

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Автомобільний транспорт»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Демченку Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Оцінка впливу мікродугового окиснення на ресурс
циліндропоршневої групи ДВЗ в КАТП «Агробудавтосервіс»»

керівник роботи: Маркович Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» ____ 2024 року

№ _____

2. Строк подання здобувачем роботи «__» _____ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: дані переддипломної практики; технологічні карти
дефектування та ремонту колінчастих валів в КАТП «Агробудавтосервіс»;
Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. – К.: Знання-
Прес, 2003. – 511 с.; Ремонт автомобілів: Навчальний посібник/ Упор. В.Я.
Чабанний. - Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. - 348 с.
Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згорання. Навчальний
посібник для здобувачів вищої освіти вищих навчальних закладів. / Укл.
Маркович С.І., Бевз О.В. - Кропивницький: ЦНТУ, 2022. - 315 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити): Вступ, реферат

- 4.1 Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень
4.2 Розділ 2. Аналіз об'єкта досліджень
4.3 Розділ 3. Дослідження впливу зміни параметрів об'єкта
4.4 Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийняття рішень
 5. Перелік ілюстративного матеріалу:
1. Назва роботи, ціль роботи, предмет та об'єкт досліджень, задачі, наукова новизна, практичне значення дослідження та публікації.
2. Ілюстративні матеріали що до обґрунтування напрямку наукових досліджень.
3. Ілюстративні матеріали що до аналізу об'єкта досліджень.
4. Ілюстративні матеріали що до дослідження впливу зміни параметрів об'єкта
5. Ілюстративні матеріали що до обґрунтування ефективності прийняття рішень
6. Висновки

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>Вступ, реферат</u>	30.10.2024 р.	
2	<u>Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень</u>	02.11.2024 р.	
3	<u>Розділ 2. Аналіз об'єкта досліджень</u>	05.11.2024 р.	
4	<u>Розділ 3. Дослідження впливу зміни параметрів об'єкта</u>	13.11.2024 р.	
5	<u>Розділ 4. Обґрунтування ефективності прийняття рішень</u>	28.11.2024 р.	
6	Формування ілюстративних матеріалів	01.12.2024 р.	

Магістрант _____
 (підпис)

ДЕМЧЕНКО А.В.
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
 (підпис)

Сергій МАРКОВИЧ
 (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Метою роботи є підвищення працездатності поверхонь (зносостійкості, корозійної стійкості та теплостійкості) деталей з алюмінієвих сплавів циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згорання методом мікродугового оксидування.

Об'єкт дослідження: процес зміцнення елементів циліндропоршневої групи з алюмінієвих сплавів мікродуговим оксидуванням.

Предмет дослідження: – залежності та закономірності впливу мікродугового оксидування поверхонь циліндропоршневої групи на ресурс двигуна.

В першому розділі обґрунтовано напрямок та визначено задачі наукових досліджень.

В другому розділі вибрана устаткування та розроблена експериментальна установки для випробувань.

В третьому розділі встановлено закономірності впливу технології мікродугового оксидування на механічні, хімічні, фізичні та експлуатаційні властивості поверхневих шарів та досліджено працездатності поверхневих шарів, в умовах роботи ДВЗ, у полі експлуатаційних режимів, та оцінити ефективність використання цієї технології у двигунобудуванні.

В четвертому розділі приведено результати та відображено ефективність проведених досліджень.

Наукова новизна. Визначено механізм формування поверхневих шарів при мікродуговому оксидуванні деталей із алюмінієвих сплавів. Шар формується при впливі на поверхню оброблюваного матеріалу іскрових розрядів, що виникають при пробіі кисневих анодних газових бульбашок, за рахунок проникнення атомів та іонів газового середовища вглиб матеріалу оброблюваного зразка за дислокаціями та межами зерен.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 69 сторінок тексту, 33 рисунків, 6 таблиць.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1	10
ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1. 1. Аналіз причин виходу з ладу гільз циліндрів	
1. 1. 1. Причини виходу з ладу гільз циліндрів	10
1. 1. 2. Умови роботи та причини виходу з ладу поршнів	12
1.2. Аналіз технологічних методів зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів	18
1.3. Актуальність теми магістерської роботи та задачі дослідження	25
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ	26
2.1. Вибір об'єкта досліджень та характеристики матеріалу деталі	26
2.2. Обладнання для нанесення покриттів МДО	27
2.3. Обладнання та методики досліджень поверхневих шарів, сформованих МДО	29
2.3.1. Обладнання та методики вимірювання мікротвердості	29
2.3.2. Обладнання та методики вимірювання товщини та дослідження мікроструктури покриття	34
2.3.3. Обладнання та методики визначення хімічного та фазового складу поверхневих шарів, сформованих методом МДО	35
2.3.4. Обладнання та методики трибологічних випробувань	36
2.3.5. Обладнання та дослідження адгезійної взаємодії	37

2.3.6. Обладнання та методики теплофізичних випробувань	38
2.3.7 Устаткування дослідження масових показників	38
2.3.8. Обладнання та методики досліджень шорсткості поверхні	40
2.3.8. Устаткування для проведення моторних стендових випробувань	40
РОЗДІЛ 3	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА	41
3.1. Дослідження процесу формування покриттів МДО	41
3.2. Дослідження мікроструктури зразків з МДО	48
3.4. Дослідження поверхневих шарів при МДО на зносостійкість	50
3.5. Дослідження поверхневих шарів поршнів з МДО на адгезійну міцність і теплостійкість	55
3.6. Аналіз результатів стендових випробувань поршнів з МДО- покриттями	60
РОЗДІЛ 4	
ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	62
4.1. Результати та ефективність проведених досліджень	62
ВИСНОВИ	64
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- МДО – мікродугове оксидування
ЦПГ – циліндро-поршнева група
АТЗ - автотранспортні засоби
АТТ - автотракторна техніка
ВМТ - верхня мертва точка
ГРМ - газорозподільний механізм
ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння
ДП - дизельне паливо
ККД - коефіцієнт корисної дії
ОГ - відпрацьовані гази
ОС - навколишнє середовище
ПА - паливна апаратура
ТО - технічне обслуговування
ТО-2 - технічне обслуговування №2
ПР - поточний ремонт
ППД – попередня пластична деформація
ПЕО – плазмово-електролітичне оксидування
РФА – рентгенофазовий аналіз
РЕМ – растровий електронний мікроскоп
СОЖ - мастильно-охолоджувальна рідина
ТКЛР – температурний коефіцієнт лінійного розширення;
ТП – технологічний процес;
ТЦ – термоциклювання;
С_{рс} - концентрація метасилікату натрію (рідкого скла) в електроліті, г/л;
С_{коп} - концентрація їдкого калію в електроліті, г/л;
З - молярна теплоємність, кДж/(моль-К);
С_р - питома теплоємність, кДж/(кг-К);

ВСТУП

Двигуни внутрішнього згоряння знайшли широке поширення не тільки на виробництві, транспорті, а й у побуті. При цьому від 30 до 50 % відмов різної техніки відбуваються через поломки двигунів [3]. Наприклад, в процесі експлуатації автотракторної техніки через поломки двигуна складають 78-95% випадків [1]. Витрати на планове та позапланове технічне обслуговування, а також ремонти швидкохідних тракторних дизелів у 1,5-2 рази перевищують витрати на їх придбання [2].

Актуальність робіт з підвищення працездатності деталей ДВЗ зростає у зв'язку з посиленням умов експлуатації сучасних високофорсованих двигунів з одночасною необхідністю зниження їхньої маси та габаритів. Деталі ДВС зазнають впливу тиску газів, сил тертя та високих температур. Особливо це актуально для деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ). Погіршує негативний вплив цих навантажень їх характер - в основному вони є циклічними і найчастіше призводять до руйнування втоми. Значний вплив на появу відмов мають і вібраційні навантаження. Загалом умови роботи деталей ДВЗ характеризуються високою тепловою та механічною напруженістю. З вищевказаних причин підвищення працездатності ДВС є одним із пріоритетних напрямків сучасного двигунобудування і ще на довгі роки залишиться актуальним науково-технічним завданням для вчених та інженерів.

Підвищення працездатності ДВС здатне дати значний економічний ефект у промисловості країни за рахунок скорочення часу простою техніки, підвищення продуктивності машин, зменшення витрат на ремонти та придбання запасних частин. Підвищення працездатності та ресурсу двигунів рівноцінно збільшенню їхнього випуску [6].

Працездатність об'єктів машинобудування безпосередньо залежить від стану окремих його вузлів та деталей, безпосередньо пов'язана з умовами та режимами їх експлуатації та визначається комплексом критеріїв: міцністю, жорсткістю,

зносоустійкістю, вібростійкістю та теплостійкістю. Для вузлів та деталей ДВЗ працездатність забезпечується високими значеннями поверхневої зносоустійкості (для деталей вузлів тертя), корозійної стійкості (для деталей, що функціонують в агресивних середовищах), теплостійкості (для деталей, що працюють в умовах високих температур), а також механічними властивостями матеріалів.

Підвищення працездатності ДВС досягається переважно шляхом розробки комплексу заходів, вкладених у збільшення термінів служби окремих деталей і вузлів двигунів конструкторсько-технологічними методами. У повністю доведеної конструкції ДВС протягом ресурсу не повинні руйнуватися деталі, а довговічність повинна визначатися виключно зношуванням деталей вузлів тертя [2].

Сучасні методи поверхневого зміцнення являють собою або нанесення будь-яких захисних покриттів, або модифікування поверхонь, що труться. Загалом будь-які покриття або модифіковані поверхні деталей ДВЗ повинні забезпечувати такі якості: високу зносоустійкість; низький коефіцієнт тертя (при використанні в парах тертя); корозійну стійкість та жароміцність; високу адгезію до підкладки, особливо при високих температурах; не повинні погіршувати експлуатаційні характеристики та ефективні показники двигунів.

Всім переліченим вище вимогам відповідають покриття, або поверхневі шари, що формуються за допомогою технології мікродугового оксидування (МДО), при цьому на поверхні деталі можна створити шар із унікальними властивостями: високою мікротвердістю (до 24 ГПа), яка у 2-3 рази перевищує мікротвердість газотермічних покриттів та у 4,5 рази вище, ніж у загартованої сталі; з гарною адгезією до підкладки, яка у 3-4 рази вище, ніж у покриттів, отриманих плазмовим напиленням; з високою корозійною стійкістю; з високою зносоустійкістю, яка в 2-2,5 рази вища, ніж у загартованої сталі.

Таке поєднання властивостей багато в чому обумовлено структурою, яка, згідно з низкою досліджень, в МДО-шарах представлена дрібномасштабними порами та кристаліти з розмірами не більше 100 нм. За ГОСТ Р 9.318-2013, ці покриття є нанокристалічними, неметалевими та неорганічними. Крім цього, технологія є не витратною, екологічно безпечною і не вимагає попередньої

підготовки поверхні. Проведенню цих досліджень і присвячена дана робота.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз причин виходу з ладу елементів циліндропоршневої групи

1. 1. 1. Причини виходу з ладу гільз циліндрів

Згідно статистичних даних поломка деталей КШМ і ЦПГ приводить до виходу з ладу до 70% двигунів [1]. На поломки деталей ЦПГ припадає 44%, з них на гільзи циліндрів – 18% [32]. При цьому вихід з ладу однієї деталі викликає пошкодження ще кількох. Циліндр є однією з основних деталей корпусу двигуна. Його внутрішня поверхня спільно з днищем поршня і кришкою утворює камеру згоряння, і є напрямною, вздовж якої відбувається переміщення поршня в процесі роботи [4]. Поверхня циліндра стикається з полум'ям та гарячими газами в камері згоряння, температура яких досягає 1800-3100 К [3,8]. Деталь є однією з найбільш навантаженими деталей системи є гільза циліндрів, що зазнає впливу високих температур, дії газових сил та інтенсивного зношування в жорстких умовах масляного голодування.

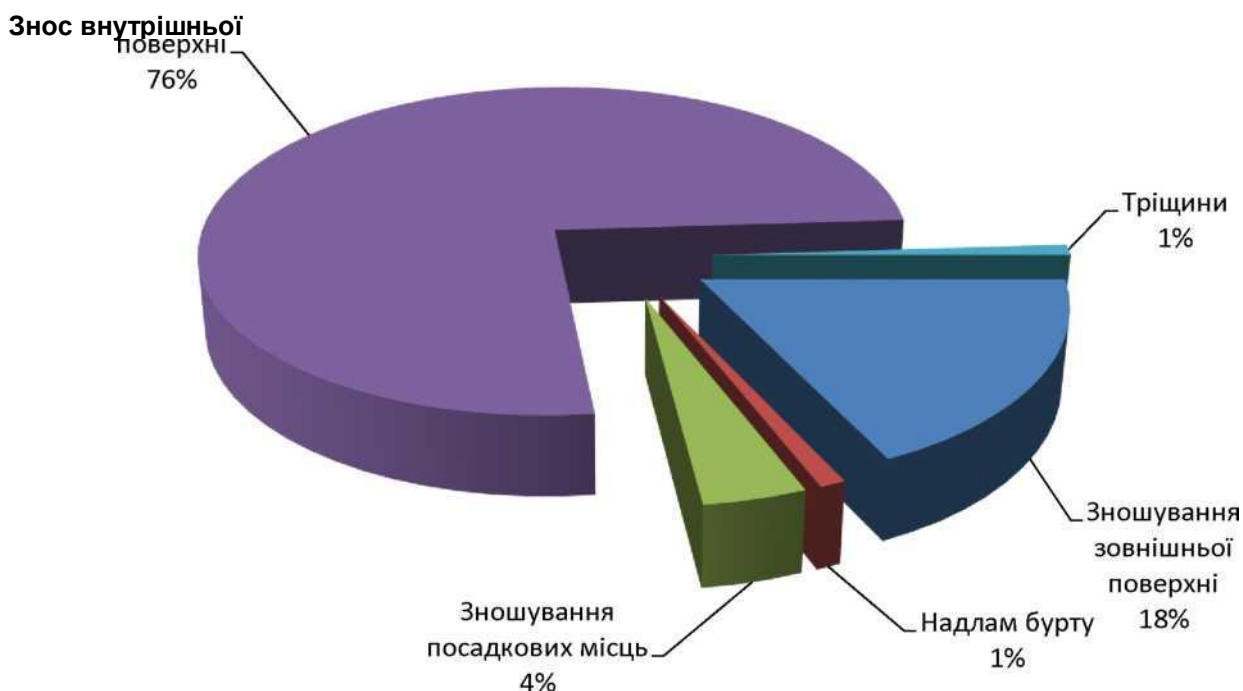


Рисунок 1.1. Основні дефекти гільз блоку циліндрів

Основні дефекти: перенесення частини матеріалу поршня на гільзу при явищах задиру; тріщини у матеріалах гільз; кавітаційне зношування та виразкова корозія зовнішньої поверхні гільз; зрив верхнього бурта гільз та спрацювання внутрішньої поверхні циліндра.

Причинами виникнення цих дефектів здебільшого [1,3,7]: недостатня зносостійкість поверхонь гільзи; низька якість та недостатня ефективність системи очищення повітря; недоліки системи мащення; низькі трибомеханічні характеристики матеріалу гільзи. Все це може викликати наступні наслідки: суттєве зниження потужності двигуна; погіршення параметрів випускних газів; збільшений прорив картерних газів, підвищена витрата оливи; підтікання олії через з'єднання у випускній системі; пришвидчене старіння олії; пускові проблеми; нестійка робота на малих обертах двигуна; форсований знос та підвищена небезпека аварій.

Внутрішня поверхня блоку циліндрів двигуна використовується як робоча поверхня досить рідко. Здебільшого в блок циліндрів встановлюється гільза, що виготовлена з відповідного матеріалу, завдяки чому забезпечується належний рівень зносостійкості. При цьому з'являється можливість організувати систему водяного охолодження. Також гільза встановлюється і на двигунах повітряного охолодження підвищення зносостійкості поверхні «дзеркала» циліндра [4; 39; 40]. Робота гільзи характеризується значними газовими навантаженнями, високою теплонапруженістю, та піддається дії сил тертя з боку поршня та поршневого кільця. Всі ці чинники викликають активний знос внутрішньої поверхні циліндра [3,9]. Зношування робочої поверхні гільзи циліндра відбувається за її довжиною нерівномірно. Найбільш несприятливі умови з погляду зносу поверхні виникають у зоні перекладки поршнів, до якої приводить поворотно-поступальний рух поршня вздовж гільзи. При цьому найжорсткіший режим спостерігається в зоні верхньої мертвої точки (ВМТ), де фіксуються високі температури, що викликають граничне або сухого тертя через вигоряння мастильного матеріалу в поєднанні «гільза – поршневе кільце».

У цій зоні також присутні частки атмосферного пилу, що потрапляють у камеру згоряння разом з повітрям [1], що викликає абразивне зношування поверхні гільзи.

Максимальна температура стінки циліндрів ДВЗ з водяним охолодженням досягає в зоні ВМТ 170-180°C, а в середньому нагріваються до 100-130°C, при цьому у двигунів з повітряним охолодженням температури гільз зазвичай на 30-40°C вище [7]. Протягом такту впуску масляна плівка розріджується робочою сумішшю, а в момент такту стиснення вона відмухується з пари і вигоряє при згорянні палива [14]. В зоні ВМТ та нижньої мертвої точки (НМТ) завжди відбувається повне або часткове руйнування масляних плівок. На малюнку 1.2 показано зміну температури, тиску та товщини масляної плівки по довжині ходу поршня, а також знос поверхні гільзи.

1. 1. 2. Умови роботи та причини виходу з ладу поршнів

Матеріали поршнів ДВЗ. Спочатку поршні ДВЗ виготовляли чавуну. Зазвичай використовувалися чавуни з пластинчастою та кулястою формою графіту, розташованої в перлітній структурі [12]. Для забезпечення високих експлуатаційних властивостей часто чавун легують Мо, V, Cr, Ni, Cu [14, с. 199]. Також для виробництва поршнів іноді використовують сталі типу 20ХЗМВФ, 20Х25Н20С2, 15ХМ, 20ХМ 49]. Однак поршні з чавуну і сталей відрізняються великою масою, що не відповідає сучасним тенденціям двигунобудування.

Виробляти поршні з алюмінієвих сплавів почали ще на початку ХХ століття для авіаційних ДВС. Після заміни чавуну на алюміній виявилось збільшення потужності двигуна на 9% [10]. На сьогоднішній день основна частка поршнів виготовляється з алюмінієвих сплавів. У таких поршнів відзначаються такі переваги:

- невелика маса, що призводить до зниження інерційних сил у кривошипно-шатунному механізмі двигуна, і, як наслідок, знижується знос поршня та гільзи;
- температура поршнів з алюмінієвих сплавів нижче, ніж у поршнів чавуну, у зв'язку з високою теплопровідністю алюмінію;

- Наслідком низької температури поршня є зменшення нагароутворення на його днищі та формування більш щільної плівки мастильного матеріалу на спідниці [14, с. 199].

Як недоліки поршнів з алюмінієвих сплавів виділяють:

- низьку жароміцність;
- високий температурний коефіцієнт лінійного розширення [14];
- низьку зносостійкість;
- недостатню втомну міцність, яка знижується при високих температурах [12];
- високу вартість [12].

Найбільш популярними марками алюмінієвих сплавів для поршнів є евтектичні та заевтектичні силуміни, які легують Cu, Ni, Mg, Fe. Поршні для форсованих ДВЗ виробляють із сплавів марок АК2, АК4, АК4-1, АК9 [14]. З огляду на недостатню зносостійкість і теплостійкість, використання алюмінієвих сплавів зазвичай обмежується температурою поршня в 350°C [4].

Таким чином, ні чавуни, ні алюмінієві сплави не відповідають повною мірою вимогам до поршні ДВС. З цієї причини на сьогоднішній день для поршнів розроблені керамічні матеріали, які найбільшою мірою відповідають експлуатаційним вимогам до поршнів, так як мають високу зносостійкість, малу щільність, високу термічну і корозійну стійкість [12]. Однак у поршнів з таких матеріалів підвищена крихкість та висока вартість.

Відомі спроби використання металокераміки для виробництва поршнів. Такий матеріал має основу з Al або Mg, в якій як наповнювач розташовуються керамічні та металеві частинки, або волокна пористого матеріалу [12]. Перспективним метало керамічним матеріалом для поршнів є алюмінієвий сплав, армований частинками або волокнами кераміки (до 50%) з оксиду алюмінію або оксиду цирконію. Основними недоліками металокерамічних композиційних матеріалів, схильність до виникнення тріщин, мала втомна міцність, висока вартість матеріалу [12]. Відомі полімеро композиційні матеріали поршнів, які складаються з полімерної основи та наповнювачів з волокон вуглецю, металевих

порошків, кераміки або скла. Такі матеріали відрізняються малою щільністю, високими антифрикційними властивостями, але мають невисоку теплостійкість. З цієї причини вони застосовуються для виготовлення окремих елементів поршня (наприклад, спідниці поршня), які не схильні до значних теплових навантажень.

Через комплекс вищезгаданих недоліків, найбільш поширеним матеріалом для виготовлення поршнів на сьогоднішній день залишаються алюмінієві сплави. На таких поршнях часто спостерігаються наступні дефекти: знос поршнів по канавках, спідниці та отворах під палець у бобишках, задираки на спідниці, прогар днища [14]. Для вирішення цих проблем використовують складові конструкції поршнів, або різні способи зміцнення поверхонь [7].

Причини виходу з ладу поршнів ДВЗ. Як показує практика, основна частка поломок двигунів пов'язана з виходом з будови поршнів. Зазвичай у поршня у процесі роботи виникають такі дефекти [1; 3; 7]:

- утворення тріщин на днищі та в районі бобишок;
- прогар днища і кромки поршня;
- пригорання кілець;
- знос і задир бічної поверхні (спідниці поршня) [10];
- розбивка поршневих канавок та поломка перемичок [14];
- знос бобишок.

Деякі з перерахованих вище дефектів (знос і задир спідниці поршня, розбивка поршневих канавок, прогар кромки) призводять до підвищення витрат мастила, прориву газів з камери згоряння, що веде до зниження потужності двигуна та інших його експлуатаційних показників. А такий дефект, як прогар днища може призвести до виходу з ладу не тільки поршня, але і двигуна в цілому.

Поршень сучасного двигуна працює при високій температурі, яка досягає 150-455С [4; 10; 7]. У цьому розподіл температури по тілу поршня відбувається нерівномірно (рис. 1.2,а). Максимальна температура спостерігається на днищі поршня (рис. 1.2,б), залежить від типу двигуна і досягає за різними джерелами до 260-450°С [4; 10; 3]. Поверхню поршня, що утворює, найбільш висока температура спостерігається в районі верхньої поршневої канавки (вогневого

пояса) і становить за різними джерелами 190-260°C [10].

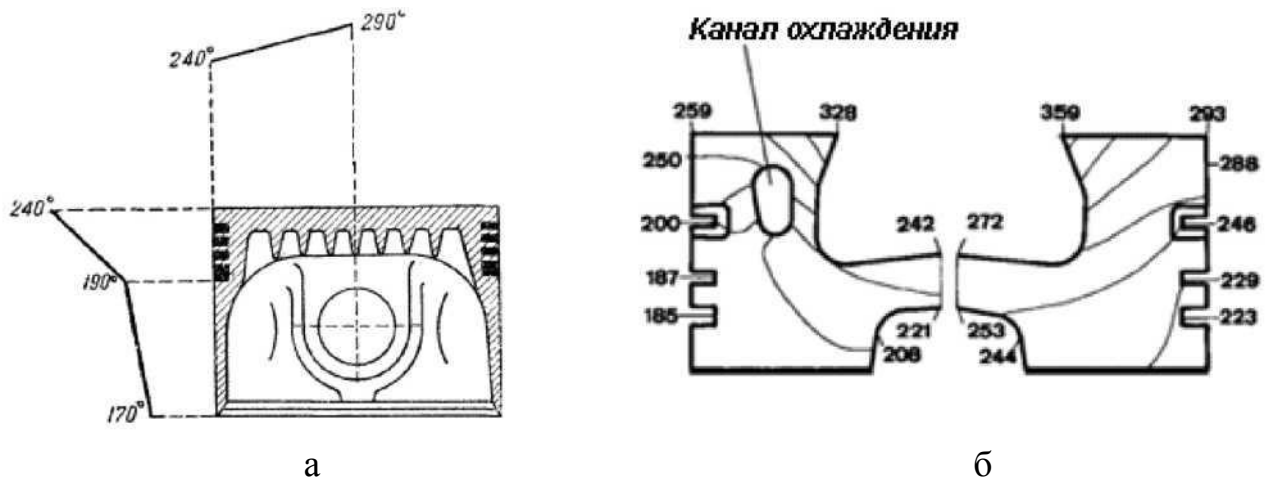


Рисунок 1.2 – Розподіл температур в алюмінієвому поршні двигуна: а – розподіл температур за даними П. І. Орлова [10, с. 222]; б - розподіл температур по днищу поршня за даними Kolbenschmidt [2]

Верхня і нижня частини поршня знаходяться в різних умовах роботи і мають самостійне призначення, тому їх розрізняють. Виділяють, перш за все, головку та спідницю поршня. Головка поршня включає днище, жаровий і ущільнювальний пояс. Уздовж осі циліндра поршень умовно поділено на три пояси [3]:

а) верхній (жаровий) пояс - від верхньої кромки днища до кромки першої поршневої канавки;

б) ущільнювальний пояс - область поршневих кілець;

в) опорний пояс – спідниця поршня.

Верхній і ущільнювальний пояс є найбільш нагрітою частиною поршня, через яку передається значна частина тепла від днища, через кільця до циліндра.

Однак температура є не єдиним негативним фактором, що діє на поршень. Поршень приймає силу тиску газів -основне механічне навантаження. На поршень також припадає найбільша кількість механічних втрат [10] (рис. 1.4).

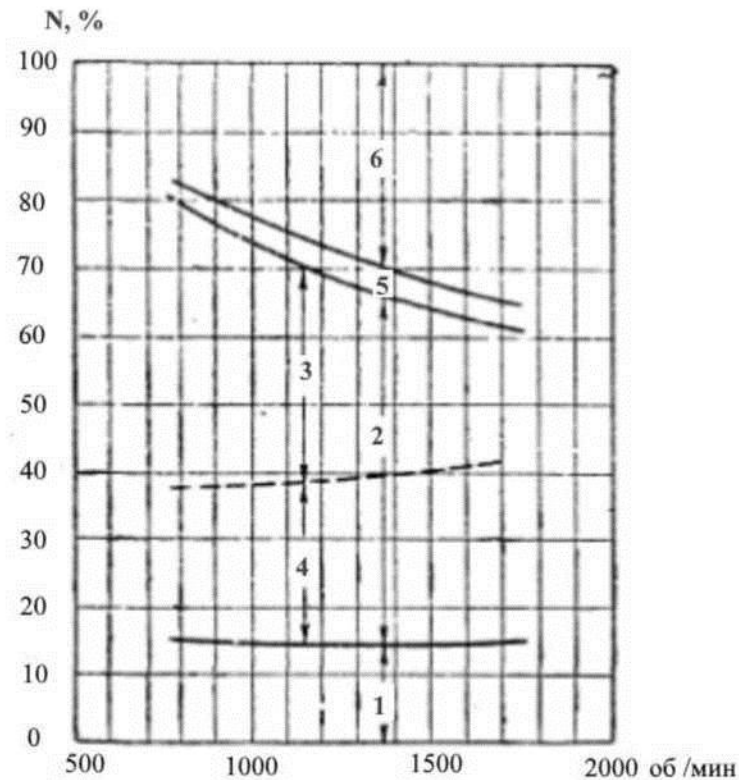


Рисунок 1.3 - Механічні втрати окремих деталей двигуна [10]: 1 - тертя в підшипниках, 2 - тертя поршнів, 3 - тертя ПК, 4 - тертя бічної поверхні поршня, 5 - втрати на агрегати та розподіл, 6 – насосні втрати

Для головки поршня (область верхнього і ущільнювального пояса) характерний знос верхньої поршневої канавки [10]., так і до поломки поршневого кільця. Розбивка поршневої канавки збільшує прорив газів із камери згоряння (КС), погіршується її ущільнення і, як наслідок, виникає зниження потужності двигуна. Крім цього поширеною поломкою поршня є прогар його днища та кромки (рис. 1.4,б).

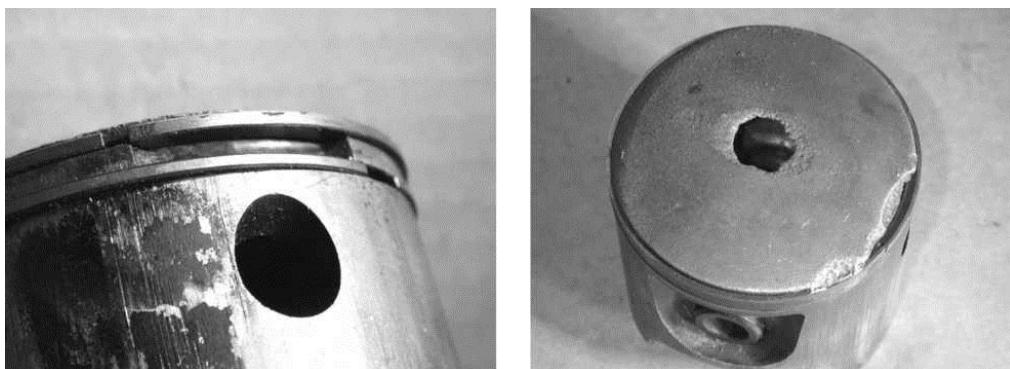


Рисунок 1.4 - Дефекти поршня: а - поршень із зруйнованою перемичкою; б - прогар днища поршня та кромки [45]

Явище прогару проявляється в результаті малоциклової термічної втоми поршневого сплаву, яка виникає в результаті аперіодичних перехідних процесів при запуску та зупинці двигуна, а також в результаті багатоциклової термомеханічної втоми, обумовленої робочим процесом двигуна [4].

Крім цього поршні ДВС схильні до корозійного впливу. Це пов'язано з агресивними властивостями палива та продуктів його згоряння. Сірка, що міститься в бензинах і, особливо, в дизельному паливі, при згорянні перетворюється на сірчистий газ і сірчистий ангідрид. При високій температурі ці речовини призводять до газової корозії, а при низькій - до рідинної. У результаті охолодження двигуна, сірчисті речовини розчиняються у воді, конденсованій на поверхні деталей КС, і утворюють сірчану та сірчисту кислоти. Ці кислоти викликають корозію поверхні [6]. Корозію викликають також окисли азоту відпрацьованих газів, самі палива та продукти окислення моторних масел [7]. На швидкість окислення істотно впливають метали деталей КС, які виступають у ролі каталізатора корозійного окислення [8].

Для забезпечення працездатності поршні ДВЗ їх поверхні повинні задовольняти наступним вимогам:

- поверхня повинна мати оптимальну шорсткість (особливо спідниця поршня);
- мати оптимальну твердість, що забезпечує можливість приробітку спідниці поршня і, при цьому, високу зносостійкість;
- повинна бути корозійностійкою до агресивних компонентів палив, масел і газів, що відпрацьовали;
- має бути теплостійкою, тобто витримувати високі температури камери згоряння (до 450-500°C).

1.2. Аналіз технологічних методів зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів

Розглядаючи способи зміцнення поршнів, були виділені способи, що використовуються для днища, жарового і ущільнювального поясів, а також для спідниці. Необхідність у такому поділі пов'язана з різкою відмінністю умов роботи цих частин поршня і, відповідно, з різним характером дефектів, що виникають. У

зв'язку з такою особливістю поршня, для кожної з цих частин використовують різні способи зміцнення. Базуючись за умов роботи поршнів, до покриття поршнів пред'являється ряд вимог. Зносостійкі покриття спідниці поршня і канавок повинні володіти [7]:

- високою опрацьованістю;
- хорошими проти задирними властивостями;
- добрими антифрикційними властивостями;
- високою пористістю та змочуваністю мастильним матеріалом.

Для зносостійких і теплозахисних покриттів поршнів актуальні також такі властивості як:

- висока адгезія покриття до підкладки, що забезпечує стійку роботу покриття протягом усього терміну служби;
- відсутність великодисперсних продуктів зношування;
- стійкість до механічних та теплових навантажень;
- висока корозійна та ерозійна стійкість;
- економічність та технологічність процесу нанесення.

Розглянемо докладніше існуючі технології зміцнення поверхонь поршнів.

Способи теплового захисту головки поршня. Для цієї частини поршня зазвичай використовують методи зміцнення, які призначені для формування теплозахисного бар'єру. Такий бар'єр формується різними способами:

- в центральній частині днища поршня встановлюють термоізолюючу керамічну накладку у вигляді перевернутого конуса, при цьому між накладкою і матеріалом поршня розташовують шар волокнистого матеріалу, який поглинає надмірну напругу, що діє на вкладку [8];

- як термоізоляція на днище поршня може наклеюватися шаркомпозиту з неорганічних металевих волокон і легкого сплаву [8];

- використовують керамічні вкладиші, які з'єднуються з поршнем механічним способом шляхом заповнення пір в керамічній частині, матеріалом поршня під час формування з підпресуванням [8];

- армують днище поршня з ливарного алюмінієвого сплаву керамічними

волокнами, або волокнами з карбїду кремнію [8];

- теплозахисний шар формують наливом і подальшою термообробкою спеціальної суспензії, що складається з органосилікатної основи, карбїду кремнію та каолінової вати [8].

Перераховані способи теплоізоляції з проміжними шарами між металом і керамікою, а також з наявністю механічного з'єднання мають серйозні недоліки. Перший недолік полягає в тому, що через коефіцієнти лінійного розширення двох матеріалів - алюмінію і кераміки - керамічна накладка в процесі роботи руйнується. Другий недолік полягає в тому, що ці технології мають високу трудомісткість і вартість. З цих причин найбільш перспективними та ефективними методами захисту поршнів є спеціальні покриття.

Як тепло- і жаростійкі покриття часто застосовують інтерметаліди, оксиди, жароміцні сталі і сплави, багато з яких також підвищують зносостійкість поверхонь. Крім цих матеріалів, для отримання жаростійких покриттів перспективні тугоплавкі карбїди різних металів, з'єднання бору та кермети. В останні десятиліття почали також використовувати металокерамічні термозахисні покриття, що захищають поверхні одночасно і від окислення, і від перегріву. Термостійкість теплозахисних покриттів багато в чому залежить від структури, фазового складу, пористості покриттів. Велике значення має геометрія поршня, швидкість його нагрівання та охолодження, вплив температури на теплоємність та теплопровідність матеріалу [7; 8].

Плазмове напилення металокерамічних сумішей та композиційних матеріалів є одним з перспективних напрямків у розробці теплозахисних термостійких покриттів поршнів. Покриття керметного складу, що формуються при цьому, мають значні термоміцність, надійність і працездатність. Застосування як металеві зв'язки в керметах Al, Cu, Ni, Mo, та інших компонентів підвищує адгезійну і термічну міцність, коефіцієнт термічного розширення, покращує структуру та якість покриттів. Значним недоліком металеві зв'язки є збільшення коефіцієнта теплопровідності покриття, а також зміна геометричних розмірів кінцевого виробу [7].

Емалювання. Досить часто для головки поршня використовують керамічні покриття на основі окису цирконію (ZrO_2) та окису алюмінію (Al_2O_3), які наносять методом емальгування, тобто спочатку обмазують поверхню керамічним складом, а потім її обпалюють. Товщина таких покриттів зазвичай становить 100-400 мкм [14]. Для того, щоб покриття ефективно забезпечувало тепловий захист поршня, коефіцієнт теплопровідності повинен бути не нижчим за $X = 1,74$ Вт/(м·К), а коефіцієнт тепловідображення не менше 0,75 [14].

Для нанесення оксидних покриттів використовують також плазмове або газополум'яне напилення складних керамічних складів [8]. Недоліком покриттів, що наносяться методом емалювання та напилення, є їх низька адгезійна міцність і недостатня термостійкість. Застосування металевих підшарів значно збільшує термостійкість таких оксидних покриттів [7].

Анодне оксидування. Нанесення оксидних покриттів також проводять електролітичним способом за технологією анодного оксидування. Ця технологія дозволяє формувати покриття, за властивостями подібні до скерамічних, але мають більшу щільність і більш високу адгезію до підкладки. Мікротвердість таких покриттів становить HV 300-600 [14]. Оксидний шар зазвичай має товщину ~80 мкм і істотно підвищує стійкість матеріалу поршня до циклічного температурного впливу [8].

Мікродугове оксидування днища поршня. Дослідження в області теплового захисту поршнів ДВС методом МДО зараз активно ведуться в різних наукових лабораторіях. Відомо про те, що в результаті нанесення на поверхню днища поршня з боку КС МДО-покриття товщиною 25-30 мкм, спостерігається зниження температури поршня з боку картеру на 24-33 °С [8]. За іншими джерелами, температура оксидованого поршня, виміряна в днище, знижується на 25% (з 150 до 110 °С) порівняно з поршнем без МДО-покриття [7]. Крім зниження температури за рахунок МДО-шару, автори робіт також зафіксували збільшення ефективної потужності двигуна на 4,8%, зменшення на 4,4% вартового та на 8,8% питомої ефективної витрати палива [7]. Ці ефекти супроводжуються зниженням вмісту ОГ оксиду вуглецю і вуглеводнів на 8 і 11 %, відповідно. Детонаційна

стійкість (кількість циклів детонації, які здатний витримати поршень до поломки міжкільцевих перемичок) упоршні з МДО на днищі також збільшилася в 2-2,5 рази [9]. Поршні з МДО на днищі також показали хорошу працездатність і довговічність при випробуваннях на спортивних автомобілях, які функціонують при екстремальних швидкісних режимах в умовах піщаних та грязьових трас [8].

Однак, незважаючи на очевидні переваги МДО-шарів, широкого поширення ця технологія для теплового захисту поршнів досі не придбала. Така ситуація пов'язана з тим, що досить довго не вдавалося сформувати якісні товстошарові МДО-покриття на алюмінієвих сплавах з високим вмістом кремнію [9]. І, якщо на сьогоднішній день насилумінах вже отримують МДО-покриття досить високої якості, то питання забезпечення задовільної адгезійної міцності при тривалій роботі в умовах мало-і багатоциклових термічних навантажень ДВЗ залишається до кінця не опрацьованим. Крім цього, недостатньо досліджено теплофізичні властивості МДО-шарів, а також їх вплив на тепловий стан двигуна.

Способи зміцнення черевця (спідниці) поршня. У цій групі покриттів можна виділити дві підгрупи виходячи з призначення: приробіткові і зносостійкі (антизадирні) покриття.

Приробітне покриття спідниці поршня. Відповідно до назви, група таких покриттів забезпечує приробіток поверхні поршня до гільзециліндра, і сприяє підвищенню зносостійкості її робочої поверхні:

- гальванічні покриття свинцем, завтовшки 5-8 мкм;
- фосфатування на глибину 3-5 мкм з подальшим нанесенням сульфідну молибдену як антифрикційне покриття;
- графітизація колоїдного розчину на глибину 8-15 мкм;
- напилення сплавів на основі міді покращує прироблюваність і задиростійкість, зазвичай для цих цілей використовується бронза Бр 0Ф-10-1;
- хімічне осадження нікелю з добавками фтору (нікель-фосфорне покриття);
- напилення капсульованих твердих мастил MoS_2 , BN , AlF_3 , CaF_2 , C та інших порошкових матеріалів.

У твердих мастил існують свої недоліки - низька теплопровідність і низький

коефіцієнт термічного розширення. Ці властивості погіршують адгезійну міцність та напружений стан таких покриттів [79, с. 138]. Тому, найбільш підходящими для поршнів властивостями володіють приробіткові покриття, що містять у своєму складі алюміній [7]. Хоча і ці покриття не мають достатньої теплопровідності і адгезією до поверхні поршня.

Антизадирні та зносостійкі покриття спідниці поршня. Як покриття, що знижують знос і запобігають задир поверхні спідниціпоршня, виділяються наступні [9]:

1. Хімічно осаджуваний нікель з незначною кількістю фосфору.

2. Плазмове напилення хрому завтовшки від 13 до 100 мкм. Такі поршні добре працюють в парі тертя як з чавунною, так і з алюмінієвою гільзою. Покриття наносять або по всій поверхні спідниці поршня, або смугами.

3. Плазмове напилення молібдену, алюмінію нікелю ($AlNi_3$), карбідаввольфраму (WC), заліза або сталі.

4. Плазмове напилення антифрикційних сплавів типу алюмінієвої бронзи або суміші бабіту з дисульфідом молібдену дозволяє підвищити зносостійкість поверхні спідниці. Переваги цього покриття полягають у його хорошій адгезії до підкладки.

5. Нанесення заліза на спідниці поршнів гальванічним методом із спеціальних електролітів. За кордоном ця технологія відома під маркою FERROSTAN. Покриття має товщину ~ 6 мкм та твердість 350-600 НВ. З метою поліпшення трибологічних властивостей поверхні таких поршнів, як фінішної операції, поверх залізо-гальванічного покриття наносять шаролова товщиною 1 мкм [85, с. 90].

У перерахованих вище покриттів, крім $AlNi_3$, є один істотний недолік - вони нижче, ніж у алюмінієвих сплавів, коефіцієнт лінійного розширення, у результаті погіршується адгезія цих покриттів до підкладці, особливо у циліндричних поверхнях, за умов високих температур і навантажень. При цьому $AlNi_3$ як покриття спідниці поршня застосовувати взагалі недоцільно через його високу твердість, крихкість і незадовільну прирабатываемость [7].

6. Напилення алюміній покриттів, що містять, з дротів складу Al-Ni (порошок AlNi80), Al-Ti (AlTi40), Al-Mo (часто використовується суміш AlMo50) електрородуговим методом. За такою технологією формуються покриття дрібно зернистою структурою та великою кількістю оксидних фаз, з міцністю зчеплення з підкладкою ~30 МПа. Однак такі покриття незадовільно працюють на форсованих двигунах, так як мають низьку твердість (HV від 70 до 80), яка при збільшенні температури знижується [7]. Звичайна товщина напилених покриттів становить 0,8 мм, мікротвердість залежить від складу напилюваного матеріалу: Al70Ti30 (HV 1200); Al50Mo50 (HV600); NiCrAl50 (HV 450) [79, с. 145].

Покриття з Al-Ti мають явні переваги, оскільки дозволяють підвищити зносостійкість поверхні в 8-10 разів у порівнянні з алюмінієвим сплавом АК4 без покриття [7]. Структура такого покриття являє собою псевдосплав типу Al₇₀Ti₃₀ [9]. Товщина таких електрометалізаційних покриттів становить від 0,3 до 0,5 мм з адгезійною міцністю від 27 до 30 МПа і твердістю HB 350, що пов'язано з великою кількістю оксидів титану. Покриття Al-Mo характеризуються середньою твердістю HB 200 [7].

7. А Diamond-Like Carbon (DLC) - технологія отримання алмазоподібних покриттів із вуглецю. Алмазоподібні покриття DLC - інноваційна розробка в області плазмового напилення алмазоподібних плівок в одному вакуумному циклі із заздалегідь заданими властивостями. За своєю суттю, це метод імпульсного розпилення графіту, який має ряд переваг, що дозволяють використовувати його в масовому виробництві. Основні переваги цього покриття: міцне зчеплення плівок з підкладкою, висока твердість, порівняна з твердістю натурального алмазу, надзвичайно низький абразивний тертя, і, як наслідок, висока зносостійкість. Крім того, метод є екологічно чистим [9].

DLC-покриття складаються з атомів вуглецю, які пов'язані між собою як алмазними, так і графітоподібними зв'язками. Покриття є аморфним за своєю структурою. DLC-покриття можна отримувати в широкій області температур, аж

до кімнатної, на різних матеріалах: металах, кераміці, склі, пластичних матеріалах.

Високий вміст атомів вуглецю з алмазними зв'язками в присутності графітоподібних зв'язків призводить до появи унікальних характеристик алмазоподібних покриттів, таких як висока твердість, низький коефіцієнт тертя (0,15-0,08) і висока зносостійкість. Ці покриття характеризуються мікротвердістю 25-60 ГПа, мають модуль Юнга від 2000 до 3500 ГПа. Товщина покриттів становить 1,5-8 мкм.

DLC-покриття забезпечують високоякісне підробіток поверхні поршнів (рис. 1.15), зменшують коефіцієнт тертя в умовах граничного і сухого тертя (до 0,1), довговічність деталей зростає в 1,5-2 рази. DLC-покриття добре працюють у парі тертя з гільзою з алюмінієвого сплаву, тим самим сприяючи поширенню таких гільз в двигунобудуванні.

Алмазоподібні покриття показали свою ефективність у захисті різних відповідальних деталей машин і механізмів, що працюють в умовах високого тертя та зносу. Можливе нанесення DLC-покриттів на рухомі деталі, що обертаються, і вузли, підшипники. Покриття використовується для підвищення зносостійкості різального інструменту та іншого технологічного оснащення.

Модифікація поверхні поршня у потоці стиснутої плазми дозволяє підвищувати триботехнічні властивості деталей з ливарних алюмінієвих сплавів і використовується для поршнів ДВЗ [9]. Суть методу полягає в обробці поверхні плазмовим струменем під тиском. Оброблювана поверхня швидко нагрівається, розплавляється і потім охолоджується. В результаті в поверхневому шарі формуються інтерметалідні фази, за рахунок чого змінюються властивості поверхні. Насамперед, підвищується мікротвердість поверхні до HV 750-883 порівняно з HV 90-130 у вихідному стані, що веде до підвищення зносостійкості [9].

8. Molykote - це група антифрикційних покриттів під єдиною торговою маркою. Покриття виготовляються на основі графіту та поліамідної зв'язки, яка твердне при нагріванні. Це покриття досить популярне завдяки цілому комплексу

переваг [8]:

- покриття забезпечує захист поршня від задирів та зносу, особливо в важких умовах роботи ЦПГ ДВС;
- підвищує несучу здатність поверхні поршня;
- прискорює процес опрацювання;
- забезпечує утримання мастила на поверхні тертя протягом тривалого часу завдяки западинам мікрорельєфу;
- знижує шум та тертя;
- знижує витрату палива;
- захищає поверхню від корозії.

Технологічний процес нанесення покриття Molykote полягає в попередньому очищенні поверхні спідниці поршня, нанесенні покриття потрафарету пензлем або розпорошенням, затвердіння покриття в сушарці при температурі 150-180°C протягом 30-120 хв [8].

Всі вищеописані способи зміцнення поверхонь поршня представлені на малюнку 1.16. Необхідно відзначити, що для формування зносостійкого шару на канавках і спідниці поршнів, технологія МДО практично не використовується.

1.3. Актуальність теми магістерської роботи та задачі дослідження

Пріоритетним напрямом у двигунобудуванні залишається підвищення працездатності деталей ДВЗ. Найбільша увага приділяється довговічності системоутворювальних деталей двигуна - деталям ЦПГ ДВС (гільзе, поршню і поршневим кільцям), які піддаються найбільш інтенсивному зносу, циклічним температурним навантаженням, механічним навантаженням від тиску газів у КС та корозійному впливу з боку палив, масел та ОГ.

Аналіз сучасних тенденцій поршневого двигунобудування показав, що використання легких сплавів на основі алюмінію для виробництва основних деталей ДВЗ постійно розширюється. Алюмінієві сплави мають низьку щільність, що дозволяє знизити масу деталей ДВС і сприяє поліпшенню питомих ефективних показників двигунів: підвищення питомої потужності, зниження питомої витрати палива. При цьому алюмінієві сплави мають достатні механічні властивості. Проте

використання їх для виробництва деталей ЦПГ ДВС стримується низькою зносостійкістю, корозійною стійкістю і теплостійкістю.

Найбільш оптимальними покриттями для деталей ДВС є керамічні матеріали, які забезпечують поверхні високу зносостійкість, корозійну стійкість і мають високу теплостійкість. Одним з найбільш перспективних методів зміцнення поверхонь деталей із алюмінієвих сплавів, що формує керамічні шари, є МДО. володіють комплексом унікальних властивостей: високою мікротвердістю та зносостійкістю, гарною корозійною стійкістю, високою адгезійною міцністю, здатні витримувати значні температури. Низький коефіцієнт теплопровідності МДО-покриттів сприяє організації ефективного теплового захисту деталей ДВЗ. Однак широке поширення цієї технології в двигунобудуванні стримується через недостатню вивченість експлуатаційних властивостей покриттів в умовах двигуна, у тому числі трибологічних, корозійностійких та теплофізичних, а також відсутністю технологічних рекомендацій щодо формування МДО-покриттів на деталях ДВС.

Використання МДО зараз стримується відсутністю даних про комплексний вплив факторів технологічного процесу на структуру та властивості покриттів, що формуються на алюмінієвих сплавах, що застосовуються в поршневому двигунобудуванні.

Існує також необхідність у розробці методології досліджень, що дозволяє визначати технологічні параметри процесу МДО для формування наноструктурних поверхневих шарів з підвищеною працездатністю для деталей ЦПГ ДВЗ, рекомендацій практичного застосування: з проектування технологічного процесу МДО; з розробки конструкцій пристроїв, для обробки різних поверхонь деталей.

Тому було сформульовано мету та завдання даної магістерської роботи.

Метою роботи є підвищення працездатності поверхонь (зносостійкості, корозійної стійкості та теплостійкості) деталей з алюмінієвих сплавів циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згоряння методом мікродугового оксидування.

Для досягнення мети було поставлено та вирішено такі завдання:

1. На основі аналізу фізичних та електрохімічних аспектів технології МДО уточнити механізм формування поверхневих шарів на алюмінієвих сплавах для створення покриттів із необхідними експлуатаційними властивостями.
2. Розробити методологію комплексних досліджень, що дозволяє визначати режими МДО для формування поверхневих шарів на поршнях ДВС з метою підвищення їх працездатності.
3. Встановити закономірності впливу технології мікродугового оксидування на механічні, хімічні, фізичні та експлуатаційні властивості поверхневих шарів, що формуються, і на цій основі обґрунтувати можливість підвищення працездатності деталей ДВЗ цією технологією.
4. Провести дослідження працездатності поверхневих шарів, сформованих методом мікродугового оксидування, в умовах роботи ДВЗ, у полі експлуатаційних режимів, та оцінити ефективність використання цієї технології у двигунобудуванні.
5. Розробити рекомендації для практичного застосування технології мікродугового оксидування в двигунобудуванні та інших галузях техніки.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вибір об'єкта досліджень та характеристики матеріалу деталі

Одним з важливих факторів, що впливають на формування МДО-шару необхідної якості, є хімічний склад матеріалу, що обробляється. В якості матеріалів для проведення досліджень були обрані алюмінієві сплави, які набули найбільш широкого поширення в сучасному поршневому двигунобудуванні.

Лабораторні та експериментальні зразки виготовлялися із алюмінієвого сплаву АК4-1. Сплав АК4-1 є сплавом, що деформується. При досить високих механічних характеристиках [2] він володіє незначним коефіцієнтом лінійного теплового розширення $\alpha = (23,4-26,7) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [2]. так як це дозволяє мінімізувати теплові зазори і забезпечити найкращий тепловий стан двигуна.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад сплавів АК4-1

Елементи, масова частка, %												
Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Gr	Ni	Zk	B	Інші домішки
Інше	1,9 - 2,7	1,2 - 1,8	0,2	0,35	0,8 - 1,4	до 0,3	0,02 -0,1	0,1	0,8 - 1,4	-	-	0,1 в сумі

2.2. Обладнання для нанесення покриттів МДО

На кшталт використовуваного устаткування, технології та принципам управління метод МДО нагадує гальваніку. Тим не менш, подібність це тільки зовнішня. Механізм процесів при МДО інший - значно складніший.

Процес МДО відбувається в електролітичній ванні, в яку занурюється деталь та електрод (рис. 2.1). Ванна має систему охолодження, так як у процесі обробки електроліт нагрівається (рис. 2.2). Якщо в якості електрода використовується

корпус ванни, то в цьому випадку ванна виготовляється з нержавіючої сталі з подвійними стінками, між якими циркулює холодна вода.



Рисунок 2.1 – Електролітична ванна: 1 – електролітична ванна; 2 - витяжна шафа; 3 – ванна системи охолодження; 4 - огорожа

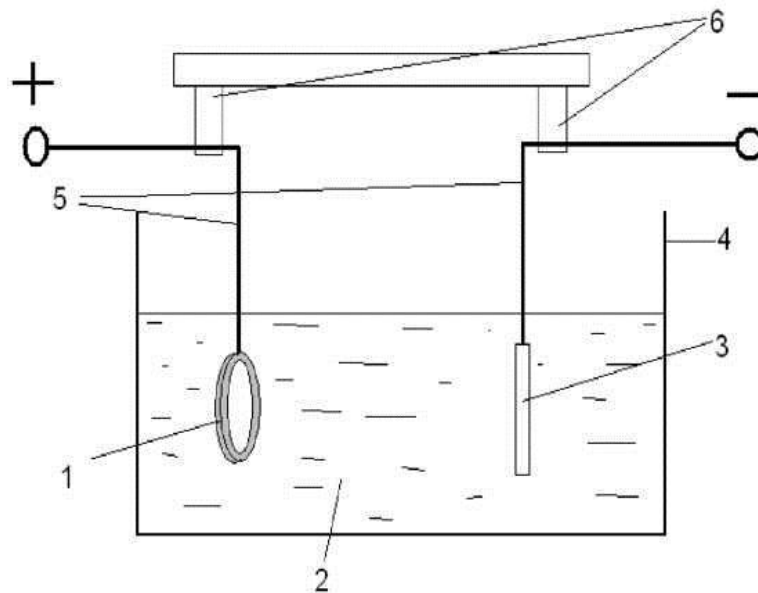


Рисунок 2.2 – Схема обробки деталі методом МДО: 1 – деталь; 2 – електроліт; 3 – електрод; 4 – електролітична ванна; 5 - система струмопідведення; 6 - кріплення для електрода [151]

Після монтажу в електролітичній ванні, деталь та електрод підключаються до джерела живлення. З пульта керування задаються параметри режиму МДО, як і у ньому здійснюється контролю над ходом процесу. Пульт управління та джерело технологічного струму можуть бути виконані у вигляді єдиного блоку (рис 2.3).

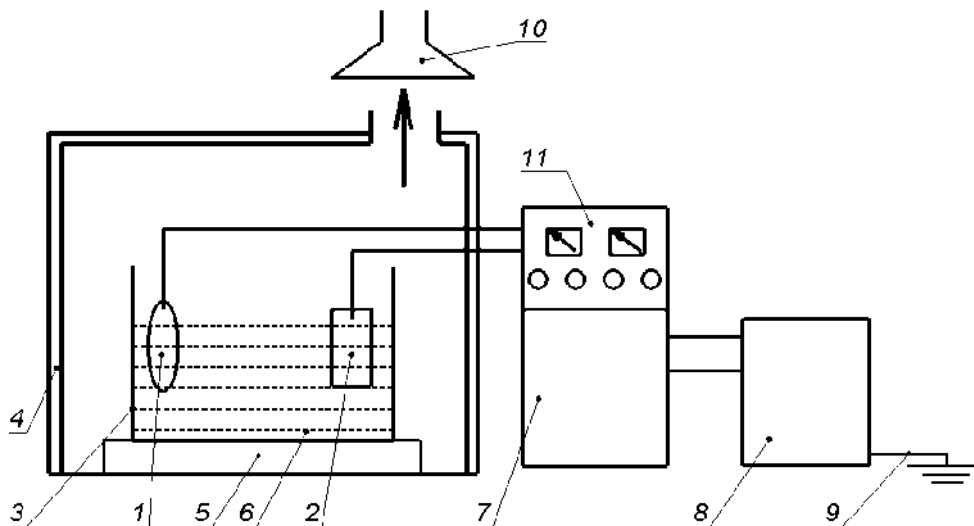


Рисунок 2.3 - Типове розташування устаткування установки МДО: 1 – деталь; 2 – електрод; 3 – електролітична ванна; 4 - витяжна шафа; 5 - підставка; 6 – електроліт; 7 – джерело технологічного струму; 8 – трансформатор; 9-заземлення; 10 – витяжна вентиляція; 11 – пульт управління

2.3. Обладнання та методики досліджень поверхневих шарів, сформованих МДО

2.3.1. Обладнання та методики вимірювання мікротвердості.

При проведенні досліджень мікротвердість МДО-шару вимірювали двома способами: а) як мікротвердість поверхні: індентор прикладався перпендикулярно до обробленої поверхні зразка; б) як мікротвердість за глибиною шару: вимірювання проводилися напоперечний шліф.

Всі вимірювання мікротвердості проводилися за методом відновленого відбитка відповідно до ГОСТ 9450-76 з використанням як індентора піраміди Віккерса, на яку прикладалося навантаження $P = 0,1$ кг або $P = 0,2$ кг протягом 10 секунд. На кожному зразку здійснювалося не менше 2-х вимірів.

Для вимірювання мікротвердості поверхні МДО-шару використовувалося наступне обладнання:

- мікротвердомір ПМТ-3М (рис. 2.5,а);
- дослідницький комплекс на базі цифрового мікротвердоміра HVS-1000 та цифрової відеокамери (рис. 2.5,б);
- мікротвердомір Struers Duramin-2.

Мікротвердомір ПМТ-3М оснащений алмазним наконечником Віккерса, діапазон навантаження, що прикладається - від 0,002 до 0,5 кгс, похибка вимірювання 2%.

Мікротвердомір HVS-1000 має діапазон вимірів: 5-3000 HV. Діапазон навантаження, що прикладається: 10-1000 гс, точність вимірювання + 2 мкм, збільшення мікроскопа - 400 x і 100 x. Дослідницький комплекс на базі мікротвердоміра HVS-1000 оснащений цифровою відеокамерою, яка дозволяє спостерігати зображення відбитків на екрані комп'ютера, спрощуючи роботу на приладі, а також програмним забезпеченням (ПО) «NEXSIS ImageExpert MicroHardness 2». Це ПЗ, завдяки майстру зйомки, дозволяє здійснювати відеозахоплення, завантаження та збереження зображень на комп'ютері, калібрування твердоміра, проводити вимірювання, а також аналізувати отримані дані та формувати звіт. При проведенні досліджень з використанням мікротвердоміра HVS-1000, розміри відбитка індентора та значення мікротвердості поверхні визначалися на фотографії шліфу, яка формувалася також за допомогою вищеприведеного ПЗ.



Рисунок 3.5 - Цифровий мікротвердомір: а - ПМТ-3М.

Мікротвердомір Struers Duramin - 2 також використовувався для вимірювання мікротвердості по товщині шару на поперечному шліфі. Мікротвердомір Struers Duramin-2 є стаціонарним засобом вимірювання

мікротвердості, за принципом статичного вдавлювання алмазної піраміди Віккерса відповідно до ГОСТ 9450-76. Прилад складається з пристрою програми навантаження та вимірювального блоку. Діапазон навантажень, що прикладаються: від 0,09807 Н (10 г-сила) до 19,61 Н (2000 г-сила). Загальне збільшення мікроскопа: 400 х. Діапазон виміру мікротвердості: 50-1500 HV [240].

2.3.2. Обладнання та методики вимірювання товщини та дослідження мікроструктури покриття.

Для дослідження мікроструктури МДО-шару в поперечному шліфу використовувалося різне обладнання:

1. Дослідницький комплекс на базі цифрового мікротвердоміра HVS-1000 та цифрової відеокамери (рис. 2.3,б) використовувався для вимірювання товщини МДО-шару. Товщина визначалася на фотографії шліфу, яка формувалася з використанням ПЗ «NEXSIS ImageExpert MicroHardness 2». При вимірі проводилося не менше 3-х вимірів.

2. Мікроскоп Olympus CK200M є оптичним і дозволяє проводити дослідження та фотографування об'єктів зі збільшенням від 40 х до 1000 х [241]. Вимірювання товщини здійснювалося за цифровою фотографією, виконаною за допомогою даного мікроскопа та системи вимірювання.

3. Мікроструктуру матеріалу зразків вивчали за допомогою оптичного електронного мікроскопа Olympus GX51 зі збільшенням 500 х. Цей мікроскоп є інвертованим металографічним мікроскопом і дозволяє проводити дослідження в поляризованому та відбитому світлі зі збільшенням від 12,5 х до 1500 х (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 - Мікроскоп Olympus GX51 [242]



Рисунок 2.7 - Товщиномір ТТ-210 [244]

3. Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) JEOL JSM-6490LV (Скануючий електронний мікроскоп) [2] використовувався для вивчення мікроструктури покриття. Цей РЕМ має збільшення від $\times 5$ до $\times 300000$. При дослідженнях використовувалися різні збільшення: $\times 50$, $\times 200$ та $\times 500$. Для спрощення процесу спостереження в деяких випадках зразки попередньо піддавалися напиленню на поверхню Pt на приладі JOEL JFC-1600 auto fine coater при силі струму 10 А протягом 10 с.

4. Для неруйнівного контролю товщини покриттів використовувався вихрострумівий товщиномір ТТ-210 (рис. 2.7).

Робота цього типу товщиномірів заснована на двох принципах: вихрострумовому та індукційному. Прилад робить автоматичне розпізнавання матеріалу підкладки та використовує відповідний метод.

Діапазон вимірюваних товщин у товщиноміра ТТ-210: 0-1250 мкм. Дискретність показань приладу: при товщині покриття до 100 мкм - 0,1 мкм, при товщині покриття більше 100 мкм - 1 мкм. Похибка виміру становить $\pm (3 \% N + 1)$ мкм, де N - номінальне значення, мкм [244].

5. Для вимірювання товщини МДО-шару використовувався також

багатофункціональний товщиномір покриттів всіх типів Константа К6Т з перетворювачем ПД-0. Діапазон вимірюваних товщин цього приладу: 0-500 мкм; похибка виміру становить $\pm(0,01 N + 1)$ мкм.

2.3.3 Обладнання та методики визначення хімічного та фазового складу поверхневих шарів, сформованих методом МДО

Обладнання та методики визначення елементного хімічного складу. Хімічний аналіз МДО-покриття проводився за глибиною шару за допомогою системи рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу Oxford INCA Energy 350, якою оснащений РЕМ. Цей аналітичний комплекс є комп'ютеризованою системою, яка дозволяє досліджувати морфологію та структуру неоднорідності твердих тіл. Система має високу роздільну здатність, що забезпечує можливість проведення досліджень на малих локальних ділянках діаметром ~ 3 мкм (площа кристала до 10 мкм^2). Крім цього, комплекс дозволяє встановлювати елементний хімічний склад у локальних точках досліджуваного об'єкта. Система оснащена детектором Si (Li) Standard і дозволяє проводити елементний аналіз від Be (берилію) до U (урану).

Обладнання та методики визначення фазового складу. Для проведення якісного фазового аналізу шарів, сформованих методом іскрового зміцнення використовувався рентгенівський дифрактометр ДРОН-3.

В апараті ДРОН-3 використовується монохроматичне випромінювання, джерелом якого є рентгенівська трубка. Апарат забезпечує діапазон кутів переміщення детектора (кутів дифракції) від 0 до 166 про проти годинної стрілки і від 0 до мінус 100 за годинниковою стрілкою.

Дослідження проводились у діапазоні кутів $2\theta = 10 - 100^\circ$. При розшифруванні дифрактограм (спектру) використовувалася програма «FAN».

Для проведення фазового аналізу МДО-покриттів використовували також рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima IV, який призначений для проведення фазового та кількісного аналізу проб, аналізу Рітвельда, аналізу кристалічності та ін.

2.3.4. Обладнання та методики трибологічних випробувань

У цій роботі трибологічні випробування проводилися на лабораторних зразках (лабораторні випробування) та на реальних деталях двигунів (стендові випробування). У цьому розділі описуються лабораторні випробування зразків, які реалізовувалися двома методами: в умовах тертя ковзання та в оцінці адгезійної міцності.

Обладнання та методики дослідження тертя ковзання. Дослідження на зносостійкість проводилися на високотемпературному трибометрі TRB50N Nanovea за точковою схемою навантаження «куля-диск». Трибометр дозволяє досліджувати трибологічні властивості поверхні і покриттів у широкому температурному інтервалі в різних середовищах та режимах мастила (рис. 2.8). Трибометри такого типу дозволяють проводити випробування на безперервне ковзання при наступних параметрах: дозвіл навантаження 25 мН, максимальна сила тертя – 20 Н, максимальний випробувальний радіус 40 мм, швидкість обертання диска 0,1-2000 об/хв, лінійна швидкість -0,02-0,1 м/с.

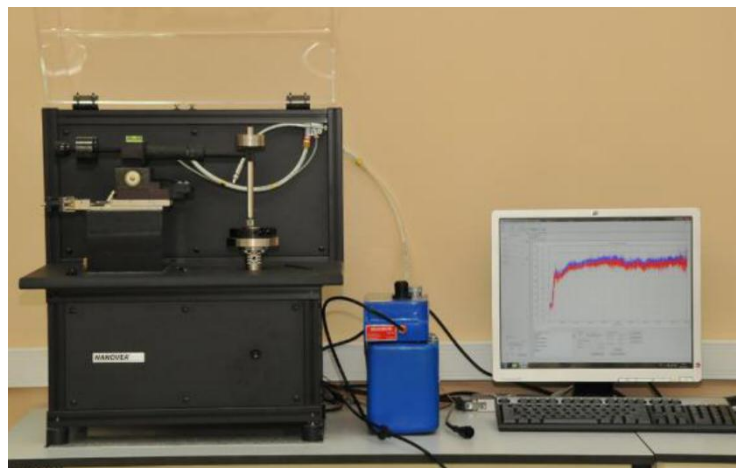


Рисунок 2.8 - Трибометр Nanovea

Режими та умови випробувань були такі: індентор (контр-тіло): куля зі сталі ШХ15, діаметр 6 мм; швидкість переміщення: 300 об/хв; діаметр траєкторії переміщення: 10 мм; тип контакту: точковий; максимальне навантаження на індентор (контр-тіло): 5 Н; режим тертя: без мастильного матеріалу (сухе); час випробування: 4:00.

Всі випробування проводилися в режимі тертя без мастильного матеріалу. Такий режим тертя був обраний через те, що це найбільш «жорсткий» режим, який може спостерігатися в умовах вигорання мастильного матеріалу в області верхнього поршневого кільця камери згорання двигунів і призводить до максимального зношування поверхонь пари тертя.

2.3.5. Обладнання та дослідження адгезійної взаємодії.

Випробування на адгезійну міцність покриття проводилися на скретч-тестері Micro Scratch Tester CSM Instruments з використанням алмазного індентора Роквелла з радіусом заокруглення 200 мкм (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 -Micro Scratch Tester CSM Instruments

Скретч-тестер зазвичай використовується для визначення комплексу механічних характеристик при руйнуванні тонких плівок та покриттів, мінімальна товщина яких може досягати до 5 мкм. Прилад дозволяє визначати такі характеристики як: адгезія, крихкість, деформація, відшаровування та зносостійкість, опір до дряпання, а також коефіцієнт тертя шляхом випробування дряпанням. Скретч-тестер також дозволяє проводити аналіз мікрофотографій подряпини, оцінювати глибину проникнення індентора, контролювати силу навантаження індентора та силу реакції на індентор. Крім цього, у процесі випробування можна здійснювати реєстрацію сигналів акустичної емісії.

Робота скретч-тестера заснована на методиці склерометрії, при реалізації якої до поверхні спочатку підводять алмазний індентор Роквелла, а потім, переміщуючи індентор, починають його навантажувати. Навантаження при цьому зростає поступово (рис. 3.10).

Максимальне вертикальне навантаження на індентор, яке забезпечує скретч-

тестер CSM Instruments від 0 до 30 Н, максимальна сила тертя - 30 Н, максимальна довжина дряпання - 120 мм, швидкість дряпання від 0,4 до 600 мм/хв, швидкість навантаження - 10 Н/хв і максимальна глибина проникнення індентора – 1 мм. При проведенні випробувань довжина шляху індентора становила 5 мм, навантаження на ньому зростало від 0,03 до 30,00 Н, швидкість переміщення індентора становила 5 мм/хв. За результатами досліджень, зіставляючи характер руйнування, глибину проникнення індентора та рівень акустичної емісії, визначали критичні навантаження: при яких з'являються перші ділянки порушення МДО-шару (L_{c1}) і при яких МДО-шар руйнується (L_{c2}). Напруга на інденторі обчислювалося за формулою [257]:

$$O_{ind} = L_c / \pi \cdot P_d \cdot (2R_{ind} - P_d), \quad (2.3)$$

де R_{ind} – радіус індентора (200 мкм);

P_d – глибина проникнення індентора.

2.3.6. Обладнання та методики теплофізичних випробувань

У роботі визначалися такі теплофізичні властивості МДО-шарів: теплоємність та коефіцієнт теплопровідності.

Обладнання та методики для визначення теплоємності. Визначення теплоємності МДО-шару здійснювалося на диференціальному сканувальному калориметрі NETZSCH DSC 404F3 (рис. 2.11). Цей прилад дозволяє визначати такі калориметричні ефекти: температуру та ентальпіюфазових перетворень у температурному інтервалі від мінус 150 до + 2000°C і оснащений датчиком ДТА та/або DSC. Вимірювальна система приладу є герметичною (10^{-4} мбар). Похибка виміру - трохи більше 2,5 %.

Калориметр реалізує метод диференціальної скануючої калориметрії. У процесі дослідження випробуваний та еталонний зразки нагріваються у встановленій атмосфері відповідно до спеціальної температурної програми. Теплоємність зразка визначається на основі вимірюваної залежності від температури теплових потоків, необхідних для підтримки однакових температур зразка та еталона .

Вимірювання теплоємності МДО-шару проводилося методом ДСК в

інтервалі температур 50-400°C. Вимірювання проводилися на порошок з МДО-покриття масою 33,454 мг, як зразок порівняння використовувався сапфіровий стандарт теплоємності. При вимірі застосовувалася типова програма нагріву, що використовується для вимірювання теплоємності C_p зі швидкістю нагріву - 20° С/хв до 400°C та ізотермічною витримкою при 400°C - 3 хв. Обробка результатів проводилася за допомогою програмного забезпечення «NETZSCHProteus».



Рисунок 2.11 - Диференціальний скануючий калориметр NETZSCH DSC 404F3

Обладнання та методики для визначення коефіцієнта теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності МДО-шару визначався методом імпульсного лазерного нагріву (методом Паркера) на установці NETZSCH LFA 457 MicroFlash. Установка дозволяє проводити вимірювання в діапазоні температур від мінус 125°C до + 1100 ° С і може бути використана для дослідження малих та великих зразків діаметром до 25,4 мм.

Метод імпульсного лазерного нагріву полягає в тому, що спочатку визначається коефіцієнт температуропровідності за термограмами нагріву поверхні зразка - $\Gamma(t)$ імпульсом випромінювання лазера - $W(t)$ (рис. 2.12,а). Форма термограми для одношарових і багатошарових зразків закономірно пов'язана з товщинами і теплофізичними властивостями шарів (рис. 2.12,б).

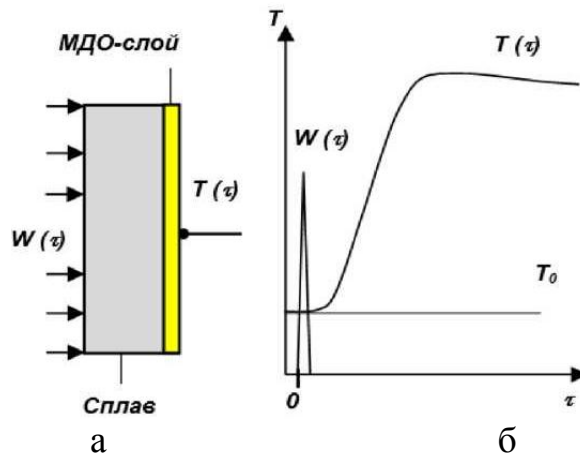


Рисунок 2.12 – Імпульсний метод вимірювання теплопровідності: а – схема вимірювання; б - термограма

Згідно з методикою, вимірювання теплопровідності і теплоемності шару в двошаровому зразку виконуються після завдання в програмі експерименту властивостей шарів, що складають зразок: товщини, теплоемності, щільності, температурного коефіцієнта лінійного розширення та теплопровідності в досліджуваному температурному діапазоні. При цьому досліджуваний шар записується як «невідомий» і для нього дані по температурі не вводяться.

Значення теплопровідності та теплоемності досліджуваних шарів розраховувалися за термограмами нагріву за допомогою програми «Proteus LFA Analysis», що містить розрахункові методики для одно-, дво- і тришарових зразків.

Відповідно до метрологічних характеристик установки та результатів численних тестових вимірювань, похибки визначення теплопровідності, питомої теплоемності та теплопровідності при дослідженні сплаву

2.3.7 Устаткування дослідження масових показників

Під час проведення трибологічних і теплофізичних випробувань, і навіть досліджень на корозійну стійкість, виникла необхідність встановлення масових показників лабораторних і експериментальних зразків. Для цього використовувалися електронні мікроваги Mettler Toledo XPE 26 (рис. 2.13). Межа зважування знаходиться в діапазоні мг до 22 р. Дискретність ваги становить 1 мкг, відтворюваність: $\pm 1,5$ мкг.



Рисунок 2.13 - Мікроваги Mettler Toledo XPE 26

У роботі використовувалися лабораторні аналітичні ваги марки ВЛ-120 С. Робота ваг заснована на принципі електромагнітної компенсації, яку забезпечує ваговимірювальний датчик новітнього зразка, виконаний у вигляді монолітного блоку. Ваги характеризуються високою стабільністю вимірювань, малим часом відгуку датчика на навантаження і значною довговічністю. Найбільша межа зважування - 120 г, найменша межа зважування - 0,01 г, клас точності - спеціальний (I) по ГОСТ Р 53228-2008; дискретність виміру $d = 0,1$ мг; похибка: + 0,5 мг (до 50 г) та + 1 мг (від 50 до 120 г).

2.3.8. Обладнання та методики досліджень шорсткості поверхні

Дослідження шорсткості поверхні проводилося за допомогою портативного вимірювача шорсткості TR-210. Профілограф призначений для проведення випробування на профіль поверхні металевих і неметалічних матеріалів, металів і сплавів, поверхневих шарів металу при механічній обробці, окремих складових структурно неоднорідних сплавів, гальванічних та інших покриттів.

Вимірювання шорсткості проводяться відповідно до ГОСТ 2789-73 «Шорсткість поверхні. Параметри, характеристики та позначення». Програмне забезпечення «Data View» потрібне для з'єднання приладу з персональним комп'ютером (використовується за наявності комп'ютера). Програма «TIMESurf» дозволяє здійснювати управління, аналіз, друк та пошук отриманих даних вимірювання та графіків на персональному комп'ютері. В комплект входить вимірювач шорсткості з рідкокристалічним дисплеєм

TR-220 та стандартний датчик TS-100. Профілометр TR220 зареєстрований у Держреєстрі під номером 20666-08.

2.3.9. Устаткування для проведення моторних стендових випробувань

Стендові випробування бензинового двигуна УМЗ-417 зі штатними поршнями (без теплозахисних оксидних шарів) та поршнями з теплозахисними оксидними шарами отриманими МДО, на днищах поршнів проводилися по ГОСТ 14846-81 [11] на стенді КІ-5543 ГОСНИТИ [12, 13].

Розрахунок експлуатаційних характеристик ДВЗ, оснащеного штатними поршнями і поршнями з теплозахисними оксидними шарами, отриманими МДО, проводили по методиці [12]: Крутний момент двигуна МК, визначався за формулою:

$$M_k = P \cdot L, \text{ Нм},$$

де P - показання вимірювального пристрою гальма стенду, Н;

L – плече вагового пристрою гальма стенда, 0,7162 м.

Ефективну потужність N_e , двигуна визначали за формулою:

$$N_e = \frac{M_k \cdot n \cdot 1,36}{716,2}, \text{ кВт},$$

де n – частота обертання колінчастого валу двигуна, хв^{-1} .

Витрата палива (ВІД кг/год) досліджуваного двигуна визначали ваговим способом з наступним розрахунком за формулою:

$$G_T = \frac{3,6 \Delta G}{\tau},$$

де ΔG - кількість палива, витрачене за час проведення виміру, г;

τ – час проведення вимірювання витрати палива, с.

Питома витрата палива (g_e , г/кВт-год) досліджуваних двигунів визначали за формулою:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3,$$

де N_e – потужність двигуна, встановлена при дослідженнях, кВт.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА

3.1. Дослідження процесу формування покриттів МДО

В роботі проводилось дослідження впливу режимів процесу МДО на влвствості поверхневих шарів, що формуються, зокрема впливу ємності установки. Так при збільшенні ємності батареї конденсатора установки МДО (С) зростає сила струму в ланцюгу (I), і, при незмінному опорі ланцюга, відбувається збільшення напруги (U). Зростання напруги призводить до збільшення його градієнта і, відповідно, до зростання напруженості електричного поля E_1 у бульбашках згідно з формулою:

$$E_1 = U/L, \quad (3.1)$$

де L – розмір (діаметр) газового міхура.

Збільшення напруженості електричного поля, своєю чергою, викликає зростання товщини МДО-шару. Режими обробки зразків наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Режими формування МДО-шарів

№	Склад електроліту		Ємність	Параметри процесу	
	$C_{\text{кон}}, \text{Г/Л}$	$C_{\text{рс}}, \text{Г/Л}$		Щільність	Напруга

зразка			установки, C, мкФ	струму на аноді, ја, $\Delta/\mu\text{м}^2$	на аноді Ua, В	на катоді Uк, В
1	4	4	100	6,9±0,5	242 ± 19	22 ± 2
2	4	4	400	24,1±2,0	290 ± 9	68 ± 6

Результати досліджу. В результаті були отримані два зразки з МДО-шаром. Поперечний шліф зразка № 1 представлений на малюнку 4.8, <х>, поперечний шліф зразка № 2 - на малюнку 4.8. Виміряні значення товщини та мікротвердості МДО-шарів представлені в табл. 3.2.

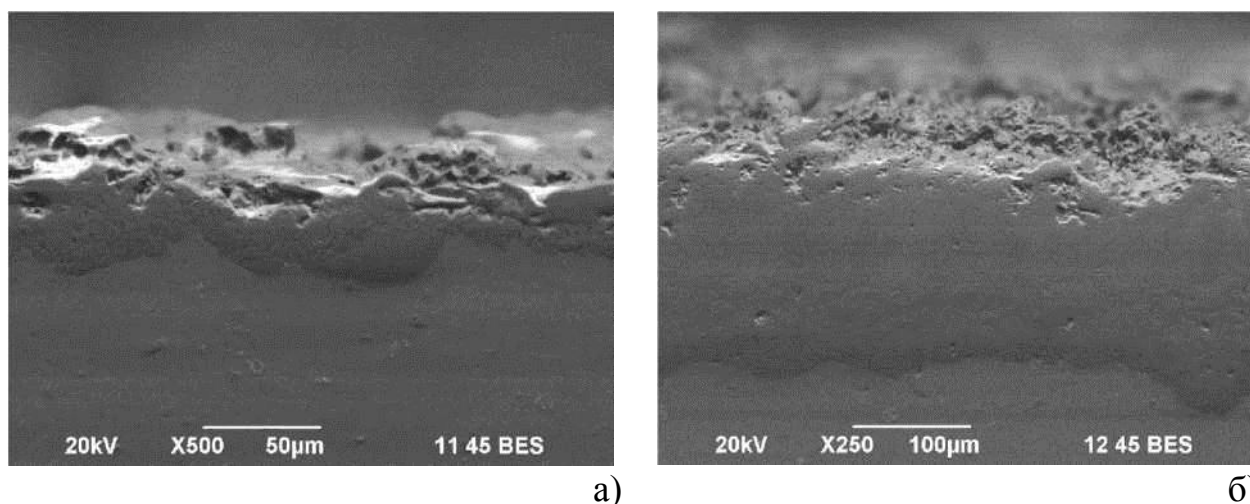


Рисунок 3.1 – Поперечний шліф МДО-шару на зразках: а – зразок № 1 (100 мкФ); б – зразок № 2 (400 мкФ)

Таблиця 3.2 – Параметри МДО-шарів

Властивості МДО-шару	Зразок №	
	1	2
Товщина h, мкм	40,0 ± 15,0	191,2±17,8
Мікротвердість, Н, гПа	9,6±3,1	7,9±1,9
Пористість, р, %	8,5±3,5	6,3±4,2

Аналіз отриманих результатів показує, що ємність установки МДО суттєво впливає на товщину МДО-шару. Збільшення ємності в 4 рази підвищує щільність струму на аноді в 3,5 рази, напруга в 1,35 рази, при цьому товщина покриття зростає в 4,8 рази. На мікротвердість оксидного шару ємність установки істотного впливу не має, оскільки отримані значення не відрізняються з урахуванням відхилень.

Проведено дослідження впливу концентрації електроліту на товщину і

мікротвердості МДО-шарів. Методика експерименту полягала у зміні концентрації електроліту за збереження постійними інших чинників процесу МДО. У проведених дослідженнях як основний фактор процесу був обраний склад електроліту. В експерименті змінювалася кількість КОН, при цьому кількісне співвідношення з Na_2SiO_3 зберігалось незмінним. В експериментах використовувався лужний електроліт на основі дистильованої води. Склад електроліту в першому досвіді: 1 г/л КОН та 1 г/л Na_2SiO_3 (режим № 1); у другому досвіді: 4 г/л КОН та 4 г/л Na_2SiO_3 (режим № 2). Місткість установки для обох зразків становила $Z = 400$ мкф. У процесі обробки співвідношення катодних та анодних струмів зберігалось постійним $I_a/I_k=1$. Температура електроліту не перевищувала 45°C . Процес МДО за часом здійснювали до припинення іскріння на оброблюваній поверхні.

За результатами спостережень було зазначено, що процес обробки до припинення іскріння на зразку № 1 тривав 5 годин, а на зразку № 2 - години.

В результаті отримано 2 зразка різного кольору (рис. 3.2)

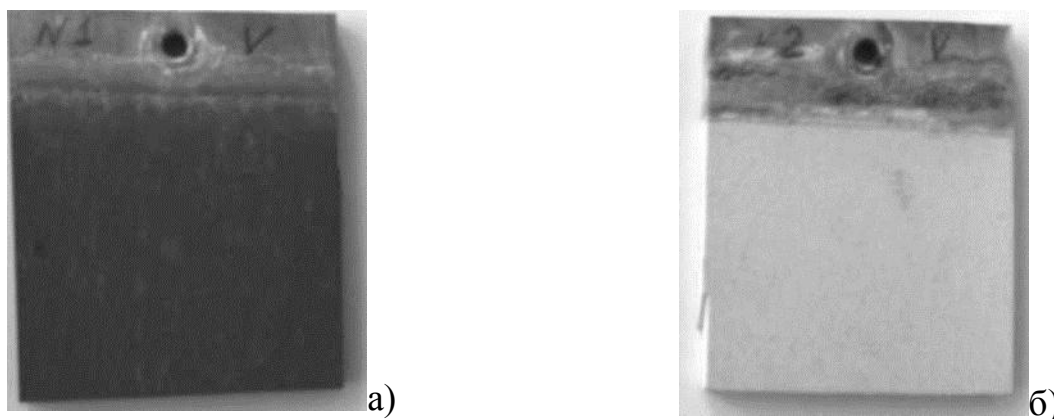


Рисунок 3.2 -Зразки після МДО-обробки: а – зразок № 1 (режим № 1);б – зразок № 2 (режим № 2)

Сумарна анодна та катодна напруга при обробці зразка № 2 в середньому становила 350-360 В, а для зразка № 1 - 450-460 В (рис. 3.3).

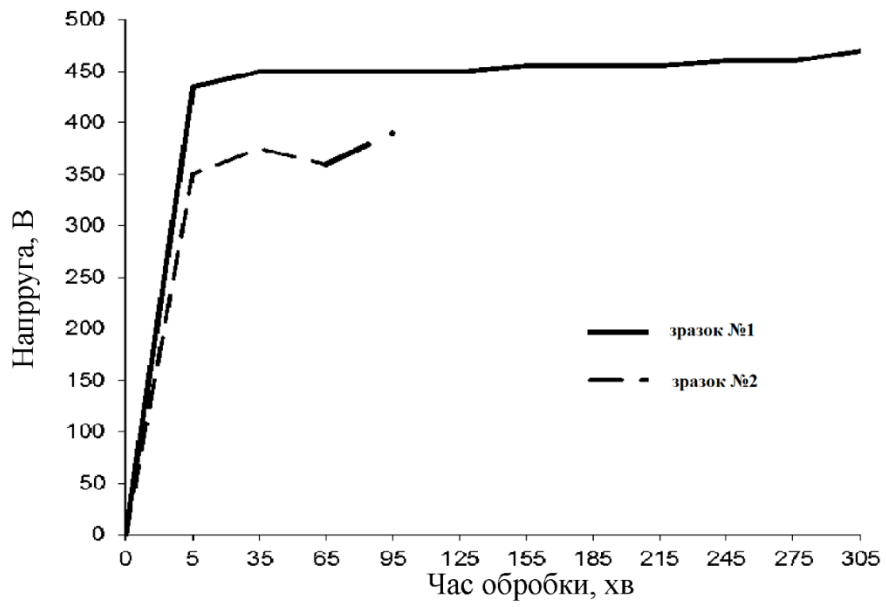


Рисунок 3.3 - Залежність зміни напруги формування МДО-покриття від тривалості обробки

Поперечні шліфи зразків із виміром товщини показані на рис. 3.4. При дослідженні МДО-шару на поперечному шліфі вимірювалося значення його мікротвердості в 5-6 точках, товщина шару - в 5-7 точках, а також хімічний (елементний) склад у 6 точках (рис. 3.4, 3.5). Усі виміри проводилися за товщиною шару. Узагальнені результати дослідження МДО-шару на різних зразках представлені в Таблиці 2.2.

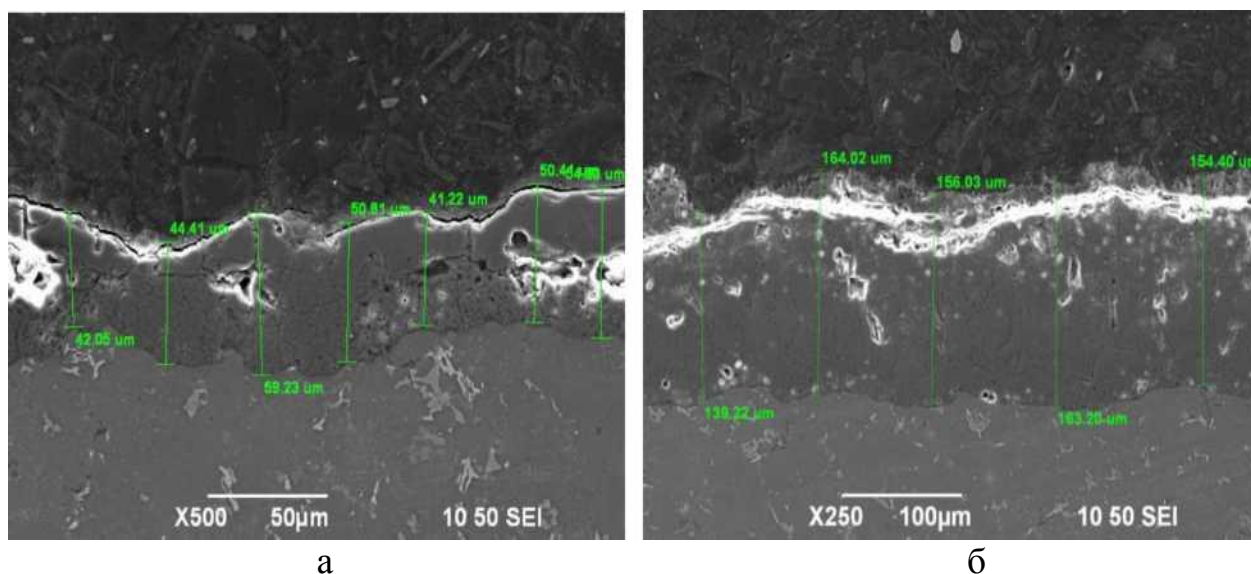


Рисунок 3.4 – Поперечний шліф МДО-шару на зразках: а – зразок № 1; б - зразок № 2

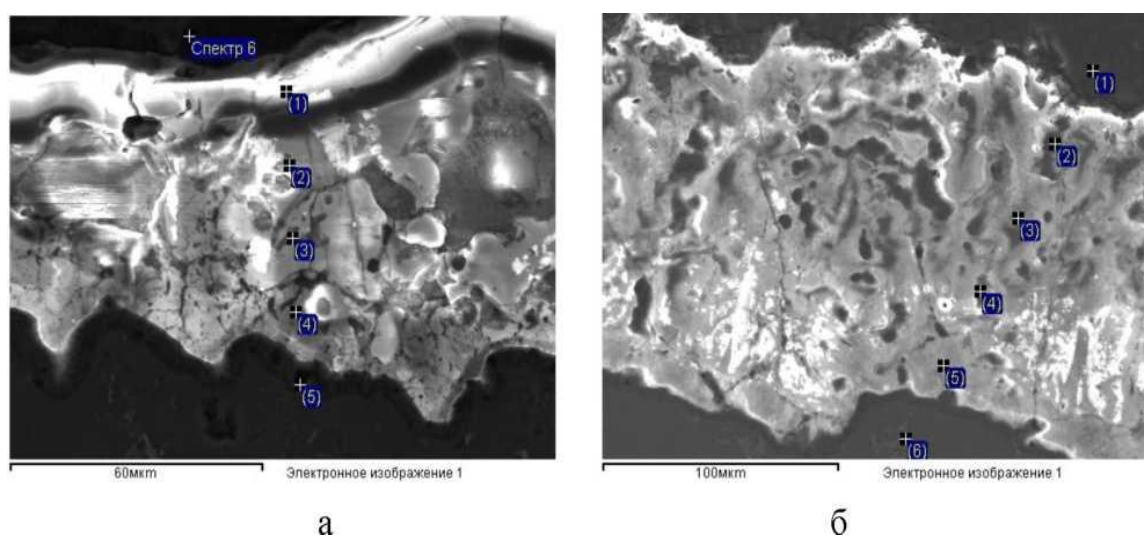


Рисунок 3.5 - Точки виміру хімічного складу МДО-шару на зразках: а – зразок № 1; б - зразок № 2

Таблиця 3.3 - Властивості МДО-шарів

№ досліду (зразка)	Властивості МДО-шару			
	Товщина h, мкм		Мікротвердість, Н, гПа	
	максимальна	середня	максимальна	середня
1	59,2	47,5±7,5	5,5	3,2±1,8
2	164,0	155,4±10,0	9,0	4,2±3,0

На малюнку 3.5 та 3.6 наведено розподіл хімічних елементів по товщині МДО-шарів. Загальний аналіз було зроблено за такими елементами: Mg, Al, Si, K, Ca, Mn, Ni, Cu, Zn. Однак як основні були вибрані лише O, Al і Si, так як інші елементи містяться у сформованих покриттях в незначній кількості.

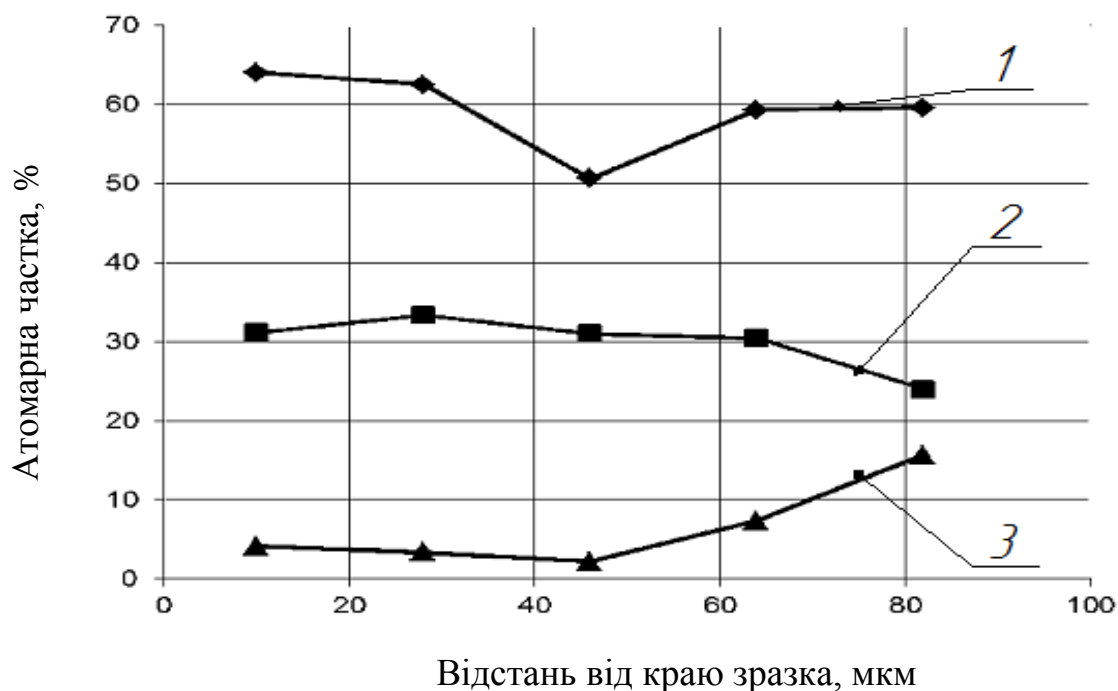


Рисунок 3.6 - Розподіл хімічних елементів за товщиною МДО-шару на зразку № 1: 1-кисень; 2-алюміній; 3-кремній

Грунтуючись на хімічних реакціях при МДО можна зробити наступні висновки за експериментом. Очевидно, що гідроксид калію КОН є джерелом іонів OH-, які в основному визначають анодний струм. При збільшенні концентрації КОН в 4 рази, анодний струм також збільшився в 4 рази з до 10 А, а щільність струму зросла з 3 до 12 А/дм². Це, у свою чергу, призвело до

збільшення інтенсивності процесу МДО, і спричинило зростання швидкості зростання МДО-шару більш ніж в 10 разів, з 9,5 до 103,5 мкм/год. При цьому тривалість процесу МДО скоротилася з 5 годин, до 1,5, тобто також приблизно в 4 рази. Змінилися умови утворення МДО-шару надають істотний вплив на його властивості.

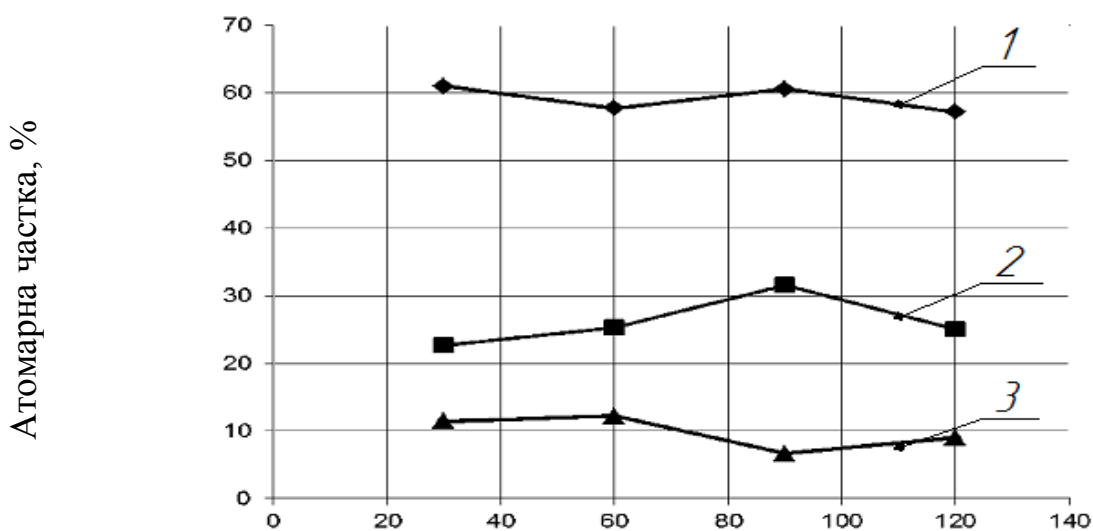


Рисунок 3.7 - Розподіл хімічних елементів за товщиною МДО-шару на зразку № 2: 1-кисень; 2-алюміній; 3-кремній

Аналізуючи елементний склад сформованих МДО-шарів, можна бачити, що кількість кисню в покритті на обох зразках приблизно однакова і становить у середньому 60% в атомних частках. Проте, враховуючи, що товщина МДО-шару у зразка № 2 істотно більше, ніж у зразка № 1, можна стверджувати, що загальна кількість кисню, що проникла в поверхневі шари зразка, збільшилася, за рахунок чого і зросла інтенсивність процесу. При цьому розподіл кисню за товщиною МДО-шарів в обох зразках однотипний і знаходиться в межах 57-64%. Одночасно спостерігається збільшення кількості кремнію майже в 2 рази у зразку № 2, що пояснюється високою концентрацією кремній вмісного компонента Na_2SiO_3 (рідкого скла) в електроліті.

Збільшення мікротвердості спостерігається в МДО-шарі на зразку № 2 зв'язано, мабуть, з тим, що МДО-шари мають досить низьку теплопровідність,

що при значній товщині зміцненого шару сприяє формуванню високотемпературних і високотвердих фаз оксиду алюмінію $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Це припущення підтверджується тим, що максимальні значення мікротвердості в обох зразків спостерігаються в центрі МДО-шару, а на зразку № 2 (з максимальною товщиною) у цій зоні спостерігається також максимальна мікротвердість.

Залежно від обраного режиму МДО і необхідної якості поверхні, процес формування шару може тривати від кількох хвилин до кількох годин. Фазовий склад, структура і властивості формованого поверхневого шару залежать від режимів процесу, складу електроліту та хімічного складу оброблюваних сплавів

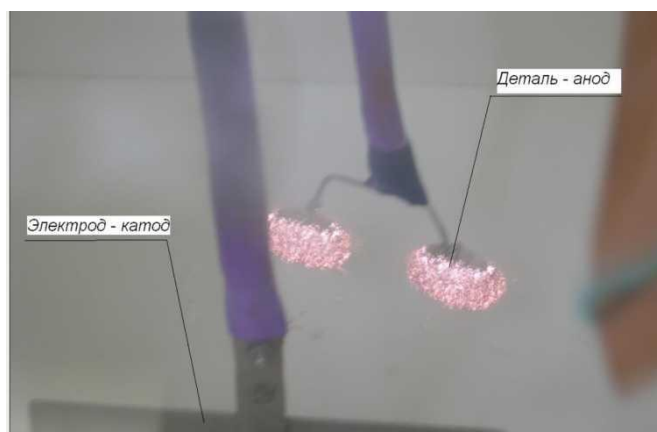


Рисунок 3.8 - Мігруючі поверхневі розряди на деталі у процесі МДО-обробки

3.2. Дослідження мікроструктури зразків з МДО

Мікроструктуру матеріалу зразків вивчали за допомогою оптичного електронного мікроскопа Olympus GX51 при збільшенні 50 x і 200 x. StruersDuramin-2 методом Віккерса з додатком навантаження 100 г протягом 10 с. Мікротвердість визначали за товщиною шару.

Аналіз структури матеріалу зразків зі сплавом АК12Д у стані поставки показав, що в структурі матеріалу кремнієва фаза розподілена неоднорідно, спостерігаються області, збагачені частинками кремнію. У структурі також

були виявлені виділення 0-фази (CuAl_2) з розміром, близьким до розміру кремнієвих частинок (рис. 3.9, а). Характеристики мікроструктури сплаву у вихідному стані наведені в Таблиці 3.1.

Мікроструктура зразків після ПДК значно відрізнялася від структури стану поставки (рис. 3.9,б). Спостерігалось однорідне розподілення частинок кремнію, при цьому середній розмір зерен алюмінієвої матриці значно зменшився. Характеристики мікроструктури сплаву в УМЗ стані наведені в таб. 3.4.

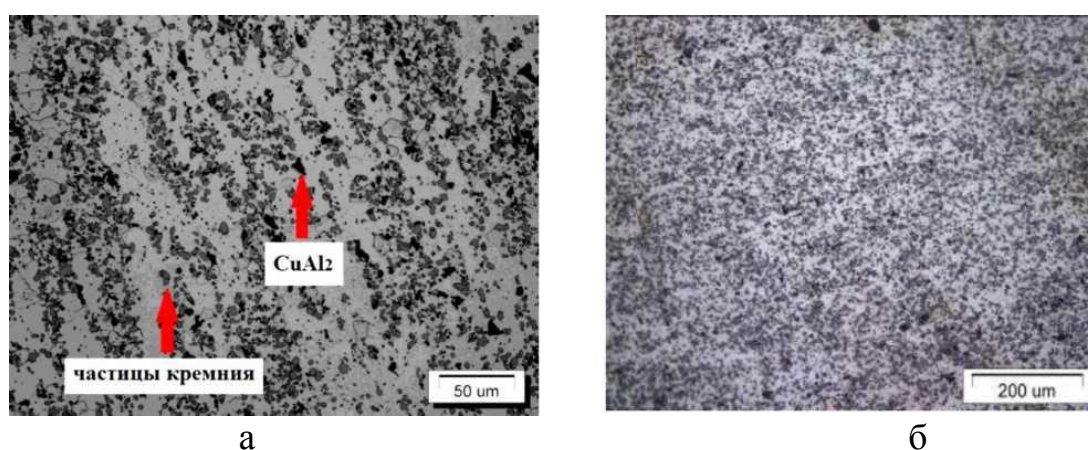


Рисунок 3.9 – Оптична мікроструктура зразків: а – у стані поставки (вихідний стан); б - після ПДК

Таблиця 3.4 - Параметри мікроструктури та мікротвердість алюмінієвого сплаву з різною мікроструктурою

Параметри	Групи
Середній розмір зерен алюмінієвої матриці, мкм	17 ± 5
Середній розмір кремнієвих частинок, мкм	$3,2 \pm 0,7$
Об'єм кремнієвої фази, %	23 ± 4
Об'єм 0-фази, %	3 ± 1
Мікротвердість, HV	242 ± 17

3.3. Дослідження мікротвердості МДО-покриття

Досліджувалась мікротвердість МДО-шарів у середній області покриття по 6 вимірам. Максимальне значення мікротвердості покриття зафіксовано зразків з вихідним станом матеріалу – 620 HV. Узагальнені результати дослідження МДО-шарів наведені в таб. 3.5.

Таблиця 3.5 - Властивості МДО-шарів

Властивості МДО-шару	
Товщина h, мкм	41 ± 15
Середня мікротвердість, HV	541 ± 60
Максимальна мікротвердість, HV	620

Результати проведених досліджень показали сильний вплив вихідної мікроструктури сплаву на товщину МДО-шарів. Очевидно, що структура матеріалу сприяє формуванню покриттів із більшою товщиною. Структура алюмінієвого сплаву характеризується малим розміром зерен алюмінієвої матриці та розвиненою дислокаційною структурою, атакована структура сприяє більш глибокому проникненню атомів/іонів кисню вглиб матеріалу підкладки по міжкристалітним дефектам в процесі МДО, що і призводить до збільшення товщини. В результаті збільшується товщина шару, при цьому загальна кількість кисню на одиницю обсягу покриття зменшується. В результаті частка оксидів алюмінію в шарі зменшується, а мікротвердість знижується.

Дані дослідження показали, що при обробці зразків з різною мікроструктурою, що характеризується розміром зерен, можна отримати МДО-шари з різними значеннями товщини та мікротвердості. Зменшення розміру зерен матеріалу підкладки призводить до зростання товщини покриття.

3.4. Дослідження поверхневих шарів при МДО на зносостійкість

Обробка зразків для випробування та загальний вигляд зразків зображено на рис. 3.10. Після проведення МДО усі зразки промивали та просушувалися. Потім проводився вимір товщини шару. З одного боку зразка, за допомогою наждакового паперу, видалялася верхня пухка частина МДО-шару, на якій потім вимірювалася мікротвердість, шорсткість і проводилися випробування на знос.



а) б)
Рисунок 3.10- Обробка а) та зовнішній вигляд б) зразків з сплаву АК 4-1 для випробування на зносостійкість

Мікротвердість зразків вимірювалася на мікротвердомірі HVS-100 при навантаженні $P = 200$ г. Товщина шару визначалася неруйнівним методом за допомогою товщиноміра ГГ-210, шорсткість - за допомогою профілографа-профілометра TR-220. Зносостійкість досліджувалась на трибометрі Nanovea. Результати дослідження товщини та мікротвердості МДО-шару лабораторних зразків зі сплаву АК4-1.

Мікротвердість на зразку зі сплаву АК4-1 без МДО-шару склала $H = 0,85 \pm 0,09$ ГПа.

Таблиця 3.6 - Властивості МДО-шару, сформованого на лабораторних зразках зі сплаву АК4-1

№ досліджу	Мікротвердість, HV, гПа	Товщина, h, мкм	
		загальна	без пухкого шару,
1	$7,18 \pm 1,24$	$73,7 \pm 4,7$	$62,0 \pm 4,3$
2	$9,43 \pm 1,20$	$152,4 \pm 8,6$	$109,8 \pm 5,5$
3	$11,70 \pm 1,63$	$89,7 \pm 5,8$	$73,7 \pm 2,0$
4	$10,91 \pm 1,26$	$93,4 \pm 6,1$	$78,2 \pm 3,6$

Як згадувалося, зносостійкість лабораторних зразків досліджувалася на спеціальному трибометрі Nanovea. З кожної партії випробувань піддавався лише один зразок із «середніми» характеристиками (товщиною та мікротвердістю). Дослідження піддавався також і зразок без МДО-шару.

Дослідження на зносостійкість здійснювалися на одній із сторін зразка, з якої був попередньо видалений верхній пухкий шар за допомогою водостійкого наждакового паперу типу Р-400. Відомо, що будь-яка методика дослідження поверхонь повинна максимально моделювати умови роботи деталей. У зв'язку з тим, що на реальних деталях ДВС заключною технологічною операцією є видалення з поверхні МДО верхньогорихлого шару, то така обробка зразка перед випробуваннями є доцільною.

На поверхні, що випробовується перед початком випробувань за допомогою профілактографа-профілометра TR-210 вимірювалася шорсткість. Для виключення впливу шорсткості на процес зносу, на поверхні з МДО-шаром у всіх зразків забезпечувалося однакове значення шорсткості: $R_a = 1,66 \pm 0,09$ мкм.

Результати випробувань на трибометрі формувалися автоматично у графіках (рис. 3.12) і були продубльовані в таблицях Excel. На цих графіках по осі абсцис вказується кількість обертів (шлях тертя), які зробив зразок, а по осі ординат - коефіцієнт тертя.

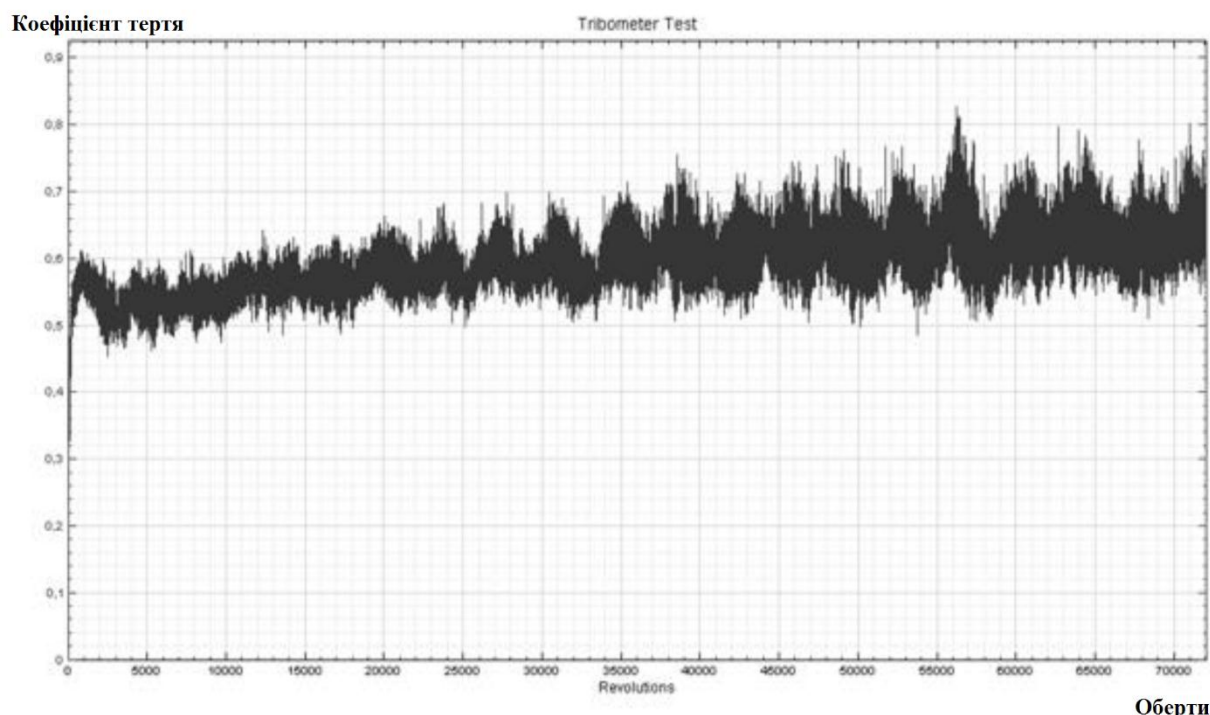


Рисунок 3.12 - Значення коефіцієнта тертя при випробуваннях МДО-

шару на сплаві АК4-1 (зразок №1)

До і після проведення випробувань зразки та контр-тіло зважувалися на електронних мікровагах Mettler Toledo XPE 26. Величина зносу по масі визначалася за формулою:

$$\Delta G = m_1 - m_2, \quad (3.22)$$

де m_1 - маса зразка/контр-тіла до випробувань, г;

m_2 - маса зразка/контр-тіла після випробувань, г.

Після випробувань на поверхні зразків спостерігався слід від індентора. На зразку без МДО-шару видно глибокий слід у вигляді канавки (рис. 3.13,а), як результат зношування зразка, а на зразку з МДО-шаром (рис. 3.13,б) слід від індентора виразний але неглибокий. Інтенсивність зношування за масою визначалася за формулою:

$$I_G = \Delta G / L_{тр}, \quad (3.1)$$

де ΔG - масове зношування, мг; L – шлях тертя, м.

Результати досліджень показали (таб. 3.8), що інтенсивність зношування зразка зі сплаву АК4-1 без МДО-шару склала $584,05 \cdot 10^{-5}$ мг/м, знос контр-тіла при цьому не був зареєстрований. Інтенсивність зношування зразка з МДО-шаром, отриманого при режимі № 4, склала $6,19 \cdot 10^{-5}$ мг/м, що в 94 рази нижче, ніж для сплаву АК4-1 без МДО-шару. На інших зразках зі сплаву АК4-1 з МДО-шаром знос не був зареєстрований, навпаки, спостерігалось збільшення маси. Це дозволяє зробити висновок про те, що відбувалося перенесення матеріалу контр-тіла на зразок.



а



б

Рисунок 3.13 - Лабораторні зразки зі сплаву АК4-1 після випробування на зносостійкість: а - зразок без МДО-шару; б - зразок з МДО-шаром

Максимальна інтенсивність зношування за масою контр-тіла при взаємодії з МДО-шаром на зразку зі сплаву АК4-1 склала $181,45 \cdot 10^{-8}$ г/м, мінімальна - $61,26 \cdot 10^{-8}$ г/м.

У зв'язку з тим, що знос МДО-шару був зареєстрований тільки на одному зразку, отримати рівняння регресії інтенсивності зношування за масою для МДО-шару на зразку зі сплаву АК4-1 не вдалося.

Таблиця 3.7 – Результати випробувань лабораторних зразків на зносостійкість

Матеріал зразка	№ режиму (№ зразка)	Знос по масі контр-тіла, ΔG_k , мг	Знос по масі зразка, ΔG , мг	Шлях тертя, L_{tr} , м	Інтенс-ть зношування 10^{-5} мг/м	
					контр-тіла, I_k	зразка I
АК4-1	1 (6)	3,790	-0,400	4521,82	83,82	-8,85
	2 (1)	2,770	-0,330	4521,82	61,26	-7,30
	3 (11)	1,080	-0,340	595,20	181,45	-57,12
	4 (7)	4,230	0,280	4521,85	93,54	6,19
	без МДО	0	26,410	4521,82	0	584,05

Таблиця 3.9 - Обробка даних з інтенсивності зношування

№ досліджу	Інтенсивність зношування контр-тіла з масою, $/G \cdot 10^{-5}$, мг/м під час роботи зі зразком з МДО на АК4-1
1	83,82
2	61,26
3	181,45
4	93,54

У процесі випробувань реєструвалися значення коефіцієнтів тертя, які потім були представлені у файлі "MS Excel" у вигляді масиву даних. Обробка результатів дозволила встановити значення коефіцієнтів тертя (таб. 3.10).

Аналіз отриманих значень коефіцієнтів тертя показує, що максимальне значення для МДО-шару на сплаві АК4-1 становить = 0,99, Найменше із

середніх значень коефіцієнта тертя становить $f_r = 0,391$ - для зразка, у якого зафіксовано активне перенесення матеріалу контр-тіла на зразок. Це говорить про те, що тертя в цьому випадку відбувалося між шарами зразка контр-тіла.

Таблиця 3.10 - Значення коефіцієнтів тертя

Матеріал зразка	№ режиму (№ зразка)	Значення коефіцієнтів тертя, f_{tr}		
		мінімальне	максимальне	середня
АК4-1	1 (6)	0,006	0,813	0,623
	2 (1)	0	0,826	0,595
	3 (11)	0,000	0,678	0,391
	4 (7)	0,002	0,994	0,805
	без МДО	0	2,321	0,458

Парний кореляційний аналіз даних по мікротвердості, товщині, інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя, проведений за допомогою «MS Excel» показав наявність тісного взаємозв'язку між коефіцієнтом тертя та інтенсивністю зношування МДО-шару на сплаві АК4-1. Візуальний аналіз областей зносу на поверхні покриття сплаву АК4-1(рис 3.14) дозволяє говорити про те, що знос МДО-шарів відбувається в результаті дряпання. Відповідно до ГОСТ, дряпання - це утворення поглиблень на поверхні тертя в напрямку ковзання при впливі виступів твердого тіла або твердих частинок, а відшаровування - це відділення з поверхні тертя матеріалу у формі лусок при втомному зношуванні. Судячи з вигляду треків зносу, саме подряпання є основною причиною зносу МДО-шару.

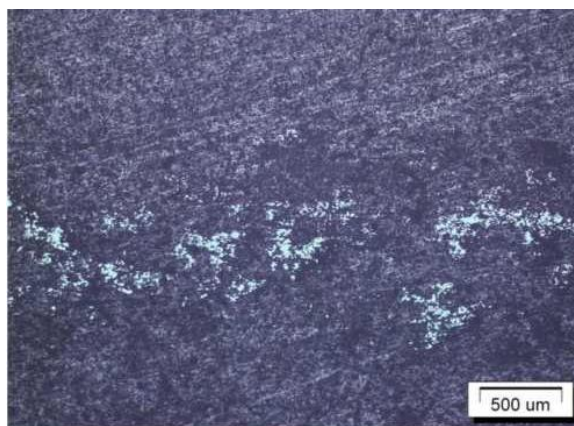


Рисунок 3.14. Зони спрацювання поверхні після МДО.

3.5. Дослідження поверхневих шарів поршнів з МДО на адгезійну міцність і теплостійкість

Теплостійкість будь-яких покриттів характеризується міцністю їх зчеплення з підкладкою при циклічних температурних навантаженнях. МДО-покриття за своєю суттю є модифікованими поверхневими шарами і характеризуються високою адгезією до підкладки, то можна припустити, що вони будуть позбавлені перелічених вище недоліків. Тому було сформульовано мету досліджень: встановлення впливу багатоциклових термічних навантажень на адгезійну міцність МДО-покриттів.

Методика підготовки зразків. Адгезійна міцність і теплостійкість МДО-покриттів досліджувалася на зразках зі сплаву АК4-1 ОСТ 192014-90.

При плануванні експерименту були обрані такі ж фактори процесу МДО, як і при дослідженні на зносостійкість - фактори, що найбільше впливають на властивості поверхневого шару: - концентрація їдкого калію Скон в електроліті, г/л; – концентрація рідкого скла СЖС, г/л; – ємність конденсаторів установки МДО, С, мкФ.

Зразки являли собою диски діаметром 64 мм і товщиною 5 мм. Площа зразка становила $S = 7405 \text{ мм}^2$. Заготівлі оброблялися методом МДО на різних режимах (Таблиця 3.12).

Тривалість обробки всім заготовкам, крім № 2, становила -3 години. На режимі № 2 тривалість обробки становила - 2 години, оскільки після цього часу процес МДО цьому режимі мимоволі припинився.

Таблиця 3.11 - Режими обробки зразків

№ режиму	1	2	3	4	5
Скон, г/л	1,5	3,5	1,5	3,5	2,5
СЖС, г/л	1,5	3,5	3,5	1,5	2,5
С, мкФ	400	400	200	200	300

Сформовані МДО-шари розрізнялися і на вигляд, і якістю МДО-шару (рис 3.12,а). Заготівлі розрізалися на зразки для проведення термоциклювання (ТЦ) та дослідження адгезійної міцності при склерометричних випробуваннях (рис 3.12,б).

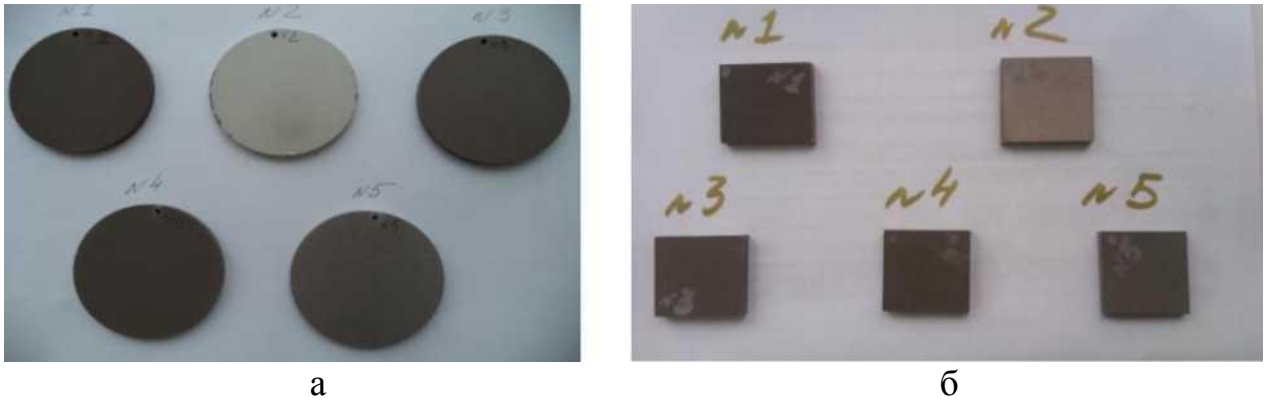


Рисунок 3.12 - Зразки для випробувань на термостійкість та адгезійну міцність: а - вихідні заготовки після МДО; б - зразки перед термоциклюванням

Дослідження на адгезійну міцність та теплостійкість проводилися одночасно. Ці випробування є стандартними. Методика розроблялася спеціально, на основі відомої методики, де випробування на теплостійкість покриттів з оксиду алюмінію проводилися на зразках, які попередньо нагрівалися в печі до 350°C і потім охолоджувалися протягом хв до кімнатної температури у воді. У цих випробуваннях теплостійкість оцінювалася за ефектом відшарування покриття, що візуально з'явився.

У випробуваннях, що проводяться в даній роботі, умови були максимально наближені до умов роботи днища поршня в двигуні, а саме: зразки піддавалися нагріванню протягом 30 хв до температури 400°C у спеціальній печі марки Nabertherm. Потім зразки охолоджувалися у воді до 20°C протягом 2 хвилин. Далі цикл повторювався. Після 30-ти циклів замірялася адгезійна міцність зчеплення МДО-покриття з підкладкою за допомогою скретч-тестера CSM SCRATCH TESTER. Загальна кількість циклів – 150. Перед початком випробувань на ТЦ і міцність адгезійну товщину МДО-покриття на всіх

зразках зішліфували до досягнення максимальної твердості. В основному товщина МДО-шару, що залишився на зразках складала ~ 40 мкм.

Як показники адгезійної міцності використовувалися: критична навантаження, при якій відбувається скол, а потім руйнування покриття (L_c); напруга на інденторі при дряпанні (аги). У процесі випробувань на індентор подавалося навантаження, величина якої поступово збільшувалася від 0,03 до 30,00 Н.

Для того щоб зафіксувати момент руйнування МДО-покриття при скретч-тестуванні, під час випробувань проводився запис сигналів акустичної емісії. Оцінюючи візуально характер руйнування шару, глибину проникнення індентора та рівень акустичної емісії, визначалося критичну напруга на інденторі, яка обчислювалася за формулою:

$$\sigma_{ind} = L_c / \pi \cdot P_d \cdot (2R_{ind} - P_d), \quad (3.3)$$

де R_{ind} – радіус індентора;

P_d - глибина проникнення індентора, нм,

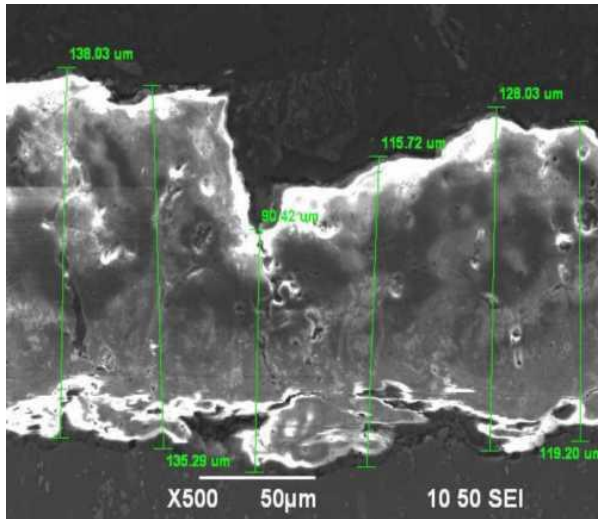
L_c – навантаження, при якому відбувається руйнування МДО-шарів.

Результати вимірювань товщини та мікротвердості МДО-шару представлені в таб. 3.12 та на рис. 3.13.

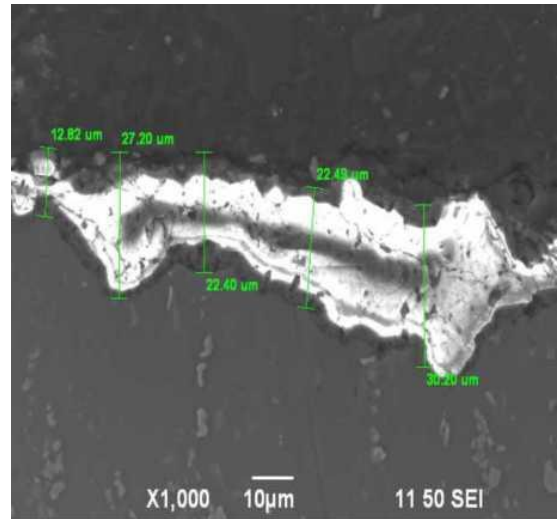
Таблиця 3.12 - Властивості МДО-шару

№ досліду	Мікротвердість, Н, гПа	Товщина h, мкм
1	6,60±1,23	84,92±9,03
2	9,52±2,03	125,25±9,97
3	6,30±1,73	25,57±3,81
4	6,02±0,38	42,95±6,03
5	8,11±1,98	76,13±10,34

Як вже згадувалося вище, перед випробуваннями на адгезійну міцність і теплостійкість МДО-шар зішліфовувався для того, щоб визначити адгезію шару до підкладки, а не адгезію між підшарам покриття. Значення товщини МДО-шарів перед скретч-тестуванням представлені в таб. 3.13.



а



б

Рисунок 3.13 – Поперечні шліфи зразків: а – зразок № 2; зразок № 3

Таблиця 3.13 - Товщина МДО-шарів сплаву перед ТЦ

№ зразка	1	2	3	4	5
Товщина шару, мкм	44,3±1,2	110,0±1,6	43,3±4,6	45,0±5,2	48,1±3,4

При проведенні скретч-тестування спочатку відбувається скол, а потім руйнування МДО-шару до основного металу. Тому, при випробуваннях виділено навантаження на індентор, при якому з'являються перші ділянки руйнування (L_{c1}) і навантаження, при якій МДО-шари руйнуються (L_d) (таб. 3.14). Критичні навантаження та напруги на інденторі у вихідному стані зразка та після проведення 150 термоциклів представлені в Таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Критичне навантаження руйнування МДО-шару

Кількість циклів нагрівання/охолодження	Критичне навантаження руйнування МДО-шару, L_{c2} , Н				
	зразок № 1	зразок № 2	зразок № 3	зразок № 4	зразок № 5
вихідний стан	26	29,5	26,5	27,6	28,8
30 циклів	25,6	29,8	24,4	25,4	28,2
60 циклів	27,4	29,5	24,9	27,1	28,5
90 циклів	25,7	29,5	26,0	26,7	29,5
120 циклів	24,7	28,7	21,7	28,4	27,3
150 циклів	26,5	29,7	20,1	25,6	25,4

Дані, наведені в таблиці 3.14 показують, що після ТЦ відбувається зниження адгезійної міцності МДО-шару на всіх зразках, крім обробленого на режимі № 3.

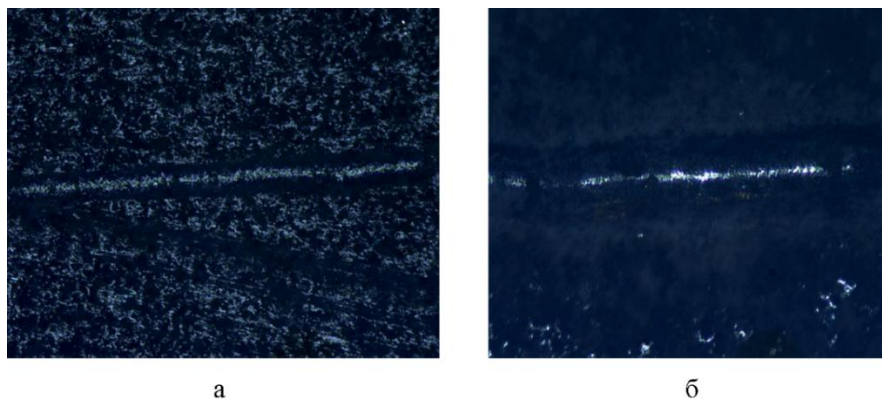


Рисунок 3.14 - Слід від індентора: а - слід без руйнування шару (зразок № 2); б - ділянка руйнування МДО-шару

Для цього зразка відбувається збільшення критичних напруг після ТЦ. Цей ефект може бути пов'язаний з тим, що в результаті ТЦ в МДО-шарі відбулися зміни, які призвели до зниження глибини проникнення індентора. Якщо до ТЦ вона становила 45-50 мкм, то після ТЦ склала 28-35 мкм, що і викликало збільшення критичних напружень.

Аналіз слідів індентора дозволяє зробити висновок, що руйнування МДО-шару при скретч-тестуванні відбувається в результаті поперечного розтріскування покриття та накопичення тріщин у міру зростання навантаження, що характерно для когезійного типу руйнування. Відшарування та великі сколи, властиві адгезійному типу, відсутні (рис 3.14).

3.6. Аналіз результатів стендових випробувань

Аналіз результатів стендових випробувань та розрахунків швидкісних характеристик показує, що у двигуна, оснащеного поршнями з теплозахисними оксидними МДО-шарами, ефективна потужність зростає з збільшенням швидкості. Так, при частоті обертання колінчастого валу 4100 хв^{-1} ефективна потужність у двигуна з теплозахисними оксидними шарами на

днищах поршнів на 3 кВт більше, ніж у двигуна зі штатними поршнями, та складає $N_e = 62,6$ кВт.

При номінальній частоті обертання колінчастого валу $2400 - 2500 \text{ хв}^{-1}$ максимальний момент, що крутить, у двигуна з теплозахисними оксидними МДО-шарами на днищах поршнів на $10 \text{ Н}\cdot\text{м}$ більше, ніж у двигуна зі штатними поршнями, і становить $175 - 180 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

При оборотах $2400 - 2500 \text{ хв}^{-1}$ питома ефективна витрата палива у двигуна з теплозахисними оксидними МДО-шарами на днищах поршнів, знизилася, в середньому, на $7,7\%$ і склала $258,7 - 259,9 \text{ г/кВтг}$.

При номінальній частоті обертання колінчастого валу 4100 хв^{-1} годинна витрата палива у двигуна з теплозахисними оксидними МДО-шарами на днищах поршнів, знизилася на $4,6\%$ і становив 19 кг/год .

При частоті обертання $2400 - 2500 \text{ хв}^{-1}$ фіксували навантажувальні характеристики двигуна. Вказана частота обертання колінчастого валу є номінальною і відповідає максимальному моменту, що крутить двигуна.

Аналіз результатів стендових випробувань та розрахунків навантажувальних характеристик показує, що у двигуна, оснащеного поршнями з теплозахисними оксидними шарами, годинна витрата палива на $1,1\%$ менше та становить $3,79 \text{ кг/год}$. Питома ефективна витрата палива у двигуна з теплозахисними оксидними МДО-шарами на днищах поршнів на 16% менше, ніж у двигунів штатними поршнями, і становить $619,77 \text{ г/кВт год}$.

У двигуна з теплозахисними оксидними шарами на днищах поршнів знизився вміст оксиду вуглецю (CO) і вуглеводню (CH) в відпрацьованих газах, у середньому, на 7% , та 10% відповідно, порівняно з двигуном зі штатними поршнями.

У двигунів з теплозахисними оксидними шарами на днищах поршнів підвищуються максимальний крутний момент та ефективна потужність, знижується годинна та питома ефективна витрата палива (погодинна на $4,6\%$,

питома на 7,7 %), зменшується вміст у відпрацьованих газах оксиду вуглецю на 7%, вуглеводню на 10%.

РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

4.1. Розробка рекомендацій щодо основних операцій технологічного процесу мікродугового оксидування

Для обґрунтування ефективності прийнятих рішень розроблено технологічний процес МДО, котрий складається технологічних операцій згідно таб. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні операції технологічного процесу МДО

Номер операції	Найменування операції
Оп. 5	Підготовка ванни до роботи
Оп. 10	Підготовка розчину
Оп. 15	Монтаж деталей (заготовок) у пристосуванні
Оп. 20	Мікродугове оксидування
Оп. 25	Демонтаж деталей (заготівель)
Оп. 30	Промивання та сушіння деталей (заготівель)
Оп. 35	Контроль
Оп. 40	Фінішна механічна обробка

Операція 05 - Підготовка ванн до роботи, полягає у зливі відпрацьованому електроліті з системи охолодження та з електролітичної ванни, промиванні та протирці ванни.

Операція 10 - Підготовка розчину, являє собою заповнення ванни дистильованою водою, а також додавання та розчинення всіх складових електроліту.

Процес МДО здійснювався в силікатно-лужному електроліті, який виготовлявся на основі дистильованої води з додаванням гідроксикалію КОН та метасилікату натрію (рідкого скла) Na_2SiO_3 . Калію гідроксид (КОН) відповідає вимогам ГОСТ 24363-80 і містила луг у перерахунку на КОН - 91,1%. Скло натрієве рідке (Na_2SiO_3) відповідає ГОСТ 13078-81 і містило масові частки SiO_2 - 31,8 - 32,2 %; Na_2O - 11,4-1,5%, мало щільність 1,47-1,48 г/см³ і силікатний модуль - 2,9. Щільність струму при обробці зразків становила $6,8 + 0,1$ А/дм². У процесі обробки організовувалося прокачування електроліту для забезпечення його охолодження. Температура електроліту не перевищувала – 45°C.

Операція 15 - Монтаж деталей (заготівель) у пристосуванні, полягає в установці оброблюваної деталі в пристосування, прикріпленні всієї системи струмопідводів та установці цього пристосування разом з деталлю в електролітичній ванні. Пристосування з деталлю необхідно встановити ввані так, щоб оброблювані поверхні були занурені в електроліт наглибину 50-150 мм. На цій операції важливо, щоб струмопідвідні елементи не торкалися розчину і розташовувалися від поверхні електроліту на відстані 10-50 мм.

Для обробки різних зон поршня спроектовано пристосування (рис. 4.1, 4.2.)

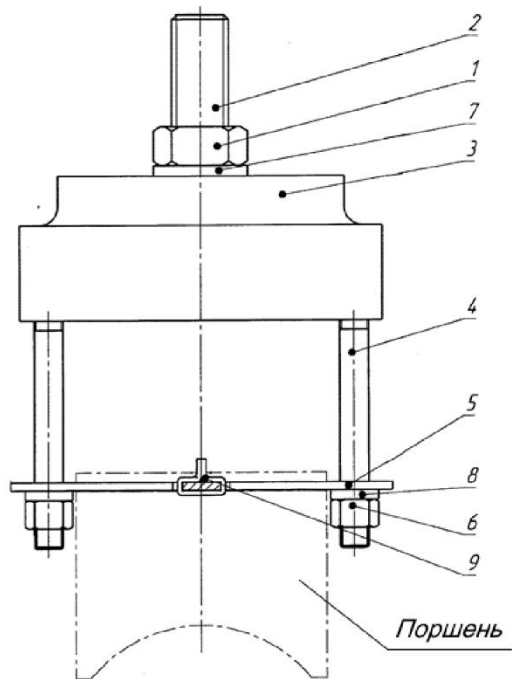


Рисунок 4.1 – Пристосування для обробки черевця (юбки) поршня: 1 – шайба верхня; 2- шпилька; 3 – основа; 4 – стрижень; 5 – захват; 6 – гайка; 7 - шайба; 8 – шайба; 9- шплінт

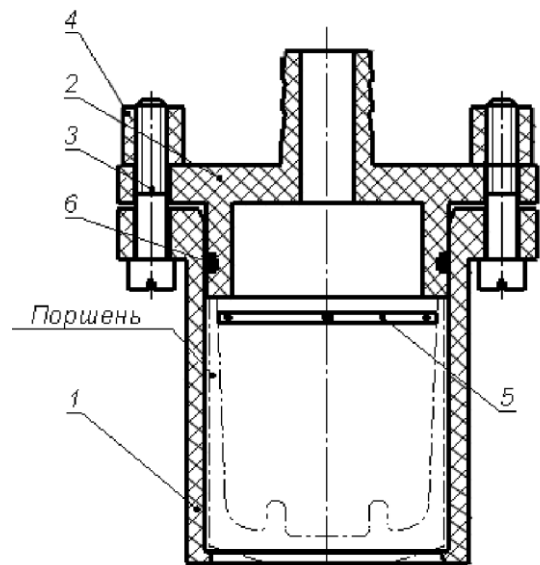


Рисунок 4.2 – Пристосування для обробки головки поршнів: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – гвинт; 4 – гайка; 5 - струмопідвідне кільце; 6 - кільце ущільнювальне

Операція 20 - Мікродугове оксидування, являє собою запуск необхідних допоміжних систем: фільтрації електроліту, охолодження, вентиляції, вимірювання температури електроліту. Потім відбувається включення установки і виставлення на пульті управління необхідних електричних параметрів.

Операція 25 - Демонтаж деталей (заготівель), передбачає вимикання установки, від'єднання струмо підвідних елементів, вилучення пристосування з деталлю з ванни і промивання їх проточною водою.

Операція 30 - Промивання та сушіння деталей. На цій операції передбачається розбирання пристосування, промивання та сушіння деталі.

Операція 35 – Контроль. Операція варта візуального контролю МДО-покриття щодо сколів, пропалів. Крім цього, можна перевірити товщину

покриття методом неруйнівного контролю, за допомогою вихрострумового товщиноміра.

Операція 40 – Фінішна механічна обробка. Ця операція передбачає механічне видалення верхнього пухкого шару, який неминуче утворюється при МДО.

Рекомендації для технологічної операції фінішної обробки поверхні з МДО-шаром. Зазвичай після МДО на поверхні деталей формується наноструктурний поверхневий шар, товщиною 50-250 мкм.

- перехідного: знаходиться на межі матеріалу підкладки;
- робітника: розташовується в середній частині МДО-шару і відрізняється мінімальною пористістю та максимальною мікротвердістю (рис. 4.5.);
- технологічного підшару: верхнього пухкого шару.

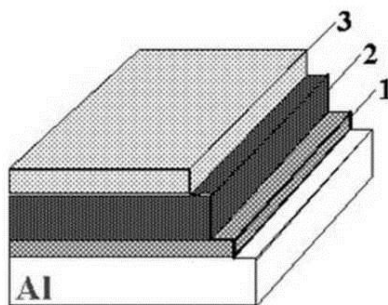


Рисунок 7.5 – Структура МДО-шару: а – типова будова оксидного шару після МДО [20]; б - шарувата будова МДО-шару; позначення: 1 - перехідний підшар; 2 - робочий підшар; 3 - технологічний підшар

Особливість технологічного (зовнішнього) підшару така, що він є пухким і пористим, складається в основному з муллита - $Al_2Si_6O_{13}$. З одного боку, пористість є позитивною властивістю підшару, оскільки сприяє зниженню його коефіцієнта теплопровідності та підвищує ефективність, наприклад, теплового захисту. З іншого боку, пухка структура може стати причиною пошкодження підшару в процесі роботи двигуна. При цьому частки муллита можуть потрапити в зону тертя «поршень - циліндр» і призвести до суттєвого зношування поверхонь деталей циліндрпоршневої групи ДВС. З

цієї причини деяку частину технологічного підшару необхідно видалити на етапі фінішної обробки.

Товщина технологічного підшару може бути різною і становить 10-50 мкм залежно від режиму МДО. Крім цього, МДО-шар формується в основному вглиб матеріалу поршня, формування шару назовні відбувається зазвичай на незначну величину - 10-20 мкм. На підставі цих даних рекомендується видалити при фінішній обробці не менше 15 мкм технологічного підшару.

У зв'язку з високою твердістю МДО-покриття, його фінішну обробку рекомендується проводити за допомогою дрібнозернистого абразивного інструменту, наприклад, пластин з надтвердих матеріалів типу кубічного нітриду бору.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено вплив режимів процесу мікродугового оксидування на структуру, механічні, хімічні, фізичні та експлуатаційні властивості поверхневих шарів – товщину, мікротвердість, зносостійкість, корозійну стійкість та теплостійкість зразків із алюмінієвих сплавів.

2. Режими процесу мікродугового оксидування мають безпосередній і істотний вплив на параметри, теплостійкість і адгезійну міцність поверхневого шару. Підвищення концентрації метасилікату натрію (СЖС), ідкого калію (СкОН) в електроліті та ємності установки призводять до зростання товщини мікротвердості МДО-шару, а також підвищують його теплостійкість та адгезійну міцність.

3. Запропоновано методологію комплексних досліджень, що дозволяє визначити технологічні режими мікродугового оксидування для формування

поверхневих шарів на деталях циліндропоршневої групи ДВЗ з необхідними значеннями зносостійкості, корозійної стійкості та теплостійкості.

4. Встановлено, що низький коефіцієнт теплопровідності МДО-покриття обумовлений присутністю у його структурі нанорозмірних пір, а також нанокристалітів в аморфній фазі, утворенню якої сприяє кремній в алюмінієвому сплаві.

5. За результатами випробувань поршнів з МДО-покриттям на спідниці було виявлено високу зносостійкість її поверхні. При цьому найбільшу зносостійкість мають поршні зі сплаву АК4-1 з покриттям - лінійна інтенсивність зношування спідниці у такого поршня зменшилася в 3,9 рази в порівнянні з необробленою спідницею. Середні значення коефіцієнтів тертя в режимі сухого тертя на МДО-шарі сплаву АК4-1 $f_{тр} = 0,39-0,80$.

6. Випробування поршнів з теплозахисним МДО-покриттям на днищі показали високу ефективність такого теплового захисту поршня. Зниження температури поршня, виміряне з внутрішньої сторони деталі (з боку картеру), за рахунок МДО-шару знижується мінімум на 45°C і максимум 78°C .

7. Стендові випробування показали: при частоті обертання колінчастого валу 4100 хв^{-1} ефективна потужність у двигуна з МДО теплозахисними оксидними шарами на днищах поршнів на 3 кВт більше, ніж у двигуна зі штатними поршнями, та складає $Ne = 62,6\text{ кВт}$.

8. При номінальній частоті обертання колінчастого валу $2400 - 2500\text{ хв}^{-1}$ максимальний момент, що крутить, більше, ніж у двигуна зі штатними поршнями, і становить $175 - 180\text{ Н}\cdot\text{м}$. При оборотах $2400 - 2500\text{ хв}^{-1}$ питома ефективна витрата палива знизилася, в середньому, на $7,7\%$ і склала $258,7 - 259,9\text{ г/кВтг}$. При номінальній частоті обертання колінчастого валу 4100 хв^{-1} годинна витрата палива знизилась на $4,6\%$ і становив 19 кг/год .

9. У двигуна, оснащеного поршнями з теплозахисними оксидними шарами, годинна витрата палива на $1,1\%$ менше та становить $3,79\text{ кг/год}$.

Питома ефективна витрата палива 16% менше, ніж у двигунів з штатними поршнями, і становить 619,77 г/кВт год.

10. Знизився вміст оксиду вуглецю (CO) і вуглеводню (CH) в відпрацьованих газах, у середньому, на 7%, та 10% відповідно, порівняно з двигуном зі штатними поршнями, підвищуються максимальний крутний момент та ефективна потужність, знижується годинна та питома ефективна витрата палива (погодинна на 4,6 %, питома на 7,7 %), зменшується вміст у відпрацьованих газах оксиду вуглецю на 7%, вуглеводню на 10%.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ionsson R. Richten warmebehandelter Werkstücke. II HTM: Harter. - techn. Mitt.- 1998.-53, №1.-5-8
2. Verbesserung der Technologie der Werkstückverfestigung durch plastische Oberflächenverformung I Belkin L. M. etc. II Maschinenbautechnik. - 1989. -38, №12.
3. Beer, S. Verbesserung der Anlaufperformance durch den Einsatz vonFrontloading-Maßnahmen / S. Beer // Anlaufmanagement in der Automobilindustrieerfolgreich umsetzen : Ein Leitfaden für die Praxis / G. Schuh, W. Stolzle, F. - [S. 1]: Kolbenschmidt Aluminium-Technologie AG; Springer, 2008. - Part of the VDI-Buch book series. – P. 43-52.
4. Долганов І. І., Автомобільні двигуни: підручник для студ. вищ. навч. закладів / Долганов, І. І. - 2-ге вид. - К. 2005. - 476 с.
5. MMC All Aluminum Cylinder Block for High Power SI Engines / T. Takami, M. Fujine, S. Kato and et. // 2000 SAE world congress: technical paper. - 2000. - №2000-01-1231. – P. 1-14.
6. Plasma electrolysis for surface engineering / AL Yerokhin, X. Nie, A. Leyland and et. // Surface and Coatings Technology. – 1999. – № 122. – P. 73-93
7. Кисликов В. Ф. Будова й експлуатація автомобілів / В. Ф. Кисликов, В. В. Лущик. - Київ: Либідь, 2006. - 400 с. - (6-те).
8. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД [Текст] / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк [и др.]. - Запорожье : Мотор Сич, 2005. - 559 с.
9. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки [Навчальний посібник] / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. - Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. - 208 с.

10. Форнальчик Є.Ю., Оліскевич М.С., Мاستикаш ОЛ., Пельо Р.А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: Навчальний посібник. – Львів: Афіша, 2004.-492 с.
11. Канарчук В.Є., Лудченко О.А., Чигиринець А.Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів: Підручник. – К.: Вища шк., 1994. – (У 3-х кн.): Кн. 1: Теоретичні основи: Технологія. – 342 с; Кн. 2: Організація, планування і управління. – 383 с; Кн. 3: Ремонт автотранспортних засобів. – 599 с.
12. Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends. Woodhead Publishing, 2010. XXX, 1018 p.
13. Сандомирський М.Г. Трактори та автомобілі. Ч.1. Автотракторні двигуни // Навчальний посібник / М.Г. Сандомирський, М.Ф. Бойко, А.Т. Лебедєв– К.: Вища школа, 2000. – 357с.
14. Маркович С. І. Експлуатація та ремонт двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. / С. І. Маркович, О. В. Бевз ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. - 334 с.
15. Ionsson R. Richten warmebehandelter Werkstiicke. II НТМ: Harter. - techn. Mitt.- 1998.-53, №1.-5-8.
16. Verbesserung der Teclmologie der Werkstückverfestigung durch plastische Oberflächenverformung I Belkin L. M. etc. II Maschinenbautechnik. - 1989. -38, №12.
17. Сандомирський М.Г. Трактори та автомобілі. Ч.1. Автотракторні двигуни // Навчальний посібник / М.Г. Сандомирський, М.Ф. Бойко, А.Т. Лебедєв– К.: Вища школа, 2000. – 357с.
18. Сахно В. П. Експлуатаційні властивості автомобілів / В. П. Сахно. – К.: Видавництво “КВІЦ”, 2006. – 174 с.
19. Клімов С.В. Організація технічного сервісу машин: Навчальний посібник, – Рівне: НУВГП, 2011 – 120 с.