

О.В. СУББОТИН, В.В. БІЛОЗЕРОВ, О.О. ВОЛКОВ, В.В. СУББОТИНА, В.М. ШЕВЦОВ

ФРИКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ МДО-ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ

Досліджені фрикційні характеристики покриттів на алюмінієвому сплаві Д16, які сформовані методом мікродугового оксидування (МДО) в лужно-силікатному електроліті при катодно-анодному режимі. Досліджена структура та морфологія робочого шару поверхні МДО-покриття, який працює в парах тертя з чавуном, сталлю та МДО-покриттям в умовах змащування дизельною оливою та водою. Показана користь від наявної пористості робочого шару МДО-покриття, яка складає 5–10% та сприяє утриманню мастила в зоні тертя. Вивчено фазовий склад, твердість покриттів та визначено коефіцієнт тертя ковзання на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка» при використанні в якості мастила води і дизельної оливи; навантаження змінювалось від 0,2 до 2 кН, номінальний тиск від 1 до 11 МПа. Встановлено, що МДО-покриття має кристалічну будову, фазовий склад – високотемпературні модифікації оксиду алюмінію (α - Al_2O_3 і γ - Al_2O_3), твердість – 18000 – 20000 МПа. Встановлено, що коефіцієнт тертя ковзання пари сірий чавун – МДО-покриття, сталь – МДО-покриття та МДО по МДО знижується до значення 0,01 - 0,013 в умовах мастила. Виявлено, що в парі МДО-покриття – МДО-покриття антифрикційні властивості проявляються в умовах змащування як оливою, так і водою. Низький коефіцієнт тертя для пари покриття-покриття у випадку змащування водою пояснюється високими гідрофільними властивостями оксидних контактуючих поверхонь, що дозволяє рекомендувати їх до використання у підшипниках ковзання (вкладишах) гідротурбін. Зроблено висновок щодо причин, які обумовлюють низький коефіцієнт тертя досліджуваних зразків.

Ключові слова: алюмінієвий сплав Д16, чавун, сталь, мікродугова обробка, покриття, фазовий склад, кристалічна будова, окисли алюмінію, товщина покриття, твердість покриття, коефіцієнт тертя, антифрикційні властивості

O. SUBBOTIN, V. BILOZEROV, O. VOLKOV, V. SUBBOTINA, V. SHEVTSOV

FRICITION PROPERTIES OF MAO COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS

Aluminum alloys are widely used in mechanical engineering due to their physical and mechanical properties. However, their low wear resistance and burr resistance limit their use in friction nodes. In this regard, parts made of aluminum alloys operating under conditions of sliding friction require surface strengthening, which determines the friction wear parameters. Research works in this direction allow increasing the reliability and service life of friction nodes. Ensuring the compatibility of friction pairs allows reducing the coefficient of friction and, as a result, to increase wear resistance. One of the effective methods of forming wear-resistant coatings on aluminum alloys is the method of micro-arc oxidation (MAO). The use of micro-arc discharges as highly concentrated energy sources to create conditions for high-temperature electrochemical processes and phase transformations in the surface layer makes it possible to form structures based on high-temperature oxides on the surface of metals, which provides qualitatively new surface properties: high hardness, wear resistance, corrosion resistance in various environments. However, the use of oxide coatings in bearings is mainly due to their high wear resistance and corrosion resistance. Information on the antifriction properties of aluminum oxide-based coatings is limited. The purpose of this work is to determine the coefficient of friction of MAO-coatings on D16 aluminum alloy in a pair with cast iron, steel and MAO-coating under conditions of oil and water lubrication, and to find out the feasibility of using MAO technology to create sliding bearings. The formation of MAO coatings was carried out in an alkaline-silicate electrolyte in the cathodic-anodic mode. The structure and morphology of the working layer of the MAO-coating surface, which works in friction pairs with cast iron, steel and MAO-coating under conditions of oil and water lubrication, was investigated. The benefit of the available porosity of the working layer of the MAO coating, which is 5-10% and contributes to the retention of lubricant in the friction zone, is shown. The phase composition, hardness of the coatings were studied and the coefficient of sliding friction was determined on the SMC-2 friction machine according to the "disk-pad" scheme when using water and oil as lubricants; the load varied from 0.2 to 2 kN, the nominal pressure from 1 to 11 MPa. It was established that the MAO coating has a crystalline structure, the phase composition is high-temperature modifications of aluminum oxide (α - Al_2O_3 and γ - Al_2O_3), and the hardness is 18000-20000 MPa. It was established that the coefficient of sliding friction of gray cast iron - MAO-coating, steel - MAO-coating and MAO on MAO decreases to the value of 0.01 - 0.013 under lubrication conditions. It was found that in a pair of MAO-coating - MAO-coating, anti-friction properties are manifested both under conditions of lubrication with oil and water. The low coefficient of friction for the coating-coating pair in the case of water lubrication is explained by the high hydrophilic properties of the oxide contacting surfaces, which makes it possible to recommend them for use in sliding bearings (liners) of hydroturbines. A conclusion was drawn regarding the reasons for the low coefficient of friction of the studied samples.

Keywords: D16 aluminum alloy, cast iron, steel, micro-arc treatment, coating, phase composition, crystal structure, aluminum oxides, coating thickness, coating hardness, friction coefficient, antifriction properties

Вступ. Актуальність задачі. Алюмінієві сплави широко застосовуються в машинобудуванні завдяки їх фізико-механічним властивостям. Однак, їх незначна зносостійкість та задиростійкість обмежує їх застосування у вузлах тертя. У зв'язку з цим деталі з алюмінієвих сплавів, що працюють в умовах тертя ковзання, вимагають зміцнення поверхні, що визначає параметри тертя зношування [1]. Дослідницькі роботи у цьому напрямі дозволяють підвищити надійність та ресурс роботи вузлів тертя. Забезпечення сумісності пар тертя дозволяє знизити коефіцієнт тертя і, як наслідок, підвищити зносостійкість.

Одним із ефективних способів формування на алюмінієвих сплавах зносостійких покриттів є метод мікродугового оксидування (МДО) [2–5]. Використання мікродугових розрядів як висококонцентрованих джерел енергії для

створення умов протікання високотемпературних електротехнічних процесів, фазових перетворень у поверхневому шарі дає можливість формувати на поверхні металів структури на основі високотемпературних оксидів [6–8], що забезпечує якісно нові властивості поверхні: висока твердість, зносостійкість, корозійна стійкість у різних середовищах [9–12].

Однак застосування оксидних покриттів у підшипниках обумовлено, в основному, їх високою зносостійкістю, корозійною стійкістю. Відомості про антифрикційні властивості покриттів на основі оксиду алюмінію обмежені.

У зв'язку з вищевказаним, метою даної роботи є визначення коефіцієнта тертя МДО-покриття в

© О.В. Субботін, В.В. Білозеров, О.О. Волков,
В.В. Субботіна, В.М. Шевцов, 2022

парі з чавуном, сталлю і МДО-покриттям в умовах змащування оливою, водою та з'ясування доцільності застосування технології МДО для створення підшипників ковзання (рис.1).



Рисунок 1 – Деталі підшипників ковзання після МДО-обробки

Експериментальна частина. Трибологічні випробування проводились на машині СМЦ – 2, яка використовується для вивчення процесів тертя та зносу, антифрикційних властивостей матеріалів. Принцип роботи машини полягає у тому, що зразки отримують відносно переміщення при заданому навантаженні. При цьому вимірюється момент тертя. Машина не забезпечує безпосереднє вимірювання зносу в процесі дослідження [13].

Антифрикційні характеристики покриттів оцінювали за коефіцієнтом тертя при ступінчастому навантаженні.

Випробування проводилося за схемою «диск-колодка» (рис. 2) [13]. Здійснювалося ступінчасте навантаження в інтервалі 0,2–2 кН, що відповідало питомим напруженням від 1 до 11 МПа. Час випробування на кожному ступені навантаження – 10 хвилин; швидкість ковзання – 1,3 м/с; змащення здійснювалося за методом занурення; мастило – вода та дизельна олива.

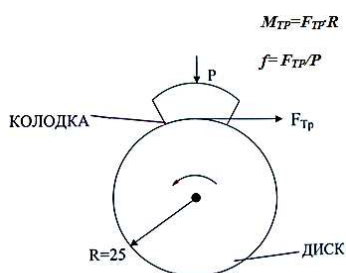


Рисунок 2 – Схема випробування «диск – колодка»

Диски (∅ 50мм) виготовлені із сірого чавуну (НВ 340) та сталі 45ХМФА (HRC 46), а також зі сплаву Д16, робочі поверхні оброблялися шліфуванням до шорсткості поверхні $R_a = 0,3-0,4$ мкм. Колодки виготовлені з промислового алюмінієвого сплаву Д16Т.

Безперервний запис динаміки зміни моменту сили тертя у встановленому режимі здійснювався потенціометром КСП-4.

«Колодки» та «диски» з алюмінієвого сплаву піддавалися мікродуговому оксидуванню у лужно-

силікатному електроліті (1,75 г/л КОН + 1 г/л Na_2SiO_3) в анодно-катодному режимі при густині струму 20 А/дм² і тривалості обробки 3 години. Відзначимо, що покриття яке було сформовано має двошарову будову (рис. 3): технологічний шар і робочий [14].

Для встановлення наявності фаз, ідентифікації та визначення їх відносного вмісту проведено рентгенівський фазовий аналіз робочого шару МДО-покриттів на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 з фокусуванням по Бреггу-Брентано у випромінюванні К α -Cu [15].

Товщину МДО-покриттів вимірювали методом віхревих токів застосовуючи віхровий товщиномір ВТ-10НЦ, який дозволяє вимірювати товщину діелектричних покриттів на металевих неферромагнітних зразках. При наведених вище режимах мікродугового оксидування загальна товщина складає 150–160 мкм. Після видалення шліфуванням технологічного шару товщина робочого шару становила 80–90 мкм.

Мікротвердість робочого шару покриттів вимірювали застосовуючи прилад ПМТ-3.

Морфологію поверхні МДО-покриттів досліджували методом растрової електронної мікроскопії на приладі РЕМ МА 101. На рис. 4, 5 представлені растрові електронно-мікроскопічні знімки поверхні технологічного та робочого шару МДО-покриттів. Найбільш наочна якість МДО-покриттів проявляється після зняття технологічного шару.

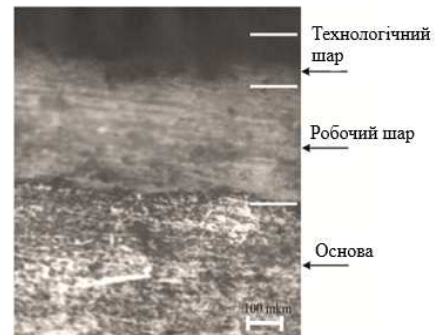


Рисунок 3 – Мікроструктура поперечного перерізу сплаву після МДО-оброблення

Оцінка пористості проводилася за методикою контролю маслоємності покриттів відповідно до ГОСТ 9.302-88. Метод заснований на визначенні кількості оливи, адсорбованої покриттям.

Результати та їх обговорення. Силова взаємодія контактних поверхонь тертя пояснюється адгезійно-деформаційною теорією тертя, згідно з якою коефіцієнт тертя є сумою адгезійної та деформаційної складових.

Деформаційна складова коефіцієнта тертя зростає зі збільшенням шорсткості поверхні, навантаження та знижується зі збільшенням твердості та модуля пружності матеріалів. Адгезійна складова пов'язана з утворенням на ділянках контакту адгезійних «містків» зварювання.

Зниження міцності адгезійних зв'язків досягається поділом поверхні тертя рідкими та твердими мастильними матеріалами. МДО-покриття володіючи високою твердістю знижує деформаційну складову тертя, проте шорсткість поверхні надаватиме зворотний вплив. Поділ поверхні тертя рідкими мастильними матеріалами зменшує адгезійну складову тертя, що дозволяє суттєво знизити коефіцієнт тертя ковзання.

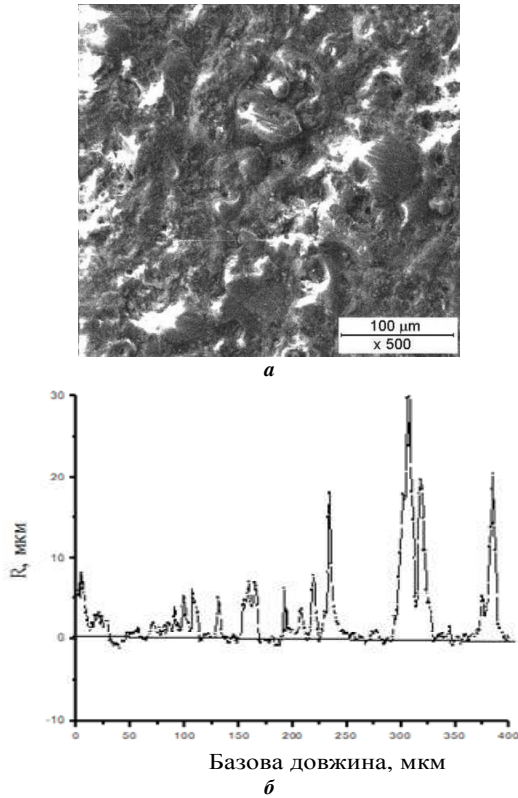


Рисунок 4 – Морфологія поверхні МДО-покриттів (а) і профілограма її шорсткості (б) до видалення технологічного шару (електроліт – 1,75 г/л КОН і 1 г/л Na_2SiO_3)

Відносна інтенсивність дифракційних ліній для виявлених фаз близька до табличного, що вказує на відсутність текстури. Високий вміст фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ забезпечує твердість покриття 18000–20 000 МПа.

Пористість технологічного шару, яка визначається обсягами порожнин, займаних мікропорами, мікро- і макротріщинами і макропустотами складала 50–80%. Після видалення технологічного шару визначена пористість поверхні робочого шару складала 5–10%, що дає корисний ефект для утримання мастила.

Результати дослідження коефіцієнта тертя наведено у табл. 1.

Аналіз отриманих результатів показує, що пар тертя покриття – чавун, покриття – сталь в умовах змащування маслом можна віднести до антифрикційних, оскільки їх коефіцієнт тертя ковзання не перевищує 0,014.

Пари тертя «покриття – покриття» відносяться до антифрикційних при використанні змащування як водою так і оливою.

Зниження коефіцієнту тертя для пар покриття – чавун, покриття – сталь та покриття – покриття

Результати дослідження дозволяють відзначити такі моменти. Рентгенодифракційний фазово-структурний аналіз показав, що зміцнений шар має кристалічну будову (рис. 6). Фазовий склад по всій товщині шару представлений двома модифікаціями оксиду алюмінію: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Основною фазою є $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, частка якої становить 70 ваг. %.

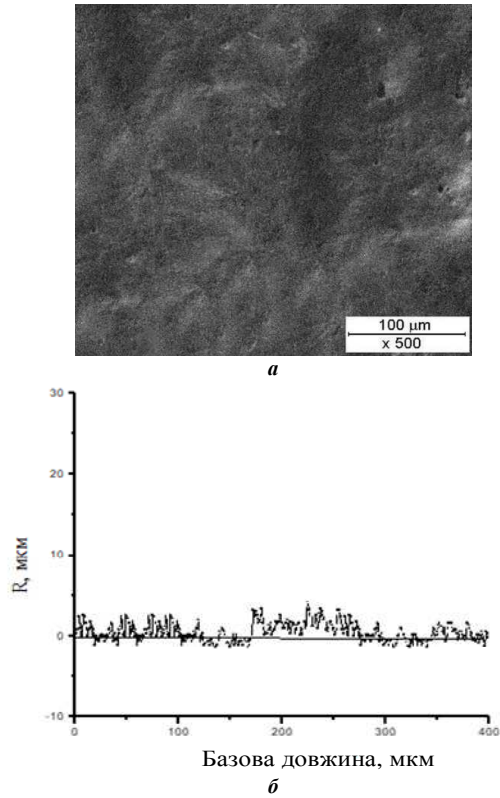


Рисунок 5 – Морфологія поверхні МДО-покриттів (а) і профілограма її шорсткості (б) робочого шару після видалення технологічного шару (електроліт - 1,75 г/л КОН і 1 г/л Na_2SiO_3)

можна пояснити наповненням пористої оксидної плівки мастилом. Низький коефіцієнт тертя у випадку змащування водою пояснюється високими гідрофільними властивостями оксидних контактуючих поверхонь.

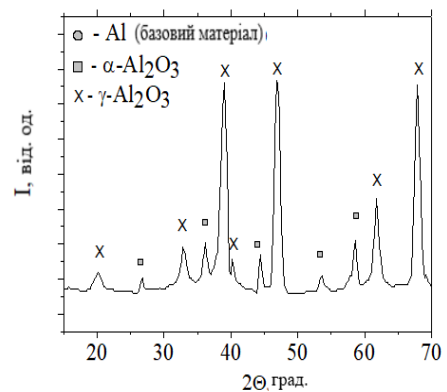


Рисунок 6 – Фрагмент типового рентгенодифракційного спектра МДО-покриття на сплав Д16, отриманого в електроліті 1,75 г/л КОН + 1 г/л Na_2SiO_3 при тривалості оксидування 3 години

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження

Матеріал «диска»	Матеріал «колодки»	Змащування	Значення коефіцієнту тертя при навантаженні P, кН									
			0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Чавун	Д16 з МДО- покриттям	Масло	0,040	0,028	0,020	0,018	0,019	0,015	0,016	0,014	0,013	0,013
		Вода	0,016	0,014	0,020	0,039	0,039	0,043	0,044	0,039	0,036	0,036
Сталь	Д16 з МДО- покриттям	Масло	0,044	0,025	0,02	0,01	0,009	0,015	0,010	0,0135	0,0135	0,013
		Вода	0,045	0,048	0,047	0,045	0,046	0,052	0,042	0,043	0,041	0,038
Д16 з МДО- покриттям	Д16 з МДО- покриттям	Масло	0,02	0,02	0,019	0,021	0,018	0,014	0,013	0,015	0,01	0,01
		Вода	0,09	0,04	0,033	0,035	0,032	0,027	0,022	0,019	0,015	0,014

Значимо, що підшипники ковзання зі змащуванням водою в даний час широко використовуються в гідротурбінобудуванні. Вони конструктивно простіші і зручніші в експлуатації ніж підшипники зі змащуванням оливою тому що відпадає необхідність у складних ущільненнях.

Основні вимоги до поверхневого шару підшипника - низький коефіцієнт тертя в парі зі сталлю та чавуном у воді і низький знос в абразивній воді.

Дані, наведені в табл. 1 вказують на те, що підшипник ковзання з алюмінієвого сплаву Д16 з нанесеним МДО-покриттям відповідає основній вимозі до поверхневого шару підшипника, а саме: забезпечує низький коефіцієнт тертя в парі зі сталлю та чавуном під час роботи у воді. Ці результати однозначно вказують на доцільність використання мікродугового окисдування для створення екологічно чистих підшипників ковзання гідротурбін.

Висновки.

1. Встановлено, що МДО-покриття має кристалічну будову, фазовий склад – високотемпературні модифікації окислу алюмінію (α -Al₂O₃ і γ -Al₂O₃), твердість – 18000 – 20000 МПа.

2. Встановлено, що коефіцієнт тертя ковзання пари «сірий чавун – МДО-покриття», «сталь-МДО-покриття» та «МДО по МДО» знижується до значення 0,01–0,013 в умовах мастила.

3. Виявлено, що в парі «МДО-покриття – МДО-покриття» антифрикційні властивості проявляються в умовах змащування як оливою, так і водою. Низький коефіцієнт тертя для пари «покриття – покриття» у випадку змащування водою пояснюється високими гідрофільними властивостями оксидних контактуючих поверхонь, що дозволяє рекомендувати їх до використання у підшипниках ковзання (вкладишах) гідротурбін. Зроблено висновок щодо причин, які обумовлюють низький коефіцієнт тертя досліджуваних зразків.

4. Показано доцільність застосування технології МДО для створення підшипників ковзання (вкладишів) гідротурбін.

Планується подальше дослідження антифрикційних властивостей покриттів, отриманих методом мікродугового окисдування на ливарних алюмінієвих сплавах.

Список літератури

1. Афтанділянц, С. Г., Зазимко, О. В., Лопатько, К. Г. (2012), *Матеріалознавство: підручник*, Вища освіта, Київ, 548 с.
2. Li, W.J., Li, H.X., Song, R.G., Ji, Z. (2012), "Effects of different current densities on properties of MAO coatings embedded with and without α -Al₂O₃ nanoadditives", *Materials science and technology*, Vol. 28, №5, pp. 565–568.
3. Asquith, D., Yerokhin, A., James, N., Yates, J., Maltheus, A. (2013), "Evaluation of residual stress development at the interface of plasma electrolytically oxidized and cold-worked aluminum", *Metallurgical and materials transactions A: Physical metallurgy and materials science*, Vol. 44, Iss. 10, pp. 4461–4465.
4. Shen, D., Cai, J., Guo, C., Liu, P. (2013), "Evolution of residual stresses in micro-arc oxidation ceramic coatings on 6061 Al alloy", *Chinese journal of mechanical engineering*, Vol. 26, Iss. 6, pp. 1149–1153.
5. Dean, J., Gu, T., Clyne, T.W. (2015), "Evaluation of residual stress levels in plasma electrolytic oxidation coatings using a curvature method", *Surface and coatings technology*, Vol. 269, pp. 47–53.
6. Martin, J., Leone, P., Nomine, A., Veys-Renaux, D., Henrion, G., Belmonte, T. (2015), "Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium", *Surf Coat Technol*, Vol. 269, pp. 36–46.
7. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017), "Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys", *Transactions of nonferrous metals society of China*, Vol. 27, pp. 1439–1454.
8. Javidi, M., Fadaee, H. (2013) "Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior", *Applied surface science*, Vol. 286, pp. 212–219.
9. Lv, P.X., Chi, G.X., Wei, D.B., Di, S.C. (2011), "Design of scanning micro-arc oxidation forming ceramic coatings on 2024 aluminum alloy", *Advanced materials research*, Vol. 189–193, pp. 1296–1300.
10. Martin, J., Melhem, A., Shchedrina, I., Duchanoy, T., Nominé, A., Henrion, G., Czerwiec, T. (2013) "Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium", *Surface and coatings technology*, Vol. 221, pp. 70–76.
11. Liang, J., Wang, P., Hu, L., Hao, J. (2007), "Tribological properties of duplex MAO/DLC coatings on magnesium alloy using combined microarc oxidation and filtered cathodic arc deposition", *Materials science and engineering: A* Vol. 454–455, pp. 164–169.

12. Subbotina, V., Sobol, O., Belozеров, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (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, № 12 (106), pp. 14–23.
13. Бернштейн, М.Л., Рахштадт, А.Г., (1983), *Металловедение и термическая обработка стали : справ. изд. В 3-х т. Т. I. Методы испытаний и исследования*, *Металлургия*, Москва, 352 с.
14. Dunleavy, C.S., Curran, J.A., Clyne, T.W. (2011), "Self-similar scaling of discharge events through PEO coatings on aluminium", *Surface and coatings technology*, Vol. 206, pp. 1051–1061.
15. Горелик, С.С., Расторгуев, Л.Н., Скаков, Ю.А. (1994), *Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособ. для вузов, МИСИС*, 328 с.
7. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017). Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys, *Transactions of nonferrous metals society of China*, vol. 27, pp. 1439–1454.
8. Javidi, M., Fadaee, H. (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior, *Applied surface science*, vol.286, pp. 212–219.
9. Lv, P.X., Chi, G.X., Wei, D.B., Di, S.C. (2011). Design of scanning micro-arc oxidation forming ceramic coatings on 2024 aluminium alloy, *Advanced materials research.*, vol.189–193, pp. 1296–1300.
10. Martin, J., Melhem, A., Shchedrina, I., Duchanoy, T., Nominé, A., Henrion, G., Czerwiec, T. (2013). Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium, *Surface and coatings technology*, vol.221, pp. 70–76.
11. Liang, J., Wang, P., Hu, L., Hao, J. (2007). Tribological properties of duplex MAO/DLC coatings on magnesium alloy using combined microarc oxidation and filtered cathodic arc deposition, *Materials science and engineering: A*, vol. 454–455, pp. 164–169.
12. Subbotina, V., Sobol, O., Belozеров, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (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.
13. Bernshtein, M.L., Rachstadt, A.G. (1983). *Metal science and thermal processing of steel: works. [Metalovedenie i termicheskaya obrabotka stali] In 3 volumes*, vol. I. *Testing methods and research*, 352 p.
14. Dunleavy, C.S., Curran, J.A., Clyne, T.W. (2011). Self-similar scaling of discharge events through PEO coatings on aluminium, *Surface and coatings technology*, vol.206, pp. 1051–1061.
15. Gorelyk, S.S., Rastorguev, L.N., Skakov, Yu.A. (1994). *Roentgenographic and electron-optical analysis: a textbook, for universities [Rentgenograficheskiy i elektron-opticheskiy analiz: pidruchnik dlya vuzov]*, MYSIS, 328 p.

References (transliterated)

1. Aftandilyants, Ye.G., Zazimko, O.V., Lopatko, K.G. (2012). *Materials science: a textbook, [Materialoznavstvo: pidruchnik]*, Kyiv: Higher Education, 548 p.
2. Li, W.J., Li, H.X., Song, R.G., Ji, Z. (2012). Effects of different current densities on properties of MAO coatings embedded with and without α -Al₂O₃ nanoadditives, *Materials science and technology*, vol. 28, no. 5, pp. 565–568.
3. Asquith, D., Yerokhin, A., James, N., Yates J., Matthews, A. (2013). Evaluation of residual stress development at the interface of plasma electrolytically oxidized and cold-worked aluminum, *Metallurgical and materials transactions A: Physical metallurgy and materials science*, vol. 44, iss. 10, pp. 4461–4465.
4. Shen, D., Cai, J., Guo, C., Liu P. (2013). Evolution of residual stresses in micro-arc oxidation ceramic coatings on 6061 Al alloy, *Chinese journal of mechanical engineering*, vol. 26, iss. 6, pp. 1149–1153.
5. Dean, J., Gu, T., Clyne, T.W. (2015). Evaluation of residual stress levels in plasma electrolytic oxidation coatings using a curvature method, *Surface and coatings technology*, vol. 269, pp. 47–53.
6. Martin, J., Leone, P., Nomine A., Veys-Renaux, D., Henrion G., Belmonte, T. (2015). Influence of electrolyte ageing on the

Надійшло (received) 22.06.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Субботін Олександр Володимирович / Subbotin Oleksandr – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач 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 / Bilozerov 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: belozerov.valerii@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

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

Шевцов Вадим Михайлович / Shevtsov Vadym – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автомобіле- і тракторобудування», м. Харків, Україна; тел.: 098-978-26-52; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5115-4398>; e-mail: shevtsovvadim@ukr.net