

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

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ФОРМУВАННЯ ТОВЩИНИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ АМГ6 ПРИ МІКРОДУГОВОМУ ОКСИДУВАННІ

У роботі представлено результати дослідження кінетики формування товщини та фазового складу оксидних покриттів на деформівному алюмінієвому сплаві АМГ6, отриманих методом мікродугового оксидування (МДО). Особливу увагу приділено впливу складу електроліту, зокрема співвідношенню компонентів рідкого скла (Na_2SiO_3) та гідроксиду калію (KOH), на фазову еволюцію покриттів. Встановлено, що поліморфне перетворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ відбувається лише за умов значного вмісту силікату натрію (12 г/л) у поєднанні з підвищеною концентрацією KOH (2 г/л). Найвищі показники твердості покриттів (до 15 ГПа) досягнуто в комбінованому лужно-силікатному електроліті, що забезпечує утворення стабільної фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. При зменшенні вмісту Na_2SiO_3 спостерігається переважне утворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ та муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), що впливає на загальні властивості покриття. Результати дослідження підтверджують доцільність використання комплексного підходу до регулювання складу електроліту для оптимізації фазового складу, структури й механічних характеристик МДО-покриттів, що є перспективним напрямом підвищення експлуатаційної надійності алюмінієвих сплавів у різних галузях промисловості.

Ключові слова: алюмінієвий сплав; мікродугове оброблення; вимірювання твердості; товщиномір VT-10NC; рентгеноструктурний аналіз; фазовий склад

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

STUDY OF THE KINETICS OF THICKNESS FORMATION AND PHASE COMPOSITION OF COATINGS ON A DEFORMABLE ALUMINUM ALLOY DURING MICROARC OXIDATION

This paper presents the results of a comprehensive study of the microarc oxidation (MAO) processes of the deformable aluminum alloy AMg6 with an emphasis on the kinetics of coating thickness formation and the evolution of its phase composition depending on electrolyte parameters. Particular attention is paid to the influence of the concentration of liquid glass (sodium silicate - Na_2SiO_3) and potassium hydroxide (KOH) in the alkaline-silicate electrolyte on the mechanism of formation of the oxide layer, polymorphic phase transformations and their impact on the physical and mechanical characteristics of coatings. It is shown that the formation of the structure and phase composition of coatings occurs by an electrochemical mechanism that depends on the composition of the electrolyte. It has been established that at an increased concentration of Na_2SiO_3 (12 g/L), thermodynamically favorable conditions are created for the completion of the polymorphic transformation of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ into $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, a thermostable phase that gives the coating high hardness (up to 15 GPa) and electrical insulating properties. Instead, at a reduced content of sodium silicate (6 g/L) and a low concentration of KOH (1 g/L), the predominant formation of a mullite phase ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) was found, which leads to a different coating morphology with reduced mechanical properties but potentially higher thermal stability. The results obtained indicate that adjusting the composition of the electrolyte allows for a controlled influence on the phase composition of coatings and optimization of their properties in accordance with operational requirements. It is proved that only the use of a combined alkaline-silicate electrolyte ensures the formation of a dense, durable coating dominated by the $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase, which is characterized by increased hardness, corrosion resistance, and durability. The results of the study are of practical importance for improving the processing technologies of aluminum alloys, developing wear and corrosion-resistant coatings with predictable properties, as well as for creating new structural and functional materials for the aviation, automotive, electronics, and energy industries.

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

Вступ. Актуальність задачі. У сучасній промисловості та матеріалознавстві особливу увагу приділяють розробці та вдосконаленню покриттів, які здатні значно підвищити експлуатаційні характеристики металевих виробів. Одним із ключових напрямів у цьому контексті є підвищення зносостійкості конструкційних матеріалів та покращення корозійних властивостей, що особливо важливо для деталей, які експлуатуються в умовах агресивного середовища, високих навантажень і перепадів температур [1–3]. На цьому тлі алюмінієві сплави, зокрема сплав АМГ6, продовжують залишатися у фокусі наукових і прикладних досліджень. Цей деформівний сплав характеризується низькою густиною, високою питомою міцністю, доброю оброблюваністю та стійкістю до корозії, що зумовлює його широке застосування у таких галузях, як авіабудування, автомобілебудування, транспортне машинобудування, електроніка та приладобудування [4, 5].

Однак, незважаючи на переваги, притаманні сплаву АМГ6, під впливом механічних навантажень, температурних коливань та агресивних середовищ

його поверхня може зазнавати деградації, що значно знижує ресурс виробів. З цієї причини для забезпечення довговічності та надійності елементів із алюмінієвих сплавів широко застосовують спеціальні захисні покриття, які здатні істотно поліпшити функціональні властивості матеріалу, зокрема зносостійкість, твердість, термостабільність і електрохімічну стійкість [6].

Одним із найефективніших сучасних методів отримання захисних оксидних покриттів на алюмінієвих сплавах є мікродугове оксидування (МДО) — електрохімічна технологія, що базується на реалізації високовольтних імпульсних розрядів у різних складах електролітів. У процесі МДО на поверхні металу формується щільне, товсте, міцно адгезоване покриття, що складається з оксидів алюмінію та, залежно від складу електроліту, інших фаз. Такі покриття демонструють виняткові властивості — підвищену твердість, високу термостійкість, стабільність у корозійно-активних

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

середовищах, а також здатність протистояти абразивному та фретинг-зношенню [7, 8].

Незважаючи на беззаперечні переваги технології МДО, механізми формування оксидного шару, його мікроструктурна еволюція, фазовий склад і особливості росту залишаються предметом інтенсивного наукового аналізу. Особливо актуальним є питання вивчення кінетики формування покриття — процесу, який визначає не лише товщину та однорідність шару, але й його внутрішню структуру, фазову композицію та властивості. Відомо, що навіть незначні зміни режиму обробки — такі як щільність струму, тривалість обробки та склад електроліту — можуть істотно впливати на природу протікання електрофізичних і електрохімічних процесів у зоні мікродугових розрядів [9–11].

У зв'язку з цим, дослідження кінетики формування товщини та фазового складу покриттів на деформованому алюмінієвому сплаві АМг6 при МДО є надзвичайно актуальною науковою задачею, яка вимагає комплексного підходу, що поєднує експериментальні дослідження з аналізом структури, морфології та фазового складу утворених шарів. Такий підхід дозволяє не лише оптимізувати параметри процесу, але й глибше зрозуміти взаємозв'язки між умовами формування покриття, його мікроструктурними особливостями та функціональними властивостями [12].

Отримані результати можуть слугувати науковим підґрунтям для подальшої розробки та вдосконалення технологій обробки алюмінієвих сплавів, розширення сфер їхнього застосування та підвищення ефективності використання у відповідальних технічних системах..

Метою даної роботи є виявлення основних закономірностей формування покриттів на алюмінієвому сплаві АМг6 у процесі мікродугового оксидування.

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

Експериментальна частина. Для експериментів були використані зразки алюмінієвого сплаву АМг6 у вигляді пластин розміром 50×50×5 мм. Перед початком обробки зразки піддавались механічній шліфовці для усунення поверхневих дефектів і забезпечення рівномірного формування покриттів. Мікродугове оксидування здійснювалось при густині струму $j = 20 \text{ А/дм}^2$. Тривалість оброблення варіювалася від 60 до 180 хвилин.

Зразки з алюмінієвого сплаву піддавались 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 ($\lambda_{\text{Cu}} = 1,54 \text{ \AA}$) в інтервалі кутів $2\theta = 10\div70^\circ$. При розшифровці дифрактограми використовували картотеку ASTM (American Society for Testing Materials) [13].

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 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($2\theta = 45,9^\circ$) [13].

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 неферомагнітних зразках. Діапазон вимірювання товщини 0–2 мм. Прилад має цифрову ідифікацію.

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 [14].

Результати та їх обговорення. Серія зразків піддавалася мікродуговій обробці у водних розчинах електролітів, що містили лугу (KOH) та силікат натрію (Na_2SiO_3). Електроліти, які застосовуються для оптимізації технології нанесення покриттів на сплаві АМг6 наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови електролізу

Тип електроліту	Густина струму, А/дм ²	Тривалість, хв
№ 1 1 г/л KOH + 6 г/л Na ₂ SiO ₃ (базовий)	20	60
		120
		180
№2 2 г/л KOH + 6 г/л Na ₂ SiO ₃	20	60
		120
		180
№3 2 г/л KOH + 12 г/л Na ₂ SiO ₃	20	60
		120
		180

На рис. 1 представлено мікроструктуру МДО-покриття, сформованого на алюмінієвому сплаві АМг6. Відсутність видимих дефектів, таких як пори, мікротріщини або ознаки відшарування, а також наявність чітко вираженої межі між підкладкою та покриттям свідчить про високий рівень адгезії та однорідність отриманого шару. Аналіз поперечного перерізу покриття демонструє його типову двошарову будову, характерну для процесу мікродугового оксидування.

Встановлено, що покриття ростуть як усередину зразка (внутрішня товщина покриття, основний шар), так і назовні (зовнішня товщина покриття, технологічний шар). Загальна товщина покриття складається з його внутрішньої і зовнішньої товщини. Як правило, верхній пухкий шар покриття є припуском для подальшої розмірної обробки виробів.

Зовнішній шар має більш пористу структуру, що зумовлено інтенсивним розвитком мікродугових розрядів на поверхні під час обробки. За

результатами фазового аналізу встановлено, що цей шар переважно містить кристалічну фазу муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), яка забезпечує покриттю високу термостійкість, стабільність при циклічних теплових навантаженнях та додаткову механічну міцність. Завдяки своїй пористості, зовнішній шар може виконувати роль адгезійно-активної основи для подальшого нанесення додаткових функціональних шарів, наприклад, полімерних, антикорозійних або змащувальних композицій.

Внутрішній шар, або так званий робочий, розташовується безпосередньо на межі з основним матеріалом і характеризується високою щільністю та більш однорідною структурою. Його фазовий склад представлений стабільними оксидними фазами $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та мулітом. Завдяки такому поєднанню компонентів, внутрішній шар виконує функцію основного захисного бар'єру, забезпечуючи ефективну протидію дифузії агресивних середовищ, підвищену корозійну стійкість і високу твердість. Саме цей шар визначає довговічність і функціональність покриття в умовах експлуатаційних навантажень.

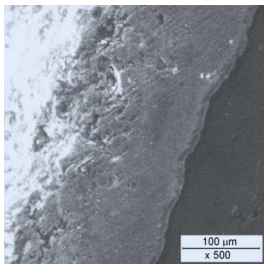


Рисунок 1 – Структура поперечного перерізу покриття, одержаного мікродуговим оксидуванням сплаву АМг6

Двошарова будова покриття виникає внаслідок неоднорідності процесів, що відбуваються під час МДО: сильніші розряди формують пористий зовнішній шар, а рівномірне осадження оксидів ближче до поверхні основи сприяє утворенню щільного внутрішнього шару. Така структура забезпечує поєднання механічної міцності, хімічної стійкості та функціональності покриття.

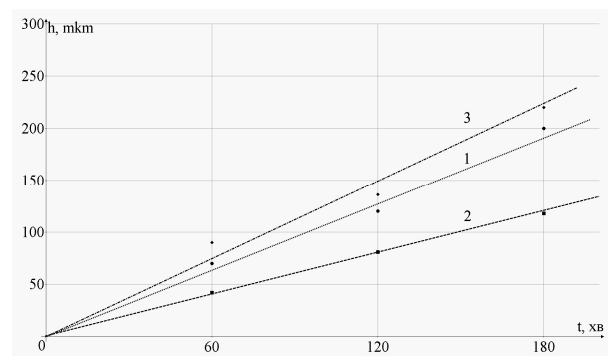
Таким чином, двошарова структура МДО-покриття є результатом складної взаємодії фізико-хімічних процесів, які відбуваються під час мікродугового оксидування, і забезпечує ефективний захист сплаву АМг6 при його роботі в агресивних середовищах.

Потрібно зазначити, що чіткої межі між внутрішнім і зовнішнім шарами покриття немає (рис. 1). Швидкість нарощування цих товщин практично однакова, тобто ці товщини в процесі обробки змінюються практично синхронно.

В роботі, залежно від складу електроліту та тривалості процесу оксидування, було досліджено кінетику росту мікродугового оксидного покриття. На рис. 2 показано залежності товщини покриття від тривалості оксидування.

Результати демонструють, що збільшення вмісту рідкого скла (Na_2SiO_3) у складі електроліту сприяє підвищенню швидкості формування

оксидного покриття (порівняйте прямі 2 та 3 на рис. 2). Водночас підвищення концентрації лугу в електроліті знижує швидкість росту покриття (порівняйте прямі 1 та 2 на рис. 2). У кількісному вираженні швидкість росту зменшується від $V = 1,2$ мкм/хв. до $V = 0,7$ мкм/хв.



1, 2, 3 – тип електроліту (табл. 1)

Рисунок 2 – Кінетика формування товщини покриття на сплаві АМг6

Істотний вплив лугу пов'язаний із більш інтенсивним розчиненням алюмінію, оскільки зі збільшенням КОН агресивність електроліту зростає.

Важливим показником механічних властивостей МДО-покриттів є їх твердість. На рис.3 представлена гістограма, що відображає твердість основного шару залежно від тривалості процесу оксидування та складу електроліту.

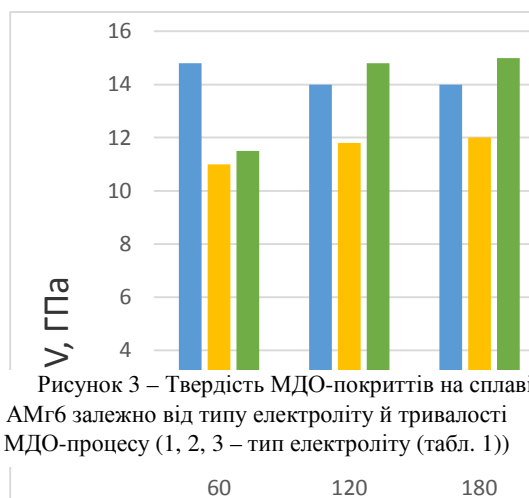


Рисунок 3 – Твердість МДО-покриттів на сплаві АМг6 залежно від типу електроліту й тривалості МДО-процесу (1, 2, 3 – тип електроліту (табл. 1))

Як видно з даних, склад електроліту впливає на твердість: максимальне значення твердості (до 15 ГПа) досягається при використанні електроліту з концентрацією 2 г/л КОН і 12 г/л Na_2SiO_3 (рис. 3). Але незалежно від умов електролізу твердість покриттів достатньо велика, а саме, більше 11 ГПа (табл. 2).

Фазовий склад МДО-покриттів був досліджений за допомогою рентгендифракційного аналізу із застосуванням випромінювання мідного анода. На рис. 4 наведено типовий рентгенівський дифракційний спектр робочого шару МДО-покриття, отриманого в електроліті третього складу (табл. 1). Аналіз спектра показав, що для таких

покриттів характерне утворення фаз $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

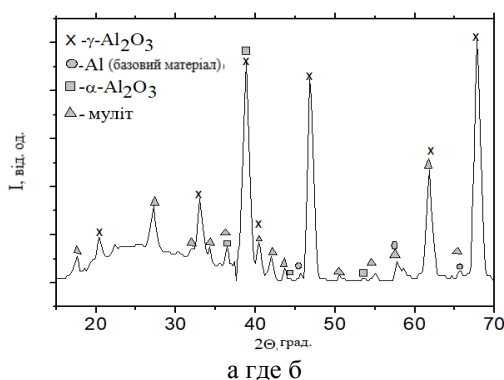


Рисунок 4— Фрагмент дифракційного спектра оксидного покриття, отриманого в електроліті складу 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3 при тривалості електролізу 60 хв (Ка - Cu – випромінювання)

Результати аналізу фазового складу МДО-покриттів на сплаві АМг6 наведені у табл. 2. Як свідчать дані таблиці, практично в усіх досліджених електролітах покриття складаються переважно із кристалічної фази $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Варто зазначити, що процес формування покриття відбувається послідовно: спочатку утворюється $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, потім формується муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), а на завершальному етапі – фаза $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд). Остання виникає внаслідок поліморфного перетворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Таким чином, склад лужно-силікатного електроліту та тривалість електролізу суттєво впливають на кінетику росту, фазовий склад і твердість покриттів, отриманих методом мікродугового оксидування алюмінієвого сплаву АМг6. Збільшення концентрації рідкого скла (Na_2SiO_3) у складі електроліту прискорює процес формування МДО-покриття (рис. 2), але водночас сприяє утворенню мулітної фази ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Таблиця 2 – Технологічні умови і фазовий склад МДО-покриттів на сплаві АМг6

Електроліт	τ , хв	h , мкм	Фази, %			HV, ГПа
			α	γ	М	
1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3	60	70	–	96	4	13,8
	120	120	–	85	15	14
	180	200	–	70	30	14
2 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3	60	44	–	100	–	11
	120	83	–	100	–	11,8
	180	116	–	100	–	12
2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3	60	91	–	100	–	11,5
	120	130	–	80	20	14,8
	180	220	25	55	20	15

Примітка: τ – тривалість оброблення, h – загальна товщина, α – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд), γ – $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, М – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (муліт), HV – мікротвердість

Використання лужно-силікатного електроліту з різним співвідношенням КОН і Na_2SiO_3 дозволило визначити умови, необхідні для поліморфного

перетворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Як показують результати дослідження (табл. 2), це перетворення відбувається лише за значного вмісту Na_2SiO_3 у розчині — на рівні 12 г/л.

При нижчій концентрації Na_2SiO_3 (6 г/л) утворення мулітної фази ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) стає домінуючим процесом. Особливо це проявляється при мінімальному вмісті КОН (1 г/л), що сприяє стабілізації фазового складу муліту. Натомість підвищення концентрації КОН до 2 г/л змінює механізм формування покриття: починають переважати реакції, характерні для лужного електроліту (табл. 2). Це обмежує перехід $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, залишаючи фазовий склад покриття на рівні $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Тільки за умов збільшення вмісту Na_2SiO_3 до 12 г/л у складі електроліту створюються термодинамічно сприятливі умови для завершення поліморфного перетворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Це, у свою чергу, сприяє формуванню твердого шару з фазою $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, який має високу механічну міцність (HV до 15 ГПа) і значні електроізоляційні властивості.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що тільки використання комплексного лужно-силікатного електроліту дозволяє досягти необхідних умов для повного поліморфного перетворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Це відкриває можливість отримання покриттів із високою твердістю, хімічною стійкістю та покращеними фізико-механічними характеристиками.

Висновки.

1. Установлено, що фазовий склад покриття визначається складом електроліту і, в першу чергу, співвідношенням концентрації між лугом та силікатом натрію.

2. Зміна концентрації силікату натрію у складі електроліту суттєво впливає на процеси формування покриття, які здійснюються за електрофоретичним механізмом.

3. Найвища твердість (15 ГПа) МДО-покриттів на сплаві АМг6 досягається наявністю у покритті корунду ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$).

Дослідження та фінансування здійснені у рамках проєкту 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

- Cheng Y., Matykina E., Arrabal R. et al. Plasma electrolytic oxidation and corrosion protection of zircaloy-4 / Surface and coatings technology, 2012, Vol. 206, Iss. 14, P. 3230–3239.
- Cui S.H., Han J.M., Du Y.P. et al. Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites / Surface and coatings technology, 2007, Vol. 201, Iss. 9–11, P. 5306–5309.
- Clyne T.W., Troughton S.C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals / International materials reviews, 2019, Vol. 64, Iss. 3, P. 127–162.
- Curran J.A., Clyne T.W. Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium / Surface and coatings technology, 2005, Vol. 199, Iss. 2–3, P. 168–176.
- Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Al-Qawabab S.M., Tabaza T.A., Al-Qawabab S.M., Shnayder V. A study of the electrolyte

- composition influence on the structure and properties of mao coatings formed on AMG6 alloy. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2020. Vol. 3. № 12(105). P. 6–14.
6. Friedemann A.E.R., Gesing T.M., Plagemann P. Electrochemical rutile and anatase formation on PEO surfaces / *Surface and coatings technology*, 2017, [Vol. 315](#), P. 139–149.
 7. Curran J.A., Clyne T.W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings / *Acta Materialia*, 2006, [Vol. 54, Iss. 7](#), P. 1985–1993.
 8. Yu X.-W., Chen L., Qin H.-L. et al. Formation process of in situ oxide coatings with high porosity using onestep plasma electrolytic oxidation / *Applied surface science*, 2016, Vol. 366, P. 432–438.
 9. Zhang X., Aliasghari S., Nemcova A. et al. X-ray computed tomographic investigation of the porosity and morphology of plasma electrolytic oxidation coatings / *ACS Applied materials & interfaces*, 2016, Vol. 8(13), P. 8801–8810.
 10. Momida H., Hamada T., Takagi Y. et al. Theoretical study on dielectric response of amorphous alumina / *Physical review B.*, 2006, Vol. 73.
 11. Nie X., Meletis E.I., Jiang J.C. et al. Mathews A. Abrasive wearproprties and [properties and analysis of Al₂O₃ coatings fabricated using plasma electrolysis / Surface and coatings technology](#), 2002, [Vol. 149, Iss. 2–3](#), P. 245–251.
 12. Субботіна В.В., Соболь О.В., Білозеров В.В. Можливості фазово-структурної інженерії і властивості мікродугових оксидних покриттів на сплаві АМГ3. *Металознавство та термічна обробка металів*, 2020. № 4 (91). С. 69–82.
 13. Мудрий С.І., Кулик Ю.О., Якимович А.С. , Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві : навч.-метод. посіб.: [для вищ. навч. закл.]. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 227 с.
 14. Канарчук В.С., Шевченко В.І. Методи дослідження металів: навч. посіб. Київ : НТУ, 2001. 98 с.
- of various metals / *International materials reviews*, 2019, Vol. 64, Iss. 3, P. 127–162.
4. Curran J.A., Clyne T.W. Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium / *Surface and coatings technology*, 2005, Vol. 199, Iss. 2–3, P. 168–176.
 5. Subbotina V., Sobol O., Belozarov V., Al-Qawabah S.M., Tabaza T.A., Al-Qawabah S.M., Shnayder V. A study of the electrolyte composition influence on the structure and properties of mao coatings formed on AMG6 alloy. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2020. Vol. 3. № 12(105). P. 6–14.
 6. Friedemann A.E.R., Gesing T.M., Plagemann P. Electrochemical rutile and anatase formation on PEO surfaces / *Surface and coatings technology*, 2017, [Vol. 315](#), P. 139–149.
 7. Curran J.A., Clyne T.W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings / *Acta Materialia*, 2006, [Vol. 54, Iss. 7](#), P. 1985–1993.
 8. Yu X.-W., Chen L., Qin H.-L. et al. Formation process of in situ oxide coatings with high porosity using onestep plasma electrolytic oxidation / *Applied surface science*, 2016, Vol. 366, P. 432–438.
 9. Zhang X., Aliasghari S., Nemcova A. et al. X-ray computed tomographic investigation of the porosity and morphology of plasma electrolytic oxidation coatings / *ACS Applied materials & interfaces*, 2016, Vol. 8(13), P. 8801–8810.
 10. Momida H., Hamada T., Takagi Y. et al. Theoretical study on dielectric response of amorphous alumina / *Physical review B.*, 2006, Vol. 73.
 11. Nie X., Meletis E.I., Jiang J.C. et al. Mathews A. Abrasive wearproprties and [properties and analysis of Al₂O₃ coatings fabricated using plasma electrolysis / Surface and coatings technology](#), 2002, [Vol. 149, Iss. 2–3](#), P. 245–251.
 12. Subbotina V.V., Sobol O.V., Bilozarov V.V. Possibilities of phase-structural engineering and properties of microarc oxide coatings on AMg3 alloy. *Metallurgy and heat treatment of metals*, 2020. № 4 (91). P. 69–82.
 13. Mudryi S.I., Kulyk Y.O., Yakymovych A.S., X-ray structural analysis in materials science: a textbook: [for higher education institutions]. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2017. 227 c.
 14. Kanarchuk V.E., Shevchenko V.I. Methods of research of metals: a textbook. Kyiv: NTU, 2001. 98 c.

References

Надійшла (received) 31.05.2025

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 / Bilozarov 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: belozarov.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

Рябоштан Валентин Анатолійович / Ryaboshan 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