

**О. В. СУББОТИН, В. В. БІЛОЗЕРОВ, В. В. СУББОТИНА, О. О. ВОЛКОВ, С. А. КНЯЗЬЕВ,
В. А. РЯБОШТАН, В. М. БАРАННИКОВ, В. І. БОБРОВ, К. І. КАЛІНІЧЕНКО, С. О. ФЕСЮКОВ.**

ДОСЛІДЖУВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ФАЗОВОГО СКЛАДУ І ТВЕРДОСТІ ВІД ТОВЩИНИ МДО-ПОКРИТТІВ

Досліджено залежності фазового складу і твердості від товщини МДО-покривів на алюмінієвому сплаві АК6, які сформовані методом мікродугового оксидування (МДО) в лужно-силікатному електроліті при катодно-анодному режимі. Досліджена структура та морфологія МДО-покривів. Встановлено, що покриття на сплаві АК6, сформоване в лужно-силікатному електроліті, має двошарову будову - технологічний шар і основний. Саме основний шар покриття має практичне призначення - він обумовлює поверхнєве зміцнення алюмінієвих виробів методом МДО. Аналіз товщини покриття показав, що покриття зростає як всередину зразка (товщина основного шару) та і ззовні зі збільшенням розміру зразка (технологічна товщина покриття). Загальна товщина покриття складається з його внутрішньої та зовнішньої товщини. Ці товщини змінюються практично синхронно. Встановлено, що технологічний шар (верхній пухкий шар) покриття є припуском для подальшої розмірної обробки виробів. Оброблення отриманих результатів показало, що частка основного шару становить 50 - 60% від загальної товщини покриття, а технологічного - 50 - 40 %. Вивчено фазовий склад МДО-покривів і показано, що покриття має кристалічну будову та складається з високотемпературних модифікацій окислів алюмінію (α - Al_2O_3 і γ - Al_2O_3) та муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). В роботі показано можливість обробкою МДО алюмінієвого сплаву АК6 забезпечити фазовий склад зміцненого шару і, як наслідок, високі експлуатаційні характеристики (твердість) за рахунок високого вмісту в зміцненому шарі модифікації α - Al_2O_3 - корунду. Встановлено, що за рахунок формування різної товщини покриття можуть бути створені умови формування структурно-фазового стану покриттів, що забезпечують надійність і довговічність сполучених з'єднань.

Ключові слова: алюмінієвий сплав; мікродугове оброблення; вимірювання твердості; товщиномір ВТ – 10НЦ; рентгеноструктурний аналіз; фазовий склад.

**O. SUBBOTIN, V. BILOZEROV, V. SUBBOTINA, O. VOLKOV, S. KNYAZEY, V. RYABOSHTAN,
V. BARANNIKOV, V. BOBROV, I. KALINICHENKO, S. FESYUKOV.**

STUDY OF THE DEPENDENCE OF PHASE COMPOSITION AND HARDNESS ON THE THICKNESS OF MAO COATINGS

Aluminum alloys are widely used in a variety of industries due to their lightweight yet strong properties. However, their relatively low wear resistance, hardness, and corrosion resistance limit their long-term operation. The most promising way to improve the performance properties of tribotechnical materials is to create surface layers on parts that have high wear resistance and antifriction. The micro-arc oxidation (MAO) method produces hardened layers on the surface of aluminum alloys. One of the key factors affecting the properties of such coatings is their thickness. Changes in thickness can lead to changes in the phase composition of the coating, which in turn affects its hardness and overall performance. The study of the relationship between the phase composition, hardness, and thickness of MAO coatings is important for understanding the processes that occur in coatings during their production and for optimizing the technological processes of creating protective layers on aluminum alloys. The dependence of the phase composition and hardness on the thickness of MAO coatings on aluminum alloy AK6, formed by the method of microarc oxidation (MAO) in alkaline-silicate electrolyte in the cathodic-anodic mode, was investigated. The structure and morphology of the MAO coatings were investigated. It has been established that the coating on AK6 alloy formed in alkaline-silicate electrolyte has a two-layer structure: a technological layer and a base layer. It is the main layer of the coating that has a practical purpose - it causes surface hardening of aluminum products by the MAO method. The analysis of the coating thickness showed that the coating grows both inside the sample (base layer thickness) and outward with increasing sample size (technological coating thickness). The total thickness of the coating consists of its inner and outer thicknesses. These thicknesses change almost synchronously. It was found that the technological layer (upper loose layer) of the coating is an allowance for further dimensional processing of products. Processing of the obtained results showed that the share of the base layer is 50-60% of the total coating thickness, and the technological layer is 50-40%. The phase composition of MAO coatings was studied and it was shown that the coating has a crystalline structure and consists of high-temperature modifications of aluminum oxides (α - Al_2O_3 and γ - Al_2O_3) and mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). The paper shows the possibility of MAO treatment of aluminum alloy AK6 to provide the phase composition of the hardened layer and, as a result, high performance characteristics (hardness) due to the high content of α - Al_2O_3 modification - corundum in the hardened layer. It has been established that by forming different coating thicknesses, conditions can be created for the formation of the structural-phase state of coatings that ensure the reliability and durability of the mated joints.

Keywords: aluminum alloy; microarc machining; hardness measurement; thickness gauge VT-10NC; X-ray diffraction analysis; phase composition

Вступ. Актуальність задачі. Світовим досвідом доведено, що застосування алюмінієвих сплавів є виключно ефективним у багатьох сферах. Вони стали широко використовуватися не лише у конструкціях літальних апаратів і у судобудівництві, а й у будівництві, залізничному і автомобільному транспорті, машинобудуванні, хімічній та нафтогазовій промисловості [1,2]. Однією з переваг алюмінієвих сплавів є мала питома вага при достатньо високих механічних властивостях, але по характеристикам міцності вони значно поступаються сплавам на залізній основі. Найбільша кількість алюмінію використовується для виробництва сплавів на алюмінієвій основі, які завдяки їх малій густині, дозволяють значно зменшити вагу

конструкцій, машин, апаратів, підвищити довговічність, вантажопідймальність, зменшити на 10 – 15 % експлуатаційні витрати [1,2].

Алюміній і його сплави завоювали значне місце в сучасній техніці в якості одного із найважливіших матеріалів. Його широко використовують для виготовлення ненавантажених деталей і елементів конструкцій, коли головну роль відіграють мала густина, висока пластичність, корозійна стійкість, добра зварювальність.

© О.В. Субботін, В.В. Білозеров, В.В. Субботіна,
О.О. Волков, С.А. Князєв, В.А. Рябоштан,
В.М. Баранніков, В.І. Бобров, К.І. Калініченко,
С.О. Фесюков, 2025

Висока електропровідність алюмінію в поєднанні з малою густиною, дозволили широко використовувати його в електротехніці в якості провідникового матеріалу. Корозійна стійкість дозволяє широко використовувати алюміній в хімічному машинобудуванні, будівництві. Розширення застосування алюмінію і його сплавів – це довготривала тенденція, яка буде визначати не тільки теперішню, але й подальшу перспективу розвитку машинобудування [1,2].

Значно розширити область застосування алюмінію та його сплавів можливо шляхом нанесення різних покриттів. Тому серед найбільших науково-технічних проблем сьогодення значне місце займає нанесення захисних покриттів. Покриття грають роль дифузійного бар'єра, який гальмує доступ агресивних середовищ, забезпечують високу надійність і протикорозійний захист. Окрім цього покриття дозволяють надати металевим виробам зносостійкість, теплостійкість і інші цінні якості, відкриваючи можливість відновлення зношених деталей, а також допомагає рішенням чисто декоративних задач [3].

Відомо багато способів нанесення покриттів – газовий, плазмовий, електрохімічний до якого належить один з найбільш відносно нових способів – мікродугове оксидування (МДО), відомий також як анодно-іскровий електроліз або мікроплазмове оксидування [4–7].

По своїй зносостійкості оксидні покриття, одержані методом МДО, в 10 – 15 раз перевищують анодні. Вони міцні, теплостійкі, володіють діелектричною міцністю [8–13].

Застосування алюмінієвих сплавів з керамічним оксидним покриттям, сформованим методом мікродугового оксидування, які поєднують певну конструкційну міцність основи з високою зносостійкістю і корозійною стійкістю поверхневого шару дозволяє значно знизити вагу конструкцій і зменшити експлуатаційні витрати [14, 15].

Одним із ключових факторів, що впливає на властивості таких покриттів, є їхня товщина. Зміна товщини може призводити до змін фазового складу покриття, що, у свою чергу, впливає на його твердість і загальні експлуатаційні характеристики. Дослідження взаємозв'язку між фазовим складом, твердістю та товщиною МДО-покриттів є важливим для розуміння процесів, що відбуваються в покриттях під час їх отримання, та для оптимізації технологічних процесів створення захисних шарів на алюмінієвих сплавах [16–20].

Дослідження в цій сфері дозволяє удосконалювати технології нанесення покриттів, підбираючи оптимальні умови електролізу для досягнення найкращих механічних і фізико-хімічних властивостей, що є ключовим для забезпечення надійності та довговічності матеріалів в екстремальних умовах експлуатації.

Метою даної роботи є дослідження залежності між товщиною основного слою покриття (час протікання процесу) та вмістом $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (фазовим складом), а також оцінка твердості покриття в залежності від фазового складу.

Для досягнення цієї мети передбачається вирішення кількох ключових завдань, а саме вивчення впливу різних умов процесу, таких як: склад електроліту, густина струму тривалість обробки.

Експериментальна частина. Дана робота ініційована необхідністю зміцнення поверхонь тертя шатунів плунжерного компресору (рис. 1).



Рисунок 1 – Шатун плунжерного компресору

Дослідження проводилось на зразках деформованого алюмінієвого сплаву АК6 у вигляді циліндрів ($\varnothing$ 24 мм, h = 15 мм).

Зразки з алюмінієвого сплаву піддавалися МДО-обробці в анодно-катодному режимі в лужному електроліті, що містить рідке скло.

Дослідження фазового складу зміцненого шару проводилося на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4 в монохроматичному випромінюванні мідного аноду ($\lambda_{\text{K}\alpha} = 1,54 \text{ \AA}$) в інтервалі кутів $2\Theta = 30^\circ\text{--}70^\circ$. При розшифровці дифрактограми використовували картотеку ASTM (American Society for Testing Materials).

Кількісний фазовий аналіз проводили дифрактометричним методом, використовували еталони з відомим фазовим кількісним складом. Як аналітичні лінії (лінії порівняння) взято лінію муліту ($2\Theta = 16,4^\circ$), лінію $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($2\Theta = 43,4^\circ$) і лінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($2\Theta = 45,9^\circ$) [21].

Для вимірювання товщини оксидних плівок використовувався неруйнівний метод контролю – електромагнітний. Товщину МДО-покриттів вимірювали методом віхревих токів застосовуючи віхровий товщиномір ВТ-10НЦ, який дозволяє вимірювати товщину діелектричних покриттів на металевих неферромагнітних зразках. Діапазон вимірювання товщини 0–2 мм. Прилад має цифрову індифікацію.

Мікротвердість покриттів вимірювали на приборі ПМТ-3 при навантаженні $P = 200 \text{ г}$ (а також при $P = 100 \text{ г}$). Твердість покриття визначалась після видалення технологічного шару, тобто твердість основного шару покриття [22].

Результати та їх обговорення. Серія зразків піддавалася мікродуговій обробці в лужно-силікатному електроліті (1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3), при цьому варіювалися час оксидування та густина струму.

Характеристика зразків (густина, тривалість обробки та товщина МДО-покриттів) наведена в

табл.1.

Таблиця 1 – Характеристика зразків

№ зразка	τ , год	j , А/дм ²	$h_{\text{заг}}$, мкм	$h_{\text{осн}}$, мкм
1-1	1	23	65	40
1-2	2	23	120	70
1-3	3	23	170	100
1-4	5	23	250	160
2-1	0,5	20	53	28
2-2	1	20	88	53
2-3	2	20	161	94
2-4	3	20	183	118
3-1	1	16	68	50
3-2	2	16	138	95
3-3	3	16	174	120
3-4	5	16	206	120
4-1	1	12	40	30
4-2	2	12	84	54
4-3	3	12	120	70
4-4	5	12	152	102

Примітка: τ – час оброблення;

j – густина струму;

$h_{\text{заг}}$ – загальна товщина покриття

$h_{\text{осн}}$ – товщина основного шару покриття

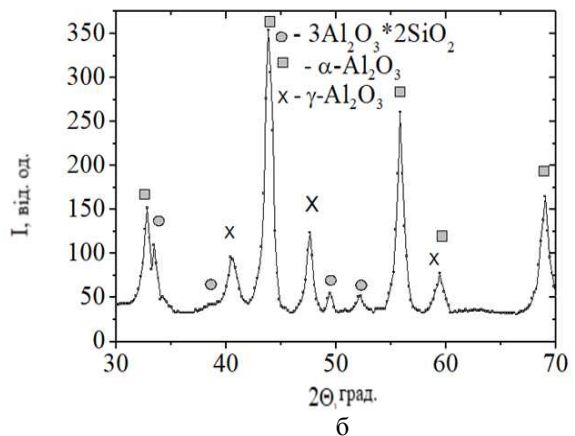
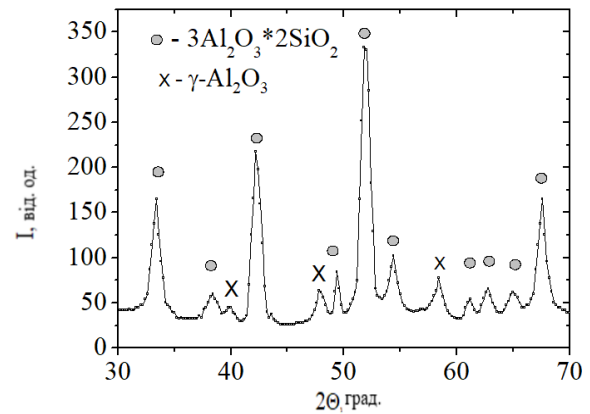
Фазовий склад МДО-покриттів вивчався рентгеноструктурним методом. Типові дифрактограми МДО-покриттів на сплаві АК6 наведено на рис. 2. Із аналізу представлених дифрактограм видно, що покриття має кристалічну будову. Проведений якісний аналіз показує, що в складі покриття присутні різні кристалічні оксиди алюмінію такі як корунд – α - Al_2O_3 ; γ - Al_2O_3 і муліт – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Аналіз товщини покриття показав, що покриття зростає як всередину зразка (товщина основного шару) та і назовні, що призводить до збільшення розміру зразка. Загальна товщина покриття складається з його внутрішньої та зовнішньої товщини. Ці товщини змінюються практично синхронно. Зміна товщини покриття залежно від часу оксидування або кількості електрики, що пройшла, виявляє лінійну залежність (рис. 3). Закономірності, представлені на рис.3, якісно однакові для всіх досліджуваних зразків, сформованих за різних густин струму.

Якщо кінетику зростання покриття показати залежно від кількості електрики, що пройшла (рис. 4), то спостерігається суттєва відмінність. Так, $h_{\text{осн}}$ шару лінійно залежить від енерговитрат, що вказує на електрохімічний процес окислення; під час формування $h_{\text{заг}}$ – на електрохімічний процес окислення накладається електрофоретичний механізм: участь кремнезему. Експериментально це проявляється в «переломі» залежності $h_{\text{заг}} = f(Q)$ (рис.4, крива 1).

Установлено, що технологічний шар (верхній пухкий шар) покриття є припуском для подальшої розмірної обробки виробів (рис. 5). Оброблення отриманих результатів показало, що частка основного шару становить 50–60% від загальної

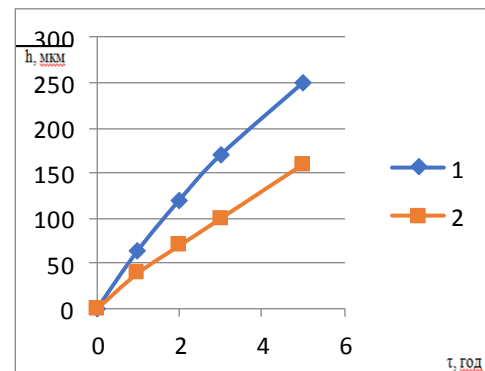
товщини покриття, а технологічного – 40–50 %.



а– без зняття технологічного шару;

б– після зняття технологічного шару

Рисунок 2 – Фрагменти дифрактограми МДО-покриття (Ca – Cu – випромінювання)



1 – загальна товщина;

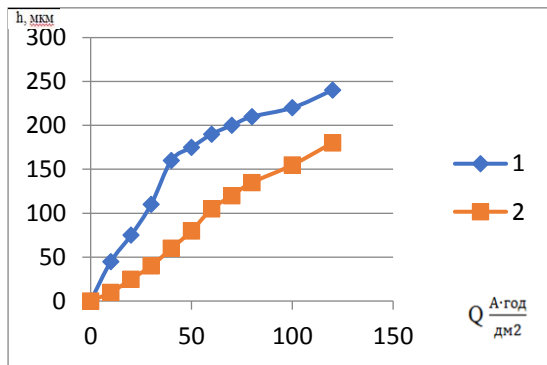
2 – товщина основного шару

Рисунок 3 – Кінетика формування товщини покриття при $j = 23$ А/дм²

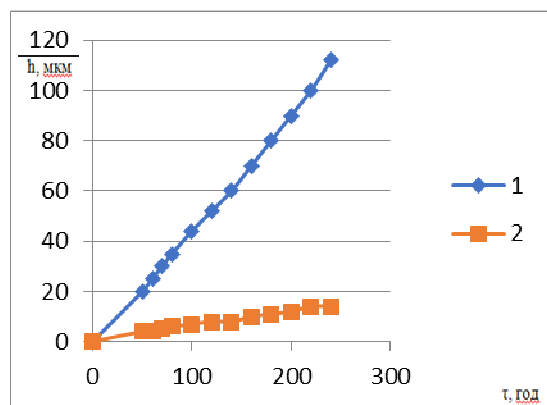
Таким чином, встановлено, що покриття на сплаві АК6, сформоване в лужно-силікатному електроліті, має двошарову будову - технологічний шар і основний (рис. 6). Саме основний шар покриття має практичне призначення – він обумовлює поверхневе зміцнення алюмінієвих виробів методом МДО.

За тривалості обробки 5 годин забезпечується

формування товщини основного шару ~ 150 мкм, за загальної товщини ~ 250 мкм (рис. 3).



1 – загальна товщина;
2 – товщина основного шару
Рисунок 4 – Вплив кількості енергії, що пройшла на товщину покриття



1 – після МДО-обробки;
2 – після зняття технологічного шару
Рисунок 5 – Зміна розміру зразка



Рисунок 6 – Поперечний зріз зразка з оксидним покриттям на сплаві АК6 (x200)

Основною структурною особливістю покриттів є їх фазовий склад, який вносить головний вклад в ефект зміцнення.

Раніше вже вказувалося на роль фази α - Al_2O_3 - саме ця фаза обумовлює високі експлуатаційні характеристики зміцненого шару.

Результати дифрактометричних досліджень дають змогу відзначити такі основні закономірності:

- зміцнений шар має кристалічну будову - характерна наявність чітких дифракційних піків (рис. 2);

- має певний фазовий склад, який являє собою поєднання модифікацій Al_2O_3 - це α - Al_2O_3 + γ - Al_2O_3 , а також муліт - $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Зазначимо, що значна кількість муліту виявляється в технологічному шарі, що стосується основного шару - то основними фазами є α - Al_2O_3 + γ - Al_2O_3 , кількісне співвідношення яких залежить від часу МДО-обробки, тобто від товщини покриття (рис. 7). Як видно з наведеного рисунка, МДО-обробка дає змогу формувати покриття із заданим вмістом α - Al_2O_3 , однак для цього потрібно забезпечити певну товщину основного шару. Збільшення товщини основного шару призводить до підвищення твердості (рис. 8), при вмісті α - Al_2O_3 ~ 80 % (ваг.) твердість HV ~ 17 ГПа.

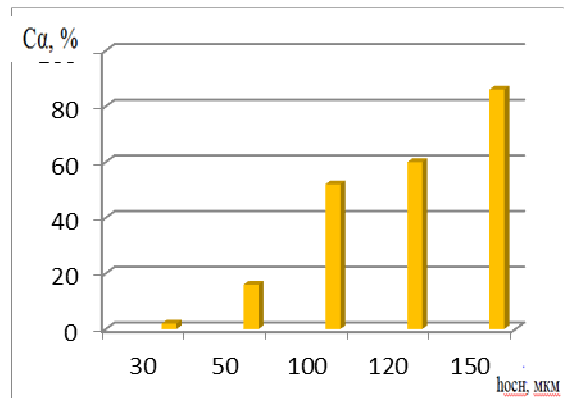


Рисунок 7 – Вміст α - Al_2O_3 (корунд) на поверхні основного шару

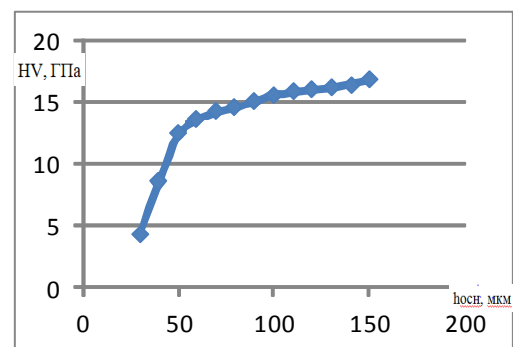


Рисунок 8 – Залежність твердості від товщини основного шару

Таким чином, показано, що саме фаза α - Al_2O_3 визначає твердість МДО-покриття.

Висновки.

1. Установлено, що фазовий склад та твердість основного шару покриття на сплаві АК6 залежить

від товщини покриття; зі зростанням товщини, зростає кількість фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ у зв'язку з поліморфним перетворенням.

2. Для забезпечення максимальної твердості покриття (15–18 ГПа) потрібно формувати покриття з товщиною основного шару більше 100 мкм.

3. За рахунок формування різної товщини покриття можуть бути створені умови формування структурно-фазового стану покриттів, що забезпечують надійність і довговічність сполучених з'єднань.

Дослідження та фінансування здійснені у рамках проєктів: EU #3055 EURIZON «Combined technologies of metallic surface modification by micro - arc oxidation and boriding for critical machine parts with high contact loads» та NRFD ID: 2023.04/0036 «Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures».

Список літератури

- Богун Л., Плешаков Е., Швачко С., Тепла Т. *Кольорові метали та сплави*. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. 124 с.
- Алюміній та алюмінієві сплави деформовні. Хімічний склад та види продукції [Електронний ресурс]. – Київ. : Держспоживстандарт України, 2004. Ч. 1 : DSTU ISO 209-1:2002 ; Марки (ISO 209-2:1989, IDT) / пер. і наук.-техн. ред. Л. Скрябіна [та ін.] ; – Чинний в Україні від 01.07.2004. – Київ : [б. в.], 2004. – IV, 11 с. – (Національний стандарт України). Похмурський В.І., Аксенова Е. В. О перспективах використання алюмінію для захисту чорних металів від корозії // 1-а республіканська конференція по корозії та протикорозійному захисту металів: Тезиси основних докладів. – Львів 1971 р. – с. 51 - 52.
- Dursun T., Soutis C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. - *Mater Des*, 56, pp. 862-871 *Sanpo N. Solution Precursor Plasma Spray System*. Springer International Publishing, 2014, 100 p.
- Clyne T.W., Troughton S.C. (2019). A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals *Int Mater Rev*, 64, pp. 127-162
- Zhu L., Ke X., Li J., Zhang Y., Zhang Z., Sui M. (2021). Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al, *Surface Interfac*, 25, Article 101186
- Zhang Y., Wu Y., Chen D., Wang R., Li D., Guo C., et al. (2017) Micro-structures and growth mechanisms of plasma electrolytic oxidation coatings on aluminium, *Surf Coating Technol*, 321, pp. 236-246.
- Zhu L., Guo Z., Zhang Y., Li Z., Sui M. (2016). A mechanism for the growth of a plasma electrolytic oxide coating on Al, *Electrochim Acta*, 208, pp. 296-303
- Subbotina V., Al-Qawabeha U.F., Belozero V., Sobol' O., Subbotin A., Tabaza T.A., Al-Qawabeh S.M. (2019). Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase in MAO-coatings on aluminum. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. Vol. 6, no. 12 (102), pp. 6–13.
- Yerokhin A.L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Leyland A., Matthews A. (2004). Fatigue properties of Keronite® coatings on a magnesium alloy, *Surf Coating Technol*, 182, pp. 78-84
- Yao J.T., Wang S., Zhou Y., Dong H. (2020). Effects of the power supply mode and loading parameters on the characteristics of micro-arc oxidation coatings on Magnesium alloy, *Metals*, 10, p. 1452
- Subbotina V., Bilozero V., Subbotin O. (2022). Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation. *Physics and chemistry of solid states this link is disabled*. Vol. 23, iss. 2, pp. 380–386
- Javid M., Fadaee H. (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior *App Surf Sci*, 286, pp. 212-219
- Barati N., Meletis E.I., Fard F.G., Yerokhin A., Rastegari S., Faghihi-Sani M.A. (2015). $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ nanostructured coatings using DC plasma electrolytic oxidation to improve tribological properties of Al substrates, *Appl Surf Sci*, 356, pp. 927-934
- Kossenko A., Zinigrad M. (2015). A universal electrolyte for the plasma electrolytic oxidation of aluminum and magnesium alloys, *Mater Des*, 88, pp. 302-309
- Tang M., Li W., Liu H., Zhu L. (2011). Influence of titania sol in the electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating formed on 2A70 aluminum alloy, *Surf Coating Technol*, 205, pp. 4135-4140
- Babaei K., Fattah-alhosseini A., Molaei M. (2020). The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: a review, *Surface Interfac*, 21, Article 100677
- Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Subbotin O. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. Vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23.
- Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M., Moghaddam N.S., Elahinia M. (2019). Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel-titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process, *Journal of Materials Science*, 54, pp. 7333-7355
- Wei T., Yan F., Tian J. (2005). Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy, *J Alloys Compd*, 389, pp. 169-176
- Мудрий С. І., Кулик Ю. О., Якимович А.С. (2017). *Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: навч.-метод. посіб.: [для вищ. навч. закл.]* – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 227 с
- Харитонов Л.Г. Визначення мікротвердості. Київ, 2017. 44 с.

References (transliterated)

- Bohun L., Pleshakov E., Shvachko S., Tepla T. Non-ferrous metals and alloys: Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. 124 p.
- Deformable aluminium and aluminium alloys. Chemical composition and types of products [Electronic resource] - Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2004. Part 1: DSTU ISO 209-1:2002; Marks (ISO 209-2:1989, IDT) / translated and scientific and technical ed. by L. Skryabin [et al. Pokhmurskyi V.I., Aksanova E.V. On the prospects of using aluminium for the protection of ferrous metals against corrosion // 1st Republican Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Metals: Theses of the main reports. - Lviv, 1971 - p. 51 -52.
- Dursun T., Soutis C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. - *Mater Des*, 56, pp. 862-871 *Sanpo N. Solution Precursor Plasma Spray System*. Springer International Publishing, 2014, 100 p.
- Clyne T.W., Troughton S.C. (2019). A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals *Int Mater Rev*, 64, pp. 127-162
- Zhu L., Ke X., Li J., Zhang Y., Zhang Z., Sui M. (2021). Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al, *Surface Interfac*, 25, Article 101186
- Zhang Y., Wu Y., Chen D., Wang R., Li D., Guo C., et al. (2017) Micro-structures and growth mechanisms of plasma electrolytic oxidation coatings on aluminium, *Surf Coating Technol*, 321, pp. 236-246.
- Zhu L., Guo Z., Zhang Y., Li Z., Sui M. (2016). A mechanism for the growth of a plasma electrolytic oxide coating on Al, *Electrochim Acta*, 208, pp. 296-303
- Subbotina V., Al-Qawabeha U.F., Belozero V., Sobol' O., Subbotin A., Tabaza T.A., Al-Qawabeh S.M. (2019). Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase in MAO-coatings on aluminum. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. Vol. 6, no. 12 (102), pp. 6–13.
- Yerokhin A.L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Leyland A., Matthews A. (2004). Fatigue properties of Keronite® coatings on a magnesium alloy, *Surf Coating Technol*, 182, pp. 78-84
- Yao J.T., Wang S., Zhou Y., Dong H. (2020). Effects of the power supply mode and loading parameters on the characteristics of micro-arc oxidation coatings on Magnesium alloy, *Metals*, 10, p. 1452
- Subbotina V., Bilozero V., Subbotin O. (2022). Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation. *Physics and chemistry of solid states this link is disabled*. Vol. 23, iss. 2, pp. 380–386
- Javid M., Fadaee H. (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior *App Surf Sci*, 286, pp. 212-219
- Barati N., Meletis E.I., Fard F.G., Yerokhin A., Rastegari S., Faghihi-Sani M.A. (2015). $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ nanostructured coatings using DC plasma electrolytic oxidation to improve tribological properties of Al substrates, *Appl Surf Sci*, 356, pp. 927-934
- Kossenko A., Zinigrad M. (2015). A universal electrolyte for the plasma electrolytic oxidation of aluminum and magnesium alloys, *Mater Des*, 88, pp. 302-309
- Tang M., Li W., Liu H., Zhu L. (2011). Influence of titania sol in the electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating formed on 2A70 aluminum alloy, *Surf Coating Technol*, 205, pp. 4135-4140
- Babaei K., Fattah-alhosseini A., Molaei M. (2020). The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: a review, *Surface Interfac*, 21, Article 100677
- Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Subbotin O. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. Vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23.
- Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M., Moghaddam N.S., Elahinia M. (2019). Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel-titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process, *Journal of Materials Science*, 54, pp. 7333-7355
- Wei T., Yan F., Tian J. (2005). Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy, *J Alloys Compd*, 389, pp. 169-176
- Мудрий С. І., Кулик Ю. О., Якимович А.С. (2017). *Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: навч.-метод. посіб.: [для вищ. навч. закл.]* – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 227 с
- Харитонов Л.Г. Визначення мікротвердості. Київ, 2017. 44 с.

- 182, pp. 78-84
10. Yao J.T., Wang S., Zhou Y., Dong H. (2020). Effects of the power supply mode and loading parameters on the characteristics of micro-arc oxidation coatings on Magnesium alloy, *Metals*, 10, p. 1452
 11. Subbotina V., Bilozero V., Subbotin O. (2022). Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation. *Physics and chemistry of solid states* link is disabled. Vol. 23, iss. 2, pp. 380–386
 12. Javidi M., Fadaee H. (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior *App Surf Sci*, 286, pp. 212-219
 13. Barati N., Meletis E.I., Fard F.G., Yerokhin A., Rastegari S., Faghihi-Sani M.A. (2015). Al₂O₃-ZrO₂ nanostructured coatings using DC plasma electrolytic oxidation to improve tribological properties of Al substrates, *Appl Surf Sci*, 356, pp. 927-934
 14. Kossenko A., Zinigrad M. (2015). A universal electrolyte for the plasma electrolytic oxidation of aluminum and magnesium alloys, *Mater Des*, 88, pp. 302-309
 15. Tang M., Li W., Liu H., Zhu L. (2011). Influence of titania sol in the electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating formed on 2A70 aluminum alloy, *Surf Coating Technol*, 205, pp. 4135-4140
 16. Babaei K., Fattah-alhosseini A., Molaei M. (2020). The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: a review, *Surface Interfac*, 21, Article 100677
 17. Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Subbotin O. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. Vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23.
 18. Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M., Moghaddam N.S., Elahinia M. (2019). Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel-titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process, *Journal of Materials Science*, 54, pp. 7333-7355
 19. Wei T., Yan F., Tian J. (2005). Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy, *J Alloys Compd*, 389, pp. 169-176
 20. Mudryi S.I., Kulyk Y.O., Yakymovych A.S. (2017). *X-ray diffraction analysis in materials science: a textbook: [for higher education institutions]*. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2017. 227 p.
 21. Kharytonov L.G. *Determination of microhardness*. Kyiv, 2017. 44 p.

Надійшло (received) 31.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Субботін Олександр Володимирович / Subbotin Oleksandr – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (067) 530-04-35; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9422-4480>; e-mail: subbotin.alex95@gmail.com

Білозеров Валерій Володимирович / Bilozero Valery – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (067) 575-29-14; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7623-3658>; e-mail: belozero.valerii@gmail.com

Субботіна Валерія Валеріївна / Subbotina Valeria – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: 067-933-20-68; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3882-0368>, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com

Волков Олег Олексійович / Volkov Oleg – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (097) 973-49-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8797-0322>; e-mail: volkovoleg1978@gmail.com

Князев Сергій Анатолійович / Knyazev Sergiy – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: +38 (050)-160-87-36; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6422-3658>; e-mail: obmeninfo@ukr.net

Рябоштан Валентин Анатолійович / Ryaboshtan Valentyn – PhD, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (093)- 778- 69- 46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5826-5085>; e-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com

Баранніков Вячеслав Миколайович / Barannikov Vyacheslav – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (067) 546-79-15; e-mail: v.barannikov@gmail.com

Бобров Володимир Іванович / Bobrov Volodymyr – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (093) 155-70-19; e-mail: bobrov.vladimir@gmail.com

Калініченко Ігор Анатолійович / Kalinichenko Igor – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (099) 720-98-67; e-mail: sportsmen7jq@gmail.com

Фесюков Сергій Олексійович / Fesyukov Sergey – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (063) 523-42-87; e-mail: sergey.fesyukov@gmail.com