

УДК 621.793:621.357.7

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15

ТЕХНОЛОГІЇ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВТОМОБІЛЬНОЇ ТА БРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

Г. В. КАРАКУРКЧИ^{1*}, М. Д. САХНЕНКО¹, М. В. ВЕДЬ², Р. О. КАЙДАЛОВ³,
О. М. ШАПОВАЛ³

¹ кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

³ кафедра бойового та логістичного забезпечення, Національна академія Національної гвардії України, Харків, УКРАЇНА

*e-mail: anyutikukr@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проведено огляд існуючих підходів використання методів інженерії поверхні деталей поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння. Показано, що застосування процесів спрямованого модифікування поверхні дозволяє розширити функціональні властивості оброблюваного матеріалу, зокрема підвищити показники міцності, зносостійкості, корозійної тривкості. Як ефективний метод інженерії поверхні запропоновано використання плазмово-електролітичного оксидування в лужних електролітах. Особливості обробки матеріалу у високоенергетичних режимах під дією короткоживучих електричних розрядів полягають у формуванні наноструктурованих оксидних композиційних покриттів під час електрохімічних та термохімічних реакцій. Завдяки особливостям перебігу плазмово-електролітична обробка може розглядатися як комбінований метод інженерії поверхні за рахунок поєднання в одному процесі модифікування поверхневого шару оброблюваного матеріалу та формування покриття з інкорпорацією компонентів електроліту та продуктів термохімічного перетворення. Запропоновано спосіб поверхневої обробки поршневого силуміну АК12М2МgN у лужних розчинних електролітах, що містять солі мангану та кобальту, можливо одержувати рівномірні щільні міцноадгезовані з основним металом керамікоподібні покриття, доповані каталітичними компонентами, вміст яких варіюється в межах 25–35 ат.%. Показано, що морфологія та фазова структура поверхневих шарів змінюється із інкорпорацією металів-допантів. Сформовані покриття мають високий ступінь розвинення поверхні, що є передумовою високих функціональних властивостей сформованих керамікоподібних покриттів. Запропонований підхід використано для модифікування поверхні поршня КамАЗ-740. Встановлено, що використання керамікоподібних покриттів поршня двигуна приводить до зниження годинної витрати палива та кількості токсичних речовин з відпрацьованими газами, що робить їх перспективними для використання у внутрішньоциліндровому каталізі.

Ключові слова: інженерія поверхні; поверхнева обробка; плазмово-електролітичне оксидування; поршневий сплав; силумін

SURFACE ENGINEERING TECHNOLOGIES OF POWER PLANT ITEMS OF THE AUTOMOTIVE AND ARMORED VEHICLES

A. KARAKURKCHI^{1*}, M. SAKHNENKO¹, M. VED², R. KIDALOV³, O. SHAPOVAL³

¹ Department of Physical Chemistry National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

² Department of General and Inorganic Chemistry National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

³ Department of Combat and Logistic Support, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A review of the existing approaches to the use of surface engineering methods for parts of a piston group of internal combustion engines was made. It is shown that the use of processes of directional surface modification allows you to expand the functional properties of the material being processed, in particular, to increase the indicators of strength, wear and corrosion resistance. As an effective method of surface engineering, the use of plasma-electrolytic oxidation in alkaline electrolytes has been proposed. The features of material processing in high-energy modes under the action of short-lived electrical discharges consist in the formation of nanostructured oxide composite coatings during electrochemical and thermochemical reactions. Due to its features, plasma-electrolytic treatment can be considered as a combined method of surface engineering by combining the surface layer of the material being processed in one process and forming coatings with the incorporation of electrolyte components and thermochemical conversion products. A method of treating piston silumin AK12M2MgN in alkaline electrolytes by the method of plasma-electrolytic oxidation is proposed. It is shown that in the galvanostatic mode from alkaline electrolyte solutions containing manganese and cobalt salts, it is possible to obtain uniform dense ceramic adhesives with high base metal adhesion, doped with catalytic components, the content of which varies from 25-35 at.%. It is shown that the morphology and phase structure of the surface layers changes upon incorporation of dopant metals. Formed coatings have a high degree of surface development, which is a prerequisite for enhanced functional properties of ceramic-like coatings. The proposed approach is used to modify the surface of the KamAZ-740 piston. It has been established that the use of ceramic-like coatings of an engine piston leads to a decrease in hourly fuel consumption and the amount of toxic substances with exhaust gases, which makes them promising for use in intra-cylinder catalysis.

Keywords: surface engineering; surface treatment; plasma electrolytic oxidation; piston alloy; silumin

Вступ

Сучасний розвиток машинобудування зумовлює пошук підходів щодо зменшення

масогабаритних характеристик деталей та конструкцій при одночасному підвищенні їх експлуатаційних властивостей. В той же час висока якість та експлуатаційна надійність машин

досягається використанням нових наукоємних технологій та науково-технічних напрямів. Зокрема інженерія поверхні (*surface engineering*) об'єднує методи спрямованих змін фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів конструкційних матеріалів шляхом модифікування, деформування, нанесення захисних шарів, плівок та покриттів різними способами. Це дозволяє формувати поверхневі шари із заданими властивостями безпосередньо на оброблюваному матеріалі та отримувати характеристики, що суттєво переважають показники основного металу [1].

Суттєвий інтерес до поверхневої модифікації обумовлений саме тим, що характеристики поверхневих шарів у поєднанні із властивостями основного металу визначають рівень властивостей виробів в цілому. Такий підхід є безумовно привабливим і з економічної точки зору в порівнянні із відомими способами змін об'ємних характеристик конструкційних матеріалів та готових виробів.

Таким чином, комплексне використання досягнень певних фундаментальних наук забезпечує створення і практичне використання як в основному, так і в ремонтному виробництві нових високоефективних ресурсощадних технологій керування функціональними властивостями деталей машин за рахунок спрямованого формування поверхневих шарів та управління їх властивостями.

З використанням методів інженерії поверхні на даний час вирішуються питання протикорозійного захисту, підвищення зносостійкості, покращення якості деталей машин, особливо під час експлуатації в екстремальних умовах, мінімізації забруднення навколишнього середовища, а також багато інших проблем.

Технологічні методи інженерії поверхні можна розподілити на наступні групи, а саме: методи модифікування (зміна фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів основного матеріалу); нанесення плівок, покриттів та захисних шарів; комбіновані, що поєднують методи модифікування та нанесення покриттів; управління мікротопографією поверхонь.

Останнім часом в інженерії поверхні все найчастіше використовуються методи плазмової обробки, зокрема в електролітах. Електрохімічна обробка поверхні матеріалу у високоенергетичних режимах отримала назву плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО), яке ще має назву анодно-іскрового або мікродугового [2].

Під дією короткоживучих електричних розрядів у водних розчинах електролітів при високій напрузі реалізуються електрохімічні та термохімічні реакції, що призводить до формування наноструктурованих оксидних композиційних покриттів, які за багатьма показниками перевершують покриття, сформовані в інший спосіб [2,3]. Модифікована поверхня складається із оксидної матриці основного металу, в яку інкорпоровані компоненти та переплави робочого розчину.

Даному способу поверхневої модифікації притаманні такі переваги, як простота технологічного обладнання, нетоксичність робочих електролітів, відсутність (необов'язковість) етапу попередньої підготовки поверхні деталі, можливість ефективної обробки великогабаритних та складно-профільованих виробів. Перераховані особливості характеризують процес ПЕО-обробки як економічний, екологічний та ресурсощадний.

З урахуванням викладених особливостей, ПЕО-обробка може розглядатися як комбінований метод інженерії поверхні, тому що в одному процесі поєднується модифікування поверхневого шару оброблюваного матеріалу та формування покриття з інкорпорацією компонентів електроліту та продуктів термохімічного перетворення.

На даний час технологія ПЕО достатньо повно опрацьована для групи вентильних металів (алюміній, титан, магній), про що свідчить значна кількість робіт з результатами досліджень іноземних та вітчизняних вчених. Сформовані ПЕО-покриття володіють високими показниками міцності, термічної та зносостійкості, корозійної тривкості, виявляють каталітичні властивості по знешкодженню токсичних компонентів у газовій та рідкій фазах [4].

Отримані результати дозволяють використати переваги ПЕО для підвищення експлуатаційних та ресурсних характеристик деталей автомобільної та бронетанкової техніки, зокрема поршневої групи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).

ДВЗ є силовим агрегатом більшості зразків озброєння та військової техніки. Конструкційні матеріали, що використовуються для виготовлення комплектуючих двигунів, повинні мати високу теплопровідність та міцність, зносо- та корозійну стійкість, а також низьку щільність. Найбільш повно зазначеним вимогам відповідають ливарні сплави алюмінію на основі систем Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg-Ni [5]. Оптимальне поєднання масогабаритних показників та експлуатаційних властивостей притаманно системі Al-Si. Матеріали на її основі, носять назву силумінів та найчастіше використовуються для виготовлення деталей поршневої групи силових агрегатів [6].

Слід зазначити, що в процесі експлуатації двигуна поршні піддаються впливу високих температур і тиску газів під час згоряння палива. Тому найбільш розповсюдженою причиною виходу з ладу поршня є дефекти (прогорання) його денця.

Виходячи з цього, актуальним є пошук економічно та технологічно доступних методів інженерії поверхні деталей поршневої групи ДВЗ з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей.

Мета та задачі роботи

Запропонувати спосіб ПЕО-обробки деталей поршневої групи силових установок автомобільної та бронетанкової техніки із формуванням керамікоподібних покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

провести огляд існуючих підходів використання методів інженерії поверхні деталей поршневої групи ДВЗ;

опрацювати спосіб обробки силумінів методом плазмово-електролітичного оксидування з формуванням кермакоподібних покриттів, допованих додатковими компонентами;

дослідити властивості сформованих оксидних систем.

Матеріали і методи

Керамікоподібні покриття формували на зразках поршневого сплаву АК12М2МгН (АЛ25) та серійному поршні КамАЗ-740 методом ПЕО в гальваностатичному режимі. Для нанесення кобальто- та мангановмісних покриттів використовували лужні розчини електролітів. Склад робочих розчинів та режими формування наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Склад електролітів та режими формування покриттів на поршковому сплаві АК12М2МгН (АЛ25)

№ розчину	Склад, моль/дм ³	Густина струму, А/дм ²	Напруга ПЕО, В
1	KMnO ₄ – 0.05	10...20	160...180
	NaOH – 0.005		
2	CoSO ₄ – 0.1	3...5	200...240
	K ₄ P ₂ O ₇ – 0.4		

Для формування покриттів використовували лабораторну установку, яка включала джерело постійного струму Б5-50, електрохімічну комірку з примусовим охолодженням та перемішуванням електроліту, робочі електроди. Температура розчину підтримувалась в інтервалі 20–25°C. Час формування покриттів – 30 хв.

ПЕО-обробку поршня проводили з використанням модифікованої установки підвищеної потужності для забезпечення реалізації технологічних параметрів процесу (рис. 1).



Рис. 1 – Установка для ПЕО-обробки поршня ДВЗ

Морфологію поверхні сформованих покриттів досліджували з використанням сканівного електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP (Німеччина). Топографію поверхневих шарів вивчали методом атомно-силової мікроскопії на мікроскопі НТ-206, зонд CSC-37. Хімічний склад покриттів визначали з використанням енерго-дисперсійного спектрометра Oxford INCA Energy 350 (Великобританія) з інтегрованим програмним середовищем SmartSEM.

Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгеновському дифрактометрі ДРОН-2 в монохроматизованому Co-Kα випромінненні ($\lambda = 1,7902\text{Å}$). Визначення фаз проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней та відносних інтенсивностей експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN.

Каталітичну активність керамікоподібних покриттів тестували під час стендових випробувань в процесі згоряння і каталітичного перетворення токсичних речовин в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння.

Виклад основного матеріалу

Дослідження процесів спрямованого модифікування поверхні деталей поршневої групи двигунів є актуальною практичною задачею. Відомі різні технології, що використовуються автовиробниками для зміцнення поверхонь деталей із ливарних сплавів алюмінію. Проте кожне таке технічне рішення не є універсальним та має певні обмеження.

У силових установках зразків автомобільної та бронетанкової техніки, що експлуатуються Збройними Силами України та іншими військовими формуваннями, також використовуються додаткові способи обробки деталей поршневої групи. Наприклад, алюмінієві поршні танкових двигунів 5 ТДФ та 6 ТД мають накладку зі сталі з термодифузійним хромуванням з метою підвищення міцності, поршні бензинових двигунів ЗМЗ-4905 та ЗИЛ-131 додатково вкриті шаром олова для підвищення зносостійкості, а поршень дизельного двигуна УТД-20 (5Д20) має одержаний анодуванням оксидний покриття для підвищення показників міцності та термічної стійкості [7].

У 50-ті роки ХХ століття фірмою Mahle (Німеччина) застосовувалось покриття поршнів із алюмінію твердим хромом. Для підвищення адгезії на етапі попередньої обробки наносили м'яке гальванічне залізо, після чого формували безпосередньо шар електролітичного хрому. Покриття отримав комерційну назву Chromal. Основним недоліком цього покриття була можливість розшарування в умовах експлуатації. Наступним комерційним продуктом, що використовувався у двигунах BMW, Ferrari, Citroen, Porsche та VW Group, став металокерамічний покриття Nikasil, розроблений

Mahle у 60-70-ті роки ХХ століття. Покрив “нікель-карбід кремнію” (Ni-SiC) формували гальванічним методом з осадженням шару металевого нікелю із наступним насиченням сформованої матриці карбідом кремнію. Сформовані покриття володіють високими показниками міцності та маслоємності, проте через складний та екологічно небезпечний процес одержання дана технологія не стала масовою.

Наступне покоління покриттів поршневої групи базується на насиченні поверхневих шарів ливарних алюмінієвих сплавів кремнієм. При цьому для виготовлення комплектуючих використовують силуміни із різним вмістом силіцію, піддаючи їх обробці різними способами (хімічне та лазерне травлення, електрохімічна обробка). В результаті на поверхні оброблюваної деталі формується керамічний покриття із підвищеною теплостійкістю, міцністю, зносостійкістю та корозійною тривкістю. Прикладами покриттів цього типу є Lokasil та Alusil (Kolbenschmidt), Silumal (Mahle) або їх варіації. Указані технології використовуються провідними компаніями-виробниками автомобілів, зокрема Mercedes-Benz, Honda, Porsche, Rolls-Royce Group, General Electric, BMW, Volvo, Jaguar. В той же час у відкритих джерелах відсутня інформація щодо складу та технології одержання даних покриттів через комерційну таємницю. Це свідчить про актуальність та перспективність досліджень щодо формування керамікоподібних покриттів на поршневих сплавах.

Як зазначалося вище, нами запропоновано використання технології плазово-електролітичного оксидування для формування функціональних покриттів на поршнях ДВЗ. Можливість реалізації ПЕО-обробки на прикладі деталей поршневої групи двигунів наведено у дослідженнях [8–13]. У роботі [8] надано результати досліджень щодо використання технології ПЕО для зміцнення робочих поверхонь блоку циліндрів ДВЗ. Показано технологічну можливість реалізації ПЕО великогабаритних відливків силумінів з одержанням якісного оксидного шару. Авторами [9] досліджено можливість та перспективи використання технології ПЕО для ремонту та відновлення геометрії робочих поверхонь деталей двигунів із силумінів. В роботі [10] наведено результати експериментальних досліджень щодо зміцнення поверхні поршня ASP80 зі сплавом АК12 методом ПЕО у лужно-силікатному електроліті. Під час стендових випробувань встановлено, що інтенсивність зношування поршня з нанесеним покриттям зменшується у 2.5 рази. В роботах [11,12] експериментально підтверджено підвищення ефективності та економічності ДВЗ при використанні поршнів із теплоізоляційним покриттям оксиду алюмінію, який одержують гальваноплазовою обробкою штатних поршнів двигунів. Авторами [13] встановлено зниження шляхової та транспортної витрати палива на 5-7% під час використання ПЕО-покриттів на поршнях ДВЗ порівняно із типовими поршнями двигуна.

Проведений аналіз свідчить, що найчастіше дослідниками для формування на силумінах оксидних покриттів із підвищеними теплозахисними властивостями використовуються лужні силікатні електроліти [4,14–16]. Також можливо оксидування сплавів алюмінію в електролітах-суспензіях із додаванням в базовий розчин порошків різного ступеню дисперсності [17,18]. Прогнозовано природа компонентів, що інкорпорується до складу поверхневих шарів, буде впливати на властивості сформованих керамікоподібних покриттів. Для надання модифікованої поверхні силуміну додаткових властивостей, зокрема каталітичних, використовують електроліти із додаваннями солей перехідних металів [19,20].

Саме такий підхід було обрано для одержання керамікоподібних покриттів на поршневому силуміні в даній роботі.

Результати та їх обговорення

Плазово-електролітичним оксидуванням у лужних розчинах електролітів 1 та 2 (табл. 1) на зразках поршневого сплаву АК12М2МгН (АЛ25) одержані рівномірні щільні керамікоподібні покриття.

Використання лужних комплексних електролітів дозволяє здійснювати гомогенізацію поверхні в процесі обробки, що забезпечує високу адгезію утворюваного покриття із основним металом.

Величина робочої густини струму та напруги обробки залежить від типу використовуваного електроліту. Встановлено, що для отримання покриттів достатньої товщини та задовільної якості доцільно використовувати режим падаючої потужності, коли при виході на режим інтенсивного іскріння густину струму обробки знижують для запобігання переходу процесу у дуговий режим [7,21].

Морфологія та колір поверхні оброблюваного матеріалу (рис. 2, а) змінюється із інкорпорацією додаткових компонентів до складу поверхневих шарів. ПЕО-обробка в манганомісному електроліті призводить до утворення рівномірного коричнево-чорного покриття із вмістом мангану до 35 ат.%. Поверхня покриття є мікроглобулярною, на ній візуалізується значна кількість конгломератів, що утворені дрібними сфероїдами (рис. 2, б). Оксидування в електроліті, що містить солі кобальту, дозволяє отримувати синьо-фіолетовий покриття із вмістом кобальту в поверхневих шарах до 24 ат. %. Інкорпорація кобальту відбувається у вигляді сфероїдних острівкових утворень, які в процесі оксидування вкривають всю поверхню зразка та формують мозаїчні структури. (рис. 2, в). Двостадійною послідовною ПЕО-обробкою в електролітах 1 та 2 можливо одержати дрібнодисперсний поруватий керамікоподібний покриття, що містить одночасно обидва каталітичні компоненти. Сумарний вміст кобальту та мангану в поверхневих шарах досягає 25-30 ат. % (рис. 2, з).

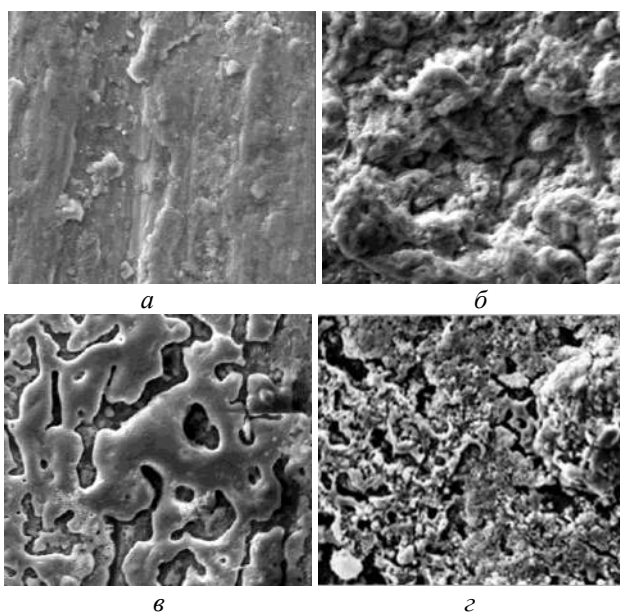


Рис. 2 – СЕМ-зображення поверхні керамікоподібних покриттів, сформованих ПЕО-обробкою на АК12М2МгН (АЛ25): а – Al, б – Al | Al₂O₃·MnO_y, в – Al | Al₂O₃·CoO_x, з – Al | Al₂O₃·CoO_x, MnO_y. Збільшення × 1000.

За результатами аналізу хімічного складу сформованих покриттів встановлено, що в поверхневих шарах вміст силіцію (Si) складає до 3 ат.%. Це позитивно впливає на теплозахисні властивості утворених керамікоподібних шарів, а також істотно не знижує каталітичну активність інкорпорованих металів-допантів.

Сформовані керамікоподібні покриття мають високий ступінь розвинення поверхні, що підтверджено результатами досліджень топографії поверхневих шарів контактним методом (рис. 3).

Поверхневі керамікоподібні шари складаються з агломератів зерен, розмір яких коливається в межах 100-200 нм та може сягати 400 нм.

Показники шорсткості (R_a та R_q) для розглянутих систем не перевищують: 0.05 – 0.06 мкм для покриттів, допованих манганом, та 0.3 – 0.4 мкм для покриттів, допованих кобальтом.

Результати рентгеноструктурного аналізу модифікованої поверхні поршневого силуміну свідчать, що у поверхневих шарах окисданого сплаву крім алюмінію присутні фази Si та α -Al₂O₃, а сформовані покриття містять оксиди металів-допантів (рис. 4). Інтенсивність ліній на дифрактограмах є відображенням кількісного складу сформованих систем.

Формування керамікоподібних ПЕО-структур відбувається у нерівноважних умовах, про що свідчить аморфне гало на кутах $2\theta \sim 20^\circ$ на рентгенограмах, а також утворення оксидів металів-допантів різної валентності. Одержані результати корелюють з даними для оксидних ПЕО-систем на сплавах алюмінію та інших вентильних металів [22].

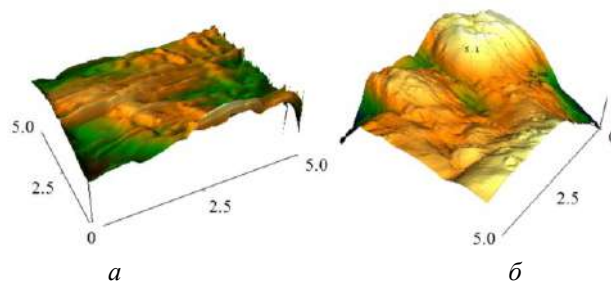


Рис. 3 – 3D-карта поверхні ПЕО-покриттів, на АК12М2МгН (АЛ25): а – Al | Al₂O₃·MnO_y, б – Al | Al₂O₃·CoO_x. Область сканування 5мкм×5мкм.

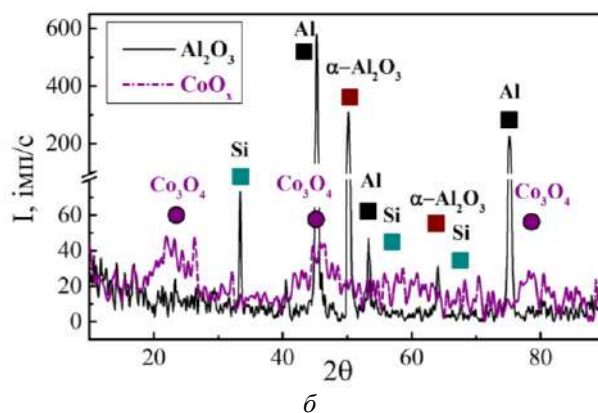
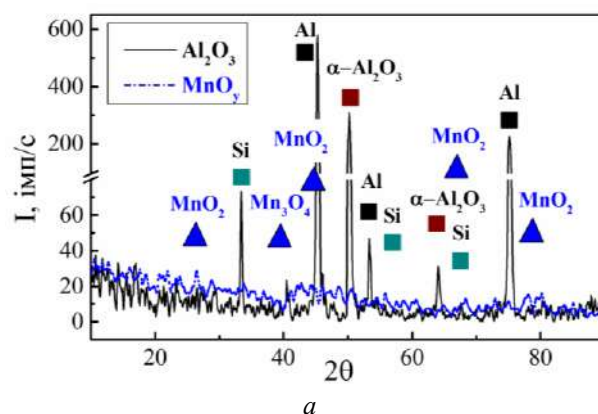


Рис. 4 – Рентгенограми керамікоподібних покриттів, сформованих на АК12М2МгН (АЛ25): а – Al | Al₂O₃·MnO_y, б – Al | Al₂O₃·CoO_x.

Особливості фазової структури модифікованої поверхні силуміну у сукупності із розвинутою поверхнею та значним вмістом оксидів каталітичних компонентів є передумовою високих функціональних властивостей сформованих керамікоподібних покриттів.

Апробація можливості використання розробленого підходу для модифікування поверхні поршнів ДВЗ здійснювалась шляхом ПЕО поршня двигуна КамАЗ-740, виготовленого зі сплаву АК12М2МгН, з формуванням оксидних покриттів на денці поршня (рис. 5) [23].

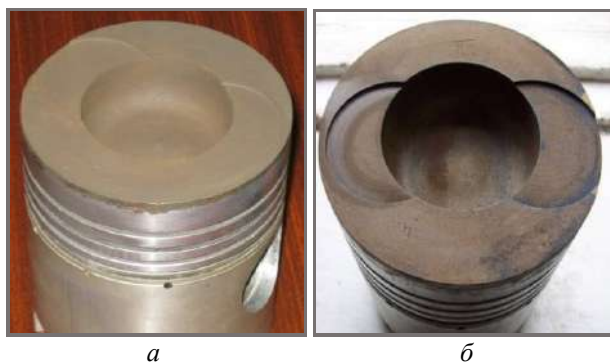


Рис. 5 – Поршень КамАЗ-740 зі сформованим керамікоподібним покритвом:
а – $Al_2O_3 \cdot MnO_x$, б – $Al_2O_3 \cdot MnO_x \cdot CoO_y$.

Встановлено, що використання керамікоподібних покриттів поршня ДВЗ приводить до зниження температури запалювання паливної суміші. За рахунок теплоізоляційних властивостей шару каталітичного покриття для всіх досліджених оксидних систем зменшується витрата повітря порівняно з поршнем з необробленою поверхнею.

Завдяки особливостям процесів каталітичного горіння палива у пристінкових зонах камери згорання ДВЗ скорочується фаза некерваного горіння палива і час його згорання. Встановлено зниження годинної витрати палива в межах 1-4%. Найвищі показники паливної економічності демонструє поршень із керамікоподібним шаром нестехіометричних оксидів мангану. Зниження температури горіння виключає можливість участі азоту повітря у газофазових реакціях. Значені особливості процесу горіння та каталітичні процеси на поверхні оксидних покриттів поршня забезпечують зниження кількості токсичних газових викидів двигуна. Найвищу каталітичну дію проявляють змішані оксидні системи з кобальтом. Поршень із покритвом $Al_2O_3 \cdot CoO_x$ дозволяє знизити викиди NO_x в межах 10% та CO – 15-18%, тоді як для манган-вмісних оксидних покриттів ці показники є істотно нижчими.

Таким чином, ПЕО-обробка поршнів ДВЗ дозволяє формувати манган- та кобальтвмісні керамікоподібні покриття із високими каталітичними властивостями. Указані системи можуть знайти застосування в технологіях внутрішньоциліндрового каталізу з метою зниження токсичності викидів двигунів та підвищення їх паливної економічності, зокрема для двигунів В-46 (В-84), УТД-20, КамАЗ-740, ЯМЗ-238, тощо.

Впровадження запропонованого технічного рішення щодо обробки серійних поршнів ДВЗ дозволить підвищити паливну економічність та термін експлуатації поршневих двигунів, знизити кількість токсичних газових викидів.

Перспектива подальших досліджень пов'язані із адаптацією запропонованого підходу для поверхневого модифікування (обробки) інших

конструкційних матеріалів, а також розширення кола металів-допантів. Це дозволить підвищити функціональні властивості оброблюваних матеріалів та розширити сферу використання змішаних оксидних систем.

Висновки

1. В роботі проведено огляд існуючих підходів використання методів інженерії поверхні деталей поршневої групи двигунів внутрішнього згорання. Показано, що застосування процесів спрямованого модифікування поверхні дозволяє підвищити показники міцності та зносостійкості деталей, розширити їх функціональні властивості.

2. Опрацьовано спосіб поверхневої обробки поршневого силуміну у лужних електролітах методом ПЕО. Показано, що в запропонованих режимах можливо формувати рівномірні щільні міцноадгезовані з основним металом керамікоподібні покриття, доповані додатковими компонентами.

3. Сформовані оксидні системи на поршневих алюмінієвих сплавах мають підвищені механічні властивості. Завдяки інкорпорації оксидів мангану та кобальту до складу поверхневих шарів модифікована поверхня набуває каталітичної активності. Це робить запропонований підхід ПЕО-обробки перспективним для використання у внутрішньоциліндровому каталізі з метою зниження токсичності газових викидів двигунів та підвищення їх паливної економічності.

Список літератури

1. Суслів, А. Г. Инженерия поверхности деталей: Монография / А. Г. Суслів, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов, С. Г. Бишутин. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / под общ. ред. И. В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 2. – 512 с.
3. Gupta, P. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview / P. Gupta, G. Tenhundfeld, E. O. Daigle, D. Ryabkov // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 201, Issue 21. – P. 8746–8760. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
4. Rudnev, V. S. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties / V. S. Rudnev, I. V. Lukiyanchuk, M. S. Vasilyeva, M. A. Medkov, M. V. Adigamova, V. I. Sergienko // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307, Part C. – P. 1219–1235. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
5. Glazoff, M. V. Casting Aluminum Alloys / M. V. Glazoff, V. S. Zolotarevsky, N. A. Belov. – Elsevier, Oxford, 2007. – 544 p.
6. Okada, A. Innovative materials for automotive industry / A. Okada. – New York: Nova Science Publishers, 2010. – 147 p.
7. Каракуркчі, Г. В. Підходи щодо підвищення паливної економічності двигунів внутрішнього згорання бронетанкового озброєння та автомобільної техніки / Г. В. Каракуркчі, М. Д. Сахненко, М. В. Вель, А. С.

- Горохівський, В. М. Щокін** // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2016. – № 2(46). – С. 26-31.
8. **Криштал, М. М.** О применении технологии микродугового оксидирования для ремонта и восстановления изделий из силуминов / **М. М. Криштал, И. С. Ясников, П. В. Ивашин, А. В. Полунин** // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. – 2012. – № 3 (34). – С. 225–228.
9. **Криштал, М. М.** Использование технологии микродугового оксидирования при разработке ДВС с блоком цилиндров из алюминиевого сплава / **М. М. Криштал, П. В. Ивашин, П. В. Коломиец** // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 12, № 4. – С. 242–246.
10. **Бутусов, И. А.** Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость поршня ДВС / **И. А. Бутусов, Н. Ю. Дударева** // *Наука и образование*. – 2013. – № 9. – С. 127–144.
11. **Марченко, А. П.** Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС / **А. П. Марченко, В. В. Шпаковский** // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – № 2. – С. 24–28.
12. **Марченко, А. П.** Підвищення економічності бензинового двигуна на різних режимах роботи при застосуванні частково-динамічної теплоізоляції поршнів / **А. П. Марченко, В. В. Шпаковский, В. В. Пильов** // *Вісник НТУ «ХПИ»*. – 2013. – № 32 (1005). – С. 106–110.
13. **Степанов, В. А.** Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей микродуговым оксидированием днищ поршней двигателей / **В. А. Степанов** // *Science and world*. – 2014. – № 1 (5). – С. 115–117.
14. **Dudareva, N. Yu.** The Structure of Plasma-Electrolytic Coating Formed on Al-Si alloys by the Micro-Arc Oxidation Method / **N. Yu. Dudareva, M. M. Abramova** // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2016. – Vol. 52, Issue 1. – P. 128–132. – doi:10.1134/S2070205116010093.
15. **Ivashin, P. V.** The influence of SiO₂ nanoparticles addition into electrolyte on the thermal conductivity of oxide layer formed on eutectic aluminum-silicon alloy by PEO / **P. V. Ivashin, A. V. Polunin, A. Y. Tverdokhlebov, E. D. Borgardt, M. M. Krishtal** // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1121*. – 2018. – P. 012014. – doi: 10.1088/1742-6596/1121/1/012014.
16. **Rogov, A. B.** Plasma electrolytic oxidation of A1050 aluminium alloy in homogeneous silicate-alkaline electrolytes with edta4-complexes of Fe, Co, Ni, Cu, La and Ba under alternating polarization conditions / **A. B. Rogov** // *Materials Chemistry and Physics*. – 2015. – Vol. 167. – P. 136–144. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2015.10.020.
17. **Malyshev, V. N.** Features of Microarc Oxidation Coatings Formation Technology in Slurry Electrolytes / **V. N. Malyshev, K. M. Zorin** // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 254, Issue 5. – P. 1511–1516. – doi: 10.1016/j.apsusc.2007.07.079.
18. **Borisov, A. M.** Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review / **A. M. Borisov, B. L. Krit, V. B. Lyudin, N. V. Morozova, I. V. Suminov, A. V. Apelfeld** // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2016. – Vol. 52, Issue 1. – P. 50–78. – doi:10.3103/S106837551601004X.
19. **Rudnev, V. S.** Iron- and Nickel-Containing Oxide-Phosphate Layers on Aluminum and Titanium / **V. S. Rudnev, V. P. Morozova, T. A. Kaidalova, P. M. Nedozorov** // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2007. – Vol. 52. – №9. – P. 1350–1354. – doi: 10.1134/S0036023607090069.
20. **Lukiyanchuk, I. V.** Plasma electrolytic oxide layers as promising systems for catalysis / **I. V. Lukiyanchuk, V. S. Rudnev, L. M. Tyrina** // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307, Part C. – P. 1183–1193. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.076.
21. **Ved', M. V.** Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety / **M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurkchi, T. Yu. Myrna** // *Functional Materials*. – 2017. – Vol. 24, No. 2. – P. 303–310. – doi: 10.15407/fm24.02.303.
22. **Karakurkchi, A.** Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis / **A. Karakurkchi, M. Sakhnenko, M. Ved, A. Galak, S. Petrukhin** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 5/10 (89). – P. 12–18. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.109885.
23. **Parsadanov, I. V.** Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines / **I. V. Parsadanov, N. D. Sakhnenko, M. V. Ved', I. V. Rykova, V. O. Khyzhniak, A. V. Karakurkchi, A. S. Gorohivskiy** // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2017. – Vol. 52, No 6. – P. 145–151.

References (transliterated)

1. **Suslov, A. G., Bezjazychnyj, V. F., Panfilov, Ju. V. Bishutin, S. G.** *Inzhenerija poverhnosti detalej: Monografija [Surface engineering of details: Monograph]*. M.: Mashinostroenie, 2008, 320 p.
1. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov: v 2 t.* I. V. Suminov (ed.) [Plasma-electrolytic modification of metals and alloys surface: in 2 vol.]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2011, T. 2, 512 p.
2. **Gupta, P., Tenhundfeld, G., Daigle, E. O., D. Ryabkov** Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surface and Coatings Technology*, 2007, **201**(21), 8746–8760, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
3. **Rudnev, V. S. Lukiyanchuk, I. V., Vasilyeva, M. S., Medkov, M. A., Adigamova, M. V., Sergienko, V. I.** Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties. *Surface and Coatings Technology*, 2016, **307**(Part C), 1219–1235, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
4. **Glazoff, M. V., Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A.** Casting Aluminum Alloys. Elsevier, Oxford, 2007, 544 p.
5. **Okada, A.** Innovative materials for automotive industry. New York: Nova Science Publishers, 2010, 147 p.
6. **Karakurkchi, H. V., Sakhnenko, M. D., Ved', M. V., Horokhivskyy, A. S., Shchokin V. M.** Pidkhodny shchodo pidvyshchennya palyvnoyi ekonomichnosti dvyhuniv vnutrishn'oho z'horyannya bronetankovoho ozbroyennya ta avtomobil'noyi tekhniki [Approaches to improve the fuel efficiency of internal combustion engines of armored and automotive machines]. *Systemy ozbroyennya i viyskova tekhnika* [Weapons systems and military equipment]. 2016, **2**, 26–31.
7. **Krishtal, M.M., Yasnikov, I.S., Ivashin, P.V., Polunin, A.V.** О применении технологии микродугового оксидирования для ремонта и восстановления изделий из силуминов [On the application of microarc oxidation technology for the repair and restoration of products from silumins]. *Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika*

- [Aviation and rocket and space technology]. 2012, 3(34), 225–228.
8. **Krishtal, M. M., Ivashin, P. V., Kolomiets, P. V.** Ispolzovanie tehnologii mikrodogovogo oksidirovaniya pri razrabotke DVS s blokom tsilindrov iz aluminievogo splava [The use of microarc oxidation technology in the development of internal combustion engines with an aluminum alloy cylinder block]. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. 2012, 12(4), 242–246.
 9. **Butusov, I. A., Dudareva, N. Yu.** Issledovanie vliyaniya mikrodogovogo oksidirovaniya na iznosostoykost porshnya DVS [Investigation of the effect of microarc oxidation on the wear resistance of an internal combustion engine piston] *Nauka i obrazovanie [Science and education]*. 2013, 9, 127–144.
 10. **Marchenko, A. P., Shpakovskiy, V. V.** Vliyanie korundovogo sloya na rabochih poverhnostyah porshney na protsess sgoraniya v DVS [The effect of corundum on the working surfaces of the pistons on the combustion process in internal combustion engines] *Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines]*. 2011, 2, 24–28.
 11. **Marchenko, A. P., Shpakovskiy, V. V., Pyl'ov, V. V.** Pidvyshchennya ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna na riznykh rezhymakh roboty pry zastosuvanni chastkovodynamichnoyi teploizolyatsiyi porshniv [Increasing the efficiency of the gasoline engine at different operating modes when applying partially dynamic thermal insulation of pistons]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of NTU "KhPI"]*. 2013, 32(1005), 106–110.
 12. **Stepanov, V. A.** Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobiley mikrodogovym oksidirovaniem dnish porshney dvigateley [Improvement of vehicle performance by microarc oxidation of engine piston bottoms]. *Science and world*, 2014, 1(5), 115–117.
 13. **Dudareva, N. Yu., Abramova, M. M.** The Structure of Plasma-Electrolytic Coating Formed on Al–Si alloys by the Micro-Arc Oxidation Method. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2016, 52(1), 128–132, doi:10.1134/S2070205116010093.
 14. **Ivashin, P. V., Polunin, A. V., Tverdokhlebov, A. Y., Borgardt, E. D., Krishtal, M. M.** The influence of SiO₂ nanoparticles addition into electrolyte on the thermal conductivity of oxide layer formed on eutectic aluminum-silicon alloy by PEO. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1121*, 2018, 012014, doi: 10.1088/1742-6596/1121/1/012014.
 15. **Rogov, A. B.** Plasma electrolytic oxidation of A1050 aluminium alloy in homogeneous silicate-alkaline electrolytes with edta4-complexes of Fe, Co, Ni, Cu, La and Ba under alternating polarization conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, 167, 136–144, doi: 10.1016/j.matchemphys.2015.10.020.
 16. **Malyshev, V. N., Zorin, K. M.** Features of Microarc Oxidation Coatings Formation Technology in Slurry Electrolytes. *Applied Surface Science*, 2007, 254(5), 1511–1516, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.07.079.
 17. **Borisov, A. M., Krit, B. L., Lyudin, V. B., Morozova, N. V., Suminov, I. V., Apelfeld, A. V.** Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2016, 52(1), 50–78, doi:10.3103/S106837551601004X.
 18. **Rudnev, V. S., Morozova, V. P., Kaidalova, T. A., Nedorozov, P. M.** Iron- and Nickel-Containing Oxide-Phosphate Layers on Aluminum and Titanium. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2007, 52(9), 1350–1354, doi: 10.1134/S0036023607090069.
 19. **Lukiyanchuk, I. V., Rudnev, V. S., Tyrina, L. M.** Plasma electrolytic oxide layers as promising systems for catalysis. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 307(C), 1183–1193, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.076.
 20. **Ved', M. V., Sakhnenko, N. D., Karakurkchi, A. V., Myrna, T. Yu.** Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety. *Functional Materials*, 2017, 24(2), 303–310, doi: 10.15407/fm24.02.303.
 21. **Karakurkchi, A., Sakhnenko, M., Ved, M., Galak, A., Petrukhin, S.** Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 5/10(89), 12–18, doi:10.15587/1729-4061.2017.109885.
 22. **Parsadanov, I. V., Sakhnenko, N. D., Ved', M. V., Rykova, I. V., Khyzhniak, V. O., Karakurkchi, A. V., Gorohivskiy, A. S.** Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines. *Voprosy himii i himicheskoy tehnologii [Issues of Chemistry and Chemical Technology]*, 2017, 52(6), 145–151.

Відомості про авторів (About authors)

Каракуркчі Ганна Володимирівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

Ann Karakurkchi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher of Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

Сахненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Mykola Sakhnenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Ведь Марина Віталіївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5719-6284; e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua.

Maryna Ved' – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5719-6284; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Кайдалов Руслан Олегович – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри бойового та логістичного забезпечення, Національна академія Національної гвардії України; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5131-6246; e-mail: kaidalov.76@ukr.net.

Ruslan Kaidalov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Combat and Logistic Support, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5131-6246; e-mail: kaidalov.76@ukr.net.

Шаповал Олександр Миколайович – старший викладач кафедри бойового та логістичного забезпечення, Національна академія Національної гвардії України; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2845-5109; e-mail: shapoval.oleksandr@nangu.edu.ua.

Oleksandr Shapoval – senior lecturer of the Department of Combat and Logistic Support, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2845-5109; e-mail: shapoval.oleksandr@nangu.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Каракуркчі, Г. В. Технології інженерії поверхонь деталей силових установок автомобільної та бронетанкової техніки / **Г. В. Каракуркчі, М. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Р. О. Кайдалов, О. М. Шаповал** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 115-123. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15.

Please cite this article as:

Karakurkchi, A., Sakhnenko, M., Ved', M., Kaidalov, R., Shapoval, O. Surface engineering technologies of power plant items of the automotive and armored vehicles. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 115-123, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Каракурчи, А. В. Технологии инженерии поверхности деталей силовых установок автомобильной и бронетанковой техники / **А. В. Каракурчи, Н. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Р. О. Кайдалов, А. Н. Шаповал** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 115-123. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15.

АННОТАЦИЯ Проведен обзор существующих подходов использования методов инженерии поверхности деталей поршневой группы двигателей внутреннего сгорания. Показано, что применение процессов направленного модифицирования поверхности позволяет расширить функциональные свойства обрабатываемого материала, в частности повысить показатели прочности, износостойкости, коррозионной стойкости. Как эффективный метод инженерии поверхности предложено использование плазменно-электролитического оксидирования в щелочных электролитах. Особенности обработки материала в высокоэнергетических режимах под действием короткоживущих электрических разрядов заключаются в формировании наноструктурированных оксидных композиционных покрытий при электрохимических и термохимических реакциях. Благодаря своим особенностям плазменно-электролитическая обработка может рассматриваться как комбинированный метод инженерии поверхности за счет совмещения в одном процессе модифицирования поверхностного слоя обрабатываемого материала и формирования покрытий с инкорпорацией компонентов электролита и продуктов термохимического преобразования.

Предложен способ обработки поршневого силумина АК12М2М2Н в щелочных электролитах методом плазменно-электролитического оксидирования. Показано, что в гальваностатическом режиме из щелочных растворов электролитов, содержащих соли марганца и кобальта, возможно получение равномерных плотных с высокой адгезией с основным металлом керамикоподобных покрытий, допированных каталитическими компонентами, содержание которых варьируется в пределах 25-35 ат.%. Показано, что морфология и фазовая структура поверхностных слоев изменяется при инкорпорации металлов-допантов. Сформированные покрытия имеют высокую степень развития поверхности, что является предпосылкой повышенных функциональных свойств керамикоподобных покрытий. Предложенный подход использован для модификации поверхности поршня КамАЗ-740. Установлено, что использование керамикоподобных покрытий поршня двигателя приводит к снижению часового расхода топлива и количества токсичных веществ с отработавшими газами, что делает их перспективными для использования во внутрицилиндровом катализе.

Ключевые слова: инженерия поверхности; поверхностная обработка; плазменно-электролитическое оксидирование; поршневой сплав; силумин

Поступила (received) 15.02.2019