

ВЛАСТИВОСТІ ОКСИДОКЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА СПЛАВІ АК9М2, СИНТЕЗОВАНИХ В ЕЛЕКТРОЛІТІ, МОДИФІКОВАНОМУ ПЕРОКСИДОМ ВОДНЮ

В. М. ПОСУВАЙЛО, І. В. КОВАЛЬЧУК, Г. Г. ВЕСЕЛІВСЬКА,
І. Б. ІВАСЕНКО

Досліджено вплив пероксиду водню на фазовий склад, товщину та поруватість оксидокерамічних покриттів, отриманих методом плазмоелектролітного оксидування на алюмінієвому сплаві АК9М2. Встановлено, що з додаванням в електроліт пероксиду товщина покриття порівняно з вихідним електролітом збільшується на 50%. Подальший ріст його концентрації призводить до зменшення поруватості та підвищення корозійної тривкості покриття. Максимальний вміст корунду 12 mass% одержано за концентрації пероксиду водню 5 g/l. Корозійна тривкість покриттів, отриманих в електроліті з 7 g/l H₂O₂, на два порядки вища, ніж вихідного сплаву, та на порядок – ніж сформованих у базовому електроліті. Кремній сприяє утворенню в оксидокерамічних покриттях силіманіту та кварцу.

Ключові слова: *плазмоелектролітне оксидування, оксидокерамічні покриття, рентгеноструктурний аналіз, кристалічна структура, поруватість, силіманіт, корозійна тривкість.*

The influence of hydrogen peroxide on the phase composition, thickness and porosity of oxide ceramic coatings obtained by plasma electrolytic oxidation on AK9M2 aluminum alloy is studied. It is found that the addition of hydrogen peroxide to the electrolyte increases the thickness of the coating compared to the original electrolyte by 50%. Further increase in the concentration of hydrogen peroxide leads to a decrease in its porosity and increase in corrosion resistance. The maximum corundum content of 12 mass% is obtained at a hydrogen peroxide concentration of 5 g/l. Corrosion resistance of coatings obtained in the electrolyte with 7 g/l H₂O₂ is two orders of magnitude higher than of the original alloy and an order of magnitude higher than those obtained in the base electrolyte. Silicon promotes the formation of sillimanite and quartz in oxide ceramic coatings.

Keywords: *plasma electrolytic oxidation, oxide ceramic coatings, X-ray diffraction analysis, crystal structure, porosity, sillimanite, corrosion resistant.*

Вступ. Ливарні сплави на основі алюмінію часто застосовують на машинобудівних, автомобільних, авіаційних, електротехнічних та текстильних підприємствах. Однак через низьку абразивну зносотривкість їх використання у технологічних середовищах, де є абразивні частинки, обмежене. Підвищити їх зносотривкість [1–10] можна гальванічним хромуванням, електролюговим напиленням, твердим анодуванням та плазмоелектролітним оксидуванням (ПЕО) [11–17]. Перші два методи передбачають вживання екологічно небезпечних електролітів, а сформовані покриття мають досить низькі твердість (≤ 500 HV) та зносотривкість. Тому їх поступово замінюють на ПЕО [18–21], суттєвими недоліками якого загалом та для силумінів, зокрема, є мала швидкість синтезу оксидокерамічного шару (~ 1 $\mu\text{m}/\text{min}$), незначна товщина покриття (до 100 μm), низька мікротвердість (700...900 HV) та висока енергозатратність одержаних покриттів. Робоча густина струмів 25...30 A/dm² [22, 23]. Крім того, під час ПЕО утворюються шорсткі

покриття [24, 25], що унеможливило їх використання у вузлах тертя без шліфування, і через що необхідно збільшити товщину покриттів.

Силуміни є основними матеріалами, з яких виготовляють поршні двигунів внутрішнього згоряння. Оксидокерамічні покриття, сформовані на їх поверхні, дають можливість не тільки підвищити температуру в камері згоряння, а й ввести каталізатори горіння палива в покриття [22, 23, 25]. Так вдається суттєво збільшити потужність двигунів та зменшити викиди шкідливих газів. Теплопровідність таких покриттів істотно залежить від їх фазового складу та поруватості [26], які можна змінювати, використовуючи електроліти з підвищеним вмістом окисників [27–31].

Мета цього дослідження – вивчити вплив окисників у плазмових розрядах на фазовий склад, структуру та поруватість оксидокерамічних покриттів, синтезованих на алюмінієвому ливарному сплаві АК9М2.

Матеріали та методи випроб. Покриття синтезували на зразках $20 \times 15 \times 3$ mm сплаву АК9М2 (84,1...95,6 mass% Al; 7,5...10 Si; 0,5...2 Cu; 0,5...0,2 Ti; 0,2...0,8 Mg; 0,1...0,4 mass% Mn). Їх заздалегідь полірували, промивали в дистильованій воді та етиловому спирті. Покриття формували, почергово прикладаючи до зразка анодні та катодні імпульси напруги з допомогою установки ІМПЕЛІОМ. Густина катодного та анодного струмів $15/15$ A/dm², частота імпульсів 50 Hz. Електролітом слугував водний розчин КОН (3 g/l) і Na₂SiO₃ (2 g/l) та цей же електроліт з додаванням 3; 5 та 7 g/l H₂O₂. Для рентгенофазового аналізу покриттів застосували дифрактометр ДРОН-3.0 з CuK_α-випромінюванням. Вміст кожної з фаз визначали за дифрактограмами, використовуючи пакет програм FullProf, багатофільним методом Рітвельда. Товщину покриттів вимірювали приладом Coating Thickness Gauge CV-205FN (з похибкою 0...199 μm: ±2 μm). Поруватість досліджували, аналізуючи мікрофотографії ПЕО покриттів, отриманих на сканівному електронному мікроскопі Zeiss EVO-40XVP зі збільшенням у ×300 разів [32–34]. Електрохімічні дослідження виконували в 3%-му розчині NaCl (6,4 рН) у потенціодинамічному режимі зі швидкістю поляризації 1 mV/s у стандартній триелектродній комірці з хлорсрібним електродом порівняння. Час експозиції у корозивному середовищі 3 h.

Результати та їх обговорення. Покриття одержували на промисловому сплаві АК9М2, який містить 10 mass% Si, за стандартною методикою [18, 20]. Побудували (рис. 1a) залежності анодної U_a та катодної U_c напруг від концентрації пероксиду водню у вихідному електроліті за густин катодного та анодного струмів $j_c/j_a = 15/15$ A/dm². Значення катодної напруги для обох сплавів майже однакові і становлять 50 V для вихідного електроліту та 70 V – з максимальним вмістом у ньому пероксиду. Значення анодної напруги у вихідному електроліті 330...340 V, яка з подальшим зростанням концентрації пероксиду на сплаві АК9М2 зростає незначно (340 V), а на сплаві АК7 – до 400 V за максимальної його концентрації.

Виявили (рис. 1b), що на обох сплавах товщина покриття, сформованого у вихідному електроліті, становить 40...45 μm, а після додавання 3 g/l H₂O₂ збільшується до 52...60 μm. З подальшим ростом вмісту пероксиду на сплаві АК7 вона зростає, але не змінюється на сплаві АК9М2. Фазовий склад покриттів визначали за рентгенівськими дифрактограмами (ДРОН-3.0, CuK_α-випромінювання) (рис. 2 і табл. 1) [35, 36]. Встановили, що покриття, сформовані на сплаві АК9М2, в основному складаються з фази γ-Al₂O₃ та силіманіту Al₂O₃·SiO₂. Вміст високотемпературного оксиду алюмінію зростає від 2 (синтез у вихідному електроліті) до 12...13 mass% (в електролітах з H₂O₂). Кількість кристалічної фази γ-Al₂O₃ суттєво не змінюється, а силіманіту незначно зростає з підвищенням концентрації пероксиду у розчині (табл. 1).

Таблиця 1. Вплив концентрації H_2O_2 на фазовий склад оксидокерамічних покриттів

H_2O_2 , g/l	$\alpha-Al_2O_3$	$\gamma-Al_2O_3$	SiO_2	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Al	Si
	mass%					
–	2,41	35,85	0	8,32	49,44	3,98
3	11,64	44,2	2,9	18,93	20,75	1,59
5	12,84	48,18	7,78	19,7	10,5	1,01
7	9,53	47,64	2,84	21,44	16,81	1,74

Зі збільшенням вмісту кремнію в сплавах вплив окисників на товщину покриття послаблюється [32]. Якщо максимальна товщина покриття на сплаві АК7, синтезованого в електроліті з додаванням 5 г/л H_2O_2 , зростає вдвічі порівняно з вихідним, то на сплаві АК9М2, синтезованого в електроліті з додаванням 3г/л H_2O_2 – лише на 40..50%, та не змінюється з подальшим ростом концентрації пероксиду.

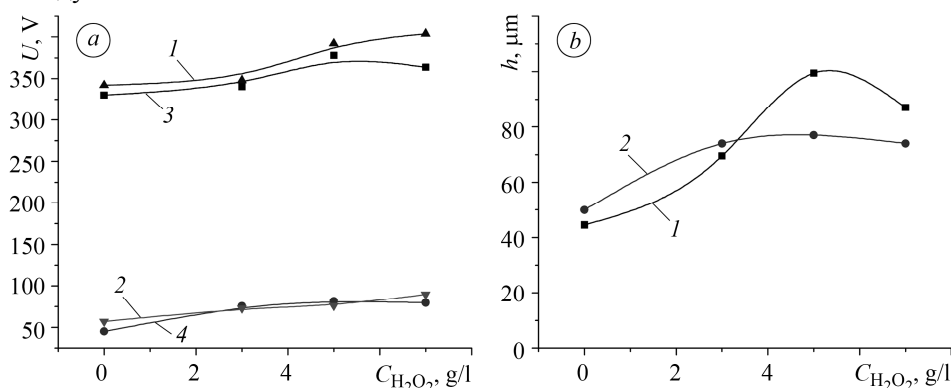


Рис. 1. Залежності анодних U_a (1, 3) та катодних U_c (2, 4) напруг (a), а також товщини оксидокерамічного покриття (b) від концентрації H_2O_2 в електроліті упродовж 1 h синтезу за співвідношень $j_c/j_a = 15/15 A/dm^2$: 1, 2 – сплав АК7; 3, 4 – сплав АК9М2.

Fig. 1. Dependences of anode U_a (1, 3) and cathode U_c (2, 4) voltages (a) and thickness of oxide ceramic coatings (b) on the concentration of H_2O_2 in the electrolyte for 1 h of synthesis at the ratios $j_c/j_a = 15/15 A/dm^2$: 1, 2 – АК7 alloy; 3, 4 – АК9М2 alloy.

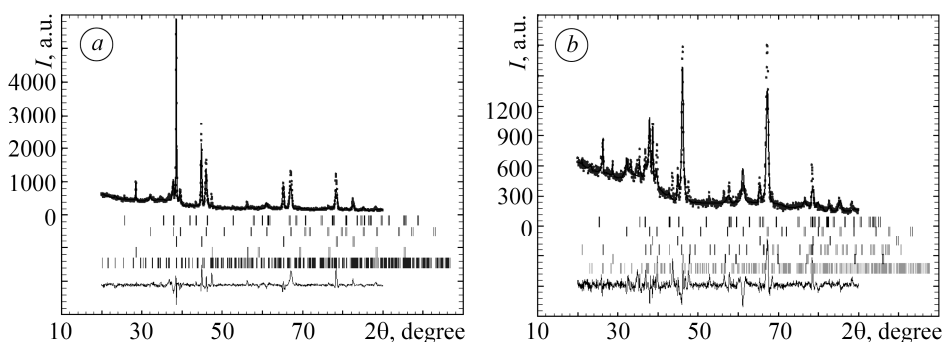


Рис. 2. Рентгенівські дифрактограми оксидокерамічного покриття, отриманого на сплаві АК9М2 в електроліті 3 г/л KOH + 2 г/л Na_2SiO_3 (a) та 3 г/л KOH + 2 г/л Na_2SiO_3 + 3 г/л H_2O_2 (b) за $j_c/j_a = 15/15 A/dm^2$ і тривалості синтезу 1 h.

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of oxide ceramic coating obtained on the АК9М2 alloy in the electrolyte 3 g/l KOH + 2 g/l Na_2SiO_3 (a) and 3 g/l KOH + 2 g/l Na_2SiO_3 + 3 g/l H_2O_2 (b) at $j_c/j_a = 15/15 A/dm^2$ and duration 1 h of synthesis.

Поруватість покриттів оцінювали, використовуючи вісім мікрофотографій поверхні, для кожного з режимів оксидування (рис. 3а).

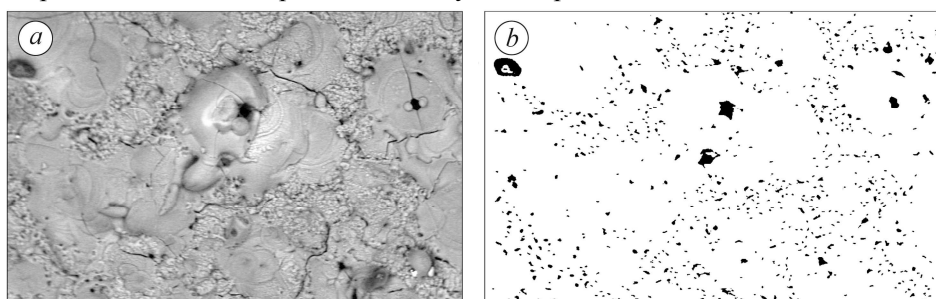


Рис. 3. Вихідне (а) та сегментоване (b) зображення оксидокерамічного покриття, синтезованого на сплаві АК9М2.

Fig. 3. Initial (a) and segmented (b) image of the oxide ceramic coating synthesized on the АК9М2 alloy.

Методом сегментації проаналізували зображення поверхні покриттів на сплаві АК9М2 та розраховували загальну кількість дефектів N , загальну їх площу S_{def} , густину об'єктів на одиницю площі поверхні N/S_{surf} , відношення площі дефектів до площі поверхні S_{def}/S_{surf} ; площі дефектів S_{min} , S_{avg} та S_{max} (див. табл. 2).

Таблиця 2. Параметри дефектів оксидокерамічних покриттів на сплаві АК9М2

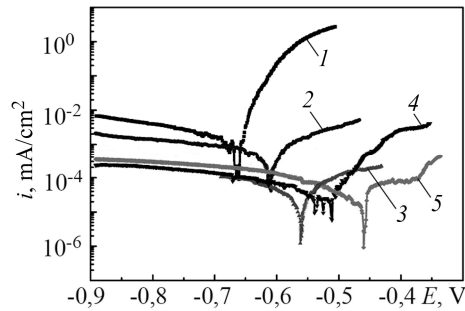
Склад електроліту	КОН (3 g/l) + +Na ₂ SiO ₃ (2 g/l)	КОН (3 g/l) + +Na ₂ SiO ₃ (2 g/l)+ +H ₂ O ₂ (3 g/l)	КОН (3 g/l) + +Na ₂ SiO ₃ (2 g/l)+ +H ₂ O ₂ (5 g/l)	КОН (3 g/l) + +Na ₂ SiO ₃ (2 g/l)+ +H ₂ O ₂ (7 g/l)
N	5814	6567	5956	5905
S_{def} , m ²	2,534047e-08	2,605665e-08	2,330741e-08	2,182236e-08
S_{surf} , m ²	7,573948e-07	7,573948e-07	7,573948e-07	7,573948e-07
N/S_{surf} , 1/m ²	7,676314e+09	8,670511e+09	7,863799e+09	7,796462e+09
S_{def}/S_{surf}	0,03345741	0,03440300	0,03077313	0,02881240
S_{min} , m ²	1,371742e-13	1,371742e-13	1,371742e-13	1,371742e-13
S_{max} , m ²	2,222222e-10	1,434842e-10	1,725652e-10	1,639232e-10
S_{avg} , m ²	4,35777582e-12	3,96721269e-12	3,91260826e-12	3,69494741e-12

Виявили, що з додаванням до електроліту H₂O₂ загальна кількість пор зростає, причому максимально – у покриттях, сформованих в електроліті з 3 g/l H₂O₂. Загалом поруватість покриттів зменшується з підвищенням вмісту H₂O₂. Подібний ефект зафіксували, досліджуючи сплав АК7 [31]. Для обох сплавів (АК7 та АК9М2) зі зростанням концентрації H₂O₂ збільшується кількість розрядів та змінюються їх параметри. Найменш поруваті (~2,88%) покриття, отримані в електроліті з 7 g/l H₂O₂, а найбільш (~3,34%) – сформовані в електроліті з 3 g/l H₂O₂. Хоча у базовому електроліті загальна кількість пор найменша, але їх розмір суттєво більший (табл. 2). Поруватість цих покриттів добре корелює з їх корозійною тривкістю (рис. 4).

Форма кривих вказує на ідентичність процесів, що відбуваються на електроді у катодній області потенціалів за цих умов, як для вихідного сплаву, так і для всіх сплавів з покриттями. Зсув потенціалів корозії окисдованих зразків у бік позитивніших значень проти вихідних з підвищенням вмісту H₂O₂ в електроліті свідчить про зменшення кількості наскрізних пор у покриттях.

Рис. 4. Поляризаційні криві сплаву АК9М2 (1) та з ПЕО покриттями, синтезованими в електролітах (g/l): 2 – 3 КОН + 2 Na₂SiO₃; 3–5 – у цьому ж електроліті з 3; 5 та 7 H₂O₂ після 3 h експозиції в 3%-му розчині NaCl.

Fig. 4. Polarization curves of AK9M2 alloy (1) and with plasma electrolytic coatings, synthesized in electrolytes (g/l): 2 – 3 KOH + 2 Na₂SiO₃; 3–5 – in the same electrolyte with 3; 5 and 7 H₂O₂ after 3 h exposure in 3% NaCl solution.



Зміщення потенціалу корозії в анодну область супроводжується досить повільним зростанням швидкості розчинення покриттів, отриманих у базовому електроліті та модифікованих 5 g/l H₂O₂. Покриття, сформовані в електролітах з 3 та 7 g/l H₂O₂, мають чітку ділянку пасивації в анодній області (рис. 4), а одержані в електроліті з максимальним вмістом H₂O₂ – мінімальні значення струмів корозії, які на два порядки менші, ніж для вихідного сплаву, та на порядок, ніж для покриттів, сформованих у базовому електроліті.

Таблиця 3. Корозійна тривкість вихідного сплаву АК9М2 з ПЕО покриттями після 3 h експозиції в 3%-му NaCl

Зразки	$E_{\text{соп}}$, V	$i_{\text{соп}}$, mA/cm ²
АК9М2	-0,726	$2,11 \cdot 10^{-3}$
КОН (3 g/l) + Na ₂ SiO ₃ (2 g/l)	-0,615	$7,77 \cdot 10^{-4}$
- // - + 3 g/l H ₂ O ₂	-0,617	$5,73 \cdot 10^{-5}$
- // - + 5 g/l H ₂ O ₂	-0,509	$4 \cdot 10^{-5}$
- // - + 7 g/l H ₂ O ₂	-0,497	$3,7 \cdot 10^{-5}$

ВИСНОВКИ

Встановлено вплив H₂O₂ на фазовий склад, товщину та поруватість оксидо-керамічних покриттів, отриманих методом ПЕО на алюмінієвому сплаві АК9М2. Встановлено, що за модифікації електроліту пероксидом водню (3 g/l) їх товщина зростає на 50%. Подальший ріст концентрації пероксиду призводить лише до зменшення поруватості та підвищення корозійної тривкості покриттів. Максимальний вміст корунду (12 mass%) мають покриття, одержані в електроліті з 5 g/l H₂O₂, а їх корозійна тривкість на два порядки вища, ніж вихідного сплаву. Зі збільшенням вмісту кремнію в оксидокерамічних покриттях зростає кількість силіманіту.

1. *Contradictory effect of chromate inhibitor on corrosive wear of aluminium alloy* / V. I. Pokhmurskii, I. M. Zin, V. A. Vynar, and L. M. Bilyy // *Corr. Sci.* – 2011. – **53**, № 3. – P. 904–908.
2. *Corrosive wear of aluminium alloy in presence of phosphate* / V. I. Pokhmurskii, I. M. Zin, V. A. Vynar, O. P. Khlopyk, and L. M. Bilyy // *Corr. Eng. Sci. and Techn.* – 2012. – **47**, № 3. – P. 182–187.
3. *Volchok I. P., Girzhon V. V., and Tantsiura I. V. Increasing of microhardness of Al–Si alloys by laser treatment* // *Metallofizika.* – 2011. – **33**, № 8. – P. 1111–1118.
4. *Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method* / V. Hutsaylyuk, M. Student, K. Zadorozhna, P. Maruschak, and H. Pokhmurska // *J. of Mat. Res. and Techn.* – 2020. – **9**, № 6. – P. 16367–16377.

5. *Structure and properties of silumin after electron-ion-plasma multy-cycle modification / Yu. F. Ivanov, I. V. Lopatin, O. C. Tolkachev, and M. E. Rygina // 13th Int. Conf. "Interaction of Radiation with Solids". – 2019, September 30–October 3. – Minsk, Belarus.*
6. *Protective action of inorganic inhibitors on mechanically activated aluminum surfaces / I. M. Zin, O. P. Khlopyk, M. Ya. Holovchuk. // Materials Science. – 2013 – 49, № 3. – P. 298–303.*
7. *Formation of oxynitride layers on titanium alloys by gas diffusion treatment / I. Pohrelyuk, O. Yaskiv, O. Tkachuk, D. B. Lee // Metals and Mat. Int. – 2009.– 15, № 6. – P. 949–953.*
8. *Effect of nitriding conditions of Ti6Al7Nb on microstructure of TiN surface layer / K. Szymkiewicz, J. Morgel, L. Maj, M. Pomorska, M. Tarnowski, O. Tkachuk, I. Pohrelyuk, T. Wierzchon // J. of Alloys and Comp. – 2020. – 845, № 10. – P. 156320.*
9. *Pohrelyuk I. M., Tkachuk O. V., and Proskurnyak R. V. Corrosion resistance of the Ti–6Al–4V titanium alloy with nitride coatings in 0.9% NaCl // J. of Met. – 2011. – 63, № 6. – P. 35–40.*
10. *Effect of temperature on gas oxynitriding of Ti–6Al–4V alloys / I. Pohrelyuk, J. Morgel, O. Tkachuk, K. Szymkiewicz // Surf. and Coat. Techn. – 2019. – 360, № 25. – P. 103–109.*
11. *Ropyak L. and Ostarovych V. Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts // Eastern-European J. of Enterprise Techn. – 2016. – 2, № 5. – P. 50–62.*
12. *Яворський В. Т., Кунтий О. І., Хома М. С. Електрохімічне нанесення металевих, конверсійних та композиційних покриттів. – Львів: Вид-во "Львівська Політехніка", 2000. – 216 с.*
13. *Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2-х т. / И. В. Суминов, П. М. Белкин, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, Б. Л. Крит, А. М. Борисов. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 2. – 512 с.*
14. *Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminium coatings / V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, and A. Wank // J. of Thermal Spray Techn. – 2007. – 16, № 5, 6. – P. 998–1004.*
15. *Corrosion resistance of plasma-electrolytic layers on alloys coatings of Al–Cu–Mg system for various modes of heat treatment / M. M. Student, V. M. Posuvailo, H. H. Veseliv'ska, Y. Y. Sirak, and R. A. Yatsyuk // Materials Science. – 2018. – 53, № 6. – P. 789–795.*
16. *Student M. M., Pokhmurska H. V., and Zadorozhna K. R. Structure and wear resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo coating obtained by supersonic flame spraying // Materials Science. – 2018. – 54, № 1. – P. 22–29.*
17. *Influence of the composition of electrolyte for hard anodizing of aluminium on the characteristics of oxide layer / M. M. Student, I. M. Pohrelyuk, V. M. Hvozdetskyi, H. H. Veseliv'ska, K. R. Zadorozhna, R. S. Mardarevych, and Y. V. Dzioba // Materials Science. – 2021. – 57, № 2. – P. 240–247.*
18. *Gutsalenko Y. G., Sevidova E. K., and Stepanova I. I. Evaluation of technological capability to form dielectric coatings on AK6 alloy, using method of microarc oxidation // Surf. Eng. and Appl. Electrochem. – 2019. – 55, № 5. – P. 602–606.*
19. *Klapkiv M. D. Simulation of synthesis of oxide-ceramic coatings in discharge channels of a metal-electrolyte system // Materials Science. – 1999. – 35, № 2. – P. 279–283.*
20. *Simultaneous reduction of wear and corrosion of titanium, magnesium and zirconium alloys by surface plasma electrolytic oxidation treatment / H. M. Nykyforchyn, V. S. Agarwala, M. D. Klapkiv, and V. M. Posuvailo // Adv. Mat. Res. – 2008. – 38. – P. 27–35.*
21. *Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium / J. Martin, P. Leone, A. Nominé, D. Veys-Renaux, G. Henrion, and T. Belmonte // Surf. and Coat. Techn. – 2015. – 269. – P. 36–46.*
22. *Corrosion and physicomechanical properties of the coatings on AK12M2MgN alloy formed by plasma-electrolytic oxidation / H. V. Karakurkchi, M. D. Sakhnenko, M. V. Ved, S. I. Zyubanova, and I. I. Stepanova // Materials Science. – 2020. – 55, № 5. – P. 693–7021.*
23. *Effects of different nanoparticles additions on composition and properties of oxide layers formed by plasma electrolytic oxidation on cast Al–Si alloy / A. V. Polunin, E. D. Borgardt, M. R. Shafeev, A. V. Katsman, and M. M. Krishtal // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2020. – P. 1713.*
24. *Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers syntheses on D16T alloys / M. M. Student, V. M. Dovhunya, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, V. M. Hvozdets'kyi // Materials Science. – 2017. – 53, № 3. – P. 359–367.*

25. *Wear resistance of the oxide layers formed on AK9pch silumin by microarc oxidation in an electrolyte modified by silicon dioxide nanoparticles / A. V. Polunin, P. V. Ivashin, I. A. Rastegaev, E. D. Borgardt M. M. Krishtal // Russian Metallurgy (Metally).* – 2016. – № 4. – P. 385–388.
26. *Influence of applied frequency on thermal physical properties of coatings prepared on Al and AlSi Alloys by plasma electrolytic oxidation / Li Guodong, Ma Fei, Li Zhijie, Xu Yi, Gao Fangyuan, Guo Lingyan, Zhu Jianwei, Li Guang, Xia Yuan // Coatings.* – 2021. – **11**. – P. 1439.
27. *Thermodynamics of the interaction of aluminum, magnesium and zirconium with components of an electrolytic plasma / M. D. Klapkiv, O. S. Chuchmarev, P. Ya. Sydor, V. M. Posuvailo // Materials Science.* – 2000. – **36**, № 1. – P. 66–79.
28. *Кузнецов Ю. А., Кулаков К. В., Гончаренко В. В. Технологические особенности выбора электролита для получения толстослойных керамических покрытий // Новые материалы и технологии в машиностроении.* – 2011. – № 14. – С. 52–55.
29. *The effect of electrolyte composition on the plasma electrolyte oxidation and phase composition of oxide ceramic coatings formed on 2024 aluminium alloy / V. M. Posuvailo, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina, I. V. Koval'chuck, M. M. Student, and B. D. Vasylyv // Archives of Mat. Scie. and Eng.* – 2020. – **105**, № 2. – P. 49–55.
30. *Influence of the conditions of plasma-electrolytic treatment of D16T aluminium alloy on its corrosion resistance in 3% NaCl solution / M. M. Student, H. H. Veselivska, O. S. Kalakhan, K. R. Zadorozhna, and Y. Y. Sirak // Materials Science.* – 2021. – **56**, № 4. – P. 550–559.
31. *Посувайло В. М., Ковальчук І. В., Івасенко І. Б. Вплив пероксиду водню на склад та поруватість оксидокерамічних покриттів на сплавах систем Al–Cu–Si та Al–Cu–Mg // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2021. – **57**, № 6. – P. 127–132.
32. *Xiao-Cong L. A. Hybrid SVM-QPSO model based ceramic tube surface defect detection algorithm // 5th Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Eng. Appl.* – Hunan. – 2014. – P. 28–31.
33. *Express method for determining the presence of defects of the surface of oxide-ceramic coatings / I. Ivasenko, V. Posuvailo, M. Klapkiv, V. Vynar, and S. Ostap'yuk // Materials Science.* – 2009. – **45**, № 3. – P. 460–464.
34. *Ivasenko I. and Chervatyuk V. Detection of rust defects of protective coatings based on HSV color model // IEEE 2nd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON).* – 2019. – P. 1143–1146.
35. *Rodríguez-Carvajal J. Program FullProf.2k. Version 2.20.* – France: Laboratoire Léon Brillouin (CEA–CNRS), 2002n HSV color model // IEEE 2nd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Eng. (UKRCON). – 2019. – P. 1143–1146.
36. *Rodríguez-Carvajal J. Program FullProf.2k. Version 2.20.* – France: Laboratoire Léon Brillouin (CEA–CNRS), 2002.

Одержано 02.09.2021