

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет Конструювання та дизайну

УДК 61:01-5/1694-3

**ПОГОДЖЕНО**

Декан факультету

Конструювання та дизайну

(назва факультету)

Іван РОГОВСЬКИЙ.

(підпис)

(ПІБ)

“ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри

Надійності техніки

(назва кафедри)

Андрій НОВИЦЬКИЙ

(підпис)

(ПІБ)

“ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему «Підвищення зносостійкості та зниження механічних втрат двигуна  
внутрішнього згорання за допомогою зміцнення робочої поверхні циліндра»

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Освітня програма «Технічний сервіс машин та обладнання

сільськогосподарського виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій НОВИЦЬКИЙ

(ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:**

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександр БАННИЙ

(ПІБ)

**Виконав:**

Сергій ДЕМЧЕНКО

(підпис)

(ПІБ)

**КИЇВ - 2025**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет Конструювання та дизайну

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**Надійності техніки**  
(назва кафедри)

Андрій НОВИЦЬКИЙ  
(підпис) (ПІБ)

“ ” 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Демченко Сергій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»  
(код і назва)

Освітня програма «Технічний сервіс машин та обладнання  
сільськогосподарського виробництва»  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Підвищення зносостійкості та зниження  
механічних втрат двигуна внутрішнього згорання за допомогою зміцнення  
робочої поверхні циліндра»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 16. 12. 2024р. № 2401 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.11.21  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи Зношування є основною причиною виходу  
з ладу циліндро-поршневої групи (ЦПГ). Зміцнення поверхні циліндра значно  
подовжує термін служби двигуна, знижуючи потребу в ремонті та заміні.

Зниження механічних втрат: До 50% усіх механічних втрат у двигуні припадає  
на тертя у ЦПГ. Використання зміцненої поверхні з низьким коефіцієнтом тертя  
дозволяє зменшити ці втрати. Це безпосередньо призводить до:

Експериментально досліджувати, як конкретна технологія зміцнення  
(наприклад, наноструктуровані покриття, лазерне легування) змінює структуру,  
твердість та триботехнічні властивості матеріалів в умовах, характерних для  
ДВЗ (високі температури, тиск, динамічне навантаження).

Дата видачі завдання “14” жовтня 2024 року

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександр БАННИЙ  
(ПІБ)

**Завдання прийняв до виконання**  
(підпис)

Сергій ДЕМЧЕНКО  
(ПІБ)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	9
1.1 Вступ.....	9
1.2 Конструкції алюмінієвих блоків циліндрів .....	10
1.3 Фактори, що впливають на ресурс робочої поверхні циліндра.....	14
1.4 Аналіз сучасних способів підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра зі сплавів алюмінію .....	16
1.4.1 Нанесення зносостійких покриттів і установка вставок .....	18
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІСКРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ .....	25
2.1 Вступ.....	25
2.2 Вплив режимів іскрового зміцнення на зносостійкість алюмінієвих сплавів .....	25
2.3 Методика дослідження .....	25
2.4 Результати експерименту .....	28
2.5 Вплив іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на коефіцієнт тертя.....	30
2.5.1 Методика дослідження .....	30
2.5.2 Результати експерименту .....	32
2.6 Висновки .....	33
РОЗДІЛ 3. МОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ.....	35
3.1 Опис експериментального двигуна .....	35
3.2 Випробувальний стенд .....	36
3.3 Методика досліджень .....	38
3.3.1 Методика формування покриття на робочій поверхні гільзи циліндра із сплаву алюмінію методом мікродугового оксидування .....	38
3.3.2 Методика формування покриття на робочій поверхні гільзи циліндра із сплаву алюмінію методом іскрового зміцнення.....	39
3.3.3 Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи .....	41
3.3.4 Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на механічні втрати двигуна .....	43
3.3.5 Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на ефективні показники двигуна .....	45
3.4 Результати досліджень .....	47
3.4.1 Дослідження зносостійкості деталей циліндро-поршневої групи базового двигуна .....	47
3.4.2 Дослідження ефективних показників базового двигуна.....	49
3.5 Аналіз результатів досліджень .....	50

3.5.1	Вплив іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи.....	50
3.5.2	Прогнозування ресурсу двигуна, оснащеного гільзами циліндрів з іскровим зміцненням і мікродуговим оксидуванням робочої поверхні..	52
3.6	Висновки по розділу .....	56
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ ДВЗ.....		58
4.1.	Розрахунок економічної ефективності.....	58
ВИСНОВОК.....		61
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....		63
ДОДАТКИ.....		66

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Зростання конкуренції на ринку двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) і 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 і матеріальних ресурсів. Це, в свою чергу, призводить до розробки та впровадження більш складних технологій і технічних рішень.

У роботі [1] вказується, що в середньостроковій перспективі основними цілями розробок в області ДВЗ є збільшення потужності, економії палива, надійності і довговічності, зменшення маси і габаритів, забезпечення сумісності з альтернативними паливами. Як результат, внаслідок збільшення тиску і температури в камері згоряння, частоти обертання колінчастого валу тощо, відбувається збільшення механічних і теплових навантажень на деталі ДВЗ. Застосування альтернативних видів палива супроводжується зміною хімічної активності середовища в камері згоряння і, як наслідок, збільшенням корозії поверхонь деталей. Способи забезпечення надійності деталей ДВЗ, що застосовуються в даний момент, не задовольняють в повній мірі зростаючим вимогам, що обумовлює необхідність розробки нових конструкторських і технологічних рішень в цій області.

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, з'єднань, підвіски тощо. Особливу важливість маса ДВЗ має при їх застосуванні в ручному інструменті, авіації, мобільних енергоустановках.

Сьогодні з алюмінієвих сплавів виготовляють поршні, а також корпусні деталі двигуна і агрегатів. Подальше розширення застосування сплавів алюмінію обмежується 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 сталевий гільзи [2]. У зв'язку з цим одним з напрямків науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, що проводяться в області двигунобудування, є виключення таких вставок з конструкції ДВЗ і повний перехід на сплави алюмінію при виготовленні блоків циліндрів.

Деталі циліндропоршневої групи (ЦПГ) є найбільш навантаженими в ДВЗ. Вони функціонують в умовах впливу високих температур, динамічних навантажень, сил тертя і агресивних хімічних сполук. Знос поршнів, кілець і

робочих поверхонь циліндрів є одним з основних лімітуючих факторів, що визначають міжремонтні періоди двигуна. І якщо поршень і кільце відносяться до швидкознімних деталей, то ремонт поверхні циліндра або заміна гільзи пов'язані з істотними витратами. У поршневих ДВЗ до 11% енергії палива втрачається на подолання сил тертя [3]. З них до 40% втрат припадає на частку деталей циліндропоршневої групи [4]. Економічний ефект від зниження втрат на тертя і знос у всіх використовуваних двигунах оцінюється в 120 мільярдів доларів США.

Одним з перспективних способів підвищення ресурсу деталей ЦПГ з алюмінієвих сплавів є мікродугове оксидування (МДО) [10–12]. МДО дозволяє сформувати на поверхні міцне оксидне покриття з твердістю, близькою до корунду, хорошою адгезією, низькою пористістю і високими антикорозійними властивостями. Незважаючи на істотні переваги МДО, залишається ряд невирішених проблем, які не дозволяють застосовувати його в повній мірі на деталях ЦПГ ДВЗ. Низька теплопровідність покриття може негативно позначатися на тепловій напруженості інших деталей, що обмежують об'єм робочої камери. Висока твердість і низька маслоутримуюча здатність обробленої поверхні можуть призводити до збільшення зносу кілець і спідниці поршня. Можливі відколи покриття на краях, що є серйозним недоліком, особливо для двотактних ДВЗ. Крім того, до теперішнього часу не вирішена проблема отримання рівномірного за властивостями покриття на всій поверхні деталі.

У даному дослідженні розглядається можливість заміни гільзи циліндра (ГЦ) зі сплаву заліза на алюмінієві з робочою поверхнею, зміцненою методами ІЗ та МДО, з метою збільшення зносостійкості дзеркала циліндра та ресурсу двигуна. Вивчається вплив таких ГЦ на механічні втрати двигуна.

#### **Актуальність роботи визначається такими обставинами:**

- Незважаючи на те, що алюмінієві блоки циліндрів впроваджуються в двигунобудуванні з середини 1950-х років, переважна більшість з них випускається зі зносостійкими вставками з інших матеріалів для збільшення ресурсу робочої поверхні циліндра. При цьому провідні виробники проводять дослідження з метою виключення таких вставок з конструкції ДВЗ.

- Існуючі на ринку технології, по-перше, не задовольняють весь спектр запитів виробників ДВЗ: зокрема, виявляються дорогими для застосування в малорозмірних ДВЗ, мають проблеми сумісності з різними паливами тощо. По-друге, ці технології розроблені і є власністю декількох компаній-монополістів. Російська Федерація сьогодні не володіє подібними технологіями, впровадженими у виробництво.

- Доступні у відкритому доступі дослідження присвячені переважно триботехнічним і технологічним аспектам застосування МДО в

двигунобудуванні.

- Застосування методу іскрового зміцнення для підвищення ресурсу циліндра не досліджувалося. При цьому метод ІЗ - нова технологія, що має ряд переваг щодо аналогічних рішень.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра з алюмінієвого сплаву і зниження механічних втрат двигуна методами іскрового зміцнення і мікродугового оксидування.

**Об'єкт дослідження:** Процеси зношування та механічних втрат у циліндро-поршневій групі (ЦПГ) двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).

**Предмет дослідження:** Закономірності зміни експлуатаційних характеристик (зносостійкості, коефіцієнта тертя, механічного ККД) робочої поверхні циліндра ДВЗ внаслідок застосування технології її зміцнення

**Відповідно до мети були сформульовані завдання дослідження:**

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

2. Дослідження впливу іскрового зміцнення на коефіцієнт тертя, мікротвердість і 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 .

4. Оцінка впливу зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра з алюмінієвого сплаву методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на тепловий режим деталей циліндропоршневої групи та головки циліндра ДВЗ .

**Методи дослідження. При виконанні роботи використані наступні методи дослідження:**

- теоретичні дослідження з використанням основних положень теорії двигунів внутрішнього згоряння, теплопередачі та триботехніки;

- експериментальні дослідження на лабораторних зразках;

- експериментальні дослідження на малорозмірних поршневих ДВЗ.

Дослідження мало розрахунково-експериментальний характер.

**Обсяг і структура роботи.** Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, основних висновків, додатка та списку літератури. Містить 65 сторінок машинописного тексту, що включає 17 рисунків, 21 таблиці та бібліографічний список із 46 найменувань.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

### 1.1 Вступ

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

1. Підвищення енергоефективності, що виражається в зниженні витрати 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 застосовуваних матеріалів тощо.

3. Підвищення споживчих властивостей, тобто підвищення потужності, надійності, безпеки, зниження вартості його виробництва та обслуговування тощо.

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

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

Незважаючи на постійне вдосконалення конструкції двигунів і технології їх виробництва, знос деталей циліндропоршневої групи продовжує обмежувати міжремонтні пробіги. Якщо поршень і кільце відносяться до швидкознімних деталей, то відновлення і заміна гільзи пов'язані з набагато більшими витратами. Знос деталей ЦПГ ДВЗ значною мірою негативно впливає на індикаторні та ефективні показники двигуна, витрату картерних газів і витрату масла на випаровування.

## 1.2 Конструкції алюмінієвих блоків циліндрів

У сучасному двигунобудуванні виділяються кілька концепцій в конструкції блоків циліндрів (БЦ). Найбільшого поширення набули монолітні блоки (Рис. 1.1). При такій конструкції циліндри і блок циліндрів виготовляються як єдине ціле. У малорозмірних одно- і двоциліндрових двигунах можливі варіанти конструктивного виконання, коли в єдину деталь об'єднується 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 охолоджуюче середовище омиває циліндр з усіх боків, теплові потоки від нагрітого середовища робочої камери рівномірно розподіляються по діаметру.

У конструкціях типу «Closed-Deck», на відміну від попереднього варіанту, верх циліндрів до отворів для протікання охолоджуючої речовини закритий (Рисунок 1.3). При цьому циліндри виготовляються як окрема монолітна деталь. Така конструкція забезпечує хороше ущільнення кришки БЦ і високу жорсткість верхньої частини циліндрів.

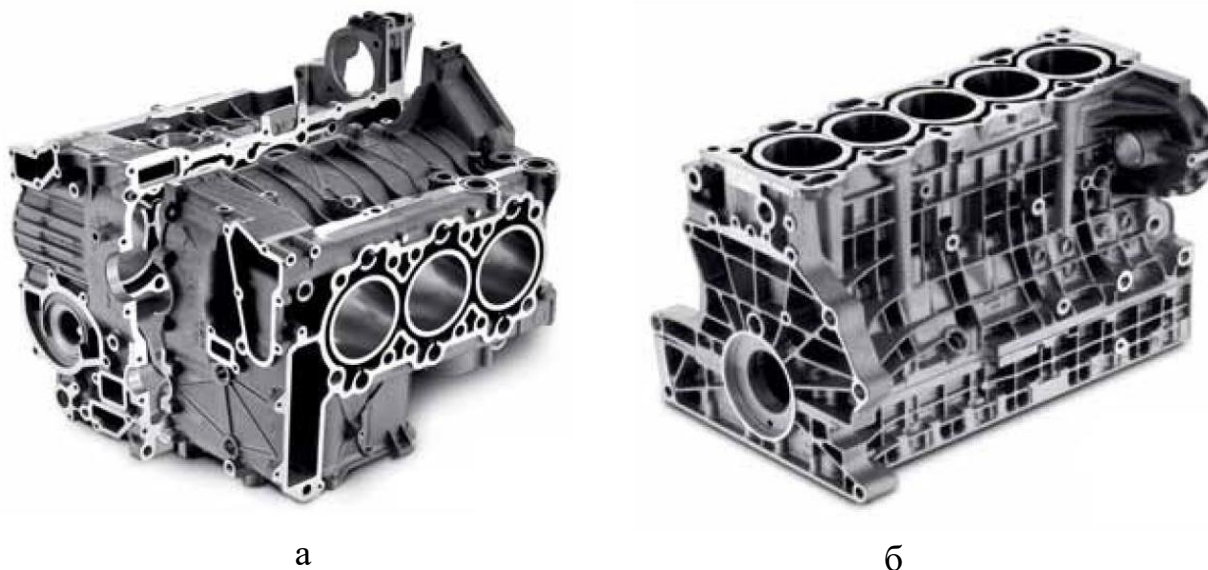


Рисунок 1.2 - Блоки циліндрів конструкції типу «Open-Deck» [21]



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

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

В даний час у світі приблизно половина всіх блоків виготовляється з алюмінієвих сплавів. Однак у 90% з них використовують гільзи зі сплавів заліза або інших зносостійких матеріалів [2]. Тому провідні моторобудівні фірми світу ведуть розробки в напрямку впровадження алюмінієвих гільз і безгільзових алюмінієвих блоків циліндрів.

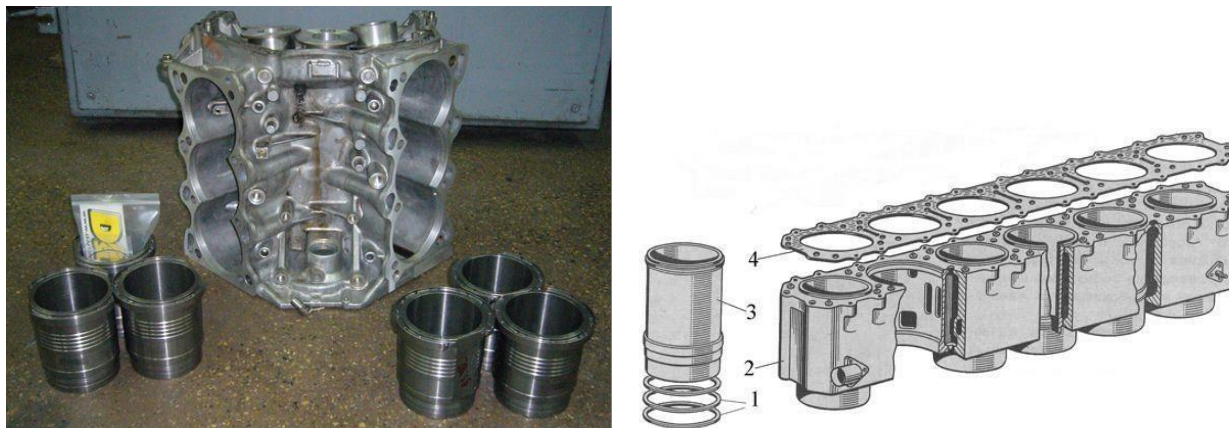


Рисунок 1.4 - Блок циліндрів з «мокрими» гільзами:

1 - ущільнювальні кільця, 2 - блок циліндрів, 3 - гільза, 4 - прокладка головки блоку.

Основні переваги застосування алюмінієвих блоків циліндрів без чавунних гільз пов'язані з масогабаритними і технологічними показниками. Щільність алюмінієвих сплавів в 2,5...3 рази менше щільності сплавів заліза. Заміна чавуну на алюміній при виготовленні блоку циліндрів призводить до зниження його маси приблизно на 50%. Подальше виключення з конструкції двигуна гільз циліндрів зі сплавів заліза дозволяє додатково зменшити масу блоку циліндрів до 30% [2]. Це в свою чергу забезпечує збільшення питомої маси двигуна і зменшення витрати енергії на переміщення самого ДВЗ в просторі стосовно до мобільних машин. Крім того, зниження маси двигуна дозволяє зменшити масу інших деталей: кріплень, рами і тощо. Завдяки цьому, наприклад, зниження загальної маси автомобіля на 10% дозволяє зменшити витрату палива до 1,5% [22].

З точки зору конструкції і технології виробництва, безгільзовий алюмінієвий блок циліндрів забезпечує мінімальний конструктивний перекис циліндрів, обумовлений некруглістю або неточним позиціонуванням гільз. Завдяки кращій теплопровідності алюмінію зменшується термічна некруглість і термічний перекис циліндрів [2]. Якщо говорити про алюмінієві ГЦ, то 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. Особливу актуальність це набуває у зв'язку з переходом на альтернативні види палива, такі як етанол, метанол, водень та ін. Поршневі кільця і втулки, виготовлені з чавунів, при наявності електроліту утворюють один з одним гальванічні пари, в той час як оксидна плівка на

поверхні алюмінію має високий електричний опір 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 середовищу в циліндрі двигуна, алюміній є стійким до впливу таких елементів і сполук, як вода, водень, кисень, азот, сірка, сечовина, сірчиста, сірчана, азотна, вугільна кислоти та ін.

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

До прикладу, 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, позитивно впливає на тепловий баланс і теплову інерцію двигуна [21]. На Рисунку 1.5 показано порівняння висоти сорочки охолодження циліндра при застосуванні чавуну (*a*) і сплаву алюмінію (*б*). У виробничо-технічному плані зменшення глибини сорочки охолодження також має певні переваги, що виражаються в зниженні вартості виготовлення.

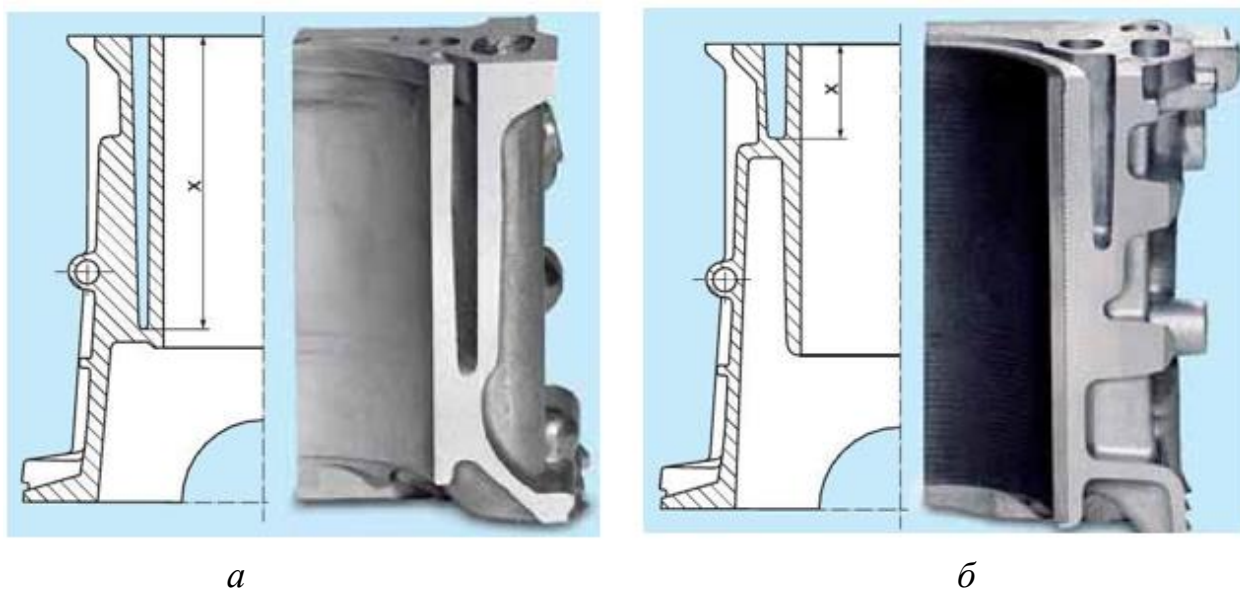


Рисунок 1.5 Порівняння висоти  $x$  сорочки охолодження циліндра при застосуванні чавуну (*a*) і алюмінію (*б*) [21].

Застосування алюмінієвих блоків циліндрів позитивно позначається на показниках токсичності відпрацьованих газів. Скорочення часу прогріву

двигуна дозволяє знизити викиди незгорілих вуглеводнів. Так, за даними досліджень, підвищення середньої температури стінок циліндра з 72 до 147 °C призвело до зниження концентрації незгорілих вуглеводнів у відпрацьованих газах двигуна в 2 рази [2]. В результаті зменшення часу прогріву ДВЗ легкового автомобіля з 90 до 40 секунд викиди незгорілих вуглеводнів за їздовим циклом скоротилися з 0,1 до 0,05 г/км, тобто практично увійшли в вимоги норм Євро-4 [27].

### **1.3 Фактори, 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, застосовуваного палива і масла, умов навколишнього середовища, властивостей застосовуваних матеріалів тощо. При цьому однозначного визначення природи зношування не існує. Дослідження показують, що робоча поверхня циліндра одночасно піддається абразивному, корозійно-механічному і молекулярно-механічному зношуванню. Процес молекулярно-механічного зношування найбільш імовірний у верхній частині циліндра [29]. В умовах недостатнього змащення, малої швидкості поршня в цій області, високих температурах і тиску відбувається порушення безперервності масляної плівки, що стає причиною виникнення захоплювання поверхонь тертьових пар в окремих точках. З іншого боку, окисні та лакові покриття, що утворюються на поверхні циліндра, знижують ймовірність зчеплення [30].

Корозійно-механічний знос поверхні циліндрів полягає у взаємодії металу поверхонь тертя з газоподібними і рідкими продуктами згоряння палива, окислення масла і води [30]. Корозійно-механічний знос зазвичай складається 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, в основному, частинками мінерального походження, що проникають в циліндр разом з повітрям або утворюються в процесі експлуатації ДВЗ. Як правило, максимальний абразивний знос циліндра спостерігається в області верхньої мертвої точки, при цьому відбувається процес подряпування і мікрорізання поверхні деталі твердими абразивними частинками, а також їх інтенсивне дроблення між стінкою циліндра і поршнем. Максимальний абразивний знос нижньої і середньої частини циліндра спостерігається 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 в конструкції, порушенні теплового режиму і т.д., а також при роботі на нестабільних режимах. При нормальному функціонуванні двигуна складно виділити причинно-наслідковий зв'язок між ресурсом циліндра і видами зношування.

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

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

Експлуатаційні фактори визначаються комплексом теплових, навантажувальних і швидкісних режимів двигуна. Як при стабільних, так і при нестабільних режимах навантаження на двигун і частота обертання колінчастого вала мають вирішальний вплив на надійність робочої поверхні циліндра. Як показують дослідження, при нестабільних режимах знос виявляється в 2,5...3,5 рази вищим, ніж при стабільних [31].

Збільшення навантаження при стабільному усталеному тепловому режимі призводить до пропорційного зростання зносу (Рис 1.6 а), так як збільшується питомий тиск кілець на стінки циліндра. Слід зазначити, що інтенсивність зношування залежить не тільки від величини навантаження, але і від інтенсивності її зміни. На Рисунку 1.7 показано вплив інтенсивності зміни навантаження на знос гільзи циліндра двигунів ЗМЗ-21 (а) і ЗМЗ-53 (б). Інтенсивність зміни навантаження  $W(p)$  знаходиться в діапазоні 0,05...0,25 МН/м<sup>(2)</sup>. Аналіз даних, отриманих у роботі [32], показує, що незалежно від типів двигунів при нестабільних режимах навантаження в порівнянні з еквівалентними стабільними режимами знос ГЦ зростає більш ніж у 3 рази. Важливу роль відіграє тепловий стан двигуна. Так, наприклад, при холодному пуску знос циліндрів двигунів, навантажених на 10...15 % від максимальної потужності, має більші значення, ніж при навантаженні до 70...80 % і оптимальних температурах охолоджуючої рідини та масла [31].

На Рис. 1.6 б показано характер впливу частоти обертання колінчастого вала (КВ)  $n$  на знос циліндра [31]. Зі збільшенням частоти обертання КВ при стабільному тепловому режимі знос збільшується. При динамічних режимах роботи двигуна знос поверхні циліндра значною мірою залежить від величини прискорень КВ.

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

В умовах реальної експлуатації ДВЗ 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 в свою чергу викликають теплову деформацію деталей.

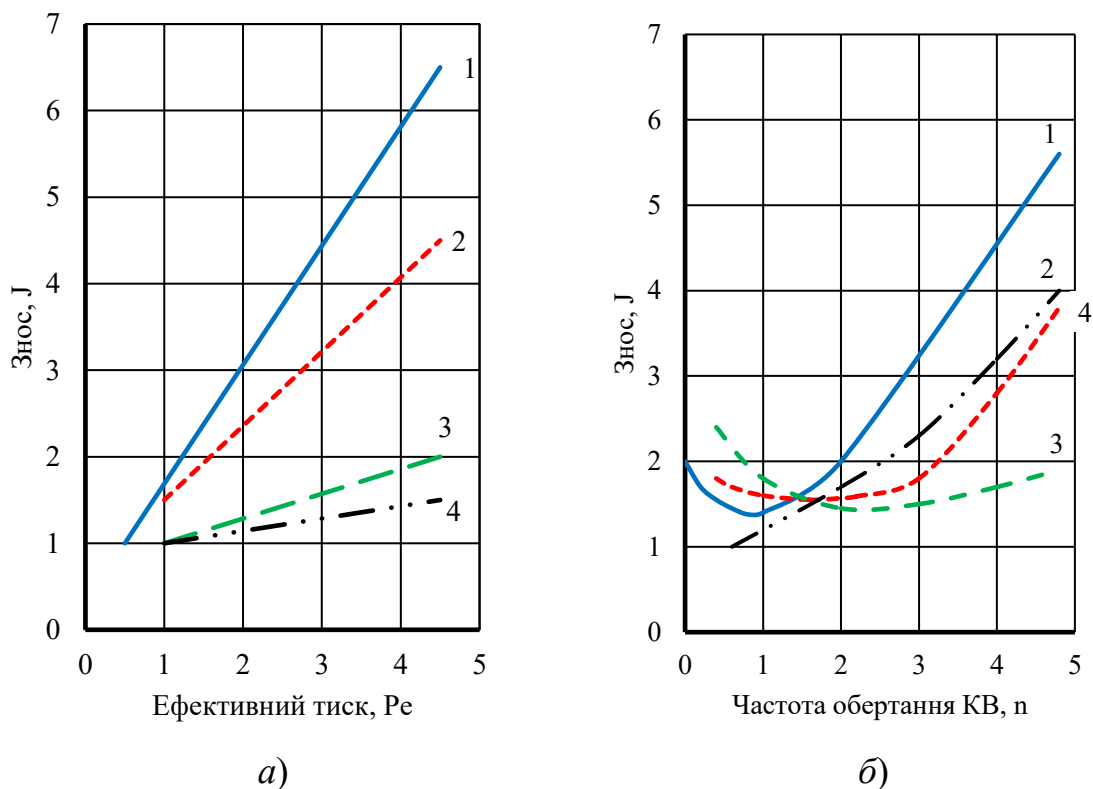


Рисунок 1.6 - Вплив середнього ефективного тиску  $P_e$  (а) і частоти обертання  $n$  колінчастого вала (б) на знос  $J$  деталей двигуна ГАЗ і ЗМЗ: 1 – циліндри; 2 – поршневі кільця; 3- шийки колінчастого вала; 4 – стрижні клапанів і напрямні втулки [31]

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

У сучасному машинобудуванні відомо і застосовується велика кількість способів підвищення зносостійкості тертьових поверхонь. 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 з кожної групи. У свою чергу технологічні способи підвищення зносостійкості робочої поверхні алюмінієвих циліндрів поділяються на три напрямки:

- зміна властивостей матеріалу в обсязі деталі;
- зміна властивостей матеріалу на поверхні деталі;
- застосування зносостійких покриттів, у тому числі спеціальних вставок.

Компанія Kolbenschmidt Pierburg AG розробила метод Locasil [21], при якому стандартний сплав для лиття під тиском (наприклад,  $\text{AlSi9Cu3}$ ) збагачується локально кремнієм в зоні робочих поверхонь циліндрів. Це досягається завдяки високопористим циліндричним фасонним 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 способом на робочій поверхні циліндра утворюються армуючі кристали кремнію. Завдяки такому місцевому збагаченню кремнієм отримують властивості робочих поверхонь, еквівалентні сплаву Alusil, при цьому інша частина блоку циліндрів добре обробляється різанням. На Рис. 1.10 показаний розріз блоку циліндрів, виготовленого за даною технологією. Видно збагачення кремнієм в зоні робочої поверхні циліндра. Розміри частинок кремнію при цьому складають 30...120 мкм.

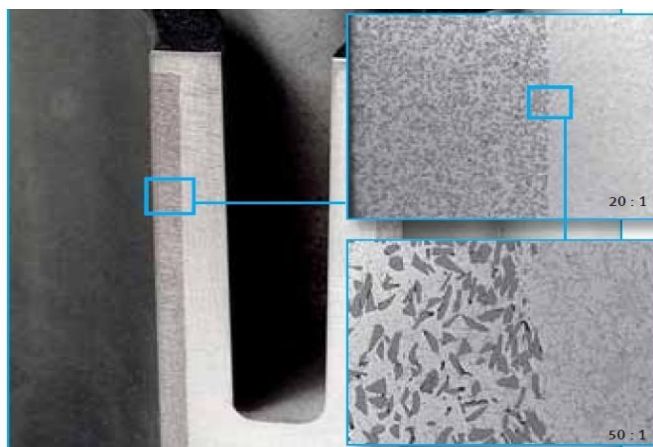


Рисунок - 1.7 Технологія Locasil на гільзі циліндра [21]

Для зміцнення робочої поверхні циліндра застосовується те саме лазерне легування [23]. Зокрема, поверхня може армуватися кремнієм, свинцем, міддю тощо. При лазерному легуванні робоча поверхня циліндра, виготовленого зі стандартного алюмінієво-кремнієвого сплаву, за допомогою обертового лазерного оптичного пристрою оплавляється і металургійно легується паралельно підведеним порошком кремнію та ін. (Рис 1.11). Таким чином отримують тонкий шар (до 20 мкм) з твердою фазою в зоні внутрішньої поверхні циліндра. Після обробки робоча поверхня циліндра піддається хонінгуванню і проводиться розкриття частинок кремнію хімічним травленням.

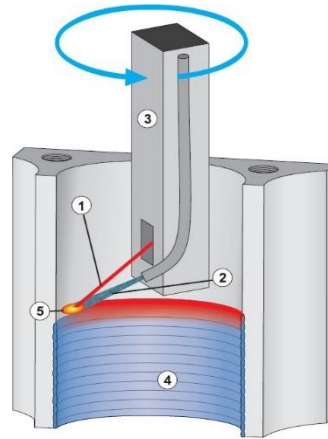


Рисунок 1.11 - Схематичне зображення процесу лазерного легування поверхні циліндра кремнієм: 1 – лазерний промінь, 2 – струмінь порошку, 3 – обертовий лазерний оптичний пристрій, 4 – легований шар, 5 – зона оплавлення [21]

#### 1.4.1 Нанесення зносостійких покриттів і установка вставок

Перші рішення, створені для боротьби з проблемою низької надійності блоків циліндрів з алюмінієвих сплавів, ґрунтувалися на покритті робочої поверхні зносостійкими матеріалами або встановленні зносостійких вставок. Велика група застосовуваних і розроблюваних методів 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 нанесеного матеріалу.

Одним з методів, заснованих на PVD-процесі, є покриття робочих поверхонь циліндрів нітридом титану (TiN) або нітридом титану і алюмінію (TiAlN). Метод розробляється компанією Kolbenschmidt Pierburg AG. Матеріал-донор, в якості якого 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 по балістичних орбітах через вакуумну камеру або відкладаються на покритих поверхнях. Підводячи в камеру азот, отримують нітриди титану і алюмінію, який осідає на робочій поверхні ГЦ. Тривалість процесу покриття визначає необхідну товщину покриття. Покриття наноситься на хонінговану алюмінієву робочу поверхню циліндрів. Товщина покриття відносно невелика, так що структура хонінгування при покритті залишається. Порівняно високі витрати і недостатня надійність процесу обмежують широке застосування даного методу в області двигунобудування.

Наступна група зміцнюючих покриттів ґрунтується на електролітичному осаджуванні тонкого шару нанесеного матеріалу на поверхні ГЦ [23]. Таким способом отримують покриття із сполук кремнію, нікелю, хрому

тощо. Принципова схема установки для гальванічної обробки ГЦ показана 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  $1 - 4 \text{ А/дм}^{(2)}$  при напрузі 10-25 В. Необхідні параметри електричного струму забезпечуються системою управління, яка на схемі спрощено представлена реостатом  $R$ , і контролюються протягом процесу обробки.

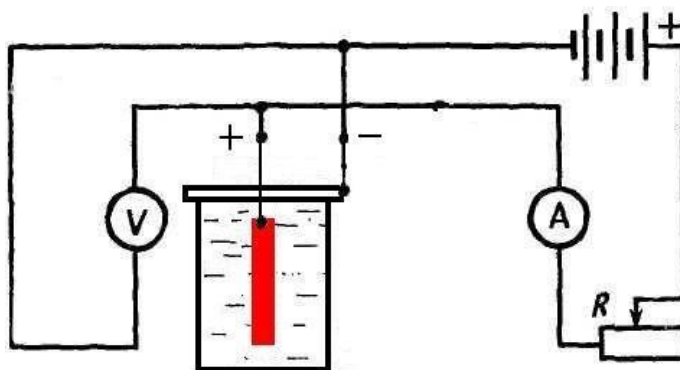


Рисунок 1.12 - Принципова схема гальванічної обробки ГЦ

Одним з найбільш поширених електролітичних нікелевих покриттів є Nikasil або Galnikal [7; 21; 25]. Робоча поверхня алюмінієвого блоку циліндрів після чистової обробки покривається дисперсійним шаром нікелю і карбіду кремнію (Ni-SiC). Товщина нікелевого шару становить в середньому від 10 до 50 мкм. У даний шар для поліпшення зносостійкості інтегровані тверді фази з карбіду кремнію (7-10% від обсягу). В якості основного матеріалу блоку циліндрів можуть застосовуватися як широко поширені алюмінієві сплави, так і спеціалізовані. На Рисунку 1.13 показана робоча поверхня циліндра, покрита нікелем, в розрізі.



Рисунок 1.13 - Гільза циліндра з покриттям Nikasil [21]

Покриття типу Nikasil мають ряд недоліків, які призвели до того, що на даний момент масштаби їх застосування в ДВЗ значно скоротилися:

1. Отримане покриття не сумісне з сірковмісними паливами. При запуску двигуна або при роботі в умовах низьких температур на деяких ділянках поверхні гільзи можливе утворення конденсату, який, реагуючи з продуктами горіння сірки, утворює сірчисту кислоту. Це, в свою чергу, призводить до корозії та відколів 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 і пристрої утилізації токсичних речовин, що містяться в електроліті.

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

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

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

Крім нікелю, широко 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 поверхні. Майже всі хромові покриття мають сітку тріщин, величина якої залежить від режимів електролізу і ряду інших факторів. З одного боку, тріщини підвищують припрацьовуваність і маслоутримуючу здатність поверхні, а з іншого - послаблюють шар хрому.

З підвищенням твердості хромового покриття до певної величини знос хрому і пов'язаного з ним чавунного контртіла зменшується до мінімуму, а потім підвищується (Рисунок 1.14). Така залежність між твердістю і зносостійкістю пояснюється тим, що зі збільшенням твердості вище оптимальної збільшується крихкість і напруженість покриття [14]. Ще одним недоліком хромових покриттів є різке падіння твердості і зносостійкості в міру їх нагрівання.

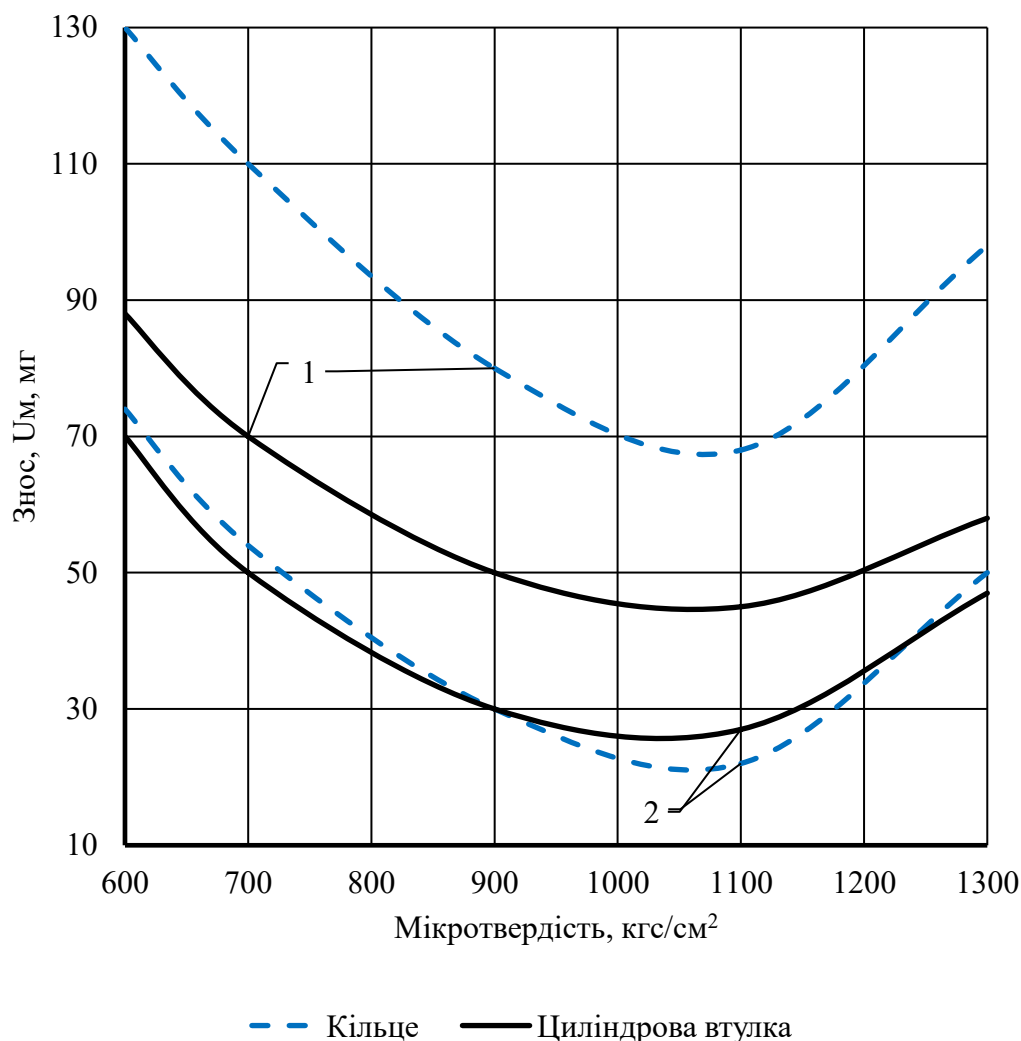


Рисунок 1.14 - Вплив твердості хромового покриття на знос пар тертя:  
1 - чавун, 2 - хром [14].

Велика кількість технологій підвищення надійності робочої поверхні циліндрів базується на газотермічному напиленні покриттів [26]. Загальна назва «газотермічне напилення» об'єднує в собі ряд способів нанесення матеріалу на поверхню. У практиці обробки деталей ЦПГ застосовуються переважно плазмове і газополум'яне напилення.

Плазмове напилення базується на використанні енергії плазмового струменя як для нагрівання, так і для перенесення частинок металу. Плазмовий струмінь отримують пропусканням плазмоутворюючого газу через електричну дугу і стисканням стінками спеціального сопла. При газополум'яному напиленні металевий або полімерний порошковий, дротяний або шнуровий матеріал подається в полум'я ацетилен-кисневого або пропан-кисневого пальника, розплавляється там і переноситься стисненим повітрям на поверхню виробу, охолоджуючись на якому призводить до формування покриття.

Зокрема, в серійному випуску застосовуються плазмові покриття на основі заліза. На Рисунку 1.15 схематично показаний процес формування

покриття. У зону обробки подається газ, наприклад, водень або аргон, який іонізується в у до у стану у плазми. Температура у плазми досягає 15000 – 20000 °С. Порошок, з якого буде формуватися покриття, подається в плазмовий струмінь, де розплавляється і зі швидкістю 80...100 м/с в рідкому стані наноситься на поверхню, що покривається. Процес відбувається при атмосферному тиску. Технологія дозволяє додатково інтегрувати в 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 маслоутримуючу здатність покриття. Це в свою чергу призводить до поліпшення умов тертя і зниження зносу робочої поверхні циліндра.

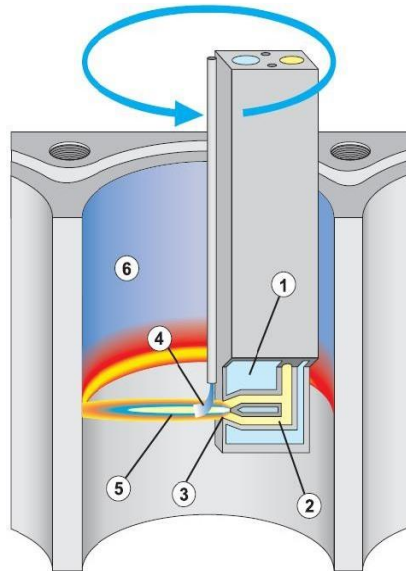


Рисунок 1.15 - Схематичне зображення нанесення плазмового покриття: 1 - водяне охолодження, 2 - підведення пального газу, 3 - вихідне сопло, 4 - підведення порошку, 5 - плазмовий промінь, 6 - плазмове покриття [21]

Наступною концепцією підвищення надійності алюмінієвих циліндрів є заливні гільзи циліндрів з алюмінієвого сплаву. Заливальні гільзи з алюмінієвих сплавів дозволяють виготовити блок циліндрів зі звичайного сплаву алюмінію, а робочу поверхню циліндра – з більш зносостійкого сплаву з високим вмістом кремнію, таких як заевтектичні сплави Alusil або Silumal. Одним з перспективних рішень є технологія Silitec. У спеціальній камері розплав алюмінію розпилюється за допомогою азоту, і таким чином шар за шаром утворює заготовку (Рисунок 1.16). Форма конуса розпилення обумовлює форму напівфабрикату. За процесом виготовлення компактне набризкування знаходиться між спіканням і класичним формоутворюючим литтям. У

порівнянні зі звичайними ливарними матеріалами з'являється можливість, як і при спіканні, отримувати матеріали незвичайного складу. Вміст кремнію при даному методі може доходити до 25%. Розміри кристалів кремнію складають 4...10 мкм. Отриманий матеріал має дуже тонку структуру з гомогенним розподілом елементів і фаз і хорошими можливостями зміни форми. Таким способом отриманий сирий матеріал у формі заготовки переробляється методом безперервного видавлювання в труби, які потім розпилюються на шматки і застосовуються як заливні деталі для блоку циліндрів.

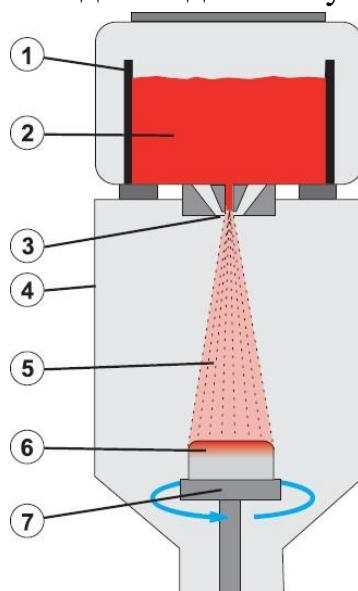


Рисунок 1.16 - Схема отримання заготовок для виробництва заливних алюмінієвих гільз за технологією Silitec: 1 – ливарний тигель, 2 – розплав, 3 – кільцеве сопло, 4 – камера розпилення, 5 – конус розпилення, 6 – заготовка, 7 – обертова тарілка [21]

### 1.5 Висновки по розділу. Формулювання гіпотези, постановка мети і завдань

Огляд і аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел літератури, присвячених проблемі підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндрів з алюмінієвих сплавів, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Одним з актуальних завдань в області поршневого двигунобудування є застосування сплавів алюмінію при виготовленні гільз циліндрів і безгільзових блоків циліндра.

2. Через низьку зносостійкість алюмінію та його сплавів необхідно застосовувати спеціальні заходи для забезпечення необхідної зносостійкості робочої поверхні циліндра. Технологічні заходи полягають у застосуванні зносостійких покриттів, об'ємного та поверхневого легування.

3. Існуючі технологічні рішення для підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра мають ряд недоліків, таких як відшарування при високих температурах і великих механічних навантаженнях, руйнування в результаті

агресивного впливу палива, висока вартість, великий обсяг браку при серійному виробництві і т.д.

4. В даний час у вітчизняній та зарубіжній літературі недостатньо повно відображені дослідження, спрямовані на вивчення можливості застосування методу іскрового зміцнення для підвищення надійності деталей циліндропоршневої групи ДВЗ . Ряд робіт [66; 67; 71; 72] присвячені дослідженням підвищення зносостійкості поршнів і поршневих кілець, в той час як підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра або гільзи циліндра ДВЗ потребує додаткових досліджень.

Виходячи з властивостей покриттів, що формуються при МДО та ІЗ, а також беручи до уваги схожість цих двох технологій, сформульована гіпотеза дослідження про те, що модифікація робочої поверхні гільзи циліндра зі сплаву алюмінію методом іскрового зміцнення і мікродугового оксидування дозволяє підвищити її зносостійкість без негативної зміни теплового режиму деталей ЦПГ, при цьому можливе зниження механічних втрат двигуна.

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

На основі поставленої мети роботи визначено та сформульовано завдання теоретичних і експериментальних досліджень:

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

2. Дослідження впливу іскрового зміцнення на коефіцієнт тертя, мікротвердість і 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 .

4. Проведення дослідження впливу зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра з алюмінієвого сплаву методами іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на тепловий режим деталей ЦПГ і головки циліндра ДВЗ .

## **РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІСКРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

### **2.1 Вступ**

Аналіз літературних джерел та експериментальних даних показав, що можливість застосування методу іскрового зміцнення для обробки робочої поверхні гільзи циліндра не досліджувалася, також відсутня інформація про оптимальні з точки зору зносостійкості параметри зміцнення. Для підтвердження висунутої гіпотези та досягнення мети дослідження необхідно спочатку вирішити завдання, пов'язані з дослідженням впливу іскрового зміцнення на зносостійкість, коефіцієнт тертя, мікротвердість та межу міцності покриття. Для визначення зносостійкості покриття, що формується, був спланований і проведений дробовий трифакторний експеримент, на підставі результатів якого обраний режим іскрового зміцнення, який далі використовувався при підготовці експериментальних гільз циліндрів для проведення моторних досліджень.

Важливими властивостями покриття, що визначають працездатність робочої поверхні циліндра, є мікротвердість та коефіцієнт тертя покриття. До того ж під впливом концентрованих потоків енергії в процесі іскрового зміцнення в поверхневому шарі матеріалу відбуваються структурні та хімічні зміни, які в результаті можуть негативно впливати на міцнісні властивості всієї деталі. Тому було сплановано та проведено повний трифакторний експеримент щодо визначення впливу режимів іскрового зміцнення на мікротвердість покриття та межу міцності зразків з покриттям.

Також було сплановано та проведено експеримент з визначення коефіцієнта тертя, при якому проводилося порівняння коефіцієнтів тертя покриттів, отриманих методом іскрового зміцнення та мікродугового оксидування, зразків із сталі 40X та сплаву алюмінію АК4-1. Матеріали зразків були обрані виходячи з того, що штатна гільза циліндра двигуна, що використовується в моторних дослідженнях, виготовлена зі сталі 40X, а експериментальні гільзи циліндра – зі сплаву алюмінію АК4-1.

### **2.2 Вплив режимів іскрового зміцнення на зносостійкість алюмінієвих сплавів**

#### **2.3 Методика дослідження**

Метою дослідження є визначення оптимальних з погляду підвищення зносостійкості технологічних режимів іскрового зміцнення сплавів алюмінію. Т.к. покриття, що формується при ІЗ, 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, збільшення кількості факторів веде до зростання кількості експериментів, що з огляду на тривалість процесу ІЗ є небажаним.

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 (4 ... 295 мкм), шорсткості ( $R_a$  0,3 ... 3,2) та мікротвердості шару ( $H_m$  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.

Таблиця 2.1 Фактори експерименту

	Ємність конденсаторів $C$ , мкФ	Індуктивність $L$ , Гн	Межелектродний зазор $d$ , 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  $x_3$   $1 \times 2$  (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	X0	X1	X2	X3
1	+	+	+	-
2	+	-	-	-
3	+	+	-	+
4	+	-	+	+

Зразок для випробувань був виготовлений із сплаву алюмінію марки Д16Т згідно з ГОСТ 21488-97. Ескіз зразка наведено на рис. 2.1. Зовнішня поверхня зразка обробляється методом ІЗ 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.

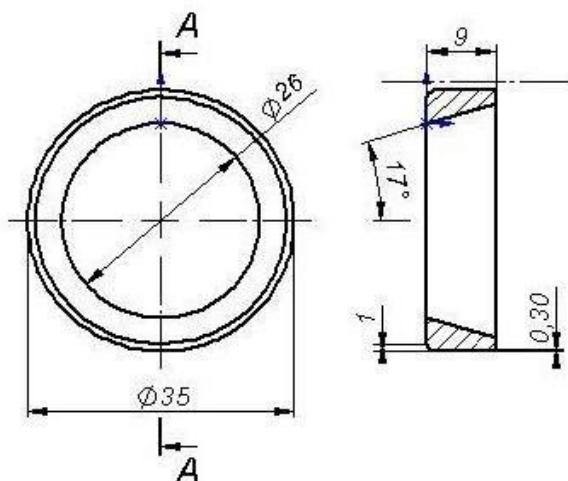


Рисунок 2.1 – Зразок для випробувань на зносостійкість

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 машиною тертя (Рисунок 2.3). 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.

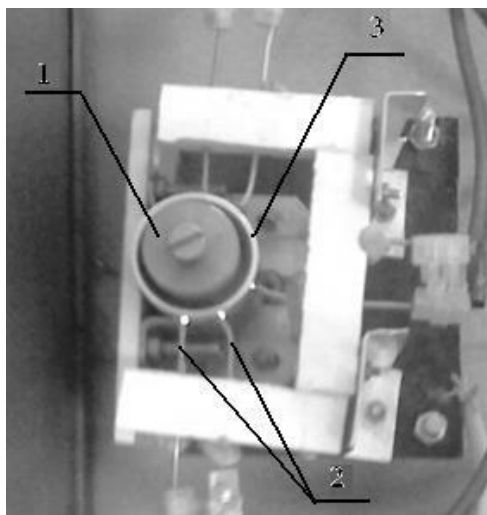


Рисунок 2.2 - Пристосування для іскрового зміцнення зразків

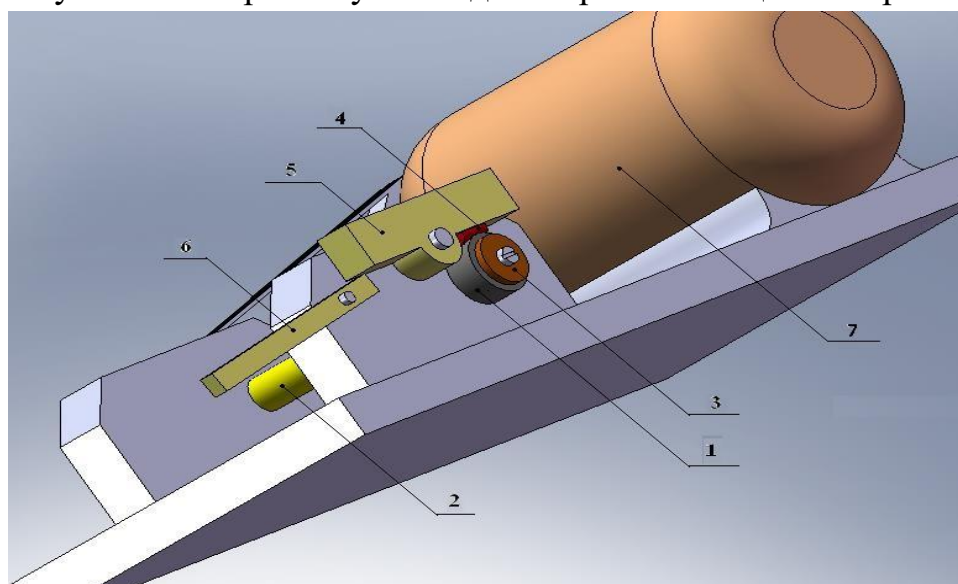


Рисунок 2.3 - Машина тертя:

1 - зразок, 2 - вал, 3 - шайба, 4 - індентор, 5 - обойма кріплення індентора, 6 - важіль навантаження, 7 – електродвигун.

Маса вантажу – 19 кг. Частота обертів валу машини тертя – 352 хв-1. Час випробування 10 хвилин. У ролі мастила використовувалося напівсинтетичне моторне масло 10W-40. Індентор діаметром 8 мм був виготовлений із сплаву ШХ-15 за ГОСТ 3722-81.

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

#### 2.4 Результати експерименту

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  $52,79 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/с, тоді як

зразка без покриття швидкість зношування дорівнює  $1369,71 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/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].

Таблиця 2.3 Результати експериментів щодо визначення швидкості зношування

Зразок	Ширина канавки <i>b</i> , мм	Знос <i>I</i> , мм <sup>3</sup>	Швидкість зношування <i>v</i> мм <sup>3</sup> /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 ІЗ	0,71	0,82182828	$1369,71 \cdot 10^{-6}$

На Рисунку 2.4 наведено графіки залежності швидкості зношування *v* від ємності конденсаторів *C* та міжелектродного зазору *d* при індуктивності *L* рівної

100 Гн (а) та 200 Гн (б). Аналіз виразу 2.3 показує, що швидкість зношування зростає зі збільшенням ємності та міжелектродного зазору, що може бути пов'язано, по-перше, зі зменшенням товщини та зростанням шорсткості УС, що узгоджується з результатами однофакторних експериментів. По-друге, зі збільшенням міжелектродного зазору, збільшується площа ділянки поверхні зразка, яку впливають іскрові розряди, тобто. зменшується фактичний час обробки одиниці поверхні. Індуктивність незначно впливає на величину досліджуваного параметра. Таким чином, виходячи з отриманих результатів, а також доцільності та технічних обмежень, в якості оптимального обраний технологічний режим іскрового зміцнення, який визначається наступними параметрами: ємність блоку конденсаторів - 0,22 мкФ, індуктивність *L* - 100 Гн, міжелектродний зазор *d* - 0,5. При збільшенні міжелектродного проміжку необхідно збільшення загального часу процесу обробки.

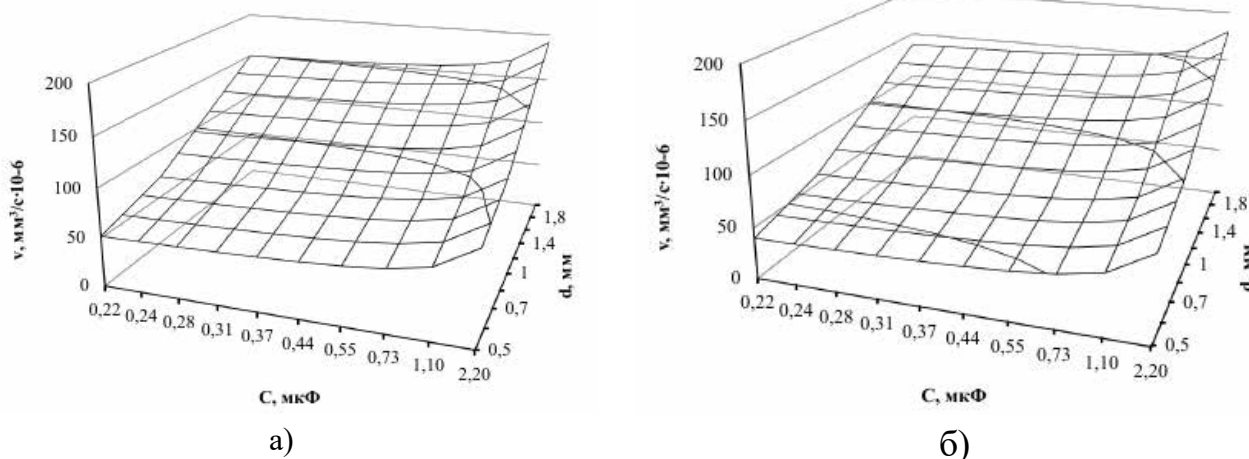


Рисунок 2.4 - Графік залежності швидкості зношування  $v$  від ємності конденсаторів  $C$  та міжелектродного зазору  $d$  при індуктивності  $L$  дорівнює 100 Гн (а) та 200 Гн (б).

## 2.5 Вплив іскрового зміцнення та мікродугового оксидування на коефіцієнт тертя

### 2.5.1 Методика дослідження

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 ІЗ, 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  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  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. В ході випробувань тертя відбувається по кільцю з певними геометричними розмірами, доцільно обробляти тільки цю область. Технологічний режим обробки ІЗ 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.

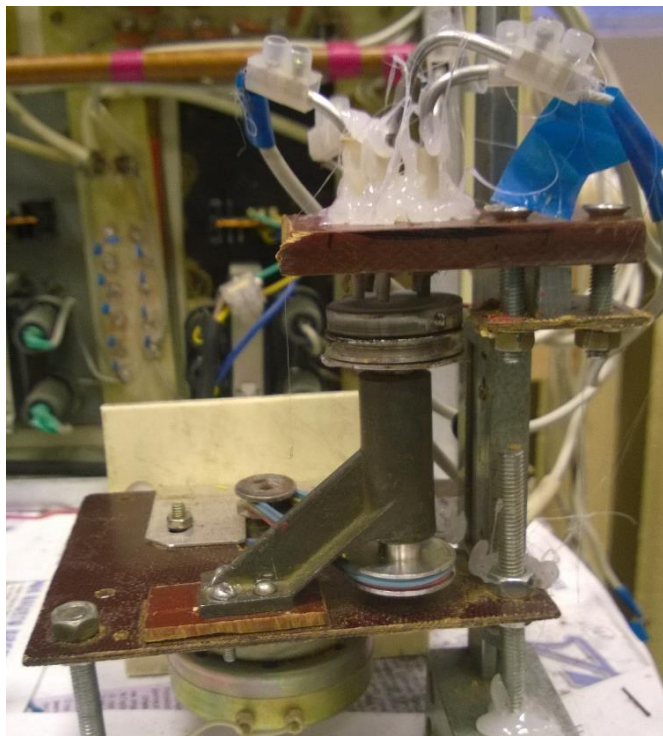


Рисунок 2.5 - Пристосування для іскрового зміцнення зразків

Випробування проводили на високотемпературному трибометрі фірми Nanovea (Рисунок 2.6). Він дозволяє оцінювати трибологічні властивості поверхні та покриттів, у широкому температурному інтервалі в різних середовищах та режимах мастила. Коефіцієнт тертя визначається під час тесту шляхом вимірювання прогину еластичного важеля. Зношування досліджуваного зразка здійснюється шляхом впливу нерухомого індентора на зразок, що обертається. Так само в результаті експерименту визначається масове зношування зразка та індентора, що дозволяє оцінити інтенсивність зношування.

Режим випробувань визначався такими параметрами:

- режим тертя: сухе тертя;
- навантаження: 5 Н;
- максимальний радіус випробування: 6 мм;
- швидкість обертання диска: 4000 мм/хв;
- тривалість: 60 хв;
- контр-тіло: кулька ШХ15 радіусом 3 мм.

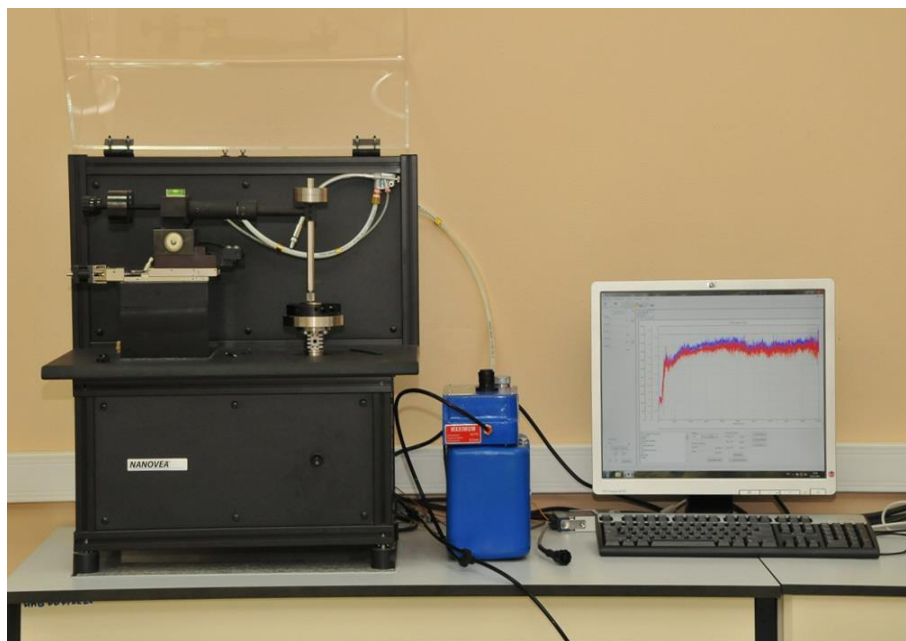


Рисунок 2.6 - Високотемпературний трибометр Nanovea

### 2.5.2 Результати експерименту

На рис. 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 контртіл, по шорсткості поверхні зразків і товщині покриття, а на Рис. 2.9 наведено підсумкові значення коефіцієнтів тертя.



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

Аналіз отриманих результатів показує, що зносу зразків з покриттям і для зразка із сталі 40Х за цих умов випробувань не спостерігається. Масове зношення зразка зі сплаву АК4-1 без покриття склало 0,004 м. Зношення контртіла при випробуваннях не спостерігався. Отримані коефіцієнти тертя для ВУ і МДО-покриття близькі і незначно перевищують значення сталі 40Х:  $0,85 \pm 0,18$ ;  $0,79 \pm 0,13$ ;  $0,72 \pm 0,1$  відповідно. Отримані результати для МДО покриття за своїми значеннями близькі до даних, наведених у відомих дослідженнях [79-84], де показано, що коефіцієнт тертя без мастильного матеріалу становить 0,45...0,8.

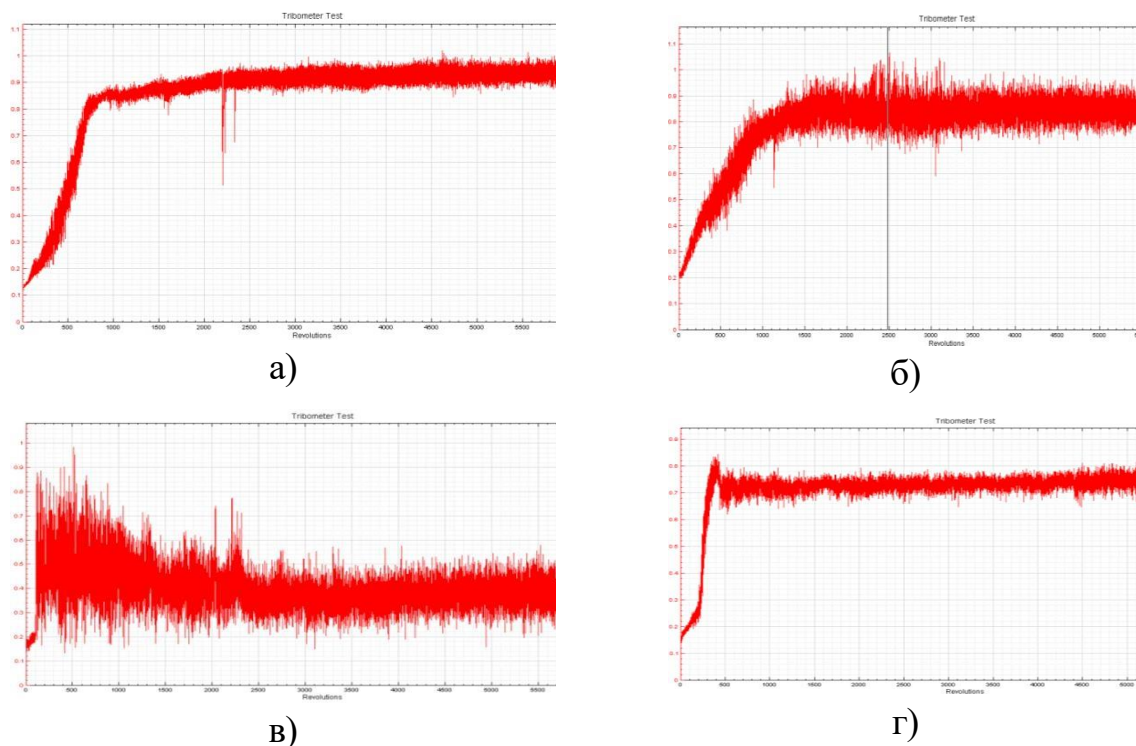


Рисунок 2.8 - Зміни коефіцієнта тертя у процесі випробувань:  
 а) з ІЗ-покриттям; б) із МДО-покриттям; в) без покриття; г) із сталі  
 40Х.

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
ІЗ	$1,6 \pm 0,2$	0	0	$30 \pm 3$	$0,85 \pm 0,18$
МДО	$1,3 \pm 0,2$	0	0	$118 \pm 3$	$0,79 \pm 0,13$
АК4-1	$1,5 \pm 0,2$	0	0,004	-	$0,40 \pm 0,08$
Сталь 40Х	$1,2 \pm 0,2$	0	0	-	$0,72 \pm 0,1$

## 2.6 Висновки

1. Зносостійкість поверхні, що формується іскровим зміцненням, визначена на машині тертя і характеризується швидкістю зношування, збільшується в 10...26 разів у порівнянні з вихідним алюмінієвим сплавом. Головними технологічними факторами, що визначають зносостійкість покриття, є ємність блоку конденсаторів і величина зазору між електродом і поверхнею, що обробляється, що зумовлюють енергію іскрового розряду, що впливає на оброблювану поверхню.

2. Трибологічні властивості поверхонь, що формуються іскровим зміцненням та мікродуговим оксидуванням, що характеризуються коефіцієнтом тертя в умовах сухого тертя, практично ідентичні.

3. Іскрове зміцнення дозволяє збільшити мікротвердість поверхні в 2-5 разів відносно вихідного сплаву алюмінію. Основними факторами, що впливають на мікротвердість сформованого покриття є величина зазору між електродом і оброблюваною поверхнею і ємність блоку конденсаторів.

4. Іскрове зміцнення не чинить негативного впливу на межу міцності алюмінієвих сплавів.

## РОЗДІЛ 3. МОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ

### 3.1 Опис експериментального двигуна

Як об'єкт дослідження для розрахунково-експериментальних робіт було обрано малорозмірний авіамодельний двигун ASPFS80 AR (рис. 3.1). Досвідчений зразок представляє собою чотиритактний одноциліндровий карбюраторний двигун робочим об'ємом 12,8 см<sup>3</sup>, з верхнім розташуванням клапанів, зовнішнім сумішоутворенням, примусовим займанням від калільної свічки. Характеристики базового двигуна представлені Таблиці 3.1. Виробником рекомендується застосовувати спеціальні авіамодельні палива, до складу яких входять метиловий спирт, нітрометан (CH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub>) та синтетичне. олія. У період обкатки двигуна використовується паливо, містить не більше 10% нітрометану і не менше 18% олії. Надалі паливо повинне містити не більше 15% нітрометану і не менше 16% олії.

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 маслоснімних 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 проводяться в закритому приміщенні лабораторії, застосування рекомендованого виробником двигуна палива в умовах стендових випробувань становить небезпеку для здоров'я.

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 обсяг:	12,8 см <sup>3</sup>
Число кілець на одному поршні: компресійних маслоснімних	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
Габаритно-масові характеристики:	
висота, мм	0
ширина, мм довжина, мм	0
суха маса, кг	0,63
Система енергозабезпечення	зовнішнє джерело живлення
Система запуску:	зовнішній електростартер
Система охолодження:	повітряна



Рисунок 3.1 - Зовнішній вигляд двигуна ASPFS80 AR

Таблиця 3.2 Властивості палив

Показник	Паливо		
	Метанол	Етанол	Бензин
Октанове число (RON)	156	132	91-99
Питома теплота випаровування, МДж/кг	0,36	0,92	1,2
Найнижча теплота згоряння, МДж/кг	19,9	21,2	45,5
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	790	790	750
В'язкість, сП, при 25 С	0,544	1,074	0,52
ГДК, мг/м <sup>3</sup>	5	1000	300

### 3.2 Випробувальний стенд

Стенд для проведення моторних випробувань показаний на рис. 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 станду.

Двигун кріпиться до двох поздовжніх балок 8 відповідно до вимог виробника. Регулятор 3 дозволяє змінювати та фіксувати положення паливної голки карбюратора в діапазоні  $0...720^{\circ}$  з кроком  $1^{\circ}$ . Ручка управління положенням дросельної заслінки 4 забезпечує плавну зміну кута відкриття дросельної заслінки (УОДЗ) в діапазоні  $0...100\%$ , а також фіксацію положеннях, 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  $55-60^{\circ}\text{C}$ , що пов'язано з високою питомою теплотою випаровування етилового спирту; звуження при встановленому рекомендованому гвинті діапазону робочих частот обертання до величин  $4500-7000 \text{ хв}^{-1}$ , діапазону УОДЗ до  $40-75\%$ ; нестабільність роботи в перехідних режимах.

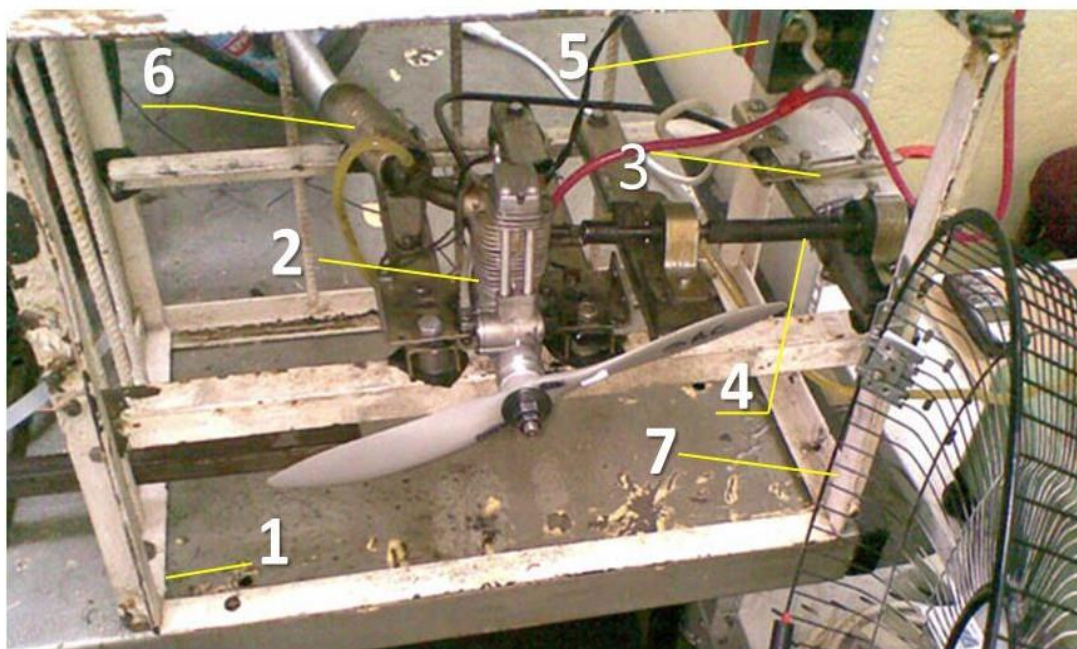


Рисунок 3.2 - Випробувальний стенд: 1 - рама, 2 - двигун, 3 - управління дроселем, 4 - управління паливним жиклером, 5 - система запалювання, 6 - система відведення вихлопних газів, 7 - ґрати гвинта

Розроблена система запалювання забезпечує нагрівання гартальної свічки як при пуску, так і під час роботи двигуна в процесі випробувань. Необхідні значення сили струму на свічці підібрано експериментальним шляхом.

Для вимірювання температури застосовуються хромель-алюмелеві термопари, підключені до двоканального вимірювача ОВЕН ТРМ200-Щ2. Термопара встановлюється на головці циліндра. Контроль значень температури ведеться екраном приладу.

Паливний бак встановлений на електронних вагах VigorHX-8205, що дозволяє вимірювати масову витрату палива. Один із виходів паливного бака з'єднаний з карбюратором двигуна, а другий – з глушником, тим самим у процесі роботи створюється надлишковий тиск у баку.

Як навантаження при випробуваннях використовувалися дволопатеві повітряні гвинти фіксованого кроку з розмірами 12x7, 13x7, 14x10, 15x10 дюймів. 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 стенда алюмінієвої ГЦ із МДО-покриттям.
3. Випробувань на зносостійкість в умовах моторного стенда алюмінієвої ГЦ із ІЗ-покриттям.
4. Експериментального визначення гвинтових характеристик застосовуваних повітряних гвинтів та визначення ефективної потужності двигуна.
5. Експериментального визначення механічних втрат ДВС досліджуваними ГЦ.

#### **3.3.1 Методика формування покриття на робочій поверхні гільзи циліндра із сплаву алюмінію методом мікродугового оксидування**

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 електролітичної ванни. Уздовж поздовжньої осі ГЦ встановлюється електрод 5 з нержавіючої сталі. Через штуцер 1 і розсікач 6 обсяг ванни подається електроліт. Шайба 2 необхідна вирівнювання потоків рідини. Електроліт через отвори у верхній заглушці видаляється з ванни та повертається в теплообмінник. Завдяки потоку електроліту в міжелектродному просторі вдалося організувати видалення газових бульбашок із зони, в якій відбувається процес формування покриття.

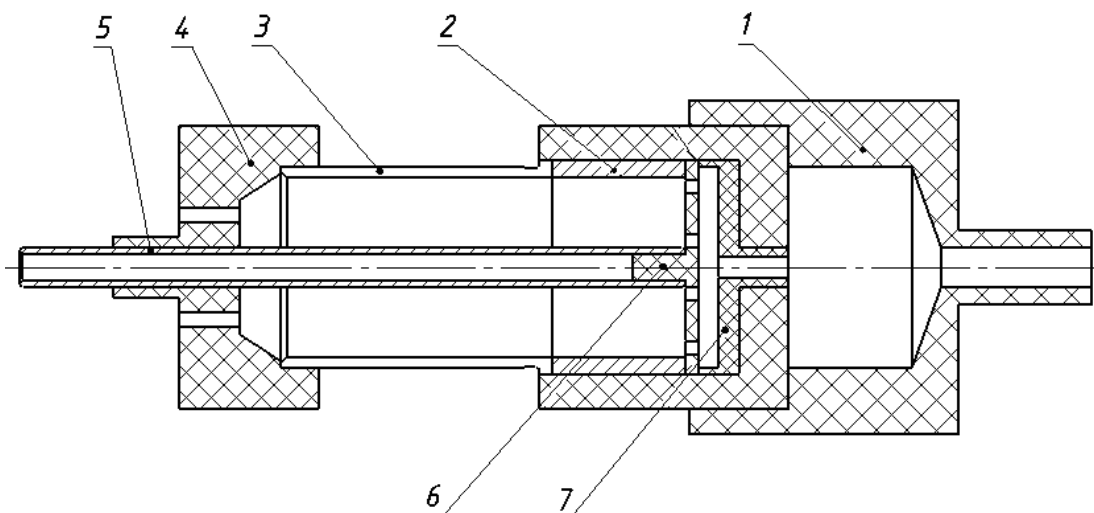


Рисунок 3.3 - Пристосування для нанесення МДО-шару на гільзу циліндра: 1-штуцер; 2-шайба; 3-гільза; 4-заклушка верхня; 5-електрод; 6-розсікач; 7 – заглушка нижня.

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  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  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 (муліт), він був видалений механічно на верстаті токарному за допомогою алмазної пасту і спеціальних пристосувань. Товщина віддаленого пухкого шару становила  $\sim 15\text{...}20$  мкм.

### 3.3.2 Методика формування покриття на робочій поверхні гільзи циліндра із сплаву алюмінію методом іскрового зміцнення

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 джерела живлення, може керувати 10 установками одночасно. При цьому одночасно включено лише одну установку.

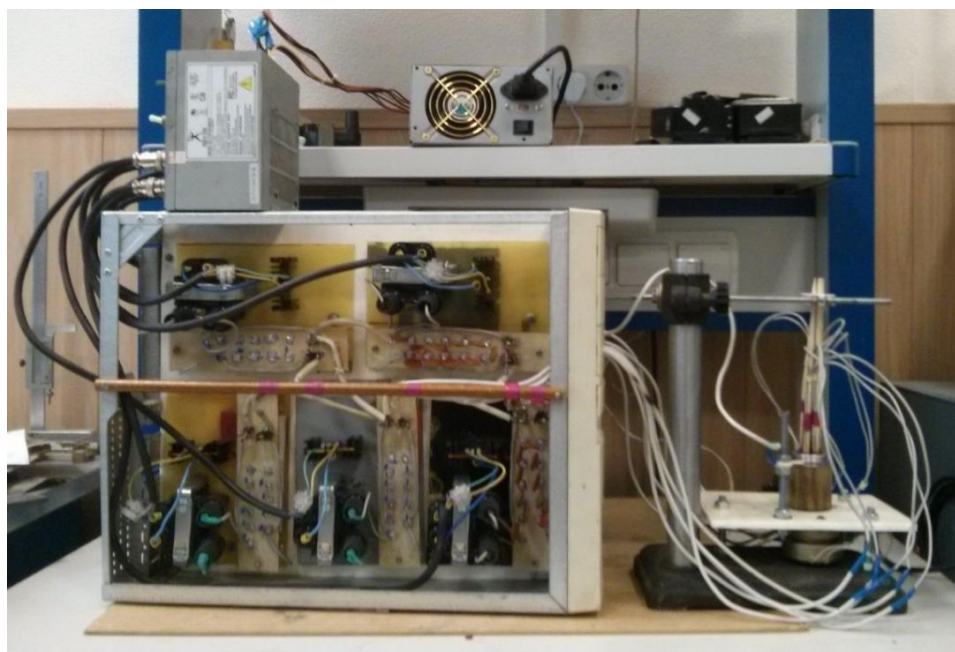


Рисунок 3.4 - Іскрова установка на 10 електродів та пристосування для зміцнення поверхні гільзи циліндра

Генератор, що задає, генерує імпульси з регульованою частотою. Далі імпульси надходять на вхід десяткового лічильника, який з кожним імпульсом перемикає свої виходи. Виходи лічильника підключені до іскрових установок через комутатори, ролі яких виступають транзистори. Паралельно з першою іскровою установкою встановлено лічильник, який рахує кількість іскрових розрядів. Високовольтна частина іскрової установки залишається аналогічною до зазначеної на Рис. 1.25.

Для обробки всієї внутрішньої поверхні ГЦ було розроблено спеціальний пристрій, схематично зображений на малюнку 3.5. Експериментальна ГЦ 1 встановлюється в патрон 2 з діелектричного матеріалу, який обертається за допомогою електричного мотора через вал 3. На п'ять стрижнів 4 одягаються ролики 5 і шайба 7 з діелектричного матеріалу, а між ними електроди 6. Таким чином сумарно для обробки експериментальної ГЦ мм стояння електрода мм Міжелектродний 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  $\sim 2$  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 точки зору зносостійкості, так як при такій схемі нанесення покриття виникають значні напруги на межі основного м'якого металу і 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.

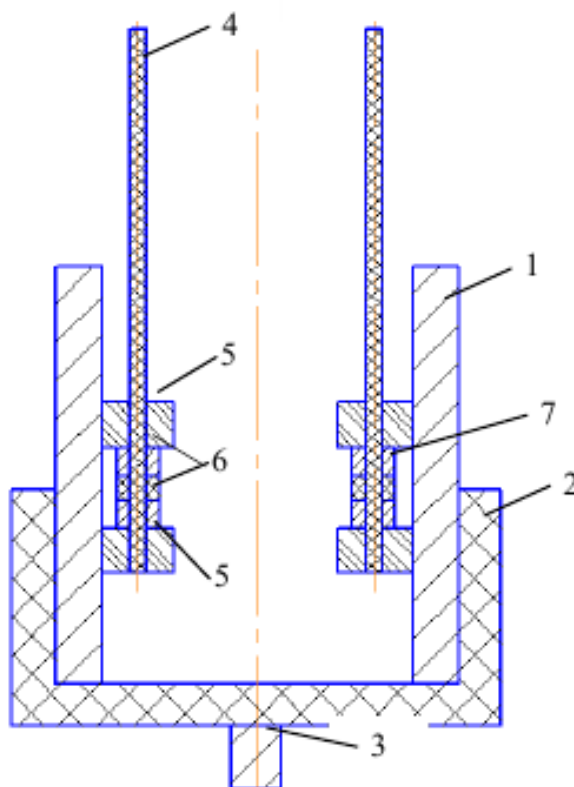


Рисунок 3.5 - Пристосування для модифікації методом ІЗ внутрішньої поверхні ГЦ: 1 – гільза циліндра, що обробляється, 2 – патрон, 3 – вал, 4 – стрижень, 5 – ролик, 6 – електрод, 7 – шайба.

### 3.3.3 Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи

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 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 Малюнку 3.6, поверхні поршня – на Малюнку 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 згорання. Для цього застосовують бензин, водний розчин гідроксиду амонію, господарське мило, етиловий спирт. Результати вимірювань заносяться до протоколу експерименту.

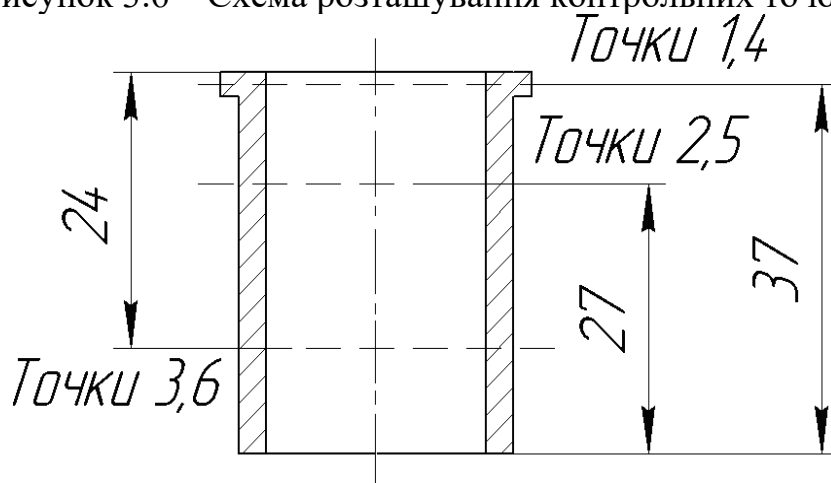
Таблиця 3.3 Зміна УОДЗ протягом одного запуску ДВЗ

Етап	УОДЗ, %	Час, с/к
1	25	30
2	50	60
3	100	60
4	25	30
5	75	120
6	50	60
7	25	30
8	100	120
9	50	60
10	25	60

Таблиця 3.4 Зміна умов роботи ДВЗ залежно від часу напрацювання

Час, год	Склад палива			Розмір гвинта
	Етиловий спирт, %	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.

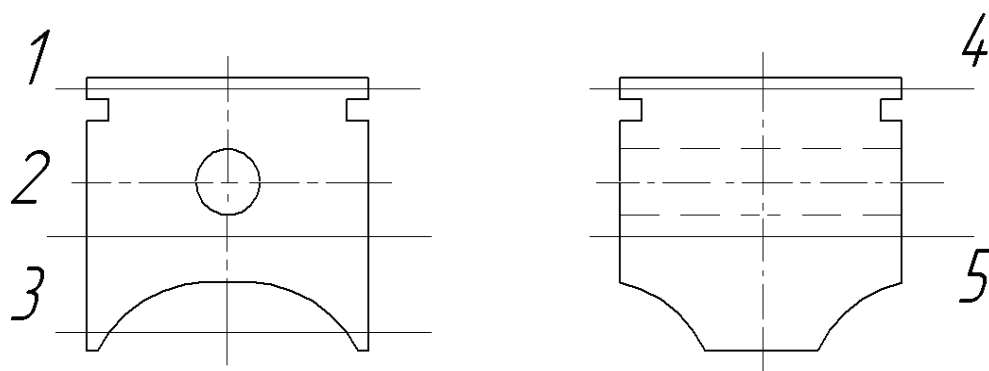


Рисунок 3.7 – Схема розташування контрольних точок на поверхні поршня.

### 3.3.4 Методика дослідження впливу іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на механічні втрати двигуна

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 повертався за допомогою стенду. Діапазон частоти обертання  $3000 \dots 6000 \text{ хв}^{-1}$ , крок –  $1000 \text{ хв}^{-1}$ . 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  $3000 \text{ хв}^{-1}$ , тривалість 5 хв.
3. Вимірювання досліджуваних показників. Частота обертання  $3000 \text{ хв}^{-1}$ , тривалість виміру 30 с.
4. Збільшення частоти обертання на  $1000 \text{ хв}^{-1}$ . Вимірювання досліджуваних параметрів. Тривалість виміру 30 с.
5. Повторення кроку 4 до тих пір, поки частота обертання не досягне  $6000 \text{ хв}^{-1}$ .



Рисунок 3.8 - Двигун на стенді СТМ-3000

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.

### 3.3.5 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 досліджуваній 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.
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.

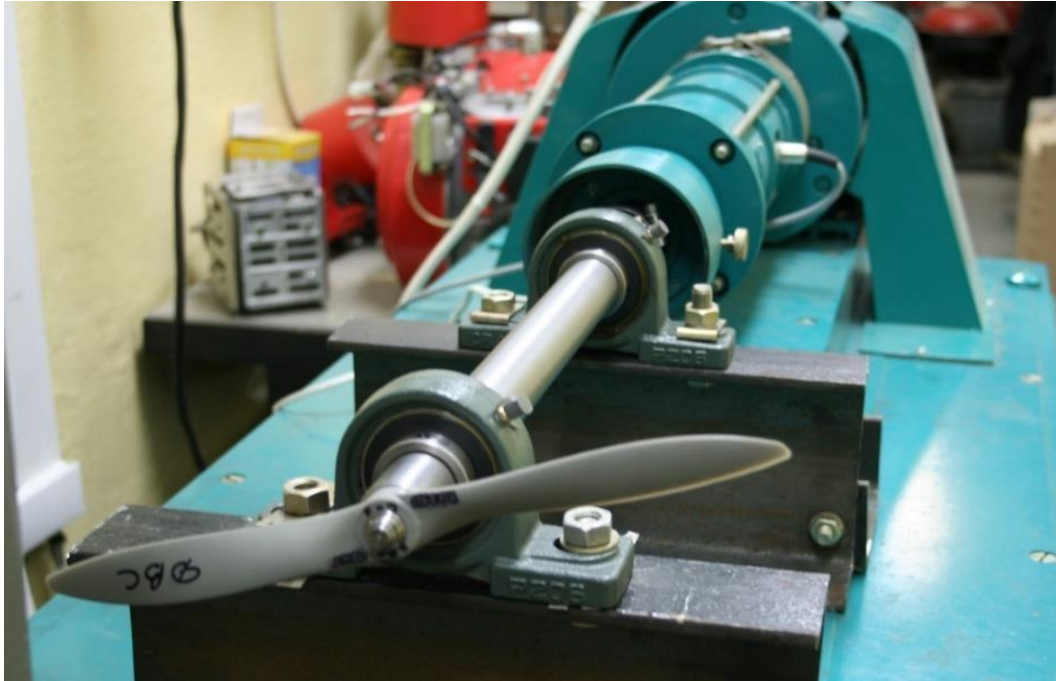


Рисунок 3.9 - Повітряний гвинт на стенді СТМ-3000

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 термopарою типу ТХА, встановленій у кришці циліндра, за допомогою вимірювача ОВЕН ТРМ-200.

### 3.4 Результати досліджень

#### 3.4.1 Дослідження зносостійкості деталей циліндро-поршневої 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;
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 напрацюван ня, 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 напрацюван ня, 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

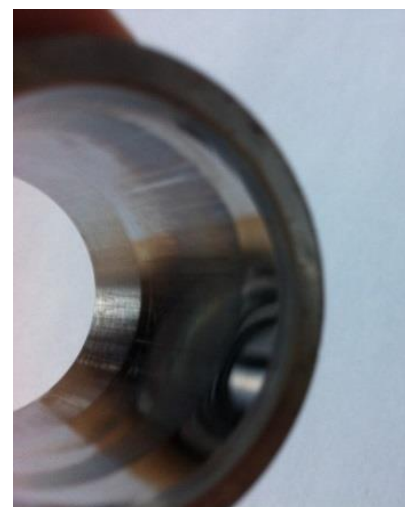


Рисунок 3.10 – Штатна гільза циліндра після випробувань



Рисунок 3.11 – Штатний поршень після випробувань

### 3.4.2 Дослідження ефективних показників базового двигуна

Відповідно до методики, наведеної в розділі 3.3.5, отримано значення частоти обертання КВ, витрати палива та температури на головці циліндра для штатної комплектації досліджуваного двигуна. Вимірювання проводилися кожного повітряного гвинта. У Таблиці 3.16 наведено результати вимірювання максимальної частоти обертання валу двигуна при 100% УОДЗ під час роботи на різні повітряні гвинти після обкатки двигуна. У Таблицях 3.17 – 3.20 наведено результати, отримані після 50,5 годин напрацювання двигуна.

Таблиця 3.16. Результати випробувань після обкатки

Повітряний гвинт	Частота обертання, мін-1
15x10	6200
14x10	6650
13x7	9150
12x7	9650

Таблиця 3.17. Результати випробувань (гвинт 12x7)

УОДЗ, %	Час, хв	Частота обертання КВ, хв-1	Витрата палива, г	Температура, °С
25	5	7150	19	118,7
50	3	8270	17	123,2
75	3	9040	25	163,1
100	3	9450	31	164,3

Таблиця 3.18 Результати випробувань (гвинт 13x7)

УОДЗ, %	Час, хв	Частота обертання КВ, хв <sup>-1</sup>	Витрата палива, г	Температура, °С
25	5	6060	12	115,4
50	3	7040	16	117,4
75	3	8310	20	127,1
100	1:45	8790	21	128,9

Таблиця 3.19 Результати випробувань (гвинт 14x10)

УОДЗ, %	Час, хв	Частота обертання КВ, хв <sup>-1</sup>	Витрата палива, г	Температура, °С
25	5	4860	12	119
50	3	5320	13	115,1
75	3	5490	14	138
100	3	5600	16	137

Таблиця 3.20 Результати випробувань (гвинт 15x10)

УОДЗ, %	Час, хв	Частота обертання КВ, хв <sup>-1</sup>	Витрата палива, г	Температура, °С
25	5	4440	20	106,6
50	3	5100	18	108,9
75	1:46	4850	9	130,5
100	3	-	-	-

### 3.5 Аналіз результатів досліджень

#### 3.5.1 Вплив іскрового зміцнення та мікродугового оксидування робочої поверхні гільзи циліндра на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи

Для аналізу впливу іскрового зміцнення та МДО на зносостійкість деталей гільзи циліндра на основі результатів, наведених у розділах 3.4.1 – 3.4.3, побудовано графіки, що описують динаміку лінійного зносу гільзи циліндра в контрольних точках (Рисунок 3.13) і масового. Контрольні точки 1 і 4 знаходяться в зоні ВМТ, де відбувається перекладання поршня та діють

максимальні температура та тиск. Зношування в точці 1 склав: для штатної ГЦ 0,089 мм, для ГЦ з МДО 0,023 мм, для ГЦ з ВП 0,038 мм [96 - 98]. Таким чином, лінійне зношування алюмінієвої ГЦ з МДО-покриттям в зоні ВМТ в 3,87 рази менше, ніж знос штатної ГЦ із сталі марки 40Х. Зношування ГЦ з ІЗ-покриттям у 2,34 рази нижчим, ніж штатною ГЦ.

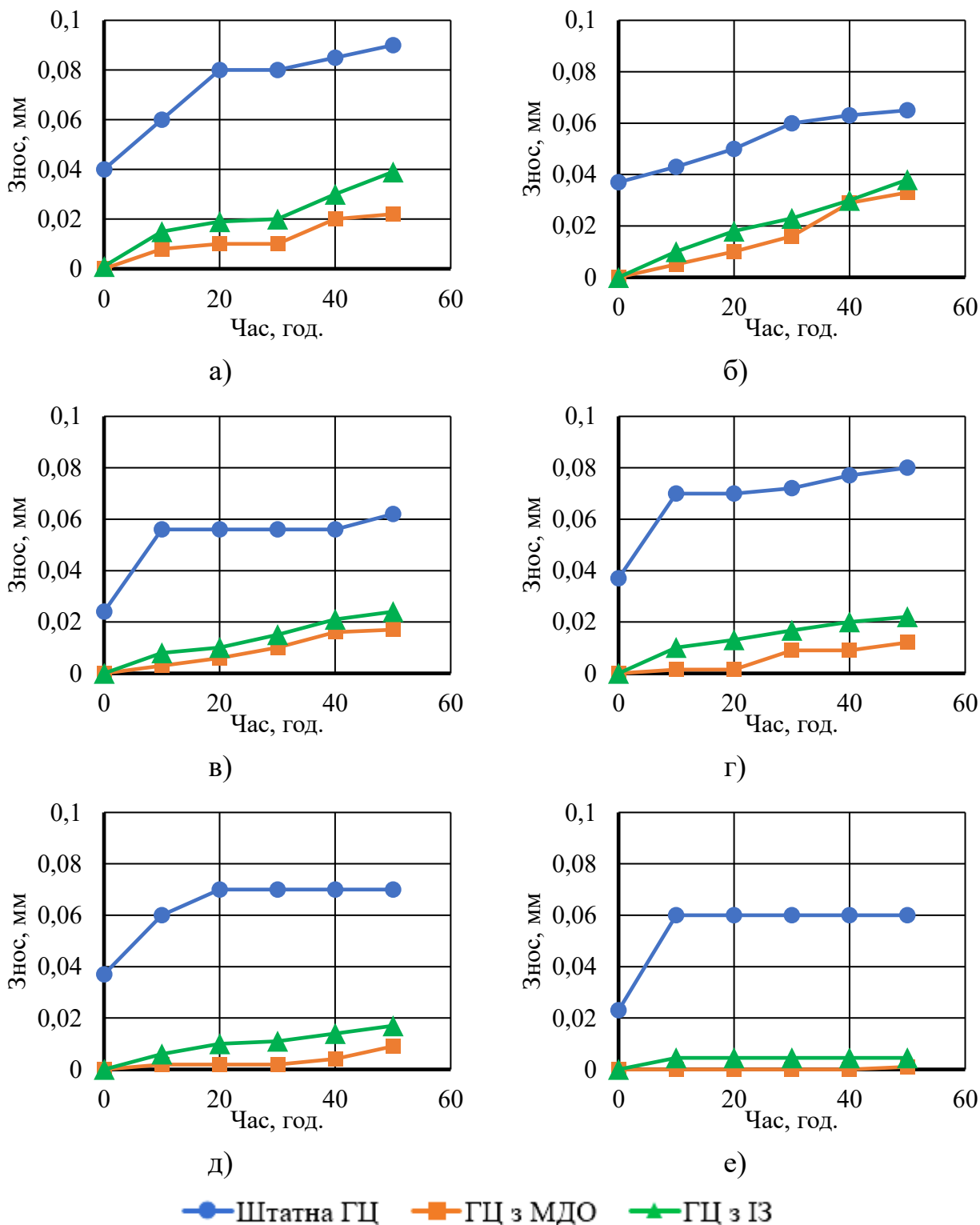


Рисунок 3.16 -Лінійний знос досліджуваних ГЦ за часом:

а) в точці 1, б) в точці 2, в) в точці 3, г) в точці 4, д) в точці 5, е) в точці 6.

Характер кривої динаміки зносу інших контрольних точок ідентичний і показує, що застосування іскрового зміцнення і мікродугового оксидування дозволяє підвищити зносостійкість робочої поверхні гільзи циліндра. Даний висновок підтверджується динамікою масового зносу досліджуваних ГЦ (Рисунок 3.17), який показує, що зносостійкість ГЦ з МДО та ІЗ-покриттям у 2,05 та 1,63 рази вище, ніж у штатної. Випробування показали, що покриття, яке формується при іскровому зміцненні, працює в умовах, характерних для ЦПГ ДВЗ навіть у разі несплошності покриття.

Зміна властивостей робочої поверхні гільзи циліндра, зокрема мікротвердості, призводить до зміни умов тертя в сполученнях «гільза циліндра – поршень». На рис. 3.16 наведено динаміку лінійного та масового зносу поршня.

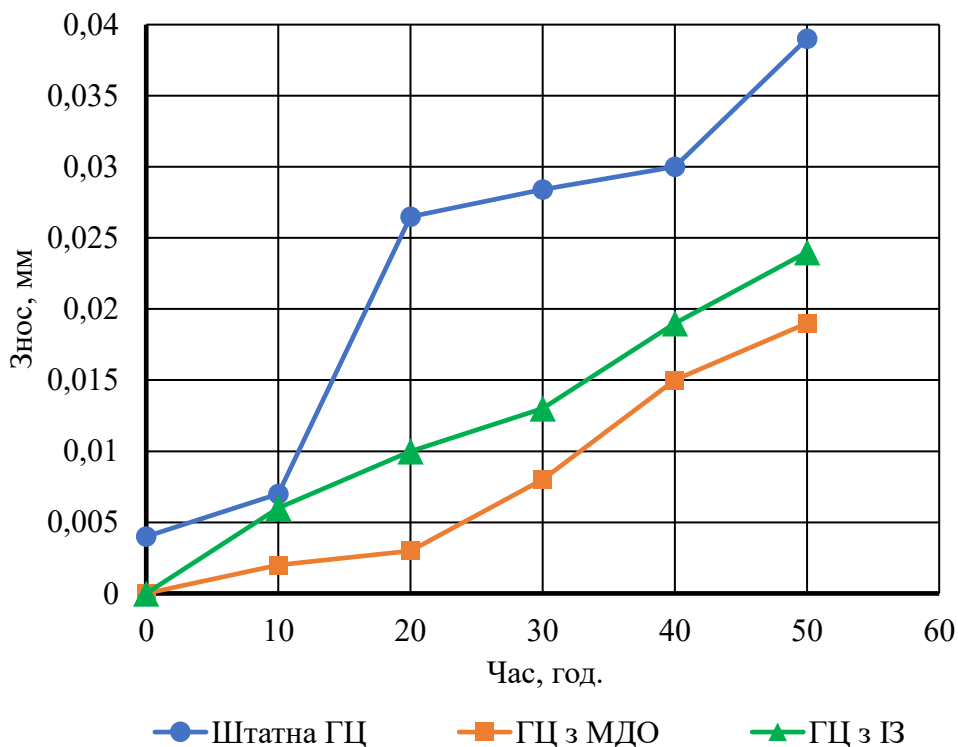


Рисунок 3.17 - Масовий знос досліджуваних ГЦ за часом напрацювання

Знос гільз з МДО-покриттям нижчий в  $\sim 2$  рази порівняно зі штатними, що пов'язано з високою мікротвердістю покриття і узгоджується з відомими дослідженнями зносостійкості деталей ЦПГ [14; 93]. Отримані результати щодо зносу поршнів корелюють з даними відомих досліджень [2].

**3.5.2 Прогнозування ресурсу двигуна, оснащеного гільзами циліндрів з іскровим зміцненням і мікродуговим оксидуванням робочої поверхні**

З метою прогнозування ресурсу двигуна при роботі з експериментальними гільзами циліндрів отримано рівняння регресії, що описують залежність швидкості зношування робочої поверхні гільзи циліндра від частоти обертання  $n$  і середнього ефективного тиску  $p_e$ . На підставі результатів, наведених у розділі 3.4, були підготовлені вихідні дані для визначення рівнянь регресії (Таблиці 3.32 – 3.33). Частота обертання колінчастого вала двигуна на різних етапах випробувань на знос відома. Використовуючи характеристики повітряних гвинтів (вираз 3.1), визначалися значення ефективної потужності  $N_e$  при зазначених частотах обертання  $n$ , далі, значення середнього ефективного тиску  $p_e$  :

$$N_e = \frac{M_e \cdot n \cdot \pi}{30000}, \quad (3.2)$$

$$p_e = \frac{30 \cdot \tau \cdot N_e}{V_h \cdot i \cdot n}, \quad (3.3)$$

де  $M_e$  – ефективний момент, що визначається за характеристикою повітряного гвинта для даної частоти обертання  $n$ ,  $\tau$  – тактність двигуна,  $V_h$  – робочий об'єм двигуна,  $i$  – кількість циліндрів. Відгуками рівнянь регресії виступають швидкості зношування  $v_L$  в перерізі 1 (Рисунок 3.6), в якому спостерігалися максимальні значення лінійного зносу, і швидкість зношування  $v_M$ , що характеризує масовий знос гільзи циліндра. Далі, за допомогою програми DataFit 9 для кожної досліджуваної гільзи циліндра визначалися відповідні рівняння регресії. Критерієм відбору виду рівнянь регресії була залишкова сума квадратів (residual sum of squares), яка показує різницю між вихідними даними і значеннями, обчисленими за рівнянням регресії.

Таблиця 3.32 Вихідні дані для отримання рівняння регресії швидкості зношування гільзи циліндра з МДО-покриттям

Повітряний гвинт	Частота обертання $n$ при 100%, $\text{хв}^{-1}$	Середній ефективний тиск $p_e$ , МПа	Швидкість зношування $v_L$ , мм/ГОД	Швидкість зношування $v_M$ , г/ГОД
13x7	9150	0,698	0,0008	0,0001
15x10	6200	0,796	0,0002	0,0002
14x10	6650	0,761	0,0001	0,0005
12x7	9650	0,617	0,0008	0,0007

Таблиця 3.33 Вихідні дані для отримання рівняння регресії швидкості зношування гільзи циліндра з ІЗ-покриттям

Повітряний гвинт	Частота обертання $n$ при 100%, $\text{хв}^{-1}$	Середній ефективний тиск $p_e$ , МПа	Швидкість зношування $v_L$ , мм/год	Швидкість зношування $v_M$ , г/год
13x7	9150	0,698	0,0008	0,0001
15x10	6200	0,796	0,0002	0,0002
14x10	6650	0,761	0,0001	0,0005
12x7	9650	0,617	0,0008	0,0007

В результаті для гільзи циліндра з іскровим зміцненням робочої поверхні були отримані наступні рівняння регресії:

$$v_L = 6,201 \cdot 10^{-6} \cdot 1,001^n \cdot p_e^{7,799} \quad (3.4)$$

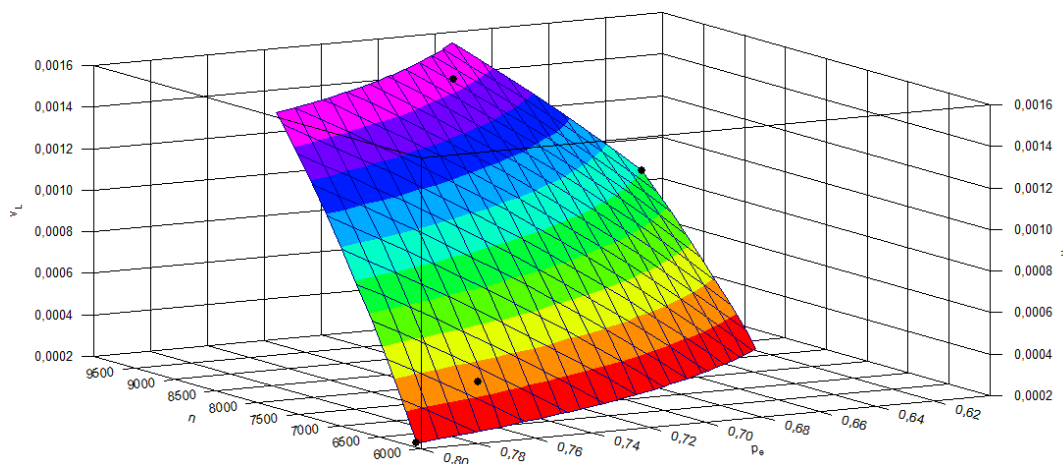
$$v_M = 1,486 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0001^n \cdot p_e^{-0,838} \quad (3.5)$$

і для гільзи циліндра з МДО-покриттям:

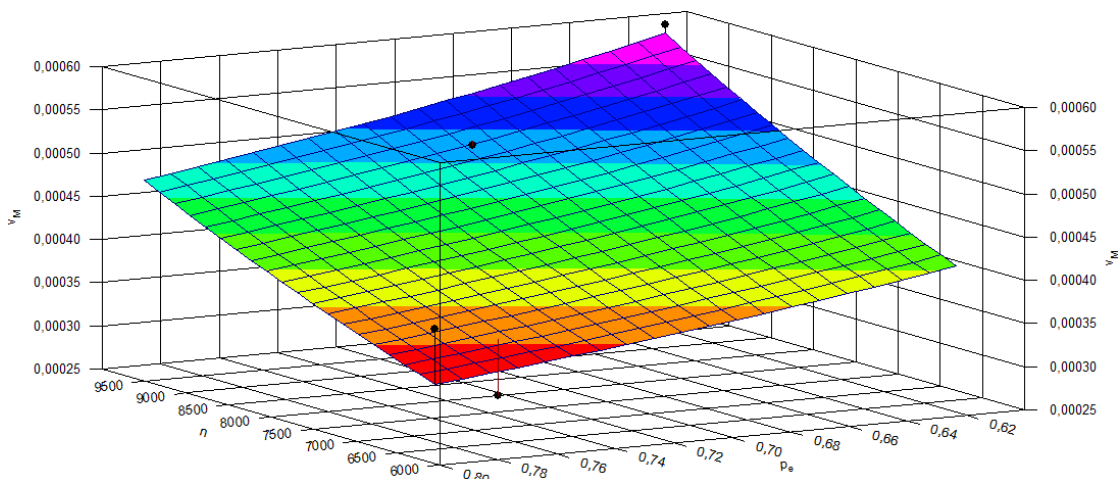
$$v_L = 2,614 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0007^n \cdot p_e^{3,107} \quad (3.6)$$

$$v_M = 0,487 \cdot 0,9973^n \cdot p_e^{-41,149} \quad (3.7)$$

На рисунках 3.26 – 3.27 наведено графічні зображення даних рівнянь регресії.

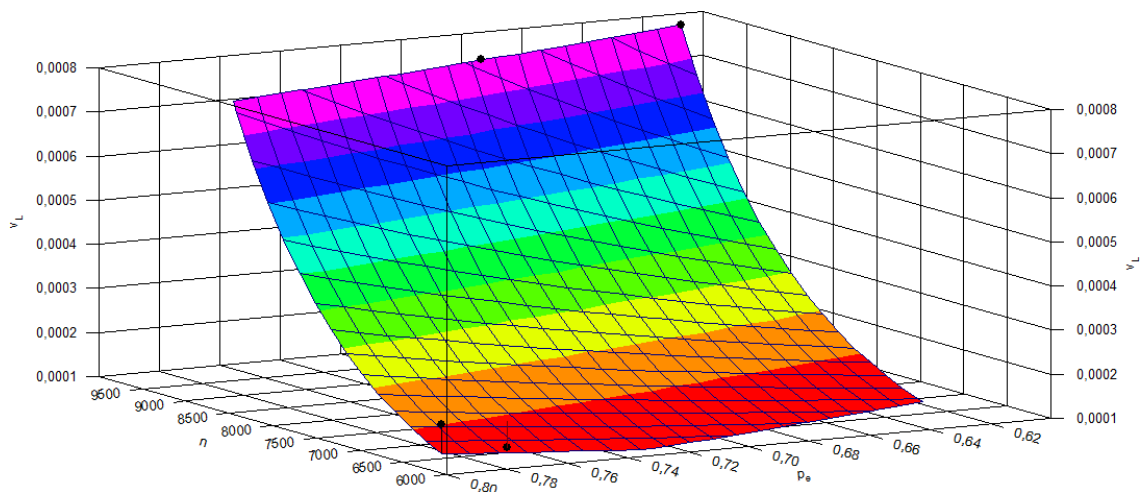


a)

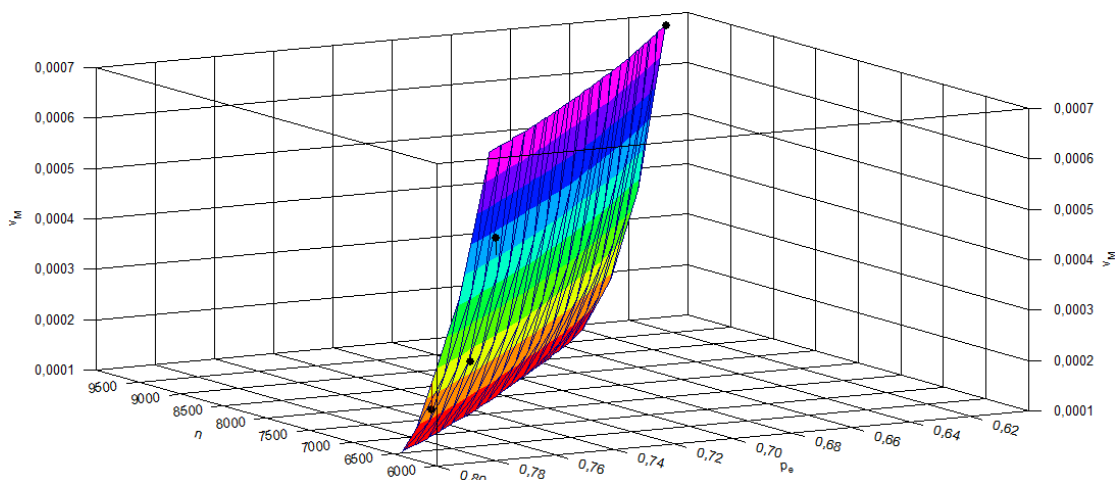


б)

Рисунок 3.26 – Швидкості зношування гільзи циліндра з ІЗ-покриттям  $v_L$  (а) і  $v_M$  (б), обчислені за рівняннями регресії



а)



б)

Рисунок 3.27 – Швидкості зношування гільзи циліндра з МДО-покриттям  $v_L$  (а) і  $v_M$  (б), обчислені за рівняннями регресії

В ході проведених моторних досліджень було встановлено, що двигун в комплектації зі штатною гільзою циліндрів після 50,5 годин напрацювання не зміг вийти на стабільний режим роботи при максимальному навантаженні, що вказує на досягнення граничного зносу гільзи циліндрів. Виходячи з цього, допустимо прийняти величину граничного лінійного зносу гільзи циліндра, що дорівнює 0,09 мм.

На рис. 3.28 (а) показано зміну зносу експериментальних гільз циліндрів при комплектації двигуна рекомендованим повітряним гвинтом розміром 13x7 при частоті обертання 9000 хв<sup>-1</sup> і середньому ефективному тиску 0,677 МПа. Прогнозований ресурс двигуна становить 90 год і 140 год для комплектації гільзою циліндра з ІЗ і МДО покриттям відповідно.

### 3.6 Висновки по розділу

1. Експериментально встановлено вплив іскрового зміцнення та мікродугового окисдування на зносостійкість гільзи циліндра з алюмінієвого сплаву. Показано, що після 50,5 годин напрацювання максимальний лінійний знос у порівнянні зі штатною гільзою знизився в 2,87 і в 2,34 рази для ГЦ з МДО- покриттям і ІЗ-покриттям відповідно. Масовий знос скоротився в 2,05 і 1,63 рази відповідно. Таким чином, зносостійкість алюмінієвої ГЦ з модифікованою робочою поверхнею більш ніж в 1,5 рази вища, ніж у штатної.

2. Встановлено, що масовий знос поршнів відрізняється несуттєво і, переважно, визначається відхиленнями розмірів деталі.

3. Експериментально встановлено вплив іскрового зміцнення і мікродугового окисдування робочої поверхні гільзи циліндра на механічні втрати і ефективну потужність двигуна. Найменше значення механічних втрат в діапазоні частот обертання 3000...6000 хв<sup>-1</sup> отримано на гільзі циліндра з МДО-покриттям. Двигун, оснащений гільзою циліндра з МДО-покриттям, також показав кращі значення ефективної потужності у всьому діапазоні частот обертання (6000...10000 хв<sup>-1</sup>) при роботі по ВСХ, як після обкатки, так і після 50,5 годин напрацювання.

4. У процесі напрацювання ефективна потужність двигуна в комплектації штатною гільзою знизилася на 10...23% у всьому діапазоні частот обертання, у той час як ефективна потужність двигуна, оснащеного гільзою з ІЗ-покриттям, не знизилася, при цьому максимальна потужність зросла на 11...26%, що підтверджує як високу зносостійкість покриття, так і потенціал вдосконалення процесу іскрового зміцнення. Внаслідок істотного зносу, двигун, оснащений штатною гільзою, не зміг вийти на стабільний режим роботи при максимальному навантаженні.

З огляду на те, що результати безмоторних досліджень показують, що

покриття, що формуються при мікродуговому оксидуванні та іскровому зміцненні, мають однакові коефіцієнти тертя, слід очікувати, що для гільзи циліндра з ІЗ-покриттям, при повноцінному доведенні процесу іскрового зміцнення, можуть бути отримані результати, аналогічні для МДО-покриття. Показники гільзи циліндра з ІЗ-покриттям пов'язані зі збільшенням механічних втрат через обробку робочої поверхні горизонтальними смугами

## РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ ДВЗ

### 4.1. Розрахунок економічної ефективності.

Впровадження технології відновлення гільз циліндрів повинен проводитися економістами безпосередньо на тому підприємстві, де ця технологія буде використовуватися. Тоді цей розрахунок дозволяє досить точно виявити економічну ефективність використання технології відновлення в залежності від умов даного підприємства [91,92]

Розрахунок економічної ефективності розроблених технологій розраховується за методикою як при створенні та впровадженні нових технологічних процесів відновлення гільз циліндрів двигунів сільськогосподарської техніки.

Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження розроблених технологій визначається за формулою:

$$E = \left[ \left( (C_1 + E_H K_1) \cdot (P_1 + E_H) / P_2 + E_H \right) - (C_2 + E_H K_2) \right] \cdot A, \quad (4.1)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  - собівартість відновлення за базовим і новою варіанту, грн .;

$E_H = 0,15$  нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

$K_1$  і  $K_2$  - питомі капітальні вкладення на придбання і установку устаткування за базовим і новим варіантом, грн. шт .;

$P_1$  і  $P_2$  - величини зворотні термінам служби деталей відновлених за базовим і новим варіантом;

$A$  - річний обсяг відновлюваних деталей по новому варіанту, шт.

Припустимо, що ремонтне підприємство відновлює деталі сторонньому замовнику і тому за базовий варіант приймаємо ціни нових запасних частин, а за новий варіант відпускні ціни відновлених деталей. При однаковому терміні служби відновлених і нових деталей справедливо вираз:

$$(P_1 + E_H) / (P_2 + E_H) = 1 \quad (4.2)$$

Тоді формула набуде вигляду

$$E = [(C_H \cdot C_2) + E_H (K_1 - K_2)] \cdot A \quad (4.3)$$

За умови, що питомі капітальні вкладення виготовлення нової деталі  $K = 0$ , так як при порівняльній оцінці враховуються тільки додаткові капітальні вкладення формула запишеться у вигляді:

$$E = [(C_H - C_B) - E_H \cdot K] \cdot A, \quad (4.4)$$

Де  $C_H = C_N$  і  $C_B = C_V$  - відповідно вартість (відпускна ціна) нових і відновлених деталей, грн.

$K$  - питомі додаткові капітальні вкладення на виготовлення і установку устаткування.

Питомі додаткові капітальні вкладення на виготовлення і установку технологічного устаткування для відновлення гільз циліндрів визначаються з припущення, що програма відновлення гільз на одному підприємстві складе 2000 шт. в рік, тобто 1...2 двигуна в день. Використовувати розроблену технологію відновлення деталей рекомендується на ремонтних підприємствах, де є маханобробне обладнання (токарні, шліфувальні, розточувальні і хонінгувальні верстати), на ділянці термічної обробки деталей є установка ТВЧ. Тоді додаткові капітальні вкладення необхідні для впровадження технології відновлення деталей укладатимуться у виготовленні установки для гільз циліндрів.

Виготовлення установки відновлення гільз циліндрів для впровадження розробленої технології у виробництво вимагає незначних додаткових капітальних вкладень, так як використовується наявне ремонтно-технологічне обладнання підприємства на якому здійснюється впровадження.

Витрати на виготовлення установки відновлення деталей підраховувалися за формулою

$$C_{ц, кин} = C_K + C_{од} + C_{пд} + C_{ск.н} + C_{зв},$$

де  $C_K$  вартість виготовлення корпусних деталей, грн. .;

$C_{од}$  - витрати на виготовлення оригінальних деталей (матриця, індуктор) грн.;

$C_{пд}$  - ціна великих покупних деталей, виробів, агрегатів за прејскурантом, (гідростанція з гідроциліндром, водяний насос) грн.;

$C_{ск.н}$  - заробітна плата виробничих робітників, зайнятих на складанні, конструкції, грн.;

$C_{зв}$  - загальновиробничі (цехові) накладні витрати на виготовлення конструкції, грн.

Величина витрат на виготовлення установки ТПД відновлення гільз циліндрів становить 80000 грн. Тоді питомі додаткові капітальні вкладення ремонтного підприємства, з урахуванням вище викладеного, розраховані на програму 2000 відновлених гільз в рік, складуть:

$$K = 80000/2000 = 40 \text{ грн. / шт.} \quad (4.6)$$

Повна собівартість відновлення гільзи циліндрів визначається за формулою:

$$C_{п} = ЗП + М + РФ + ІВ + НР, \quad (4.7)$$

де: ЗП - заробітна плата виробничих робітників, зайнятих в процесі відновлення деталей, грн.;

М - Витрати на матеріали, що використовуються при відновленні, грн.;

РФ - повна вартість ремфонд, грн.;

ІВ - Інші витрати, грн.;

НР - накладні витрати, грн.;

Аналіз економічних показників ремонтних підприємств, що відновлюють гільзи циліндрів ДВЗ в матриці, показав, що середня собівартість становить 50 .. .60% від вартості нової гільзи. Середня відпускна ціна відновлених гільз становить 60. ..70%, що в 1,5 рази дешевше нових.

Річний економічний ефект від впровадження технології відновлення гільз циліндрів розраховують за формулою

$$E = [(380-230) + 0,15 \cdot 4] \cdot 2000 = 302000 \text{ грн.} \quad (4.8)$$

Термін окупності додаткових капітальних вкладень на ремонтному підприємстві розраховують за формулою

$$T = C_{ц. кін} / (C_H - C_B) \cdot A \quad (4.9)$$

$$T = 80000 / (380 - 230) \cdot 2000 = 0,27 \text{ року.}$$

Розрахунок економічної ефективності та аналіз економічних показників ремонтних підприємств підтвердив доцільність застосування технології запропонованої в магістерській роботі.

## ВИСНОВОК

Результати виконаного дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Гільзи циліндрів з алюмінієвого сплаву, робочі поверхні яких оброблені методами іскрового зміцнення і мікродугового оксидування, можуть застосовуватися в ДВС. Експериментально встановлено, що після 50,5 годин напрацювання максимальний лінійний знос у порівнянні зі штатною гільзою (сталевою) знизився в 2,87 рази для гільзи циліндра з МДО-покриттям і в 2,34 рази для гільзи циліндра ІЗ-покриттям. Масовий знос знизився в 2,05 разів і 1,63 рази відповідно. Знос поршнів при роботі з циліндрами з МДО-покриттям і ІЗ-покриттям практично ідентичний зносу поршнів при роботі зі сталевою гільзою циліндра.

2. Експериментально визначено вплив режиму іскрового зміцнення на зносостійкість алюмінієвих сплавів. Швидкість зношування ІЗ-покриття до 26 разів нижча, ніж у вихідного матеріалу, мікротвердість поверхні збільшується до 5 разів. Зниження міцності не відбувається. Коефіцієнти тертя поверхонь, що формуються іскровим зміцненням і мікродуговим оксидуванням, практично ідентичні і знаходяться в діапазоні 0,79...0,85 в умовах сухого тертя.

3. Експериментально визначені характеристики механічних втрат і ефективної потужності двигунів з гільзами циліндрів, робочі поверхні яких оброблені методами іскрового зміцнення і мікродугового оксидування. Найменше значення механічних втрат і найбільше значення ефективної потужності отримані на гільзі циліндра з МДО покриттям.

4. У процесі напрацювання ефективна потужність двигуна в комплектації штатною гільзою знизилася на 10...23% у всьому діапазоні частот обертання, у той час як ефективна потужність двигуна, оснащеного гільзою з ІЗ-покриттям, зросла на 11...26%, що підтверджує як високу зносостійкість покриття, так і потенціал вдосконалення процесу іскрового зміцнення. Внаслідок істотного зносу, двигун, оснащений штатною гільзою, не зміг вийти на стабільний режим роботи при максимальному навантаженні.

5. Іскрове зміцнення гільзи циліндра не призводить до істотної зміни теплового стану гільзи і суміжних деталей. Заміна сталевої гільзи на алюмінієву з ІЗ-покриттям призводить до зміни середніх температур деталей циліндропоршневої групи не більше ніж на 5...10 К. Так, при товщині покриття 300 мкм і коефіцієнті теплопровідності шару 1 Вт/(м·К) спостерігається зниження середньої температури гільзи на 5...10 К і зростання середньої температури поршня і кришки циліндра в тому ж діапазоні. При цьому на 20...25 К збільшується температура робочої поверхні гільзи. Тепловий потік через алюмінієву гільзу з зміцненим шаром в залежності від товщини стінки і

зміцненого шару може бути як вище, ніж у сталевій гільзі, так і нижче. Залежно від умов нагрівання і охолодження різниця може досягати 10%.

Подальший розвиток досліджень спрямований на:

1. Удосконалення методу іскрового зміцнення з метою зниження тривалості процесу обробки і механічних втрат двигуна.
2. Використання методу іскрового зміцнення для збільшення ресурсу поршня, зокрема, поршневої канавки.
3. Розробку математичних моделей, що дозволяють прогнозувати вплив параметрів покриття, в тому числі його дискретність, на зносостійкість поверхні деталей ЦПГ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абрамов Б. В. Вплив покриттів на основі хрому на зносостійкість гільз циліндрів дизельних двигунів / Б. В. Абрамов, В. С. Коваль // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Транспортне машинобудування. – 2018. – № 34 (1311). – С. 54–61.
2. Андрієнко П. Оптимізація параметрів хонінгування робочої поверхні циліндра для зменшення втрат на тертя / П. Андрієнко, С. Авраменко // Проблеми трибології. – 2020. – № 2. – С. 22–28.
3. Афанасьев В. П. Исследование триботехнических характеристик упрочненных поверхностей цилиндров ДВС / В. П. Афанасьев, С. А. Смирнов // Вестник машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 34–39.
4. Бабич А. П. Методи підвищення довговічності деталей циліндропоршневої групи / А. П. Бабич. – К. : Аграрна наука, 2015. – 210 с.
5. Бондаренко В. В. Плазмове напилення як метод відновлення та зміцнення гільз циліндрів / В. В. Бондаренко, Г. М. Лисенко // Ремонт, відновлення та модернізація техніки. – 2017. – № 1. – С. 15–20.
6. Варварюк Є. В. Підвищення зносостійкості гільз циліндрів бензинових двигунів біметалізацією робочої поверхні тертя / Є. В. Варварюк, Б. С. Правдюк // Науковий вісник ХНТУСГ. – 2021. – Вип. 22. – С. 108–114.
7. Визначення величини спрацювання робочої поверхні циліндрів двигунів внутрішнього згоряння / К. Л. Шевченко, С. І. Бондарєв // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2017. – Вип. 275. – С. 228–235.
8. Воловик Е. Л. Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – М. : Колос, 2008. – 415 с.
9. Гелевера О. П. Вплив наноструктурованих покриттів на інтенсивність зношування циліндрів ДВЗ / О. П. Гелевера // Нанотехнології в промисловості. – 2020. – № 3. – С. 88–94.
10. Голуб В. С. Трибологія та надійність машин : підручник / В. С. Голуб. – Львів : Афіша, 2019. – 320 с.
11. ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання (ГОСТ 7.1–2003, IDT). – [Чинний від 2007–01–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 47 с.
12. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання. – [Чинний від 2016–01–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2016. – 16 с.
13. Дяченко В. Г. Двигуни внутрішнього згоряння : підручник / В. Г. Дяченко. – Харків : ХАІ, 2006. – 459 с.
14. Жуков В. А. Методи діагностування зносу циліндропоршневої групи / В. А. Жуков // Автомобільна діагностика. – 2016. – № 5. – С. 10–14.

15. Зношування та довговічність гільз циліндрів дизельних двигунів / М. Я. Пришляк, В. О. Яковенко // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 1 (79). – С. 165–171.

16. Іванов П. В. Спосіб підвищення зносостійкості робочої поверхні циліндра ДВЗ : пат. 123456 Україна, МПК F16J 10/04 / Іванов П. В., Петров В. С. ; заявник та патентовласник Харків. нац. автомобіл.-дор. ун-т. – № u202101234 ; заявл. 15.02.2021 ; опубл. 25.08.2021, Бюл. № 8.

17. Кириченко М. М. Вплив експлуатаційних факторів на зношування гільз циліндрів / М. М. Кириченко, І. Р. Олійник // Вісник аграрної науки. – 2018. – № 11. – С. 45–48.

18. Ковальчук В. О. Вплив легуючих елементів на структуру та властивості зміцнених шарів гільз циліндрів / В. О. Ковальчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2019. – № 6. – С. 30–35.

19. Костенко А. А. Аналіз методів зменшення втрат на тертя в двигунах внутрішнього згоряння / А. А. Костенко // Сучасні проблеми машинобудування : зб. наук. пр. – 2021. – Вип. 2 (24). – С. 78–84.

20. Кухаренко В. Оцінка технічного стану циліндро-поршневої групи двигуна / В. Кухаренко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка: Проблеми надійності машин. – 2018. – Вип. 192. – С. 195–203.

21. Левківський О. О. Підвищення зносостійкості циліндрів автомобільних двигунів при відновленні : кваліф. робота магістра / О. О. Левківський. – Житомир : Поліський нац. ун-т, 2020. – 88 с.

22. Лизогуб В. Я. Трибологічні процеси в циліндро-поршневій групі ДВЗ / В. Я. Лизогуб. – К. : Наукова думка, 2012. – 190 с.

23. Марченко А. П. Двигатели внутреннего сгорания : учеб. пособ. / А. П. Марченко, И. В. Парсаданов, Н. К. Рязанцев [та ін.] ; под ред. А. П. Марченка. – Харків : НТУ "ХПИ", 2006. – 300 с.

24. Методичні рекомендації з виконання курсового проекту з дисципліни "Автомобільні двигуни" / А. В. Бабіч [та ін.]. – Дніпро : НГУ, 2016. – 68 с.

25. Молодык К. В. Восстановление деталей машин / К. В. Молодык, А. С. Зенкин. – М. : Машиностроение, 2003. – 250 с.

26. Немий С. В. Вплив ремонтних змін діаметрів циліндрів автомобільних двигунів на їх характеристики / С. В. Немий, О. Й. Коцюмбас // Вісник Львівського ДУБЖД. – 2016. – № 13. – С. 145–151.

27. Новицький О. Р. Підвищення зносостійкості гільз циліндрів бензинових двигунів біметалізацією робочої поверхні тертя : кваліф. робота бакалавра / О. Р. Новицький. – Житомир : Поліський нац. ун-т, 2022. – 60 с.

28. Охотников Б. Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособ. / Б. Л. Охотников. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.

29. Петрик М. Тертя і зношування в машинах : основи / М. Петрик, В.

Мельник. – Ужгород : Закарпат. іст. музей, 2003. – 160 с.

30. Повышение износостойкости и снижение механических потерь ДВС : обзор соврем. технологий // *Automotive Engineering* : міжнар. електрон. журн. – 2023. – № 4. – Режим доступу: <http://www.auto-eng.com/>. – Назва з екрана.

31. Прохоренко А. А. Статические характеристики электронного регулятора для дизеля с аккумуляторной топливной системой // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2012. – № 2. – С. 41–45.

32. Романенко М. Сучасні методи обробки поверхонь тертя в ДВЗ / М. Романенко // *Двигунобудування України* : електрон. журн. – 2022. – № 3. – Режим доступу: <http://www.engine-journal.org.ua/>. – Назва з екрана.

33. Свічкарьов В. Д. Триботехнічне забезпечення надійності та довговічності ДВЗ : монографія / В. Д. Свічкарьов, І. В. Свічкарьов. – Харків : ХНАДУ, 2016. – 340 с.

34. Татарин А. Методи відновлення блоків циліндрів двигуна автомобіля / А. Татарин, Р. Розум // *Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – Тернопіль : ЗУНУ, 2023. – С. 55–58.

35. Технології зміцнення поверхонь тертя : навч. посіб. / О. А. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін [та ін.]. – Кременчук : КрНУ, 2021. – 140 с.

36. Тертя, зношування та змащування : енциклопедичний довідник / за заг. ред. О. В. Зарубіна. – К. : Техніка, 2001. – 520 с.

37. Тітов В. А. Підвищення довговічності гільз циліндрів шляхом оптимізації ремонтних технологій : монографія / В. А. Тітов. – К. : НУБіП України, 2019. – 160 с.

38. Федорченко В. В. Композиційні покриття для підвищення зносостійкості деталей ДВЗ / В. В. Федорченко, Г. С. Клименко // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2020. – № 5. – С. 98–104.

39. Хефнер Х. Улучшение рабочих характеристик двигателей внутреннего сгорания / Х. Хефнер ; пер. с нем. В. М. Семенов. – М. : Машиностроение, 1985. – 216 с.

40. Шалапко Д. О. Випробування та дослідження двигунів внутрішнього згоряння : метод. вказівки / Д. О. Шалапко, А. А. Андреев, А. В. Дрозд. – Харків : НТУ "ХП", 2019. – 55 с.

41. Шапко В. Ф. Автомобільні двигуни. Основи теорії двигунів внутрішнього згоряння : підручник / В. Ф. Шапко. – Кременчук : КрНУ, 2023. – 180 с.

42. Шляхи зниження механічних втрат у сучасних двигунах внутрішнього згоряння / В. Я. Антонов [та ін.] // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2022. – № 1. – С. 4–9.

## **ДОДАТКИ**