

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи бакалавра

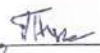
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»

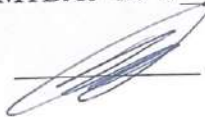
Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигуна іскровим
зміцненням та мікродуговим оксидуванням»

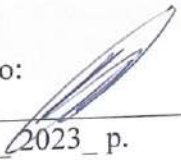
Шифр: ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ

Виконав: студент 3 курсу, група МТВАс -20-2  Б.І. Туз

Керівник

 д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ 

Диха О.В.

8 06 2023 р.

Хмельницький, 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Освітня програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою ТАМ
Диха О.В.
" 20 "березня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Туз Богдан Ігорович

1. Тема проекту:

«Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигуна іскровим зміцненням та мікродуговим оксидуванням»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 1.03 2023р. № 5

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 10.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Технічні умови на ремонт алюмінієвих блоків циліндрів ДВЗ..
- 2) Річна програма ремонту.
- 3) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз сучасних способів підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра двз
2. Технологія іскрового зміцнення алюмінієвих сплавів
3. Моторні випробування гільз циліндрів

5. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 20 березня 2023р.


КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасних способів підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра двз	1.05.2023	
2	Технологія іскрового зміцнення алюмінієвих сплавів	15.05.2023	
3	Моторні випробування гільз циліндрів	25.05.2023	
4	Оформлення презентації	5.06.2023	
5	Оформлення пояснювальної записки	15.06.2023	

Студент

 Туз Б.І.

Керівник роботи

 Диха О.В.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 94 сторінок, кількість рисунків – 51, таблиць – 14, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 62
Студент гр. МТВАс-20-2 Туз Б.І.

Тема «Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигуна іскровим зміцненням та мікродуговим оксидуванням»

Дана бакалаврська дипломна робота присвячена підвищенню зносостійкості робочої поверхні циліндра з алюмінієвого сплаву та зниження механічних втрат двигуна методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування.

Відповідно до мети вирішені завдання:

Обґрунтовані режими іскрового зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра ДВС з алюмінієвого сплаву для забезпечення його зносостійкості.

Досліджений вплив іскрового зміцнення на коефіцієнт тертя, мікротвердість та межу міцності покриття, що визначають надійність конструкції двигуна.

Розроблена методика та проведені порівняльні моторні випробування для оцінки впливу зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на зносостійкість циліндра та механічні втрати ДВЗ.

Перелік ключових слів: гільза циліндра, іскрове зміцнення, зносостійкість, мікродугове оксидування

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1.АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРА ДВЗ.....	10
1.1.Умови роботи деталей ЦПГ.....	10
1.2.Конструкції алюмінієвих блоків циліндрів.....	12
1.3.Чинники, що впливають на ресурс робочої поверхні циліндра.....	17
1.4.Аналіз сучасних способів підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра зі сплавів алюмінію.....	24
1.5.Мікродугове оксидування та іскрове зміцнення.....	35
2. ТЕХНОЛОГІЯ ІСКРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	42
2.1.Вплив режимів іскрового зміцнення на зносостійкість алюмінієвих сплавів.....	42
2.2.Вплив іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на коефіцієнт тертя.....	47
2.3.Вплив режимів іскрового зміцнення на мікротвердість та межу міцності алюмінієвих сплавів.....	51
3. МОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ.....	55
3.1.Опис експериментального двигуна.....	55
3.2.Випробувальний стенд.....	57
3.3.Методика досліджень.....	59
3.3.1.Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на ефективні показники двигуна.....	67

ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
			<i>Гіля</i>			
Розроб.	Туз		Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигуна іскровим зміцненням та мікродуговим оксидуванням	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Диха			4	84	
Н.контр.	Бабак			ХНУ,		
Затвер	Диха			гр. МТВАс-20-2		

3.4.Результати досліджень.....	69
3.4.1.Дослідження зносостійкості деталей циліндропоршневої групи базового двигуна.....	69
3.4.2.Дослідження впливу мікродугового окислення робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи.....	72
3.4.3.Дослідження впливу іскрового зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи.....	74
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	78
Додатки.....	84

ВСТУП

Зростання конкуренції на ринку двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та безперервно зростаючі екологічні вимоги викликають необхідність постійного підвищення якості та скорочення термінів створення (дослідження, проектування та виробництва) нових конструкцій двигунів, а також зниження витрат на всіх стадіях життєвого циклу виробу за рахунок використання інноваційних технологій, що забезпечують мінімізацію споживаних трудових та матеріальних ресурсів. Це, у свою чергу, призводить до розробки та впровадження більш складних технологій та технічних рішень.

У роботі [1] вказується, що в середньостроковій перспективі основними цілями розробок у галузі ДВЗ є збільшення потужності, економії палива, надійності та довговічності, зменшення маси та габаритів, забезпечення сумісності з альтернативними паливами. Як результат, внаслідок збільшення тиску та температури в камері згоряння, частоти обертання колінчастого валу тощо, відбувається збільшення механічних та теплових навантажень на деталі ДВЗ. Застосування альтернативних видів палив супроводжується зміною хімічної активності середовища в камері згоряння та, як наслідок, збільшенням корозії поверхонь деталей. Способи забезпечення надійності деталей ДВЗ, що застосовуються зараз, не задовольняють повною мірою зростаючим вимогам,

З іншого боку, тенденція до зниження маси двигуна призвела до того, що відбувається поступовий перехід до легких, зокрема до алюмінієвих сплавів. Зниження маси двигуна тягне за собою зниження вимог до кріплень, зчленування, підвіски і т.д. Особливу важливість маса ДВЗ має при їх застосуванні в ручному інструменті, авіації, мобільних енергоустановках.

Сьогодні із алюмінієвих сплавів виготовляють поршні, а також корпусні деталі двигуна та агрегатів. Подальше розширення застосування сплавів

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

алюмінію обмежуються рядом властивих їм недоліків, зокрема, низькою зносостійкістю. З цієї причини, незважаючи на те, що в даний час у світі приблизно половина всіх блоків циліндрів виготовляється з алюмінієвих сплавів, тільки 10% з них використовуються без чавунної або сталеві гільзи [2]. У зв'язку з цим одним із напрямів науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, що проводяться в галузі двигунобудування, є виключення таких вставок з конструкції ДВЗ та повний перехід на сплави алюмінію при виготовленні блоків циліндрів.

Деталі циліндропоршневої групи (ЦПГ) є найбільш навантаженими ДВС. Вони функціонують в умовах впливу високих температур, динамічних навантажень, сил тертя та агресивних хімічних сполук. Зношування поршнів, кільця і робочих поверхонь циліндрів є одним з основних лімітуючих факторів, що визначають міжремонтні періоди двигуна. І якщо поршень і кільця відносяться до швидкознімних деталей, ремонт поверхні циліндра або заміна гільзи пов'язані з істотними витратами. У поршневих ДВЗ до 11% енергії палива втрачається на подолання сил тертя [3]. У тому числі до 40% втрат посідає частку деталей циліндропоршневої групи [4]. Економічний ефект від зниження втрат на тертя і знос у всіх двигунах оцінюється в 120 мільярдів доларів США.

Сьогодні в області поршневого двигунобудування для підвищення ресурсу робочої поверхні алюмінієвого циліндра знаходять застосування різні зміцнюючі покриття, способи об'ємного та поверхневого легування. Однак ці способи мають різні недоліки [5-8]: покриття відшаровуються при високих температурах і великих механічних навантаженнях, поверхні руйнуються в результаті агресивного впливу палив, дороги в застосуванні, мають великий обсяг шлюбу при виготовленні і т.д. Так само необхідно враховувати, що більшість існуючих рішень є власністю іноземних компаній, що обмежує їх застосування в ДВС.

Одним із перспективних способів підвищення ресурсу деталей ЦПГ з алюмінієвих сплавів є мікродугове оксидування (МДО) [10-12]. МДО

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		8

ресурсу робочої поверхні циліндра. При цьому провідні виробники проводять дослідження з метою виключення таких вставок із конструкції ДВЗ.

- Існуючі на ринку технології, по-перше, не задовольняють усьому спектру запитів виробників ДВЗ: зокрема, виявляються дорогими для застосування в малорозмірних ДВЗ, мають проблеми сумісності з різними паливами тощо. По-друге, ці технології розроблені та є власністю кількох компаній-монополістів.

Метою дипломної роботи є підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра з алюмінієвого сплаву та зниження механічних втрат двигуна методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування.

Відповідно до мети формулювалися завдання:

1. Обґрунтування режимів іскрового зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра ДВС з алюмінієвого сплаву для забезпечення його зносостійкості.

2. Дослідження впливу іскрового зміцнення на коефіцієнт тертя, мікротвердість та межу міцності покриття, що визначають надійність конструкції двигуна.

3. Розробка методики та проведення порівняльних моторних випробувань для оцінки впливу зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на зносостійкість циліндра та механічні втрати ДВЗ.

1.АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРА ДВЗ

1.1 Умови роботи деталей ЦПГ

Конкуренція на ринку машин та механізмів посилюється щодня. У зв'язку з цим змінюються вимоги до джерел енергії, зокрема й механічної. Поршневі двигуни внутрішнього згорання (ДВС), загальна потужність яких у час становить 80 – 85% потужності всіх енергоустановок світової енергетики, також відгукуються вимоги ринку [14]. Протягом останніх 40 років значний вплив на розвиток двигунобудування робить посилення норм токсичності продуктів, що виникають протягом життєвого циклу двигуна. Можна виділити такі тенденції розвитку двигунобудування:

1. Підвищення енергоефективності, що виражається у зниженні витрат палива, рециркуляції та вторинному використанні продуктів життєдіяльності двигуна тощо.
2. Підвищення екологічних показників ДВЗ, тобто. зниження токсичності відпрацьованих газів, кількості та токсичності мастильних матеріалів; зменшення витрат на утилізацію та вторинне використання матеріалів і т.д.
3. Підвищення споживчих якостей, тобто. підвищення потужності, надійності, безпеки, зниження вартості його виробництва та обслуговування тощо.

Як результат, відбувається збільшення механічних та теплових навантажень на деталі двигуна. З цієї причини особливої актуальності набувають проблеми підвищення надійності деталей ДВЗ. Як відомо, найбільш навантаженими ДВС є деталі циліндропоршневої групи. Ці деталі зазнають впливу високих динамічних навантажень і температур у процесі експлуатації. При цьому деталі, що знаходяться в поєднанні, схильні

кільком видам зносу: механічному, абразивному, окисному, корозійному,

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		11

зношування при заїданні, а також комбінованій дії перерахованих видів зносу [14-17]. Крім того, в процесі роботи деталі ЦПГ відчувають вібрації, які зростають у міру зносу поверхонь поршня, поршневих кілець і стінок циліндра. Вібрації суттєво погіршують роботу двигуна та призводять до втомного руйнування деталей.

Додатково умови роботи деталей ЦПГ ускладнюються ще й тим, що при високих температурах та швидкостях ковзання відбувається часткове руйнування масляної плівки, що призводить до виникнення режиму сухого тертя, збільшення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Великий вплив на знос роблять продукти згоряння та пил, що потрапляє до робочої камери з навколишнього середовища. Частинки продуктів згоряння та пилу є причиною абразивного зношування поршневих кілець та поверхні циліндрів.

Незважаючи на постійне вдосконалення конструкції двигунів та технології їх виробництва, зношування деталей циліндропоршневої групи продовжує лімітувати міжремонтні пробіги. Якщо поршень і кільце відносяться до швидкознімних деталей, відновлення і заміна гільзи пов'язані з набагато більшими витратами. Зношування деталей ЦПГ ДВС значною мірою негативно впливає на індикаторні та ефективні показники двигуна, витрата картерних газів і витрата масла на чад.

Тенденція до зниження маси деталей двигуна призвела до того, що багато деталей ДВС, зокрема й деталі ЦПГ, виготовляють із алюмінієвих сплавів [18–20]. Однак низька зносостійкість сплавів алюмінію обмежує сферу застосування алюмінію у відповідальних деталях ДВС. Так, наприклад, блок циліндрів з алюмінієвого сплаву вставляється втулка з більш зносостійкого матеріалу, що призводить до збільшення маси двигуна і ускладнює його конструкцію. У зв'язку з цим застосування алюмінієвих гільз циліндрів та безгільзових блоків циліндра залишається однією з цілей провідних моторобудівних фірм світу.

1.2 Конструкції алюмінієвих блоків циліндрів

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		12

У сучасному двигунобудуванні виділяються кілька концепцій конструкції блоків циліндрів (БЦ). Найбільшого поширення набули монолітні блоки (Рисунок 1.1). При такій конструкції циліндри та блок циліндрів виготовляються як єдине ціле. У малорозмірних одно- та двоциліндрових двигунах можливі варіанти конструктивного виконання, коли в єдину деталь поєднується ще й кришка БЦ або картер.



Рисунок 1.1 – Монолітний БЦ [21]

У конструкціях типу Open-Deck циліндри стоять вільно в блоці, а сорочка охолодження відкрита в площині роз'єму кришки БЦ. Циліндри можуть бути виготовлені як окремо один від одного (Рисунок 1.2 а), так і єдиною деталлю (Рисунок 1.2 б). Завдяки тому, що охолоджувальне середовище омиває циліндр з усіх боків, теплові потоки від нагрітого середовища робочої камери розподіляються рівномірно по діаметру.

У конструкціях типу "Closed-Deck" на відміну від попереднього варіанта, верх циліндрів до отворів для протікання охолоджувальної речовини закритий (Рисунок 1.3). При цьому циліндри виготовляють як окрему монолітну деталь. Така конструкція забезпечує гарне ущільнення кришки БЦ

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та високу жорсткість верхньої частини циліндрів.



а

б

Рисунок 1.2 – Блоки циліндрів конструкції типу «Open-Deck» [21]



Рисунок 1.3 – Блоки циліндрів конструкції типу «Closed-Deck» [21]

Ще одним варіантом виконання є блоки циліндрів з мокрими гільзами (Рисунок 1.4). Гільзу циліндра називають мокрою, якщо вона омивається рідиною системи охолодження.

В даний час у світі приблизно половина всіх блоків виготовляється із алюмінієвих сплавів. Однак у 90% їх використовують гільзи зі сплавів заліза

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

чи інших зносостійких матеріалів [2]. Тому провідні моторобудівні фірми світу ведуть розробки у напрямку впровадження алюмінієвих гільз та безгільзових алюмінієвих блоків циліндрів.

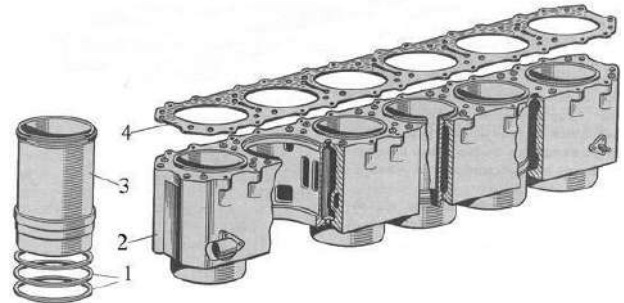


Рисунок 1.4 - Блок циліндрів з «мокрими» гільзами: 1 – кільця ущільнювачів, 2 – блок циліндрів, 3 – гільза, 4 – прокладка головки блоку.

Основні переваги застосування алюмінієвих блоків циліндрів без чавунних гільз пов'язані з масогабаритними та технологічними показниками. Щільність алюмінієвих сплавів у 2,5...3 рази менша за щільність сплавів заліза. Заміна чавуну на алюміній під час виготовлення блоку циліндрів призводить до зниження його маси приблизно на 50%. Подальший виняток із конструкції двигуна гільз циліндрів із сплавів заліза дозволяє додатково зменшити масу блоку циліндрів до 30% [2]. Це у свою чергу забезпечує збільшення питомої маси двигуна та зменшення витрати енергії на переміщення самого ДВС у просторі стосовно мобільних машин. Крім того, зниження маси двигуна дозволяє зменшити масу інших деталей: кріплень, рами та т.д. Завдяки цьому, наприклад, зниження загальної маси автомобіля на 10% дозволяє зменшити витрату палива до 1,5% [22].

З погляду конструкції та технології виробництва, безгільзовий алюмінієвий блок циліндрів забезпечує мінімальний конструктивний перекид циліндрів, зумовлений некруглістю або неточним позиціонуванням гільз. Завдяки кращій теплопровідності алюмінію зменшується термічна

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

некруглість та термічний перекис циліндрів [2]. Якщо говорити про алюмінієві ГЦ, використання матеріалів з близькими значеннями коефіцієнта теплового розширення дозволяє відмовитися від спеціальних конструкційних заходів для компенсації теплової зміни розмірів втулки і блоку циліндрів. Крім того, алюмінієві сплави відрізняються високою оброблюваністю різанням, хорошими ливарними властивостями та ін.

Алюмінієві циліндри менш схильні до проблем, пов'язаних з корозійною стійкістю робочої поверхні. Особливої актуальності це набуває у зв'язку з переходом на альтернативні види палива, такі як етанол, метанол, водень та ін. алюмінію володіє високим електричним опором і запобігає виникненню електричного струму між деталями, що труться. Корозійна стійкість алюмінієвих сплавів приблизно в 20 разів вища, ніж у сталі. Причому за умов, властивих середовищі в циліндрі двигуна, алюміній є стійким до впливу таких елементів та сполук як вода, водень, кисень, азот, сірка, сечовина, сірчиста, сірчана, азотна, вугільна кислоти та ін.

Важливою властивістю, що має значення при використанні алюмінію ДВЗ, є його висока теплопровідність. Завдяки цьому відбувається зниження термічних навантажень та теплової інерції деталей. Термічна напруженість безпосередньо впливає на надійність та довговічність деталей. Теплова інерція може істотно впливати на робочий процес двигуна, особливо на режимах, що не встановилися. Зокрема, тепла інерція впливає на коефіцієнт наповнення циліндра та індикаторний ККД двигуна. Причому цей вплив характерний як для дизельних, так і для карбюраторних двигунів. До

наприклад, при розгоні холодного двигуна спостерігається зниження індикаторного ККД на 5-7% за рахунок теплової інерції [28]. Висока теплопровідність алюмінієвих сплавів дозволяє зменшити об'єм водяної сорочки циліндра до 35...65%, що забезпечує додаткове зменшення маси, що позитивно впливає на тепловий баланс та теплову інерцію двигуна [21]. На рисунку 1.5 показано порівняння висоти сорочки охолодження циліндра при застосуванні чавуну (а) та сплаву алюмінію (б). У виробничо-технічному

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		16

0,02 мм. Зазори в камері згоряння, які занадто малі для поширення полум'я, є джерелом емісії вуглеводнів, що не згоріли. Найбільш важливим є зазор між поршнем і стінкою циліндра над першим кільцем поршневим. Дослідження показують, що маса вогневоднів, що не згоріли, що утворюються в подібних зазорах, знаходиться в прямій залежності від обсягу зазору. Причому маса вуглеводнів, що не згоріли, що утворюються в зазорі, становить від 40 до 60% від загальної маси вуглеводнів, що не згоріли, що утворюються в циліндрі. За попередніми оцінками розрахунками зменшення монтажного зазору поршня з 0,05 мм до 0,02 мм для бензинового двигуна об'ємом 1,5...2 л дозволить знизити викиди вуглеводнів, що не згоріли, на 15–20 %, а в період пуску та прогріву до 40 % від наявного до зменшення зазору рівня емісії [2].

Таким чином, удосконалення робочого процесу, зниження маси блоку циліндрів, теплової інерції та напруженості, монтажних зазорів поршня при заміні чавунного блоку циліндрів або алюмінієвого блоку з чавунними гільзами повністю алюмінієвий блок циліндрів надають позитивний вплив на екологічні, питомі та . Істотним недоліком алюмінієвих сплавів є низька поверхнева твердість та, як наслідок, низька зносостійкість. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування спеціальних заходів для забезпечення необхідних показників надійності при зношуванні, що особливо актуально для деталей ЦПГ та робочої поверхні циліндра, зокрема. Слід зазначити, що з виготовленні двигунів робочим об'ємом 1 л вартість алюмінієвого блоку виявляється на 20-25% більше, ніж чавунного, а двигунів робочим об'ємом 2,0...2,5 л – дорівнює чи менше [28].

1.3 Чинники, що впливають на ресурс робочої поверхні циліндра

На процес зносу робочої поверхні циліндрів впливає велика кількість факторів, що залежать від типу двигуна, конструктивних особливостей, ступеня форсованості, палива і масла, що застосовується, умов навколишнього середовища, властивостей застосовуваних матеріалів і т.д. У цьому однозначного визначення природи зношування немає. Дослідження

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показують, що робоча поверхня циліндра одночасно піддається абразивному, корозійно-механічному та молекулярно-механічному зношуванню. Процес молекулярно-механічного зношування найімовірніший у верхній частині циліндра [29]. В умовах недостатнього мастила, малої швидкості поршня в цій області, високих температурах і тиску відбувається порушення безперервності масляної плівки, що стає причиною виникнення захоплення поверхонь пар, що труться, в окремих точках.

Корозійно-механічне зношування поверхні циліндрів полягає у взаємодії металу поверхонь тертя з газоподібними та рідкими продуктами згоряння палива, окислення олії та води [30]. Корозійно-механічне зношування складається зазвичай з двох фаз. У першій фазі під впливом агресивної речовини на метал відбувається утворення окисної плівки. Друга фаза супроводжується видаленням цієї плівки з поверхні тертя. Вважається, що для циліндрів двигунів основне значення має електрохімічна корозія, що є результатом взаємодії з металом слабких кислот, розчинених у воді та сконденсованих на стінках циліндрів.

Абразивне зношування деталей ЦПГ викликається, переважно, частинками мінерального походження, проникаючими в циліндр разом із повітрям чи які у процесі експлуатації ДВС. Як правило, максимальне абразивне зношування циліндра спостерігається в області верхньої мертвої точки, при цьому відбувається процес дряпання і мікрорізання поверхні деталі твердими абразивними частинками, а також їх інтенсивне дроблення між стінкою циліндра і поршнем. Максимальне абразивне зношування нижньої та середньої частини циліндра спостерігаються при попаданні пилу в масло [15].

Необхідно відзначити, що в явному вигляді розглянуті види зношування впливають на ресурс дзеркала циліндра тільки при патологічних режимах експлуатації ДВЗ, помилках у конструкції, порушенні теплового режиму і т.д., а також при роботі на режимах, що не встановилися. При нормальному функціонуванні двигуна складно виділити причинно-наслідковий зв'язок між

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

ресурсом циліндра та видами зношування.

У загальному випадку фактори, що впливають на зношування дзеркала циліндра, можуть бути згруповані наступним чином:

1. експлуатаційні фактори, що визначаються режимом роботи двигуна;
2. технологічні та конструкційні фактори;
3. фактори впливу довкілля.

Експлуатаційні фактори визначаються комплексом теплових, навантажувальних та швидкісних режимів двигуна. Як при встановилися, так і при невстановлених режимах навантаження на двигун і частота обертання колінчастого валу надають вирішальний вплив на надійність робочої поверхні циліндра. Як показують дослідження, при режимах, що не встановилися, знос виявляється в 2,5...3,5 рази вище, ніж при встановилися [31].

Збільшення навантаження при стабільному тепловому режимі призводить до пропорційного зростання зносу (Рисунок 1.6 а), так як збільшується питомий тиск кілець на стінки циліндра. Слід зазначити, що інтенсивність зношування залежить тільки від величини навантаження, а й від інтенсивності її зміни. На рисунку 1.7 показано вплив інтенсивності зміни навантаження на знос гільзи циліндра двигунів ЗМЗ-21 (а) та ЗМЗ-53 (б). Інтенсивність зміни навантаження W_p перебуває у діапазоні 0,05...0,25 МН/м². Аналіз даних, отриманих у роботі [32], показує, що незалежно від типів двигунів при невстановлених навантажувальних режимах порівняно з еквівалентними режимами, що встановлені, знос ГЦ зростає більш ніж у 3 рази. Важливу роль відіграє тепловий стан двигуна. Так, наприклад, при холодному пуску зношування циліндрів двигунів, навантажених на 10...15 % від максимальної потужності, має більші значення, ніж при навантаженні до 70...80 % та оптимальних температурах охолоджуючої рідини та олії [31].

На рисунку 1.6 б показаний характер впливу частоти обертання колінчастого валу (КВ) n на знос циліндра [31]. Зі збільшенням частоти обертання КВ при стабільному тепловому режимі зношування збільшується.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

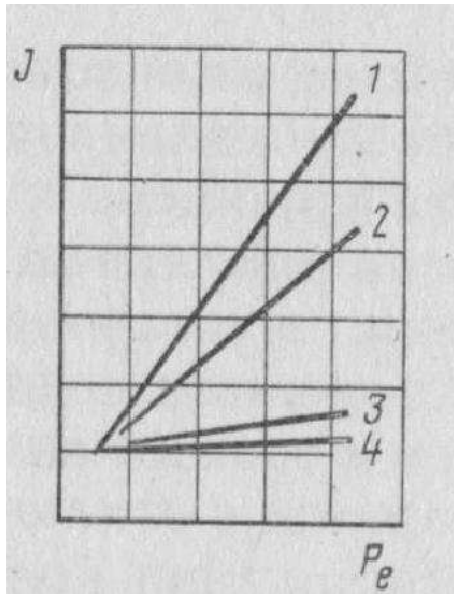
При динамічних режимах роботи двигуна зношування поверхні циліндра значною мірою залежить від величини прискорень КВ. Наприклад, у роботі [32] показано, що зміна прискорення в діапазоні 5...20 1/с² (за 1·10⁸ од. ум. роботи) призводить до збільшення зносу в середньому у 2,3...2,5 рази. Якщо інтенсивність зношування при режимах з прискореннями 5...10 1/с² приблизно однакова і залежність, що представляють цей процес, мають мінімум, то при прискоренні валу 15-20 1/с² – мінімум відсутня і має місце збільшення зносу зі зростанням еквівалентної швидкості КВ.

При режимах, що не встановилися, можливе порушення процесів згоряння, наприклад, виникнення детонації. Дослідження показали, що середнє зношування у верхньому поясі циліндра при детонації зростає більш ніж у 2 рази, а середнє максимальне зношування в 3 рази більше порівняно зі зношуванням при роботі без детонації.

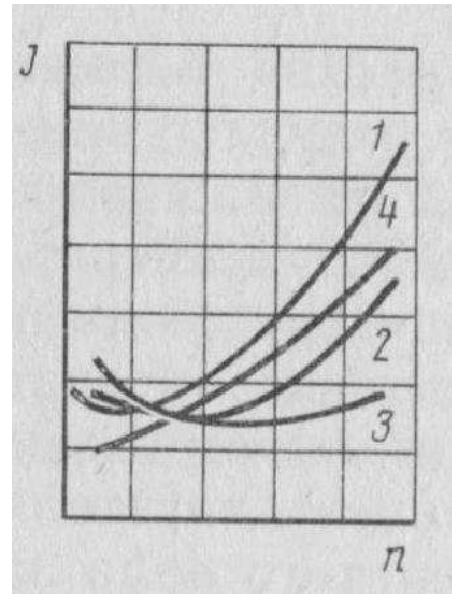
Температурна напруженість і рівень температур на поверхні циліндра також значно впливають на надійність. При нормальних умовах роботи двигуна стінки циліндрів у зоні переміщення поршневих кілець мають середні значення температури 100...130°C та його найбільші граничні відхилення від них 170...180 °С, а двигунів з повітряним охолодженням вони на 30...40 °С вище.

У разі реальної експлуатації ДВС мають місце значні відхилення температур від зазначених меж. Дослідження показують, що зниження температури стінок циліндрів інтенсифікує їх корозійне зношування. Підвищення температури сприяє молекулярно-механічному зношуванню, а різкі перепади температури, у свою чергу, викликають теплову деформацію деталей.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		21



a)



б)

Рисунок 1.6 - Вплив середнього ефективного тиску p_e (а) та частоти обертання n колінчастого валу (б) на знос J деталей двигуна ГАЗ та ЗМЗ: 1 – циліндри; 2 – поршневі кільця; 3-шийки колінчастого валу; 4 – стрижні клапанів та напрямні втулки [31]

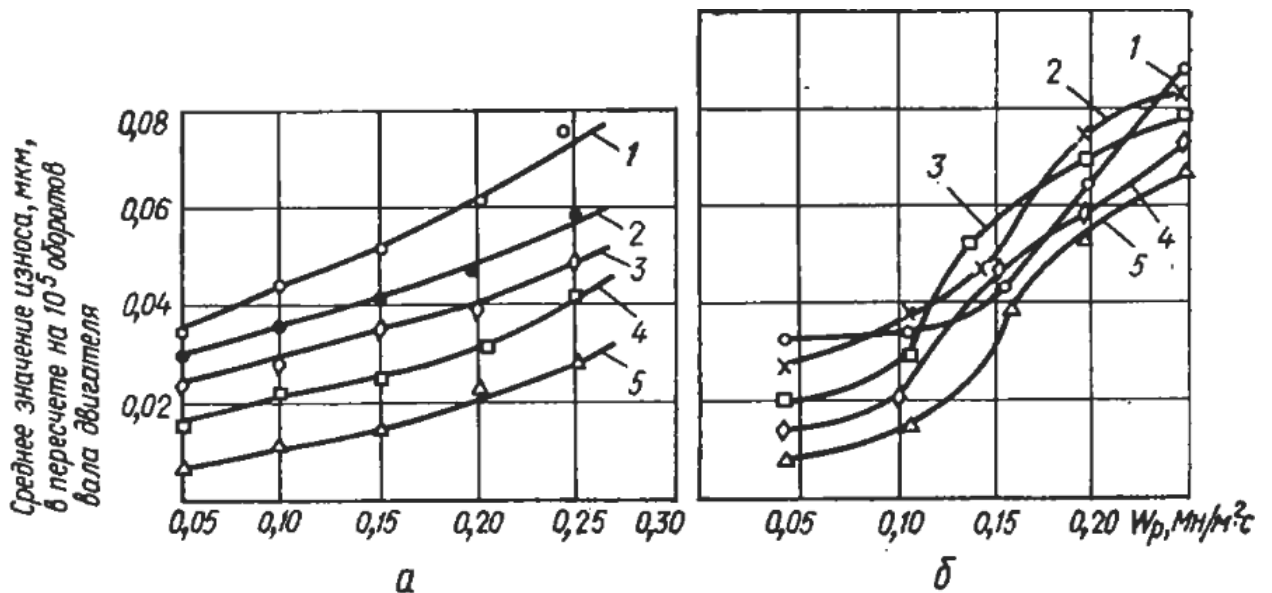


Рисунок 1.7 - Вплив інтенсивності зміни навантаження на зношування гільзи циліндра (середнє значення) двигунів ЗМЗ-21 (а) та ЗМЗ-53 (б): 1 – 0,7...0,8МН/м²; 2 - 0,6 ... 0,7 МН / м²; 3 - 0,5 ... 0,6 МН / м²; 4 - 0,3 ... 0,4 МН / м²; 5 – 0,3 ... 0,2 МН / м² [32]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

випередження запалення двигуна М-21Д при $n=2500$ об/хв; 4, 5, 6 – навантаження 100% [33].

Істотний вплив на ресурс робочої поверхні циліндра надають технологічні та конструкційні фактори, зокрема, макро- та мікрогеометрії дзеркала циліндра (вихідна та набута) (Рисунок 1.9). Збільшена овальність дзеркала подовжує період приробітку, пара, що треться, працює при підвищених місцевих тисках і температурах, виникають ділянки без мастила, що може призвести до задирання і збільшення інтенсивності зношування.

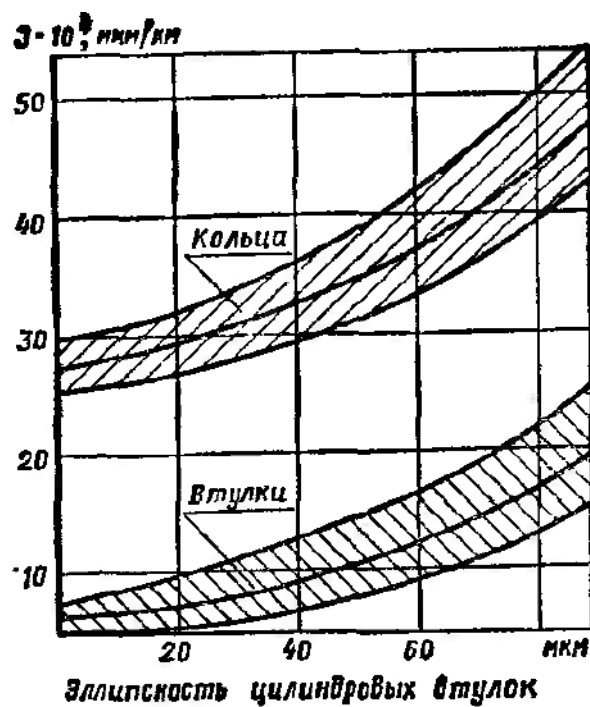


Рисунок 1.9 – Інтенсивність зношування поршневих кілець та циліндрових втулок тепловозних дизелів Д100 залежно від еліпсності циліндрових втулок [14].

Початкова шорсткість робочої поверхні циліндра має оптимальні значення, які вибираються, з одного боку, виходячи з необхідності зниження зносу в процесі роботи двигуна та економічних міркувань, з іншого. Надмірне збільшення шорсткості призводить до інтенсифікації процесів зношування, особливо в період опрацювання. Зниження шорсткості, крім збільшення

вартості виготовлення, може призводити до погіршення маслоутримуючої здатності поверхні, що негативно позначається на опір задиру. Оптимальною для автомобільних циліндрів ДВС є шорсткість Ra в діапазоні 0,15...0,4 мкм [14].

Додаткове профілювання робочої поверхні циліндра проводиться з метою підвищення маслоутримуючої здатності. Рельєф може бути як регулярним (хонінгування), так і нерегулярним (хімічне чи електрохімічне травлення, обдування дробом тощо). Параметри рельєфу можуть надавати як позитивний, і негативний вплив на процеси зношування.

Кінематична схема і геометричні розміри деталей двигуна, відповідно швидкості руху і навантаження на деталі, істотно впливають на знос дзеркала циліндра. Наприклад, збільшення короткохідності двигуна призводить до збільшення механічних втрат та зносу.

Якщо говорити про фактори навколишнього середовища, то основну роль відіграє вміст абразивних частинок (пилу) у повітрі, що надходить до робочої камери ДВЗ. Чим вище ступінь форсування двигуна, тим більше повітря потрапляє в циліндр двигуна і, отже, абсолютна кількість пилу. Зношення сполучених поверхонь в циліндрі збільшується прямо пропорційно до запиленості повітря і кількості абразивів, що підводяться в зону тертя [14].

1.4 Аналіз сучасних способів підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра зі сплавів алюмінію

У сучасному машинобудуванні відомо і застосовується велика кількість способів підвищення зносостійкості поверхонь, що труться. У загальному випадку вони поділяються на три групи: конструкційні, трибологічні та технологічні (так званий принцип LUDEMA від англ. lubrication, design, materials). Найбільший ефект дає комплексне застосування методів кожної групи. У свою чергу технологічні способи підвищення зносостійкості робочої поверхні алюмінієвих циліндрів поділяються на три напрямки:

- зміна властивостей матеріалу обсягом деталі;

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

- зміна властивостей матеріалу поверхні деталі;
- застосування зносостійких покриттів, зокрема спеціальних вставок.

Під об'ємним зміцненням розуміється вплив на властивості матеріалу у всьому обсязі деталі. При виготовленні алюмінієвих ГЦ та БЦ найбільшого поширення набули методи легування матеріалу деталі та впливу на процеси структуроутворення. Незважаючи на те, що об'ємної термічної обробки піддається більшість алюмінієвих деталей, ці методи є загальноприйнятим технологічним рішенням і не розглядаються в даній роботі.

Методи легування матеріалу широко застосовуються під час виготовлення деталей зі сплавів алюмінію, зокрема ГЦ і БЦ. Легування може використовуватися як самостійне технологічне рішення підвищення надійності ГЦ, або у комплексі коїться з іншими методами.

Як легуючі добавки використовують кремній (до 40%), свинець (до 8%), магній (до 5%), мідь (до 10%), а також Fe, Ni, Cr, Zn, Mn, Zr, Li, Ti, B, P, Co, V із сумарним вмістом до 10% [17; 18]. Кремній забезпечує високу твердість і зносостійкість сплаву, а також покращує його ливарні властивості. Свинець діє як тверде мастило на поверхні тертя при підвищених температурах. Інші легуючі елементи підвищують стійкість до пригорання, жароміцність, оброблюваність різанням, корозійну стійкість і т.д.

Досить широкого поширення в області поршневого двигунобудування набули евтектичні та заевтектичні силуміни. Наприклад, заевтектичний сплав Alusil або Silumal (AlSi17Cu4Mg) містить 17% кремнію [21]. Ступінь насичення алюмінію досягається при частці кремнію 12-13%. Вища частка кремнію призводить до того, що з застигання розплаву утворюються первинні кристали кремнію. Таким чином, та частина кремнію, яка через насичення алюмінію кремнієм не може увійти в з'єднання з алюмінієм, викристалізовується і відкладається серед насиченого алюмінієво-кремнієвого сплаву (евтектика). Розмір кристалів кремнію перебуває у межах від 20 до 70 мкм. Ці первинні кристали кремнію,

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ				

відповідним чином оброблені та розкриті, без додаткового армування утворюють стійку до зношування внутрішню поверхню циліндра.

Через те, що кристали кремнію рівномірно розподілені у всьому обсязі блоку циліндрів, виникає проблема виготовлення отворів, пазів, нарізування різьблення тощо. Вона може бути вирішена застосуванням спеціальних різальних інструментів. В результаті зростає вартість та час виготовлення такого блоку циліндрів. Однак можливість застосування сплаву Alusil як самодостатнє рішення для виготовлення блоку циліндра забезпечує велику популярність даної технології. Застосовується в двигунах автомобілів та мотоциклів, що випускаються фірмами BMW, Chevrolet, Ferrari, Citroen, Honda, Lotus, Porsche, Maserati, Suzuki, Yamaha та ін [7; 21]

Застосування технологічних рішень об'ємного зміцнення призводить до необхідності забезпечення максимальних вимог до властивостей матеріалу у всьому обсязі деталі, що призводить до збільшення складності та вартості технологічного процесу виробництва блоку циліндрів. Альтернативним варіантом є способи підвищення зносостійкості, що змінюють властивості матеріалу тільки робочої поверхні деталі. Одні технологічні рішення, що стосуються поверхневого зміцнення, не дозволяють гнучко керувати фізико-механічними властивостями поверхні в окремих точках або областях поверхні, інші забезпечують можливість регулювання властивостей зміцненого шару. Це дозволяє оптимізувати процес зміцнення за часом та вартістю обробки. Зокрема, еюра зносу ГЦ має яскраво виражений максимум області верхнього компресійного кільця. У той час як у нижній частині ГЦ знос значно менший. Таким чином, змінюючи властивості покриття в різних зонах робочої поверхні ГЦ, можна підвищувати ефективність застосовуваних технологій.

Компанія Kolbenschmidt Pierburg AG розробила метод Locasil [21; 22], при якому стандартний сплав для лиття під тиском (наприклад, AlSi9Cu3)

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		27

збагачується локально кремнієм у зоні робочих поверхонь циліндрів. Це досягається завдяки високопористим фасонним циліндричним частинкам з кремнію, які вкладаються в ливарну форму і при литті пресуванням під високим тиском заливаються в блок циліндрів. Алюмінієвий сплав, що знаходиться під тиском 90...100 МПа, продавлюється крізь пори кремнієвих фасонних частинок. Таким чином, на робочій поверхні циліндра утворюється армуючі кристали кремнію. Завдяки такому місцевому збагаченню кремнієм отримують властивості робочих поверхонь, еквівалентні сплаву Alusil, причому решта блоку циліндрів добре обробляється різанням. На рисунку 1.10 показаний розріз блоку циліндрів, виготовленого за цією технологією. На рисунку видно збагачення кремнієм у зоні робочої поверхні циліндра.

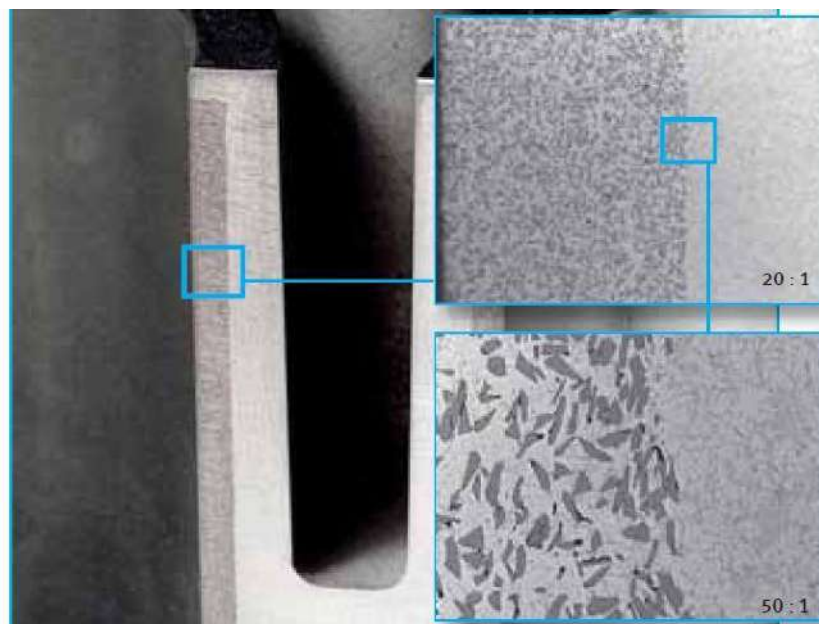


Рисунок - 1.10 Технологія Locasil на гільзі циліндра [21]

Для зміцнення робочої поверхні циліндра застосовується та сама лазерне легування [23]. Зокрема, поверхня може армуватися кремнієм, свинцем, міддю тощо. При лазерному легуванні робоча поверхня циліндра, виготовленого із стандартного алюмінієво-кремнієвого сплаву, за допомогою лазерного оптичного пристрою, що обертається, оплавляється і металургійно легується паралельно підводиться порошком кремнію та ін. (Рисунок 1.11).

Тим самим одержують тонкий шар (до 20 мкм) з твердою фазою (в основному кремнію) у зоні внутрішньої поверхні циліндра. Після обробки робоча поверхня циліндра піддається хонінгуванню та проводиться розкриття частинок кремнію хімічним травленням.

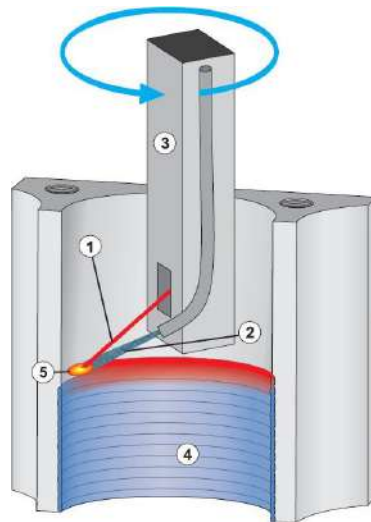


Рисунок 1.11 - Схематичне зображення процесу лазерного легування поверхні циліндра кремнієм: 1 – лазерний промінь, 2 – струмінь порошку, 3 – лазерний оптичний пристрій, що обертається, 4 – легований шар, 5 – оплавлена зона [21]

Перші рішення, створені для боротьби з проблемою низької надійності блоків циліндрів із алюмінієвих сплавів, ґрунтувалися на покритті робочої поверхні зносостійкими матеріалами або встановленням зносостійких вставок. Велика група методів, що застосовуються і розробляються, базується на процесах напилення конденсацією з парової (газової) фази (PVD – physical vapour deposition) [23]. Фізичний принцип, що лежить в основі методів PVD, полягає в напиленні покриттів у вакуумі шляхом прямої конденсації пари матеріалу, що наноситься.

Одним із методів, заснованих на PVD-процесі, є покриття робочих поверхонь циліндрів нітридом титану (TiN) або нітридом титану та алюмінію (TiAlN). Метод розробляється Kolbenschmidt Pierburg AG. Матеріал-донор,

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ				

якою виступають алюміній і титан у твердій формі, випаровується у вакуумі або шляхом іонного бомбардування, або за допомогою електричної дуги. Випарені або вибиті металеві частинки рухаються балістичними орбітами через вакуумну камеру або відкладаються на поверхнях, що покриваються. Підводячи в камеру азот, одержують нітриди титану та алюмінію, який осідає на робочій поверхні ГЦ. Тривалість процесу покриття визначає потрібну товщину покриття.

Покриття наноситься на хонінговану алюмінієву робочу поверхню циліндрів. Товщина покриття відносно невелика, тому структура хонінгування при покритті залишається. Порівняно високі витрати та недостатня надійність процесу обмежують широке застосування даного методу в галузі двигунобудування.

Наступна група зміцнювальних покриттів ґрунтується на електролітичному осадженні тонкого шару матеріалу, що наноситься на поверхні ГЦ [23]. Таким способом отримують покриття зі сполук кремнію, нікелю, хрому і т.д. Принципову схему установки для гальванічної обробки ГЦ показано на Рисунку 1.12. У внутрішній частині ГЦ концентрично оброблюваної поверхні встановлюється електрод-анод. Роль електрода-катода виконує ГЦ. Внутрішній об'єм гільзи заповнюється електролітом. На електроди подається електричний струм щільністю 1 - 4 А/дм² при напрузі 10-25 В. Необхідні параметри електричного струму забезпечуються системою керування, яка на схемі спрощено представлена реостатом R і контролюються протягом процесу обробки.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

даний момент масштаби їх застосування в ДВС значно скоротилися:

1. Покриття, що виходить, не сумісне з сірковмісними паливами. При пуску двигуна або під час роботи в умовах низьких температур на деяких ділянках поверхні гільзи можливе утворення конденсату, який реагуючи з продуктами горіння сірки, утворює сірчисту кислоту. Це своє чергу призводить до корозії і сколам покриття.

2. Покриття має низьку шорсткість і погано змочується мастильними матеріалами. У зв'язку з цим існує необхідність проведення заключної операції хонінгування покриття, що має високу мікротвердість (до 40 ГПа) із застосуванням спеціально розроблених інструментів.

3. Для отримання нікелевих покриттів потрібні дорогі гальванічні установки та пристрої утилізації токсичних речовин, які містяться в електроліті.

4. У процесі обробки утворюються нікелеві шлаки, які так само необхідно видаляти з поверхні та утилізувати.

5. Складність та висока вартість відновлювального ремонту робочої поверхні ГЦ, що вимагає застосування спеціалізованого обладнання та інструментів.

Покриття Nikasil застосовувалося у автомобільних двигунах марок BMW, Ferrari, Audi, Jaguar. Через його несумісність із сірковмісними паливами наприкінці 90-х років використання цього покриття у серійному виробництві автомобільних двигунів зупинено. В даний час Nikasil знаходить застосування в малорозмірних двигунах одноциліндрових бюджетного сегменту фірм Honda, Husqvarna, Hitachi та ін.

Крім нікелю, поширене гальванічне нанесення покриттів на основі хрому. Хромове електролітичне покриття має високі мікротвердість і температуру плавлення, хорошу теплопровідність, має корозійну стійкість і термостійкість, малий коефіцієнт тертя з багатьма матеріалами. У необробленому вигляді хромове покриття має недостатні маслоутримуючі властивості, що вимагає застосування спеціальних методів профілювання

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		32

струмінь отримують пропусканням плазмоутворюючого газу через електричну дугу та обтискання стінками спеціального сопла. При газополум'яному напиленні металевий або полімерний порошок, дротяний, або шнуровий матеріал подається в полум'я ацетилен-кисневого або пропан-кисневого пальника, розплавляється там і переноситься стисненим повітрям на поверхню виробу, остигаючи на якому призводить до формування покриття.

Зокрема, у серійному випуску використовуються плазмові покриття на основі заліза. На рисунку 1.15 схематично показаний процес формування покриття. До зони обробки подається газ, наприклад, водень або аргон, який іонізується до стану плазми. Температура плазми сягає 15000 – 20000 °З. Порошок, з якого формуватиметься покриття, подається в плазмовий струмінь, де розплавляється і зі швидкістю 80...100 м/с в рідкому стані наноситься на поверхню, що покривається. Процес відбувається за атмосферного тиску. Технологія дозволяє додатково інтегрувати у покриття керамічні матеріали.

Товщина покриття, що формується при плазмовому напиленні, досягає 0,18...0,22 мм. Отримане на робочій поверхні циліндра покриття піддається хонінгуванню для отримання остаточної мікрогеометрії. В результаті товщина покриття зменшується до 0,11 ... 0,13 мм. Шар є пористим і на поверхні утворюються поглиблення, які покращують маслостримуючу здатність покриття. Це у свою чергу призводить до поліпшення умов тертя та зниження зносу робочої поверхні циліндра.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

Блок управління 5 дозволяє задавати та контролювати параметри та режим процесу оксидування.

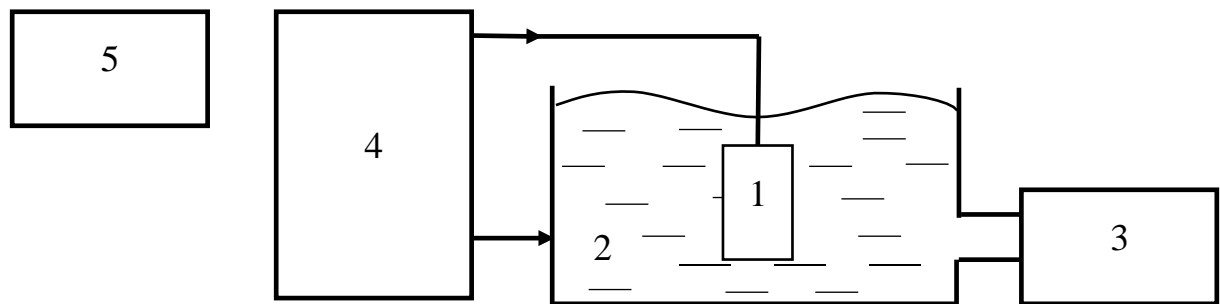


Рисунок 1.17 - Технологічна схема МДО: 1 - деталь, що обробляється, 2 - електролітична ванна, 3 - система охолодження електроліту, 4 - джерело технологічного струму, 5 - блок управління.

Формування зміцненого шару в залежності від умов процесу може тривати від кількох хвилин до кількох годин. При цьому утворюється багат шаровий зміцнений шар, структура якого схематично зображена на рисунку 1.18. Верхній шар (технологічний) 1 є пухким та пористим. У цій роботі використовувався електроліт із вмістом рідкого скла та оксидувалися деталі зі сплавів алюмінію. Верхній шар 3 за хімічним складом у цьому випадку це муліт ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) [34]. Саме властивості цього шару визначають експлуатаційні параметри покриття. Товщина робочого шару становить від 10 до 300 мкм. Далі йде тонкий (0,01...0,1 мкм) перехідний шар між оксидом і основним металом. На рисунку 1.19 показано зміну фазового складу, мікротвердості та пористості в різних шарах покриття.

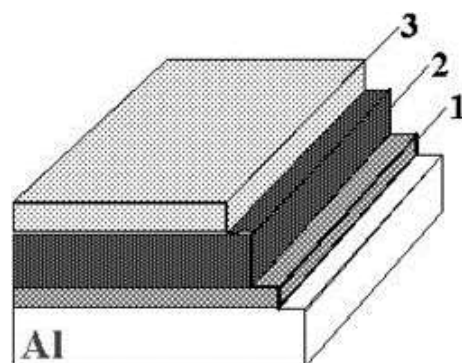


Рисунок 1.18 - Структура МДО-покриття [35]: 1 – перехідний шар, 2 – робочий шар, 3 – муліт

що МДО-покриття утворюються за рахунок матеріалу, що обробляється з просуванням вглиб межі розділу покриття - матеріал основи [43-45]. Крім того, високій адгезії сприяє утворення механічного зчеплення т.з. «анкерного типу», яке утворюється за рахунок часткового оплавлення оксидованого алюмінієвого сплаву в зоні контакту з мікродуговим розрядом, контакту та його перемішування зі зміцненим шаром, а також за рахунок сил хімічного зв'язку, що виникає внаслідок такого впливу [46; 47]. Геометричні розміри деталі після зняття технологічного шару залишаються майже постійними. Міцність зчеплення покриття з матеріалом основи може досягати значень 350...380 МПа [46; 47].

Пористість МДО-шару залежить від режимів обробки, а також від температури електроліту. Розміри пір знаходяться в діапазоні 2...15 мкм, пористість становить 10...30% у робочому шарі і до 50% у шарі мулліта [39; 42; 48; 49-52].

Теплофізичні властивості зміцненого шару суттєво відрізняються від властивостей матеріалу підкладки. У роботі [53] коефіцієнт теплопровідності покриття на сплаві АК9, визначений методом постійного теплового потоку, становив величину близько 0,08...1,5 Вт/(мК). Тими ж авторами в роботі [35] наведено результати дослідження коефіцієнта теплопровідності покриття, отриманого на сплаві АК9ПЧ у різних електролітах, що варіюється в діапазоні 3 ... 30 Вт / (м · К).

Зносостійкість УС, отриманих при раціональних режимах МДО, дуже висока і може порівнюватися із зносостійкістю дифузійних борідних покриттів [35; 54-57]. Однак МДО-покриття мають високі фрикційні властивості [58-60], що призводить до підвищеного зносу (до 30%) другої деталі в парі тертя [44; 59; 61]. Для поліпшення антифрикційних властивостей в умовах опрацювання та експлуатації рухомих сполук можуть застосовуватися додаткові заходи [42; 50; 59; 62-66; 88]:

1. введення антифрикційних присадок в мастильний матеріал, які мають низький опір зсуву;

2. створення поверхні МДО-покриття шару з антифрикційного матеріалу, дія якого знизить коефіцієнт тертя при взаємодії деталей рухомого з'єднання;

3. підвищення маслоємності МДО-покриття, яке досягається за рахунок збільшення кількості пір або їх штучного наповнення мастильними матеріалами;

4. створення МДО-покриттів в електролітах, до складу яких запроваджено антифрикційні матеріали, які при оксидуванні входять до складу зміцненого шару.

Область застосування МДО досить широка, в т. ч. як зносостійкі, корозійностійкі та теплостійкі покриття. У галузі двигунобудування Більшість робіт, присвячених застосуванню МДО розглядають можливість обробки деталей ЦПГ ДВС підвищення їх зносостійкості і теплового захисту.

У роботі [2] наведено результати 300 годинних стендових випробувань експериментального двигуна на базі ВАЗ 21083, оснащеного чавунним блоком циліндрів із запресованими алюмінієвими гільзами (сплав АК6М2) з покриттям МДО робочих поверхонь. Показано, що:

1. величини зносу циліндрів, поршнів та поршневих кілець знаходяться в інтервалі розкиду величин зносу деталей раніше випробуваних двигунів ВАЗ на подібних режимах;

2. зносостійкість верхніх компресійних поршневих кілець з хромовим покриттям у парі з оксидованими гільзами вище, ніж у парі з чавунними гільзами;

Згідно з патентом РФ № 211958 [68] за допомогою МДО створюють зміцнююче покриття таким чином, що на поверхні однієї з деталей пари тертя утворюють α -фазу окису алюмінію, що містить від 70% до 100% α -Al₂O₃, а на іншій деталі - γ - фазу, що містить від 70% до 100% -Al₂O₃. Як приклад запропонованого способу розглянута обробка МДО гільзи з алюмінієвого сплаву-95 і поршня зі сплаву АЛ-25. Зміцнений шар на поверхні ГЦ складався

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		40

переважно з -фази оксиду Al_2O_3 (70...100%), твердість покриття HV 20000 - 22000 МПа. Поршень мав покриття, що складається з фази $-Al_2O_3$, що має твердість HV 10000 - 12000 МПа. Після зняття технологічного шару товщина УС становила 150 мкм, геометричні розміри не змінилися. В результаті збільшилася надійність та зносостійкість пари ГЦ – поршень, а також у 10 разів знизилася втрата на тертя у цій парі. В рамках дослідження МДО розроблено метод іскрового зміцнення (ІУ). При імпульсному впливі в газовому середовищі іскрового розряду з певними параметрами поверхня заготовки піддається впливу високих температур, іонізованих частинок та ударних хвиль. У результаті формується модифікований поверхневий шар, що складається з оксидів або нітридів матеріалу підкладки [13]. На рисунку 1.20 показано принципову схему встановлення ІУ. Джерело електричного струму забезпечує на виході стабілізовану напругу 5В. Комутатор К1, керований таймером Т1, подає електричний струм на первинну обмотку трансформатора, що підвищує L1. Вторинна обмотка трансформатора підключена до блоку конденсаторів С1. Катод високовольтної частини підключається до оброблюваної деталі Д, а анод - до електрода Е. Електрод розташовують над поверхнею, що обробляється. Обмежувальний діод VD1 не дає блоку конденсаторів розрядитись у вторинну обмотку трансформатора.

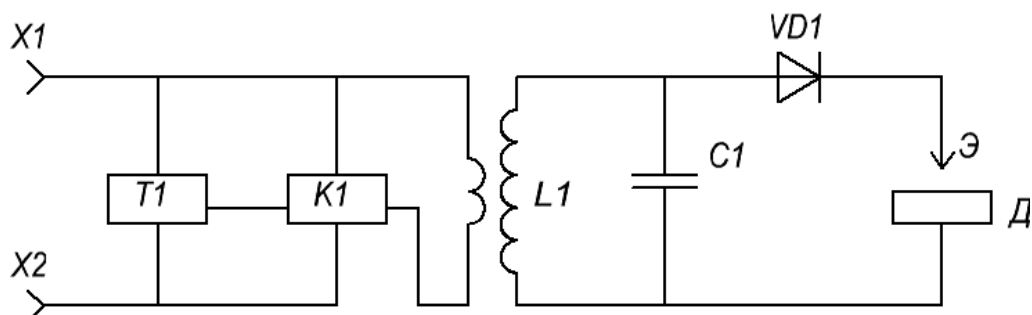


Рисунок 1.20 - Принципова схема установки для іскрового зміцнення: X1, X2 – роз'єм підключення джерела електричного струму, Т1 – таймер, К1 – комутатор, L1 – підвищуючий трансформатор, С1 – блок конденсаторів, Д – оброблювана деталь, Е – електрод, VD1 – діод

На відміну від МДО іскрові розряди виникають над довільному місці

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ				

контакту поверхні деталі з електролітом, але в ділянках, що є безпосередньо під електродом. При цьому виникає необхідність переміщення електрода по всій поверхні, що обробляється, проте в той же час зникає необхідність захисту необроблюваних поверхонь.

Зміцнений шар росте також углиб матеріалу, проте не відбувається утворення технологічного шару, який у разі МДО необхідно видаляти механічною обробкою. Таким чином, вихідні розміри деталі не змінюються, а модифікований шар має високу міцність зчеплення з основним матеріалом.

Іскрове зміцнення здійснюється електричними розрядами тривалістю 10-7–10-9 с та енергією ~1 Дж. На відміну від електроіскрового легування ІУ відбувається при високих значеннях електричної напруги (5...6 кВ) та невеликій величині струму (10-3...10-4 а). Частота імпульсів варіюється в межах 1...10 Гц. У процесі обробки немає переносу матеріалу електрода і деталі [13]. Товщина шару може досягати 300 мкм при мікротвердості понад 24 гПа. Зміцнений шар складається з оксиду алюмінію α -Al₂O₃.

Незважаючи на те, що роботи в галузі іскрового зміцнення нині нечисленні, даний метод має ряд переваг, що дозволяють його застосовувати у вузлах тертя і, зокрема, в деталях ЦПГ. По-перше, покриття росте в глиб матеріалу основи і при цьому не формується верхній пухкий шар, що виключає технологічні операції з його видалення. По-друге, завдяки тому, що при ІУ обробка відбувається безпосередньо в області електрода, а не по всій поверхні деталі, яка контактує з електролітом, то немає необхідності захищати ділянки, які не повинні оброблятися, а також виникає можливість обробки локальних ділянок поверхні. По-третє, відсутність електроліту не вимагає операцій з його підготовки та утилізації.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ТЕХНОЛОГІЯ ІСКРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

2.1 Вплив режимів іскрового зміцнення на зносостійкість алюмінієвих сплавів

Метою дослідження є визначення оптимальних з погляду підвищення зносостійкості технологічних режимів іскрового зміцнення сплавів алюмінію. Т.к. покриття, що формується при ІУ, має більшу мікротвердість, ніж алюмінієвий сплав матеріалу основи, то зносостійкість деталей повинна збільшуватися. У цьому те, наскільки зміниться зносостійкість, визначається насамперед технологічними режимами процесу іскрового зміцнення. Як фактори, що визначають режим прийняті ємність блоку конденсатора, мкФ; індуктивність котушки L , Гн; величина зазору між електродом та оброблюваною поверхнею d , мм (Рисунок 1.25). Цей вибір обумовлений, з одного боку, технічними обмеженнями, що накладаються експериментальним обладнанням: цими параметрами можна керувати у відомих діапазонах. З іншого боку,

Для кожного фактора взято два рівні значень (Таблиця 2.1). Значення факторів були обрані виходячи з наявних у розпорядженні автора результатів проведених раніше однофакторних експериментів. Так на проміжку значень ємності 0,22...2,2 мкФ виходить УС з прийнятним ставленням товщини (5...295 мкм), шорсткості (Ra 0,3...3,2) та мікротвердості шару (H_{μ} 1,5...32 ГПа) [13, 73]. Вибір значень індуктивності обґрунтовано наявними комплектуючими та можливістю утворення іскри зі збільшенням загального опору ланцюга. Вибір максимального значення міжелектродного проміжку також продиктований умовами утворення іскри, а також внутрішніми зазорами котушки запалювання.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		43

Таблиця 2.1 Фактори експерименту

	Ємність конденсаторів Z , мкФ	Індуктивність L , Гн	Міжелектродний проміжок d , мм
Кодована змінна	X1	X2	X3
Нижній рівень. (-1)	0,22	100	0,5
Основний рівень	1,21	150	1,25
Верхній рівень (+1)	2,2	200	2
Крок	0,99	50	0,75

Для скорочення кількості експериментів використовувалася напіврепліка від

експерименту 23, задана генеруючим співвідношенням

$$x_3 = -\xi_1 x_2$$

(Таблиця 2.2),

що дозволило використовувати чотири зразки замість восьми. Відповідно до рекомендацій, даних [74], для виключення впливу систематичних помилок, викликаних зовнішніми умовами, використовується випадкова послідовність при постановці дослідів, запланованих матрицею. Також випробувань піддавався зразок без зміцнення.

Таблиця 2.2 Скорочена матриця планування

Номер досвіду	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃
1	+	+	+	-
2	+	-	-	-
3	+	+	-	+
4	+	-	+	+

Зразок для випробувань був виготовлений із сплаву алюмінію марки

Д16Т згідно з ГОСТ 21488-97. Ескіз зразка наведено на рисунку 2.1. Зовнішня поверхня зразка обробляється методом ІУ таким чином, щоб вийшло покриття завширшки не менше 1,5 мм. Електрод виготовлений із дроту марки АМг6Н діаметром 1,65 мм. Частота іскрового розряду 4 Гц.

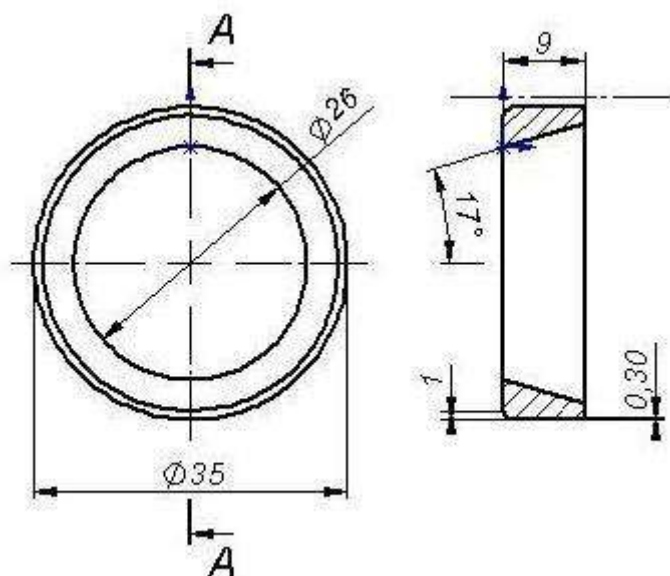


Рисунок 2.1 – Зразок для випробувань на зносостійкість

Для обробки поверхні зразків було виготовлено пристрій (Рисунок 2.2). На валу 1, привід якого здійснює від електричного двигуна з редуктором, встановлюється зразок 3. Шість електродів 2 встановлені таким чином, щоб виходив зміцнений шар з необхідною шириною.

Випробування на зносостійкість проводилися на машині тертя (Рисунок 2.3), розробленої в Науково-виробничому об'єднанні Госпрозрахунковий творчий центр Уфімського авіаційного інституту. Тертя здійснюється за схемою «циліндри, що перетинаються» [73]. Зразок 1 встановлюється на вал 2 і закріплюється шайбою 3. Індентер 4 являє собою ролик діаметром 8 мм. Він встановлюється в обойму 5, яку за допомогою важеля 6 передається навантаження від вантажів. Вал приводиться в дію електродвигуном 7 за допомогою пасової передачі.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

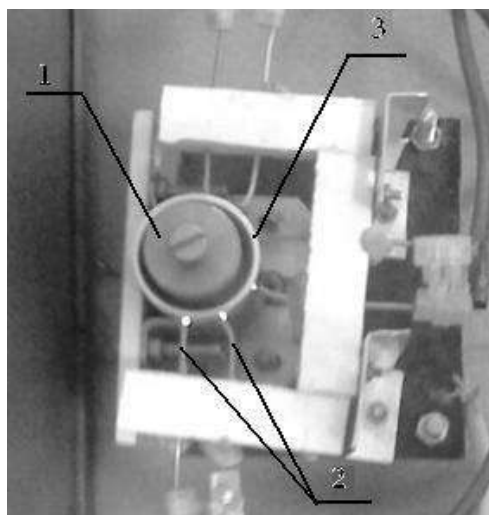


Рисунок 2.2 - Пристосування для іскрового зміцнення зразків

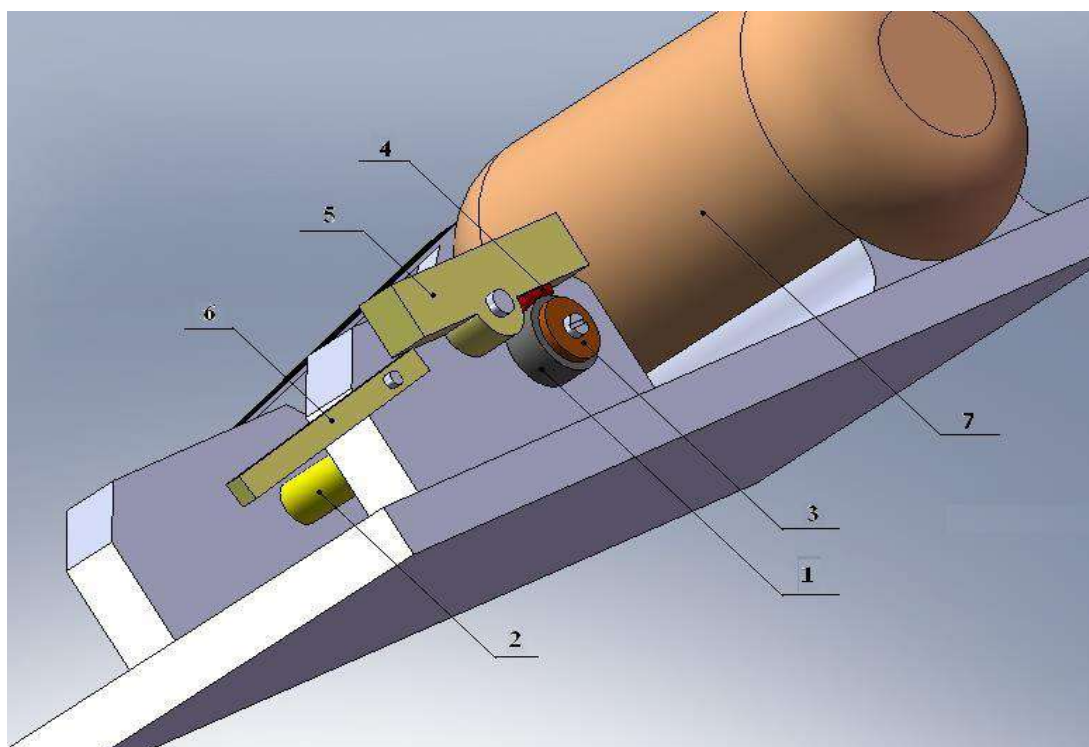


Рисунок 2.3 - Машина тертя: 1 - зразок, 2 - вал, 3 - шайба, 4 - індентор, 5 - обойма кріплення індентора, 6 - важіль навантаження, 7 - електродвигун

Маса вантажу – 19 кг. Частотаоборотів валу машини тертя – 352 хв-1. Час випробування 10 хвилин. У ролі мастила використовувалося напівсинтетичне моторне масло 10W-40. Індентор діаметром 8 мм був

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

виготовлений із сплаву ШХ-15 за ГОСТ 3722-81.

Після випробувань за допомогою мікротвердоміра HVS-1000 вимірювалася ширина зношеної канавки

Відповідно до методики випробувані чотири зразки з покриттям, сформованим методом іскрового зміцнення, та один зразок без покриття. Отримані результати зведено до Таблиці 2.3.

Експериментально встановлено, що зношування та швидкість зношування зразків з покриттям, сформованим методом ВП, значно знизилася. Найменше значення швидкості зношування склало $52,79 \cdot 10^{-6}$ мм³/с, тоді як зразка без покриття швидкість зношування дорівнює $1369,71 \cdot 10^{-6}$ мм³/с. Загалом іскрове зміцнення поверхні зразків призвело до збільшення зносостійкості у 10...26 разів. Найменше значення швидкості зношування отримано за мінімальних значень ємності, індуктивності та зазору.

Виходячи з експериментальних значень швидкості зношування, використовуючи методику, описану в роботі [74], отримана залежність:

$$v = (26,6 + 21,2 \cdot X - 0,12 \cdot \Lambda + 65,3 \cdot \delta) \cdot 10^{-6}. \quad (2.3)$$

Таблиця 2.3 Результати експериментів щодо визначення швидкості зношування

Зразок	Ширина канавки <i>b</i> , мм	Знос <i>I</i> , мм ³	Швидкість зношування <i>v</i> мм ³ /с
1	0,28	0,05030492	$83,84 \cdot 10^{-6}$
2	0,24	0,03167581	$52,79 \cdot 10^{-6}$
3	0,37	0,11610763	$193,51 \cdot 10^{-6}$
4	0,33	0,08236455	$137,27 \cdot 10^{-6}$
Без ВП	0,71	0,82182828	$1369,71 \cdot 10^{-6}$

2.2 Вплив іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на коефіцієнт тертя

Метою дослідження є визначення коефіцієнта тертя покриття, що формується при іскровому зміцненні та мікродуговому оксидуванні алюмінієвих сплавів. Експерименти проводилися на трьох зразках з алюмінієвого сплаву АК4-1 ГОСТ 12592-67, один з яких оброблявся методом ІУ, другий МДО, а третій не піддавався зміцненню. Також випробовувався зразок із сталі 40Х. Діаметр зразків 29 мм, висота 6 мм.

Режим обробки МДО був обраний виходячи з результатів досліджень, проведених раніше, та визначався такими параметрами:

- концентрація КОН в електроліті – 2 г/л;
- концентрація рідкого скла Na_2SiO_3 в електроліті – 2 г/л;
- ємність конденсаторів – 100 мкФ.

Для здійснення іскрового зміцнення було виготовлено спеціальний пристрій (Рисунок 2.5), який дозволяє за допомогою 5 електродів отримати на поверхні покриття шириною ~6 мм. Т.к. в ході випробувань тертя відбувається по кільцю з певними геометричними розмірами, доцільно обробляти тільки цю область. Технологічний режим обробки ІУ визначався такими параметрами:

- частота іскрових розрядів: 4 Гц;
- час зміцнення сумарний: 150 год;
- кількість електродів: 5;
- ємність конденсаторів: 0,22 мкФ;
- міжелектродний проміжок: 1 мм.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

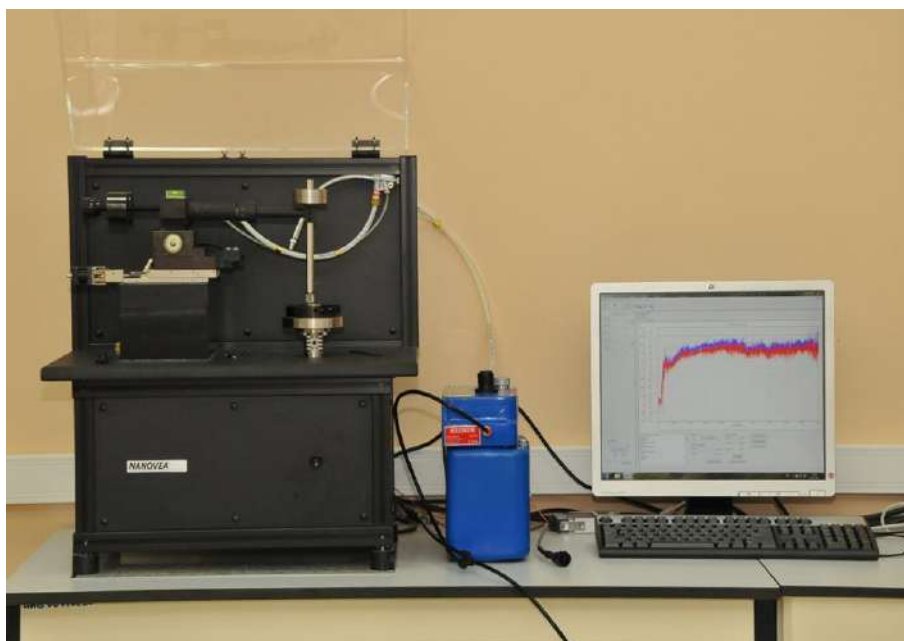
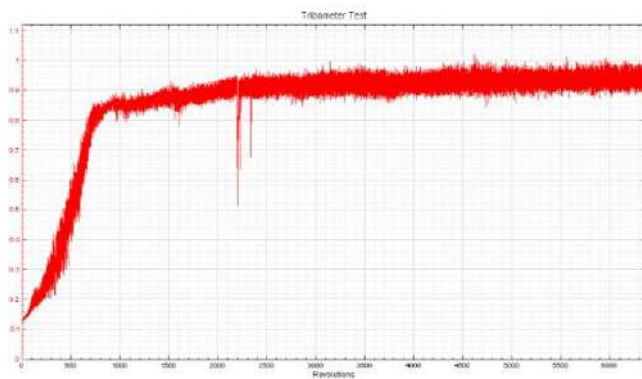


Рисунок 2.6 - Високотемпературний трибометр Nanovea

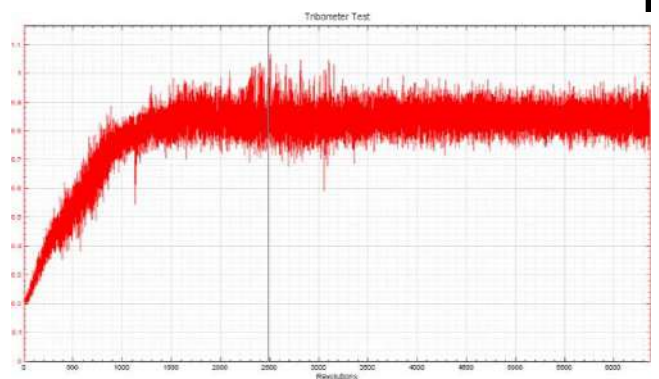
На рисунку 2.7 показані лабораторні зразки після випробувань. В результаті було отримано дані щодо зміни коефіцієнта тертя залежно від часу (Рисунок 2.8). У Таблиці 2.4 наведено параметри масового зносу зразків і констрії, по шорсткості поверхні зразків і товщині покриття, а на Рисунку 2.9 наведено підсумкові значення коефіцієнтів тертя.



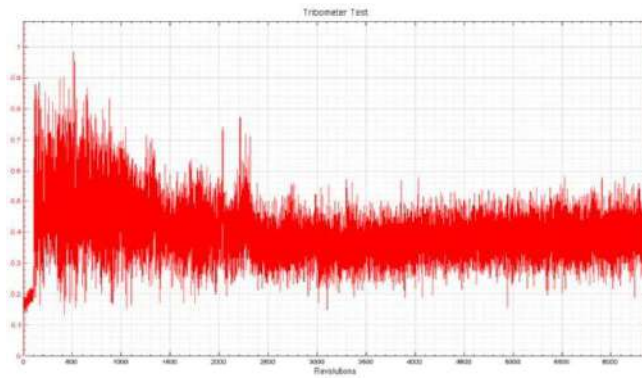
Рисунок 2.7 – Лабораторні зразки після випробувань на коефіцієнт тертя, де зліва направо: з ІУ-покриттям, з МДО-покриттям, без покриття, із сталі 40Х.



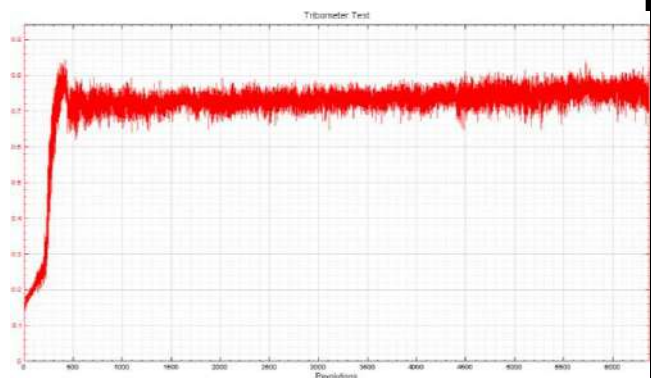
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.8 - Зміни коефіцієнта тертя у процесі випробувань: а) з ІУ-покриттям; б) із МДО-покриттям; в) без покриття; г) із сталі 40Х.

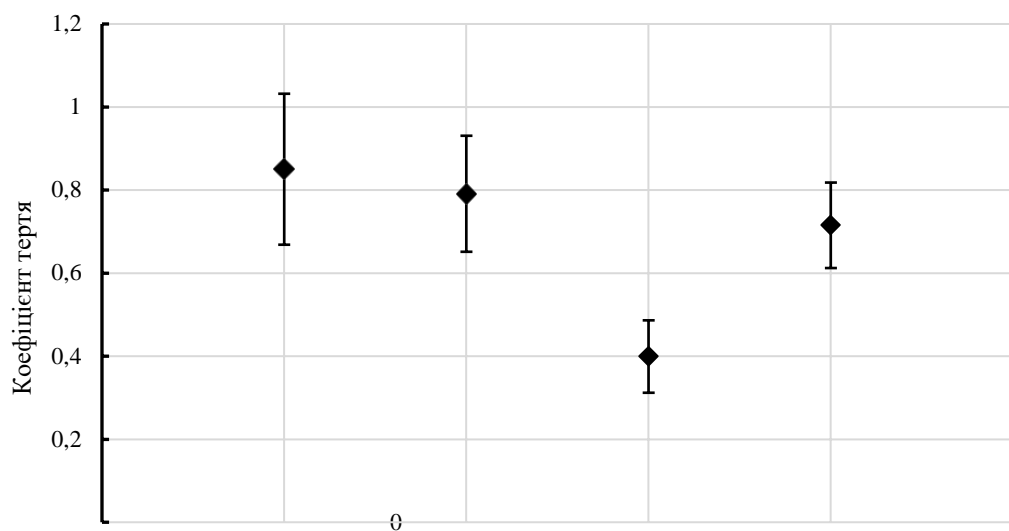


Рисунок 2.9 - Коефіцієнти тертя

для досліджуваних зразків: 1)

Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата

з покриттям; 2) з МДО-покриттям; 3) без покриття; 4) із сталі 40Х.

Таблиця 2.4. Результати випробувань лабораторних зразків

Зразок	Шорсткість R_a , мкм	Зношення по масі контртіла, м.	Знос за масою зразка, м.	Товщина покриття, мкм	Коеф. тертя
ВУ	1,6±0,2	0	0	30±3	0,85±0,18
МДО	1,3±0,2	0	0	118±3	0,79±0,13
АК4-1	1,5±0,2	0	0,004	-	0,40±0,08
Сталь 40Х	1,2±0,2	0	0	-	0,72±0,1

2.3 Вплив режимів іскрового зміцнення на мікротвердість та межу міцності алюмінієвих сплавів

Метою дослідження є визначення впливу іскрового зміцнення на мікротвердість та межу міцності сплавів алюмінію. Іскрове зміцнення істотно впливає на мікротвердість поверхневого шару алюмінієвих сплавів, при цьому під дією концентрованих потоків енергії в поверхневому шарі можуть виникати зміни, що негативно позначаються на загальній міцності деталі. Було заплановано та проведено повний факторний експеримент виду 23, матриця планування якого наведена в Таблиці 2.5.

Зразки зі сплаву АЛ30 ДЕРЖСТАНДАРТ 2685-75 вирізалися електроіскровою різкою згідно ескізу, який представлений на Рисунку 2.10. Поверхня зразків полірувалася механічно. Перемичка зразка оброблялася методом ІУ з обох сторін по всій довжині. Електрод був виготовлений із дроту марки АПВ діаметром 1 мм. Тривалість зміцнення становила 3 години/мм² за частоти іскрових розрядів 4 Гц.

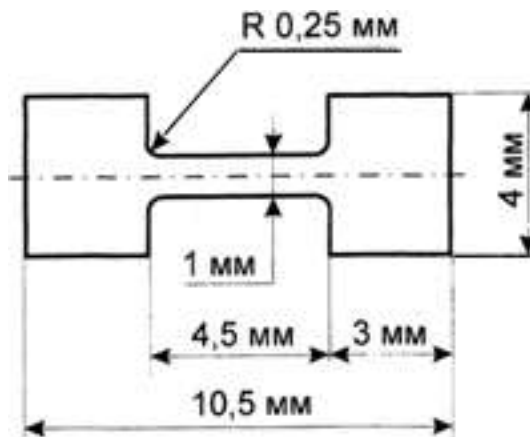


Рисунок 2.10 – Зразок для випробувань на міцність

Машина оснащена вертикальним вимірювально-силовим пристроєм. Навантаження зразка при розтягуванні на цій установці створюється кроковим двигуном, який дозволяє задавати швидкість переміщення траверси в діапазоні від 0,001 мм/с до 2 мм/с за точності підтримки швидкості 3% [81]. Швидкість переміщення траверси при випробуваннях становила 0,01 мм/хв. Установка оснащена датчиком зусилля, що має верхню межу 200 кг при точності реєстрації 1% зусиль. Переміщення траверси реєструється оптичним датчиком із точністю до 3 мкм. Силова частина установки контролюється комп'ютерною програмою з одночасним виведенням на дисплей показань швидкості розтягування, величини переміщення, зусилля на зразку.

Після проведення випробувань файл звіту містить значення зусиль та переміщень за кожну одиницю часу та діаграму розтягування в координатах "Зусилля - переміщення". Отримані дані обробляються відповідно до методики, описаної в [81]. В результаті отримуємо діаграму розтягування в координатах "напруга - відносне подовження". За цією діаграмою визначається межа міцності зразка σ_b .

Мікротвердість зросла усім режимах обробки. Максимальна мікротвердість, досягнута при режимі 1, становить 4,45 ГПа, що у 4,8 рази вище, ніж у вихідного матеріалу. Мінімальна мікротвердість отримана на режимі 5 і становить 1,89 ГПа, що в 2 рази вище, ніж у зразка без ВП. Основний вплив на мікротвердість покриття надають ємність блоку конденсаторів і міжелектродний зазор d . Збільшення ємності блоку конденсаторів C негативно впливає на мікротвердість покриття. Збільшення міжелектродного зазору d призводить до збільшення пробійної напруги, необхідної для виникнення іскрового розряду, у результаті зростає енергія іскрового розряду. На додаток до цього, у іскровому проміжку утворюється більша кількість іонів кисню, які впроваджуються у поверхню матеріалу основи та беруть участь в утворенні покриття. У сукупності це призводить до того, що мікротвердість покриття при великих значеннях міжелектродного проміжку виявляється вище.

Практично на всіх режимах обробки межа міцності σ_b виявилася вищою, ніж у вихідного зразка [82]. Міцні властивості зразка, обробленого на режимі 8, виявилися нижчими, ніж у вихідного. Максимальна величина межі міцності, досягнута при максимальних значеннях ємності та міжелектродного проміжку, склала 168 МПа. На рисунку 2.12 наведено зразок, оброблений на вказаному режимі, після випробувань. Зважаючи на те, що похибка вимірювання при використуванні методики може досягати 10%, зроблено висновок, що покриття, яке формується методом іскрового зміцнення, не впливає на міцність алюмінієвих сплавів.

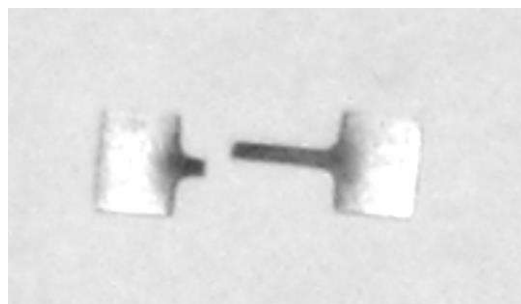


Рисунок 2.12 – Зразок після випробувань на розтягування

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

3. МОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ

3.1 Опис експериментального двигуна

Як об'єкт дослідження для розрахунково-експериментальних робіт було обрано малорозмірний авіамоделльний двигун ASPFS80 AR (рис. 3.1).

Метиловий спирт та нітрометан є токсичними речовинами. При пуску та в процесі роботи деяка кількість палива витікає з карбюратора. Мастило двигуна здійснюється мастильними матеріалами, що містяться у складі палива. Поршень не має маслосніжних кілець, внаслідок чого олія з робочої камери потрапляє в картер і змащує деталі КШМ. Разом із олією в картер може потрапляти і певний обсяг палива. Далі мастило разом із частинками палива видаляється через штуцер, що у днище картера. Таким чином існує висока ймовірність попадання токсичних речовин, що містяться в паливній змісті, що рекомендується, в навколишнє середовище. У зв'язку з тим, що стендові випробування проводять у закритому приміщенні лабораторії,

В результаті аналізу альтернативних видів палива, була обрана паливна суміш, що складається з етилового спирту, касторової олії та ацетону.

Застосування синтетичних масел разом з етиловим спиртом утруднено у зв'язку з тим, що вони погано поєднуються. У Таблиці 3.2 представлено порівняння властивостей доступних палив, які розглядалися як альтернативні.

Таблиця 3.1 Характеристики двигуна ASPFS80 AR

Показники	Значення
Робочий об'єм:	12,8 см ³
Число кілець на одному поршні: компресійних маслосніжних	1 0
Діаметр циліндра:	26,5 мм
Хід поршня:	23,2 мм
Потужність:	1.1 л.с. при 11000 хв-1
Робочий діапазон:	2000 ... 11000 хв-1

3.2 Випробувальний стенд

Стенд для проведення моторних випробувань показаний на рисунку 3.2. Він являє собою коробчату раму 1, на якій закріплюється двигун 2, органи управління паливною голкою 3 і дросельною заслінкою 4 система запалювання 5 система контролю температури 6 і захисна решітка 7. Паливний бак встановлений на вагах за межами стенду.

Двигун кріпиться до двох поздовжніх балок 8 відповідно до вимог виробника. Регулятор 3 дозволяє змінювати та фіксувати положення паливної голки карбюратора в діапазоні 0...720° з кроком 10°. Ручка управління положенням дросельної заслінки 4 забезпечує плавну зміну кута відкриття дросельної заслінки (УОДЗ) в діапазоні 0...100%, а також фіксацію положення, відповідних 25, 50, 75 і 100%.

Застосування палива, відмінного від рекомендованого виробником двигуна, вимагало зміни системи запалювання двигуна. При використанні стандартного палива електричний струм до калільної свічки підводиться тільки в момент пуску двигуна, а надалі загострення забезпечується за рахунок теплоти, що виникає в камері згоряння. Застосування такого підходу при використанні палива на основі етилового спирту виявило низку проблем. Зокрема, неможливість пуску без попереднього прогріву палива та БЦ до 55-60 °С, що пов'язано з високою питомою теплотою випаровування етилового спирту; звуження при встановленому рекомендованому гвинті діапазону робочих частот обертання до величин 4500-7000 хв-1, діапазону УОДЗ до 40-75%; нестабільність роботи в перехідних режимах.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

двоїмів. Вимірювання частоти обертання колінчастого валу двигуна здійснювалося безконтактним методом за допомогою фототахометра-стробоскопа АКТАКОМ АТТ-6002.

3.3 Методика досліджень

Дослідження, проведені в рамках цієї роботи, склалися з:

1. Випробувань на зносостійкість за умов моторного стенду базової ГЦ;
2. Випробувань на зносостійкість в умовах моторного стендаалюмінієвої ГЦ із МДО-покриттям.
3. Випробувань на зносостійкість в умовах моторного стендаалюмінієвої ГЦ із ІУ-покриттям.
4. Експериментального визначення гвинтових характеристик застосовуваних повітряних гвинтів та визначення ефективної потужності двигуна.
5. Експериментального визначення механічних втрат ДВС здосліджуваними ГЦ.

Експериментальна гільза циліндра виготовлена з алюмінієвого сплаву, що деформується, АК4-1 ГОСТ 4784-97. Матеріал піддавався гартуванню у воду протягом 1,5 год при температурі $530\pm 5^{\circ}\text{C}$ штучному старінню на повітрі протягом 10 годин при температурі $190\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Для нанесення МДО-покриття на внутрішню поверхню ГЦ було розроблено та виготовлено спеціальний пристрій (Рисунок 3.3). Воно є дві фторопластові втулки (позиція 4 і 7), які разом з поверхнею ГЦ 3 утворюють стінки електrolітичної ванни. Уздовж поздовжньої осі ГЦ встановлюється електрод 5 з нержавіючої сталі. Через штуцер 1 і розсікач 6 обсяг ванни подається електrolіт. Шайба 2 необхідна вирівнювання потоків рідини. Електrolіт через отвори у верхній заглибці видаляється з ванни та повертається в теплообмінник. Завдяки потоку електrolіту в міжелектродному просторі вдалося організувати видалення газових бульбашок із зони, в якій відбувається процес формування покриття.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		60

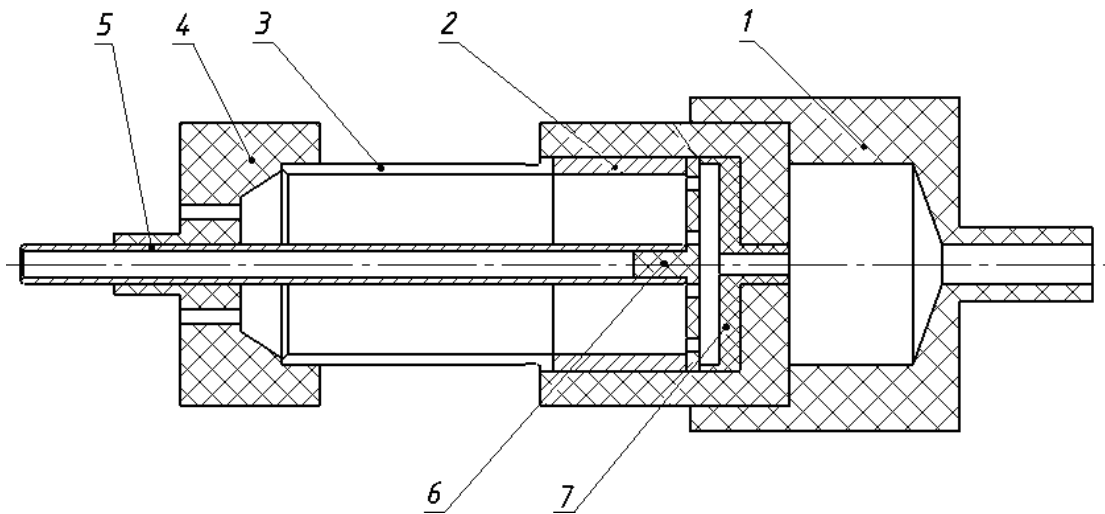


Рисунок 3.3 - Пристосування для нанесення МДО-шару на гільзу циліндра: 1-штуцер; 2-шайба; 3-гільза; 4-заглушка верхня; 5-електрод; 6-розсікач; 7 – заглушка нижня.

Режим обробки МДО був обраний виходячи з результатів досліджень, проведених раніше, і визначався такими параметрами [77]:

- концентрація КОН в електроліті – 2 г/л;
- концентрація рідкого скла Na_2SiO_3 в електроліті – 2 г/л;
- ємність конденсаторів – 100 мкФ;
- тривалість процесу – 3 год.

У зв'язку з тим, що в результаті МДО на поверхні деталі утворюється пухкий шар (мулліт), він був видалений механічно на верстаті токарному за допомогою алмазної пасти і спеціальних пристосувань. Товщина віддаленого пухкого шару становила $\sim 15\text{...}20$ мкм.

Експериментальна гільза виготовляється аналогічно ГЦ з МДО-покриттям. Для реалізації процесу іскрового зміцнення було розроблено іскрову установку, що дозволяє використовувати велику кількість електродів (Рисунок 3.4), та спеціальний пристрій. Блок керування, підключений до

										Арк.
										61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ					

експериментальної ГЦ використовувалося десять електродів, висота електрода 2 мм, відстань між електродами – 2 мм. Межелектродний зазор визначається різницею між радіусом кільця-електрода та ролика. Іскрові установки мають загальний катод, який підключається до зовнішньої поверхні ГЦ через ковзний контакт. Патрон обертається із швидкістю 2 хв-1. Таким чином, поверхня гільзи обробляється смугами висотою ~2 мм і із зазором 2 мм між ними. Вибір подібної схеми зміцнення обґрунтовується, з одного боку, скороченням сумарного часу обробки всієї поверхні, і, з іншого боку, необхідністю забезпечення найважчих умов роботи покриття з погляду зносостійкості, оскільки за такої схеми нанесення покриття виникають значні напруги на межі м'якого основного металу та твердої зміцненої смуги. В результаті, важливу роль починає відігравати не тільки мікротвердість, а й адгезія зміцненого шару, а також його здатність чинити опір періодичному згинальному напруженню. необхідністю забезпечення найбільш важких умов роботи покриття з погляду зносостійкості, так як за такої схеми нанесення покриття виникають значні напруги на межі м'якого основного металу та твердої зміцненої смуги. В результаті, важливу роль починає відігравати не тільки мікротвердість, а й адгезія зміцненого шару, а також його здатність чинити опір періодичному згинальному напруженню. необхідністю забезпечення найбільш важких умов роботи покриття з погляду зносостійкості, так як за такої схеми нанесення покриття виникають значні напруги на межі м'якого основного металу та твердої зміцненої смуги. В результаті, важливу роль починає відігравати не тільки мікротвердість, а й адгезія зміцненого шару, а також його здатність чинити опір періодичному згинальному напруженню.

Час обробки кожної лінії – 40 годин. Місткість блоку конденсаторів становила 0,22 мкФ, міжелектродний зазор - 1 мм. Частота іскрових розрядів 4 Гц кожному електроді.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		63

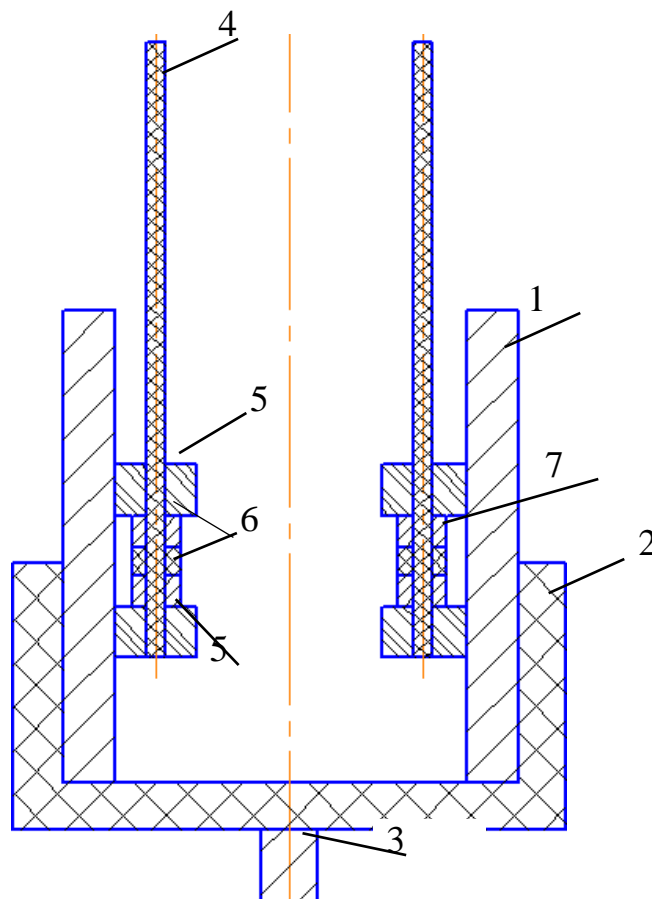


Рисунок 3.5 - Пристосування для модифікації методом ІУ внутрішньої поверхні ГЦ: 1 – гільза циліндра, що обробляється, 2 – патрон, 3 – вал, 4 – стрижень, 5 – ролик, 6 – електрод, 7 – шайба.

Моторні випробування досліджуваних гільз циліндрів складається з кількох етапів. Перший етап, тривалістю 30 хв – обкатка двигуна та опрацювання деталей ЦПГ. Після пуску двигуна проводиться прогрів протягом 1 хв при УОДЗ 25%. Обкатка, що залишився, проводиться при частоті обертання КВ 5000 хв-1. Використовується рекомендований виробником гвинт розміром 13x7 дюймів. Склад палива: 80% етилового спирту, 20% касторової олії, 30 г ацетону. Після завершення обкатки проводиться розбирання двигуна та контроль геометричних розмірів та маси деталей ЦПГ.

Далі випробування проводяться в такий спосіб. Після пуску двигун працює протягом 10,5 хвилин, при цьому відбувається зміна УОДЗ відповідно

									Арк.
									64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ				

до Таблиці 3.3. Після чого проводиться зупинка та охолодження двигуна протягом 10 хвилин.

Після кожних десяти годин напрацювання проводиться розбирання двигуна та контроль геометричних розмірів та маси деталей ЦПГ. Залежно від загального часу випробувань змінюються умови роботи двигуна: знижується кількість масла у паливі, за допомогою різних повітряних гвинтів змінюється частота обертання та навантаження (Таблиця 3.4). Сумарний час роботи двигуна складає 50 годин.

Вимірювання зносу ГЦ і поршня проводиться перед початком випробувань, а також після кожного етапу. Контролюється лінійне та масове зношування деталей. Вимірювання здійснюються за допомогою нутроміра НІ 18-35-0,01, скоби індикаторної СІ-50 та аналітичних ваг ВСЛ-400-1. Схема контрольних точок робочої поверхні ГЦ показано на Рисунку 3.6, поверхні поршня – на Рисунку 3.7. Точки 1, 2 та 3 лежать на площині, перпендикулярній до поздовжньої осі КВ двигуна. Для того щоб забезпечити однакове положення ГЦ при кожному циклі розбирання/складання у верхній частині гільзи зроблено ризик, що вказує на вісь КВ. Перед проведенням вимірювань поверхню деталей необхідно очистити від бруду та продуктів згоряння. Для цього застосовують бензин, водний розчин гідроксиду амонію, господарське мило, етиловий спирт. Результати вимірювань заносяться до протоколу експерименту.

Таблиця 3.3 Зміна УОДЗ протягом одного запуску ДВЗ

Етап	УОДЗ, %	Час, сік
1	25	30
2	50	60
3	100	60
4	25	30
5	75	120
6	50	60
7	25	30

Таблиця 3.4 Зміна умов роботи ДВЗ залежно від часу напрацювання

Час, год	Склад палива			Розмір гвинта
	Етиловий спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, %	Касторове масло, %	Ацетон, г/л палива	
0...10	80	20	30	13x7
10...20	80	20	30	15x10
20...30	86	14	30	14x10
30...50	92	8	30	12x7

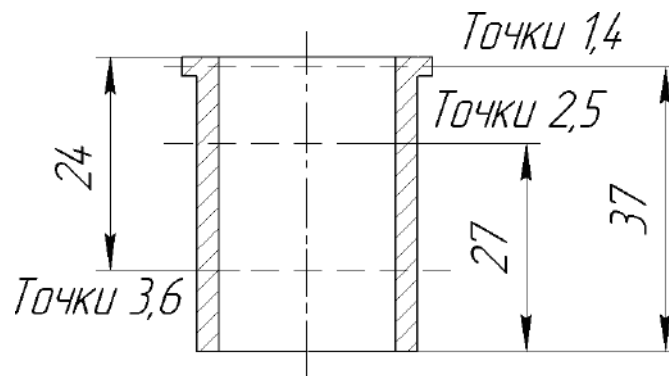


Рисунок 3.6 – Схема розташування контрольних точок на робочій поверхні гільзи циліндра.

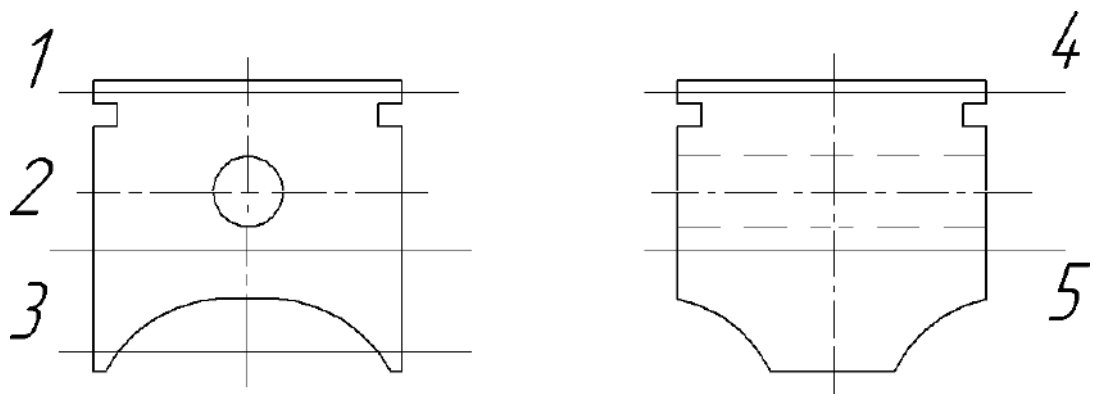


Рисунок 3.7 – Схема розташування контрольних точок на поверхні поршня.

Потужність механічних втрат двигуна з досліджуваними ГЦ визначалася методом прокручування на стенді СТМ-3000. Двигун з'єднувався зі стендом за допомогою гнучкої муфти (Рисунок 3.8). Вал двигуна провертався за допомогою стенду. Діапазон частоти обертання 3000...6000 хв⁻¹, крок – 1000 хв⁻¹. На кожній точці проводилося вимірювання і запис моменту, що крутить, протягом 30 секунд, далі дані усереднювалися. У зв'язку з тим, що мастильний матеріал подається в двигун разом із паливом, паливна система працювала у штатному режимі. УОДЗ – 100%.

Програма випробувань:

1. Включити подачу палива, відкрити паливний жиклер на обороту, виставити УОДЗ в 100%.
2. Прогрів стенда і двигуна. Частота обертання 3000 хв⁻¹, Тривалість 5 хв.
3. Вимірювання досліджуваних показників. Частота обертання 3000 хв⁻¹, тривалість виміру 30 с.
4. Збільшення частоти обертання на 1000 хв⁻¹. Вимірювання досліджуваних параметрів. Тривалість виміру 30 с.
5. Повторення кроку 4 до тих пір, поки частота обертання не досягне 6000 хв⁻¹.



Рисунок 3.8 - Двигун на стенді СТМ-3000

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		67

Випробування проводяться кожної гільзи циліндрів, результати заносяться до протоколу, значення моменту кожної контрольної точки усереднюються. Далі вимірюються механічні втрати, які у самому стенді без встановленого двигуна. Остаточні значення моменту визначаються як різницю між відповідними значеннями виміряного усередненого моменту двигуна та самого стенду.

3.3.1 Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на ефективні показники двигуна

Зміна потужності механічних втрат при роботі з експериментальними гільзами призведе до зміни ефективних показників двигуна, зокрема ефективної потужності N_e . Після обкатки двигуна знімалася зовнішня швидкісна характеристика двигуна, а після проведення 50-годинних випробувань на зносостійкість будувалися швидкісні характеристики двигуна при 25%, 50%, 75% і 100% УОДЗ. Для цього були отримані характеристики повітряних гвинтів, що використовуються, що описують споживану потужність в залежності від частоти обертання. Далі, знаючи частоту обертання колінчастого валу двигуна за отриманими характеристиками повітряних гвинтів визначалася ефективна потужність N_e .

Визначення гвинтових характеристик проводилося на стенді СТМ-3000 (Рисунок 3.9). Повітряний гвинт закріплений на валу за допомогою болта. Вал встановлений у 2 кулькових підшипниках.

Програма випробувань:

1. Встановити досліджуваний повітряний гвинт на стенд.
2. Прогрівання стенду. Частота обертання 3000 хв-1, тривалість 5хв.
3. Вимірювання досліджуваних показників. Частота обертання 3500 хв-1, тривалість виміру 10 с.
4. Збільшення частоти обертання на 500 хв-1. Вимірювання досліджуваних параметрів. Тривалість виміру 10 с.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		68

5. Повторення етапу 4 до тих пір, поки частота обертання не досягне 9000 хв-1.

Дослідження проводяться по 2 рази для кожного повітряного гвинта, а також для стенду із встановленим валом без повітряного гвинта. Отримані результати усереднюються для кожної точки, що досліджується. Остаточні значення досліджуваних параметрів визначаються як різницю між вимірюванням відповідного параметра з повітряним гвинтом і без нього для кожної точки, що досліджується.

Таким чином, визначаються момент, що розвивається на валу, і потужність, що розвивається, в діапазоні частоти обертання валу 3000...9000 хв-1 з кроком 500 хв-1. На підставі отриманих результатів будуються графіки, що показують відповідні залежності. Т.к. частота обертання двигуна перевищує 9000 хв-1, для отриманих результатів виводяться апроксимаційні багаточлени для кожного повітряного гвинта. Момент повітряного гвинта має квадратичну залежність від частоти обертання, тобто. $M \sim n^2$ [83]. Апроксимаційні багаточлени другого ступеня отримані у програмному пакеті Microsoft Excel.

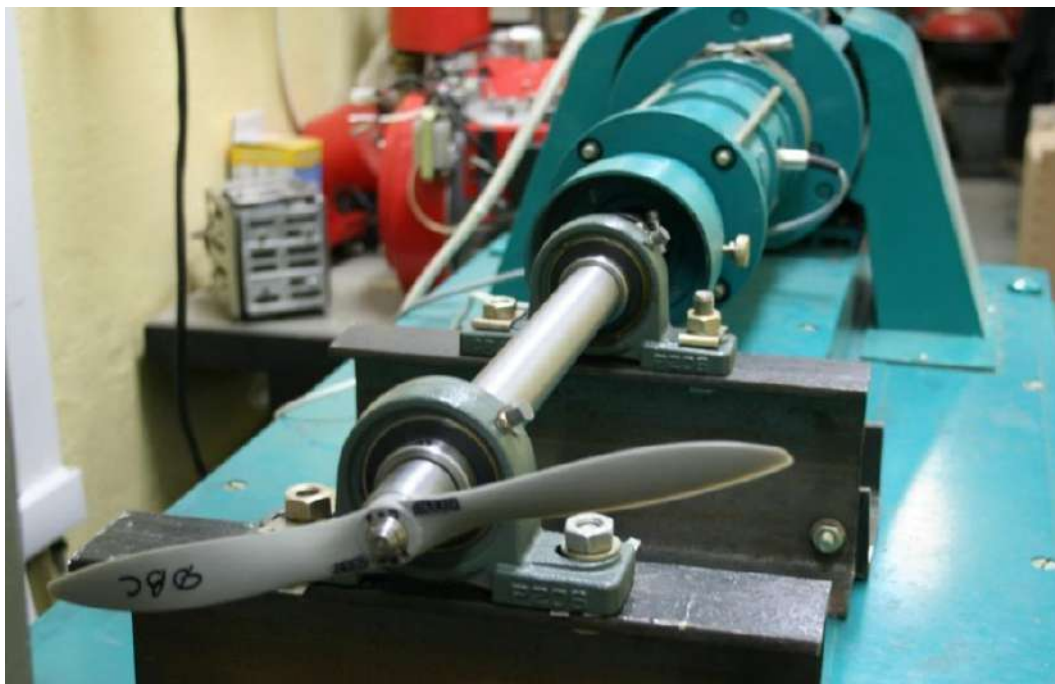


Рисунок 3.9 - Повітряний гвинт на стенді СТМ-3000

									Арк.
									69
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ				

Далі проводяться випробування для визначення потужності, що розвивається двигуном, при роботі з повітряними гвинтами, що використовуються. Програма випробувань:

1. Встановлення повітряного гвинта на двигун.
2. Прогрівання двигуна, тривалість 3 хв, частота обертання – 5000 хв-1.
3. Встановлення УОДЗ 25%. Визначення частоти обертання повітряного гвинта. Контролює масову витрату палива та температуру на головці циліндра.
4. Встановлення УОДЗ 50%. Визначення частоти обертання повітряного гвинта. Контролює масову витрату палива та температуру на головці циліндра.
5. Встановлення УОДЗ 75%. Визначення частоти обертання повітряного гвинта. Контролює масову витрату палива та температуру на головці циліндра.
6. Встановлення УОДЗ 100%. Визначення частоти обертання повітряного гвинта. Контролює масову витрату палива та температуру на головці циліндра.

Частота обертання повітряного гвинта визначалася за допомогою фототахометра-стробоскопа АКТАКОМ АТТ-6002, температура головки циліндра вимірювалася термопарою типу ТХА, встановленій у кришці циліндра, за допомогою вимірювача ОВЕН ТРМ-200.

3.4 Результати досліджень

3.4.1 Дослідження зносостійкості деталей циліндропоршневої групи базового двигуна

В результаті спектрального аналізу матеріалів, з яких виготовлені штатні деталі двигуна ЦПГ ASP FS 80 AR встановлено, що:

1. штатна ГЦ виготовлена із сталі марки 40Х ГОСТ 4543-71;

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. штатний поршень виготовлений із сплаву алюмінію марки АК-12;
3. штатне компресійне кільце виготовлено із сталі 45.

Відповідно до методики, описаної в розділі 3.3.3, проведені випробування двигуна в штатній комплектації в умовах стенду. Після обкатки та кожні 10 годин випробувань проводився розбір двигуна з подальшим контролем лінійних розмірів та маси ГЦ та поршня. Результати вимірювань наведено у Таблицях 3.5 та 3.6. Підсумкові значення лінійного та масового зношування деталей зведені в Таблицю 3.7. На Рисунках 3.10 та 3.11 показані ГЦ та поршень після 50 годин випробувань.

Масове зношування ГЦ за час випробувань склало 0,039 г, поршня - 0,008 г. Максимальне діаметральне зношування ГЦ спостерігається в точках 1 і 4 (0,089 і 0,08 мм відповідно), які лежать у ділянці ВМТ. Найменше зношування поверхні ГЦ спостерігається в точках 3 і 6. Величина швидкості зношування гільзи циліндра в період обкатки двигуна (30 хв) досягає $1,33 \cdot 10^{-3}$ мм/хв у контрольній точці 1, і до кінця 10 годин роботи знижується до $0,032 \cdot 10^{-3}$ мм/хв.

Таблиця 3.5. Результати вимірювань розмірів штатної гільзи

№	Час напрацюв ання, год	Розміри ГЦ за точками, мм						Маса ГЦ, г
		1	2	3	4	5	6	
1	0	26,46	26,46	26,465	26,45	26,45	26,46	49,952
2	0,5	26,5	26,497	26,49	26,487	26,488	26,485	49,948
3	10,5	26,52	26,503	26,52	26,52	26,51	26,52	49,945
4	20,5	26,54	26,51	26,52	26,52	26,52	26,52	49,925
5	30,5	26,54	26,52	26,52	26,522	26,52	26,52	49,923
6	40,5	26,543	26,522	26,52	26,526	26,52	26,52	49,922
7	50,5	26,549	26,526	26,526	26,53	26,52	26,52	49,913
Зношування		0,089	0,066	0,061	0,08	0,07	0,06	0,039

Таблиця 3.6 Результати вимірів розмірів поршня

№	Час напрацювання, год	Розміри поршня по точках, мм					Маса, г
		1	2	3	4	5	
1	0	26,414	26,41	26,384	26,42	26,424	10,653
2	0,5	26,42	26,41	26,395	26,425	26,43	10,649
3	10,5	26,42	26,42	26,39	26,43	26,43	10,647
4	20,5	26,412	26,42	26,39	26,43	26,43	10,647
5	30,5	26,39	26,42	26,39	26,39	26,43	10,644
6	40,5	26,39	26,42	26,378	26,39	26,43	10,646
7	50,5	26,389	26,42	26,369	26,388	26,43	10,645
Зношування		0,025	-0,01	0,015	0,032	-0,006	0,008

Таблиця 3.7 Лінійний та масовий знос штатної ГЦ та поршня

Деталь	Лінійний знос, мм						Масовий знос, г
	1	2	3	4	5	6	
Гільза циліндра	0,089	0,066	0,061	0,08	0,07	0,06	0,039
Поршень	0,025	-0,01	0,015	0,032	-0,006	–	0,008



Рисунок 3.10 – Штатна гільза циліндра після випробувань



Рисунок 3.11 – Штатний поршень після випробувань

3.4.2 Дослідження впливу мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи

Відповідно до методики, описаної в розділі 3.3.1 була отримана гільза циліндра з МДО-покриттям на робочій поверхні (Рисунок 3.12). Товщина та мікротвердість зміцненого шару визначалися за зразком-свідком, виготовленим з того ж матеріалу та обробленим на тому ж технологічному режимі. Мікротвердість покриття визначалася за допомогою мікротвердоміра HVS-1000 і становила 6,3 ГПа. Товщина УС вимірювалася за допомогою товщиноміра ТТ-210 і склала 82 мкм.

При випробуваннях використовувалися штатне компресійне кільце та поршень. Результати, отримані під час проведення випробувань, наведено у Таблицях 3.8 та 3.9. Підсумкові значення лінійного та масового зношування деталей зведені в Таблицю 3.10.



Рисунок 3.12 - Гільза циліндра із сплаву алюмінію АК4-1 після МДО

Таблиця 3.8 Результати вимірювання розмірів гільзи з МДО-покриттям

№ виміру	Час напрацювання, год	Розміри ГЦ за точками, мм						Маса ГЦ, г
		1	2	3	4	5	6	
1	0	26,55	26,54	26,535	26,54	26,525	26,52	17,972
2	0,5	26,55	26,54	26,535	26,54	26,525	26,52	17,972
3	10,5	26,558	26,544	26,538	26,542	26,526	26,52	17,971
4	20,5	26,56	26,551	26,54	26,542	26,526	26,52	17,969
5	30,5	26,561	26,557	26,543	26,548	26,526	26,52	17,964
6	40,5	26,569	26,569	26,55	26,548	26,528	26,52	17,957
7	50,5	26,573	26,571	26,551	26,55	26,531	26,521	17,953
Зношування		0,023	0,031	0,016	0,01	0,006	0,001	0,019

Таблиця 3.9 Результати вимірів розмірів поршня

№ виміру	Час напрацювання, год	Розміри поршня по точках, мм					Маса, г
		1	2	3	4	5	
1	0	26,39	26,421	26,418	26,39	26,44	10,523
2	0,5	26,389	26,421	26,415	26,39	26,449	10,523
3	10,5	26,389	26,42	26,401	26,39	26,445	10,522
4	20,5	26,387	26,416	26,392	26,388	26,44	10,521
5	30,5	26,386	26,414	26,379	26,383	26,442	10,519
6	40,5	26,383	26,411	26,364	26,381	26,438	10,515
7	50,5	26,381	26,407	26,362	26,378	26,437	10,514
Зношування		0,009	0,014	0,056	0,012	0,003	0,009

Таблиця 3.10 Лінійний та масовий знос експериментальної ГЦ та поршня

Деталь	Лінійне знос по точках, мм						Масовий знос, г
	1	2	3	4	5	6	
Гільза циліндра	0,023	0,031	0,016	0,01	0,006	0,001	0,019
Поршень	0,009	0,014	0,056	0,012	0,003	-	0,009

Масове зношування ГЦ з МДО за час випробувань склало 0,019 г, поршня - 0,009 г. Максимальне діаметральне зношування ГЦ спостерігається в точках 1 і 2 (0,023 і 0,031 мм відповідно). Найменше знос поверхні ГЦ спостерігається в точках 5 і 6. Найбільше лінійне знос поршня спостерігається в точці 3 і дорівнює 0,056 мм. У період обкатки помітного зносу гільзи циліндра з МДО-покриттям не відбувається, а до кінця 10 годин роботи швидкість зношування склала 0,013 10-3 мм/хв, що в 2,5 рази нижче, ніж у штатної ГЦ.

3.4.3 Дослідження впливу іскрового зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи

Відповідноз методикою, описаною в розділі 3.3.2, була отримана гільза

								Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ			75

циліндра з покриттям ІУ на робочій поверхні (Рисунок 3.13). Висота обробленої зони становить ~34 мм.

При випробуваннях використовувалися штатне компресійне кільце та поршень. Результати, отримані під час проведення випробувань, наведено у Таблицях 3.11 та 3.12. Підсумкові значення лінійного та масового зношування деталей зведені в Таблицю 3.13.



Рисунок 3.13 - Гільза циліндра із сплаву алюмінію АК4-1 після ВП

Таблиця 3.11 Результати вимірювання розмірів гільзи з ІУ-покриттям

№ виміру	Час напрацювання, год	Розміри ГЦ за точками, мм						Маса ГЦ, г
		1	2	3	4	5	6	
1	0	26,497	26,499	26,507	26,491	26,493	26,503	17,563
2	0,5	26,501	26,501	26,507	26,493	26,493	26,503	17,562
3	10,5	26,512	26,511	26,515	26,5	26,498	26,508	17,557
4	20,5	26,514	26,515	26,517	26,503	26,5	26,508	17,553
5	30,5	26,518	26,524	26,521	26,507	26,501	26,508	17,55
6	40,5	26,527	26,53	26,528	26,512	26,506	26,509	17,544
7	50,5	26,535	26,534	26,532	26,514	26,508	26,509	17,539
Зношування		0,038	0,035	0,025	0,023	0,015	0,006	0,024

Таблиця 3.12 Результати вимірів розмірів поршня

№ виміру	Час напрацювання, год	Розміри поршня по точках, мм					Маса, г
		1	2	3	4	5	
1	0	26,41	26,412	26,412	26,419	26,422	10,652
2	0,5	26,406	26,41	26,409	26,42	26,422	10,651
3	10,5	26,401	26,408	26,402	26,418	26,422	10,648
4	20,5	26,398	26,408	26,398	26,414	26,422	10,646
5	30,5	26,394	26,407	26,397	26,412	26,421	10,645
6	40,5	26,385	26,403	26,392	26,409	26,418	10,643
7	50,5	26,381	26,4	26,391	26,404	26,418	10,642
Зношування		0,029	0,012	0,021	0,015	0,004	0,01

Таблиця 3.13 Лінійний та масовий знос експериментальної ГЦ та поршня

Деталь	Лінійний знос, мм						Ваговий знос, г
	1	2	3	4	5	6	
Гільза циліндра	0,038	0,035	0,025	0,023	0,015	0,006	0,024
Поршень	0,029	0,012	0,021	0,015	0,004	-	0,01

Масове зношування ГЦ з ВПза час випробувань становив 0,024 г, поршня - 0,01 г. Максимальне діаметральне зношування ГЦ спостерігається в точках 1 і 2 (0,038 і 0,035 мм відповідно). Найменше знос поверхні ГЦ спостерігається в точках 5 і 6. Найбільше лінійне знос поршня спостерігається в точці 1 і дорівнює 0,029 мм. Величина швидкості зношування гільзи циліндра в період обкатки двигуна (30 хв) досягає 0,13 10^{-3} мм/хв в контрольній точці 1, і до кінця 10 годин роботи знижується до 0,017 10^{-3} мм/хв, що в 1, 88 разів нижче, ніж у штатної ГЦ.

ВИСНОВКИ

1. Гільзи циліндрів з алюмінієвого сплаву, робочі поверхні яких оброблені методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування, можуть застосовуватись у ДВЗ. Зношування поршнів при роботі з циліндрами з МДО-покриттям і ІУ-покриттям практично ідентичний зносу поршнів при роботі зі сталеву гільзою циліндра.

2. Експериментально визначено вплив режиму іскрового зміцнення на зносостійкість алюмінієвих сплавів..

3. Експериментально визначено характеристики механічних втрат та ефективної потужності двигунів з гільзами циліндрів, робочі поверхні яких оброблені методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування.

4. Іскрова зміцнення гільзи циліндра не призводить до суттєвої зміни теплового стану гільзи та суміжних деталей.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Качканьян Р. А., Кульмагамбет К. С. Шляхи зниження втрат на тертя в кривошипно-шатунному механізмі поршневих ДВС // Молодий учений. – 2016. – №. 10. - С. 231-234.
2. Srivastava, M., Sinha, U., Muniprakash, M., Mithran, A. et al., "Wear Resistant and Fuel Efficient Ni-Co Based Composite Coating for Engine Cylinder Application," SAE Technical Paper 2017-26-0165, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0165>.
3. Lenny J. Replacing cast iron lines for aluminum engine cylinder blocks: comparative assessment of potential candidates // Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut. - 2011.
4. Goodman J. Nikasil та Alusil // Engine Professional. - 2008. - С. 18-22.
5. Kainer KU(ed.). Metal matrix composites: custom-made materials для automotive і aerospace engineering. - John Wiley & Sons, 2006.
6. Dell R., Rand DAJ Clean energy. - Royal Society of Chemistry, 2004. - Т. 5.
7. Електролітно-плазмова обробка: моделювання, діагностика, управління: монографія / Є. В. Парфьонов, Р. Р. Нев'янцева, С. А. Горбатков, А. Л. Єрохін. - К.: Машинобудування, 2014. - 380 с.
8. Основи технології мікродугового оксидування: Навчальний посібник. - К.: «ІД Альянс», 2008 - 80 с.
9. Мікродугове оксидування: теорія, технологія, обладнання/І.В. Сумінов, А.В. Епельфельд, та інших. – К.: ЕКОМЕТ, 2005. – 368 з.
10. Тертя, зношування та змащення, Довідник, У 2-х кн, Кн, 2, / За ред. І. В. Крагельського та В. В. Алісіна - К.: Машинобудування, 1979-358с.
11. Крутилін АН, Курбатов М. І., Курбатова К. І. Умови роботи та основні вимоги, що пред'являються до матеріалу гільз блоку циліндрів // Лиття та металургія. - 2005. - №. 2-1 (34).
12. Гінцбург Б, Я, Теорія поршневого кільця - М: Машинобудування,

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

1979 p, - 247 c.

13. Papadopoulos P., Priest M., Rainforth WM Investigation of fundamental wear mechanisms at the piston ring and cylinder wall interface in internal combustion engines //Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. - 2007. - Т. 221. - №. 3. - С. 333-343.

14. Y. Enomoto, T. Yamamoto New materials in automotive tribology // Tribology Letters № 5, 1998 p, c, 13-24.

15. Cole GS, Sherman AM Light weight матеріалів для automotive applications //Materials characterization. - 1995. - Т. 35. - №. 1. - С. 3-9.

16. Schäfe A. Ремонт алюмінієвих блоків циліндрів: довідник. Німеччина, 2006. 100 с.

17. Schmid J. Металевий комбінований матеріал для циліндра вузлів композиційних інструментів і їх догляду за honing //matrix composites. Custom-made матеріалів для автомобілебудування та аеропростору. - 2006. - С. 215-242.

18. Sundararajan G., Joshi SV, Krishna LR Engineered surfaces для автомобілебудування і енергетичних компонентів / / Current opinion in chemical engineering. - 2016. - Т. 11. - С. 1-6.

19. Ostermann AE Experiences with Nickel-Silicon-Carbide Coatings в Cylinder Bores of Small Aluminum Engines. - SAE Technical Paper, 1979. - №. 790843.

20. Майстри К., Priest M., Shrestha S. Потенційний plasma electrolytic oxidized eutectic aluminium-silicon alloy є cylinder wall surface для lightweight engine blocks //Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. - 2010. - Т. 224. - №. 2. - С. 221-229.

21. Ernst P., Barbezat G. Thermal spray applications in powertrain contribute to saving of energy and material resources //Surface and Coatings Technology. - 2008.

- Т. 202. - №. 18. - С. 4428-4431.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

22. Токарев А,А., Паливна економічність і тягово-швидкісні якості автомобіля, - Машинобудування, 1982 р, - 224 с,
23. Дьяченко Н. Х., Теплообмін в двигунах і теплонапруженість їх деталей, М: Машинобудування, 1969 р, - 248 с,
24. Утворення та розкладання забруднюючих речовин у полум'ї: пер, з англ, / Під ред, Н, А, Чигиря, - Машинобудування, 1981.
25. Арзамасцева Е,А, Застосування алюмінієвих сплавів в автомобілебудування, журнал Автомобільна промисловість США, 1987 № 3,4, с. 35-38
26. Вплив легування на структуру та властивості деталей з чавуну з кулястим графітом / Р,А, Семенов, В,М,Садофєв, А,В, Запольська та ін.// Застосування нових матеріалів для підвищення довговічності деталей транспортних дизелів, - М: ІНФОРМТЯЖМАШ, – 1972, – № 5, – с. 12-24
27. Микулін Ю.В. Змащення та знос двигуна при пусковому режимі в умовах позитивних та негативних температур повітря // Електромашинобудування, - 1969 - № 1, - С. 9-14
28. Гурвіч І,Б,, Сиркін П,Е,, Чумак В,І, Експлуатаційна надійність автомобільних двигунів, -Транспорт, 1994 - 144 с.
29. Канарчук В,Е,, Довговічність та знос двигунів при динамічних режимах роботи, – Київ: Наук, Думка, 1978р, – 256 с,
30. Гурвіч І, Б, Довговічність автомобільних двигунів, - М: Машинобудування, 1967 р, - 103 с,
31. К.К. Криштал, П.В. Івашин, А.В. Полунін, Д.А. Павлов Про теплопровідність оксидних покриттів, отриманих методом мікродугового оксидування, на силумін АК9ПЧ // Вектор науки ТГУ, 2012. №4(22). З. 169 – 172.
32. Федоров, В.А. Розробка основ застосування легких сплавів як матеріали триботехнічного призначення рахунок формування поверхневого керамічного шару [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук/В.А. Федоров. - К., 1993. - 49 с.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		81

33. Петросянц, А.А. Кінетика зношування покриттів, нанесених методом мікродугового оксидування [Текст]/О.О. Петросянц, В.К. Малишев, В.А. Федоров // Тертя та знос. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 350-354.

34. Міхєєв, А.Є. Технологічні можливості мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів [Текст]/О.Є. Міхєєв, Н.А. Терьохін, В.В. Стацура// Вісник машинобудування. – 2003. – № 2. – С. 56-63.

35. Стребков, С.В. Забезпечення працездатності окисдованих поверхонь деталей [Текст]/С.В. Стребков, І.Г. Голубєв, А.В. Грамолін // Механізація та електрифікація сільського господарства. - 1997. - № 7. - С. 30-31.

36. Новіков, О.К. Пористість МДО-покриттів на відновлених поверхнях деталей із алюмінієвих сплавів [Текст] / О.К. Новіков, В.В. Жуків //Ремонт, відновлення, модернізація. – 2005. – № 6. – С. 7-9.

37. Коломейченко, О.В. Вплив режиму МДО на щільність покриттів [Текст]/О.В. Коломейченко, Н.С. Чернишов// Ремонт, відновлення, модернізація. - 2006. - №7. - С. 12-14.

38. отримання керамічних покриттів [Текст]/Е.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барикін // Зварювальне виробництво. – 1993. – № 6. – С. 4-7.

39. Кузнєцов, Ю.А. Відновлення та зміцнення деталей машин та обладнання АПК мікродуговим оксидуванням [Текст]: автореф. дис. докт. техн. Наук/Ю.А. Ковалів. - К., 2006. - 35 с.

40. Коломейченко, О.В. Мікродугове оксидування як спосіб відновлення та зміцнення деталей машин [Текст]/О.В. Коломейченко, В.К. Логачов, Н.С. Чернишов // Інженерія поверхні та реновація виробів: матер. 2-й Міжнар. наук.-техн. конф. - Київ: АТМ України, 2002. - С. 73-76.

41. Смілянський В.К. Методика технологічного проектування МДО [Текст]/В.К. Смілянський, О.Ю. Герцій// Автомобільна промисловість. – 2001. – № 2. – С. 31-33.

42. Тертя, знос та мастило (трибологія та триботехніка) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Е.К. Берлінер, Е.Д. Браун [та ін]; за заг. ред. А.В. Чичинадзе. - К.:

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		82

Машинобудування, 2003. - 576 с.

43. Voevodin, AA Characterisation of wear resistant Al-Si-O Coatings формується на al-based alloys micro-arc discharge treatment [Text] / AA Voevodin, AL Yerokhin, VV Lyubimov // Surface and Coating Technology. – 1996. – V 86-87. - P. 516-521.

44. Кузнєцов, Ю.А. Протизносні властивості керамічних покриттів, одержаних мікродуговим оксидуванням [Текст]/Ю.А. Кузнєцов // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2004. – № 6. – С. 28.

45. Козлов, А.В. Підвищення зносостійкості деталей машин мікродуговим оксидуванням з подальшим модифікуванням покриття [Текст]: дис. канд. техн. наук/А.В. Козлів. - Орел., 2014. - 152 с.

46. Пат. 2287025 Україна, С23 С26/00. Спосіб фрикційно-механічного нанесення антифрикційних покриттів на внутрішні циліндричні поверхні деталей та пристрій для його здійснення [Текст] / В.Л. Басинюк, Є.І. Мардосевич, А.В. Коломейченка [та ін.]. - №2005117285/02; заявл. 06.062005; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31. - 910 с.

47. Марков, Г.А. Мікродугові та дугові методи нанесення захисних покриттів [Текст]/Г.А. Марков, О.П. Терлеєва, Є.К. Шулепко// Підвищення зносостійкості деталей газонафтового обладнання за рахунок реалізації ефекту вибіркового перенесення та створення зносостійких покриттів: зб. тр. / За ред. А.А. Петросянца, А.Г. Кана. – К., 1985. – Вип. 185. – С. 54-64.

48. Єрохін, А.Л. Підвищення фрикційних характеристик МДО-покриттів вакуумно-плазмовою обробкою [Текст]/О.Л. Єрохін, А. Меттьюз, С. Доуї [та ін.] // Тертя та знос. – 1998. – Т. 19, № 5. – С. 642-646.

49. Дударєва Н.Ю. Поршневе кільце для ДВС, виготовлене з алюмінієвого сплаву [Текст] // Автомобільна промисловість. - 2012. - № 3. - С. 25.

50. Дударєва Н.Ю. Поршневе кільце для ДВС, виготовлене з алюмінієвого сплаву [Текст] / Дударєва Н.Ю., Соколов С.А. // Автомобільна промисловість. - 2010. - № 7. - С. 31-32.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

51. Адлер Ю.П. Планування експерименту під час пошуку оптимальних умов. - К.: Наука, 1976 - 280 с.
52. Карасік І.І. Методи трибологічних випробувань у національних стандартах. - Мінськ: Наука та техніка, 1993. - 325 с.
53. Tian J. та ін. Структура і antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings на алюмінієвий alloy // Surface and Coatings Technology. - 2002. - Т. 154. - №. 1. - С. 1-7.
54. Nie X. та ін. Thickness ефекти на механічні властивості micro-arc discharge oxide coatings на aluminium alloys //Surface and Coatings Technology. - 1999. - Т. 116. - С. 1055-1060.
55. Malayoglu U. et al. У 6082 алюмінієвої косметології // Матеріали природничої і інженерної: А. – 2011. – Т. 528. – №. 24. - С. 7451-7460.
56. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear-and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy //Journal of Alloys and Compounds. - 2005. - Т. 389. - №. 1-2. - С. 169-176.
57. Патрахальцев Н.Н, Характеристики двигунів внутрішнього згоряння: Навчальний посібник, - М,: Вид-во РУДН, - 100 с.
58. Curran, James A. Термальні та механічні властивості plasma electrolytic oxide coatings. Diss. University of Cambridge, 2006.
59. Цирельман Н.К. Прямі та зворотні завдання тепломасоперенесення / Н.К. Цирельман. - К.: Вища школа, 2005. - 392 с.
60. Колчин А.І., Демідов В.П. Розрахунок автомобільних та тракторних двигунів. - М: Вищ. школа, 1980. – 400 с.
61. Костін А.К., Ларіонов В.А., Михайлов Л.І. Теплонапруженість двигунів внутрішнього згоряння. Л., 1979 р.
62. Чайнов Н.Д. Конструювання двигунів внутрішнього згоряння/За ред. Н.Д. Чайнова. М: Машинобудування, 2008 р. - 496 с.

					ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84