

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)

“ ” 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Надійності техніки

(назва кафедри)

Андрій НОВИЦЬКИЙ

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Підвищення зносостійкості робочою поверхні тертя гільз
циліндрів ДВЗ»

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Освітня програма «Машини та обладнання сільськогосподарського

виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

В'ячеслав ЛОВЕЙКІН

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександр БАННИЙ

(ПІБ)

Виконав:

Василь МИРОНЮК

(ПІБ)

КИЇВ - 2026

**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

_____ Миронюк Василь Андрійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Освітня програма _____ «Машини та обладнання сільськогосподарського
_____ виробництва» _____
(назва)

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

Тема магістерської роботи «Підвищення зносостійкості робочою поверхні тертя
гільз циліндрів ДВЗ» _____

затверджена наказом ректора НУБіП України від 16.12.2024р. № 2268 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 2026.05.15 _____
(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)

_____ Василь МИРОНЮК _____
(ПІБ)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1. Аналіз факторів, що впливають на зносостійкість гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння	8
1.2. Аналіз існуючих способів відновлення гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння	13
1.3. Шляхи підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння.....	21
1.4 Висновки.....	27
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗНИЖЕННЯ ЗНОСУ БІМЕТАЛІЗАЦІЄЮ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ТРЕРТЯ ГІЛЬЗИ ЦИЛІНДРІВ.....	28
2.1. Теорія взаємодії поверхонь при зовнішньому терті.....	28
2.2. Теоретичне обґрунтування форми, геометричних розмірів та кількості кільцевих канавок на робочій поверхні тертя гільзи циліндрів	30
Висновки.....	33
3. КОНСТРУКТИВНИЙ ВАРІАНТ ВИКОНАННЯ БІМЕТАЛІЗОВАНОЇ МІДДЮ ГІЛЬЗИ ЦИЛІНДРІВ.....	35
3.1. Конструкція біметалізованою гільзи циліндрів і роботи пари тертя «поршневе кільце-гільза»	35
3.2 Технологічний процес виготовлення біметалізованої міддю гільзи циліндрів	37
Висновки.....	42
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	43
4.1. Програма експериментальних досліджень	43
4.2. Методика лабораторних досліджень.....	43
4.2.1. Методика визначення температури поверхонь тертя та мастильного матеріалу	43

4.2.2. Методика дослідження зносу робочої поверхні зразків на машині тертя СМТ-1 44	
4.2.3. Методика визначення зносу досвідчених зразків і гільзи циліндра ваговим методом	49
4.2.4. Методика визначення елементного складу поверхні тертя дослідних зразків 50	
4.2.5. Методика мікрометражу гільзи циліндрів	52
4.2.6. Методика прискорених лабораторних випробувань гільз циліндрів на зносостійкість	54
4.3. Методика стендових досліджень	56
4.3.1. Устаткування і приладове забезпечення	56
Висновки.....	61
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БІМЕТАЛІЗОВАНИХ ПОВЕРХНІВ ТЕРІННЯ.....	62
5.1. Результати лабораторних досліджень біметалізованих поверхонь тертя	62
5.2. Результати прискорених лабораторних випробувань гільз циліндрів на зносостійкість	65
5.3. Результати порівняльних стендових досліджень двигуна EA113 в штатної комплектації і оснащеного біметалізованими гільзами.....	66
Висновки.....	69
РОЗДІЛ 6.ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АВТОМОБІЛЯ VOLKSWAGEN GOLF 4 З ДВИГУНОМ, ОСНАЩЕНИМ БІМЕТАЛІЗОВАНИМИ ГІЛЬЗАМИ ЦИЛІНДРІВ	71
Висновки.....	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
ДОДАТКИ.....	80

ВСТУП

Підвищення надійності машин та збільшення їх ресурсу мають велике значення у сучасних економічних умовах. Енергетичною основою мобільних енергетичних засобів є двигун внутрішнього згоряння, частку якого припадає до 36...52% від загальної кількості відмов [1].

Ефективні показники роботи двигуна тим вищі, чим досконаліше тепловикористання та нижчі механічні втрати і, зокрема, втрати на тертя [2].

Основними дефектами гільз циліндрів є: знос дзеркала циліндра; знос, зміна форми та взаємного розташування верхнього та нижнього настановних поясів щодо осі циліндра; сколи та тріщини будь-якого розміру та розташування; відкладення накипу на поверхні, що омивається водою; відкладення накипу на поверхнях посадкових поясів; короблення, відколи, глибокі задираки або втрата натягу вставки гільзи [4].

В даний час розроблено декілька способів відновлення та зміцнення внутрішньої поверхні гільз циліндрів автотракторних двигунів, які за своєю технологією діляться на розточування під ремонтний розмір та відновлення до номінального розміру [5].

Розточування під ремонтний розмір тягне за собою зниження твердості внутрішньої поверхні та необхідність організації виробництва поршнів і поршневих кілець ремонтного розміру, а також наводить до скорочення ресурсу двигунів на 30...50% [6].

Для відновлення гільз циліндрів до номінального розміру застосовуються такі способи: металізація, гальванічні способи, запресування зносостійких пластин, наплавлення на внутрішню поверхню зносостійких порошків, відновлення нагріванням і т.д. Але вони не знайшли широкого застосування через те, що не відповідають вимогам стандарту щодо ка- вшановування і мають високу собівартість, крім того, практично все ці технологічні процеси надають несприятливий вплив на екологію [5]. Тому розробка і вдосконалення способів відновлення та підвищення зносостійкості гільз циліндрів, відповідальних вимог стандартів, є актуальними і практично значущими для сільського виробництва.

По-перше, гільза має бути зносостійкою і мати низький коефіцієнт тертя.

По-друге, зберігати в процесі роботи стабільні розміри і при цьому витримувати високі тиску, механічні і теплові навантаження, а також мати хорошу теплопровідність і корозійну стійкість в активних середовищах.

Для забезпечення перерахованих технічних вимог до якості гільз циліндрів при формуванні поверхонь тертя необхідно забезпечувати отримання оптимальних триботехнічних характеристик поверхонь, що сполучаються, таких як низький коефіцієнт тертя, висока зносостійкість, оптимальні фізико-механічні властивості.

Метою цієї роботи є підвищення зносостійкості гільз циліндрів бензинових двигунів біметалізацією робочої поверхні тертя.

Об'єкт дослідження: Процес триботехнічної взаємодії та зношування в sprzęженні «гільза циліндра — поршневе кільце» двигунів внутрішнього згорання.

Предмет дослідження: Закономірності зміни зносостійкості, коефіцієнта тертя та топографії робочої поверхні гільз циліндрів залежно від методів та параметрів їхнього поверхневого модифікування.

Завдання дослідження:

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Провести аналітичний огляд сучасних методів підвищення зносостійкості деталей циліндро-поршневої групи ДВЗ та визначити їхні недоліки й переваги.

Дослідити механізм зношування робочої поверхні гільз циліндрів у різних режимах тертя (від гідродинамічного до граничного).

Розробити (або вдосконалити) технологічний процес модифікації робочої поверхні гільзи для покращення її антифрикційних властивостей.

Провести лабораторні триботехнічні випробування зразків на знос та тертя, порівняти результати із серійними зразками.

Оцінити економічну ефективність та екологічну безпеку запропонованого методу впровадження у виробництво або ремонтну практику.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз факторів, що впливають на зносостійкість гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння

За ГОСТом 27674-88, зносостійкість - властивості матеріалу чинити опір зношування в певних умовах тертя, що оцінюється величиною, зворотній швидкості зношування або інтенсивності зношування [9].

Зносостійкість виробу характеризують наступні показники:

- знос - зміна маси виробів, їх розмірів, кількості металу в олії або зміна параметрів виробу, що залежать від зносу поверхонь або сполучень;
- швидкість зношування - відношення значення зносу до інтервалу часу, протягом якого він виник (миттєва - у певний момент часу, середня - за певний інтервал часу);
- інтенсивність зношування (миттєва, середня) — відношення значення зносу до обумовленого шляху, на якому відбувається зношування, чи обсягу виконаної роботи [9].

Довговічність та ефективність роботи автотракторних двигунів значною мірою визначаються зносостійкістю деталей циліндропоршневої групи. Зношування деталей ЦПГ призводить до зниження тягово-потужних показників роботи двигуна, зростання витрати паливно-мастильних матеріалів, забруднення навколишнього середовища. Порушення в роботі ЦПГ впливають на роботу інших складальних одиниць двигуна, прискорюючи їх зношування. Ресурс капітально відремонтованого двигуна становить 35...40% ресурсу нового двигуна. Однією з дорогих деталей ЦПГ, що швидко зношуються, є гільза циліндра. Інтенсивність зношування ГЦ після капітального ремонту в 2-3 рази вище, ніж у нових гільз. Тому розробка та вдосконалення способів відновлення та збільшення ресурсу гільз циліндра є актуальними [1,6, 10-18].

Процес зношування гільзи циліндра відбувається таким чином: на верхній торець поршневого кільця діє тиск газів P_r , що трохи відрізняється від тиску в камері згоряння двигуна, що притискає його до нижнього торцю поршневої канавки (рис. 1.1) [18]. Знизу на кільце впливає тиск газів P_1 пройшли через зазори між кільцем або гільзою, кільцем або нижнім торцем канавки. Цей тиск газів

змінюється за шириною кільця і прагне відірвати його від площини з'єднання з канавкою. Проте тиск газів на нижній торець значно менше, ніж верхній, через його дроселювання в зазорах. В результаті кільце притискається до нижнього торця канавки різницею тисків, що діють на його верхній та нижній торці.

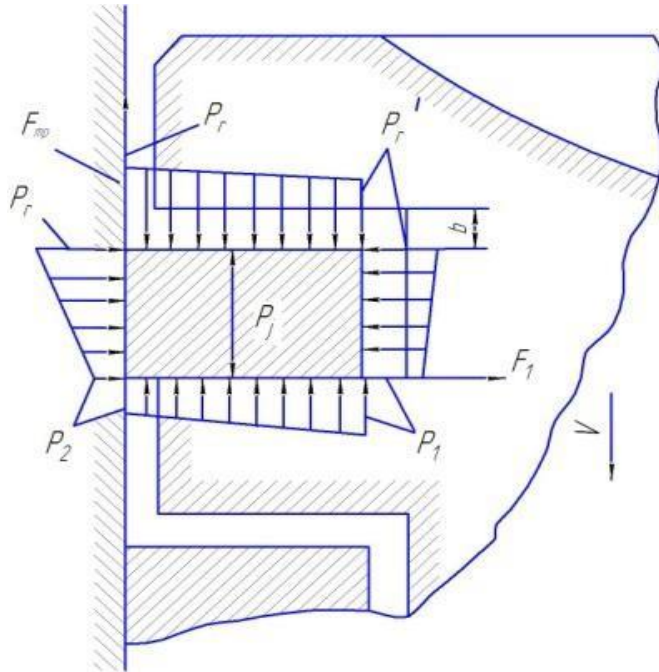


Рисунок 1.1 - Схема сил, діючих на поршневе кільце

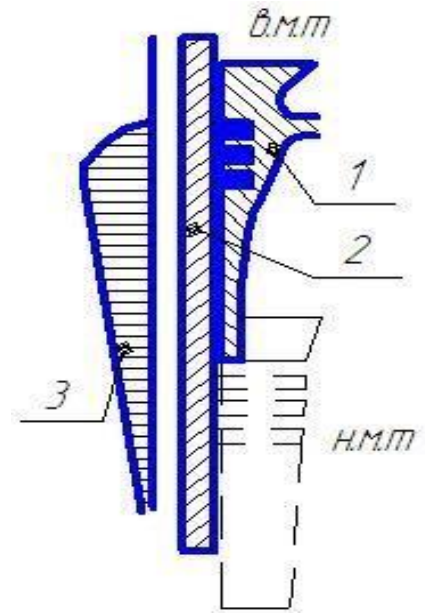


Рисунок 1.2 - Характер зносу гільзи циліндра по висоті
1 поршень; 2 циліндр;
3 епюра зносу

Тиск газів у канавках значно збільшує силу притиснення кільця до гільзи; при цьому видавлюється мастило і зростає робота тертя. Між поверхнею кільця та гільзи при великих тисках за кільцем виникає граничне тертя, в умовах якого спостерігається підвищений знос, особливо верхніх кілець та верхнього пояса гільз. У бензинових двигунах робота тертя, що припадає на компресійні кільця, розподіляється так: перше кільце 60%, друге 30% і третє 10% [2].

Між кільцем і поверхнею ГЦ виникає сила тертя ($F_{тр}$), значення якої пропорційно тиску кільця на поверхню гільзи циліндра, що виникає внаслідок дії тиску газів та сили пружності кільця. Ця змінна за величиною сила спрямована убік, протилежний руху поршня. Робота сил тертя викликає знос гільзи циліндра та робочої поверхні кільця. На роботу сил тертя впливають: співвідношення фізико-механічних властивостей матеріалів кільця та гільзи циліндра; стан

мастила та наявність у ньому абразиву; температура деталей, що з'єднуються.

Робота сил тертя нижніх кілець завжди менша, ніж першого, що пояснюється, з одного боку, кращими умовами мастила, а з іншого – нижчим тиском газів у лабіринтному ущільненні.

Поблизу верхньої мертвої точки (в.м.т.), на тактах стиснення та робочого ходу, відбувається інтенсивне зношування гільзи циліндра, що посилюється дією високої температури газу, що призводить до вигорання мастильного матеріалу на поверхні циліндра. За міри руху поршня вниз робота сил тертя кілець у поєднанні зменшується. Кільця заходять у зону ГЦ, де є масло на поверхні, інтенсивність зношування ГЦ по висоті зменшується. Епюра зношування циліндра має форму конуса, більша основа якого розташована поблизу в.м.т. (Рис. 1.2) [18].

У площині хитання шатуна знос циліндра дещо більше через дію нормальної сили. Ділянка гільзи циліндра, розташована навпроти вогневого пояса поршня, при положенні його у в.м.т. зношується. Інтенсивність зношування ГЦ, крім перерахованих факторів, значною мірою визначається умовами експлуатації двигуна та досконалістю його технічного обслуговування.

Нерівномірне зношування гільз циліндрів по висоті призводить до радіальних переміщень кільця в канавці. В результаті переміщення кільця та дії нормального зусилля, що притискає його до нижнього торця канавки, між ними виникає сила тертя F_1 (див. рис. 1.1). Робота сили тертя спричиняє знос першого поршневого кільця та канавки поршня, який прийнято оцінювати по збільшенню торцевого зазору b . Надмірний знос цих деталей призводить до того, що дроселююча дія кільця слабшає. Гази вільно проходять у картер, що прискорює старіння масла та зношування деталей ЦПГ двигуна [19].

Вивчення процесів, що відбуваються при зношуванні різних пар тертя, здійснюється в рамках швидко розвивається науки - трибології. Дослідження показують, що деталі ЦПГ працюють при нестационарних теплових, навантажувальних, швидкісних режимах, в умовах впливу абразивного та газового середовищ, які сприяють розриву плівок, що розділяють, і виникненню мікросхоплювання з різною інтенсивністю зношування [28-30,38]. При цьому

процес зношування змінюється з часом. Виділяють три етапи цього процесу: підробіток, режим і катастрофічний знос:

Перший етап - характеризується досить швидким збільшенням зносу, оскільки відбувається згладжування мікронерівностей на робочих поверхнях деталей. Цей період пов'язаний з припрацюванням і відбувається при незначному пробігу двигуна. Закінчення цього етапу відбувається після обкатки нового двигуна та характеризується стабілізацією зазору між ними. Цей зазор називається номінальним.

Другий етап – нормальна експлуатація двигуна. Цей етап характеризується малою швидкістю наростання зносу та значною тривалістю за часом. Називається також періодом природного зношування. Збільшення зношування залежить від багатьох параметрів. Будь-яке погіршення умов експлуатації підвищує темп зношування. Поліпшення умов експлуатації двигуна зменшує темп наростання зносів на даному етапі. Але по мірі експлуатації зноси нарастають і досягають допустимих величин. Подальше функціонування поєднань проходить з найгіршою мастилом і, отже, з підвищеною швидкістю зношування механізмів.

Третій етап – етап аварійного зношування. Робота пар на цьому етапі може викликати поломку і вимагає уважного контролю. Знос не повинен бути більшим за граничну величину. Чисельні значення номінального зносу (зазору) визначаються конструкцією двигуна. Значення допустимого та граничного зносу визначаються з теорії, виходячи з умов мастила.

У тракторних та автомобільних двигунах встановлюють гільзи мокрого типу з верхнім опорним буртом. ГЦ легкознімні «мокрого» типу відливаються із спеціального перлітного сірого чавуну із вмістом фериту до 5%. Графіт середньо- або дрібнозернистий прямої або завихреної форми. Твердість 170...241 HV. Для зниження зносу у верхню частину гільзи запресована з натягом 0,08...0,14 мм вставка із спеціального кислототривкого легованого чавуну аустенітного типу. Твердість матеріалу вставки 74...92 HRC. Структура: аустеніт та карбіди у вигляді окремих включень або сітки та графіту, що складається з дрібних та середніх пластин прямої або завихреної форми.

Внутрішню поверхню гільзи обробляють до шорсткості $Ra_{0,32}$. Для збільшення маслоємності робочої поверхні на частини гільз циліндрів внутрішню поверхню піддають плосковершинному хонінгуванню. Сумарна площа опорних майданчиків складає 50...70% площі бічної поверхні циліндра [22,39-43].

Гільзи циліндрів під час роботи сприймають механічні та теплові навантаження, а також зносу. Умови в камері згоряння двигунів зумовлюють такі основні вимоги до гільз циліндрів:

- а) міцність стінок при дії на них сил тиску газів;
- б) зносостійкість дзеркала циліндра при тривалій експлуатації двигуна; в) невеликі втрати на тертя при переміщенні поршня з кільцями в гільзі; г) антикорозійна стійкість внутрішньої і зовнішньої поверхонь гільзи; д) надійність ущільнення в місцях газового стику і стиків водяного охолодження;
- е) вільне розширення в осьовому напрямку для мокрих гільз циліндрів з верхнім опорним буртом [19,44-46].

У процесі експлуатації на зношування гільзи впливає безліч факторів. До основних факторів відносяться швидкісний, навантажувальний та тепловий режими роботи двигуна, ефективність очищення від пилу та інших механічних частинок, що надходять у двигун повітря та палива, ефективність очищення від продуктів зношування та механічних домішок картерної олії, число холодних пусків і ін. [20, 38 - 40,44,47].

Під час роботи двигуна гільзи циліндрів зазнають значних змінних механічних і теплових навантажень, зазнають впливу корозійних речовин, абразивних частинок, високих температур і тиску [48]. У момент спалаху максимальний тиск газів у циліндрі бензинового двигуна досягає 2,5...5 МПа, а температура газів у камері згоряння досягає 1800...2000 °С, біля нижньої мертвої точки тиск знижується до 0,3...0,5 МПа, а температура до 700...900 °С, а температура до 700...900 °С чавунних поршнів 400...500 °С у алюмінієвих 200...250 °С біля кромки камери згоряння, 200...220 °С у зоні верхнього компресійного кільця [39,41,42]. Температура головки циліндрів досягає 400 °С. Температура гільзи циліндра в зоні верхньої мертвої точки досягає 250...300 °С і

зменшується вниз по стінці гільзи.

Внаслідок нагрівання відбувається зниження механічних властивостей матеріалів, з яких виготовлені деталі ЦПГ. При температурі понад 450 °С механічні властивості чавуну знижуються настільки, що нормальна тривала робота ГЦ за такої температури неможлива [20,38,49,50].

1.2. Аналіз існуючих способів відновлення гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання

Основним дефектом гільз циліндрів, що відпрацювали міжремонтний ресурс, є знос робочої поверхні тертя. Зношування робочої поверхні тертя гільзи є складним триступеневим процесом, що включає адгезію, корозію і абразивний знос. Тріщини, сколи, забоїни та задираки гільз є результатом неправильного складання або розбирання двигунів, зберігання або транспортування ремфонду, а також аварійним станом ЦПГ. Такі гільзи 100% бракують. Найбільше зношування гільзи, як правило, знаходиться в перерізі, що відповідає положенню верхнього компресійного кільця в мертвій точці і є визначальним з погляду ремонтпридатності. [5, 19, 41, 44]. Основні дефекти гільз циліндрів відпрацювали міжремонтний ресурс представлені на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 - Основні дефекти гільз циліндрів

В даний час розроблено декілька способів відновлення та зміцнення робочої поверхні гільз циліндрів автотракторних двигунів (рис.1.4), які за своєю технологією діляться на розточування під ремонтний розмір та відновлення до номінального розміру [5, 61].

Найбільш поширеним способом відновлення внутрішньої поверхні гільзи є обробка під ремонтний розмір. Підприємство - виробник двигуна встановлює ремонтні розміри для гільз циліндрів, як правило, вони мають один ремонтний розмір збільшений на 0,3 мм; 0,4 мм; 0,5 мм або 0,7 мм (іноді встановлюється і другий ремонтний розмір). Зношені гільзи двигунів EA113 замінюють новими: номінального ($\varnothing 92$) або ремонтного розмірів (92,5; 93,0 та 93,5 мм). Гільзи дизелів мають один ремонтний розмір, збільшений на 05 або 07 мм [19, 61].

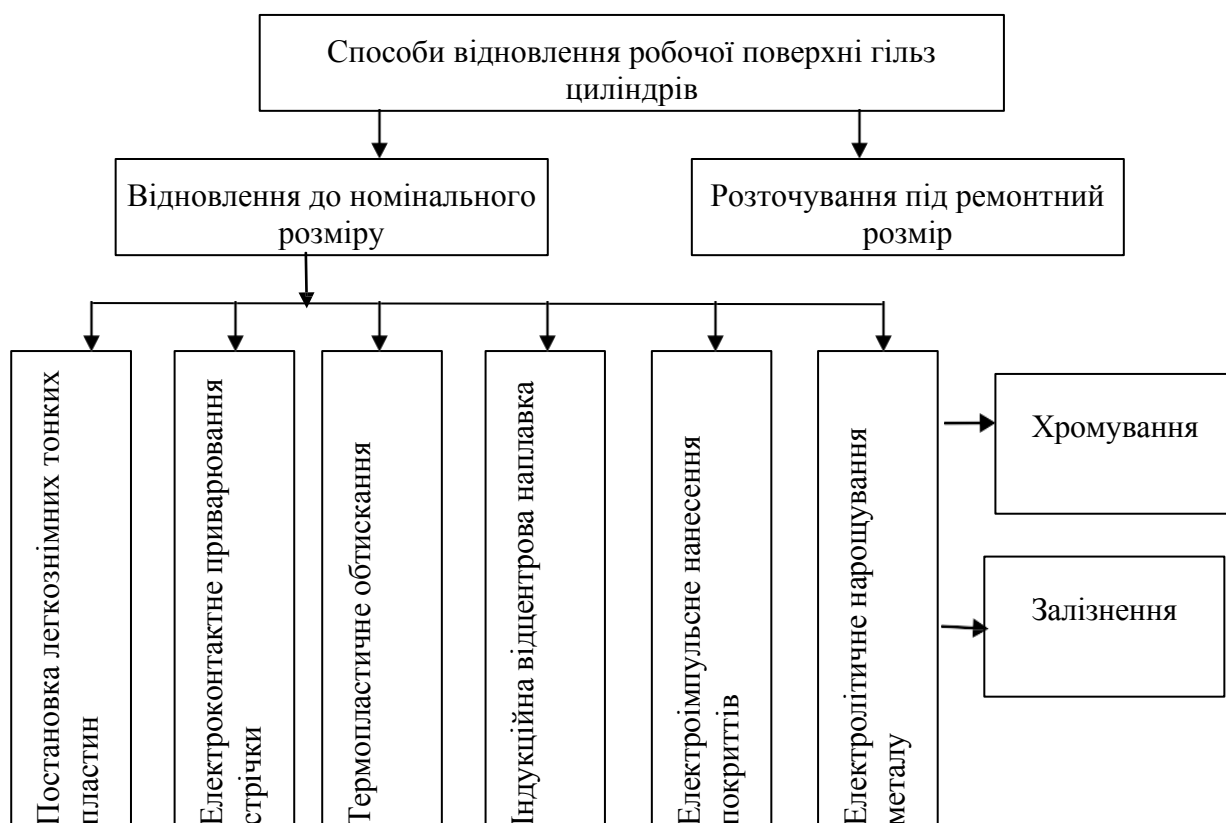


Рисунок 1.4 - Способи відновлення робочої поверхні гільз циліндрів

Схема маршрутів відновлення гільз шляхом ремонтних розмірів представлена на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 - Схема маршрутів технологічного процесу відновлення гільз циліндрів методом ремонтних розмірів

Очищення гільз від накипу та слідів корозії найбільш ефективно металевим піском у спеціальній установці. Як очищувального середовища використовують кісточкову або пластмасову крихту, скляні кульки та гранули сухого льоду. Кісточкова крихта (подрібнена шкаралупа фруктових кісточок) подається потоком стисненого повітря, що рухається з високою швидкістю, на поверхню з нагаром під тиском 0,3...0,6 МПа. Частинки, з силою вдаряючись об поверхню деталі, руйнують і видаляють нагар та інші забруднення, не порушуючи при цьому шорсткості поверхні деталі.

Кавітаційні пошкодження найчастіше усувають нанесенням на попередньо підготовлену та підігріту до температури 60° С поверхню композиції на основі епоксидної смоли. Розроблено простіший метод електроконтактного приварювання сталевієї пластини. Пластина зі сталі 10 або 20 завтовшки 0,3 мм повинна на 5...10 мм перекривати пошкоджена ділянка.

Посадковий верхній та нижній пояски відновлюють електроконтактним приварюванням стрічки, металізацією, нанесенням полімерних матеріалів, гальванічним залізненням, електроконтактним нанесенням (електронатиранням) залізоцинкового сплаву.

Зазвичай гільзу розточують і піддають дво- або триразовому хонінгування. Розточують гільзи на верстатах моделі 278 або 287Н за один прохід різцями з пластинками зі сплавів ВК2 або ВК3. Багато підприємств замість розточування застосовують шліфування внутрішньої поверхні на спеціальних безцентрово-шліфувальних верстатах типу СШ-22, СШ-64 та ін. Шліфують гільзи за два переходи: чорнове та чистове шліфування. При чистовому шліфуванні в 2 рази зменшують поперечну та поздовжню подачі. Потім виконують зачисні ходи без поперечної подачі.

Після розточування або шліфування гільзи циліндрів двигуна хонінгують на верстатах 3А83, 3М83. При чорновому хонінгування знімають основу частку припуску та виправляють похибки геометричної форми отвору (овальність, конусність та ін.) після розточування або шліфування, а при чистовому – зменшують шорсткість поверхні [19, 28, 46].

Зношений торець опорного бурта підрізають до виведення слідів зношування перед останньою операцією хонінгування [19, 46].

Після відновлення гільзи контролюють відповідно до технічних вимог і сортують на розмірні групи за діаметром внутрішньої поверхні.

Гільзи циліндрів, вийшли за ремонтний розмір або не мають ремонтні розміри, відновлюють одним з наступних методів [19, 28, 46]:

При ремонті постановкою тонких легкознімних пластин гільзу розточують і хонінгують під певний розмір. Потім у неї за допомогою пристосування запресовують сталеві вставки, виготовлені з холодно-катаної термообробленої каліброваної тонкої (0,5...1,0 мм) стрічки зі сталі У8А, У10А, 70С2ХА, 40КХНМ, ОХ17Н7ГТ, ОХ17ГТ-ВІ і ін. Натяг при запресуванні становить 0,15...0,18 мм, твердість стрічки HRC 45...55. Після запресування пластин гільзи піддають чорновому та чистовому хонінгуванню. Ресурс таких гільз дорівнює ресурсу

нових гільз. При повторному відновленні зношені пластини випресовують та замінюють на нові [19,63].

Переваги відновлення гільз *електроконтактним приварюванням стрічки* в порівнянні з розглянутим раніше способом полягає в тому, що в даному випадку використовують дешеву і недефіцитну стрічку зі сталі 40,45,50 та ін. Висока твердість і зносостійкість гільзи забезпечуються за рахунок самозагартування стрічки при її приварці. Можливе також приварювання порошків [19,45,63,64-66].

Сутність способу відновлення гільз *термопластичним обтисканням* полягає в тому, що гільзу поміщають у матрицю, що охолоджується водою. Всередину гільзи вводять індуктор ТВЧ та нагрівають її. При нагріванні вище температури 900°C відбуваються структурні перетворення і необхідний зростання зерна чавуну. Внаслідок обмеження матрицею вільного розширення в гільзі нарастають температурні внутрішні напруження і при їх визначеному значенні розвиваються пластичні деформації в радіальному напрямку. Внаслідок цього зменшується діаметр внутрішньої поверхні. Зносостійкість відновлених гільз дорівнює зносостійкості нових гільз [19,63,67].

Перед *індукційним відцентровим наплавленням* гільзу у верхній, найбільш зношеній частині (на довжині 65...70 мм) розточують на глибину 0,5 мм. Підготовлену гільзу закріплюють у патроні автоматизованої установки та обертають із частотою 750...950 хв⁻¹. У розточування подають шихту, що складається з флюсу та порошку ПГ-ХН80СР4. Під дією відцентрових сил шихта рівномірно розподіляється поверхнею гільзи. Всередину гільзи вводять індуктор ТВЧ та розплавляють шихту. Після охолодження гільзи до температури 200...300°C зупиняють її обертання. Далі проводять високотемпературну відпустку для зняття внутрішньої напруги, розточування та хонінгування. Твердість наплавленої поверхні становить HRC 55...58, зносостійкість збільшується в 4...6 разів. За такої технології ресурс відремонтованих двигунів підвищується на 80% [19,68].

Електроімпульсне нанесення покриттів засноване на імпульсному розряді конденсатора через дріт металу, що напилюється. При цьому відбувається

вибухове плавлення дроту та осадження розплавлених дрібних частинок металу на внутрішній поверхні гільзи.

Краплі металу, що утворюються при вибуховому розряді, можна розділити на дві групи, до однієї з яких відносяться частинки розміром кілька мікрметрів, а до іншої - розміром кілька сотих часток мікрметра. Покриття утворюється за рахунок осадження на поверхні частинок першої групи, тоді як частинки другої групи випаровуються, перетворюючись на аерозолі. При недостатньому рівні енергії розряду металевий дріт розплавляється без вибуху, а за надмірного рівня енергії - повністю переходить в газоподібне стан. І в том і в другому випадку напилення неможливе. Своєрідність електроімпульсного нанесення покриттів пов'язана з особливо малим розміром частинок у дрібнорозпиленому стані матеріалу, що напилюється. При температурі розпилення, яка, як вважають, близька до точці кипіння металу дроту, всі частинки в дрібнорозпиленому стані нагріваються рівномірно. При зіткненні з поверхнею основного матеріалу швидкість руху частинок досягає кількох сотень метрів за секунду. Рух частинок до основного матеріалу відбувається за рахунок різкого розширення газу під час вибуху та витіснення повітря із зони вибуху, що майже повністю виключає окислення частинок, і, отже, забезпечує отримання щільного покриття з високою міцністю зчеплення з основним матеріалом [69,70].

Електролітичне нарощування металу на зношені поверхні деталей ґрунтується на утворенні у водних розчинах солей, кислот та лугів (електролітів) при пропусканні через них постійного електричного струму заряджених частинок — іонів. При проходженні постійного струму через електроліт позитивно заряджені іони (метали, водень) рухаються до катода-електроду, з'єднаного з негативним полюсом джерела струму, а негативно заряджені іони (кислотний і водний залишки) - до аноду-електроду, з'єднаному з позитивним полюсом джерела струму. Досягши анода або катода, іони втрачають свій електричний заряд і виділяються на них у вигляді нейтральних атомів, утворюючи згодом на поверхні деталі необхідне покриття. Зазвичай катодами є деталі, що відновлюються, а анодами — різні метали. У ремонтній практиці при

електролітичному нарощуванні використовують опади хрому чи заліза. Електролітичне нарощування хрому називають хромуванням, а заліза залізненням або залишенням.

Хромування застосовують у випадках, коли від покриття вимагається висока твердість. Такі покриття мають низьким коефіцієнтом тертя і великою зносостійкістю, що в кілька разів перевищує зносостійкість сталевих нехромованих деталей. Крім того, хромове покриття міцно з'єднується з основним металом і має високу корозійну стійкість, а хромування не викликає зміни структури та фізико-механічних властивостей основного металу. Хромування застосовують при відновленні деталей з невеликим зносом, що вимірюється десятими та сотими частками міліметра. Мала товщина хромового покриття, що рідко перевищує 0,3...0,5 мм, пояснюється крихкістю опадів хрому [19,33,71-75].

Залізнення є одним із способів відновлення чавунних деталей. При відновленні гільз циліндрів використовують сплави Fe - P, Fe - Ni - P і ін, з допомогою яких отримують залізо-фосфорні покриття завтовшки до 1 мм зі швидкістю осадження 0,25 ... 0,35 мм/год. Зміст фосфору в сплаві становить 7...10%, мікротвердість його у вихідному стані 7000...8000 МПа. Сплави заліза з фосфором застосовують для відновлення гільз циліндрів тому, що при нагріванні їх до температури понад 250°C мікротвердість покриттів не знижується, а, навпаки, підвищується за рахунок утворення фосфідів заліза. В результаті цього різко збільши-ється зносостійкість, а також покращується зчеплюваність з основним металом. Після термообробки таких покриттів за температури 400°C протягом 1 год їх мікротвердість досягає 16000 МПа, зносостійкість більш ніж 2 рази перевищує зносостійкість загартованої сталі 45 і більш ніж 10 раз – зносостійкість звичайного електролітичного заліза [19,46,69,76-78]. Основними характерними недоліками наведених вище способів, внаслідок яких вони не отримали широкого поширення в ремонтному виробництві, є:

- обробка під ремонтний розмір – різке (на 20...30%) зниження їхнього ресурсу через зменшення твердості поверхні;
- постановка легкознімних тонких пластин - погіршує умови

теплопередачі через стінку гільзи, що може викликати порушення посадки пластин у гільзі, їх провертання і задирання гільзи циліндрів, а також вимагає суворо дотримання технологічного процесу, порушення якого може призвести до виникнення дефектів аж до аварії через розрив гільз, викидання пластин та обрив поршнів;

- електроконтактне приварювання сталеві стрічки - викликає підвищене зношування поршневих кілець і, відповідно, витрата масла на чад;
- термопластичне обтискання - вимагає додаткових досліджень щодо керованості процесу обтиснення, отримання необхідної усадки за один прохід;
- електроімпульсне нанесення покриттів - непридатне для відновлення гільз з великою величиною зносу, оскільки даним способом неможливе отримання покриттів великої товщини;
- металізація – низька адгезійна міцність, використання дорогих матеріалів, складність мехобробки та високий рівень шуму;
- залишання – низька зносостійкість, складність мехобробки, висока трудомісткість;
- хромування – низька продуктивність, висока вартість процесу, недостатня змочуваність та оброблюваність поверхні;
- пластинування – високий ступінь точності всіх операцій, підвищений знос поршневих кілець і чад олії, порушення теплообміну в стінках гільзи;
- відцентрове напікання – значні деформації, висока вартість матеріалів, складність мехобробки.

Крім того, практично всі ці способи несприятливо впливають на екологію [5].

З вищевикладеного випливає, що методи зміцнення робочої поверхні гільз циліндрів як широко розповсюджені, так і альтернативні повинні в результаті впливу на неї усувати недоліки, викликані ливарним процесом і в залежності від призначення та хімічного складу, надавати деталі якості, необхідні для забезпечення ресурсу двигуна. Однак, як видно з наведеного огляду, напрацювання двигунів до відправки в капітальний ремонт, в том числі із

зазначеними методами зміцнення, в реальних умовах експлуатації суттєво нижчі за нормативні.

Таким чином, пошук нових способів та методів зміцнення робочої поверхні гільзи циліндрів для нинішнього стану автомобільного двигунобудування є об'єктивною необхідністю.

1.3. Шляхи підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання

Проблема зносостійкості деталей машин — це проблема їхньої довговічності та надійності. Облік фізико-хімічних процесів, що протікають в поверхневих шарах тіл, що труться, призводить до перегляду традиційних уявлень про методи боротьби зі зносом. Раніше для підвищення зносостійкості прагнули підвищити твердість поверхонь, що труться. Цей спосіб частково забезпечував виконання поставленого завдання, проте він не зміг задовольняти всім вимогам через невелику площу фактичного контакту поверхонь тертя [22, 28-30,34, 43, 79,80,81].

Зусилля захистити поверхневий шар від зношування поділом поверхонь, що труться, шаром мастильного матеріалу, за допомогою плівок хімічних сполук (окислів) і збільшенням твердості або міцності самого матеріалу виявилися недостатньо ефективними. Розглянемо найбільш широко застосовувані (рис. 1.6) шляхи підвищення зносостійкості робочої поверхні тертя гільз циліндрів.

Вибіркове перенесення реалізується при тертя стали по певним мідним сплавам (наприклад, за деякими бронзами або латунями) у ряді середовищ (передусім всього в гліцерині, спиртогліцеринових середовищах, морський воді і т. д.) у певних інтервалах зміни умов роботи з'єднання [82-84]. Під дією гліцерину (або іншого середовища) при терті починається виборче анодне розчинення легуючих бронзу елементів. Атоми цих елементів уносяться в мастильне середовище, а поверхня бронзи збагачується міддю. У відновлювальному середовищі, яким є гліцерин, ця мідь не окислюється і тому дуже активна. Вона легко схоплюється зі сталеву поверхнею, покриваючи її тонким шаром. У цьому шарі виникає велика кількість вакансій, частина яких утворює пори, що

заповнюються молекулами гліцерину. У результаті утворюється так звана сервовітна плівка товщиною 1...2 мкм, яка має низьку міцність на зсув і не наклепується при терті. Вона чудово адсорбує активні компоненти середовища, насамперед комплексні сполуки, утворені розчиненими елементами сплаву та продуктами механохімічних перетворень мастила. Крім того, володіючи високою теплопровідністю, вона сприяє зниженню температури поверхні тертя шляхом відведення теплоти в глибинні шари матеріалу [26,28-30,81,85-89].

Вибіркове перенесення, на жаль, реалізується лише при певних поєднаннях матеріалів тіл, що труться, і мастильних матеріалів в певному, досить вузькому інтервалі зміни діючих факторів (навантажувальних, швидкісних і особливо температурних).



Рисунок 1.6 - Способи підвищення зносостійкості робочої поверхні тертя гільз циліндрів

Як відомо, зносостійкість залежить від остаточної (фінішної) технологічної обробки поверхонь деталей. До такого способу належить розроблена *фінішна антифрикційна безабразивна обробка*. Сутність ФАБО полягає в тому, що поверхня тертя деталі покривається тонким шаром латуні, бронзи або міді шляхом використання явища переносу металу під час тертя. Перед нанесенням покриття поверхню, що обробляється, знежирюють і покривають гліцерином або сумішшю, що складається із двох частин гліцерину та однієї частини 10%-ного розчину соляної кислоти. В процесі тертя окисна плівка на поверхні сталі розпушується, поверхня мідного сплаву пластифікується, і створюються умови для його

схоплення зі сталлю. Товщина перенесеного шару бронзи чи латуні 1-2 мкм. Перевага ФАБО перед іншими фінішними операціями складається в тому, що цей метод надзвичайно простий і не потребує складного обладнання. ФА-БО надає сталевій або чавунній поверхні високі антифрикційні властивості. Досвід використання ФАБО для циліндрів двигунів внутрішнього згоряння дозволяє зменшити час приробітку та збільшити зносостійкість гільз циліндрів в 1,6 ... 1,75 рази, а що працюють у парі із нею поршневих кілець – в 1,35...1,4раза [81,90-93].

Широке поширення для підвищення зносостійкості деталей двигунів набули спеціальні *присадки*, що застосовуються як на етапі обкатки двигуна, так і в період його експлуатації.

За своєю фізико-хімічною дією присадки можна розділити на ряд груп:

Присадки з використанням ПАР (ДФІ – 1; ОГМ – 1, 2, 3 та інші) Поверхнево-активні речовини утворюють на поверхнях тертя міцну адгезійну плівку, яка знижує тертя, перешкоджає підвищенням зносам при роботі з великими навантаженнями. Необхідно відзначити, що дія ПАР погіршується при високих температурах, що може спричинити зниження протизадирних властивостей [94].

Інактивні присадки (Градіс; АЛП – 1,2; Молікот – А; Ресурс; Ремол – 1; Деста – М; Гарант та ін.). Загальним недоліком інактивних речовин є те, що вони, заповнюючи западини мікрорівностей, не змінюють характер поверхні, поверхня під шаром присадки залишається незмінною, і при використанні в надалі чистого олії мікронерівності розкриваються і зішліфовуються. Крім того, ці присадки нерозчинні в моторних оліях і випадають в осад при зберіганні та фільтрації [95,96].

Хімічно – активні присадки (ОМ-2; ОКМ; ДК-8 [123,124]) інтенсифікують хімічні процеси на поверхнях деталей, що труться, що призводить до утворення шарів з продуктів хімічної взаємодії з металом, які поділяють контактуючі поверхні, тим самим, перешкоджаючи схоплюванню і зади. Розглянуті хімічно активні присадки за всієї їх ефективності мають такі недоліки: токсичність; хімічну активність присадок при збільшенні навантаження та температури, що призводить до підвищеного корозійно-механічного зношування деталей;

труднощі приготування в умовах ремонтного виробництва.

До присадок, що реалізують ефект вибіркового перенесення (ВП) – при доробці деталей, відноситься композиція КТЦМС. Явище ВП ґрунтується на тому, що за певних умов спостерігається утворення плівок перенесення (антифрикційних плівок) металів зі складу присадок, що забезпечують низьке тертя та зниження зносу деталей [82,83]. Нестача композиції – складність приготування в заводських умовах. Присадка характеризується загальнотоксичною дією [97].

Підвищити зносостійкість гільз циліндрів можливо способом *анодно-механічного хонінгування (АМХ)* із застосуванням металевих хонінгувальних брусків з міді, латуні, сталі або чавуну, що дозволить використовувати не тільки електрохімічну, а й електроерозійну складові процесу, а також нанести антифрик.

При АМХ знімання металу відбувається за рахунок електроерозійних та електрономількомічних явищ. У будь-якому режимі у міжелектродному проміжку протікають відповідні електрохімічні процеси, оскільки робочою рідиною є електроліт. Електричні розряди, що виникають між електродами та обумовлюють електроерозію, можна розглядати як окремі джерела тепла швидкорухаючі по поверхні електрода-заготівлі. При цьому тепло поширюється вглиб металу за законами теплопровідності. Глибина проникнення тепла залежатиме від потужності електричного розряду, швидкості руху електродів, властивостей довкілля тощо. Навколо точки, що швидко рухається, утворюються температурні зони сферичної форми. У тій зоні, де нагрівання досягає температури плавлення і вище, метал плавиться, частково випаровується і, віддаляючись потоком робочої рідини та електрод-інструментом, утворює лунки. У наступних нижче зонах відбувається зміна структури. У зоні, де температура досягає температури загартування і вище з'являється так званий «білий» шар, який характеризується низькою травністю, високою твердістю та зносостійкістю. Використовуючи ці властивості білого шару, можна підвищити ресурс гільз циліндрів.

Однак «білий» шар має нерівномірну товщину та суцільність, а також рясніє часом і тріщинами. Тому отримання «білого» шару анодно-механічним методом

виявилося недоцільним. Обробку гільз циліндрів слід проводити на режимах, припускаючих появи "білого" шару невеликої товщини. Лабораторні та експлуатаційні дослідження показали, що зносостійкість поверхні гільз циліндрів обробленої АМХ на 20 ... 22% вище зносостійкості поверхні після алмазного хонінгування. Час приробітку поверхні також скоротився [1,100,101].

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) – ефективний спосіб підвищення зносостійкості поверхонь, що труться, деталі в умовах граничного тертя, заснований на використанні пластичних властивостей матеріалу. В результаті такої обробки видаляються ризики та мікротріщини від попередньої обробки, збільшуються твердість, зносо- та корозійно-стійкість поверхні та її втомна міцність. Для підвищення зносостійкості гільз циліндрів застосовують зазвичай розкочування кулками або роликами, як у вигляді самостійної операції, так і поєднаної з операціями розточування, хонінгування, доведення [45,46,35,102-108].

Поверхневий шар, розкочений при оптимальних режимах, має підвищену (на 18-27%) мікротвердість. Товщина шару з підвищеною мікротвердістю коливається в межах 0,05-0,5 мм: чим більше діаметр деформуючого елемента, тим товщий шар з підвищеною мікротвердістю. Безперечним позитивним моментом слід вважати, що ППД є остаточною операцією і можлива як у промисловому, так і в ремонтному виробництві.

Істотним недоліком цього методу є мала товщина антифрикційного шару (до 5 мкм), що в умовах провідного абразивного зношування буде недостатньо і, як наслідок, може спричинити інші види зношування, зменшуючи ресурс гільзи [103,104].

З метою підвищення зносостійкості робочої поверхні гільз у сучасному автомобільному двигунобудуванні для більшості гільз циліндрів двигунів, у тому числі і зарубіжних, застосовується її *гартування*. Термообробка загартуванням сірого чавуну з перлітною структурою дозволяє перетворити його на чавун з мартенситною структурою. Загартування гільз, що проводиться струмами високої частоти (ТВЧ), дозволяє отримати робочу поверхню, зміцнену на глибину до 2,5

мм. Її твердість після гарту ТВЧ досягає 38 ... 48 HRC в залежності від різних факторів. Питома знос таких гільз становить залежно від умов експлуатації автомобіля 0,5...2,0 мкм/1000 км. Достатня глибина загартованого шару дозволяє проводити перешліфування гільз під ремонтні розміри, що збільшує ресурс роботи [79,109-112].

При лазерному зміцненні гільзи циліндрів на її внутрішній поверхні лазером наносять окремі рівновіддалені смужки під кутом 45° до утворює гільзи так, що смужки утворюють на поверхні сітку. Глибина зони зміцнення становить 0,5...1,0 мм, товщина доріжки до 0,5 мм, припуск на остаточну механічну обробку становить 0,1...0,2 мм. В результаті обробки спостерігається зменшення інтенсивності зношування у 1,3...1,6 раза [63,109,113-116].

У роботах [7, 120-131] запропоновано спосіб *біметалізації* поверхні тертя шляхом створення в тілі основного матеріалу впорядкованих або неупорядкованих вставок, краплень, шарів тощо з матеріалу, що має відмінні від основного фізико-механічні властивості [131].

Перевага цього способу полягає в тому, що відпадає необхідність у постійному поповненні, як у випадку з мікропорошками, запасів міді, що беруть участь у процесі тертя. Крім того, шпинель $ZnFe_2O_4$, що утворилася в результаті хімічних реакцій, є високотемпературним нейтралізатором відпрацьованих газів камери згоряння [6,131].

У результаті досліджень авторів [120-131] було використано кілька варіантів зміни фізико-механічних характеристик поверхонь деталей шляхом про шарування в поперечному напрямку кольоровими металами та сплавами (міддю, латунню, бронзою, міддю та цинком). Згідно з результатами їх досліджень встановлено, що кращу зносостійкість мають зразки, про шаровані у поперечному перерізі міддю, порівняно з суцільним. зразком і зразками, про шарованими іншими кольоровими металами. Інтенсивність зношування зразків залежить також від відносини площі тертя поперечного шару, що змінює фізико-механічні властивості поверхні тертя, до площі тертя зразка, яка в дослідженнях змінювалася залежно від кута нахилу поперечного шару до ширини зразка α . Було встановлено,

що інтенсивність зношування змінюється залежно від кута нахилу поперечного шару до ширини зразка. Ця залежність має однаковий характер для зразків з поперечним шаром з міді та латуні.

Таким чином, на підставі наведених викладок можна зробити висновок, що спосіб біметалізації поверхні тертя вставками міді дозволить поліпшити змащувальні властивості поверхні, що труться, і підвищити її зносостійкість.

Однак у літературних джерелах відсутні дані з біметалізації робочої поверхні тертя гільз циліндрів бензинових двигунів для підвищення їх зносостійкості.

1.4 Висновки

Літературний та патентний огляд показує, що підвищення зносостійкості гільз циліндрів досягається різними способами.

Основними характерними недоліками наведених вище способів, внаслідок яких вони не набули широкого поширення у ремонтному виробництві, є: низька адгезійна міцність, використання дорогих матеріалів, складність мехобробки, висока вартість процесу та ін. Крім того, практично всі ці способи надають несприятливий вплив на екологію.

Найбільш перспективним способом підвищення зносостійкості Внутрішньої поверхні гільз циліндрів є біметалізація робочої поверхні тертя шляхом створення в тілі основного матеріалу впорядкованих або невпорядкованих вставок, вкраплень, шарів тощо з матеріалу, що має відмінні від основного фізико-механічні властивості.

Однією з переваг даного способу є те, що відпадає необхідність у постійному поповненні мікропорошків, запасів міді, що бере участь у процесі тертя або елементів присадок, що діють протягом певного часу.

З вищевикладеного метою роботи є підвищення зносостійкості гільз циліндрів бензинових двигунів біметалізацією робочої поверхні тертя.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗНИЖЕННЯ ЗНОСУ БІМЕТАЛІЗАЦІЄЮ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ТРЕРТА ГІЛЬЗИ ЦИЛІНДРІВ

2.1. Теорія взаємодії поверхонь при зовнішньому терті

Взаємодія поверхонь тертя проявляється у формуванні плям контактів, в якому беруть участь не тільки виступи з плівками, що покривають їх, але і прилеглі до цих виступів матеріали. У процесі контакту відбувається деформування матеріалу поверхонь тертя.

Поверхневі шари матеріалів, що труться, змінюються, в основному, під дією значних деформацій, що розвиваються в тонкому поверхневому шарі. Зміна відбувається внаслідок фізичної та хімічної взаємодії: адсорбційного зниження міцності; дифузійного насичення елементів з навколишнього середовища і від контртіла, а також окиснення.

Таким чином, у терті беруть участь матеріали, змінені порівняно з вихідними. У зв'язку з цим тертя має подвійну молекулярно-механічну природу і зумовлене об'ємним деформуванням матеріалу та подолання міжмолекулярних зв'язків, що виникають між зближеними ділянками поверхонь, що труться.

Оскільки поверхні, що труться, завжди хвилясті, шорсткі і неоднорідні за своїми механічними властивостями, відбувається проникнення більш жорсткого елемента поверхні в більш м'яке контртіло. Елемент, що проникають, переміщаючись у тангенціальному напрямку, деформує нижче лежачий матеріал, утворюючи попереду нього напівсферичний валик. Величина валика залежить від відносного проникнення $\frac{h}{R}$ (де h - глибина проникнення, мкм, R - радіус поверхні,

що проникла, мкм), міцності містка зварювання і міцності адгезійного зв'язку $\frac{\tau}{\sigma_s}$

(де σ_s - межа текучості матеріалу) виникає між плівками, що покривають поверхні тіл тертя.

Таким чином, однією з причин виникнення зносу є порушення умов пластичного відтиснення матеріалу однієї з поверхонь тертя. Під впливом

навантаження збільшується глибина впровадження мікронерівності поверхні, що призводить до переходу від пружної до пластичної деформації і далі до мікрорізання або задирки (перехід зовнішнього тертя, при контакті двох тіл, у внутрішнє). Умова припинення обтікання, що відповідає переходу зовнішнього тертя у внутрішнє, описується виразом [12, 13]:

$$\frac{h}{R} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right), \quad (2.1)$$

де h - Глибина впровадження, мкм; R – радіус сферичного індентора (поверхні, що вкорінилася), мкм; τ - міцність на зріз адгезійного зв'язку, МПа; σ_T – межа текучості матеріалу, МПа.

Як видно із співвідношень, для здійснення зовнішнього тертя необхідно, щоб міцність на зсув тонкого поверхневого шару була б меншою за міцність основного матеріалу. Чим вона менша, тим далі рухається поріг зовнішнього тертя. Важливим фактором, що впливає на цей процес, є відмінність між міцністю адгезійного зв'язку та міцністю нижчих шарів. Якщо адгезійна зв'язок менш міцна, ніж нижче- лежить шар, має місце позитивний градієнт механічних властивостей по глибині, тобто. [132, 136]:

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (2.2)$$

де σ_x - руйнівне напруження в напрямку площині торкання, МПа; z - координата, перпендикулярна до площині торкання, мкм.

За цієї умови має місце зовнішнє тертя. Таким чином, для зниження зносу та утворення позитивного градієнта необхідно зменшити міцність тонкого поверхневого шару. Це можна зробити такими методами:

- адсорбційним чи хемосорбційним зменшенням міцності на зсув тонкого поверхневого шару;
- введенням тонкого шару сторонньої речовини, що має менший опір зсув, ніж основне тіло, тобто. мастило;
- введенням металів, мають низька опір на зсув.

При цьому бажано, щоб знижена міцність шару зберігалася в широкому

діапазоні температур і тисків.

Найбільш перспективним напрямком є біметалізація поверхонь, що труться, кольоровими металами. При терті плівка біметалізованого покриття, вступаючи в адгезійну взаємодію, захищає від схоплювання поверхню, що лежить під нею. Для біметалізації поверхонь трибовузлів використовують мідь, латунь, олово та інші сплави, що мають нижчу міцність на зсув, ніж сталь і чавун.

2.2. Теоретичне обґрунтування форми, геометричних розмірів та кількості кільцевих канавок на робочій поверхні тертя гільзи циліндрів

Підвищення зносостійкості гільз циліндрів досягається за рахунок біметалізації поверхні тертя. Для цього в тілі деталі можуть бути виконані вставки, шари, канавки, пази та інше з матеріалу з іншими фізико-механічними властивостями, як правило, у площині, непаралельній площині тертя та напрямку руху деталей (рис. 2.3).

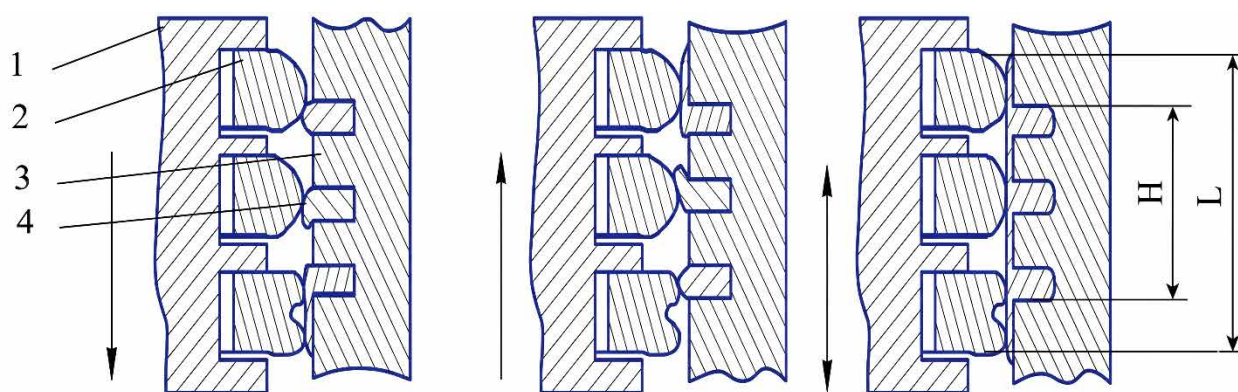


Рисунок 2.3 - Схема утворення плівки на поверхні гільзи циліндрів:

1-поршень; 2-поршневе кільце; 3-гільза циліндрів; 4-вставка

У запропонованому способі на внутрішній поверхні гільзи виконуються канавки, що складаються з двох зустрічних гвинтових ліній з правим і лівим різьбленням, відповідно. Величина кроку H не повинна перевищувати відстань між верхнім компресійним і нижнім маслознімним кільцем L . Для забезпечення найбільшої зносостійкості поперечні шари повинні бути розташовані по можливості ближче до місця найбільшого зносу, але не знижувати міцність стінки гільзи циліндрів і не розташовуватися в зоні високих температур.

Кільцеві канавки заповнюються кольоровим металом (сплавом). Кут підйому кільцевих канавок повинен враховувати взаємодію поршневих кілець з робочою поверхнею гільзи: при куті підйому менше 15° поршнєві кільця будуть проходити зону канавок з ударом, а при вугіллі підйому більше 60° збільшиться

закидання олії в камеру згоряння.

Робота гільзи зі зміненими фізико-механічними характеристиками поверхні тертя здійснюється в такий спосіб. Кільця, рухаючись поверхнею гільзи, пластичним деформуванням знімають частину кольорового металу з канавок і «намазують» його по всій поверхні гільзи між н.м.т. та в.м.т. Цей процес відбувається безперервно в протягом усіх чотирьох тактів двигуна. Однак слід підкреслити, що інтенсивне знімання кольорового металу триває короткий час. Він уповільнюється після освіти на поверхні гільзи шару кольорового металу, має певну товщину.

В результаті коефіцієнт тертя робочих поверхонь кілець та гільзи знижується, і кільця перестають знімати шар кольорового металу з канавок.

При зменшенні шару кольорового металу на поверхні гільзи коефіцієнт тертя зростає, і інтенсивність його зняття з поверхні канавки підвищується кільцями. Таким чином, пристрій має функцію саморегулювання. Шар кольорового металу, знятий з канавки гільзи, переміщується в процесі тертя з маслом і тому потребує підтримання постійного рівня. Однак наявне джерело (канавки) поповнюють його запас у процесі тертя. Процес нанесення шару кольорового металу на робочі поверхні кілець та гільзи супроводжує весь період експлуатації ЦПГ двигуна.

Проведені експериментальні дослідження показали, що товщина шару кольорового металу, утворює на поверхні гільзи, складає величину близько 2-3 мкм, а наявність деяких кольорових металів, наприклад, міді або латуні, безпосередньо в камері згоряння призводить до зменшення токсичності вихлопних газів двигуна.

Техніко-економічною перевагою гільзи з застосуванням плавких вставок є підвищення довговічності циліндропоршневої групи шляхом зниження коефіцієнта тертя її сполучених деталей без додавання, наприклад, дорогих антифрикційних присадок у мастило, які необхідно вносити при кожній заміні олії. А простота конструкції модернізованої гільзи дозволяє виробляти її на будь-якому ремонтному заводі, навіть в умовах неспеціалізованого виробництва.

Реалізація методу біметалізації поверхні гільзи в даний час є досить складним завданням. Найбільш доцільним буде покриття всієї поверхні кольоровим металом, а використання вставок металів. Однак у цьому випадку виникає питання, як повинні розташовуватися вставки в поверхні гільзи циліндрів. Для цього необхідно обґрунтувати геометричні параметри гільзи із вставками.

Як видно з аналізу одним із параметрів забезпечення зниження зносу є відношення площі вставок кольорового матеріалу до площі гільзи циліндрів, проте важливо знати і кут нахилу вставки. Провівши аналіз різних джерел, було

виявлено, що при лінійному русі поверхонь, що труться, процес зносу залежить від кута атаки контртіла по відношенню до поверхні. У нашому випадку необхідно розглянути питання зняття металу вставки та розподілення його по поверхні гільзи циліндрів. Необхідність розгляду даного питання викликана тим, що від кута нахилу вставки залежить, яким чином відбуватиметься деформація матеріалу вставки – пружно чи пластично.

У цьому випадку коефіцієнт тертя може бути виражений формулою:

$$f = \frac{\tau_c}{HB} + \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.36)$$

де τ_c - середня опір зрізу; α - кут, складений фактичною площею контакту із напрямом сили тертя, HB – твердість матеріалу вставки.

Діюча деформація розтягування матеріалу ε , при ковзанні поверхні, що впровадилася, буде пропорційна коефіцієнту тертя і тангенсу кута нахилу вставки:

$$\varepsilon = c \cdot f \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.37)$$

де c - коефіцієнт форми вставки.

Підставивши в (2.37) значення коефіцієнта тертя (2.5), отримаємо:

$$\varepsilon = c \left(\left(\frac{R}{h} \right)^{\frac{3}{7}} \frac{3\tau_c}{P_C^{\frac{1}{7}} E^{\frac{6}{7}}} + \beta \right) \operatorname{tg} \alpha \quad (2.38)$$

При лінійній напрузі, що характеризує роботу циліндро- поршневої групи, значення деформації відповідає межі плинності матеріалу, тобто $\varepsilon = \sigma_T$ і при досягненні критичного значення $\varepsilon > \sigma_T$, деформація перейде з пружної пластичну. Це призведе до порушення режиму покриття труться поверхні металом вставки. Таким для забезпечення режиму покриття внутрішньої поверхні гільзи циліндрів кольоровим металом необхідне виконання умови $\varepsilon \leq \sigma_T$

$$\varepsilon = c \left(\left(\frac{R}{h} \right)^{\frac{3}{7}} \frac{3\tau_c}{P_C^{\frac{1}{7}} E^{\frac{6}{7}}} + \beta \right) \operatorname{tg} \alpha \leq \sigma_T \quad (2.38)$$

Необхідно відзначити, що кут нахилу вставки обмежуватиметься геометричними параметрами гільзи та величиною ходу поршня. Тому необхідно враховувати дані параметри.

Знаючи кут нахилу вставки, проведемо розрахунок геометричних параметрів канавки та обсяг необхідного металу для забезпечення зниження зношування (рис. 2.4).

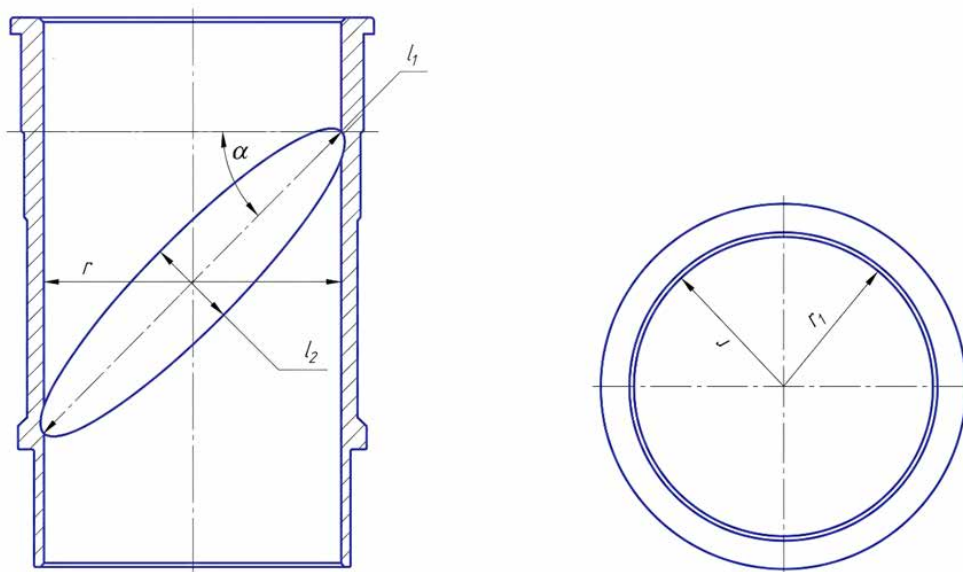


Рисунок 2.4 - Схема розрахунку геометричних параметрів вставки

Оскільки канавки мають еліпсоїдну форму, довжина великої півосі визначається:

$$l_1 = \frac{r}{\cos \alpha}$$

де r - радіус гільзи циліндрів, мм; α - кут нахилу вставки, град.

Виходячи з умови покриття всієї поверхні, що труться, гільзи циліндрів металом, і дотримуючись вимог позитивного механічного градієнта, визначимо об'єм металу у вставках. Це може бути здійснено лише в тому випадку, якщо глибина впровадження поршневих кілець не перевищує товщини покриття поверхні гільзи металом вставки. Виходячи з цього і знаючи висоту нерівностей поверхні гільзи циліндрів, визначимо обсяг металу, необхідний для покриття труться поверхні гільзи.

Як видно з проведених розрахунків, лінійне зношування біметалізованої гільзи циліндрів у 3,1 рази нижче, ніж у типової гільзи. Таким чином, проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що біметалізація поверхні гільзи циліндрів кільцевими замкнутими канавками, заповненими міддю, дозволить знизити знос поверхні гільзи, що труться.

Висновки

1 На основі теоретичних досліджень описані явища і процеси фрикційної взаємодії пар тертя з урахуванням формування поверхонь, що труться, їх впливу на коефіцієнт тертя, процес зношування.

2 Розглянуто вплив різних кольорових металів на зношування поверхні

тертя з урахуванням їхньої поверхневої активності. Обґрунтовано застосування кольорових металів при біметалізації гільзи циліндрів, що полягає у створенні між поверхнями плівки, що труться, здатної зменшити фрикційну взаємодію твердих тіл і характеризується малим опором зсуву. З проведених досліджень як матеріалу вставки обрано мідь.

3 Теоретично обґрунтовано форму, геометричні розміри та необхідну кількість канавок, заповнених кольоровим металом міддю. Кут нахилу канавок вставки до діаметральної площини гільзи циліндрів $\alpha = 17,2^\circ$, ширина канавки $b = 1,5$ мм. Враховуючи, що гільза циліндрів двигуна Volkswagen має три ремонтні розміри, що чергуються через 0,5мм, глибину канавки приймаємо 1,5мм. Підтримка шару міді на поверхні тертя гільзи товщиною 2...3 мкм забезпечується 6 кільцевими канавками, що відповідає 8,3 % по відношенню до робочої поверхні тертя гільзи циліндрів. Відповідно до проведених розрахунків лінійне зношування біметалізованої гільзи циліндрів у 3,1 рази нижче, ніж у типової гільзи.

3. КОНСТРУКТИВНИЙ ВАРІАНТ ВИКОНАННЯ БІМЕТАЛІЗОВАНОЇ МІДІЮ ГІЛЬЗИ ЦИЛІНДРІВ

3.1. Конструкція біметалізованою гільзи циліндрів і роботи пари тертя «поршневе кільце-гільза»

Підвищення зносостійкості гільз циліндрів досягається за рахунок біметалізації поверхні тертя. Для цього в тілі деталі можуть бути виконані вставки, шари, канавки, пази та інше з матеріалу з іншими фізико-механічними властивостями, як правило, у площині, непаралельній площині тертя та напрямку руху деталей [6,131].

На внутрішній поверхні гільзи виконуються канавки у вигляді замкнутих кілець, окремих один від одного, з кутами підйому $15^{\circ}\dots 20^{\circ}$ до діаметральної площини гільзи (Рис. 3.1) [3,8,48,].

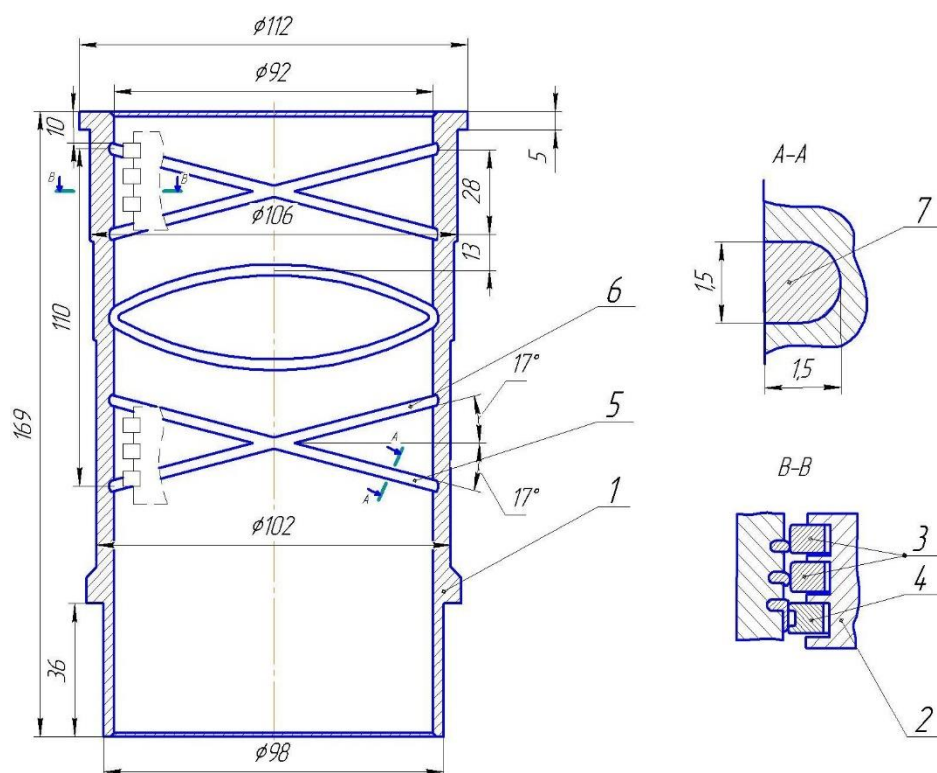


Рисунок 3.1 - Загальний вигляд біметалізованою гільзи циліндрів двигуна EA113

Циліндропоршнева група містить гільзу 1, поршень 2, компресійні 3 та маслоснімні 4 поршневі кільця. На робочій поверхні гільзи 1 зустрічно виконані канавки з лівим 5 і правим кутами 6 підйому. Канавки 5 і 6 виконані у вигляді

замкнених кілець окремих один від одного. Канавки 5 і 6 заповнені кольоровим металом – міддю 7. Кут підйому α канавок 17 градусів до діаметральної площини гільзи 1. Канавки 5 і 6 у поздовжньому перерізі мають тороподібну форму. Величина максимальної відстані між першою та наступною канавками 5 і 6 не перевищує відстані між верхнім компресійним та нижнім маслоснімним поршковими кільцями [3,8,139].

Циліндропоршнева група працює в такий спосіб. У процесі роботи двигуна внутрішнього згоряння поршень 2 з кільцями 3 і 4 здійснює зворотно-поступальний рух вгору-вниз. При цьому кільця 3 і 4, рухаючись робочою поверхнею гільзи 1, пластичною деформацією знімають частину кольорового металу 7 з канавок 5 і 6 і «розмазують» його по робочій поверхні гільзи 1 від верхньої мертвої точки до нижньої мертвої точки. Цей процес відбувається в перебіг всіх тактів двигуна та триває до тих пір, поки на робочій поверхні гільзи 1 не утворюється шар кольорового металу 7 певної товщини. В результаті цього процесу коефіцієнт тертя робочих поверхонь поршкових кілець 3 і 4 і робочої поверхні гільзи 1 знижується, а кільця 3 і 4 перестають знімати кольоровий метал 7 з канавок 5 і 6. У міру зменшення товщини «розмазаного» кольорового металу 7 з поверхні гільзи 1, коефіцієнт тертя між робочими поверхнями поршкових кілець 3 і 4 та робочою поверхнею гільзи 1 дещо збільшується. Одночасно починає підвищуватися та інтенсивність зняття поршковими кільцями 3 та 4 кольорові метали 7 з канавок 5 і 6 і процес «розмазування» кольорового металу 7 по робочій поверхні гільзи 1 повторюється [3,8,139].

Таким чином, процес нанесення шару кольорового металу 7 на робочу поверхню гільзи 1 супроводжує весь період експлуатації циліндро-поршневий групи ДВЗ.

Виконання кута підйому канавок у межах $15^{\circ}\dots 20^{\circ}$ до діаметральної площини гільзи, заповнених кольоровим металом (міддю), сприятиме утворенню на робочій поверхні гільзи захисної плівки, за рахунок зворотно-поступального руху поршня в гільзі циліндра, та зниження коефіцієнта тертя поршкових кілець о стінку гільзи циліндра [3,8,139].

Крім того, виконання канавок у вигляді окремих замкнутих кілець сприяє точності глибини їх нарізки, і, відповідно, збільшується рівномірність заповнення канавок кольоровим металом (міддю). Таке конструктивне виконання робочої поверхні гільзи циліндра дозволить підвищити якість роботи циліндропоршневої групи, знизити коефіцієнт тертя між робітниками поверхнями поршневих кілець та гільзи [139].

3.2 Технологічний процес виготовлення біметалізованої міддю гільзи циліндрів

Пропонований технологічний процес виготовлення біметалізованих гільз циліндрів включає операції очищення гільз циліндрів, їх дефектацію, усунення кавітаційних руйнувань, нарощування посадкових поясів та їх обробки, підрізування опорного бурта, нарізування кільцевих канавок та їх наплавлення, зачищення хонінгування, контролю, консервації та пакування. На відміну від *існуючого* технологічного процесу, запропонований містить операції біметалізації робочої поверхні тертя: нарізування кільцевих канавок, їх наплавлення, зачищення внутрішньої поверхні після наплавлення. Через можливість поломки різця розточувальної головки та сколів металу на межі кільцевих канавок замість операції розточування було застосовано чорнове та чистове шліфування внутрішньої поверхні гільзи на безцентрово - шліфувальних або внутрішньошліфувальних верстатах.

Нарізування кільцевих канавок виконується на центрувальному токарному верстаті (рис. 3.2) із системою ЧПУ, наприклад, Т-500 (виробництво Болгарія). Гільза циліндрів під час обробки закріплюється у трикулачковому патроні.

Установка гільз проводиться з вивіркою їх положення в горизонтальній та вертикальній площині та биття з точністю 0,03...0,05 мм. Обробка ведеться різцем, оснащеним пластинами з твердого сплаву ВК8, вибраного з урахуванням оброблюваного матеріалу, виду припуску та глибини різання, що рекомендується. При обробці застосовується мастильно-охолоджувальна рідина СОЖ Універсал. Перетин кільцевих канавок забезпечується відповідним

заточуванням різця, крок кільцевим масивам задається за рахунок налаштування верстата і відповідає 13 мм. Режими обробки зазначені у програмі, наведеній у Додатку 1.1.

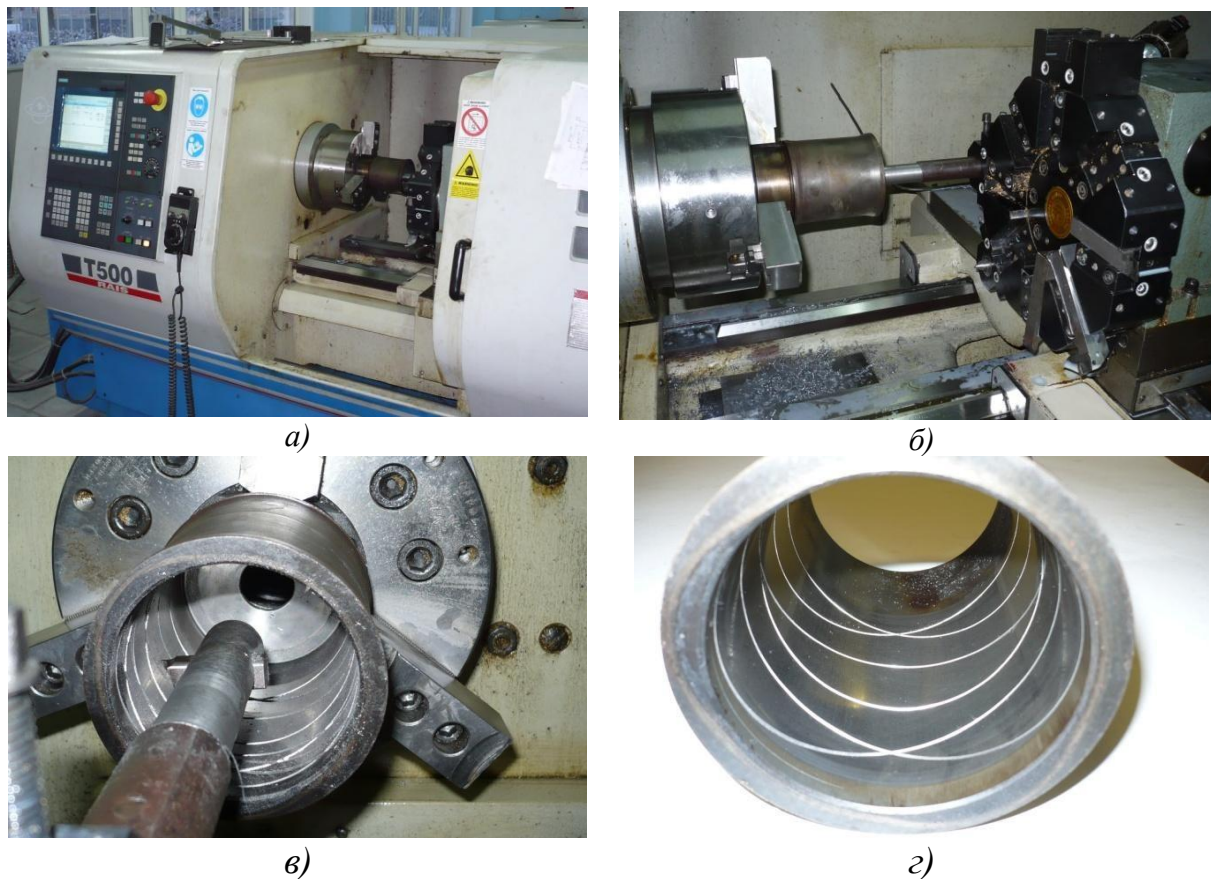


Рисунок 3.2 – Нарізування кільцевих канавок: а) загальний вигляд центровочно-токарного верстата Т-500; б) трикулачковий патрон; в)різець ВК8; г)гільза з кільцевими канавками

Глибина різання та подача визначена з урахуванням твердості оброблюваного матеріалу, виду операції, інструментального матеріалу, типу різця, способу кріплення заготівлі, застосування мастильно-охолоджувальної рідини. Основний час на точення кільцевих канавок – 11,4 хв, норма часу – 15,9 хв.

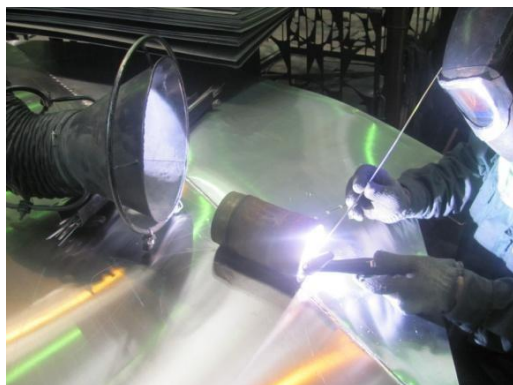
Для нарізування кільцевих канавок може застосовуватися вертикально-фрезерний обробний центр з системою ЧПУ, наприклад, моделі М-450, оснащений універсальним поворотним столом. Гільза циліндрів во час обробки закріплюється в трикулачковому патроні, встановленому на універсальному

поворотному столі, який свого часу встановлюється і кріпиться на столі верстата з кутом 17° . Установка гільзи проводиться з вивіркою її положення у горизонтальній та вертикальній площинах та биття з точністю 0,03...0,05 мм. Обробка ведеться дисковими фасонними фрезами з дрібним зубом із швидкорізальної сталі Р6М5. Трапецієподібний переріз кільцевих канавок забезпечується відповідним заточуванням зубів фрези. Необхідний крок і напрямок кільцевих масивів забезпечується за рахунок вертикальної подачі верстата та обертання гільзи на поворотному столі. Режими обробки встановлюються програмою ЧПУ. Глибина різання та подача визначені з урахуванням твердості матеріалу, що обробляється, виду операції, інструментального матеріалу, типу фрези, способу її кріплення. Основний час на нарізування гвинтових канавок - 27 хв, норма часу - 29,5 хв [141,142].

Заповнення кільцевих канавок здійснюється ручним аргонотрубовим наплавленням (рис. 3.3 а). Для наплавлення кільцевих канавок застосовується провіолока діаметром 0,8 ... 1,0 мм, матеріал - мідь М1 ГОСТ 859-78. Матеріал для наплавлення було обрано з урахуванням літературних джерел [6,7,120,125,126,130,131] виходячи з теоретичних розрахунків, проведених у 2-му розділі пункті 2.2. З урахуванням розмірів гільзи циліндрів наплавка виконується аргонотрубовий пальником АРГ-250 з вольфрамовим електродом з подачею присадного металу у вигляді дроту безпосередньо до зони дуги, вузької профільованої проставки. Як захисні гази використовується аргон сорту вищий за ГОСТ 10157—79, гелій вищої категорії якості марок А і Б за ТУ 51-940—80, а також їх суміші у співвідношенні за обсягом 50...75 % аргону. Потужність пальники забезпечує наплавлення кільцевих канавок і невелику зону термічного впливу. Попередньо внутрішня поверхня гільзи циліндрів зачищається та знежирюється. Потім гільза циліндрів міститься в термopіч і підігрівається до 300...400 °С.

Після встановлення в оправку починається оплавлення міді, для запобігання короблення гільзи циліндрів по діагоналі робляться прихвати на початку та в кінці всіх кільцевих канавок. Повторно підігрівається гільза

циліндрів до 300...400 °С і обварюється з центру навпроти прихватів, електрод розташовується суворо в площині стику, нахил електрода 60 ... 80 °.



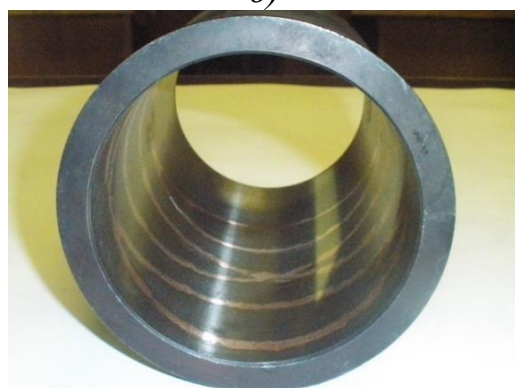
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.3 - Технологія обробки біметалізованою гільзи циліндрів: а)наплавлення канавок міддю МІ; б)зачищення внутрішньої поверхні; в) операція шліфування; г) біметалізована гільза циліндрів

Режими наплавлення: напруга дуги – 60 В, сила струму – 90 А, тиск газу – 0,05 МПа. Норма часу на наплавлення кільцевих канавок - 33,5 хв [140].

Для видалення шлаку та напливів металу після наплавлення гвинтових канавок виконується зачищення внутрішньої поверхні на токарно-гвинторізному верстаті, наприклад, 16К20 (рис. 3.3 б). При зачистці внутрішньої поверхні різець повинен проходити якомога ближче до внутрішньої поверхні гільзи, видаляючи шлак і напливи металу в зоні наплавлення, але не торкаючись її. Гільза циліндрів під час обробки закріплюється у трикулачковому патроні та на нерухомому люнеті. Установка гільз проводиться з вивіркою їх положення у горизонтальній та вертикальній площинах та биття з точністю 0,03-0,05 мм. Обробка ведеться різцями, оснащеними пластинами з твердого сплаву ВК6, обраного з

урахуванням оброблюваного матеріалу, виду припуску та глибини різання, що рекомендується. Обробка ведеться із застосуванням мастильно-охолоджувальної рідини - 3%-ного Укринолу-1 ТУ 38-101197-76 [141,142].

З урахуванням твердості оброблюваного матеріалу, марки твердого сплаву, розмірів різця, жорсткості деталі та застосування мастильно-охолоджувальної рідини теоретична швидкість різання $v=87$ м/хв, розрахункова частота обертання деталі $n_p=213$ хв⁻¹, поздовжня подача - 0,5 мм/об. Згідно з паспортом верстата, приймається частота обертання деталі $n = 200$ хв⁻¹ швидкість різання $v = 82$ м / хв. Довжина обробки з урахуванням довжини врізання і перебігу - 110 мм, припуск на обробку - 2 мм, глибина різання - 0,5 мм, кількість проходів - 4. Глибина різання та подача визначені з урахуванням твердості оброблюваного матеріалу, виду операції, інструментального матеріалу, типу різця, способу кріплення. Норма часу на зачистку

внутрішньої поверхні - 9 хв [141,142].

Можливість поломки різця розточувальної головки на межі металів не дозволяє застосовувати операцію розточування для обробки гільзи циліндрів з кільцевими канавками, заповненими міддю. Тому для обробки внутрішньої поверхні гільзи під номінальний розмір операцію розточування було замінено операціями її чорнового та чистового шліфування (рис. 3.3 в).

Шліфування може виконуватися на хонінгувальних верстатах ЗГ833, ЗА83С - 33 і ЗУ142ВМ. При обробці на верстатах гільза закріплюється в трикулачковому патроні та на нерухомому люнеті. Опорною поверхнею для люнета є поверхня нижнього посадкового пояса гільзи. Установка гільз проводиться з вивіркою їх положення у горизонтальній та вертикальній площинах та биття з точністю не більше 0,01 мм. Чорнове хонінгування виробляють брусками КЗ 1 ОСТ 1 К або алмазними брусками АС6М1 100%-ної концентрації з вмістом алмазів у бруску 3,5 карата. Чистове хонінгування ведуть брусками КЗМ20СМ1К або алмазними брусками АСМ20М1 100% концентрації. Матеріал і твердість кола, вид зв'язки, вибрані з урахуванням одночасної обробки чавуну та мідних сплавів високої твердості. Розміри кіл: зовнішній діаметр – 80

мм, ширина круга – 63 мм, діаметр посадкового отвору – 20 мм. Хонінгування ведуть за режимів: окружна швидкість – 60...80 м/мин; зворотно-поступальна швидкість - 15 ... 25 м / хв; тиск на бруски – 0,5...1,0 МПа (чорнове хонінгування) та 0,4...0,6 МПа (чистове); СОЖ - гас; припуск на чорнове хонінгування – 0,05...0,07 мм, а чистове – 0,01...0,03 мм. Режими обробки обрані з урахуванням необхідної точності та шорсткості поверхні, твердості оброблюваного матеріалу, матеріалу абразивного кола, способу кріплення заготовки, застосування мастильно-охолоджувальної рідини. Норма часу на обробку-17 хв [141,142].

Описаний технологічний процес виготовлення біметалізованих гільз циліндрів пройшов виробничу перевірку в умовах ВАТ

Висновки

1. Для підвищення зносостійкості гільз циліндрів розроблено технологічний процес виготовлення біметалізованої міддю гільзи циліндрів, на робочій поверхні якої виконуються канавки у вигляді трьох рядів замкнутих кілець окремих один від одного, з кутами підйому 17° до діаметральної площині гільзи і кроком 13 мм.

2. Технологічний процес виготовлення біметалізованих міддю гільз циліндрів включає операції: очищення гільз циліндрів; їх дефектацію; усунення кавітаційних руйнувань; нарощування посадкових поясів та їх обробку; підрізування опорного бурта; точення кільцевих канавок та їх наплавлення; зачищення внутрішньої поверхні після наплавлення; шліфування та хонінгування внутрішньої поверхні; контроль, консервацію і упаковки.

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Програма експериментальних досліджень

Програма експериментальних досліджень включала такі етапи:

- **лабораторні дослідження** досвідчених зразків по оптимізації кута нахилу (від 0 ° до 45 °) вставок, заповнених міддю, з урахуванням параметрів: температури поверхні тертя зразків та олії; моменту сили тертя; коефіцієнта тертя; шорсткості робочих поверхонь; знос зразків ваговим методом; елементного складу поверхні тертя зразків;
- **порівняльні прискорені лабораторні випробування біметалізованих гільз циліндрів** на зносостійкість типової та біметалізованої міддю гільз циліндрів по висоті;
- **порівняльні стендові дослідження** двигуна EA113 у штатній (типові гільзи циліндрів) та експериментальній (біметалізовані міддю гільзи циліндрів) комплектації на різних навантажувально-швидкісних режимах за показниками зносу гільз циліндрів (ваговим та лінійним способом); потужнісні, паливно-економічні та екологічні показники;
- **порівняльні експлуатаційні дослідження** автомобілів Volkswagen Golf 4 , укомплектованих двигунами у штатній (типові гільзи циліндрів) та експериментальній (біметалізовані міддю гільзи циліндрів) комплектації за техніко-експлуатаційними показниками.

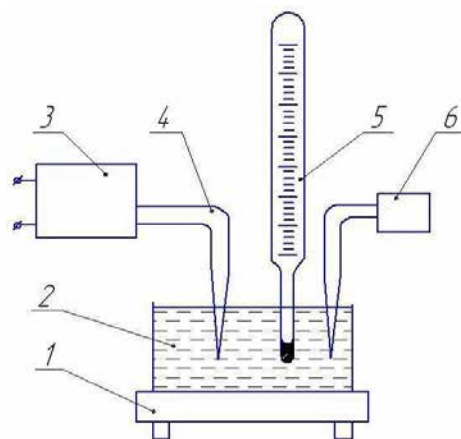
4.2. Методика лабораторних досліджень

4.2.1. Методика визначення температури поверхонь тертя та мастильного матеріалу

Температуру масла у випробувальній камері контролювали за допомогою термопари "хромель-копель" з граничною похибкою 0,87%. Термопар підключали до потенціометра КСП-4. Перед проведенням випробувань проводили тарування термопари (рис. 4.1).



а)



б)

Рисунок 4.1 - Тарування термопари «хромель-копель» а) загальний вид; б) схема тарування: 1 – нагрівач; 2 – ємність із гліцерином; 3 - потенціометр КСП-4; 4 - термопара; 5 - термометр; 6 – цифровий мультиметр М 890G

Для цього ємність з гліцерином встановлювали на нагрівач 1, в його опускали дві термопари, одну приєднували до потенціометра КСП-4, другу до цифрового мультиметру М 890G. Температуру розігрівача складу фіксували термометром з межами вимірювання від 273 до 573 К і одночасно робили позначки на шкалі потенціометра через кожні 10 К.

Температура колодки, тобто в зоні тертя трибосполучення, контролювалася за допомогою вбудованої, попередньо протарованої термопари та цифрового мультиметра М 890G з похибкою 0,75%. Для цього в колодці висвердлювали отвір діаметром 2 мм на відстані 1 мм від робочої поверхні для кріплення термопари. Дані таріювання та таріювальні графіки наведені у додатку 2.1.

4.2.2. Методика дослідження зносу робочої поверхні зразків на машині тертя СМТ-1

Для вивчення антифрикційних та протизносних властивостей матеріалів канавок, прошарованих в поперечному напрямку міддю марки М1 ГОСТ 859-78, були проведені порівняльні лабораторні випробування на машині тертя 2070 СМТ-1 (рис.4.2 та 4.3) за стандартною методикою [143,144].



Рисунок 4.2 - Загальний вигляд машини тертя 2070 СМТ- 1

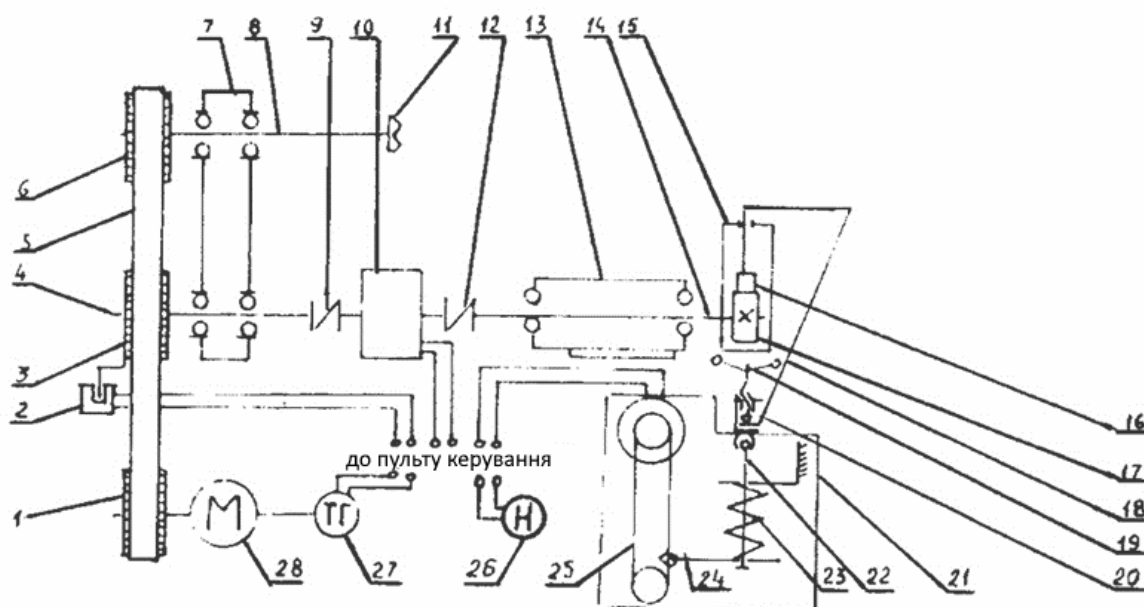


Рисунок 4.3 - Схема машини тертя 2070 СМТ-1 для трибологічних випробувань: 1, 6 – шків змінний; 2 – датчик числа циклів; 3 – шків; 4 – вал; 5 – ремінь зубчастий; 7 – корпус; 8 - Вал; 9, 12 – муфта; 10 – датчик моменту; 11 - муфта кулачкова; 13 - шпиндель змінний; 14 - вал бабки; 15 – камера випробувальна; 16 – колодка; 17 – ролик; 18 – кронштейн; 19 - ось-гвинт; 20 - п'ята; 21 – механізм навантаження; 22 - тяга; 23 - пружина; 24 - Планка; 25 – нитка; 26 – датчик навантаження; 27 – датчик швидкості; 28 - електродвигун

Трибологічні дослідження проводили по схемою "ролик-колодка" (рис.4.4).

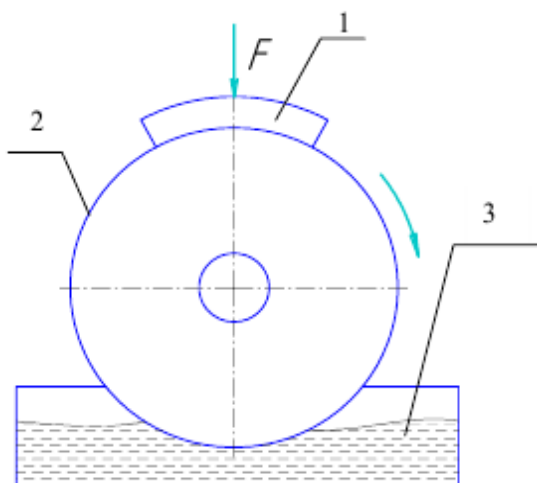


Рисунок 4.4 - Схема випробувань на машині тертя 2070 СМТ-1: 1 – колодка, 2 – ролик, 3 – масляна ванна

При випробуванні колодка утримувалася за допомогою кульки, що дозволяло їй самовстановлюватися щодо ролика (Рис.4.5). Таке кріплення забезпечує хорошу відтворюваність результатів при повторних дослідах .



Рисунок 4.5 - Загальний вигляд колодки і ролика

У час проведення випробувань вивчали зношування матеріалів:

- сталь 40Х ГОСТ 4543-71 ;
- сталь 40Х ГОСТ 4543-71 з канавками, заповненими міддю МІ ГОСТ 859-78, з кутом нахилу канавки міді 0°, 5°, 10°, 15°; 20 °, 25 °, 30 °, 35°, 40°, 45° (Рис. 4.6).

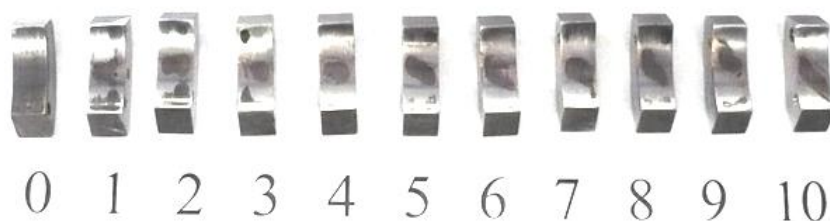


Рисунок 4.6 – Дослідні зразки із вставками кольорового металу

Таблиця 4.1 – Дані номерів дослідних зразків за нахилом біметалевої вставки

Номер зразка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кут нахилу біметалічної вставки	Без вставки	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°

Колодка виготовлена з кільця із зовнішнім діаметром $d = 70$ мм, внутрішній діаметр шліфований під розмір ролика. На поверхні колодки, що труться, вирізана канавка глибиною 2,0 мм овального перерізу з нахилом до ширини зразка. Досліджувалися зразки з кутом нахилу канавки до широкої сторони зразка 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, які були наплавлені з допомогою ручний аргонодуговий пайкою міддю марки МІ ГОСТ 859-78. Режими наплавлення: напруга дуги -60 В, сила зварювального струму - 60А, діаметр дроту - 1,5 мм, подача дроту - ручна. Після наплавлення поверхня тертя колодки оброблялася шліфуванням. Розміри колодки: радіус увігнутої поверхні - 25 мм, радіус опуклої поверхні - 35 мм, ширина - 10 мм, довжина - $24,5 \pm 1$ мм (рис.4.7).

Контртілом під час випробувань служили ролики, виготовлені з чавуну. СЧ 24-44 ГОСТ 1412-85. Розміри роликів: зовнішній діаметр – 50 мм, внутрішній діаметр – 16 мм, ширина – 12 мм. Чавунні зразки мали твердість HB = 240 од. по Брінеллю, що відповідає твердості дзеркала гільз циліндрів. Шорсткість робочої поверхні Ra ролика і колодки відповідно була 0,63 і 0,32 мкм, це відповідає технічним вимогам на капітальний ремонт двигунів Volkswagen. Для визначення навантаження та моменту тертя під час випробувань у статичному режимі визначалася залежність навантаження від величини лінійного стиснення пружини

та залежність переміщення пера графопобудівника від моменту тертя. Жорсткість пружини навантаження визначалася на приладі КІ-040-ГОСНІТІ. Перед експериментами проводили тарування машини тертя СМТ-1 (додаток 2.2) щодо навантаження та моменту тертя у статичному режимі, згідно з інструкцією з експлуатації [144].

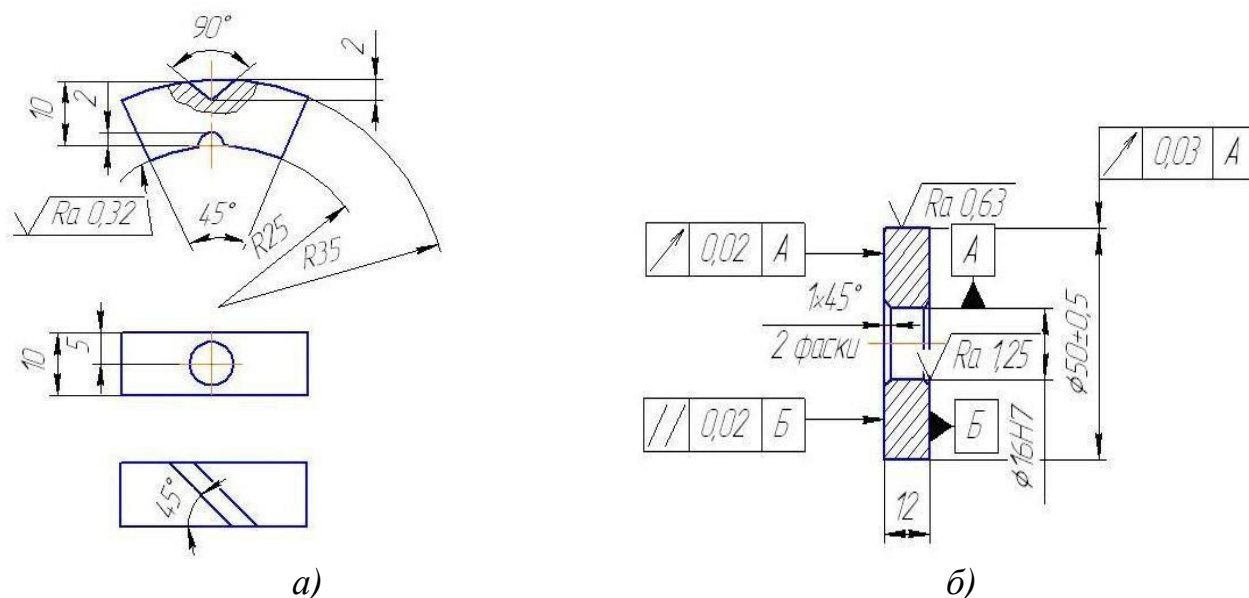


Рисунок 4.7- Геометричні розміри колодки (а) і ролика (б)

Трибологічні випробування зразків для визначення моменту сили тертя та періоду його стабілізації проводили на наступних режимах:

- частота обертання ролика - 191 хв^{-1} ;
- навантаження в зоні тертя - 150 Н;
- час випробування – 60 хв.

Показання моменту сили тертя, температури поверхні тертя, та олії контролювали через кожну хвилину, і їх середня значення заносили до зведеної таблиці.

Протягом опрацювання зразків відбувалася зміна моменту сили тертя. За час опрацювання зразків приймаємо середні значення часу стабілізації моменту сили тертя та температури поверхні тертя зразків .

Випробування визначення сили моменту тертя зі збільшенням

навантаження до задира проводилися протягом 3 год при частоті обертання ролика $n=420 \text{ хв}^{-1}$. (рис.4.8) Ролик встановлювали на вал машини тертя. На ролик встановлювалася зважена колодка з матеріалу, що випробовується, яка притискалася до ролика кареткою машини тертя. Мастило пари тертя здійснювалося зануренням ролика в масляну ванну об'ємом 60 см^3 на глибину 3 мм. Для мастила використовували олії марки M-8B SAE 20W-20, API CB/SD TY-0253-052-04001396-02. Зразки випробовувалися з навантаженням 815 Н, яке прикладали ступенями по 135 Н протягом 0,5 год.

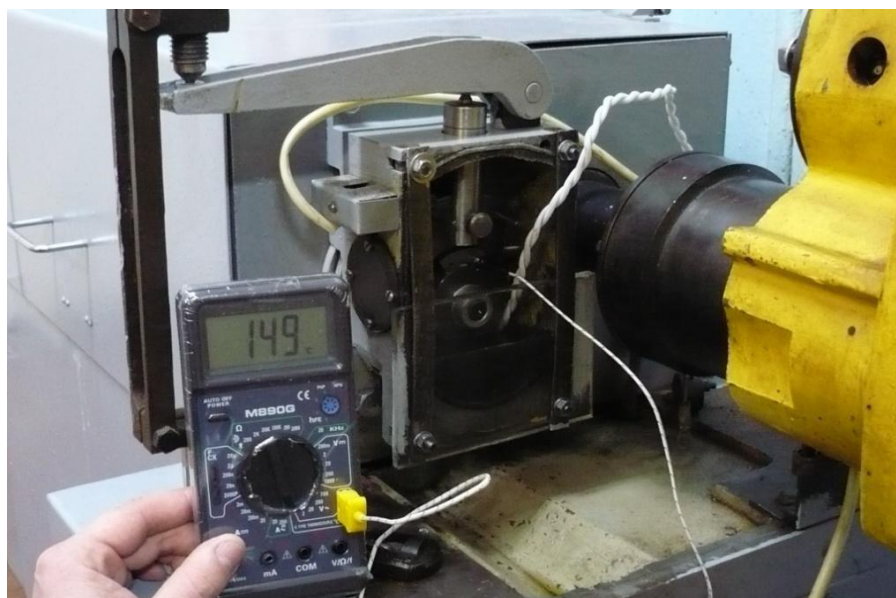


Рисунок 4.8 - Випробувальна камера машини тертя 2070 СМТ- 1

Антифрикційні властивості матеріалів оцінювали за величиною моменту тертя, який визначався по діаграмі, що викреслюється машина тертя. Зміну температури олії під час випробувань реєстрували цифровим мультиметром (тестер) M-890 G, результати вимірювань заносили до зведеної таблиці.

4.2.3. Методика визначення зносу досвідчених зразків і гільзи циліндра ваговим методом

Для визначення ступеня зносу випробуваних зразків і гільз циліндрів використовували ваговий метод.

Зважування досліджуваних колодок проводили на вагах WA-31

виробництва Польща «Zakłady Mechaniki Precyzyjnej» [145] (рис. 4.9 а) з точністю виміру $0,1 \times 10^{-3}$ г. Зважування досліджуваних гільз циліндрів S4 проводили на вагах S9. б) з точністю вимірювання $0,1 \times 10^{-3}$ г.



а)



б)

Рисунок 4.9 - Загальний вигляд ваг: а) WA-31; б) Sartorius CPA 224S

Методика визначення ступеня зносу полягала в визначення ваги зразків перед дослідженням на машині тертя та після досліджень та гільз циліндрів перед моторними дослідженнями та після досліджень.

4.2.4. Методика визначення елементного складу поверхні тертя дослідних зразків

Визначення елементного складу поверхні тертя дослідних зразків проводили за допомогою бездифракційного аналізатора рентгенівського спектрального БАРС-3 [146] (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 - Прилад БАРС -3

Принцип роботи приладу БАРС-3 заснований на зчитуванні іонів металів, що проходять через фільтр (кількість імпульсів), що утворюються при бомбардуванні поверхні зразків α , β , γ випромінюваннями.

Для визначення кількості Fe та Cu зразок без вставки кольорового металу поміщали в камеру та зчитували кількість імпульсів. Потім піддавали аналізу зразки із вставками міді М-1, з різним кутом нахилу. Спочатку знімали показання каналом Fe , а потім імпульсів каналом Cu . Для порівняльних досліджень закривали вставки досліджуваних зразків, повторно знімали кількість імпульсів по каналу Cu , і проводили розрахунок кількості металу, перенесеного зі вставки на поверхню зразка, що трується. Після проведення досліджень зразків на машині тертя проводили повторний аналіз поверхні тертя на кількість перенесеного металу [151].

Кількість імпульсів фону, що видаються, по каналу Fe розраховували за формулою:

$$Z_{Fe} = Z_E - Z_K, \quad (4.2)$$

де Z_E - кількість імпульсів зразка Fe ;

Z_K - кількість імпульсів досліджуваного зразка Fe .

Для визначення кількості перенесеного металу Cu на поверхню тертя зразків проводили тарування приладу за зразками колодок з відомим вмістом металів Fe та Cu .

За розробленою методикою вимірювали кількість імпульсів по каналах Fe . Заміри кожного зразка проводили щонайменше п'ять разів.

Кількість металу вставки, що покрила поверхню тертя зразка, визначали за такою формулою:

$$Z_{Cu} = Z_{KO} - Z_{KЗ}, \quad (4.3)$$

де Z_{KO} - кількість імпульсів досліджуваного зразка;

$Z_{KЗ}$ - кількість імпульсів зразка з закритою вставкою;

на підставі проведених досліджень визначили відсоткове зміст Cu перенесеного на труюся поверхня досліджуваного зразка. Для визначення кількості перенесеного металу на по- верхня проводили тарування приладу з

кількості імпульсів та вагою металу. Дані тарування представлені в додатку 2.3.

4.2.5. Методика мікрометражу гільзи циліндрів

Усі гільзи циліндрів комплекту мають бути однієї розмірної групи. Розмірна група позначається буквою, яка вибита верхньому торці гільзи. Відповідно, на такі ж групи розбиваються і поршні. Якщо меток немає, то індикатором вимірюють внутрішній діаметр гільзи та відносять її до відповідної розмірної групи. Необхідний інструмент для проведення мікрометражу гільзи циліндра подано на рисунку 4.13.

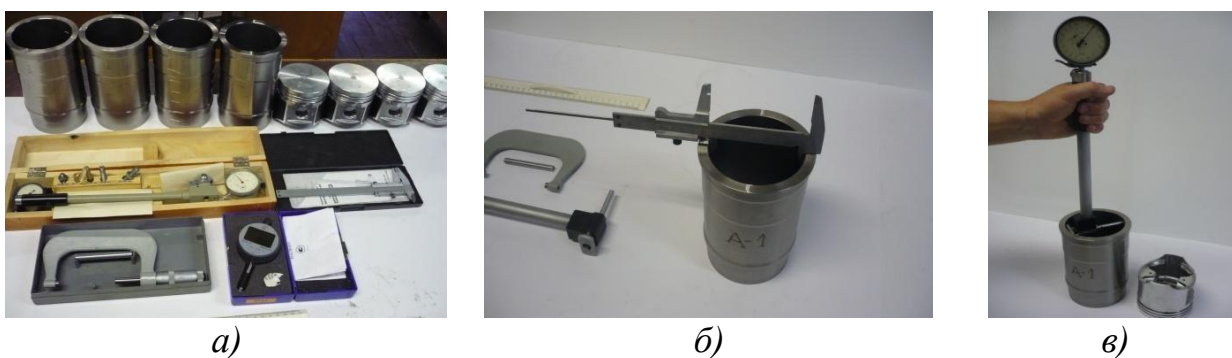


Рисунок 4.13 - Інструмент для проведення мікрометражу гільзи циліндра:
а) вигляд загальний; б) вимірювання внутрішнього діаметра гільзи для підбору змінної вставки; в) вимірювання внутрішнього діаметра гільзи індикаторним нутроміром

Розмірні групи гільз циліндрів повинні задовольняти такі технічні умови:

- 1) внутрішня поверхня гільзи чиста без ризики, задирів;
- 2) овальність і конусність допускається до 0,05 мм на довжині не більше 15 мм від верхнього торця та не більше 60 мм від нижнього торця гільзи;
- 3) при гідравлічному випробуванні гільзи під тиском 0,4 МПа протягом 2 хв текти води і потіння стінок гільзи не допускаються;
- 4) биття посадкових поясів щодо внутрішньої поверхні не повинно перевищувати 0,1 мм;
- 5) гільзи замінюють, якщо знос їх робочої поверхні перевищує 0,2 мм діаметром.

Внутрішній діаметр гільзи вимірювали при допомоги індикаторного нутроміра в наступній послідовності [165]:

- 1) перед зняттям гільзи з двигуном фарбою або крейдою відзначали на ній площину, паралельну осі колінчастого валу;
- 2) ретельно протирали дзеркало циліндра;
- 3) вимірювали лінійкою довжину циліндра і намітили крейдою перерізу, у яких потрібно проводити виміри;
- 4) при дефектуванні циліндра внутрішній діаметр вимірювали у двох взаємно перпендикулярних площинах та трьох перерізах. Вимірювання в крайніх перерізах проводили з відривом 15...20 мм від країв гільзи;
- 5) при визначенні характеру зносу циліндра перший замір проводили в перерізі, що віддалявся від верхнього краю гільзи на 15...20 мм, а решта по всій довжині циліндра з інтервалом 20 мм (рис. 4.14). У кожному перерізі вимір проводили у двох взаємно перпендикулярних площинах (паралельної осі колінчастого валу та перпендикулярної до неї).

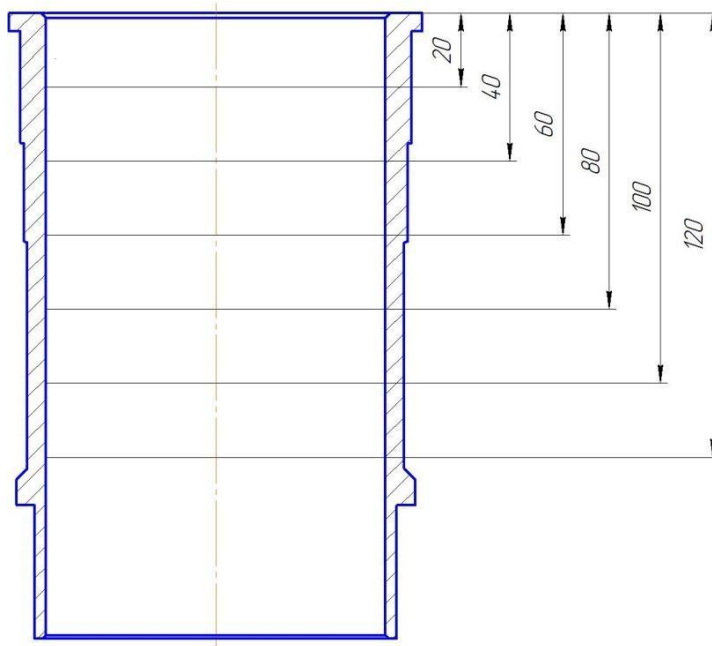


Рисунок 4.14 - Схема мікрометражу гільзи циліндра

- б) готували індикаторний нутромір до роботі:
 - а) підбирали змінну вставку відповідно до діаметра циліндра, наворачали на неї контргайку і завертали в нутромір;
 - б) встановлювали мікрометр на розмір, рівний діаметру циліндра, (вимірюваного штангельциркулем), і закріплювали його шпindel ь стопорний гайкою;

в) встановлювали вимірювальні штифти нутроміра між п'ятою та шпинделем мікрометра і повертали змінну вставку навколо своєї осі до тих пір, поки стрілка індикатора не переміститься на 1...2 обороту. Після цього закріплювали змінну вставку контргайкою та підводили нуль шкали до стрілку індикатора;

7) вимірювали циліндри в площині, паралельною осі колінчастого валу;

8) підраховували діаметр (D) циліндра та знос (I) за перерізом за наступними формулами:

$$D = D_1 - 3_{\text{мм}}, \quad (4.4)$$

де D - діаметр в даної площині і перерізі, мм;

D_1 - діаметр, на який був встановлений нутромір, мм;

$3_{\text{мм}}$ - відхилення стрілки, мм.

4.2.6. Методика прискорених лабораторних випробувань гільз циліндрів на зносостійкість

Для дослідження протизносних та антифрикційних властивостей матеріалів поперечних шарів, робочої поверхні тертя гільзи циліндрів двигуна внутрішнього згоряння було розроблено установку, зображену на рисунку 4.15 [148].

Установка для випробувань зі зворотно-поступальним рухом поршня складається зі зварної рами 1, на якій встановлені електродвигун 2 і редуктор 3. Зверху на рамі встановлені кривошипно-шатунний механізм 4, що забезпечує зворотно-поступальний рух поршня 6 і циліндра 5.

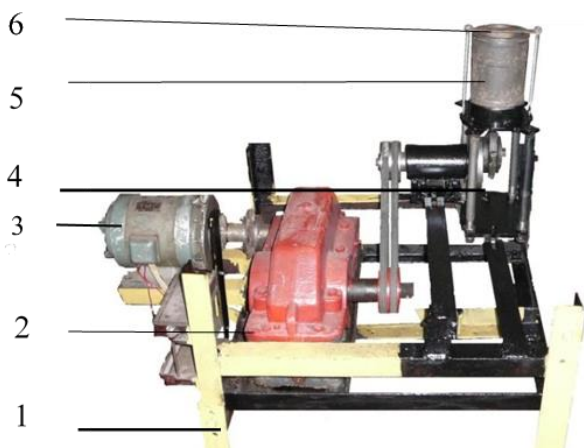


Рисунок 4.15 - Встановлення для прискорених випробувань на зносостійкість гільзи циліндра

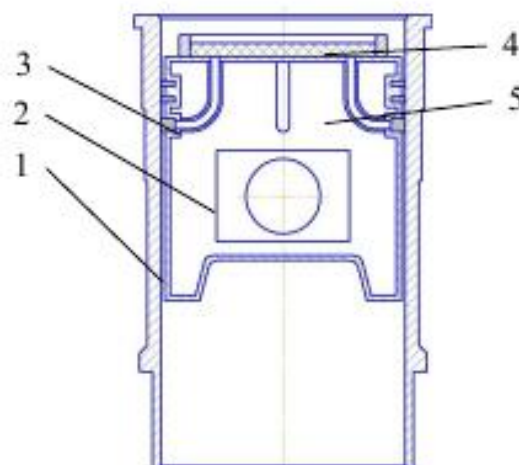


Рисунок 4.16 - Схема змащування робочої поверхні гільзи циліндра

Кінематична схема установки представлена на рисунку 4.17.

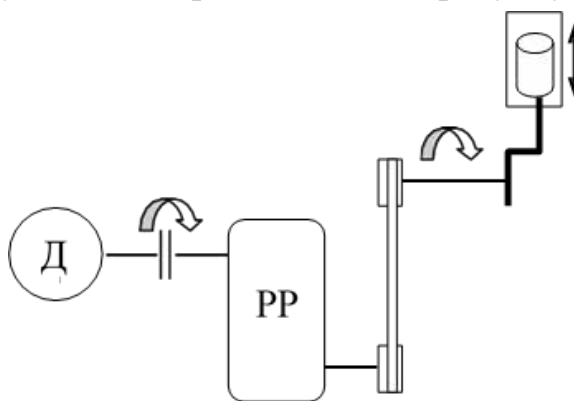


Рисунок 4.17 - Кінематична схема установки для прискорених випробувань гільзи циліндра на зносостійкість

Установка рухається електродвигуном з числом обертів $n=1450 \text{ хв}^{-1}$, $U=220 \text{ В}$ $N=0,25 \text{ кВт}$. Через сполучну муфту обертальний рух передається на редуктор РЦД-250-20 з передатним відношенням $i=2$. Потім за допомогою клинопасової передачі наводиться в рух вал-ексцентрик, який встановлений у корпусі на підшипниках. З валу крутний момент передається на шатун, за допомогою якого наводиться у зворотно-поступальний рух поршень у нерухомо закріпленій, за допомогою кронштейнів, гільзі. Частоту ходів поршня можна регулювати за допомогою набору змінних шківів.

Для прискорення процесу зношування в мастило М-8В₁ додавали мікрошліфпорошок М5 за ГОСТ 3647-80 з величиною зерна 3...5 мкм з розрахунку

0,15 г на 1 кг олії. Олія до робочої поверхні гільзи 1 подавалася з накопичувача 4, встановленого на днищі поршня 2, масляними каналами 5 в зону маслосніжного кільця 3 (рис. 4.16). Випробування тривалістю 20 год проводили при частоті обертання колінчастого валу 2000 хв⁻¹ [152,153].

Зношування зразків гільз по висоті визначали по стандартною методиці [165] нутроміром по індикатору з цифровим індикатор типу ІЧЦ 12,5 і ціною поділу 0,001 мм.

4.3. Методика стендових досліджень

4.3.1. Устаткування і приладове забезпечення

Предметом порівняльних стендових експериментальних досліджень був бензиновий двигун EA113 у штатній (типові гільзи циліндрів) та експериментальній (біметалізовані гільзи циліндрів) комплектації. Всі системи та механізми двигуна були перевірені та відрегульовані відповідно до інструкції з експлуатації автомобілів Volkswagen Golf 4 [54,55].

Моторна встановлення для дослідження роботи двигуна включала (рис.4.18): бензиновий двигун EA113 із системою відведення відпрацьованих газів, стенд гальмівний KI-5543 зі штатними контрольно-вимірювальними приладами (ваговий пристрій гальма, тахометр, датчик тиску масла), а також скомплектований вимірювально-реєструючий комплекс (ІРК).



*Рисунок 4.18 - Загальний вигляд експериментальної моторний установки:
1 - стенд гальмівний KI-5543; 2 - система відведення відпрацьованих газів; 3 –
двигун EA113*

У склад ІРК входили (Рис. 4.20): вимірники температури (тестер - мультиметр М 890 С) навколишнього повітря і експлуатаційних матеріалів (охолоджуючої рідини, моторної олії в головній масляній магістралі, температуру вихлопних газів за допомогою термопари ТХК,), витратомір палива, датчики (ВМТ, позначок зубів маховика, тиску, масової витрати повітря, розрядження, температури охолоджувальної рідини та олії), анало- ЛА-1,5РСІ, персональний комп'ютер на базі Pentium-III з монітором «SAMSUNG», стабілізуючий блок живлення, газоаналізатор Інфракар М1-

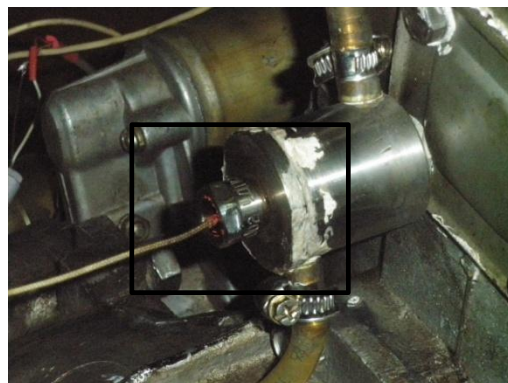


*Рисунок 4.20 - Вимірювально-реєструючий комплекс:
1 - блок харчування; 2 - системний блок з монітором; 3 – АЦП;
4 – газоаналізатор Інфракар М1-0*

Вимірювання тиску газів при індикуванні четвертого циліндра двигуна (як найбільш теплонапруженого) здійснювалося п'єзоелектричним датчиком тиску газів УДПС - 001, що охолоджується (рис. 4.21). Датчик встановлювався у спеціальний перехідник, що повертається в головку циліндрів, і з'єднувався каналом із центральною частиною камери згоряння. Підведення охолоджуючої рідини до датчика здійснювалося від водопровідної мережі. Для перетворення сигналу використовувався АЦП ЛА-1,5РСІ, який встановлювався у ланцюг між датчиком та комп'ютером.



а)



б)

Рисунок 4.21 - П'єзоелектричний датчик тиску газів УДПС-001: а) загальний вигляд; б) місце встановлення

Температура охолоджуючої рідини в системі охолодження, моторної олії в головній масляній магістралі, вихлопних газів контролювали за допомогою термодатчиків (термопар типу ТХК), встановлених у місцях заміру температури (рис. 4.22).



а)



б)



в)

Рисунок 4.22 - Місця установки термодатчиків: а) температури вихлопних газів; б) температури охолоджувальної рідини; в) температури моторного олії

Датчик ВМТ (рис. 4.23) фотоелектричного типу включав фотодіод 3 і лампу розжарювання 4, світловий потік якої в момент знаходження четвертого циліндра в ВМТ перекривався прапорцем 2, закріпленим на шківі 1 приводу вентилятора. Досліджувані аналогові сигнали від датчиків подавались на входи каналів пристрою LA-1,5PCI, який здійснює перетворення вхідних аналогових сигналів у цифрову форму для подальшої обробки комп'ютером.

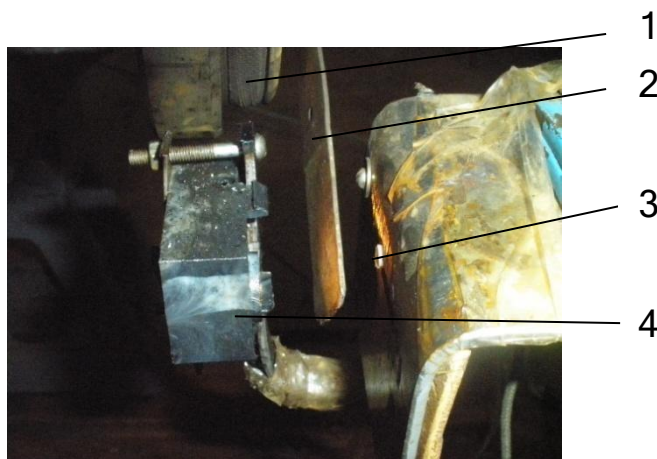


Рисунок 4.23 – Датчик ВМТ фотоелектричного типу (місце встановлення):

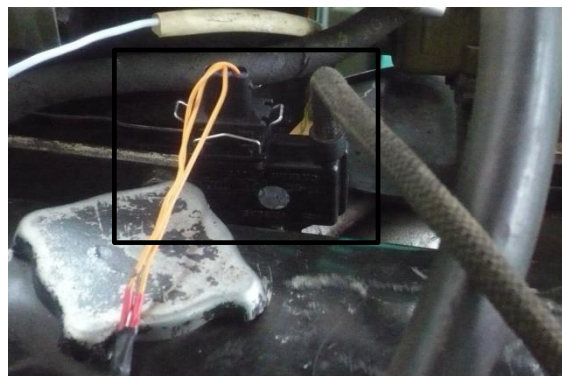
1 - шків; 2 - прапорець; 3 - фотодіод; 4 - лампа розжарювання

Обмін даними аналого-цифрового перетворення між комп'ютером та пристроєм здійснюється через інтерфейс USB комп'ютера [156-158]. Комп'ютер за допомогою спеціальної програми, що входить до комплекту (ADCLab), здійснює обробку даних, що надходять від пристрою даних анало-цифрового перетворення та управління пристроєм через інтерфейс USB. При записі індикаторних діаграм роботи двигуна потрібна довжина кадру встановлювалася за допомогою програми ADCLab у відповідній системі координат, що забезпечує запис 4-х і більше індикаторних діаграм залежно від ступеня стиснення осі ординат.

Контроль витрати об'єму повітря здійснювався за допомогою датчика масової витрати повітря BOSCH 0280218037, який встановлювався безпосередньо на вхідний патрубок повітряного фільтра і датчика розрядження повітря BOSCH 4513829, встановлений за допомогою трійника в трубопровід, що з'єднує карбюратор з розподільником². Спосіб тарування подано на рисунку 4.25, а дані тарування у додатку 2.5 .

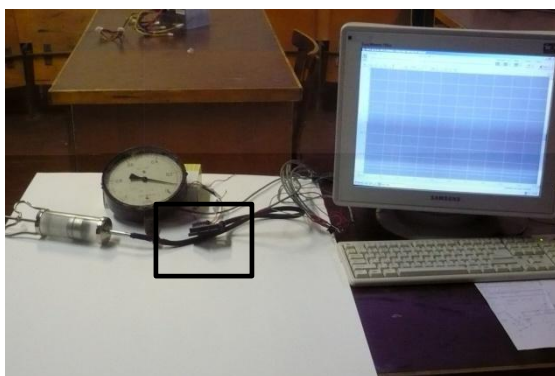


а)



б)

Рисунок 4.24 - Місця установки датчиків контролю витрати обсягу повітря: а) датчик масової витрати повітря; б) датчик розрядження



а)



б)

Рисунок 4.25 - Способи тарування:

а) датчик розрядження BOSCH 4513829; б) датчик масової витрати повітря BOSCH 0280218037

Для перетворення сигналу використовувався АЦП LA-1,5PCI, який встановлювався ланцюг між датчиком і комп'ютером.

Візуальний контроль за наявністю сигналів досліджуваних процесів та їх формою здійснювався на дисплеї комп'ютера. Синхронний запис усіх реєстрованих параметрів та позначок часу проводився на жорсткий носій комп'ютера за допомогою програми-драйвера LA-1, 5PCI.

Для визначення концентрації в відпрацювали газах вуглеводнів (СН, %) і оксиду вуглецю (З, %) використовувався газоаналізатор Інфракар М1-01. Статичне тарування каналів реєстрації тиску газів у циліндрі двигуна проводили на приладі з поршневим манометром наскрізним методом (Додаток 2.6), тобто. знаходилася взаємозв'язок між точними значеннями параметрів, виміряних зразковим манометром та відповідним їм ординатам діаграми тиску, відображається на дисплеї комп'ютера (рис. 4.26).



Рисунок 4.26 - Тарування каналів реєстрації тиску газів

Динамічна тарування каналу реєстрації тиску газів у циліндрі здійснювалася методом прокручування двигуна на динамометричній машині КІ-5543 із записом сигналу тиску газів у циліндрі двигуна та позначок ВМТ на дисплей комп'ютера в інтервалі від максимальної до мінімально стійкої частоти обертання к.в. на неодруженому ходу. Порівняння величин тиску стиснення, отриманих при статичній та динамічній таруванні на постійній частоті обертання, дозволили визначити помилку вимірювання тисків.

Висновки

1. Розроблено загальну програму досліджень, яка включає лабораторні дослідження дослідних зразків, прискорені лабораторні випробування біметалізованих міддю гільз циліндрів на інтенсивність зношування по висоті, стендові дослідження бензинового двигуна ЕА113 та експлуатаційні дослідження автомобіля для порівняльної оцінки роботи бензинового двигуна в штатній комплектації. (біметалізовані міддю гільзи циліндрів).

2. Лабораторні дослідження проводились для оптимізації кута нахилу мідних вставок досліджених зразків і визначення елементного складу поверхні тертя. При цьому використовували машину тертя СМТ-1, аналітичні ваги WA-31, бездифракційний аналізатор рентгенівський спектральний БАРС-3, профілометр ПРОФІ-130.

3. Для дослідження протизносних та антифрикційних властивостей матеріалів поперечних шарів, робочої поверхні тертя гільзи циліндрів було розроблено лабораторну установку для проведення прискорених лабораторних випробувань на інтенсивність зношування гільз циліндрів за висотою.

РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БІМЕТАЛІЗОВАНИХ ПОВЕРХНІВ ТЕРІННЯ

5.1. Результати лабораторних досліджень біметалізованих поверхонь тертя

Згідно з методикою, описаною в розділі 4.2., було проведено порівняльні дослідження зразків матеріалів з біметалізацією поверхні тертя.

Під час досліджень на початковому етапі спостерігається підвищення тертя практично у всіх зразків. Це пояснюється тим, що сполучені деталі зношуються дуже швидко, тому що відбувається обробка поверхонь, що труться. У цей період навантаження сприймається переважно виступами, причому питомі тиски досягають максимальних значень. В результаті порушуються гідродинамічні умови змащення.

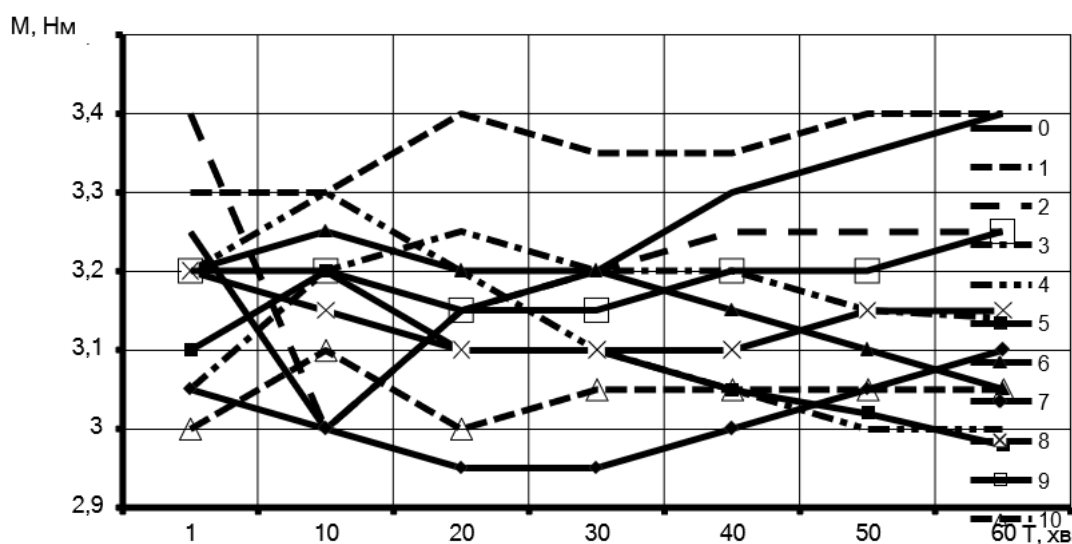


Рисунок 5.1 - Залежність моменту тертя ($M_{тр}$) від часу роботи (t)

Після припрацювання сполучених поверхонь швидкість їх зношування стабілізується або зростає незначно внаслідок згладжування нерівностей на поверхнях, що труться, і зниження питомих тисків (див. додаток 3.1) (Рис. 5.1). Найкращі показники моменту тертя спостерігаються у зразків 4, 5, 6, що мають кут 15° , 20° та 25° . У цих зразків раніше за інших закінчується період підробітку, стабілізація відбувається через 20 хвилин після початку лабораторних досліджень. У суцільного зразка 0 момент тертя протягом усього часу експерименту підвищується. Ці ж показники підтверджуються залежністю температури колодки від часу роботи (Рис. 5.2).

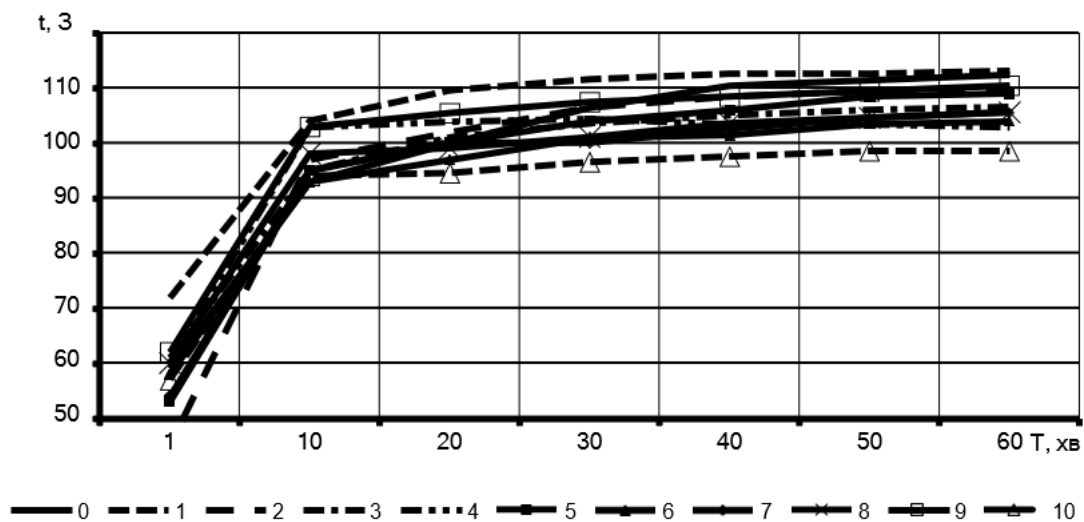


Рисунок 5.2 - Залежність температури колодки (t) від часу роботи (T)
Зношування випробуваних зразків визначали ваговим методом (Рис. 5.3)

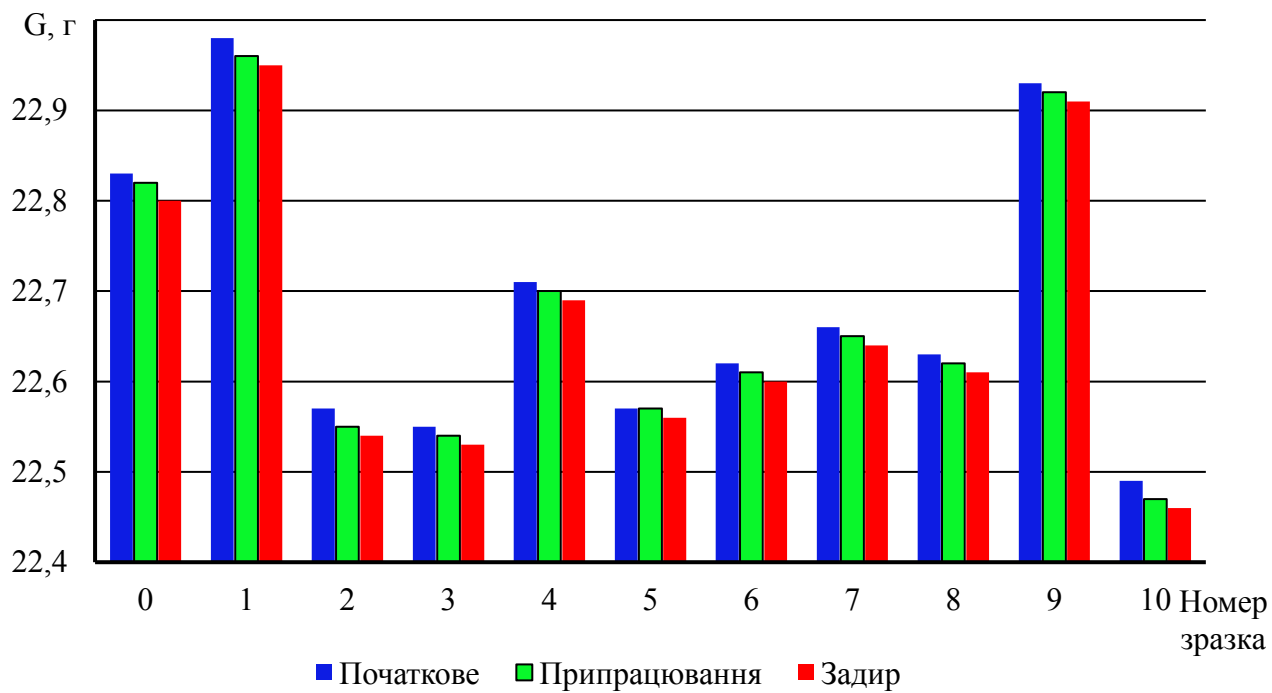


Рисунок 5.3 - Результати зважування дослідних зразків

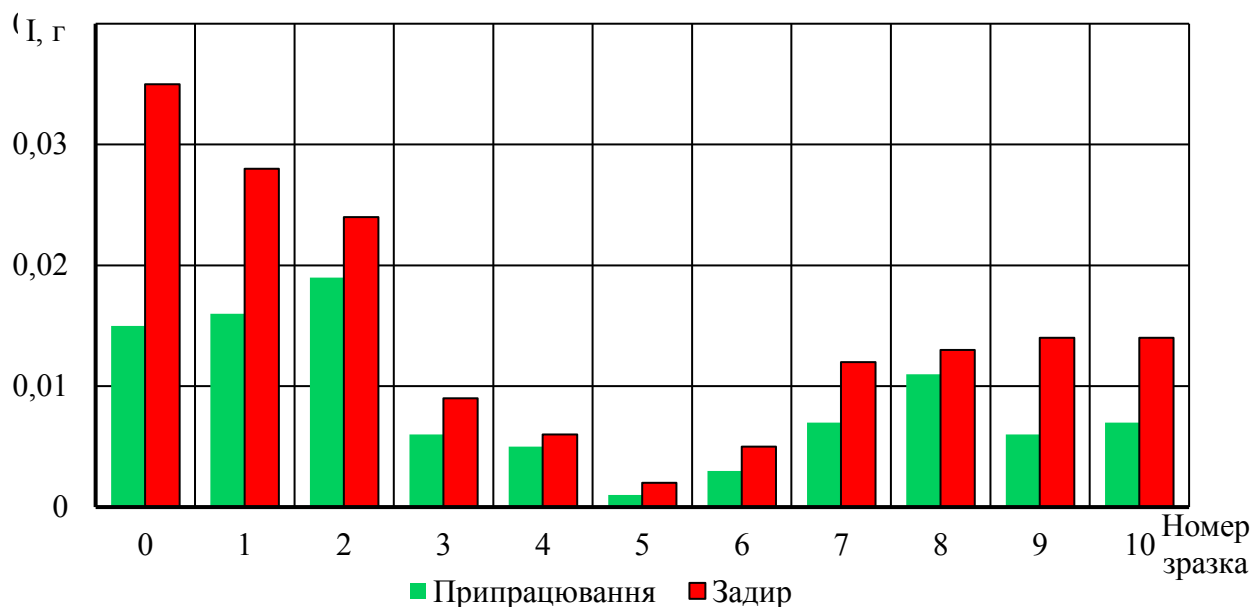


Рисунок 5.4 - Середній знос зразків (I) в період припрацювання і задир

Інтенсивність зношування змінюється в залежності від кута нахилу вставки до ширини зразка (додаток 3.3) (рис. 5.5).

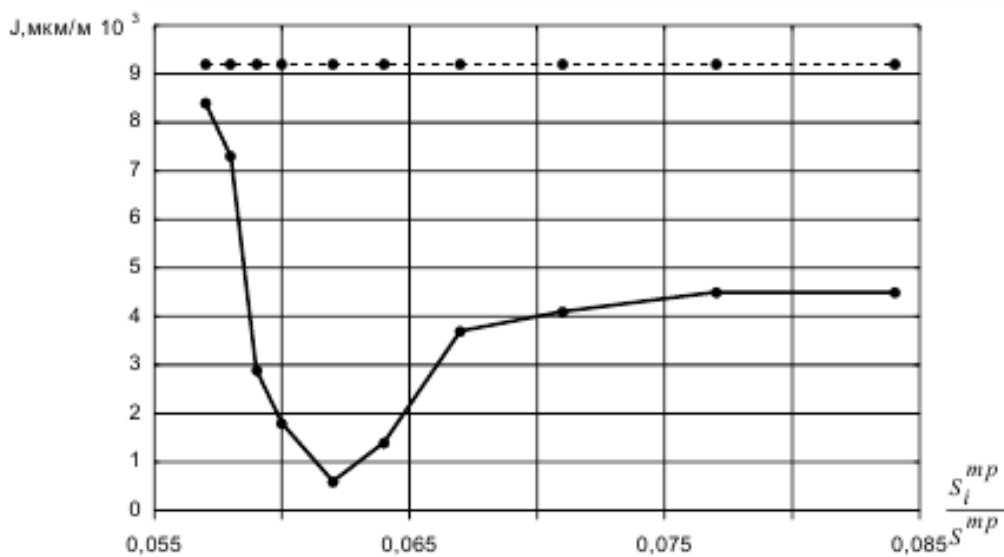


Рисунок 5.5 - Інтенсивність зношування (J) досвідчених зразків

Результати проведених випробувань свідчать про те, що для гільз циліндрів, при куті підйому вставки з міді менше 15° , поршневі кільця проходять зону канавок з ударом, а при куті підйому більше 45° збільшиться закидання масла в камеру згоряння двигуна. Таким чином, раціональний кут нахилу вставки з міді знаходиться в інтервалі $15^\circ \dots 20^\circ$, що забезпечує зниження зносу в середньому в 2,7 рази, інтенсивність зношування на 48...83 %, моменту тертя на 14,7 % [166-

168,170].

У процесі тертя ролика поверхнями зразків на поверхні останніх утворився шар невідомого складу. Для його виявлення, поверхня тертя зразків була досліджено з допомогою аналізатора БАРС-3.

5.2. Результати прискорених лабораторних випробувань гільз циліндрів на зносостійкість

Результати прискорених лабораторних випробувань типової та біметалізованої гільз циліндрів на зносостійкість представлені у додатку 3.6. Інтенсивність зношування гільз циліндрів за висотою представлені на рис. 5.12.

При дослідженні типової гільзи циліндра максимальна інтенсивність зношування J склала у верхній та нижній мертвих точках відповідно $9 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$ і $7,2 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$, відповідних 10 мм від верхнього і 50 мм від нижнього торця гільзи. Найменша інтенсивність зношування $5,1 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$ спостерігали з відривом 70 мм від верхнього торця гільзи.

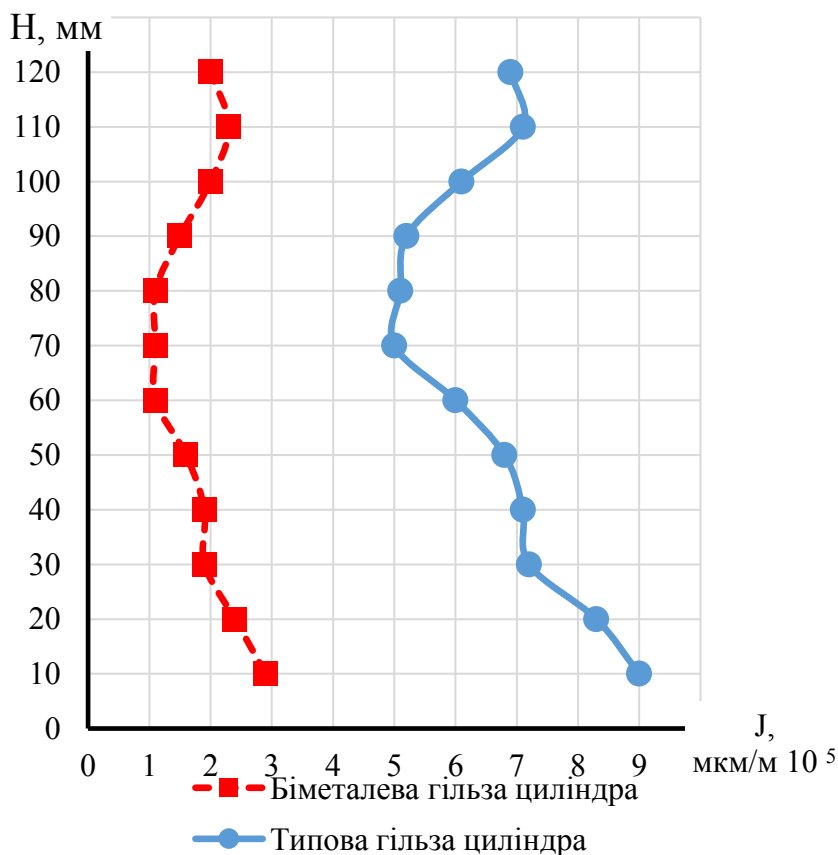


Рисунок 5.12 - Інтенсивність зношування (J) гільз циліндрів по висоті (H – робоча зона)

Дослідження біметалізованою гільзи циліндра показали, що у верхній та нижній мертвих точках інтенсивність зношування складала відповідно $2,8 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$ і $2,4 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$, а в середньої частини гільзи не перевищує $1,5 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$.

Таким чином, на підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що металізація гільзи циліндра вставками міді дозволяє поліпшити змащувальні властивості труться поверхні гільзи циліндра. Це підтверджується зниженням інтенсивності зносу гільзи циліндра в мертвих точках у 3 рази, а в середній частині – у 4 рази [153,173].

5.3. Результати порівняльних стендових досліджень двигуна ЕА113 в штатної комплектації і оснащеного біметалізованими гільзами

Аналіз стендових досліджень показує, що використання біметалізованих гільз циліндрів дозволить покращити потужнісні, паливно-економічні та екологічні показники, а також збільшити ресурс роботи двигуна за рахунок створення в тілі гільзи поперечних шарів з міді.

на рис. 5.13 представлена індикаторна діаграма двигуна, оснащеного типовими і біметалізованими гільзами при частоті обертання колінчастого вала.

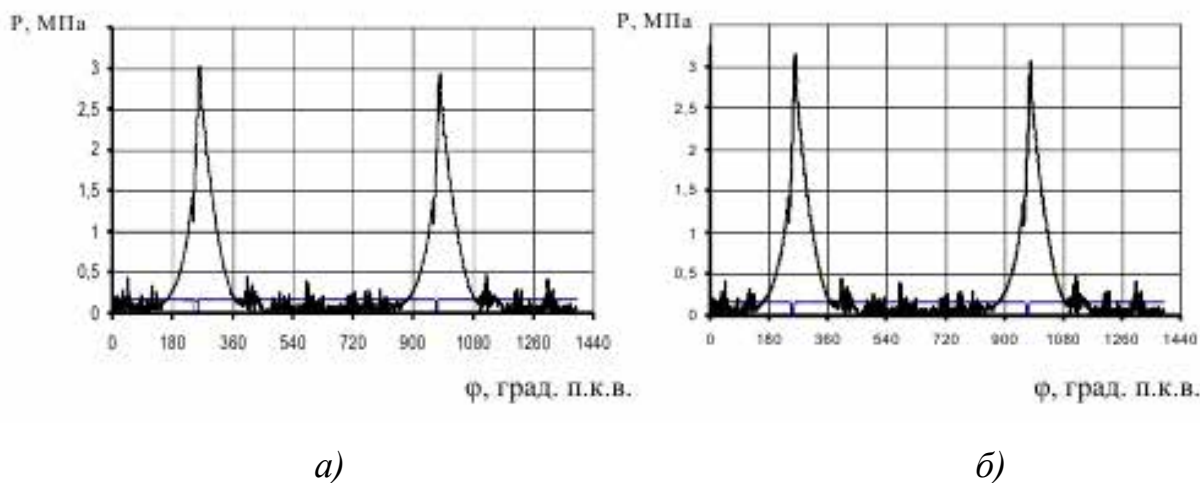


Рисунок 5.13 - Індикаторні діаграми двигуна, оснащеного типовими (а) та біметалізованими (б) гільзами

Аналогічні індикаторні діаграми (Додаток 3.7) знімалися за частоти обертання від 800 хв^{-1} до 4200 хв^{-1} з інтервалом 200 хв^{-1}

Аналіз діаграм показує, що у двигуна, оснащеного біметалізованими гільзами, максимальний тиск газів наприкінці згоряння на 2...5 % вищий, ніж у

двигуна, оснащеного типовими гільзами.

Після проведення стендових досліджень ступінь зносу гільз циліндрів визначали лінійним та ваговим методом (додаток 3.2).

Середні значення зносу за висотою гільз циліндрів представлені рисунку 5.16.

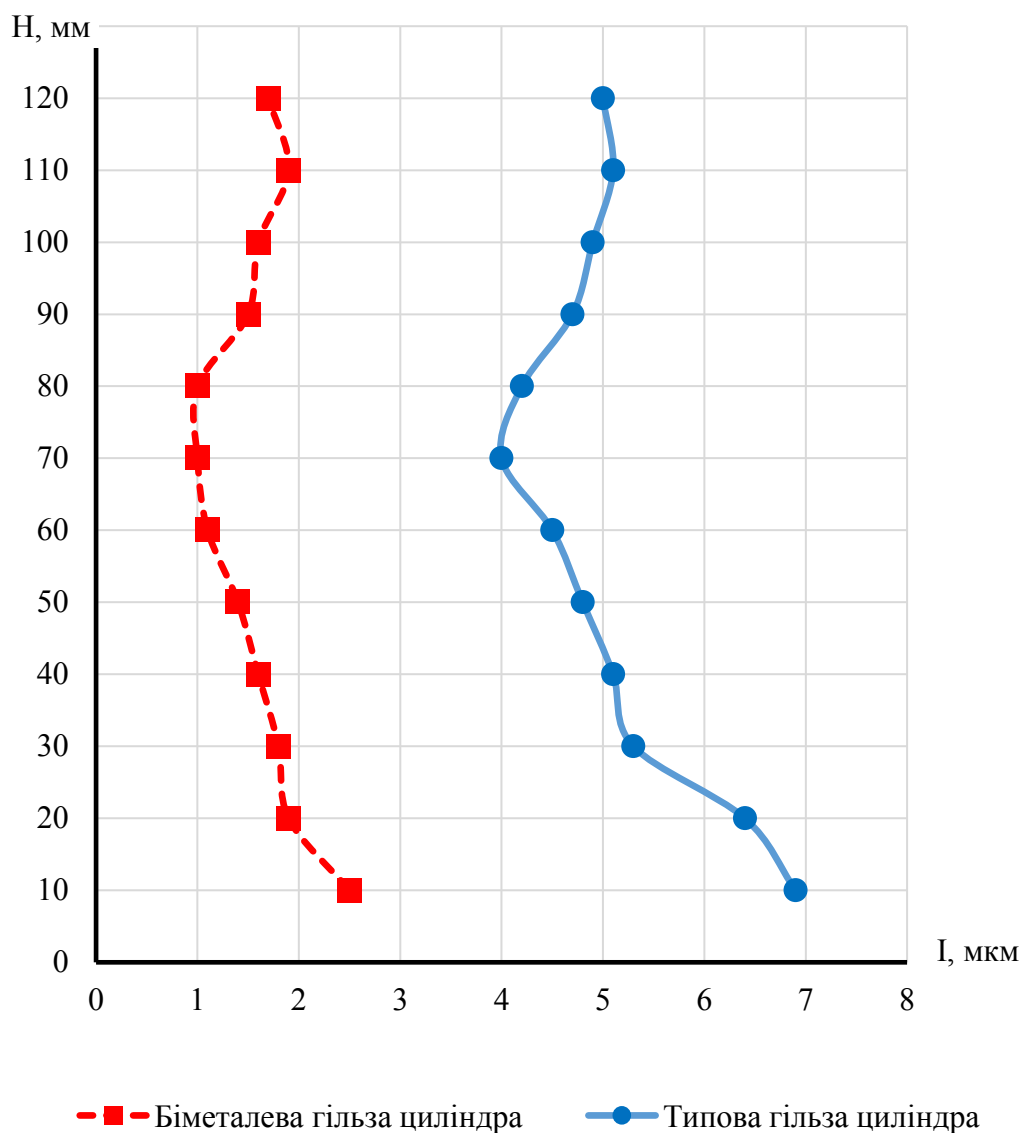


Рисунок 5.16 - Зношування (I) по висоті гільзи циліндрів (H)

Встановлено, що середній максимальний знос I типових гільз циліндра склав у верхній та нижній мертвих точках відповідно 6,9 мкм та 5,2 мкм, відповідних 10 мм від верхнього та 50 мм – від нижнього торця гільзи (рис. 5.16). Найменший знос склав 4,1 мкм на відстані 70 мм від верхнього торця гільзи, у верхній та нижній мертвих точках знос склав відповідно 2,5 мкм і 1,8 мкм, а в середньої

частини гільзи не перевищив 1,2 мкм.

За отриманими даними побудовано гістограми результатів зважування типових та біметалізованих гільз циліндрів (рис. 5.17).

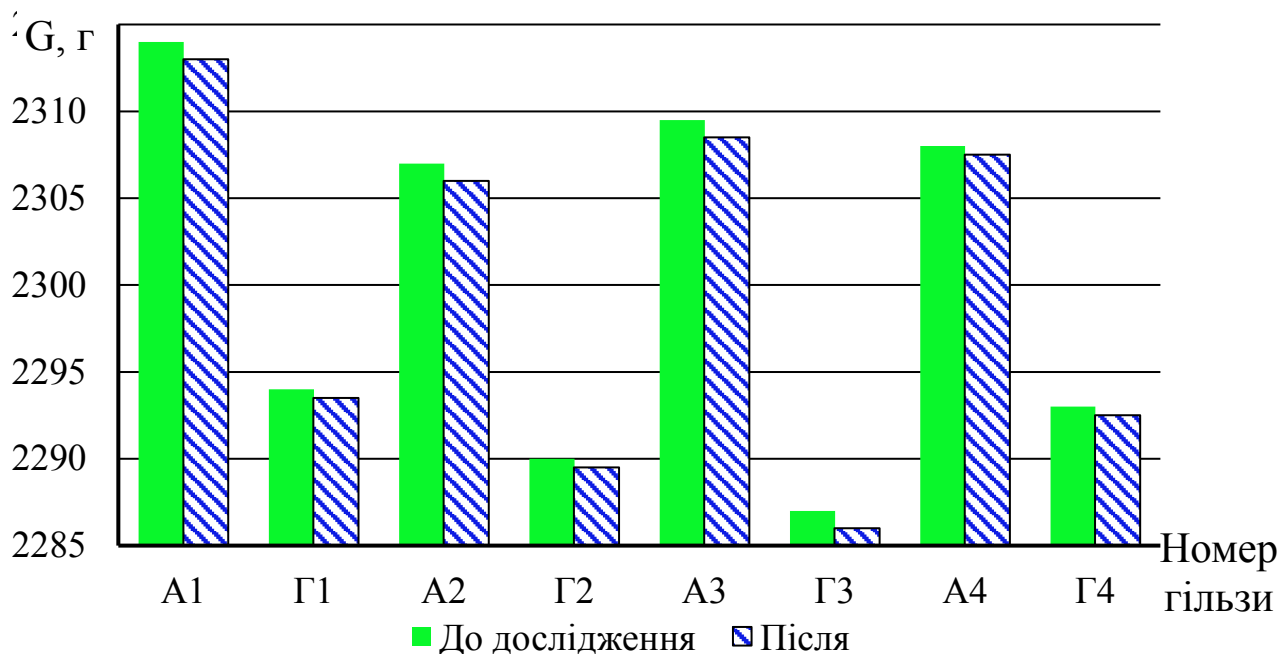


Рисунок 5.17 - Результати зважування (G) гільз циліндрів: А 1,2,3,4 типові гільзи; Г 1,2,3,4 біметалізовані гільзи

У ваговому відношенні середнє зношування типових гільз становило 1,12 г, а з біметалізованою поверхнею тертя 0,33 г, то є в 3,4 рази менше (рис. 5.18).

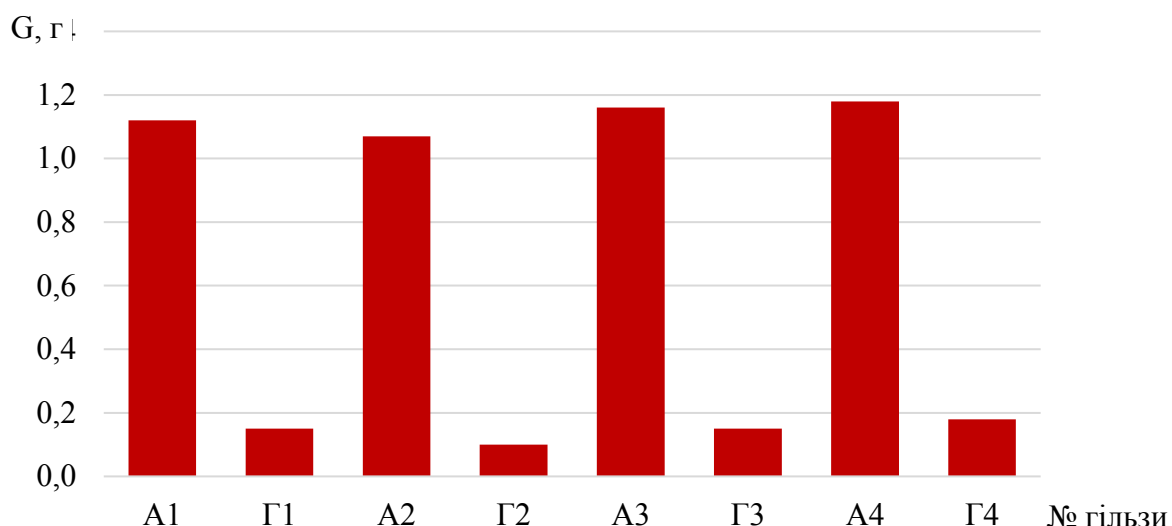


Рисунок 5.18 - Середній знос (I) гільз циліндрів: А 1,2,3,4 типові гільзи; Г 1,2,3,4 біметалізовані гільзи

Зменшення зносу біметалізованої гільзи циліндра зумовлене утворенням на поверхні тертя антифрикційної плівки та зниженням коефіцієнта тертя.

Висновки

1. За результатами лабораторних досліджень можна зробити такі висновки:

- дослідні зразки з кутами нахилу вставки міді в інтервалі $15^{\circ} \dots 20^{\circ}$ забезпечили зниження зносу в середньому 2,7 раза, інтенсивності зношування на 48...83 %, моменту тертя на 14,7 % порівняно з суцільним зразком;
- дані рентгенівського спектрального аналізу поверхонь тертя біметалізованих зразків свідчать про наявність на поверхні міді, що труться;
- спостерігається зменшення шорсткості у біметалізованих зразків на 12,5 % порівняно із суцільним.

2. На підставі проведених прискорених лабораторних випробувань гільз циліндрів на зносостійкість можна зробити висновок, що біметалізація гільзи циліндра вставками міді дозволяє знизити інтенсивність зношування гільзи циліндра в мертвих точках в 3 рази, а в середній частині - в 4 рази порівняно з типовою гільзою.

3. Результатами порівняльних стендових досліджень двигуна EA113 встановлено, що середній знос біметалізованих міддю гільз циліндрів менший у 3,4 рази порівняно з типовими. Використання біметалізованих гільз циліндрів дозволяє підвищити ефективну потужність на 4,8 %, зменшити годинний і питомий витрати пального відповідно на 4,8 % і 9,1 %, а також знизити вміст у газах, що відпрацювали, оксиду вуглецю на 10 % і вуглеводнів з 8 %.

РОЗДІЛ 6. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АВТОМОБІЛЯ VOLKSWAGEN GOLF 4 З ДВИГУНОМ, ОСНАЩЕНИМ БІМЕТАЛІЗОВАНИМИ ГІЛЬЗАМИ ЦИЛІНДРІВ

Економічну ефективність роботи автомобіля при роботі двигуна з біметалізованими гільзами циліндрів визначали шляхом порівняння витрат на експлуатацію автомобіля за двома варіантами: базовим (при роботі двигуна з типовими гільзами циліндрів) та впроваджуваному (з біметалізованими гільзами) та використанням діючих значень, вартості палива та дослідного зразка (біметалізована гільза циліндрів).

Величину річної витрати палива за базовою та впроваджуваною варіантами приймаємо за фактичною витратою, отриманою в результаті експлуатаційних досліджень автомобілів Volkswagen Golf 4 .

Таблиця 6.1 – Економічна ефективність застосування біметалізованих гільз циліндрів

Показники	Вид гільзи		Різниця, +/-
	типова	біметалі- зійована	
Середньорічний пробіг, км	45000	45000	-
Витрати на виготовлення мотор-комплекту біметалізованих гільз циліндрів, грн.	-	415	
Витрати на заміну ЦПГ, грн.	4000	4415	+ 415
Витрата палива, л/100 км	15,7	15,1	- 0,6
Витрати на паливо, грн.	157550	151528,5	- 6022
Наведені витрати, грн.	47001	47407	+ 406
Річна економія, грн.	-	6511	+ 6511
Термін окупності додаткових витрат, років	-	0,7	-

Висновки

Розрахункова річна економія від використання на автомобілі Volkswagen Golf 4 з двигуном EA113 , оснащеного біметалізованими міддю гільзами циліндрів, складе 6511 грн., Отримана за рахунок зниження витрат на паливо на 4% (без урахування підвищення експлуатаційної потужності та зниження шкідливих речовин у відпрацьованих газах). Термін окупності додаткових витрат 0,7 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. З теоретичного аналізу процесу взаємодії поверхонь, що труться, випливає, що для здійснення зовнішнього тертя необхідно, щоб міцність на зсув тонкого поверхневого шару була б меншою за міцність основного матеріалу.

Теоретично обґрунтовано форму, геометричні розміри та необхідну кількість канавок на робочій поверхні тертя гільз циліндрів, заповнених міддю. Кут нахилу кільцевої канавки до діаметральної площини циліндрів гільзи $17,2^\circ$. Ширина та глибина канавки рівні між собою і становлять 1,5 мм. Товщина антифрикційної плівки на поверхні тертя гільзи розміром 2...3 мкм забезпечується 6 кільцевими канавками, що відповідає не менше 8,3 % площі канавок, заповнених міддю, до площі робочої поверхні тертя гільзи циліндрів. У відповідності з проведеними розрахунками лінійне зношування біметалізованої гільзи циліндрів у 3,1 рази нижче, ніж у типової гільзи.

2. Результати лабораторних досліджень свідчать, що дослідні зразки з кутами нахилу вставки міді в інтервалі $15^\circ \dots 20^\circ$ забезпечують зниження зносу в середньому 2,7 рази, інтенсивності зношування на 48...83 %, моменту тертя на 14,7 % проти суцільним зразком.

Дані рентгенівського спектрального аналізу поверхонь тертя біметалізованих зразків підтверджують наявність на поверхні міді, що труться.

Спостерігається зменшення шорсткості у біметалізованих зразків на 12,5 % порівняно із суцільним.

3. Розроблено технологічний процес виготовлення біметалізованої міддю гільзи циліндрів, на робочій поверхні якої виконуються канавки у вигляді трьох рядів замкнутих кілець окремих один від одного, кутами підйому 17° до діаметральної площині гільзи і кроком 13 мм.

Проведені лабораторні порівняльні прискорені випробування гільз циліндрів на зносостійкість підтверджують, що біметалізація гільзи циліндра вставками міді дозволяє знизити інтенсивність зношування гільзи циліндра в середньому в 3 рази.

4. Результатами порівняльних стендових досліджень двигуна ЕА113 встановлено, що середній знос біметалізованих міддю гільз циліндрів менший у

3,4 рази порівняно з типовими. Використання біметалізованих гільз циліндрів дозволяє підвищити ефективну потужність на 4,8 %, зменшити годинний і питомий витрати пального відповідно на 4,8 % і 9,1 %, а також знизити вміст у газах, що відпрацювали, оксиду вуглецю на 10 % і вуглеводнів з 8 %.

5. Використання на автомобілі Volkswagen Golf 4 двигуна EA113 , оснащеного біметалізованими міддю гільзами циліндрів, дозволяє отримати річну економію 6511 грн., за рахунок зниження витрат на паливо на 4% (без урахування підвищення експлуатаційної потужності та зниження шкідливих речовин у відпрацьованих газах). Термін окупності додаткових витрат 0,7 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамчук Ф.Е Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є. Автомобільні двигуни. 4-те вид. Київ: Арістей, 2009. 476 с.
2. Абрамчук ФТ., Марченко А.П., Разлейцев Н.Ф., Третьак Е.И., Шеховцов А.Ф., Шокотов Н.К. Сучасні дизелі: підвищення паливної економічності й тривалої міцності; за заг. ред. Шеховцова А.Ф. Київ: Техника, 1992. 272 с.
3. Автомобільні двигуни. Тепловий, кінематичний та динамічний розрахунок двигуна з використанням програми MathCAD / Укл. Магопець С.О, Красота М.В., Бевз О.В., Шепеленко І.В., Матвієнко О.О., та ін. Кіровоград: КНТУ, 2014. 82 с.
4. Аналітична хімія / А.С.Алемасова, В.М.Зайцев, Л.Я.Єнальєва, Н.Д.Щепіна, С.М.Гождзінський; за ред. В.М. Зайцева. Донецьк: ДонНУ, 2009. 415 с.
5. Березуцький В.В., Адаменко М.І. Небезпечні виробничі ризики та надійність. Харків: ФОП Панов А.М., 2016. 385 с.
6. Білоусов Є.В., Савчук В.П., Курносенко Д.В., Сатулов А.І. Експериментальні дослідження впливу типових несправностей на функціональні параметри систем змащування високообертових дизелів. *Водний транспорт*. 2023. № 2 (38). С. 128-141. DOI: doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.14 (дата звернення: 25.08.2024)
7. Божидарнік В.В., Гусєв А.П. Основи технології виробництва і ремонту автомобілів. Луцьк: Надстир'я, 2007. 320 с.
8. Волков В.П., Матейчик В.П., Никонов О.Я., Комов П.Б., Грицук И.В. Інтеграція технічної експлуатації автомобілів у структуру та процеси інтелектуальних транспортних систем: монографія. Донецьк: Изд-во «Ноулідж», 2013. 400 с.
9. Гащук П.М., Нікіпчук С.В. Моделювання теплообмінних процесів, що перебігають в циліндрах двигуна внутрішнього згоряння. *Пожезжна безпека*. 2018. №33. С. 15-34. DOI: [10.32447/20786662.33.2018.03](https://doi.org/10.32447/20786662.33.2018.03) (дата звернення: 25.08.2024)

10. Герасимчук О.М. Розрахунок та вибір посадок з натягом. Електронне навальне видання. Київ, Політехника, 2010. 26 с.
11. Гіхман И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ: Вища школа, 1988. 439 с.
12. Глазурін О.І. Механічні коливання й хвилі. Профільний рівень. Харків: Основа, 2013. 77 с.
13. Говорущенко Н.Я., Гогайзель А.В., Климец Б.И. Основи експлуатаційної діагностики. Харків: Вища школа, 1967. 132 с.
14. Горкавий В., Ярова В. Математична статистика. Київ.: ВД "Професіонал", 2004. 3 84 с.
15. Гутаревич Ю.Ф., Мержиєвська Л.П., Сирота О.В., Тріфонов Д.М.. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні). Принцип роботи та особливості будови. Київ, НТУ, 2015. 244 с.
16. Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.В., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мержиєвська Л.П. Екологія та автомобільний транспорт. Київ: Арістей, 2006. 293с.
17. Двигуни внутрішнього згоряння. Т.1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / А.П. Марченко, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцов; за ред. проф. А.П. Марченка, засл. діяча науки України, проф. А.Ф. Шеховцова. Харків: Видави, центр НТУ "ХШ", 2004. 491 с.
18. Двигуни внутрішнього згоряння. Т.3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ. /А.П. Марченко, А.Ф. Шеховцов; за редакцією А.П. Марченка, Харків: Видави, центр НТУ "ХШ", 2004. 427 с.
19. Двигуни внутрішнього згоряння. Т.2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / А.П. Марченко, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцов; за ред.: А.П. Марченко, А.Ф. Шеховцова. Харків: Прапор, 2004. 288 с.
20. Двигуни внутрішнього згоряння. Т.4. Основи САПР ДВЗ / В.О.Пильов, А.Ф. Шеховцов; За ред. А.П.Марченка. Харків, Прапор, 2004. 336с.
21. Двигуни внутрішнього згоряння. Т.5. Екалогізація ДВЗ / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, Л.Л. Товажнянський, А.Ф. Шеховцов; За ред. А.П.Марченка, А.Ф. Шеховцова. Харків, Прапор, 2004. 3 60 с.

22. Двигуни внутрішнього згоряння: Т.6. Надійність ДВЗ / Ф.І. Абрамчук, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцов, за редакцією проф. А.П. Марченка, Харків: Видави, центр НТУ “ХПІ”, 2004. 423с.

23. Диха О.В. Граничне змащування в трибосистемах ковзання двигунів автомобілів. *Проблеми трибології*, 2017. № 3. С. 39-45.

24. Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. Триботехніка та основи надійності машин. Київ: Інформавтодор, 2006. 216 с.

25. Долганов К.Є., Лісовал А.А. Автоматичне регулювання двигунів внутрішнього згоряння. Київ: НТУ, 2003. 138 с.

26. ДСТУ EN 1679-1:20. Двигуни внутрішнього згоряння поршневі. Безпека. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2020. 44 с.

27. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 23 с.

28. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 16 с.

29. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Видання офіційне. Київ: Держстандарт, 1994. 16 с.

30. ДСТУ 3433-96 (ТОСТ 27.005-97) Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1996. 58 с.

31. ДСТУ 3493-96. Системи вентиляційні, фільтри повітряні. Типи і основні параметри. Київ: Держспоживстандарт України, 1997. 18 с.

32. ДСТУ 3514-97. Статистичні методи контролю та регулювання. Терміни та визначення. Київ.: Держстандарт України, 2001. 60 с.

33. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. Видання офіційне. Київ: Держстандарт України, 2011. 30 с.

34. ДСТУ 4488:2005. Нафта і нафтопродукти. Методи відбирання проб. Київ.: Держстандарт України, 2005. 33 с.

3. 8. ДСТУ EN ISO 723 5:20 Акустика. Лабораторні методики вимірювань для глушників і розподільників повітря. Внесені втрати, шумові втрати потоку і

загальні втрати тиску. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2020. 82 с.

39. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні Євро. Технічні умови. Відповідає офіційному тексту. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 15 с.

40. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне Євро. Технічні умови. Видання офіційне. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 16 с.

41. ДСТУ ISO 683-17:2008. Сталі термооброблені, леговані та автоматні. К.: Держспоживстандарт України, 2013. 25 с.

42. Дяченко В.Г. Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія / В.Г. Дяченко, за ред. А.П.Марченка. Харків: НТУ «ХШ», 2008. 488 с.

43. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.

44. Захарчук В.І. Основи теорії та конструкції автомобільних двигунів. Київ: Каравела, 2022. 232 с.

45. Зіонг Н.В., Білогуб О.В. Визначення граничних умов для розрахунку термонапруженого стану поршня. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*.

2019. No 1(153). С. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2019.1.04> (дата звернення: 12.07.2024)

46. Кашканов А.А., Кужель В.П., Грисюк О.Г. Інформаційні комп'ютерні системи автомобільного транспорту. Вінниця: ВНТУ, 2010. 230 с.

47. Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В. Трибологія. Київ: НАУ, 2009. 392 с.

48. Кисликов Ф., Лущик В. Будова та експлуатація автомобіля. 6-те вид. Київ: Либідь, 2006. 400 с.

49. Коваленко В.М., Щуріхін В.К. Діагностика і технологія ремонту автомобілів. Київ: Літера ЛТД, 2017. 224 с.

50. Косенко В.А., Кущевська Н.Ф., Добровольський О.Г., Малишев В.В. Матеріали та матеріалознавство в автомобільному транспорті. Київ: Університет "Україна", 2015. 314 с.

51. Лабай В.Й. Тепломасообмін. Львів: Тріада Плюс, 2004. 260 с.

52. Левтеров А.М., Левтерова Л.И. Аналіз математичних моделей

механізму сажеутворення при спалюванні вуглеводневих палив. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2013. №5 (979). С. 130-141.

53. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: Технологія. Київ: Вища шк., 2007. 527 с.

54. Малишев В.В., Крєтов В.В., Гладка Т.М. Технічна термодинаміка та теплопередача. Київ: Університет “Україна”, 2015. 258 с.

55. Мігаль В.Д. Технічна діагностика автомобільних двигунів. Т. 3. Практичні основи діагностування. Харків: Майдан, 2014. 444 с.

56. Павленко П.М., Філоненко С.Ф., Чередніков О.М., Трейтяк В.В. Математичне моделювання систем і процесів. Київ: НАУ, 2017. 392 с.

57. Павлишин В.І., Довгий С.О. Мінералогія. Частина 1. Київ: КНТ, 2019. 536 с.

58. Павлюк О.М., Медиковський М.О., Лиса Н.К., Ізонін І.В. Основи теорії надійності технічних систем. Львів: Львівська політехніка, 2021. 208 с.

59. Петко І.В., Бондаренко М.Й., Кострицький В.В. Розрахунок та конструювання електромеханічних пристроїв: навчальний посібник. Київ: КНУТД, 2016. 328 с.

60. Піддубний І.М., Кубіч В.І., Коробочка А.Н. Зносостійкість зміцненої фаски клапана та параметри контактної взаємодії елементів трибосполучення «фаска клапана-сідло». *Проблеми трибології*. 2013. №1. С. 127-134.

61. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. 2-ге вид.; за ред. Г.С.Писаренка. Київ: Вища шк., 2004. 655 с.

62. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту. Нормативний документ Мінтранспорту України. Положення. Київ: Міністерство транспорту України, 1998. 16 с.

63. Популярні моделі авто. Головки блоку циліндрів та їх частини (ГБЦ). Інтернет магазин Exist.ua. URL: <https://exist.ua/golovki-blokacilindrov-chasti-gbc/> (дата звернення: 09.06.2024).

64. Порядок перевірки технічного стану транспортних засобів автомобільними перевізниками. Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 05 серпня 2008 року № 974, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 01 вересня 2008 року за № 794/15485.

65. Правила експлуатації колісних транспортних засобів. Про затвердження Правил експлуатації колісних транспортних засобів. Наказ Міністерства інфраструктури України від 26.07.2013 № 550. 13 с. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/zl453> (дата звернення: 09.06.2024).

66. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Рівне: НУВГП, 2008. 250 с.

67. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.

68. Стоєв П.І., Литовченко С.В., Гірка І.О., Грицина В.Т. Хімічна корозія та захист металів. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.

ДОДАТКИ