

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАЗМОВО-ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОЇ ОБРОБКИ ПОРШНЕВОГО СПЛАВУ АК12М2МГН З ФОРМУВАННЯМ КЕРАМІКОПОДІБНИХ ПОКРИВІВ

Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Парсаданов І. В.

1. Вступ

Поршень двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) є однією із найвідповідальніших деталей сучасного автомобіля, який працює в жорстких умовах при значних теплових та механічних навантаженнях. Тому до поршневих сплавів висуваються вимоги щодо легкості, міцності, низького коефіцієнту тертя, високих показників теплопровідності, зносо- та корозійної стійкості, економічної доступності та простоти технологічної обробки [1].

Повною мірою цим вимогам відповідають сплави алюмінію з силіцієм (силуміни). Високий вміст силіцію надає силуміну поліпшені ливарні властивості, дозволяє збільшити втомну міцність та знизити коефіцієнт лінійного розширення. Також до складу силумінів вводять різноманітні легуючі компоненти для забезпечення більш високої корозійної стійкості, механічної міцності та зносостійкості.

В той же час поршневим Al-Si сплавам виробництва країн ЄС та США притаманні набагато кращі експлуатаційні характеристики. Це пояснюється звуженням інтервалів варіювання основних компонентів сплаву, меншим вмістом небажаних домішок та використанням дорогих модифікаторів (ванадію, цирконію, фосфору) [2]. Проте процес виробництва таких матеріалів є високо-технологічним та більш коштовним, що здорожує вартість кінцевого продукту.

Більш раціональним підходом до підвищення робочих характеристик є модифікація робочої поверхні деталей поршневої групи ДВЗ шляхом нанесення покриттів різного функціонального призначення. Їх формування здійснюють електрохімічною обробкою деталі з нанесенням гальванічного покриття [3], лазерним легуванням (наплавленням) [4], осадженням із газової фази [5], а також плазмовим та плазмово-дуговим напилюванням [6].

Проте наразі означені технології не досить поширені через значну собівартість реалізації та технологічну складність. Тому актуальним є пошук економічно та технологічно доступних способів поверхневої модифікації деталей ДВЗ із силумінів для підвищення їх експлуатаційних властивостей [7].

Один із підходів полягає у формуванні на поверхні деталей керамікоподібних покриттів методом плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО) [8].

Спосіб полягає в оксидуванні поверхні у водних розчинах електролітів при високій напрузі під дією короткоживучих електричних розрядів. У таких високоенергетичних режимах за рахунок реалізації електрохімічних та термохімічних реакцій відбувається формування високорозвиненої оксидної матриці основного металу з інкорпорованими катіонами або переплавами компонентів електроліту [9, 10]. Перевагами даного способу поверхневої модифікації є простота технологічного обладнання, нетоксичність робочих розчинів, відсутність етапу

попередньої підготовки деталі, можливість ефективної обробки складно-профільованих та великогабаритних виробів.

Перераховані фактори характеризують процес ПЕО-обробки як економічний, екологічний та ресурсо-ощадний. Зміна умов оксидування та складу робочих розчинів дозволяє формувати покриття заданого складу і властивостей.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є процеси поверхневої обробки поршневого сплаву АК12М2МгН методом плазмово-електролітичного оксидування з формуванням керамікоподібних покриттів.

Одним із найбільш проблемних місць даного дослідження є вплив хімічного складу сплаву Al-Si на процес обробки та формування керамікоподібних покриттів. Це пов'язано з особливостями мікроструктури силумінів, що мають у своєму складі значну кількість легуючих компонентів та інтер-металічних сполук, які відрізняються хімічними властивостями та електропровідністю оксидів. В той же час евтектики і первинні виділення кремнію у структурі сплаву викликають значне окрихчення матеріалу [11].

Для встановлення закономірностей впливу вмісту кремнію в алюмінієвих сплавах на процес ПЕО-обробки поршневих сплавів проводився технологічний аудит з метою вивчення процесів поверхневої обробки методом ПЕО та формування керамікоподібних покриттів на поршневих силумінах.

В результаті аудиту встановлено, що електрохімічні технології широко використовуються для модифікації поверхні силумінів шляхом формування покриттів різного складу і призначення [12, 13]. ПЕО таких матеріалів має певні особливості у порівнянні із оксидуванням інших сплавів алюмінію.

ПЕО поршневих силумінів доцільно проводити в лужних комплексних електролітах. Це пояснюється необхідністю гомогенізації поверхні в процесі обробки та забезпечення високої адгезії оксидного покриття із носієм. Електроліти цього типу вирізняються високою стабільністю і зручністю коригування в процесі експлуатації. В той же час оксидування в таких розчинах дозволяє формувати керамікоподібні оксидні покриття, доповані різними компонентами [14, 15]. Також можуть використовуватися електроліти-суспензії на основі базового гомогенного розчину з добавками порошків різної природи і ступеня дисперсності [16, 17]. В цьому випадку крім електрохімічних і термохімічних перетворень формування покриття відбувається за рахунок механічного захоплення частинок із робочого розчину. Проте такі електроліти є менш стабільними.

До складу поверхневих оксидних шарів можуть бути введені сполуки перехідних, благородних, рідкісних і розсіяних металів, деякі неметали. Природа допантів буде впливати на фізико-механічні властивості сформованих керамікоподібних покриттів [12, 18]. Введення до складу оксидного покриття деталей поршневої групи ДВЗ каталітично активних компонентів дозволяє реалізувати процес каталітичного горіння палива з підвищенням паливної економічності та зменшенням токсичних газових викидів [19, 20].

Для плазмово-електролітичної обробки модельних зразків сплаву використовували установку (рис. 1). Лабораторна система включає джерело струму,

електролітичну комірку із охолодженням та перемішуванням електроліту, робочі електроди та прилади контролю робочих параметрів процесу.

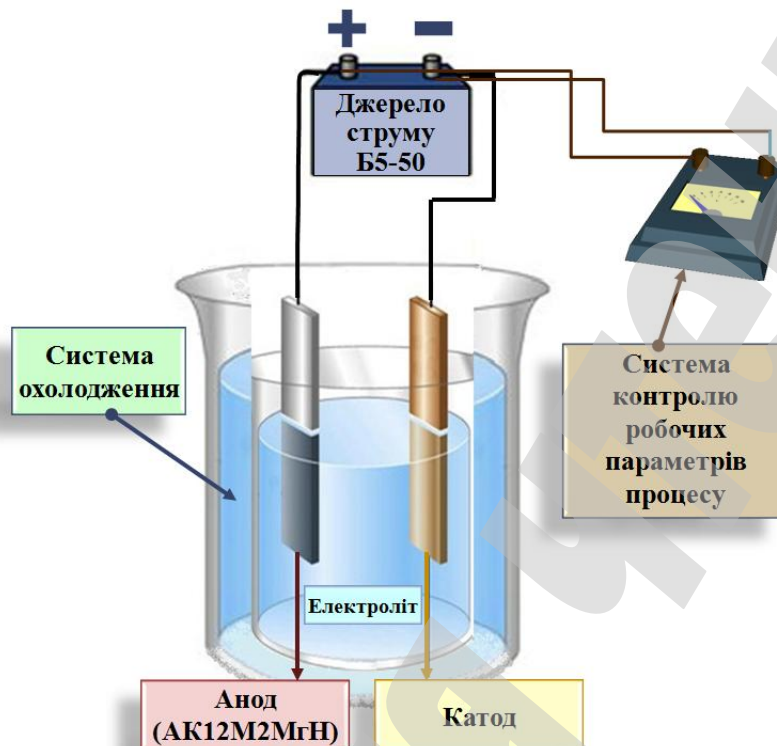


Рис. 1. Схематичне зображення лабораторної установки для плазово-електролітичної обробки модельних зразків

Для ПЕО поршня ДВЗ використовували модифіковану установку із тими самими складовими (рис. 2) підвищеної потужності для забезпечення реалізації технологічних параметрів процесу.

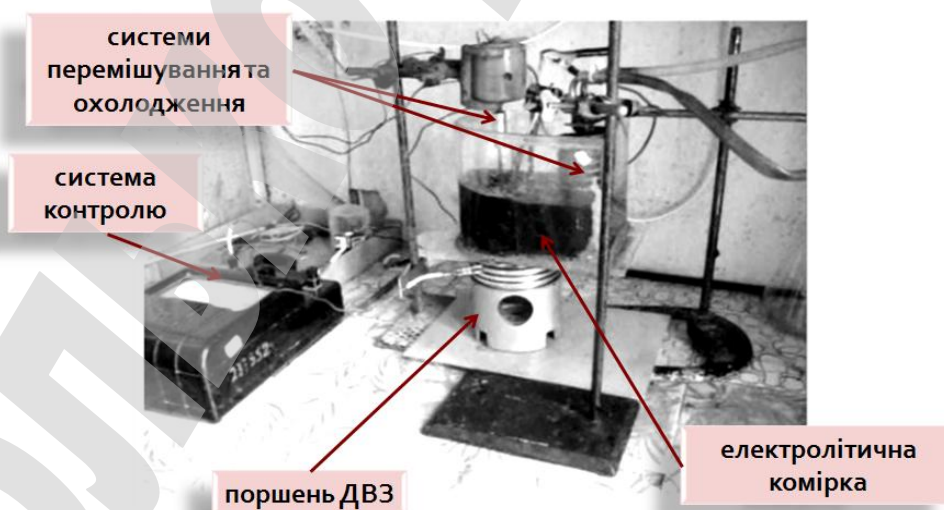


Рис. 2. Лабораторна установка для плазово-електролітичної обробки поршня двигуна внутрішнього згорання

Для досліджень використовували зразки силуміну АК12М2МгН та поршень КамАЗ 740. Хімічний склад поршневого сплаву наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву АК12М2МгН (ГОСТ 1583), %

Al	Si	Mn	Mg	Ni	Fe	Cr	Ti	Cu	Pb	Zn	Sn	Домішок
79.5–85.55	11–13	0.3–0.6	0.8–1.3	0.8–1.3	до 0.8	до 0.2	0.05–0.2	1.5–3.0	до 0.1	до 0.5	до 0.02	всього 1.3

ПЕО проводили у робочих електролітах, наведених у табл. 2. Робочі розчини для досліджень готували з використанням сертифікованих реактивів марки «хч» і дистильованої води. Використання лужних розчинів із вмістом солей перехідних металів дозволяє ефективно проводити ПЕО-обробку вентильних металів та формувати оксидні покриття зі значним вмістом допанта [10, 18].

Таблиця 2

Склад електролітів для плазово-електролітичної обробки поршневого сплаву

№ електроліту	Допуючий компонент	Склад електроліту	Концентрація компонентів, моль/дм ³	Температура електроліту, °С
1	Co	CoSO ₄	0.1	20...25
		K ₄ P ₂ O ₇	0.4	
2	Mn	KMnO ₄	0.005	
		KOH	0.05	

Оксидування здійснювали в гальваностатичному режимі з використанням стабілізованого джерела постійного струму Б5-50 (Україна). Напруга обробки складала 160–240 В, густина струму – 3...25 А/дм². Час оксидування – 30 хв. Обрані технологічні параметри є оптимальними для формування допованих кобальтом та манганом керамікоподібних оксидних покриттів [21, 22].

Підготовка поверхні зразків включала етапи механічної обробки, знежирення та промивання водою.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – удосконалити процес поверхневої обробки поршневого силуміну АК12М2МгН методом плазово-електролітичного оксидування із формуванням допованих кобальтом та манганом керамікоподібних покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Визначити технологічні особливості плазово-електролітичної обробки поршневого силуміну АК12М2МгН в лужних електролітах різного складу.
2. Дослідити вплив металів-допанта на морфологію поверхні та склад сформованих оксидних шарів.
3. Опрацювати технологію ПЕО-обробки поршня ДВЗ із формуванням керамікоподібного покриття камери згоряння.
4. Дослідити каталітичну активність одержаного покриття під час стендових випробувань поршня.

4. Дослідження існуючих підходів у вирішенні проблеми

Дослідження процесів спрямованого модифікування поверхні високо-кремністих силумінів за рахунок формування оксидних ПЕО-покривів є перспективною практичною задачею. Вміст кремнію впливає на перебіг стадій ПЕО [22]. Умови оксидування, тип робочого електроліту і природа компонентів-допантів зумовлюють склад і властивості сформованих керамікоподібних оксидних систем [10].

У роботі [23] ПЕО зразків сплаву Al-Si з вмістом кремнію 27–32 мас. % проводили в лужному силікатному електроліті. Авторами встановлено, що в процесі оксидування в іскровій та мікро-дуговій областях світіння розрядів відбувається переважно на межах включень Si. Внаслідок цього процес утворення покриву по поверхні зразка гальмується, сформований оксидний шар є нерівномірним. Морфологія утвореної поверхні характеризується наявністю великих дендритів оксиду кремнію. Для формування рівномірних оксидних покривів час обробки зразків сплаву має становити не менше 60 хв.

Схожі закономірності були виявлені авторами [24] під час дослідження процесу ПЕО литого поршневого Al-Si сплаву з вмістом кремнію 12 мас. %. Для оптимізації ПЕО-обробки дослідниками використовувався силікатний електроліт з добавками фосфату натрію. Встановлено, що частинки кремнію у складі сплаву і евтектичних Si-фаз гальмують оксидування алюмінію та впливають на склад і морфологію одержуваних покривів.

В роботі [25] відзначається, що вміст силікату в робочому електроліті впливає на тривалість процесу ПЕО-обробки високо-кремністих сплавів алюмінію, склад і товщину сформованих оксидних покривів. Це дозволяє управляти технологічним процесом плазово-електролітичної обробки силумінів за рахунок варіювання концентрації компонентів робочого розчину.

Сформовані в силікатних електролітах ПЕО-покриви на силумінах мають підвищену мікротвердість та корозійну стійкість порівняно з необробленою поверхнею [26, 27]. Проте через значний вміст кремнію в поверхневих шарах ці параметри не є оптимальними.

Для розширення спектру функціональних властивостей, зокрема ПЕО-покривів на силумінах доцільно використовувати комплексні електроліти та вводити до складу покриву додаткові компоненти. Зокрема інкорпорування оксидів перехідних металів надає окисдованій поверхні сплавів алюмінію каталітичну активність [19, 21].

Автором [28] для отримання оксидних покривів на алюмінієвому сплаві А1050 використовувалися силікатно-лужні електроліти з добавками тетрабوراتу натрію, трилону Б, оцтової кислоти і ацетатів перехідних металів. Покриви формували змінним струмом при середній густині 100 мА/см². У зазначених умовах отримані рівномірні оксидні шари з вмістом допанта 1.11–5.43 ат. %. У той же час покриви містять 8.46–13.5 ат. % Si і 8.06–32.62 ат. % карбону, що пояснюється термолізом компонентів електроліту під час ПЕО.

В роботі [29] доповані магнієм, манганом та цинком оксидні покриви на сплаві АД1 формували з поліфосфатних електролітів. Встановлено, що вміст допувальних елементів у покриві пропорційний співвідношенню концентрацій поліфосфатів та

солі металу в розчині. Фазовий склад отриманих оксидних шарів змінюється залежно від часу ПЕО і компонентного складу робочого розчину.

Поліфосфатні електроліти були використані також для отримання оксидних покривів на алюмінієвому сплаві АМцМ з високим вмістом допantu [30]. Показано, що утворення поліфосфатних комплексів з металами-допантами сприяє їх рівномірному включенню в оксидні плівки.

Таким чином, з точки зору ефективності поверхневої модифікації силумінів для їх обробки доцільно використовувати електроліти на основі комплексних сполук, зокрема поліфосфатів. В процесі оксидування це дозволяє гомогенізувати поверхневий шар сплаву за складом, зменшити вміст легувальних компонентів і створити умови для формування рівномірного оксидного покриву та інкорпорації допantu.

Оксидування зразків поршневих сплавів дозволяє розробити технологію поверхневої ПЕО-обробки деталей поршневої групи ДВЗ в цілому. Найчастіше дослідниками використовуються силікатні електроліти. В указаних розчинах формуються оксидні покриви із підвищеними теплозахисними властивостями.

Авторами [31] приведені результати досліджень з використання технології ПЕО для зміцнення робочих поверхонь блоку циліндрів ДВЗ. Показана технологічна можливість реалізації ПЕО великогабаритних відливок силумінів з одержанням якісного оксидного шару.

Робота [32] присвячена дослідженню можливості та перспектив використання технології ПЕО для ремонту та відновлення геометрії робочих поверхонь деталей двигунів із силумінів з вмістом кремнію 4–15 %.

В роботі [33] процес ПЕО-обробки штатного поршня двигуна АПД-800 зі сплаву АК12Д використовували для одержання теплозахисного оксидного шару. Оксидування проводили протягом 1,5 год. у лужно-силікатному електроліті. В результаті досліджень встановлено зменшення теплової напруги поршня з нанесеним ПЕО-покривом під час експлуатації двигуна.

Авторами в роботі [34] наведені результати експериментальних досліджень щодо зміцнення поверхні поршня ASP80 зі сплаву АК12 методом ПЕО у лужно-силікатному електроліті. Інтенсивність зношування поршня з нанесеним покривом зменшується у 2.5 рази під час стендових випробувань.

Авторами [35, 36] встановлено зниження шляхової та транспортної витрати палива на 5–7 % під час використання ПЕО-покривів на поршнях ДВЗ порівняно із типовими поршнями двигуна.

В роботах [37, 38] експериментально підтверджено підвищення ефективності та економічності ДВЗ при використанні поршнів з теплоізоляційним покривом. Корундовий шар оксиду алюмінію одержують гальвано-плазмовою обробкою штатних поршнів двигунів.

Аналіз підходів щодо ПЕО поршневих силумінів свідчить про можливість обробки вказаних матеріалів у гальваностатичному режимі та під час поляризації імпульсним струмом. При цьому в режимі постійного струму спостерігається «заліковування» дефектів оксидних покривів та формування поверхні з більш рівномірною морфологією [27].

5. Методи досліджень

Морфологію поверхні сформованих оксидних покривів досліджували з використанням сканівного електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP (Німеччина).

Топографію поверхні вивчали методом атомно-силової мікроскопії на мікроскопі HT-206, зонд CSC-37 (Білорусь).

Хімічний склад поверхневих оксидних шарів визначали з використанням енерго-дисперсійного спектрометра Oxford INCA Energy 350 (Великобританія) з інтегрованим програмним середовищем SmartSEM.

Каталітичну активність сформованих на поршні покривів тестували під час стендових випробувань в процесі згоряння і каталітичного перетворення токсичних речовин в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння. Для цього покрив безпосередньо формували на кришці поршня одноциліндрового безнаддувного дизеля. Дослідження проводили на одноциліндровому дизелі розмірністю 12/14 з поршнем серійної конструкції та з поршнем з нанесеним каталітичним покритвом за навантажувальними характеристиками при частоті обертання колінчастого валу $n=1200$ та 1400 хв^{-1} .

6. Результати досліджень

6.1. Плазмово-електролітична обробка поршневого сплаву АК12М2МгН

Під час плазмово-електролітичної обробки силумінів хронограми напруги процесу оксидування мають класичний вигляд із розділенням на доіскрову, іскрову, мікро-дугову та дугову області [14, 22]. В той же час, основні технологічні параметри ПЕО залежать від типу використовуваного електроліту (табл. 3).

Таблиця 3

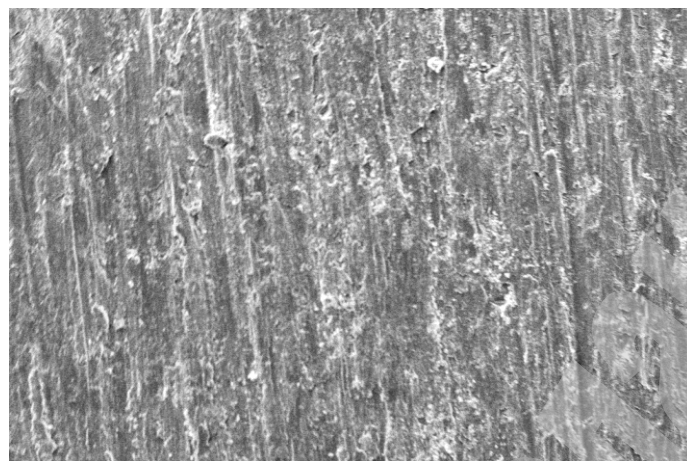
Технологічні параметри плазмово-електролітичної обробки поршневого сплаву

Електроліт	Густина струму обробки, А/дм ²	Напруга, В		Час обробки, хв
		іскріння	максимальна	
1	3...5	115...120	140...160	30...60
2	15...20	150...170	220...240	

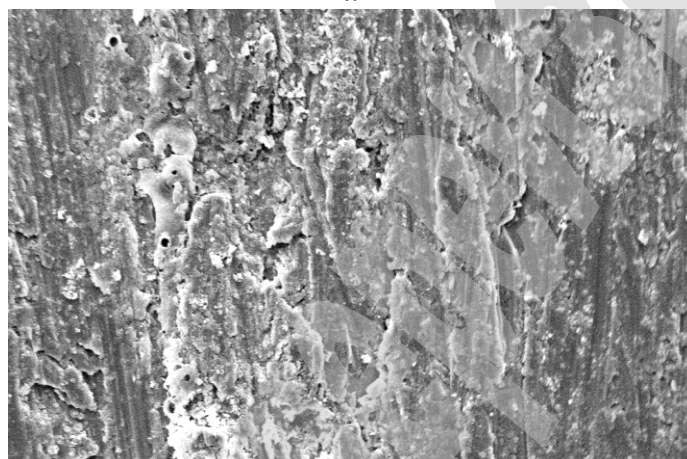
Оксидуванням у лужних розчинах електролітів 1 та 2 на зразках поршневого сплаву АК12М2МгН одержані рівномірні оксидні покриви із вмістом кобальту або мангану. Послідовним оксидуванням в електролітах 1 та 2 можливо одержати змішаний шар оксидів мангану та кобальту.

На початковому етапі ПЕО-обробки відбувається формування поверхневого шару оксиду алюмінію, який містить велику кількість включень неправильної форми (рис. 3).

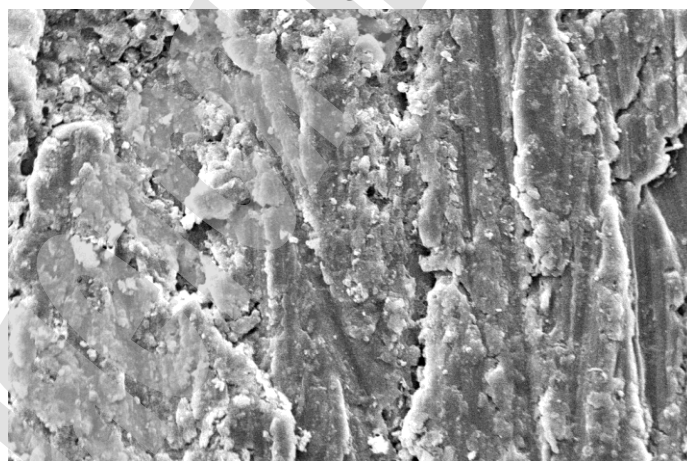
Морфологія поверхні змішаних оксидних покривів змінюється з інкорпорацією металів-допантів до матриці оксиду алюмінію.



a



б



в

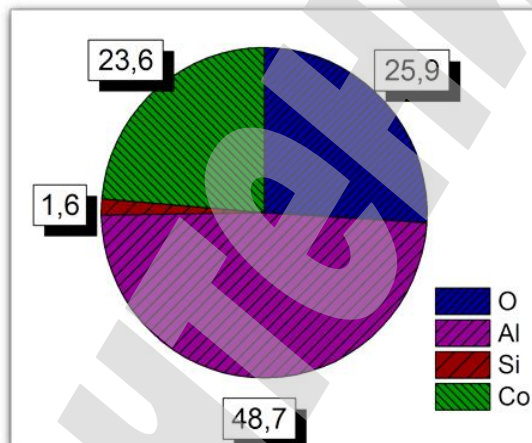
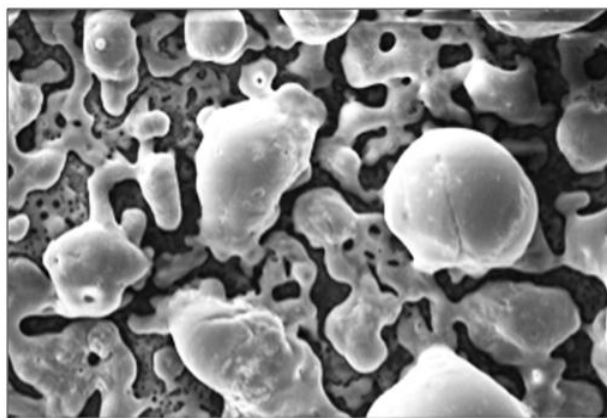
Рис. 3. Морфологія поверхні АК12М2МгН, збільшення:
a – $\times 100$, *б* – $\times 500$, *в* – $\times 1000$

Включення кобальту відбувається у вигляді сфероїдних острівкових структур синьо-фіолетового кольору. В процесі ПЕО-обробки такі мозаїчні структури рівномірно вкривають всю поверхню зразка. Вміст кобальту в поверхневих оксидних шарах сягає 24 ат. % (рис. 4, *a*).

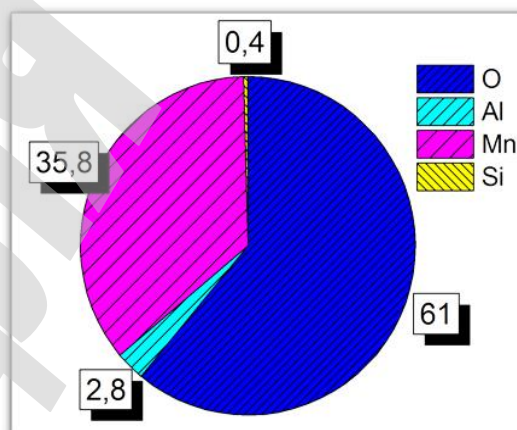
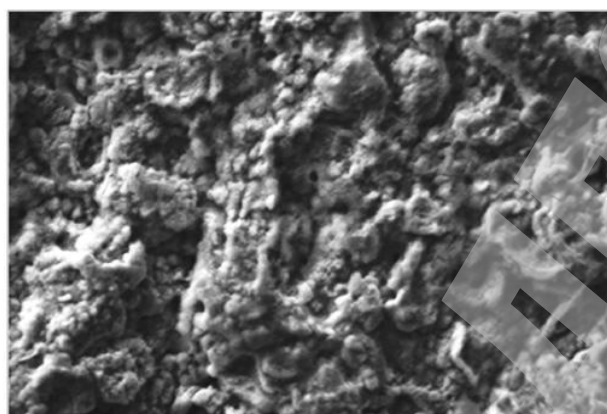
ПЕО силуміну у манганвмісному лужному електроліті забезпечує формування рівномірного коричнево-чорного оксидного шару із вмістом мангану до

35 ат. %. Поверхня покриву є мікроглобулярною, на ній візуалізована значна кількість конгломератів, утворених дрібними сфероїдами (рис. 4, б).

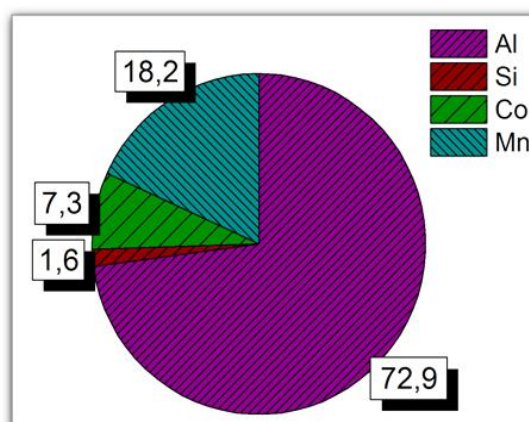
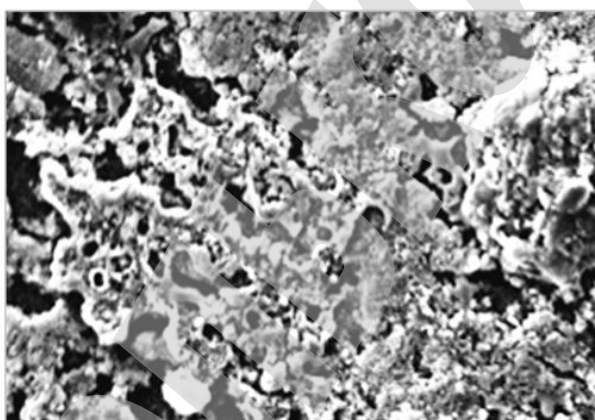
Двостадійне оксидування з формуванням змішаного шару оксидів кобальту та мангану дозволяє одержати дрібнодисперсний поруватий покрив. Сумарний вміст допантів у складі поверхневих шарів сягає 25–30 ат. % (рис. 4, в).



а



б



в

Рис. 4. Морфологія та склад оксидних покриттів на АК12М2МгН, ат. %:

а – Al | Al₂O₃·CoO_x, б – Al | Al₂O₃·MnO_y,

в – Al | Al₂O₃·CoO_x, MnO_y. Збільшення ×1000

Наведений аналіз хімічного складу сформованих керамікоподібних оксидних покриттів доводить ефективність плазово-електролітичної обробки силумінів. Вміст кремнію у поверхневих шарах не перевищує 3 ат. %, що є однією із вимог до каталітично-активних матеріалів.

Одержані оксидні покритви мають високий ступінь розвинення поверхні [39], що підтверджують результати дослідження топографії поверхневих шарів із використанням атомно-силової мікроскопії (рис. 5).

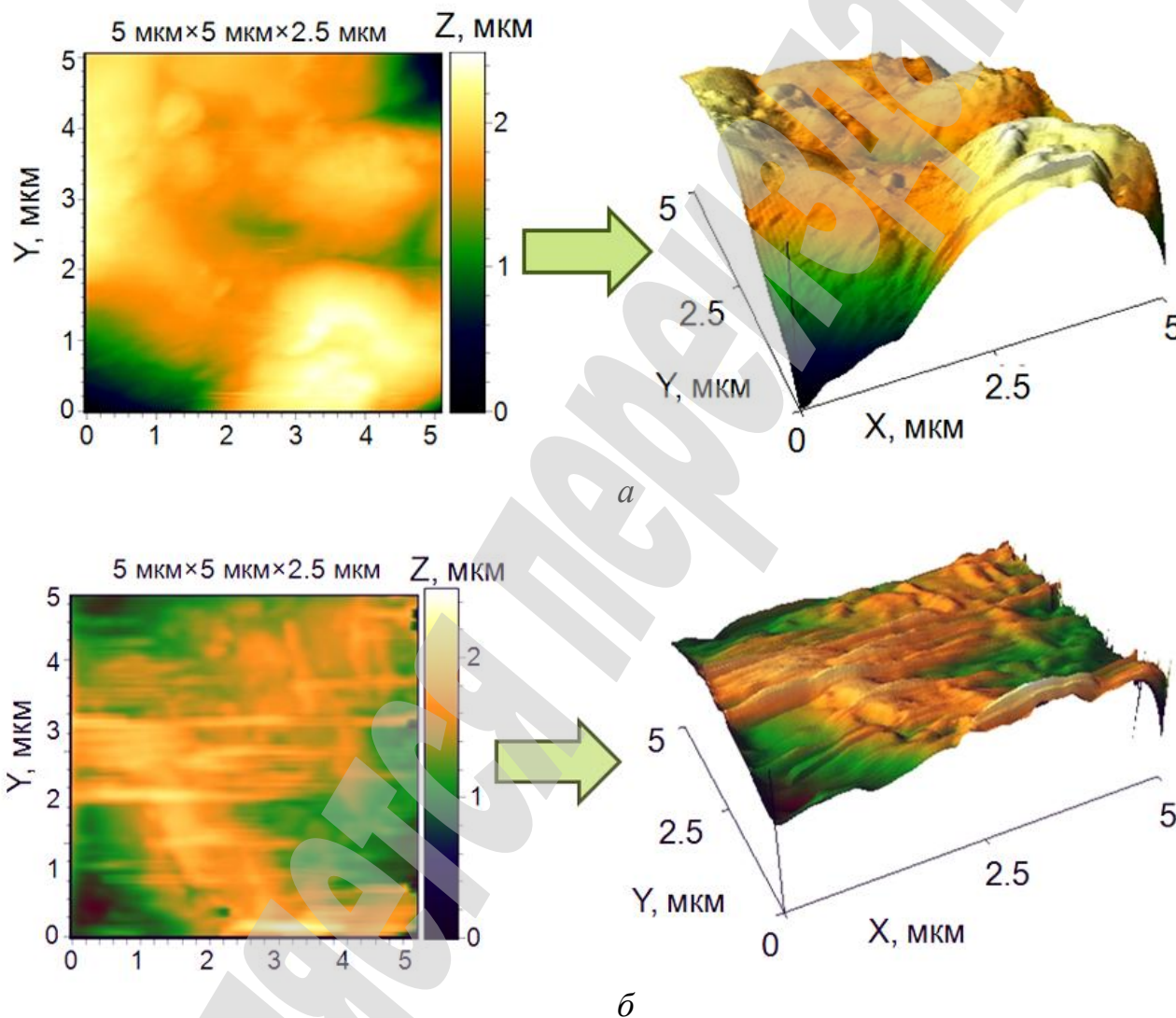


Рис. 5. 2-D- та 3-D-карти поверхні оксидних покриттів на АК12М2МгН: *а* – Al | Al₂O₃·CoO_x, *б* – Al | Al₂O₃·MnO_y. Площа сканування 5×5 мкм

В цілому одержані результати корелюють з даними для оксидних ПЕО-систем на сплавах алюмінію та інших вентильних металах [9, 21].

У поєднанні із значним вмістом допантів у складі оксидного покритву рівномірно-глобулярний характер і висока ступінь розвинення поверхні є передумовами високої каталітичної активності одержаних систем [40].

Таким чином, результати проведених досліджень враховують вплив параметрів ПЕО на хімічний склад та морфологію поверхні керамікоподібних покриттів на сплаві АК12М2МгН.

Виходячи з цього, можна рекомендувати наступні технологічні параметри для поверхневої обробки поршневого сплаву для мінімізації вмісту кремнію у поверхневих шарах та інкорпорації каталітично активних компонентів (табл. 4).

Таблиця 4

Рекомендовані параметри плазово-електролітичної обробки силуміну АК12М2МгН та формування допованих кобальтом та манганом керамікоподібних покривів

Параметр	Покрив		
	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_y$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x, \text{MnO}_y$
Склад електроліту, моль/дм ³	$\text{CoSO}_4 - 0.1$ $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 - 0.4$	$\text{KMnO}_4 - 0.005$ $\text{KOH} - 0.05$	I стадія: $\text{CoSO}_4 - 0.1$; $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 - 0.4$; II стадія: $\text{KMnO}_4 - 0.005$; $\text{KOH} - 0.05$
Температура, °C	20...25		
Режим обробки	гальваностатичний		
Густина струму, А/дм ²	3...5	15..20	I стадія – 3...5; II стадія – 15..20
Напруга, В	115...160	150...240	I стадія – 115...160 II стадія – 220...240
Час обробки, хв	30...60		
Вміст, ат. %			
допantu	до 24.0	до 36.0	Со – до 10.0 Мп – до 19.0
силіцію	до 3.0	до 0.8	до 1.8

На основі аналізу результатів досліджень визначені раціональні параметри плазово-електролітичного оксидування зразків поршневого силуміну АК12М2МН, за яких забезпечується ефективна обробка сплаву та формування керамікоподібних покривів зі значним вмістом допantів.

6.2. Формування керамічних оксидних покривів на кришці поршня двигуна внутрішнього згорання

Апробація можливості використання розробленої технології для плазово-електролітичної обробки поршнів ДВЗ здійснювалась шляхом ПЕО поршня двигуна КамАЗ-740 (Україна) з формуванням оксидних покривів на кришці поршня [19].

Для обробки була використана модернізована лабораторна установка із електролітичною коміркою необхідного розміру. За додержання запропонованих технологічних параметрів (табл. 2, 3) в цілому можлива ефективна обробка серійного поршня з формування допованих кобальтом та манганом оксидних покривів (рис. 6).

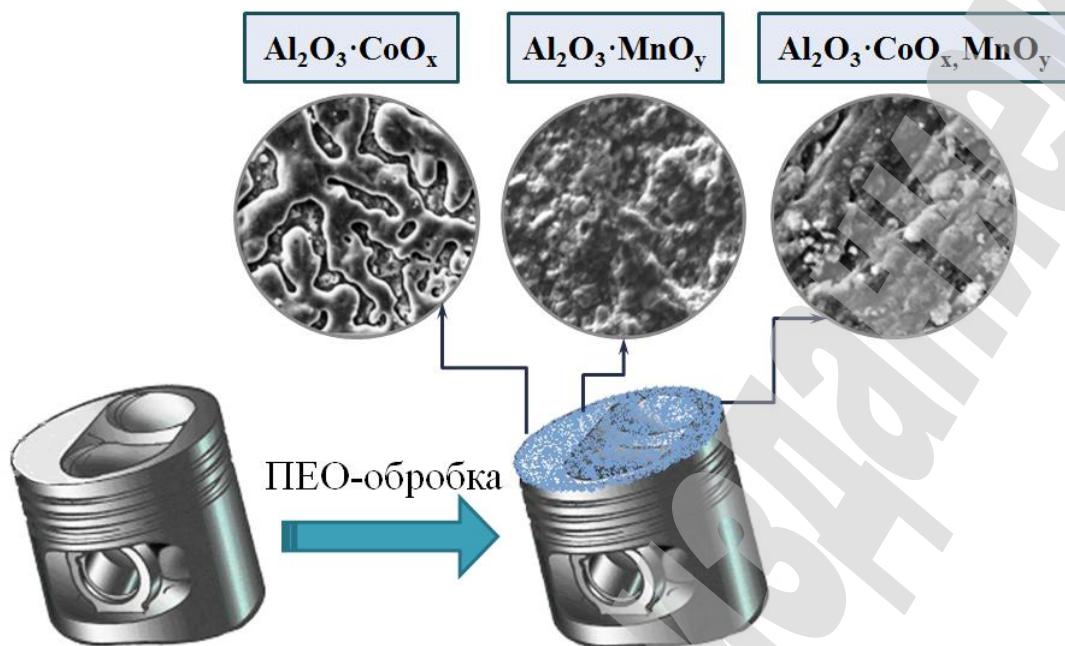


Рис. 6. Схематичне зображення поверхні поршня КамАЗ-740 (Україна) із нанесеним покритвом змішаними оксидами алюмінію з кобальтом або/та манганом. Збільшення $\times 1000$

Для одержання покриттів достатньої якості слід додержуватися температурного режиму формування та перемішування електроліту в ході оксидування.

6.3. Тестування каталітичної активності сформованих оксидних покриттів

Синтезовані осидні покритви за результатами тестування у модельних реакціях окиснення СО і бензолу характеризуються високою каталітичною активністю і не поступаються матеріалам із вмістом коштовних металів [20, 21].

Використання керамікоподібних покриттів поршня ДВЗ приводить до зниження температури запалювання паливної суміші. За рахунок теплоізоляційних властивостей шару каталітичного покритву для всіх досліджених оксидних систем зменшується витрата повітря порівняно з поршнем з необробленою поверхнею. Завдяки особливостям процесів каталітичного горіння палива у пристінкових зонах камери згоряння ДВЗ [41] скорочується фаза некерованого горіння палива і час його згоряння. 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. Зазначені 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 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x$ дозволяє знизити викиди NO_x в межах 10 % та СО – 15–18 %, тоді як для манганвмісних оксидних покриттів ці показники є істотно нижчими. Така відмінність обумовлена різною спорідненістю кобальту і мангану до кисню, а також диференціацією термічної стабільності відповідних нестехіометричних оксидів.

Таким чином, ПЕО-обробка поршнів ДВЗ дозволяє формувати манган- та кобальтовмісні 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.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відзначити отримані результати щодо узагальнення впливу основних параметрів технологічного процесу на формування допованих додатковими компонентами керамікоподібних покриттів на силумінах. Позитивним фактором є використання нетоксичних робочих розчинів для поверхневої обробки алюмо-кремнієвих сплавів.

Застосування опрацьованих технологічних параметрів дозволяє здійснювати ефективну поверхневу обробку поршневих сплавів із зменшенням вмісту кремнію до 3 ат. % та формуванням оксидних покриттів із вмістом мангану та кобальту.

Weaknesses. Слабкі сторони даного дослідження пов'язані із необхідністю використання систем контролю та підтримання технологічних параметрів процесу плазово-електролітичної обробки у вказаних інтервалах. Недодержання рекомендованих параметрів може бути однією із причин неякісної обробки та зниження вмісту каталітично активних компонентів у покриттях. В той же час, технологічний процес, який відбувається за високих напруг, потребує певних заходів безпеки з боку робочого персоналу.

Opportunities. Перспективи подальших досліджень пов'язані із адаптацією запропонованої технології для поверхневої обробки інших конструкційних матеріалів, а також розширення кола металів-допантів. Це дозволить підвищити ефективність і поширити сферу використання змішаних оксидних систем.

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

Threats. Складність у використанні одержаних результатів можуть бути пов'язані із декількома факторами. По-перше, це якість оброблюваного конструкційного матеріалу та реактивів для приготування робочих розчинів. По-друге, необхідність оснащення технологічної ділянки сучасним обладнанням. Перевагу слід надавати мобільним багатофункціональним системам із функцією програмування та автоматизації технологічного процесу.

Додаткові витрати підприємства під час впровадження запропонованого технічного рішення будуть пов'язані із закупівлею сертифікованих матеріалів, модернізацією існуючих ділянок гальванообробки та підвищення кваліфікації робочого персоналу.

8. Висновки

1. Узагальнено вплив основних параметрів плазово-електролітичної обробки поршневого силуміну АК12М2МгН у лужних електролітах із вмістом сполук мангану та кобальту. Запропоновано одностадійне оксидування силуміну в режимі падаючої потужності для формування керамікоподібних покриттів допованих оксидами мангану або кобальту.

2. Досліджено вплив металів-допантів на морфологію та склад поверхневих оксидних шарів. Керамікоподібні оксидні шари є рівномірними та мають розвинену поверхню. Вміст допантів (кобальту та мангану) становить до 30...36 ат. %, а вміст силіцію не перевищує 3.0 ат. %.

3. На підставі модельних досліджень опрацьована технологія плазмове-електролітичної обробки серійного поршня КамАЗ-740 із формуванням керамікоподібного покриття камери згоряння.

4. ПЕО-обробка поршнів ДВЗ дозволяє формувати мангано- та кобальто-вмісні керамікоподібні оксидні покриття із високими каталітичними властивостями. Найвищі показники паливної економічності на рівні 3–4 % демонструє манган-вмісна оксидна система. Під час використання поршня із покритвом оксидами кобальту зменшується емісія токсичних газових викидів: NO_x в межах 10 % та CO – 15–18 %. Запропоновані системи можуть знайти застосування в технологіях внутрішньоциліндрового каталізу з метою зниження токсичності газових викидів двигунів та підвищення їх паливної економічності.

Література

1. Belov N. A. Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminiyevykh splavov: monograph. Moscow: Izdatelskiy dom MISiS, 2010. 511 p.

2. Glazoff M. V., Zolotarevsky V. S., Belov N. A. Casting Aluminum Alloys. Oxford: Elsevier, 2007. 544 p. doi:[10.1016/b978-0-08-045370-5.x5001-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-045370-5.x5001-9)

3. Resursozaoshchadzhuvai'na tekhnolohiya vidnovlennya znoshenykh detaley / Sakhnenko M. D. et al. // Intehrovani tekhnolohiyi ta resursozberezhennya. 2013. Vol. 2. P. 9–13.

4. Kolmykov D. V., Honcharov A. N. Kombynyrovannye metody uprochneniya // Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. 2012. Vol. 6 (24). P. 46–50.

5. Mazurenko Ye. A., Herasymchuk A. I., Ovsianynkov V. P. Khimichne osadzhennia z hazovoi fazy, syntezy funktsionalnykh materialiv (ohliad) // Fizyka i khimiia tverdoho tila. 2001. Vol. 2, No. 3. P. 339–349.

6. Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process / Bobzin K. et al. // Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202, No. 18. P. 4438–4443. doi:[10.1016/j.surfcoat.2008.04.023](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.023)

7. Obzor tekhnologicheskikh meropriyatiy, napravlennykh na povyshenie nadezhnosti tsilindro-porshnevoy gruppyi dvigatelya vnutrennego sgoraniya / Nosov A. S. et al. // Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii. 2017. Vol. 3 (11). P. 80–85.

8. Okada A. Innovative materials for automotive industry. New York: Nova Science Publishers, 2010. 147 p.

9. A study of synthesis and properties of manganese-containing oxide coatings on alloy VT1-0 / Sakhnenko N. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 3, No. 5 (81). P. 37–43. doi:[10.15587/1729-4061.2016.69390](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.69390)

10. Mixed alumina and cobalt containing plasma electrolytic oxide coatings / Yar-Mukhamedova G. Sh. et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 213. doi:[10.1088/1757-899x/213/1/012020](https://doi.org/10.1088/1757-899x/213/1/012020)

11. Povyshenie resursa raboty porshney dvigateley vnutrennego sgoraniya /

Nemenenok B. M. et al. // Lite i metallurgiya. 2005. Vol. 2 (34). P. 175–178.

12. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties / Rudnev V. S. et al. // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307. P. 1219–1235. doi:[10.1016/j.surfcoat.2016.07.060](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.060)

13. Electroplating and functional properties of Fe-Mo and Fe-Mo-W coatings / Ved M. V. et al. // Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii. 2014. Vol. 5–6 (98). P. 53–60.

14. Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview / Gupta P. et al. // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201, No. 21. P. 8746–8760. doi:[10.1016/j.surfcoat.2006.11.023](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023)

15. Rogov A. B., Slonova A. I., Shayapov V. R. Peculiarities of iron-containing microplasma coating deposition on aluminum in homogeneous electrolyte // Applied Surface Science. 2012. Vol. 261. P. 647–652. doi:[10.1016/j.apsusc.2012.08.075](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.08.075)

16. Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review / Borisov A. M. et al. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2016. Vol. 52, No. 1. P. 50–78. doi:[10.3103/s106837551601004x](https://doi.org/10.3103/s106837551601004x)

17. Malyshev V. N., Zorin K. M. Features of microarc oxidation coatings formation technology in slurry electrolytes // Applied Surface Science. 2007. Vol. 254, No. 5. P. 1511–1516. doi:[10.1016/j.apsusc.2007.07.079](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.07.079)

18. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron triad / Sakhnenko M. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2, No. 11 (86). P. 4–10. doi:[10.15587/1729-4061.2017.97550](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97550)

19. Improving the environmental performance of engines by intra-cylinder neutralization of toxic exhaust gases / Parsadanov I. V. et al. // Internal Combustion Engines. 2016. No. 2. P. 63–67. doi:[10.20998/0419-8719.2016.2.12](https://doi.org/10.20998/0419-8719.2016.2.12)

20. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety / Ved M. V. et al. // Functional Materials. 2017. Vol. 24, No. 2. P. 303–310. doi:[10.15407/fm24.02.303](https://doi.org/10.15407/fm24.02.303)

21. Formation of coatings of mixed aluminum and manganese oxides on the AL25 alloy / Sakhnenko N. D. et al. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2016. Vol. 52, No. 2. P. 145–151. doi:[10.3103/s1068375516020113](https://doi.org/10.3103/s1068375516020113)

22. Kotok V., Kovalenko V., Malyshev V. Comparison of oxygen evolution parameters on different types of nickel hydroxide // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, No. 12 (89). P. 12–19. doi:[10.15587/1729-4061.2017.109770](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109770)

23. Xu F., Xia Y., Li G. The mechanism of PEO process on Al–Si alloys with the bulk primary silicon // Applied Surface Science. 2009. Vol. 255, No. 23. P. 9531–9538. doi:[10.1016/j.apsusc.2009.07.090](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.090)

24. Ceramic coating formation on high Si containing Al alloy by PEO process / Wang P. et al. // Surface Engineering. 2016. Vol. 32, No. 6. P. 428–434. doi:[10.1179/1743294415y.0000000003](https://doi.org/10.1179/1743294415y.0000000003)

25. Dudareva N. Y., 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. Vol. 52, No. 1. P. 128–132. doi:[10.1134/s2070205116010093](https://doi.org/10.1134/s2070205116010093)

26. Preparation of anti-corrosion films by microarc oxidation on an Al–Si alloy / Xue W. et al. // Applied Surface Science. 2007. Vol. 253, No. 14. P. 6118–6124. doi:[10.1016/j.apsusc.2007.01.018](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.018)

27. Anti-corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation coating formed on high Si content Al alloy by sectionalized oxidation mode / Dai L. et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 167. P. 012063. doi:[10.1088/1757-899x/167/1/012063](https://doi.org/10.1088/1757-899x/167/1/012063)

28. Rogov A. B. Plasma electrolytic oxidation of A1050 aluminium alloy in

homogeneous silicate-alkaline electrolytes with edta 4-complexes of Fe, Co, Ni, Cu, La and Ba under alternating polarization conditions // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 167. P. 136–144. doi:[10.1016/j.matchemphys.2015.10.020](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.10.020)

29. On Composition of Anodic-Spark Coatings Formed on Aluminum Alloys in Electrolytes with Polyphosphate Complexes of Metals / Boguta D. L. et al. // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2002. Vol. 75, No. 10. P. 1605–1608. doi:[10.1023/a:1022263331315](https://doi.org/10.1023/a:1022263331315)

30. Rudnev V. S. Multiphase anodic layers and prospects of their application. *Protection of Metals*. 2008. Vol. 44, No. 3. P. 263–272. doi:[10.1134/s0033173208030089](https://doi.org/10.1134/s0033173208030089)

31. O primeneniі tehnologii mikrodogovogo oksidirovaniya dlya remonta i vosstanovleniya izdeliy iz siluminov / Krishtal M. M. et al. // *Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika*. 2012. Vol. 3 (34). P. 225–228.

32. Krishtal M. M., Ivashin P. V., Kolomiets P. V. Ispolzovanie tehnologii mikrodogovogo oksidirovaniya pri razrabotke DVS s blokom tsilindrov iz alyuminievogo splava // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. Vol. 12, No. 4. P. 242–246.

33. Experimentally Studied Thermal Piston-head State of the Internal-Combustion Engine with a Thermal Layer Formed by Micro-Arc Oxidation Method / Dudareva N. et al. // *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2015. Vol. 15, No. 5. P. 115–125. doi:[10.7463/0515.0774148](https://doi.org/10.7463/0515.0774148)

34. Butusov I., Dudareva N. Influence of micro-arc oxidation on durability of IC-engine's piston // *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2013. Vol. 13, No. 9. P. 127–144. doi:[10.7463/0913.0606017](https://doi.org/10.7463/0913.0606017)

35. Stepanov V. A. Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobiley mikrodogovym oksidirovaniem dnish porshney dvigateley // *Science and world*. 2014. Vol. 1 (5). P. 115–117.

36. Povyishenie tekhniko-ekspluatatsionnykh pokazateley DVS modernizatsiey tsilindroporshnevoy gruppy / Nurutdinov A. Sh. et al. // *Vestnik SGAU im. N. I. Vavilova*. 2013. Vol. 11. P. 56–59.

37. Marchenko A. P., Shpakovskiy V. V. Vliyanie korundovogo sloya na rabochih poverhnostyakh porshney na protsess sgoraniya v DVS // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2011. Vol. 2. P. 24–28.

38. Marchenko A. P., Shpakovskiy V. V., Pylov V. V. Pidvyshchennya ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna na riznykh rezhymakh roboty pry zastosuvanni chastkovo-dynamichnoyi teploizolyatsiyi porshniv // *Visnyk NTU «KhPI»*. 2013. Vol. 32 (1005). P. 106–110.

39. Sakhnenko N. D., Ved M. V., Karakurkchi A. V. Chapter 38. Nanoscale Oxide PEO Coatings Forming from Diphosphate Electrolytes: Proceedings / ed. by Fesenko O., Yatsenko L. // *Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications*. Springer International Publishing AG, 2017. P. 507–531. doi:[10.1007/978-3-319-56422-7_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56422-7_38)

40. Synthesis of Catalytic Cobalt-Containing Coatings on Alloy Al25 Surface by Plasma Electrolytic Oxidation / Ved M. V. et al. // *Chemistry, Physics and Technology of Surface*. 2017. Vol. 82, No. 1. P. 73–79. doi:[10.15407/hftp08.01.073](https://doi.org/10.15407/hftp08.01.073)

41. Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines / Parsadanov I. V. et al. // *Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii*. 2017. Vol. 52, No. 6. P. 145–151.