати оптимальне значення v . Для досліджених швидкостей у

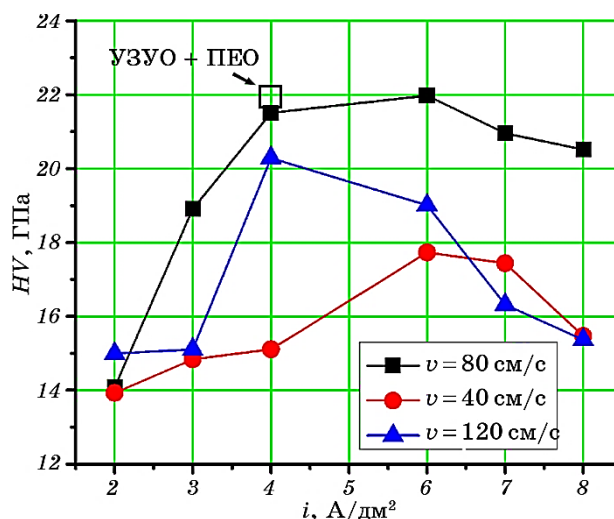


Рис. 1. Залежності мікротвердості ПЕО-покриттів від сили струму i та швидкості подачі електроліту v . Відкритий квадратний символ відповідає покриттю, виготовленому у комбінованому УЗУО + ПЕО-процесі.

Fig. 1. Dependences of microhardness of PEO coatings on the current density i and electrolyte-flow rate v . The open-square symbol relates to the coating produced during the combined UIT + PEO process.

40, 80 і 120 см/с мікротвердість сягає 17,8 ГПа, 22 ГПа і 20,5 ГПа за величин сили струму у 6, 6 і 4 А/дм² відповідно. Максимальні значення HV фіксуються на кривій, зареєстрованій для швидкості подачі електроліту $v = 80$ см/с. Крім того, за цієї швидкості електроліту величини HV залишаються високими та майже незмінними в інтервалі величин сили струму у 4–8 А/дм², тоді як для інших величин v максимуми на залежностях HV є більш вираженими. Тобто для $v = 40$ см/с і 120 см/с вибір оптимальної величини сили струму є більш критичним.

За повної кореляції із залежностями мікротвердості немонотонний характер мають і зміни втрат на зношування досліджених покриттів. На рисунку 2 показано дані щодо зношування ПЕО-покриттів у залежності від використаних під час їхнього формування сили струму та швидкості подачі електроліту. Видно, що найменші величини зношування фіксуються для ПЕО-покриттів, одержаних за сил струму в інтервалі 4–6 А/дм² незалежно від використаної швидкості подачі електроліту v . Разом з тим, варто відзначити, що для швидкостей подачі електроліту $v = 40$ см/с і 80 см/с доволі істотні втрати на зношування ($\cong 0,28$ г) ПЕО-покриттів, одержаних за малих величин сили струму, починаючи з сили струму у 4 А/дм², зменшуються до 0,19–0,21 г і стабілізуються

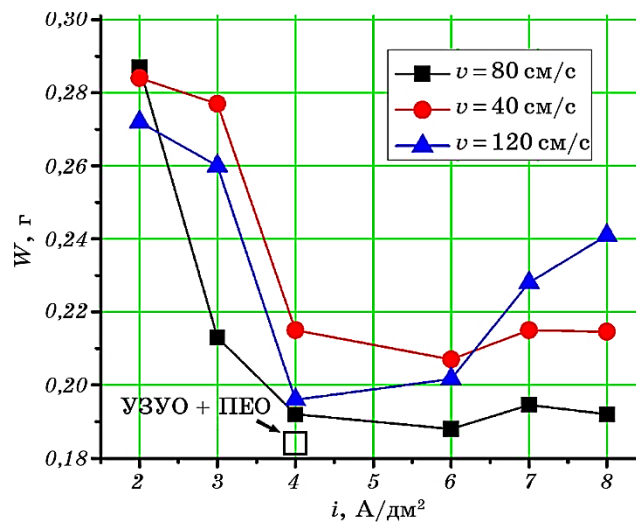


Рис. 2. Залежності величини зношування ПЕО-покриттів від сили струму i та швидкості подачі електроліту v . Відкритий квадратний символ відповідає покриттю, виготовленому у комбінованому УЗУО + ПЕО-процесі.

Fig. 2. Dependences of wear losses of PEO coatings on the current density i and electrolyte-flow rate v . The open square symbol relates to the coating produced during the combined UIT + PEO process.

на цьому рівні, незважаючи на подальше зростання сили застосованого під час ПЕО струму.

Звичною також є обернена пропорційність між твердістю H і величиною зношування W . Це узгоджується з відомою залежністю Арчарда–Рабиновича $W = kp/H$ (де p — прикладене навантаження, k — коефіцієнт тертя) [9, 36], відхилення від якої можливі у випадку крихкого руйнування покриття (композитного матеріалу) та наступного абразивного зношування.

Очевидно, що властивості одержаних ПЕО-покриттів пов'язані з їхньою мікроструктурою, яку, в свою чергу, зумовлено перебігом процесу ПЕО. В процесі ПЕО, як відомо [13, 14, 25], прикладена висока напруга спричиняє мікродугові розряди на поверхні зразка та зростання температури, у розрядних каналах за високих температур відбуваються плазмохімічні реакції з утворенням дисперсних оксидів, які формують ПЕО-покриття. Електричні параметри процесу, що задаються для забезпечення ПЕО, впливають на характеристики мікродугових розрядів, їхню кількість і рівномірність утворення. Як наслідок, від електричних параметрів має залежати щільність одержаного ПЕО-покриття, а також залишкова поруватість.

Іншим чинником, який може впливати на мікроструктуру одержаних ПЕО-покриттів, є стан поверхні зразка, а саме, шерсткість

поверхні та параметри мікроструктури поверхневого шару. Природньо, що за рівномірного осадження продуктів ПЕО на поверхню у епітаксіальному режимі кінцева шерсткість ПЕО-покриття буде залежати від вихідної шерсткості зразка [14]. Також відомо, що швидкість формування оксидних плівок і їхня щільність, наприклад за умов анодної поляризації [6, 13, 16–18], залежить від розміру зерен і частки меж зерен на поверхні зразка (деталю). Це пов'язане зі швидшим окисненням матеріалу в менш щільних областях меж зерен і разом з тим пришвидшеним формуванням оксидної плівки, яка за умов корозійних випробувань слугує захистом від подальшого окиснення (корозії). Цей механізм часто застосовується цілеспрямовано для формування щільних оксидних плівок і підвищення опору високотемпературному окисненню [28–30] й антикорозійних властивостей [31, 32] матеріалів завдяки подрібненню зернової структури поверхневих шарів їхнім деформаційним модифікуванням.

В даній роботі мікроструктура досліджених ПЕО-покриттів аналізувалася за допомогою растрової електронної мікроскопії, а залишкова поруватість визначалася на різних ділянках покриттів із застосуванням пошарової аналізи зображень у прикладній програмі ImagePro. На рисунку 3 наведено зображення поперечного перерізу ПЕО-покриттів, одержаних за двох величин сили струму, за-

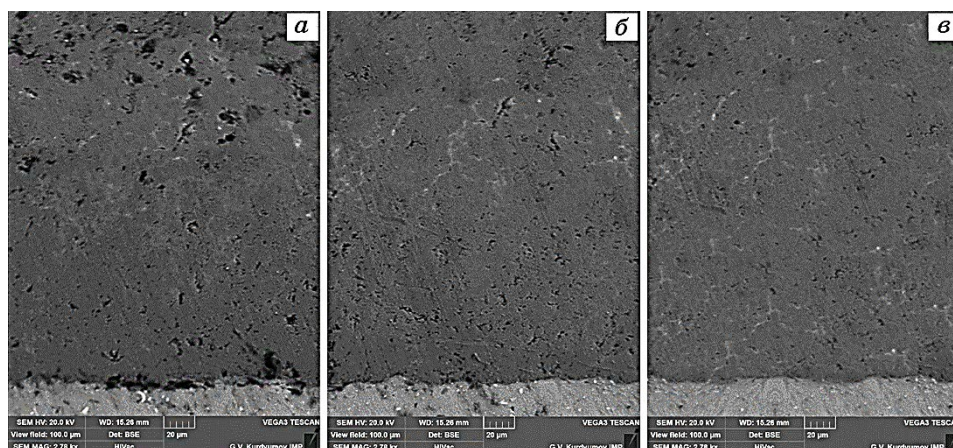


Рис. 3. РЕМ-зображення мікроструктури поперечного перерізу ПЕО-покриттів, одержаних за різної сили струму, застосованого під час ПЕО: 2 А/дм² (а), 4 А/дм² (б) та 4 А/дм² із попереднім УЗУО поверхні алюмінієвої підкладки (УЗУО + ПЕО) (в).

Fig. 3. SEM images of the microstructure of the cross-sections of PEO coatings obtained at different current densities applied during PEO: 2 A/dm² (a), 4 A/dm² (b), and with preliminary UIT modification of the aluminium substrate surface ($i = 4$ A/dm²) (UIT + PEO) (c).

стосованого під час плазмово-електролітичного оксидування (4 А/дм^2 (рис. 3, *а*) і 2 А/дм^2 (рис. 3, *б*)), і швидкості подачі електроліту у 80 см/с , а також поперечного перерізу ПЕО-покриття, сформованого після попереднього модифікування поверхні алюмінійової підкладки за допомогою УЗУО (рис. 3, *в*).

Рисунок 4 демонструє результати аналізу поруватості поверхні поперечного перерізу ПЕО-покриттів, зображення яких наведено на рис. 3. Разом із величиною загальної поруватості, оціненої за всією площею, наведено дані, що уможливлюють простежити розподіл пор за розмірами.

Видно, що проаналізовані покриття характеризуються різною поруватістю $P[\%]$. Найвищу поруватість виявлено для ПЕО-покриття, сформованого за низької величини сили струму (2 А/дм^2) без попереднього УЗУО-модифікування поверхні (рис. 4, *а*). Пори в цьому покритті спостерігаються й поблизу зовнішньої поверхні, і на інтерфейсі між покриттям і поверхнею зразка (рис. 3, *а*). Враховуючи, що ПЕО-покриття, одержане за цих параметрів, має відносно невисоку мікротвердість ($HV = 14 \text{ ГПа}$) (рис. 1) і доволі високе зношування ($W = 28,8 \text{ г}$) (рис. 2) у порівнянні з іншими покриттями, то можна пов'язати такі невисокі властивості саме із підвищеною залишковою поруватістю цього покриття.

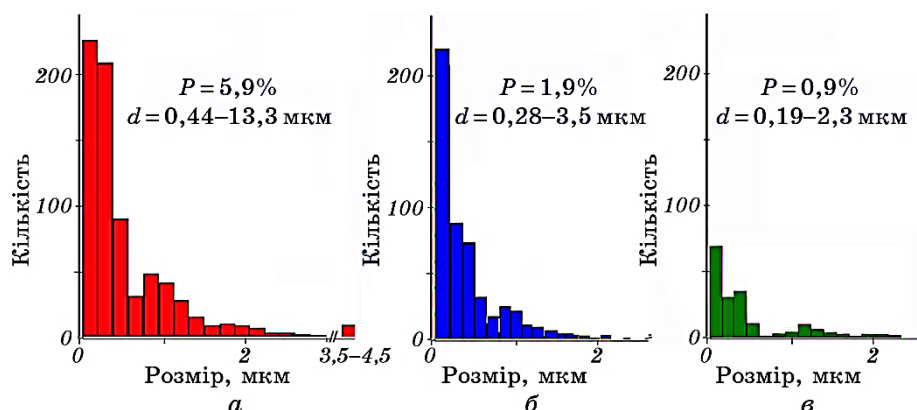


Рис. 4. Гістограми розподілу пор у поперечному перерізі ПЕО-покриттів, одержаних за різної сили струму, застосованого під час ПЕО: 2 А/дм^2 (*а*), 4 А/дм^2 (*б*) та із попереднім УЗУО-модифікуванням поверхні алюмінійової підкладки ($i = 4 \text{ А/дм}^2$) (УЗУО + ПЕО) (*в*); P — загальна частка пор на проаналізованій площі (зображення наведено на рис. 3, *а*, *б*, *в* відповідно).

Fig. 4. Histograms of the pore distribution in the cross-sections of PEO coatings obtained at different current densities applied during PEO: 2 А/дм^2 (*a*), 4 А/дм^2 (*b*), and with preliminary UIT modification of the aluminium substrate surface ($i = 4 \text{ А/дм}^2$) (UIT + PEO) (*c*); P is the total pore fraction in the analysed area (images shown in Fig. 3, *a*, *b*, *c*, respectively).

Втричі меншу ($P = 1,9\%$) поруватість, аніж у попередньому випадку ($P = 5,9\%$), має покриття, одержане за умов оксидування з силою струму у 4 А/дм^2 (рис. 4, б). Разом з тим, дещо зменшується і розмір залишкових пор (див. інтервали їхніх розмірів d , наведені на рис. 4, а, б відповідно). Зазначимо, що зменшення поруватості позначається на властивостях покриття. Мікротвердість HV зростає на 30% ($\cong 21 \text{ ГПа}$) (рис. 1), а зношування зменшується на 35% ($W \cong 19 \text{ г}$) (рис. 2). Очевидний також ефект застосування попереднього деформаційного модифікування поверхні зразка за допомогою УЗУО. ПЕО-покриття, зображення поперечного перерізу якого наведено на рис. 3, в, а дані щодо поруватості — на рис. 4, в, містить найменшу кількість пор ($P = 0,9\%$) найменших із проаналізованих покриттів розмірів ($d = 0,19\text{--}2,3 \text{ мкм}$). Ці величини на $\cong 52\%$ та $\cong 32\%$ менші, ніж для ПЕО-покриття, одержаного за тих же електричних параметрів, але без попереднього УЗУО поверхні. Водночас на $\cong 3\text{--}5\%$ зростає мікротвердість HV і зменшується зношування W (рис. 1 і 2 відповідно).

Показовими є результати аналізу розподілу пор по товщині покриттів, одержаних за різних сил струму без попереднього УЗУО-модифікування поверхні перед ПЕО (криві 1, 2 на рис. 5) і після

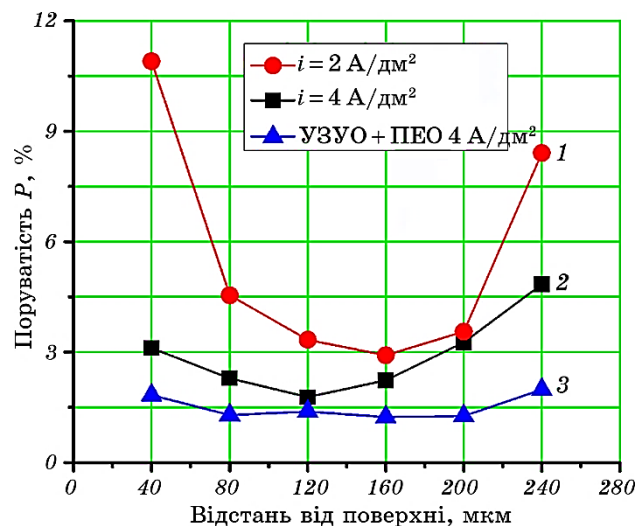


Рис. 5. Розподіл пор за товщиною ПЕО-покриттів, отриманих за різної сили струму, застосованої при ПЕО: 1 — 2 А/дм^2 , 2 — 4 А/дм^2 та 3 — із попередньою УЗУО модифікацією поверхні алюмінійової підкладки ($i = 4 \text{ А/дм}^2$) (УЗУО + ПЕО).

Fig. 5. Pore depth distribution in the cross-sections of PEO coatings obtained at different current densities applied during PEO: 1— 2 А/дм^2 , 2— 4 А/дм^2 , and 3—with preliminary UIT modification of the aluminium substrate surface ($i = 4 \text{ А/дм}^2$) (UIT + PEO).

комбінованого оброблення (УЗУО + ПЕО) (крива 3 на рис. 5). Аналізувалися площі поверхні шістьох частин поперечного перерізу покриття, починаючи від зовнішньої поверхні до інтерфейсу між покриттям і поверхнею зразка алюмінійового стопу Д16Т (світліша область унизу зображень, наведених на рис. 5). Нижня межа кожної наступної проаналізованої площі відповідає значенням, вказаним на осі абсцис рис. 5. Видно, що у всіх досліджених випадках більші скупчення пор спостерігаються біля зовнішньої поверхні покриття та біля межі між покриттям і зразком. Порівняння двох покриттів, одержаних без попереднього УЗУО, свідчить, що саме поверхневі пори можуть відповідати за істотне пониження зносостійкості покриття, одержаного за сили струму $i = 2 \text{ А/дм}^2$. Важливо також відзначити, що застосування комбінованого оброблення (УЗУО + ПЕО) веде до значного пониження кількості пор по всьому перерізу покриття (крива 3 на рис. 5) у порівнянні з покриттям, одержаним за тієї ж сили струму, але без попереднього УЗУО (крива 2 на рис. 5), що також узгоджується і з даними щодо пониження загальної поруватості (рис. 4, б, в). Таким чином, комбіноване оброблення (УЗУО + ПЕО) може бути ефективним методом з огляду на зменшення поруватості та поліпшення мікроструктури й властивостей ПЕО-покриттів за умови попереднього визначення оптимальних електричних параметрів процесу оксидування.

Відомо, що ріст ПЕО-покриття регулюється двома основними механізмами, а саме, механізмом мікророзряду та механізмом росту покриття [37, 38]. В літературі запропоновано щонайменше три механізми мікророзряду, найбільш застосовуваним з яких є механізм локального лавинного пробоя, який припускає, що електронні лавини, які сприяють мікророзрядам, також утворюють канали розряду в оксидному шарі [39].

Також було виявлено, що ріст покриття відбувається в місцях діелектричного пробоя, створюючи шляхи короткого замикання, які сприяють проникненню частинок з електроліту всередину покриттів і формуванню нових оксидів [40]. Стан поверхні підкладинки, а саме, наявність великої кількості меж зерен, тобто областей із менш досконалою кристалічною ґратницею та більшою схильністю атомів матеріалу зразка до плазмохемічних реакцій, цілком може впливати на ефективність процесу росту ПЕО-покриття. Таким чином, ініційоване подрібнення зернистої структури поверхневого шару зразка деформаційним модифікуванням, в тому числі за допомогою УЗУО, може сприяти підвищенню ефективності процесу ПЕО.

4. ВИСНОВКИ

Експериментально встановлено оптимальні величини сили струму

та швидкості подачі електроліту за плазмово-електролітичного оксидування поверхні алюмінійового стопу Д16Т з огляду на досягнуті величини мікротвердості та зносостійкості ПЕО-покриття. Максимальну твердість (22 ГПа) і мінімальне зношування (0,19 г) зареєстровано для ПЕО-покриття, одержаного за поверхневої густини струму у 4 А/дм² та швидкості подачі електроліту у 80 см/с.

Показано, що попереднє деформаційне модифікування поверхні алюмінійового стопу Д16Т за допомогою ультразвукового ударного оброблення перед плазмово-електролітичним оксидуванням веде до зменшення поруватості та поліпшення властивостей ПЕО-покриття. Поруватість ($P = 0,9\%$) і розміри пор ($d = 0,19\text{--}2,3$ мкм) для УЗУО + ПЕО-покриття найменші із проаналізованих покриттів і на $\cong 52\%$ і $\cong 32\%$ менші, ніж для ПЕО-покриття ($P = 1,9\%$, $d = 0,28\text{--}3,5$ мкм), одержаного за тих же електричних параметрів, але без попереднього УЗУО поверхні.

Зростання мікротвердості HV ($\cong 22$ ГПа) та зменшення зношування W ($\cong 0,18$ г) УЗУО + ПЕО-покриття склали $\cong 3\text{--}5\%$, що пов'язане зі зменшенням у 3,5 рази поруватості поверхневого шару покриття товщиною у 40 мкм. Поруватість на інтерфейсі між покриттям і поверхнею зразка Д16Т також зменшується у 4,5 рази.

Доведено, що попереднє деформаційне модифікування поверхневого шару зразка за допомогою УЗУО може бути запропоновано в якості ефективного чинника зменшення поруватості та поліпшення властивостей ПЕО-покриттів на алюмінійовому стопі Д16Т за рахунок подрібнення зернистої структури та підвищення ефективності й рівномірності процесу ПЕО.

Роботу виконано за сприяння Національної академії наук України (№ держ. реєстрації НДР 0123U102368) та Національного фонду досліджень України (проект НФДУ 2023.04/0160 «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки», № держ. реєстрації 0124U003748).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, *Progress Mater. Sci.*, **106**: 100578 (2019).
2. R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S. X. McFadden, N. A. Mara, and A. K. Mukherjee, *Scripta Mater.*, **42**: 163 (2000).
3. Y. K. Gao, *Mater. Sci. Eng. A*, **528**: 3823 (2011).
4. B. N. Mordyuk and G. I. Prokopenko, *Handbook of Mechanical Nanostructuring* (Ed. M. Aliofkhazraei) (Wiley: 2015), p. 417.
5. М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, А. П. Бурмак, *Металофіз. новітні технол.*, **39**, № 4: 49 (2017); М. О. Vasyl'yev, B. M. Mordyuk, S. I. Sydorenko, S. M. Voloshko, and A. P. Burmak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 4: 49 (2017) (in Ukrainian).

- an).
6. M. A. Vasylyev, B. N. Mordyuk, S. I. Sidorenko, S. M. Voloshko, and A. P. Burmak, *Surf. Eng.*, **34**, Iss. 4: 324 (2018).
7. B. N. Mordyuk, V. V. Silberschmidt, G. I. Prokopenko, Y. V. Nesterenko, and M. O. Iefimov, *Mater. Characterization*, **61**: 1126 (2010).
8. R. S. Mishra, Z. Y. Ma, and I. Charit, *Mater. Sci. Eng. A*, **341**: 307 (2003).
9. R. L. Deuis, C. Subramanian, and J. M. Yellup, *Compos. Sci. Technol.*, **57**: 415 (1997).
10. М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, А. П. Бурмак, М. В. Кіндрачук, *Металофіз. новітні технол.*, **38**, № 4: 545 (2016); M. O. Vasylyev, B. M. Mordyuk, S. I. Sydorenko, S. M. Voloshko, A. P. Burmak, and M. V. Kindrachuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 4: 545 (2016) (in Ukrainian).
11. B. N. Mordyuk, M. O. Iefimov, K. E. Grinkevich, M. I. Danylenko, and A. V. Samelyuk, *Surf. Coat. Technol.*, **205**: 5278 (2011).
12. B. N. Mordyuk, M. O. Iefimov, G. I. Prokopenko, T. V. Golub, and M. I. Danylenko, *Surf. Coat. Technol.*, **204**: 1590 (2010).
13. A. Berardi, M. Gamba, L. Paterlini, F. Ceriani, and M. Ormellese, *Coatings*, **15**: 653 (2025).
14. F. Careri, A. Sergi, P. Shashkov, R. H. U. Khan, and M. M. Attallah, *Surf. Coat. Technol.*, **489**: 131122 (2024).
15. Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук, *Металофіз. новітні технол.*, **39**, № 4: 517 (2017); L. Ya. Rop'yak, I. P. Shats'kyu, and M. V. Makoviychuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 4: 517 (2017) (in Ukrainian).
16. M. A. Vasylyev, B. N. Mordyuk, S. I. Sidorenko, S. M. Voloshko, A. P. Burmak, I. O. Kruhllov, and V. I. Zakiev, *Surf. Coat. Technol.*, **361**: 413 (2019).
17. C. Wang, Z. Li, M. O. Iefimov, and B. N. Mordyuk, *Surf. Eng.*, **23**, Iss. 5: 532 (2023).
18. M. O. Iefimov, B. N. Mordyuk, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova, T. Haoliang, C. L. Wang, C. G. Zhu, and L. Zhang, *J. Mater. Eng. Perform.*, **32**: 10371 (2023).
19. L. Y. Ropyak, A. S. Velychkovych, V. S. Vytvytskyi, and M. V. Shovkoplias, *J. Phys.: Conf. Series*, **1741**: 012039 (2021).
20. I. P. Shatskii, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **30**: 828 (1989).
21. I. P. Shats'kyi, M. V. Makoviichuk, and A. B. Shcherbii, *J. Math. Sci.*, **238**: 165 (2019).
22. М. В. Маковійчук, І. П. Шацький, А. Б. Щербій, *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки*, **2021**, № 3: 67 (2021); M. V. Makoviychuk, I. P. Shats'kyu, and A. B. Shcherbiy, *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Phys. Math. Sci.*, **2021**, No. 3: 67 (2021) (in Ukrainian).
23. L. Ropyak, T. Shihab, A. Velychkovych, O. Dubei, T. Tutko, and V. Bilinskyi, *Progress in Physics of Metals*, **24**, No. 2: 319 (2023).
24. М. М. Студент, І. В. Івасенко, В. М. Посувайло, Н. Н. Веселівська, А. Я. Покхмурський, Я. Я. Сірак, and В. М. Юс'ків. *Mater. Sci.*, **54**: 899 (2019).
25. L. Ropyak, T. Shihab, A. Velychkovych, V. Bilinskyi, V. Malinin, and M. Romaniv, *Ceramics*, **6**, Iss. 1: 146 (2023).
26. X. Xu, W. Jia, T. Yin, Q. Dong, Y. Ma, Z. Wang, Z. L. Zhao, and P. X. Lv, *Sci. Rep.*, **15**: 8044 (2025).

27. M. Kaseem, S. Fatimah, N. Nashrah, and Y. G. Ko, *Prog. Mater. Sci.*, **117**: 100735 (2021).
28. S. A. Yavari, B. S. Necula, L. E. Fratila-Apachitei, J. Duszczuk, and I. Apachitei, *Surf. Eng.*, **32**, Iss. 6: 411 (2016).
29. B. N. Mordyuk, S. M. Voloshko, V. I. Zakiev, A. P. Burmak, and V. V. Mohylko, *J. Mater. Eng. Perform.*, **30**: 1780 (2021).
30. B. N. Mordyuk, S. M. Voloshko, V. I. Zakiev, A. P. Burmak, M. A. Skoryk, V. V. Mohylko, N. I. Khripta, V. Y. Malinin, and D. A. Lesyk, *J. Mater. Eng. Perform.*, **34**: 11515 (2025).
31. D. T. Asquith, A. L. Yerokhin, J. R. Yates, and A. Matthews, *Thin Solid Films*, **515**: 1187 (2006).
32. Z. Y. Ye, D. X. Liu, X. H. Zhang, Z. Y. Wu, and F. Long, *Appl. Surf. Sci.*, **486**: 72 (2019).
33. B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko, Y. V. Milman, M. O. Iefimov, and A. V. Sameljuk, *Mater. Sci. Eng. A*, **563**: 138 (2013).
34. https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1438
35. S. P. Chenakin, B. M. Mordyuk, N. I. Khripta, and V. Y. Malinin, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 9: 1109 (2023).
36. Z. H. Melgarejo, O. M. Suárez, and K. Sridharan, *Scripta Mater.*, **55**, Iss. 1: 95 (2006).
37. P. Fernández-López, S. A. Alves, J. T. San-Jose, E. Gutierrez-Berasategui, and R. Bayón, *Coatings*, **14**: 217 (2024).
38. L. Zhu, Z. Guo, Y. Zhang, Z. Li, and M. Sui, *Electrochim. Acta*, **208**: 296 (2016).
39. N. Yaakop, *Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium for Power Electronics Applications* (Manchester: The University of Manchester: 2018).
40. F. Monfort, E. Matykina, A. Berkani, P. Skeldon, G. E. Thompson, H. Habazaki, and K. Shimizu, *Surf. Coat. Technol.*, **201**: 8671 (2007).