

**О. В. СУББОТИН, В. В. БІЛОЗЕРОВ, В. В. СУББОТИНА, О. О. ВОЛКОВ, В. М. БАРАННИКОВ,  
В. І. БОБРОВ, К. І. КАЛІНІЧЕНКО, С. О. ФЕСЮКОВ, М. Р. КОПТЄВ**

### **ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ШЛЯХОМ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

У роботі розглянуто проблему підвищення працездатності поршневих кілець двигунів внутрішнього згорання шляхом застосування технології мікродугового оксидування (МДО) алюмінієвих сплавів. Обґрунтовано актуальність використання легких матеріалів для зниження маси та підвищення ефективності циліндро-поршневої групи. Проаналізовано недоліки традиційних матеріалів і покриттів, зокрема обмеження чавунних кілець і екологічні ризики хромування. Досліджено процес формування МДО-покриттів на алюмінієвому сплаві Д16 та їх вплив на фізико-механічні й трибологічні властивості поршневих кілець. Встановлено, що утворення оксидного шару на основі  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> забезпечує високу твердість, зносостійкість, термостійкість і низький коефіцієнт тертя. Експериментальні результати показали підвищення жорсткості кілець, стабільність їх пружних властивостей та покращення ущільнювальної здатності. Проведені лабораторні та моторні випробування підтвердили ефективність застосування МДО-покриттів: зафіксовано зростання жорсткості, стабільність характеристик при високих температурах і зниження зношування. Доведено, що алюмінієві поршневі кільця з МДО-покриттям не лише відповідають вимогам традиційних конструкцій, але й перевершують їх за експлуатаційними показниками. Отримані результати свідчать про доцільність подальшого впровадження технології мікродугового оксидування у серійне виробництво деталей ДВЗ.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав; мікродугове оксидування; поршневі кільця; питомий тиск; фазовий склад

**O. SUBBOTIN, V. BILOZEROV, V. SUBBOTINA, O. VOLKOV, V. BARANNIKOV, V. BOBROV,  
I. KALINICHENKO, S. FESYUKOV, M. KOPTIEV**

### **IMPROVING THE PERFORMANCE OF PISTON RINGS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY MICRO-ARC OXIDATION OF ALUMINUM ALLOYS**

The paper addresses the actual scientific and technical problem of improving the performance and durability of piston rings in internal combustion engines. Particular attention is paid to reducing weight and dimensional parameters of components, enhancing fuel efficiency, and decreasing harmful emissions. It is shown that traditional materials such as cast iron and steel, despite their advantages, have several significant drawbacks, including high weight, limited corrosion resistance, manufacturing complexity, and environmental concerns associated with protective coating technologies. The feasibility of using aluminum alloys as an alternative material for piston rings is substantiated. It is established that their application is limited by insufficient wear resistance, low modulus of elasticity, and degradation of mechanical properties at elevated temperatures. To overcome these limitations, the use of micro-arc oxidation (MAO) is proposed, which enables the formation of high-strength ceramic-like oxide coatings on the material surface. The features of the MAO process and the mechanism of coating formation based on aluminum oxide (particularly  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) are analyzed. These coatings are characterized by high hardness, thermal stability, wear resistance, and a low friction coefficient. It is shown that the formed coatings exhibit strong adhesion to the substrate, controlled porosity, and the ability to retain lubricant, which positively affects the tribological performance of contacting surfaces. The experimental part of the study includes the manufacturing of prototype piston rings from D16 aluminum alloy, their heat treatment, and the application of MAO coatings under various technological conditions. The influence of process parameters on the phase composition and properties of the coatings is investigated. It is demonstrated that increasing the treatment duration leads to a higher content of the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase, resulting in an increase in hardness up to 24 GPa. A complex of laboratory tests was carried out, including the evaluation of elasticity, specific pressure, and relaxation resistance of the rings at elevated temperatures. The results show that the application of MAO coatings significantly increases ring stiffness, stabilizes their elastic properties, and ensures compliance with the requirements for conventional designs. It is also established that coated rings exhibit higher thermal stability and lower relaxation compared to untreated samples. Engine bench tests confirmed the effectiveness of the proposed approach: an increase in compression in the cylinders, stability of operational characteristics during operation, and reduced wear were observed. It is demonstrated that aluminum piston rings with MAO coatings outperform traditional counterparts in terms of antifriction, anticorrosion, and heat-resistant properties. In general, the results confirm the scientific validity and technological перспективність of using micro-arc oxidation to enhance the performance of piston rings. The proposed technology can be effectively implemented in mass production, providing improved operational characteristics of internal combustion engines and reducing their environmental impact.

**Keywords:** aluminum alloy; micro-arc oxidation; piston rings; specific pressure; phase composition

**Вступ. Актуальність задачі.** Проблема підвищення працездатності деталей двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), зниження їх собівартості, зменшення масогабаритних параметрів та покращення паливно-економічних і екологічних показників є однією з ключових у сучасному двигунобудуванні. Світові виробники силових установок інвестують значні матеріальні та інтелектуальні ресурси у вдосконалення конструкцій і технологій виготовлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного термомеханічного навантаження. Особливої уваги за-

слуговують елементи циліндро-поршневої групи, зокрема поршневі кільця, від функціонування яких безпосередньо залежать компресія, витрата мастила, рівень токсичності відпрацьованих газів та загальний ресурс двигуна [1].

Традиційно поршневі кільця виготовляють із чавуну, сталі або бронзи. Необхідний рівень зносо-

© О. В. Субботін, В. В. Білозеров, В. В. Субботіна,  
О. О. Волков, В. М. Баранніков, В. І. Бобров,  
К. І. Калініченко, С. О. Фесюков, М. Р. Коптєв, 2026

стійкості зазвичай досягається завдяки легуванню матеріалу та нанесенню захисних покриттів, зокрема хромуванням робочої поверхні. Разом з тим, проведені дослідження та літературні джерела вказують на суттєві недоліки таких матеріалів і технологій. Зокрема, чавунні поршневі кільця характеризуються значною масою, обмеженою гнучкістю конструкції та підвищеним інерційним навантаженням на деталі циліндро-поршневої групи. Крім того, традиційні конструкції мають низку інших недоліків, серед яких складність технології виготовлення, крихкість матеріалу, ризик поломок під час монтажу, обмеження мінімальної осьової висоти (1,5–2 мм), недостатня корозійна стійкість, а також екологічна небезпечність процесу хромування і невисока адгезія хромового шару [1–3].

Кільця з легких сплавів мають суттєві переваги порівняно з чавунними: меншу густину, високу теплопровідність, кращу пластичність і зменшене інерційне навантаження на деталі циліндро-поршневої групи. Однак їх застосування обмежується низьким модулем пружності, недостатньою зносостійкістю та зниженням механічних властивостей при підвищених температурах [3].

Таким чином, наявні переваги легких сплавів не можуть бути повністю реалізовані без додаткових технологічних рішень, що зумовлює необхідність пошуку ефективних методів підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є застосування методу мікродугового оксидування (МДО) [4]. МДО – це електрохімічний процес поверхневої модифікації вентильних металів, що дозволяє формувати на поверхні матеріалу високоміцні керамікоподібні оксидні покриття [5]. У процесі МДО синтезуються високотемпературні поліморфні модифікації оксидів, зокрема  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд), які характеризуються високою твердістю, зносостійкістю та термостійкістю. Сформований оксидний шар має міцний зв'язок з основою та забезпечує багатфункціональні експлуатаційні властивості, зокрема підвищену корозійну стійкість, покращені трибологічні характеристики та здатність працювати в умовах інтенсивних термомеханічних навантажень [6].

Важливою особливістю МДО-покриттів є їх багатшарова структура та можливість керування морфологією, фазовим складом і пористістю залежно від режимів обробки. Це відкриває широкі можливості для цілеспрямованого формування функціональних властивостей поверхні, зокрема регулювання коефіцієнта тертя, маслоємності та зносостійкості [7].

Розроблені принципи та технологічні прийоми формування МДО-покриттів на внутрішніх і зовнішніх робочих поверхнях деталей дозволили отримати якісні покриття на елементах ДВЗ – поршнях, гільзах, підшипниках та поршневих кільцях. При цьому забезпечується висока адгезія покриття до основи, відсутність відшарувань та стабільність властивостей у процесі експлуатації [8].

Попередні лабораторні дослідження підтвердили ефективність і перспективність використання таких покриттів. Зокрема, встановлено суттєве під-

вищення зносостійкості та корозійної стійкості, зниження коефіцієнта тертя, а також покращення ущільнювальної здатності поршневих кілець. Крім того, відзначено підвищення теплостійкості та стабільності механічних властивостей при високих температурах, що є критично важливим для роботи деталей циліндро-поршневої групи [9].

Отримані результати свідчать про те, що застосування МДО-технології дозволяє не лише компенсувати недоліки алюмінієвих сплавів, але й створити принципово новий рівень експлуатаційних характеристик деталей двигунів внутрішнього згоряння, що забезпечує їх підвищену надійність, довговічність та ефективність [10].

Досконалість конструкції поршневих кілець визначається їх еколого-економічними показниками. Вони повинні забезпечувати:

надійне ущільнення над- і підпоршневого об'ємів та запобігання прориву газів і масла;

достатню міцність, працездатність і довговічність;

адаптивність до змін геометричних і режимних параметрів;

високі трибологічні характеристики (низький коефіцієнт тертя та зносу);

технологічність виготовлення й експлуатації;

мінімальні масу та габарити.

Застосування МДО-технології дозволяє принципово змінити ситуацію та забезпечити високу адгезію сформованого покриття з основою, а сам шар має твердість  $\approx 20 - 24$  ГПа, зносостійкість  $\text{Ih } 10^{-10} - 10^{-12}$ , коефіцієнт тертя з мастилом у парі з традиційними матеріалами  $< 0,01$ , теплостійкість до  $1200^\circ\text{C}$ , модуль пружності  $\approx 3,7 \cdot 10^5$  МПа, товщина покриття з такими властивостями може досягати 300 мкм, основою покриття є фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Попередні дослідження показали, що корундове покриття забезпечує підвищення зносо- та корозійної стійкості, покращення трибологічних характеристик і збільшення ущільнювальної здатності кілець. Розрахунки та експерименти встановили, що при формуванні покриття товщиною близько 0,2 мм на алюмінієвому кільці перерізом  $3 \times 1$  мм<sup>2</sup> жорсткість зростає приблизно у три рази. Це пояснюється значною різницею модулів пружності алюмінію ( $0,7 \cdot 10^5$  МПа) та корунду ( $3,7 \cdot 10^5$  МПа).

Важливою перевагою МДО є можливість керування пористістю покриття та його маслоємністю, що дозволяє оптимізувати змащувальні властивості робочих поверхонь і забезпечити стабільний режим гідродинамічного або змішаного тертя [11–13].

Подальший аналіз сучасних наукових публікацій підтверджує актуальність і перспективність обраного напрямку досліджень, пов'язаного з підвищенням працездатності поршневих кілець двигунів внутрішнього згоряння шляхом застосування технології мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів. У сучасних роботах підкреслюється доцільність використання легких конструкційних матеріалів для зниження маси та підвищення ефективності циліндро-поршневої групи, що узгоджується з отриманими результатами [1–3].

Результати виконаної роботи узгоджуються із сучасними тенденціями розвитку матеріалознавства і підтверджують ефективність застосування мікродугового оксидування для модифікації поверхні алюмінієвих сплавів. Встановлено, що формування оксидного шару на основі  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  забезпечує комплекс високих експлуатаційних характеристик, зокрема підвищену твердість, зносостійкість, термостійкість і низький коефіцієнт тертя [6]. Отримані експериментальні результати свідчать про підвищення жорсткості поршневих кілець, стабільність їх пружних властивостей та покращення ущільнювальної здатності [3].

Крім того, результати лабораторних і моторних випробувань підтверджують ефективність застосування МДО-покривів у реальних умовах експлуатації: зафіксовано зростання компресії, стабільність характеристик при високих температурах та зниження інтенсивності зношування. Це узгоджується з сучасними дослідженнями, які відзначають доцільність поєднання алюмінієвих сплавів із функціональними покриттями для досягнення оптимального балансу між масою, міцністю та довговічністю.

Таким чином, отримані результати та їх порівняння з сучасними науковими публікаціями підтверджують, що алюмінієві поршні кільця з МДО-покривом не лише відповідають вимогам традиційних конструкцій, але й перевершують їх за основними експлуатаційними показниками. Це свідчить про доцільність подальшого розвитку та впровадження технології мікродугового оксидування у серійне виробництво деталей двигунів внутрішнього згоряння.

Вищевикладене показує принципову можливість і доцільність застосування алюмінієвих сплавів з МДО-покривом для виготовлення поршневих кілець двигунів внутрішнього згоряння, що є актуальним.

*Мета роботи* полягає у підвищенні працездатності та експлуатаційної надійності поршневих кілець двигунів внутрішнього згоряння шляхом застосування технології мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів, а також дослідженні впливу сформованих МДО-покривів на фізико-механічні та трибологічні властивості кілець з метою покращення їх зносостійкості, термостійкості та ущільнювальної здатності.

**Результати та їх обговорення.** Було виготовлено дослідну партію поршневих кілець з алюмінієвого сплаву Д16. Основним легувальним елементом цього сплаву є мідь, яка, маючи відносно низьку енергію окиснення, впливає на кінетику росту покриттів та їх фазово-структурне формування.

Кільця виготовляли з листового матеріалу товщиною 1 мм і 2 мм шляхом точіння заготовок з подальшим розрізанням для формування необхідного замкового зазору у вільному стані та термофіксацією (загартування з 500 °С у воду).

МДО-обробку проводили у лужно-силікатному електроліті з варіюванням складу електроліту, тривалості процесу та щільності струму. Використання комплексного електроліту забезпечувало формуван-

ня двофазного покриття ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  та  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) з відносно високою швидкістю росту.

Для визначення фазового складу сформованих покриттів було проведено рентгеноструктурний аналіз із використанням рентгенівського дифрактометра. Отримані результати підтвердили наявність двох основних фаз оксиду алюмінію, причому зі збільшенням тривалості МДО-обробки спостерігалось зростання частки високотемпературної фази  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Типова дифрактограма сформованого покриття наведена на рис. 1.

Зі збільшенням тривалості обробки підвищувався вміст  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -фази, що приводило до зростання твердості покриття. Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою приладу ПМТ-3, результати яких показали досягнення значень до 24 ГПа при об'ємній частці  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  близько 80 %.

Таким чином, встановлено пряму залежність між фазовим складом покриття та його механічними властивостями. Збільшення вмісту корундової фази забезпечує підвищення твердості та зносостійкості сформованих шарів.

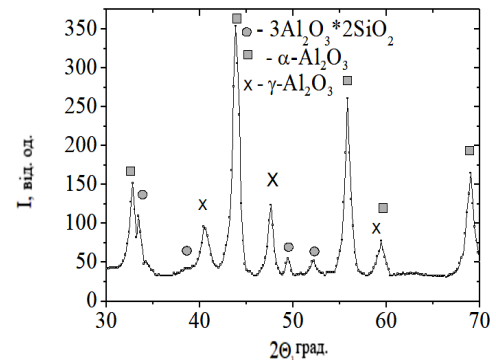


Рисунок 1 – Фрагмент дифрактограм МДО-покрива на сплаві Д16 ( $\text{Cu}$ -випромінювання)

Поршні кільця з алюмінієвого сплаву Д16 з МДО-покривом представлені на рис. 2.



Рисунок 2 – Поршні кільця з алюмінієвого сплаву Д16 з МДО-покривом

Випробування на пружність проводили методом обтиску кільця в гнучкій стрічці відповідно до ГОСТ 621-87. Отримані результати показали, що МДО-обробка забезпечує рівень питомого тиску  $P > 0,2$  МПа, що відповідає вимогам до традиційних чавунних кілець. Результати випробувань поршневих кілець ( $D = 68$  мм;  $t = 3,5$  мм,  $b = 1$  мм) наведе-

ні в табл. 1.

Таблиця 1 – Пружність алюмінієвих кілець

№ п/п	Умови обробки	Зазор у замку $S$ , мм	Навантаження $Q$ , Н	Питомий тиск $P$ , МПа
1	без зміцнювальної термічної обробки	12,0	4,21	0,116
2	термофіксація	12,0	6,18	0,167
3	МДО в заневоленому стані	12,2	7,72	0,228
4	термофіксація + МДО	13,0	7,72	0,228

У процесі роботи ДВС кільця розігріваються до температури 250–270° С, перебуваючи в умовах високих термомеханічних навантажень.

Релаксаційна стійкість дослідних кілець при  $t = 270^\circ \text{C}$ , наведена в табл. 2. Випробування на релаксаційну стійкість полягали в тому, що алюмінієві кільця після термофіксації та МДО-обробки в змушеному стані поміщалися в піч з  $t = 270^\circ \text{C}$ , періодично контролювалися пружні властивості кілець і величина зазорів у замках у вільному стані.

Таблиця 2 – Релаксаційна стійкість кілець ( $D = 68$  мм;  $t = 3,5$  мм,  $b = 1$  мм)

Обробка кілець зі сплаву Д16	Тривалість витримки при 270°С, год	Навантаження, Н	Зазор у замку у вільному стані $S$ , мм	Питомий радіальний тиск $P$ , МПа
МДО	0	7,72	12,2	0,228
	1	4,20	9	0,178
	2	4,20	8,7	0,178
	8	4,20	8,7	0,178
Загартування $t = 500^\circ \text{C}$ у воду; природне старіння – 15 дб	0	6,18	12,0	0,18
	1	2,1	1,2	0,23
	2	2,1	1,0	0,23
	8	2,1	1,0	0,23

Як видно з табл. 2, усадка кілець відбувається практично протягом першої години випробувань, як для кілець без МДО-покриття, так і для кілець з МДО-покриттям. Подальша витримка до 8 годин при  $t = 270^\circ \text{C}$  в заневоленому стані практично не впливає на зміну зазору в замку і на пружність кільця, тобто настає повна розмірна стабілізація. Однак виявлено принципову відмінність у релаксаційній стійкості кілець з МДО-покриттям і без нього, термостійкість перших – значно вища, ніж у кілець без покриття.

Також видно, що після випробувань пружність кілець з МДО-покриттям порівнянн з пружністю кручених сталевих кілець ( $Q = 400\text{--}530$  г), які випускаються серійно з питомим тиском  $P > 0,11$  МПа, і задовольняє вимогам, що пред'являються до поршневих кілець.

За результатами попередніх лабораторних досліджень властивостей алюмінієвих поршневих кілець, було зроблено висновок про можливість і необхідність проведення моторних випробувань таких кілець.

Порівняльні випробування зношеного дизеля серійної та дослідної комплектації, проведені на моторному стенді, показали, що після припрацювання тиск стиснення в циліндрах піднявся з 1,2...1,4 МПа до 2,0 МПа. Після 50 годинного напрацювання дизеля дослідної збірки на режимах, близьких до номінального – пружність кілець має стабільний і досить високий рівень  $Q = 5,0\text{--}6,0$  Н при ( $b = 1$  мм) і  $Q = 10,0$  Н при ( $b = 2$  мм) і порівнянн з значеннями пружності кілець з МДО-покриттям, які витримувалися при температурі  $t = 270^\circ \text{C}$ .

Таким чином, за результатами лабораторних досліджень та експлуатаційних випробувань можна зробити наступні висновки:

- поршневі кільця з алюмінієвих сплавів із МДО-покриттям повністю відповідають вимогам, що пред'являються до традиційних конструкцій, та перевершують їх за зносостійкістю, антифрикційними, антикорозійними і теплостійкими характеристиками;

- МДО-покриття забезпечує підвищення жорсткості, стабільність пружних властивостей і покращення ущільнювальної здатності кілець;

- зменшення маси кілець знижує інерційні навантаження та сприяє підвищенню ресурсу циліндро-поршневої групи;

- технологія виготовлення алюмінієвих кілець з МДО-покриттям є простішою та екологічно безпечнішою порівняно з традиційним хромуванням;

- результати лабораторних і моторних випробувань підтверджують доцільність подальшого впровадження даної технології у серійне виробництво.

Таким чином, застосування мікродугового оксидування для формування функціональних покриттів на алюмінієвих сплавах є науково обґрунтованим і технологічно перспективним напрямом підвищення працездатності поршневих кілець двигунів внутрішнього згорання.

**Висновки.** У роботі науково обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність застосування мікродугового оксидування для підвищення працездатності поршневих кілець двигунів внутрішнього згорання.

Установлено, що формування МДО-покриттів на алюмінієвих сплавах забезпечує утворення зміцненого оксидного шару на основі  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  з високими показниками твердості (до 24 ГПа), зносостійкості, термостійкості та низьким коефіцієнтом тертя.

Доведено, що нанесення покриття дозволяє суттєво підвищити жорсткість поршневих кілець (до трьох разів), стабілізувати їх пружні характеристики та забезпечити питомий тиск понад 0,2 МПа, що відповідає вимогам до традиційних конструкцій.

Експериментально підтверджено підвищену релаксаційну стійкість алюмінієвих кілець з МДО-покриттям при робочих температурах (250–270 °С),

що свідчить про їх здатність зберігати експлуатаційні властивості в умовах інтенсивних термомеханічних навантажень.

Результати моторних випробувань показали покращення експлуатаційних показників двигуна, зокрема підвищення компресії до 2,0 МПа, стабільність пружних характеристик кілець та зниження зношування у процесі роботи.

Установлено, що використання алюмінієвих сплавів з МДО-покриттям дозволяє зменшити масу кілець, знизити інерційні навантаження та підвищити ресурс елементів циліндро-поршневої групи.

Показано, що запропонована технологія є більш технологічно простою та екологічно безпечною альтернативою традиційним методам зміцнення, зокрема хромуванню.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень і впровадження алюмінієвих поршневих кілець з МДО-покриттям у серійне виробництво.

#### Список літератури

- Gulam R., Yogesh Y.. A Review on use of Aluminium alloy for piston manufacturing /International Journal for Research Trends and Innovation, 2023 IJRTI | Volume 8, Issue 5 | ISSN: 2456-3315
- Reddy GV, Krupakaran RL, Tarigonda H, Rasu NG. Energy balance and emission analysis on diesel engine using different thermal barrier coated pistons. Mater. Today Proc. 2021;43(4):646–654. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.424.
- Liu, Y., Lei, J., Niu, X. *et al.* Experimental and simulation study on aluminium alloy piston based on thermal barrier coating. *Sci Rep* **12**, 10991 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15031-x>
- 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.
- 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.
- Subbotina V. Tribological properties of MAO coatings on aluminum alloy Al25 / V. Subbotina, V. Bilozero, O. Subbotin, O. Volkov, S. Knyazev, V. Ryaboshtan, V. Barannicov, V. Bobrov, I. Kalinichenco, S. Fesyukov / Functional materials. – 2025. – Vol. 32. – Iss. 1. – P. 67–71. <http://functmaterials.org.ua/contents/32-1/fm321-67.pdf>, <https://doi.org/10.15407/fm32.01.67>
- Volchuk, V.M., Hlushkova, D.B. (2024), “Application of new plasma coatings for restoration of the surface of material”, *Functional Materials*, Vol. 31(2), pp. 205–209.
- Харламов Ю. О., Романченко О. В., Соколов В. І., Кроль О. С., Єпіфанова О. В. (2021), *Триботехніка і надійність машин: навчальний посібник* /– Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. – 184 с.
- 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.
- Schlesinger M., Paunovic M. *Modern Electroplating*. – 5th ed. – Wiley, 2010.
- Hirsch J. *Aluminum in innovative light-weight car design*. Materials Transactions, 2011.
- Фесенко А. Г., Бечке К. В., Манжалівський С. В. (2015), *Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посіб.* Дніпро: РВВ ДНУ, 2015.104 с

#### References

- Gulam R., Yogesh Y.. A Review on use of Aluminium alloy for piston manufacturing /International Journal for Research Trends and Innovation, 2023 IJRTI | Volume 8, Issue 5 | ISSN: 2456-3315
- Reddy GV, Krupakaran RL, Tarigonda H, Rasu NG. Energy balance and emission analysis on diesel engine using different thermal barrier coated pistons. Mater. Today Proc. 2021;43(4):646–654. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.424.
- Liu, Y., Lei, J., Niu, X. *et al.* Experimental and simulation study on aluminium alloy piston based on thermal barrier coating. *Sci Rep* **12**, 10991 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15031-x>
- 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.
- 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.
- Subbotina V. Tribological properties of MAO coatings on aluminum alloy Al25 / V. Subbotina, V. Bilozero, O. Subbotin, O. Volkov, S. Knyazev, V. Ryaboshtan, V. Barannicov, V. Bobrov, I. Kalinichenco, S. Fesyukov / Functional materials. – 2025. – Vol. 32. – Iss. 1. – P. 67–71. <http://functmaterials.org.ua/contents/32-1/fm321-67.pdf>, <https://doi.org/10.15407/fm32.01.67>
- Volchuk, V.M., Hlushkova, D.B. (2024), “Application of new plasma coatings for restoration of the surface of material”, *Functional Materials*, Vol. 31(2), pp. 205–209.
- Kharlamov, Yu. O., Romanchenko, O. V., Sokolov, V. I., Król, O. S., & Epifanova, O. V. (2021), *Tribology and Machine Reliability: A Textbook* /– Severodonetsk: V. Dahl Severodonetsk National University Press, 2021. – 184 pp.
- 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.
- Schlesinger M., Paunovic M. *Modern Electroplating*. – 5th ed. – Wiley, 2010.
- Hirsch J. *Aluminum in innovative light-weight car design*. Materials Transactions, 2011.
- Fesenko, A. G., Betshe, K. V., & Manzhaliievskiy, S. V. (2015). *Methods of surface hardening in the manufacturing of machine parts: textbook*. Dnipro: Dnipro National University Publishing House, 2015. 104 p.

Надійшла (received 21.04.26)

Стаття прийнята до друку 20.05.2026

Опублікована 29.05.2026

#### 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](mailto: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: [belozarov.valerii@gmail.com](mailto: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](mailto:subbotina.valeri@gmail.com)

**Волков Олег Олексійович / Volkov Oleh** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (093)950-85-39; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8797-0322>; e-mail: [volkovoleg1978@gmail.com](mailto:volkovoleg1978@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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:sergey.fesyukov@gmail.com)

**Коптєв Микита Романович / Koptev Mykyta**- Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: (066) 914-98-65; e-mail: [koptev.kitrum@gmail.com](mailto:koptev.kitrum@gmail.com)