

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра інжинірингу технічних систем

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ  
АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгМ-3-23  
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

\_\_\_\_\_Кавун Володимир Володимирович

**Керівник:** \_\_\_\_\_Васильєв Дмитро Леонідович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_Лисиця Микола Іванович

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: Інжинірингу технічних систем

Освітній ступінь: "Магістр"

Спеціальність: 208 "Агроінженерія"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

К.Т.Н. ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

” ” ” 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кавунові Володимирові Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання процесів зношування вузлів тертя автотракторних двигунів

керівник роботи д.т.н. доц. Васильєв Д.Л.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 12.11.2024 року  
№ 3784

2. Строк подання студентом роботи до 1.10.2024

3. Вихідні дані до роботи Фізико-механічні характеристики матеріалів (твердість, міцність, складання, зношуваність) Технічна документація на автотракторні двигуни, Програмне забезпечення для математичного моделювання, Технічні параметри вимірювальних приладів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сучасні уявлення про проблему зносу сполучень тертя Двигунів внутрішнього згорання. 2. Теоретичні передумови процесів зношування та підвищення ефективності роботи вузлів тертя автотракторного двигуна 3. Методика та результати експериментальних досліджень. 4. Безпека праці. 5. Економічна оцінка роботи. Загальні висновки. Література. Додатки

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема (1 слайд, А4). 2. Мета і задачі досліджень (1 слайд, А4). 3. Аналіз існуючих теорій тертя (1 слайд, А4). 4. Розподіл зносу шийок колінчатого валу (1 слайд, А4). 5. Дефекти колінчастих валів (1 слайд, А4). 6. Блок схема побудови м етодики зносу(1 слайд, А4). 7. Обладнання та зразки (1 слайд, А4). 8, 9, 10 Результати експериментальних досліджень (3 слайди, А4). 11. Економічні показники (1 слайд, А4). 12. Висновки (1 слайд, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ         | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|----------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| 1, 2,3, 4, 5   | Васильєв Д.Л., д.т.н., доцент             |                |                  |
| Нормоконтролер | Івлєв В.В., к.т.н., доцент                |                |                  |
|                |                                           |                |                  |
|                |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту                | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Аналітичний розділ дослідження                 | до 2.10.2024                  |          |
| 2     | Теоретична основа дослідження                  | до 26.10.2024                 |          |
| 3     | Практичне підтвердження результатів            | до 16.11.2024                 |          |
| 4     | Розділ з охорони праці та забезпечення безпеки | до 21.11.2024                 |          |
| 5     | Економічний аналіз ефективності                | до 26.11.2024                 |          |
| 6     | Презентація результатів дослідження            | до 2.12.2024                  |          |
|       |                                                |                               |          |
|       |                                                |                               |          |
|       |                                                |                               |          |
|       |                                                |                               |          |

Студент

\_\_\_\_\_ Кавун В.В. \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Васильєв Д.Л. \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)



## РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена дослідженню та моделюванню процесів зношування вузлів тертя автотракторних двигунів внутрішнього згорання. У роботі проаналізовано сучасні підходи до вивчення механізмів зносу, наведено теоретичні основи та експериментальні методи визначення зношування. Особлива увага приділяється технології фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО), яка демонструє значний потенціал у підвищенні ресурсу деталей двигунів.

Результати експериментальних досліджень включають аналіз коефіцієнта тертя, шорсткості поверхонь тертя та динаміки зношування залежно від часу. В роботі уточнено модель зношування підшипникових вузлів ковзання, а також обґрунтовано техніко-економічну ефективність впровадження технології ФАБО.

Особливу увагу приділено питанням охорони праці під час експериментальних досліджень і розробці організаційно-технологічних заходів безпеки. Робота містить рекомендації щодо застосування отриманих результатів у практиці відновлення і вдосконалення вузлів тертя автотракторних двигунів.

Результати дослідження мають як наукову, так і прикладну цінність, дозволяючи суттєво знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність роботи двигунів.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                                           | 9  |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ПРОБЛЕМУ ЗНОСУ СПОЛУЧЕНЬ<br>ТЕРТЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ.....                                  | 11 |
| 1.1. Загальні відомості .....                                                                                                         | 11 |
| 1.2. Загальні характеристики зносу поверхонь тертя.....                                                                               | 12 |
| 1.3. Огляд методів визначення зносу .....                                                                                             | 15 |
| 1.3.1. Втомна теорія зносу .....                                                                                                      | 15 |
| 1.3.2. Зношування з позицій енергетичних теорій зношування.....                                                                       | 16 |
| 1.3.3. Прогнозування зносу за методом «ІВМ» .....                                                                                     | 17 |
| 1.4. Експериментальні методи визначення зношування.....                                                                               | 18 |
| 1.5. Висновки та задачі досліджень.....                                                                                               | 23 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ТА<br>ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ<br>АВТОТРАКТОРНОГО ДВИГУНА..... | 25 |
| 2.1 Дослідження видів взносу та дефектів колінчастого валу двигуна.....                                                               | 25 |
| 2.2. ФАБО як технологічний метод зниження зносу деталей та підвищення<br>ресурсу ДВЗ.....                                             | 46 |
| 2.3. Висновок .....                                                                                                                   | 50 |
| 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ<br>.....                                                                       | 51 |
| 3.1. Уточнена модель зношування підшипникових вузлів ковзання<br>поршневого ДВЗ.....                                                  | 51 |
| 3.2. Передумови для побудови моделі зношування підшипникових вузлів<br>ковзання ДВЗ.....                                              | 51 |
| 3.3. Теоретичні умови тертя.....                                                                                                      | 53 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                                                                 | 7  |
| 3.4. Лабораторні випробування .....                                                                             | 57 |
| 3.4.1. Машина тертя СМЦ-2.....                                                                                  | 59 |
| 3.4.2. Зразки й матеріали .....                                                                                 | 59 |
| 3.4.3. Нанесення епілама .....                                                                                  | 62 |
| 3.4.4. Технологія ФАБО.....                                                                                     | 64 |
| 3.4.5. Визначення коефіцієнта тертя .....                                                                       | 66 |
| 3.4.6. Визначення зношування зразків .....                                                                      | 66 |
| 3.4.7. Оцінка шорсткості поверхні тертя .....                                                                   | 66 |
| 3.5. Результати лабораторних досліджень.....                                                                    | 66 |
| 3.5.1. Коефіцієнт тертя.....                                                                                    | 66 |
| 3.5.2. Шорсткість поверхонь тертя.....                                                                          | 68 |
| 3.5.3. Зношування зразків залежно від часу випробування.....                                                    | 70 |
| 3.6. Висновок .....                                                                                             | 71 |
| 4. ОБЕЗПЕКА ПРАЦІ .....                                                                                         | 73 |
| 4.1. Безпека праці при проведенні експериментальних досліджень.....                                             | 73 |
| 4.2. Заходи безпеки .....                                                                                       | 74 |
| 4.2.1. Розробка організаційно – технологічної карти безпечної роботи на<br>установці для ФАБО обробки.....      | 75 |
| 4.3. Висновок .....                                                                                             | 77 |
| РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ<br>.....                                             | 79 |
| 5.1. Розрахунок економічної ефективності технології відновлення<br>металізацією з нанесенням ФАБО покриття..... | 79 |
| 5.2. Висновок .....                                                                                             | 84 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                                                                                         | 85 |

|                  |    |
|------------------|----|
|                  | 8  |
| ЛІТЕРАТУРА ..... | 87 |
| ДОДАТКИ.....     | 91 |

## ВСТУП

Транспортні витрати становлять близько 10-12% у собівартості сільськогосподарської продукції, причому основна частина цих витрат пов'язана з автомобільним транспортом [1]. Під час найбільш інтенсивних сезонів агропромислового комплексу до 35% усього рухомого складу автомобільного транспорту залучається до виконання сільськогосподарських завдань. З них значна частина представлена автомобілями марок КрАЗ та ГАЗ, тоді як в останні роки все більш популярними серед агровиробників стали вантажівки таких світових брендів, як Iveco, Mercedes-Benz та Ford, які забезпечують вантажопідйомність від 5 до 10 тонн [1].

Собівартість автомобільних перевезень в сучасних умовах є досить високою, причому під час їхньої експлуатації вона зростає в 2-3 рази, а продуктивність техніки зменшується в 3-4 рази після пробігу близько 500 тисяч кілометрів [2]. Основними причинами цього є високі витрати ресурсів, часу та робіт на підтримку працездатності транспортних засобів через недостатньо ефективне технічне обслуговування й ремонт. Частка витрат, пов'язана з технічним обслуговуванням та ремонтами, сягає 12-15% від загальної собівартості перевезень. З цієї причини витрати на забезпечення працездатності транспортних засобів у 5-6 разів перевищують початкові витрати на їх виробництво [3].

Аналіз показує, що автомобілі таких марок, як КрАЗ та ГАЗ, мають значну частку відмов, що пов'язані переважно зі збоєм у роботі силового агрегата (32-37% випадків), а серед них 25-30% відмов виникають саме через проблеми з двигуном [2, 3, 4]. Силові агрегати на основі двигунів КрАЗ застосовуються не лише в автомобілях, а й у різних моделях сільськогосподарської техніки, включаючи трактори та комбайни, а також у стаціонарних силових установках. Значна частина відмов двигунів (45-50%) відзначається раптово та обумовлюється помилками в технічній експлуатації, конструктивними недоліками та дефектами у виробництві.

Діагностичний аналіз показав, що з часом технічний стан двигунів знає закономірних змін, при цьому більшість аварійних ситуацій пов'язана з перевищенням критичних значень технічних параметрів через недостатнє застосування методів діагностики. Навіть після проведення капітального ремонту двигуни демонструють низькі показники надійності. Це пояснюється відмінностями між сучасними методами ремонту та технологією виробництва. Найбільша кількість відмов пов'язана зі зносом таких ключових елементів, як підшипники колінчатого вала, циліндропоршнева група та турбокомпресори, на які припадає 35% відмов і 62% витрат на ремонт [1, 2, 5].

Витрати на забезпечення працездатності двигунів у процесі їх експлуатації пояснюються недостатньо повним дослідженням процесів мащення, очищення масла, недостатнім застосуванням діагностичних методів та недостатньо ефективними технологіями відновлення деталей під час ремонтів. Враховуючи це, питання вдосконалення методів мащення, очищення масла та застосування діагностування технічного стану, а також розробки сучасних технологій для відновлення деталей є актуальними. Від їх вирішення залежить зниження витрат на транспортні послуги, підвищення продуктивності сільськогосподарських машин та автомобілів, що працюють в агропромисловому комплексі [1, 2, 3].

Ця робота спрямована на дослідження та моделювання процесів зношування вузлів тертя двигунів автомобілів і тракторів. Мета полягає в аналізі факторів, що впливають на процеси зношування, зокрема, на діагностику, обслуговування, підтримку працездатності та оптимізацію ремонтних робіт для зниження собівартості технічної підтримки транспортних засобів.

**Публікації.** За матеріалами дослідження опубліковано 1 статтю та виконано доповідь на міжнародній науково-технічній конференції

Кавун, В., (2024). Дослідження впливу фінішної антифрикційної безрозбірної обробки на коефіцієнт тертя та шорсткість поверхні деталі. У: *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*, 15 листопада 2024, Дніпро, Україна. Дніпро: ДДАЕУ. с. 98–100.

## **РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ПРОБЛЕМУ ЗНОСУ СПОЛУЧЕНЬ ТЕРТЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ**

### **1.1. Загальні відомості**

Під час розгляду різних способів оцінки зношування підшипників ковзання колінчастого валу (КВ) двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) необхідно визначити загальні рамки умов їхньої роботи, для яких представляє інтерес прогнозування зношування. Основну увагу приділяємо найпоширенішим (стандартним) конструкціям і умовам роботи підшипників ковзання ДВЗ, характеристику умов їхньої роботи здійснюємо з позицій молекулярно-механічної теорії тертя [6], найпоширенішої на сьогоднішній день.

У сучасних двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) взаємодія «шийки - підшипники» (КВ) працює в умовах гідродинамічного змащення під час основних робочих режимів двигуна, що є найефективнішим і найбільш оптимальним режимом тертя. Однак підшипникові вузли можуть працювати й у менш сприятливих режимах, таких як напівсухе, граничне та іноді навіть сухе тертя, особливо під час запуску або зупинки двигуна, при низькій швидкості обертання вала, критичних навантаженнях, а також під час процесу адаптації трибологічних вузлів до умов роботи або критичного зносу.

На основі статистики, корінні підшипники функціонують у значно менш складних умовах, порівняно зі шатунними підшипниками, оскільки вони не зазнають настільки інтенсивних циклічних навантажень, які виникають через рух поршня. Товщина масляної плівки, що забезпечує ефективне змащення, залежить від багатьох факторів, таких як характеристики мастила, швидкість обертання підшипника, геометричні параметри сполучення, а також динамічні характеристики самого двигуна. Саме ці чинники призводять до формування зон тертя.

Обчислення товщини масляної плівки дозволяє визначити місця, де виникають циклові зони тертя в підшипниках. У порівнянні зі сполученням

«кільце-гільза» в підшипникових системах, область контакту в системі «шийки - підшипники» не є стабільною. Вона залежить від рівня навантаження, що прикладається до вузла.

Довжина дуги контакту (кут контакту), очевидно, може бути знайдена з розрахунку напруженого стану сполучення.

Вивчення умов роботи, а також причин і джерел зношування підшипникових вузлів ковзання КВ показало, що підсумкове зношування поверхонь шийок і підшипників може формуватися в результаті реалізації різних видів зношування (окислювальне, абразивне і ряд інших). Це засвідчили результати досліджень із цієї проблеми, що містяться в роботах Буше М. А., Мохнаткіна Е. М., Беленького О. Д., Нарських І. І., Захарова С. М., Загорянського Ю. А., Володіна А. І., Бабаєва Н. К. та інших. Встановлено, що на штатних режимах роботи сучасних ДВЗ з усіх можливих видів зношування істотним є тільки зношування через втомні процеси, що розвиваються на робочих поверхнях підшипникових вузлів, як правило, за граничного тертя.

## **1.2. Загальні характеристики зносу поверхонь тертя**

Зношування — це складний фізико-механічний процес, що передбачає руйнування поверхневих шарів твердого матеріалу під впливом механічного контакту з іншим тілом або середовищем [7, 8, 9]. Коли механічний вплив проявляється у формі сили тертя між двома поверхнями, цей процес отримує назву зношування під час тертя. Саме цей вид зношування буде детально розглянуто в подальших розділах цієї роботи.

У процесі зношування руйнування відбувається на дуже невеликій ділянці матеріалу, яка локалізується в зоні тертя. Матеріал, що зазнає руйнування, видаляється у вигляді мікроскопічних часток, які є продуктами зносу. Зазвичай, для визначення обсягу та інтенсивності зношування спираються на вимірювання зменшення розмірів тіла в напрямку, що перпендикулярний до площини тертя. Цей тип зношування називається лінійним зношуванням [8].

Процес зношування можна поділити на три основні стадії, що характеризуються різними інтенсивностями та особливостями:

**Приробіток** — це початкова, нерівноважна стадія зношування, яка триває недовго в порівнянні з загальним часом роботи механізму. На цьому етапі спостерігається висока інтенсивність зношування, проте з плином часу вона поступово знижується в міру адаптації сполучення до робочих умов.

**Сталий режим** — друга стадія, яка є найбільш тривалою за часом у процесі зношування. Під час цієї фази інтенсивність зношування стабілізується та залишається практично сталою протягом довгого періоду експлуатації. Це вказує на встановлення оптимальних умов між поверхнями, що труться.

**Катастрофічне зношування** — остання стадія, що настає після стабільного режиму. Ця фаза характеризується різким збільшенням швидкості зношування. Зазвичай вона виникає через накопичення дефектів, перевищення допустимих меж витривалості сполучення, збої в системі змащення або інші непередбачені фактори, що призводять до швидкого руйнування матеріалу.

Таким чином, процес зношування є послідовністю стадій, що переходять одна в іншу. Кожна стадія має свої специфічні особливості та впливає на загальний термін служби механізму. Розуміння цих стадій необхідне для розробки заходів із запобігання зносу, підвищення ефективності роботи механізмів та продовження їхнього терміну служби.

Загальноприйнята крива залежності зносу від часу роботи (рис. 1.1).

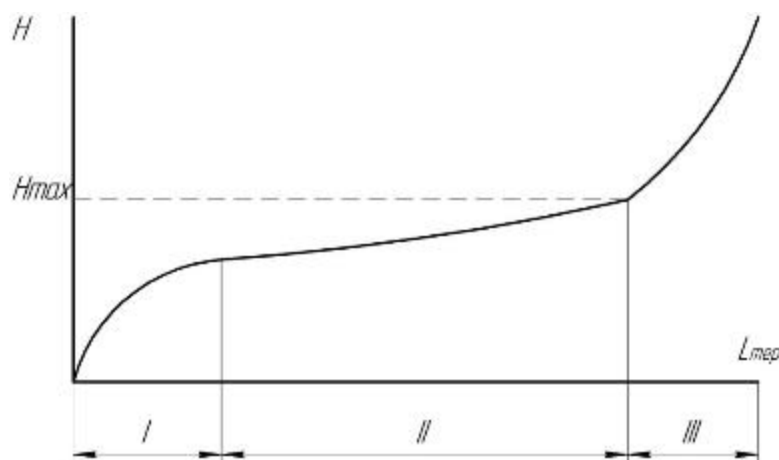


Рисунок 1.1 – Залежність зносу від часу роботи

1 - приробіток; II - сталий режим; III - катастрофічний знос

Розрахунок інтенсивності зношування:

$$I_h = \frac{\Delta H}{L_{тр}} = \frac{\Delta V}{A_T \cdot L_{тр}} = \frac{\lambda}{\rho_M} \cdot \frac{\Delta G}{A_a \cdot L_{тр}}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta H$  – товщина зношеного шару поверхні, мм;

$L_{тр}$  – шлях тертя, мм;

$\Delta V$  – об'єм зношеного матеріалу, мм<sup>3</sup>;

$A_T$  – площа поверхні тертя елемента, що стирається, мм;

$\lambda = \frac{A_a}{A_T}$  – відношення номінальної площі контакту ( $A_a$ , мм) до площі поверхні тертя;

$\rho$  – щільність зношуваного матеріалу, г / мм<sup>3</sup>;

$\Delta G$  – маса зношеного матеріалу, г.

Формула (1.1) демонструє взаємозв'язок між різними методами кількісної оцінки зношування. Аналіз накопичених експериментальних даних підтверджує, що діапазон зносостійкості різних компонентів машин і механізмів є досить широким і знаходиться в певному діапазоні значень. Цей діапазон залежить від конкретного типу елементів, умов їх експлуатації, а також характеристик робочого середовища  $I_h = (10^{-3} - 10^{-12})$ .

Перейдемо до огляду підходів і методів визначення величини зносу найбільш значущих теорій тертя і зносу [10], що активно розвиваються в даний час.

### 1.3. Огляд методів визначення зносу

#### 1.3.1. Втомна теорія зносу

Терміном «втома» зазвичай позначають специфічний тип руйнування матеріалу, який виникає внаслідок багаторазового впливу циклічних напружень, амплітуда яких не перевищує межу пружності матеріалу [11].

Дослідження показали, що в окремих випадках, коли циклічно повторювані напруження перевищують межу пружності, матеріал також руйнується. Це явище отримало назву **малоциклової втоми**, що значно розширює значення терміна «втомне руйнування».

Хоча концепція втомного руйнування дозволяє пояснити певні закономірності зношування, її застосування для повного розуміння механізму руйнування під час тертя не є вирішальним.

Процес зношування під час тертя можна пояснити наступним чином: шорсткості реальних поверхонь призводять до того, що їхня взаємодія при терті відбувається не рівномірно, а дискретно. В результаті, тертя відбувається лише на окремих ділянках, які разом утворюють площу фактичного контакту (ФПК).

При нормальному навантаженні шорсткі поверхні можуть either вдавлюватися одна в одну, або розплющуватися, що призводить до виникнення місцевих напружень та деформацій у ділянках фактичного контакту.

Протягом тертя певний об'єм матеріалу, що знаходиться у приповерхневому шарі, піддається багаторазовим впливам, що створюють знакозмінний цикл навантаження. Кожен із цих циклів призводить до накопичення мікроушкоджень у матеріалі. Навіть якщо кожен окремий вплив не призводить до миттєвого руйнування, накопичені ушкодження послаблюють структуру матеріалу. У підсумку, це накопичення мікроушкоджень веде до поступового руйнування матеріалу.

Згідно з [12, 13], основне рівняння зношування у втомній теорії зносу має вигляд:

$$i_h = \frac{K}{n} \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (1.2)$$

де  $i_h$ ,- питома лінійна інтенсивність зношування;

$n$  - число циклів впливів, що призводить до руйнування деформованого об'єму;

$h$  - глибина входження;

$r$  - радіус сфери, індентора і одиничної мікронерівності.

У межах теорії втомного зношування розроблено розгорнуті аналітичні залежності для розрахунку  $I_h$  у різних умовах контактної взаємодії на підставі рівняння (1.2).

### 1.3.2. Зношування з позицій енергетичних теорій зношування

Енергетична теорія зношування сформульована Флайшером [14] і набула подальшого розвитку в працях інших науковців [13, 15]. Головна ідея цієї концепції полягає в тому, що для відділення частки матеріалу в процесі зношування необхідно накопичення достатнього обсягу внутрішньої енергії до досягнення певного критичного значення. Тільки після того, як цей запас енергії перевищує певний критичний рівень, частинка матеріалу може відокремитися від поверхні тертя.. Відомо, що більша частина роботи сил тертя розсіюється у вигляді тепла, проте мала її частка: приблизно (9-16)%, накопичується в матеріалі у вигляді внутрішньої потенційної енергії. Саме ця обставина має вирішальне значення в розумінні причин поверхневого руйнування під час тертя.

Автори вводять поняття уявної густини енергії тертя  $e_T$  у вигляді:

$$e_T = \frac{W_T}{V_{zn}} = \frac{f \cdot N \cdot L_{тер}}{V_{zn}}, \quad (1.3)$$

де  $W_T$  - робота тертя;

$V_{\text{зн}}$  - об'єм зношеного матеріалу;

$f$  - коефіцієнт тертя;

$N$  - навантаження;

$L_{\text{тер}}$  - шлях тертя.

Інтенсивність зношування тоді:

$$I_h = \frac{\tau}{e_T} = \frac{f \cdot P_a}{e_T}, \quad (1.4)$$

де  $\tau$  - питома сила тертя;

$P_a$  - номінальний тиск на контакті.

Практичне використання співвідношень структурно-енергетичної теорії зносу вимагає знання великої кількості експериментальних даних, проте її можна зарахувати до найрозвиненіших сучасних теорій.

### 1.3.3. Прогнозування зносу за методом «ІВМ»

Цей метод прогнозування зносу деталей машин під час конструювання розроблено у США в лабораторії компанії «ІВМ» групою вчених під керівництвом Р. Бауера [16].

Автори розрізняють два види зносу: нульовий і вимірюваний. Якщо знос не перевищує висоти шорсткості поверхні, то це нульовий знос, в іншому випадку - вимірюваний. З великої кількості дослідів було встановлено, що для забезпечення нульового зносу за деякий проміжок часу роботи пари тертя необхідно виконання умови Крагельського І.В.:

$$\tau_{\text{max}} \leq \gamma \cdot \tau_y, \quad (1.5)$$

де  $\tau_{\text{max}}$  - діючі максимальні дотичні напруження;

$\tau_y$  - межа плинності на зріз;

$\gamma$  - коефіцієнт.

Коефіцієнт  $\gamma$  залежить від виду мастила, матеріалу і довговічності (ресурсу роботи) деталі. За одиницю довговічності автори взяли прохід. Один прохід - це довжина шляху тертя, що дорівнює розміру площі контакту деталей у напрямку ковзання. Коефіцієнт  $\gamma$ , що відповідає умовам нульового зносу за 2000 проходів, був прийнятий за уніфікований показник і позначений  $\gamma_R$ .

У деяких випадках прогнозування зносу зручно вести за навантаженням. Тому авторами методики «ІВМ» отримано залежність для гранично допустимого навантаження за вимірюваного зносу, що відповідає допустимій величині зносу за заданий термін служби. Обмежений обсяг опублікованих експериментальних даних за цією методикою ускладнює її практичне застосування.

#### 1.4. Експериментальні методи визначення зношування

При експериментальному визначенні зношування застосовуються різні методи, які описані нижче [8, 9].

**Метод мікрометрування** є одним із найточніших методів, які застосовуються для визначення ступеня зношування деталей та поверхонь у процесі експериментальних досліджень. Цей метод дозволяє вимірювати малі зміни геометричних параметрів поверхні, що виникають в результаті зношування, з високою точністю.

Мікрометрування базується на вимірюваннях з використанням мікрометричного вимірювального інструменту, який дозволяє визначати навіть найменші зміни у розмірах деталей, що піддаються тертю.

Для отримання достовірних результатів необхідно визначити ділянки на поверхні деталі, які зазнають тертя. Це можуть бути зони контактної поверхні або інші ділянки, які найбільше піддаються зношуванню.

Спеціальний інструмент — мікрометр — застосовується для вимірювання розмірів у визначених точках. Мікрометр має високу точність, зазвичай

у діапазоні 1-10 мікрметрів, що дозволяє вимірювати малі зміни товщини, діаметрів чи інші геометричні характеристики поверхні.

Вимірювання до і після експлуатації:

Перед проведенням експерименту вимірюють початкові параметри поверхні деталі за допомогою мікрметра. Після експлуатації або роботи деталі вимірювання повторюються у тих самих точках. Порівняння цих значень дозволяє визначити ступінь зношування.

Обробка отриманих даних:

- Різниця між значеннями до і після експлуатації показує, наскільки змінилася геометрія поверхні через зношування.
- Ці дані аналізуються для виявлення закономірностей у процесах тертя та зношування.

Переваги методу мікрметрування

- Висока точність: Мікрметр дозволяє вимірювати навіть мікроскопічні зміни.
- Простота застосування: Метод не вимагає складного обладнання, а лише використання мікрметричного інструменту.
- Швидкість отримання результатів: Вимірювання проводяться швидко, що дозволяє оперативно оцінювати ступінь зношування.

Недоліки методу

- Локальність вимірювання: Мікрметрування фокусується лише на конкретних ділянках поверхні, що може не повністю відображати загальний стан зношування.
- Залежність від точності інструменту: Для отримання достовірних даних важливо, щоб мікрметр був справний і використовувався правильно.

Метод мікрметрування є ефективним і точним інструментом для експериментального визначення зношування. Завдяки його допомозі можна виявити ступінь зміни геометричних характеристик поверхні, що виникає в результаті тертя, та оцінити динаміку процесу зношування.

**Метод визначення зношування за зменшенням маси.** Цей метод ґрунтується на вимірюванні маси деталі до та після експлуатації або роботи, в якій відбувається зношування. Суть підходу полягає в тому, що за допомогою високоточного зважування визначають втрату маси деталі, яка виникла в результаті механічного зношування. Цей метод найчастіше застосовують для дослідження зношування деталей невеликої маси, коли різні зміни у геометричних характеристиках поверхні можна проаналізувати через втрату маси.

Однак варто враховувати, що цей метод не завжди є ефективним. Якщо зношування відбувається не лише через відділення дрібних часток матеріалу, а й унаслідок пластичного деформування поверхні, метод може дати помилкові результати або виявитися непридатним. Це пояснюється тим, що пластичні деформації не завжди призводять до значних втрат маси, що робить цей метод менш інформативним у таких випадках.

**Метод аналізу металу в маслі.** Цей метод визначення зношування полягає в дослідженні металевих часток, що потрапляють до мастильного масла в процесі тертя. Продукти зношування, що виникають через взаємодію поверхонь деталей, включають дрібні металеві частки, окислені сполуки металів, а також продукти хімічних реакцій, які виникають через взаємодію металу з активними компонентами масла.

Під час роботи значна частина цих часток залишається у зваженому стані в маслі, що дає можливість їх аналізу. Для цього методики передбачають відбір проб масла, які потім піддають хімічному аналізу. Пробу спалюють, а отриманий попіл досліджують за допомогою хімічних методів або полярографії. Ці методи дозволяють визначити концентрацію металевих часток у зразку, що дає змогу оцінити ступінь зношування та кількість матеріалу, що вивільнилося в результаті тертя.

Цей підхід є дуже інформативним, оскільки він дозволяє оцінювати не тільки кількість зношеного матеріалу, а й виявляти хімічні сполуки, які утворюються в процесі зношування та взаємодії деталей із мастильними компонентами.

За період між двома послідовними відборами проб ураховують загальну кількість масла в картері, його втрату (наприклад, внаслідок згоряння) і кількість масла, що доливається. Даний аналіз є інтегральним, тому що продукти зношування звичайно відділяються одночасно від декількох третєвих деталей. Точне визначення кількості заліза ускладнюється тим, що великі частки продуктів зношування можуть осідати на стінках картера. Вміст заліза порядку 5-100 частин на мільйон частин масла визначають із точністю (5-10)%. При застосуванні полярографічного методу точність визначення заліза в маслі ще вище.

**Метод радіоактивних ізотопів для визначення зношування.** Метод радіоактивних ізотопів базується на введенні в матеріал деталі, що піддається аналізу на зношування, певної кількості радіоактивного ізотопу. Цей ізотоп стає своєрідним міченим маркером, який дозволяє відстежувати процеси зношування.

У процесі роботи деталі радіоактивний ізотоп разом із продуктами зношування (дрібними частками матеріалу) потрапляє до мастильного масла. Кількість радіоактивних атомів, що переходять в масло, пропорційна обсягу матеріалу, що зносився за певний період роботи. Завдяки цьому можна оцінити інтенсивність зношування деталі та кількість зношеного матеріалу, що накопився.

Після відбору проби масла проводять аналіз на рівень радіоактивності, використовуючи відповідні методи детекції радіації. Інтенсивність випромінювання дозволяє визначити, скільки радіоактивних атомів було втрачено в результаті зношування, що дає можливість зробити висновки про швидкість та обсяги зношування деталі.

Цей метод є високочутливим і дозволяє точно визначати кількість зношування, навіть у випадках, коли традиційні методи не можуть дати достатньо надійних результатів. Однак для його застосування необхідні спеціальні дозволи та відповідна технічна база через використання радіоактивних речовин.

Властивості ізоотопу, що вводиться, повинні бути такі, щоб він рівномірно розподілявся в металі деталі. Наведення радіоактивності у вже готові деталі можливо шляхом їхнього опромінення в ядерному реакторі. Даний метод має ряд переваг у порівнянні з попереднім методом: при радіометричному методі знаходять зношування певної деталі, а не сумарне зношування декількох деталей; чутливість підвищується в сотні раз; прискорюється процес дослідження. Однак при радіометричному методі потрібна спеціальна підготовка зразків досліджуваних деталей, наявність спеціальної апаратури для виміру інтенсивності випромінювання й вживання заходів обережності для охорони здоров'я осіб, що проводять експерименти.

**Метод поверхневої активації** є різновидом методу радіоактивних ізотопів. У цьому випадку активуванню зазнає лише невелика ділянка поверхні тертя (наприклад, пляма діаметром 5 мм) і за допомогою лічильника відзначається зміна інтенсивності випромінювання цієї ділянки, що відбувається в міру зношування поверхні. Перевага цього методу полягає в тому, що він придатний при роботі деталі як зі змащенням, так і без неї. Лічильник, що відзначає зміну інтенсивності випромінювання, може бути відділений від спостережуваної активованої ділянки металевою стінкою, що дозволяє вести відлік, не прибігаючи до розбирання вузла тертя. До недоліків методу відноситься необхідність обліку падіння інтенсивності випромінювання не тільки внаслідок зношування, але й внаслідок радіоактивного розпаду ізотопів у часі. Цей метод не дає можливості виявити розподіл зношування по поверхні тертя. Активування поверхні використовується циклотрон.

**Метод визначення зношування за допомогою профілографів** може бути застосований, наприклад, для оцінки зношування робочої поверхні зуба шестірні за допомогою приладу, що служить для запису профілю зуба. При цьому базою служать частини профіля зуба по впадині, що незношуються. Накладення кривих, знятих через різне число годин роботи зубів, при сполученні ділянок, що незношуються, можна визначити розподіл зносу по поперечному профілю

Розподіл зношування по довжині й по колу шатунних і корінних шийок колінчатого вала й відповідних підшипників також важливо знати для розробки заходів щодо підвищення їх зносостійкості. Так, наприклад, по колу шатунної шийки найменше зношування утворюється на стороні, зверненої до осі корінних шийок, а найбільший- у верхній частині шийки. Ступінь нерівномірності радіального зношування окремих сторін шийки може коливатися в межах (500-1000)%. Ступінь нерівномірності зношування корінних шийок звичайно менше, чим шатунних, але теж може досягати 400%.

### **1.5. Висновки та задачі досліджень**

Виконаний огляд теорій і методів визначення зношування й аналіз їх застосовності для оцінки зношування трибосопряження «шейку-підшипник» КВ двигуна дозволяє зробити наступні висновки:

На сьогодні не існує єдиної загальновизнаної теорії зношування й практичні інженерні розрахунки на зношування можливі лише за допомогою розрахунково-експериментальних методів. У підшипниках ковзання колінчатих валів ДВЗ реалізуються різні види зношування (окисне, абразивне й ряд інших), але основна частка зношування припадає на втомне зношування при терті сполучених поверхонь.

Найбільший практичний інтерес при розгляді зношування підшипників ковзання ДВС представляють розрахунки втомного зношування при граничному терті при пружному контакті.

Побудова розрахунково-експериментальної моделі зношування підшипникових вузлів колінчатого вала ДВЗ найбільш результативно може бути здійснене у відповідності втомної теорії зношування (по І. В. Крагельському) і молекулярно- механічною теорією тертя.

Зроблені висновки дозволяють сформулювати основну мету дослідження для справжньої роботи як побудова розрахунково-експериментальної

моделі прогнозування швидкостей зношування в підшипниках ковзання й шийках колінчатих валів ДВЗ.

Для розв'язку цього завдання необхідно:

1. Провести аналіз існуючих методів визначення зносу деталей ДВЗ.
2. Провести аналіз надійності колінчатих валів двигунів та визначити межі появи дефектів чи відмов.
3. Обґрунтувати параметри для визначення швидкості зношування підшипникових вузлів колінчатих валів двигунів та встановити алгоритм розрахунку процесу зношування.
4. Зробити розрахунково-експериментальне дослідження процесів зношування підшипників колінчатого вала та провести дослідження нанесеного покриття методом фабо-епіламування.
5. Визначити показники стану охорони праці та розробити заходи їх покращення.
6. Виконати розрахунок економічних показників роботи.

## **РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ АВТОТРАКТОРНОГО ДВИГУНА**

### **2.1 Дослідження видів зносу та дефектів колінчастого валу двигуна**

У процесі експлуатації в двигунах внутрішнього згоряння виникають несправності, що погіршують їхній технічний стан і призводять до відмов. Дослідженнями встановлено, що несправності вузлів і механізмів двигунів внутрішнього згоряння через конструктивні та виробничі чинники виникають рідко. Основним фактором появи несправностей у двигунах внутрішнього згоряння є зношення деталей, що супроводжується зміною розмірів, форми і взаємного розташування деталей у сполученнях. Зменшення зносу деталей машин і підвищення їхніх експлуатаційних властивостей є актуальною проблемою, частиною якої є підвищення довговічності двигунів внутрішнього згоряння, поширення яких у всіх галузях народного господарства безперервно збільшується.

У розділі розглянуто умови експлуатації колінчастих валів і шатунів, наведено основні чинники, що впливають на інтенсивність зносу шийок колінчастих валів і отворів головок шатуна, виявлено основні несправності та дефекти колінчастих валів і шатунів, побудовано емпіричні та теоретичні залежності розподілу зносу шатунних і колінчастих шийок колінчастого вала.

Унаслідок зносу шийок і підшипників колінчастого вала порушується початковий зазор між ними, що веде до падіння тиску в системі та появи стукотів у двигуні. Усе це може спричинити неприпустиме зношування шийок і розплавлення підшипників колінчастого вала.

Основними критеріями ресурсу колінчастого вала до першого ремонту є інтенсивність зносу шийок вала і вкладишів і граничний зазор у сполученні «шийка вала - вкладиш», за якого зберігається рідинне тертя.

Знаючи мінімальне число обертів колінчастого вала, за яких забезпечується рідинне тертя, можна вибирати раціональні методи управління машиною в конкретних умовах експлуатації.

До основних чинників, що визначають інтенсивність зносу шийок колінчастих валів, належать [8, 19]: якість матеріалу колінчастого вала і підшипника, що сполучається з ним; термічна обробка та твердість робочої поверхні шийки; шорсткість поверхні; початкова макрогеометрія шийок вала; якість та умови змащення; питомий тиск на робочу поверхню; режим роботи двигуна; кліматичні умови експлуатації.

Проведені дослідження засвідчили, що чавунні вали, встановлені на тракторних двигунах, значно перевершують за зносостійкістю та рівномірністю зносу сталеві вали.

Встановлено, що сумарний знос під час роботи двигуна зі сталевим валом приблизно вдвічі вищий, ніж із чавунним валом. Знос вкладишів в обох випадках ідентичний.

Чавунні колінчасті вали мають високу втомну міцність, порівняно високу циклічну в'язкість, зносостійкість, хороші ливарні властивості та легко обробляються на верстатах. Дослідженнями встановлено [8, 20], що за ізотермічного загартування на троостито-феритну структуру ще більше підвищуються фізико-механічні властивості чавунних колінчастих валів.

Значний вплив на процес припрацювання і зносостійкість деталей двигуна має шорсткість робочої поверхні деталі. Для кожної сполучуваної деталі існує оптимальна шорсткість робочої поверхні. Передбачається, що корінні шийки двигунів ЗМЗ-511, ММЗ 245.7 і ЯМЗ-236 після механічної обробки повинні мати шорсткість поверхні 0,4 мкм.

Проведене дослідження шорсткості шийок колінчастих валів двигунів ЗМЗ-511, ММЗ 245.7 і ЯМЗ-236 дало змогу встановити, що шорсткість корінних шийок у середньому по чотирьох двигунах ММЗ 245.7 після пробігу 162 тис. км становила 0,3-0,12 мкм, а шатунних - 0,36-0,2 мкм [21].

У колінчастих валів двигунів ЯМЗ-236 після середнього пробігу автомобілів 152,5 тис. км корінні та шатунні шийки мали шорсткість поверхні в межах 9-го класу [21].

Ідеальні умови між підшипником і валом спостерігаються в разі поділу поверхонь деталей, що сполучаються, шаром рідини, мінімальна товщина якої перевищує суму найбільших мікронерівностей вала і підшипника.

Із гідродинамічної теорії тертя та змащення відомо, що для сполучення «вал - підшипник» критична товщина масляної плівки

$$h_{\min} = \frac{55,5 \cdot 10^{-13} \cdot n_{\min} \cdot \eta \cdot l \cdot d^3}{P_{\text{ж}} \cdot \Delta \cdot C}, \quad (2.1)$$

де  $n_{\min}$  - мінімальне число обертів колінчастого вала, за якого забезпечується рідинне тертя,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$\eta$  - абсолютна в'язкість оливи в двигуні,  $\text{кг/с см}^2$  ;

$l$  - довжина шийки колінчастого вала, мм;

$d$  - діаметр шийки колінчастого вала, мм;

$P_{\text{ж}}$  - величина несучої здатності масляного клина, мм;

$\Delta$  - діаметральний зазор між шийкою та вкладишем, мм;

$C$  – коефіцієнт,  $C = 1 + \frac{d}{1}$ .

Розв'язуючи це рівняння відносно мінімального числа обертів колінчастого вала  $n_{\min}$ , отримуємо [9, 10].

$$n_{\min} = \frac{P_{\text{ж}} \cdot \Delta \cdot h_{\text{крит}} \cdot C}{55,5 \cdot 10^{-13} \cdot \eta \cdot l \cdot d^3}. \quad (2.2)$$

Величина несучої здатності масляного клина  $P_{\text{ж}}$  дорівнює сумарній величині навантаження на шатунну шийку  $P_{\text{ш}}$ .

Величина  $P_{ш}$  є розрахунковим тиском і залежить від діаметра циліндра  $d_{ц}$ , тиску газу  $P_{ц}$  і сил інерції  $P_i$  і  $P_{ш}$ :

$$P_{ш} = P_{ц} = \frac{\pi \cdot D_{п}^2 \cdot P_{ц}}{4} + P_i - P_{ш}, \quad (2.3)$$

де  $D_{п}$  - діаметр поршня двигуна, мм;

$P_i$  - сила інерції мас, що рухаються поступально, Н;

$P_{ш}$  - відцентрова сила інерції, що діє на шатун, Н.

Користуючись формулою (2.1), можна визначити режими роботи двигуна, за яких буде забезпечуватися рідинне тертя в підшипниках колінчастого вала.

З формули (2.1) видно, що в міру зносу шийок колінчастого вала та їхніх підшипників діаметральний зазор буде збільшуватися, а умови змащення деталей, що сполучаються, будуть змінюватися. Для забезпечення рідинного тертя необхідно підвищувати частоту обертання, але не вище необхідної за умовами експлуатації.

Переважаючи швидкості руху і частота обертання колінчастого вала обумовлюються насиченістю транспортних засобів, станом доріг, організацією руху транспорту.

Знаючи мінімальне число обертів колінчастого вала, за яких забезпечується рідинне тертя, можна вибирати раціональні методи управління машиною в конкретних умовах експлуатації. Наприклад, у разі збільшення діаметрального зазору можна застосовувати оливу підвищеної в'язкості, оскільки абсолютна в'язкість оливи перебуває в обернено пропорційній залежності від обертів колінчастого вала.

Проведені дослідження дали змогу встановити характер, закономірність і величини зносу шийок колінчастих валів двигунів ЗМЗ-511, ММЗ 245.7 і ЯМЗ-236 залежно від пробігів. У результаті встановлено, що шийки валів по колу і по довжині зношуються порівняно рівномірно. В інтервалі пробігів 150-

170 тис. км у деяких шатунних шийок спостерігається підплавлення вкладишів і, як наслідок, задир шийки. Основним фактором, що впливає на підплавлення вкладишів, є недостатня кількість оливи, що подається до підшипників [21].

У раніше проведених дослідженнях встановлено, що задир шатунних шийок відбувається за третім кривошипом (за п'ятою і шостою шийками), оскільки олива до них надходить від найбільш теплонапруженого четвертого корінного підшипника [21].

Знос корінних шийок протікає рівномірно, без задирів і порушень робочої поверхні шийок. Після пробігу автомобіля 162 тис. км отримано такі результати: середньозважена величина зношування корінних шийок - 0,089 мм; інтенсивність зношування - 0,54 мкм 1000 км пробігу; максимальне зношування шатунних шийок - 0,101 мм; інтенсивність зношування шатунних шийок - 0,62 мкм 1000 км пробігу.

У результаті опрацювання статистичних даних побудовано емпіричні та теоретичні криві розподілу зносу шатунних і корінних шийок, представлені на рис. 2.1.

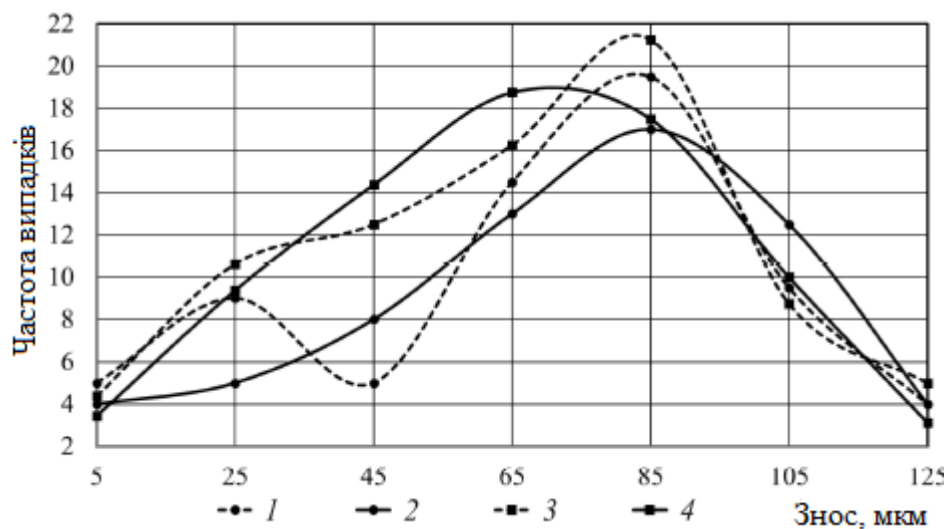


Рисунок 2.1 - Розподіл зносу шатунних (●) і корінних (■) шийок двигуна ЗМЗ-511 після середнього пробігу 162 тис. км:

1, 3 - емпіричні криві; 2, 4 - теоретичні криві

Теоретичні залежності досить близько відтворюють полігон емпіричного розподілу. Збіг емпіричних і теоретичних кривих розподілу оцінювали за критерієм згоди Пірсона. Підраховані величини критерію згоди Пірсона в усіх випадках більші за 0,05, що свідчить про добру узгодженість прийнятого закону розподілу.

Теоретична крива розподілу зносу шатунних шийок дещо зміщена вправо (див. рис. 2.1). Це вказує на інтенсивне зношування шийок після пробігу автомобілями 162 тис. км.

Під час вивчення характеру і величин зносу шийок колінчастого вала двигунів ЯМЗ-236 було встановлено, що після пробігу автомобілів 152,5 тис. км стан шийок як корінних, так і шатунних добрий.

Середньомаксимальний знос корінних шийок за чотирма двигунами становив 42,5 мкм, а шатунних - 53,6 мкм. Середня інтенсивність зносу корінних шийок 0,27 мкм 1000 км пробігу, а шатунних - 0,37 мкм 1000 км пробігу.

Під час зіставлення теоретичного і фактичного зносу шатунних шийок спостерігається деяка розбіжність характеру зносу шийки по колу. Знос шатунних шийок відбувається головним чином у площині кривошипа і значно менше - у площині, перпендикулярній кривошипу. Знос корінних шийок як по колу, так і по довжині протікає порівняно рівномірно.

На основі статистичних даних мікрометражу щодо зносу шийок колінчастих валів двигунів ЯМЗ-236 побудовано криві розподілу (рис. 2.2). Розподіл зносу шатунних і корінних шийок свідчить про те, що теоретична крива досить близько відтворює полігон експериментального розподілу. Тому дані, отримані дослідним шляхом, є об'єктивними для опису закономірності та величин зносу шийок.

Середньомаксимальна овальність шатунних шийок після пробігу двигуна 152,5 тис. км становила 0,18 мкм, а в корінних шийок - тільки 12,5 мкм.

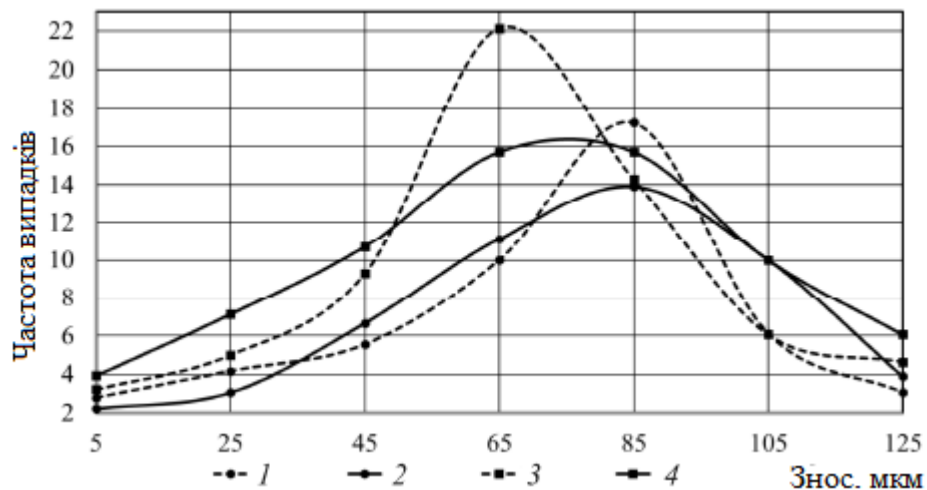


Рисунок 2.2 - Розподіл зносу шатунних (●) і корінних (■) шийок двигуна ЯМЗ-236 після середнього пробігу 152,5 тис. км:  
1, 3 - емпіричні криві; 2, 4 - теоретичні криві

Дослідження зносу шийок колінчастих валів двигунів ЯМЗ-236, що надходять на капітальний ремонт на Ростовський агрегатний завод, дало змогу встановити, що шийки валів, які надходять у ремонт вперше, зношуються порівняно рівномірно. Шатунні шийки зношуються інтенсивніше, ніж корінні, оскільки працюють у важчих умовах експлуатації. По колу і довжині шатунні шийки приймають відповідно еліптичну і конусну форми. Шатунні шийки зношуються в 1,5-2 рази (на 30-50 %) більше, ніж корінні [8].

Еліптичний знос шатунних шийок по колу зумовлений нерівномірним питомим навантаженням, а по довжині - неоднаковими умовами змащення різних частин шийки по її довжині через недосконалість способу підведення мастила. У двигунах із несиметричними шатунами причиною нерівномірності зносу шатунних шийок по довжині є несиметричність нижньої головки шатунів. На всіх двигунах, що мають у колінчастих валах похилі масляні канали, спостерігається конусна форма зносу шатунних шийок.

Під час обертання колінчастого вала внаслідок зносу шийок і підшипників порушується зазор між підшипником і шийкою вала. Унаслідок цього в двигуні з'являються стуки і падає тиск у системі змащення, що спричиняє неприпустимий знос шийок вала і розплавлення підшипників.

Основними критеріями ресурсу колінчастого вала до першого ремонту є інтенсивність зносу шийок вала і вкладиша та граничний зазор між ними, за якого зберігається рідинне тертя в цьому сполученні.

Користуючись залежністю, можна визначити технічний ресурс колінчастого вала до першого капітального ремонту:

$$T = \frac{h_{гр} - h_0}{\tau}, \quad (2.4)$$

де  $T$  - середнє напрацювання до першого капітального ремонту, тис. км;

$h_{гр}$  - граничний зазор між вкладкою і шийкою, мм;

$h_0$  - номінальний зазор, мм;

$\tau$  - середня інтенсивність зносу сполучення, мкм на 1000 км пробігу.

Розрахункові ресурси колінчастих валів двигунів і ЯМЗ-236 до першого капітального ремонту відповідно становлять 240 тис. км і 321 тис. км.

Далі розглянемо основні дефекти колінчастого валу.

Дефект 1. Знос і задирки на шийках колінчатого валу (рис. 2.3).

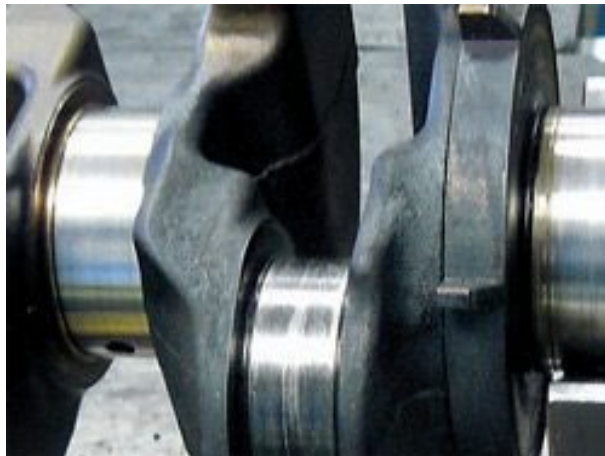


Рисунок 2.3 – Знос і задири

Опис дефекту. На поверхнях корінних і шатунних шийок виявлено значний знос, а також задирки, які викликають нерівності і змінюють геометрію поверхонь. Це призводить до порушення роботи підшипників, збільшення тертя і шуму в двигуні, зниження потужності, а у критичних випадках — до повної відмови двигуна.

### Причини виникнення дефекту

1. Недостатнє змащення:
  - Низька якість або неправильний вибір мастила.
  - Забруднення мастила металевими частками або сторонніми домішками.
  - Зниження тиску мастила через несправності масляного насоса.
2. Порушення умов експлуатації:
  - Перевантаження двигуна, часте перевищення допустимих обертів.
  - Недотримання міжсервісних інтервалів заміни масла.
3. Неправильний ремонт або монтаж:
  - Використання зношених або дефектних вкладишів.
  - Неправильне затягування болтів кришок корінних підшипників.
4. Зношення матеріалу:
  - Експлуатація колінчастого вала за межами ресурсу без відновлення або заміни.
  - Металургійні дефекти в матеріалі вала (мікротріщини, нерівномірність структури).

### Дії для усунення дефекту

1. Попередній огляд і діагностика:
  - Виміряти діаметр корінних і шатунних шийок, перевірити їх на овальність і конусність.
  - Провести контроль на наявність тріщин (ультразвуковим або магнітопорошковим методом).
2. Механічне відновлення:
  - Виконати шліфування поверхонь до ремонтного розміру.
  - При необхідності нанести відновлювальне покриття (електрохімічне осадження, плазмове напилення).
3. Заміна підшипників:
  - Підібрати і встановити вкладиші відповідного ремонтного розміру.

4. Покращення мастильної системи:
  - Очистити і перевірити працездатність масляного насоса.
  - Замінити масло і фільтри, перевірити якість мастильних матеріалів.
5. Профілактика:
  - Дотримуватися рекомендованих сервісних інтервалів.
  - Регулярно контролювати рівень і стан мастила.
  - Уникати перевантажень двигуна і тривалих роботи на максимальних обертах.

Ці дії дозволять не тільки відновити працездатність колінчастого вала, але й продовжити термін його служби.

Дефект 2. Знос торців під упорні напівкільця (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Знос торцевих поверхонь

Опис дефекту. На торцевих поверхнях колінчастого вала, які контактують з упорними півкільцями, виявлено значний знос. Зношування призводить до збільшення осьового люфту вала, порушення роботи валу в підшипниках, що може викликати вібрації, шум і неправильну роботу трансмісії або інших агрегатів двигуна.

Причини виникнення дефекту

1. Недостатнє змащення:

- Відсутність або недостатня кількість масла на торцевих поверхнях.
  - Забруднення масла, що викликає абразивний знос.
  - 2. Порушення умов експлуатації:
    - Часті запуски двигуна при низьких температурах без належного прогріву.
    - Перевантаження двигуна, що призводить до збільшення осьових навантажень.
  - 3. Неякісні упорні півкільця:
    - Використання деталей з недостатньо твердого матеріалу або з дефектами виробництва.
    - Неправильна установка півкільця.
  - 4. Неправильний ремонт або монтаж:
    - Неправильне затягування болтів кришок підшипників, що призводить до перекосу упорних півкільця.
    - Використання колінчастого вала з попередніми дефектами без належного відновлення.
  - 5. Нерівномірний розподіл навантажень:
    - Несправність зчеплення або гідротрансформатора, що передають осьові зусилля на колінчастий вал.
- Дії для усунення дефекту
- 1. Огляд і контроль стану деталей:
    - Перевірити торцеві поверхні валу на наявність зносу, тріщин або задирок.
    - Провести вимірювання осьового люфту колінчастого вала.
    - Оцінити стан упорних півкільця та їх кріплень.
  - 2. Механічне відновлення:
    - Відшліфувати торцеві поверхні до початкової геометрії.
    - За необхідності нанести відновлювальне покриття (металізація або зварювання з подальшою механічною обробкою).

3. Заміна або ремонт півкілець:
  - Встановити нові упорні півкіліця з матеріалу високої твердості (наприклад, бронза з антифрикційним покриттям).
  - Перевірити правильність монтажу і їх посадки.
4. Поліпшення системи змащення:
  - Очистити канали мастильної системи.
  - Використовувати мастильні матеріали відповідної в'язкості та класу.
5. Профілактика:
  - Регулярно перевіряти стан масла і своєчасно його замінювати.
  - Виконувати огляд і налаштування зчеплення та трансмісії для зменшення осьових навантажень.
  - Дотримуватись рекомендацій щодо експлуатації двигуна (особливо в умовах високих навантажень).

Ці дії дозволять зменшити ризик повторного виникнення дефекту і забезпечать надійну роботу колінчастого вала.

Дефект 3. Подряпини (рис. 2.5)



Рисунок 2.5 – Подряпини

Опис дефекту. На поверхнях корінних і шатунних шийок виявлено численні подряпини різної глибини та довжини. Вони порушують мікрогеометрію шийок, що викликає нерівномірний розподіл навантаження на вкладиші

підшипників. Це призводить до збільшення зносу, зниження ефективності змащення та може стати причиною заклинювання підшипників.

#### Причини виникнення дефекту

1. Потрапляння сторонніх частинок у мастильну систему:
  - Металеві ошурки, абразивний пи́л або інші домішки в оливі.
  - Несправність масляного фільтра або відсутність його заміни.
2. Недостатнє змащення:
  - Зниження рівня мастила або його витік.
  - Використання масла низької якості або не відповідного класу в'язкості.
3. Неправильний монтаж або ремонт:
  - Контакт шийок з абразивними матеріалами або інструментом під час ремонту.
  - Використання дефектних або зношених вкладишів.
4. Порушення умов експлуатації:
  - Робота двигуна в умовах підвищеної запиленості без належного технічного обслуговування.
  - Перегрів двигуна, що впливає на ефективність мастила.

#### Дії для усунення дефекту

1. Огляд і діагностика:
  - Провести візуальний огляд шийок для визначення характеру і глибини подряпин.
  - Виміряти геометричні параметри шийок (діаметр, овальність, конусність).
  - Перевірити стан вкладишів і мастильної системи.
2. Відновлення поверхонь шийок:
  - Легкі подряпини: усунути поліруванням із застосуванням мікроабразивної пасти.
  - Глибокі подряпини: провести шліфування до ремонтного розміру з подальшим балансуванням валу.

- У разі значного пошкодження — відновити поверхню методами наплавлення або металізації.

3. Заміна супутніх компонентів:

- Встановити нові вкладиші відповідного ремонтного розміру.
- Перевірити і за потреби замінити масляний фільтр.

4. Поліпшення системи змащення:

- Промити мастильну систему для видалення сторонніх частинок.
- Залити високоякісне масло відповідного класу.

5. Профілактичні заходи:

- Регулярно перевіряти та замінювати масло і фільтри.
- Контролювати герметичність мастильної системи.
- Уникати перевантажень двигуна та експлуатації в екстремальних умовах без додаткових заходів захисту (наприклад, використання пилозахисних фільтрів).

Застосування цих дій допоможе відновити працездатність колінчастого вала і запобігти повторному утворенню дефекту.

Дефект 4. Відхилення від прямолінійності колінчастого вала (прогин)

Опис дефекту. Колінчастий вал має прогин, що виявляється у відхиленні його геометричної осі від норми. Це призводить до порушення взаємодії валу з підшипниками, нерівномірного розподілу навантаження, підвищеного зносу деталей і вібрацій під час роботи двигуна. У важких випадках можливий вихід двигуна з ладу через руйнування підшипників або тріщини в валу.

Причини виникнення дефекту

1. Механічне перевантаження:

- Робота двигуна в умовах постійного перевантаження.
- Удари або поштовхи в результаті аварійної ситуації.

2. Неправильний монтаж або ремонт:

- Використання надмірного зусилля при затягуванні болтів кришок підшипників.
- Неправильне встановлення колінчастого вала під час ремонту.

3. Зношення матеріалу або виробничі дефекти:
  - Нерівномірність структури металу, внутрішні тріщини.
  - Виробничі дефекти, такі як залишкові напруження після виготовлення.
4. Неправильне зберігання або транспортування:
  - Прогин валу через зберігання у неналежному положенні (наприклад, горизонтально без опор).

Дії для усунення дефекту

1. Огляд і діагностика:
  - Виміряти прогин валу за допомогою індикатора годинникового типу.
  - Встановити величину відхилення від норми (зазвичай не більше 0,03–0,05 мм на всю довжину валу).
2. виправлення прогину:
  - Легкий прогин: вирівняти вал на пресі з дотриманням нормативних величин зусиль.
  - Значний прогин: провести термічну обробку (відпустку) для зняття залишкових напружень, потім вирівняти вал.
3. Перевірка стану валу:
  - Перевірити вал на наявність тріщин або дефектів після виправлення (ультразвуковий контроль).
  - Оцінити стан підшипникових шийок, за потреби провести шліфування.
4. Заміна або ремонт супутніх деталей:
  - Замінити вкладиші підшипників, які могли пошкодитися через прогин.
  - Перевірити і замінити кріплення або опори, якщо вони були причиною дефекту.
5. Профілактичні заходи:
  - Контролювати правильність встановлення валу під час монтажу.

- Забезпечити належні умови зберігання (з вертикальним розташуванням або на спеціальних опорах).
- Уникати перевантажень двигуна під час експлуатації.

Відновлений вал повинен пройти динамічне балансування перед встановленням у двигун. Це забезпечить зменшення вібрацій і рівномірний розподіл навантаження, підвищуючи довговічність двигуна.

#### Дефект 5. Тріщини на шийках колінчастого валу

Опис дефекту. На корінних або шатунних шийках колінчастого вала виявлено тріщини, які можуть бути поверхневими або глибокими. Це призводить до зниження міцності валу, ризику руйнування під час роботи, порушення взаємодії з підшипниками та підвищення вібрацій. У разі критичного поширення тріщин можливе повне руйнування вала та вихід двигуна з ладу.

#### Причини виникнення дефекту

1. Механічне перевантаження:
  - Робота двигуна на підвищених обертах або з постійними навантаженнями, що перевищують номінальні.
  - Різкі зміни режимів роботи двигуна (наприклад, різке гальмування двигуном).
2. Втомне руйнування матеріалу:
  - Довготривала експлуатація без ремонту або відновлення.
  - Погіршення фізико-механічних властивостей матеріалу через старіння металу.
3. Порушення технології ремонту або виготовлення:
  - Наявність мікротріщин, залишкових напружень після шліфування, наплавлення або іншої обробки.
  - Неправильний термічний режим під час відновлення.
4. Недостатнє змащення:
  - Локальний перегрів шийок через недостатнє або нерівномірне мастило, що призводить до утворення теплових тріщин.
5. Корозія:

- Тривалий контакт з вологою або агресивним середовищем через погану герметичність мастильної системи.

Дії для усунення дефекту

1. Діагностика і контроль:

- Провести дефектоскопію (ультразвукову, магнітопорошкову або капілярну) для виявлення тріщин і оцінки їх глибини.

- Визначити ступінь пошкодження шийок і можливість їх відновлення.

2. Відновлення шийок:

- Невеликі поверхневі тріщини: виконати шліфування до ремонтного розміру з наступним поліруванням.

- Глибокі тріщини: провести зварювання або наплавлення з використанням спеціальних матеріалів і термообробки для зняття залишкових напружень.

- Якщо відновлення неможливе, замінити вал на новий або відновлений.

3. Заміна супутніх компонентів:

- Перевірити і замінити вкладиші підшипників, які могли постраждати через дефект.

- Провести ревізію мастильної системи та встановити новий масляний фільтр.

4. Профілактика:

- Використовувати якісні мастильні матеріали та контролювати їх стан.

- Дотримуватися рекомендованих режимів експлуатації двигуна.

- Уникати роботи двигуна в умовах перевантаження і перегріву.

- Регулярно перевіряти стан валу під час технічного обслуговування.

Особливі рекомендації

Після відновлення валу обов'язково провести динамічне балансування, щоб уникнути появи нових напружень і забезпечити рівномірну роботу двигуна. Це значно підвищить термін служби як колінчастого вала, так і двигуна в цілому.

Дефект 6. Канавки та подряпини поверхні сальника (рис. 2.6)



Рисунок 2.6 – Вироблення та подряпини

Опис дефекту. На поверхні колінчастого вала, що контактує із сальниками, виявлено вироблення (канавки) або подряпини. Це викликає порушення герметичності, призводить до витікання мастила, зниження рівня змащення та підвищення ризику пошкодження інших деталей двигуна.

Причини виникнення дефекту

1. Зношення через тертя:
  - Тривалий контакт сальника з валом без належного змащення.
  - Використання сальників низької якості або зношених деталей.
2. Неправильний монтаж сальників:
  - Нерівномірне встановлення сальника, що викликає підвищений тиск на поверхню вала.
3. Забруднення або пошкодження мастильного середовища:
  - Наявність абразивних частинок, які спричиняють подряпини.

- Порушення герметичності системи через корозію або забруднення.

#### 4. Неправильна експлуатація:

- Робота двигуна з перегрівом, що впливає на стан сальників і мастила.

- Надмірні вібрації, що призводять до нерівномірного тертя.

Дії для усунення дефекту

#### 1. Діагностика і контроль:

- Провести візуальний огляд поверхні вала.
- Виміряти глибину вироблення та визначити ступінь пошкодження.

#### 2. Відновлення поверхні:

- Легкі пошкодження: виконати шліфування поверхні для вирівнювання мікрогеометрії.

- Глибокі канавки: нанести відновлювальне покриття (металізація, хромування або наплавлення) з подальшою механічною обробкою.

#### 3. Заміна сальників:

- Встановити нові сальники високої якості, відповідні за розміром і матеріалом.

- Перевірити правильність монтажу та рівномірність посадки.

#### 4. Поліпшення змащення:

- Очистити мастильну систему від сторонніх частинок.
- Використовувати мастило, рекомендоване виробником двигуна.

#### 5. Профілактичні заходи:

- Регулярно перевіряти стан сальників і їх посадочних поверхонь.
- Уникати роботи двигуна при низькому рівні мастила.
- Забезпечити належну герметичність системи для запобігання проникненню забруднень.

Особливі рекомендації

Після відновлення валу необхідно перевірити осьове та радіальне биття, щоб уникнути додаткових навантажень на сальники. Правильне

обслуговування і своєчасна заміна сальників продовжать термін служби як колінчастого вала, так і всієї системи двигуна.

Дефект 7: Знос Шпонкового пазу (рисунок 2.7).



Рисунок 2.8 – Знос шпонкового пазу

Опис дефекту. Шпонкові пази, посадкові місця під штифти і втулки мають деформації, тріщини або часткове руйнування. Це призводить до порушення фіксації компонентів, ослаблення з'єднань, зсуву деталей і, в результаті, до нерівномірного навантаження на колінчастий вал та пов'язані вузли двигуна.

Причини виникнення дефекту

1. Перевищення допустимих навантажень:
  - Різкі зміни обертів двигуна або часті пускові перевантаження.
  - Надмірне передавання крутного моменту через конструктивно слабкі зони.
2. Неправильний монтаж:
  - Перетягування штифтів або неправильне встановлення втулок і шпонок.
  - Використання деталей невідповідного розміру або матеріалу.
3. Знос і втомне руйнування матеріалу:
  - Тривала експлуатація без перевірки стану шпонкових пазів та посадкових місць.

- Нерівномірне розподілення навантаження через зношеність інших компонентів.

4. Корозійні процеси:

- Утворення корозії на поверхнях пазів та посадкових місць через погану герметичність чи агресивне середовище.

5. Механічні пошкодження:

- Попадання сторонніх предметів або неакуратна обробка під час ремонту.

Дії для усунення дефекту

1. Діагностика:

- Провести візуальний огляд стану шпонкових пазів, штифтів і втулок.

- Виконати вимірювання посадкових місць і пазів для визначення ступеня їх пошкодження.

- За потреби, провести дефектоскопію для виявлення мікротріщин.

2. Відновлення шпонкових пазів:

- Для невеликих пошкоджень: виконати обробку пазів до ремонтного розміру та встановити шпонки відповідного розміру.

- Для значних пошкоджень:

- Наплавлення металу з наступною механічною обробкою.
- Використання ремонтних вставок або втулок.

3. Відновлення посадкових місць під штифти і втулки:

- Розточування отвору до ремонтного розміру з установкою втулок.
- Застосування методів наплавлення або металізації для відновлення геометрії посадкових місць.

- Для отворів під штифти — розточування і встановлення штифтів збільшеного діаметра або спеціальних ремонтних вставок.

4. Заміна пошкоджених деталей:

- Замінити шпонки, втулки, штифти на нові, відповідні за розміром і матеріалом.

- Перевірити стан пов'язаних компонентів (шестерень, муфт, фланців).

5. Захист від корозії:

- Обробити поверхні антикорозійними складами.
- Забезпечити герметичність для запобігання проникненню вологи.

Профілактичні заходи

1. Правильний монтаж:

- Дотримуватися рекомендованих зусиль затягування і точності посадки.

- Використовувати тільки якісні деталі, сумісні з конструкцією.

2. Регулярна перевірка:

- Оцінювати стан пазів, штифтів і втулок при кожному технічному обслуговуванні.

- Своєчасно усувати дрібні пошкодження, щоб уникнути їх прогресування.

3. Контроль режимів роботи двигуна:

- Уникати частих перевантажень і роботи в екстремальних умовах.

Особливі рекомендації

Після відновлення необхідно перевірити балансування колінчастого вала, щоб запобігти вібраціям і додатковим навантаженням на відновлені ділянки. Це дозволить продовжити термін служби відремонтованого вузла.

## **2.2. ФАБО як технологічний метод зниження зносу деталей та підвищення ресурсу ДВЗ**

Ресурс двигуна загалом залежить від зносостійкості та працездатності окремих складових елементів. Для вирішення завдання збільшення ресурсу двигунів необхідно знайти способи збільшення ресурсу їхніх з'єднань.

За останні роки машинобудівні заводи виконали велику роботу з підвищення ресурсу і якості виготовлення двигунів. Однак загалом їхній міжремонтний ресурс становить 50...60 % від нормативного [21].

Низький ресурс двигунів призводить до витрат від простою тракторів і машин. Низка авторів пояснюють це недоліками технологій виготовлення та ремонту, застосуванням неякісних матеріалів.

Ключові трибосполучення, що значно впливають на ресурсні характеристики двигуна, функціонують в умовах тертя ковзання. До ресурсно визначальних для двигунів належать сполучення типу «гільза циліндра – поршневе кільце» та «колінчастий вал – вкладиш». Це змушує виробників забезпечувати довговічність цих компонентів на рівні 70% загального ресурсу двигуна внутрішнього згоряння [22].

Призначенням поршневих кілець є ущільнення камери згоряння і видалення надлишків мастильного матеріалу з дзеркала гільзи. За великих значень зносу в парі тертя «гільза циліндра - поршневе кільце» підвищується витрата оливи.

Незважаючи на щільне притиснення поршневих кілець до стінок гільзи циліндра внаслідок дії сил пружності та тиску газів у процесі роботи двигуна, між кільцем і гільзою зберігається масляна плівка завтовшки близько 10 мкм, що перешкоджає сухому тертю зазначених деталей.

Матеріалами для виготовлення гільз циліндрів ДВЗ зазвичай служать спеціальний або сірий чавуни. З метою підвищення зносостійкості поверхонь тертя гільз циліндрів і поршневих кілець, їх термообробляють і покривають зносостійкими покриттями. Так, наприклад, нанесення хрому на поверхню дзеркала циліндра може в кілька разів підвищити його зносостійкість. Проте на практиці хромуванню, як правило, піддають тільки поршневі кільця. Пов'язано це насамперед із низькими триботехнічними характеристиками пари тертя «хром - хром». Основними ж матеріалами для виготовлення поршневих кілець є сірий чавун і низьковуглецеві сталі, на бічну поверхню яких наносять

зносостійкі та приробіткові покриття. Маслознімні, а також нижні компресійні кільця можуть виготовляти з легованих або вуглецевих сталей.

Підвищення ресурсу двигунів можливе шляхом реалізації конструкторських, технологічних і експлуатаційних заходів.

До експлуатаційних заходів відносять використання мастил з присадками в початковий період експлуатації, а також вибір режимів роботи двигуна.

До конструкторських заходів можна віднести: вибір матеріалів пар тертя; створення умов для реалізації гідродинамічного режиму змащування; застосування геометричної форми деталей, що забезпечує потрібну механіку контакту; підтримання оптимальних температурних режимів у вузлах тертя тощо. Нині в цьому напрямі виконано низку важливих досліджень, що призвели до практичних результатів. Так, наприклад, встановлено, що за нормальних умов роботи двигуна більшість поршневих кілець утворюють бочкоподібний профіль, що забезпечує умови гідродинамічного змащення. Випробування кілець зі штучно заокругленим профілем показали, що їхній знос до 10 разів менший за знос звичайних кілець.

Підвищення мастилоутримувальної здатності та опірності задиру гільз циліндрів можливо домогтися нанесенням мастилоутримувального рельєфу у вигляді лунок або канавок вібронакаткою, плоскоковершинним хонінгуванням, що забезпечує збільшення ресурсу гільз до 30%. Широкого поширення для запобігання задирам набули покриття кілець, що наносяться хімічним і електрохімічним способами: лудіння, кадмування, міднення, фосфотування, сульфідидування, залізнєння, пористе хромування тощо. Позитивною властивістю сульфідних покриттів є їхня здатність під час тертя і зносу виділяти сірку, яка сприяє ковзанню і запобігає задирам в умовах граничного тертя. Набули поширення молібденові покриття на поршневих кільцях, що показали хороші протизадирні та зносостійкі якості.

До технологічних заходів відносять як підвищення точності виготовлення і складання деталей трибосполучень, так і застосування досконаліших способів обробки поверхонь тертя. У другому випадку для підвищення ресурсу

гільз циліндрів застосовують спеціальні методи хонінгування: плосковершинне, антифрикційно-деформаційне, безабразивне. За допомогою антифрикційно-деформаційного хонінгування на поверхні тертя отримують міцне антифрикційне покриття з дисульфиду молібдену, графіту, міді, олова [23]. Подібні методи отримали назву «Фінішна антифрикційна безабразивна обробка» - ФАБО.

Процес ФАБО полягає в покритті поверхні тертя деталей тонким (до 7 мкм) шаром твердомастильного матеріалу, що надає їм антифрикційних і протизносних властивостей і підвищує контактну жорсткість. Поверхні деталей за фрикційно-механічного способу ФАБО обробляють, як правило, інструментом із твердомастильних матеріалів із використанням технологічних середовищ, що містять ПАР. Структура покриття, отриманого подібним чином, пориста, що сприяє утриманню мастильного матеріалу на контактуючих поверхнях.

При ФАБО фрикційно-хімічним способом захисна так звана «сервовитна» плівка утворюється внаслідок фізико-хімічних процесів, що відбуваються між робочим середовищем і оброблюваною поверхнею під час механічної активації останньої інструментом, причому як інструментальні можуть бути використані й неметалеві матеріали. Необхідні для здійснення процесу питомі навантаження при застосуванні зазначеного методу значно менші, і не перевищують 1,0 МПа, а швидкість обробки значно підвищується. Цей метод уможливорює отримання покриттів із заданою товщиною на різних за формою і розмірами деталях.

ФАБО дає можливість підвищити зносостійкість дзеркала гільзи до 2 разів, скоротити час припрацювання, усунути задирки, збільшити ресурс двигуна. Процес ФАБО не тільки надає елементам пар тертя антифрикційних властивостей, а й захищає оброблені поверхні від проникнення водню, зменшуючи водневе зношування.

Методи ФАБО не тільки ефективні для підвищення зносостійкості поверхонь деталей, а й не потребують застосування додаткового устаткування,

тобто практично не збільшують трудомісткість і собівартість виготовлення та ремонту двигунів, що полегшує їх впровадження у виробництво.

### **2.3. Висновок**

Проведені дослідження дали змогу зробити такі висновки щодо зносу та ресурсу колінчастих валів:

Вивчення колінчастих валів базових двигунів ЗМЗ-511, ММЗ 245.7 і ЯМЗ-236 під час використання їх на автомобілях дало змогу встановити, що зносостійкість корінних і шатунних шийок доволі висока.

Корінні та шатунні шийки зношуються порівняно рівномірно як по колу, так і по довжині.

Технічний ресурс колінчастих валів перевищує встановлені норми пробігів деталей до першого капітального ремонту.

У разі, коли розміри шийок вала нижчі за останній ремонтний розмір, вал доцільно відновлювати до номінального розміру одним із таких способів: автоматичним наплавленням шийок під шаром легувальних флюсів; металізацією напиленням; електроімпульсним наплавленням у рідині; твердим електродним заливанням.

ФАБО дає можливість підвищити зносостійкість дзеркала гільзи до 2 разів, скоротити час припрацювання, усунути задирки, збільшити ресурс двигуна. Процес ФАБО не тільки надає елементам пар тертя антифрикційних властивостей, а й захищає оброблені поверхні від проникнення водню, зменшуючи водневе зношування.

### 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Уточнена модель зношування підшипникових вузлів ковзання поршневого ДВЗ

Підшипники ковзання колінчатих валів ДВЗ відносяться до класу нестационарно-навантажених, внаслідок чого зношування поверхонь тертя відбувається під впливом змінних навантажень. Зношування за таких умов виникає нерівномірно по довжині окружності тертьових поверхонь підшипника ковзання, тобто тягне появу згодом роботи вузла так званої діаграми зношування [23, 24]. Це означає, що розрахункова модель зношування підшипникових вузлів ковзання ДВЗ повинна дозволяти визначення локальних величин зношування по окружності підшипника й шийки вала. Розробці такої моделі й аналізу її можливостей і присвячена дана глава.

#### 3.2. Передумови для побудови моделі зношування підшипникових вузлів ковзання ДВЗ

Зношування поверхонь тертя підшипників ДВЗ відбувається з неоднаковою інтенсивністю в різні проміжки часу міжремонтних строків експлуатації двигуна (див. рис. 3.1). Кількісно це означає, що на тих самих режимах роботи ДВЗ швидкість зношування його вузлів тертя буде різною.

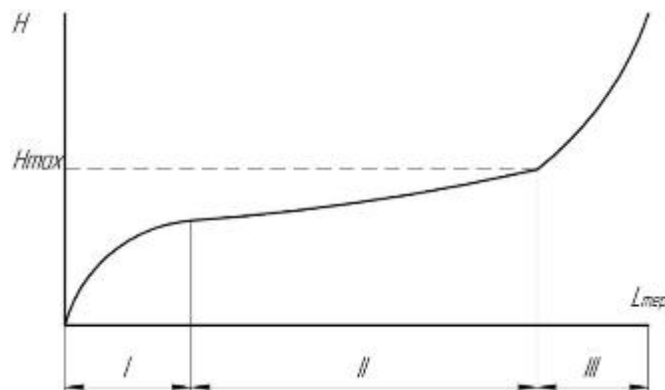


Рисунок 3.1 - Загальний вигляд поверхні зносу від часу роботи

I – припрацювання, II – сталий режим, III – катастрофічний знос

Якщо зношування поверхні тертя рівний АН за час  $t$ , то лінійна швидкість зношування цієї поверхні може бути визначена так:

$$U_h = \frac{\Delta H}{\tau} \quad (3.1)$$

Аналогічно визначаються об'ємна й масова швидкості зношування:

$$U_V = \frac{\Delta V}{\tau} \quad (3.2)$$

$$U_G = \frac{\Delta G}{\tau} \quad (3.3)$$

де  $\Delta V$ ,  $\Delta G$  - об'єм і маса зношеного матеріалу поверхні тертя.

Враховуючи вираз для лінійної швидкості зношування (3.1) буде:

$$U_h = I_h \frac{L_{TP}}{\tau} \quad (3.4)$$

Таким чином, так само як для розрахункової оцінки величин зношування, для оцінки швидкостей зношування робочих поверхонь вузла тертя на різних тимчасових етапах експлуатації ДВЗ необхідно попереднє визначення інтенсивностей зношування й шляхів тертя на різних режимах роботи двигуна [25].

Згідно з висновками, отриманими в попередній главі за результатами аналізу методів визначення параметрів, необхідних для розрахункової оцінки зношування відповідно до втомної теорії зношування, загальна послідовність усіх розрахунків розроблювальної методики виглядає в такий спосіб (рис. 3.1)



Рисунок 3.2 - Загальна принципова блок-схема побудови методики розрахункового прогнозування зношування підшипникових вузлів ДВЗ

Перейдемо до побудови методики розрахункового прогнозування зношування підшипникових вузлів ДВЗ у припущенні, що такі параметри як навантаження й товщини масляного шару для кожного кроку розрахунків по куту ПКВ знайдені за допомогою методів [25], описаних у главі 2.

### 3.3. Теоретичні умови тертя

Розрізняють три види тертя [26]:

- сухе,
- граничне,

- рідинне.

Сухе тертя виникає при взаємозв'язаному відносному русі двох сухих твердих тіл одне відносно іншого. Дане тертя ймовірне при мінімальній забрудненості поверхонь тіл, що взаємодіють. Основним показником даного тертя є коефіцієнт сухого тертя (коефіцієнт тертя покою) який визначається за виразом:

$$f = \frac{F}{N} \quad (3.5)$$

де  $F$  – максимальна сила тертя в момент початку руху, Н;

$N$  – сила нормального тиску на поверхні їх контакту, Н.

Граничне тертя виникає як і при сухому терті між двома тілами, але між ними ще є тонка плівка мастила. Товщина плівки визначається загальною формою поверхні та її шорсткістю. Так наприклад якщо поверхні що труться оброблені по вищому класу чистоти, ця умова виконується при товщині плівки біля 50-70 мкм. Та все ж в режимі граничного тертя мастильна плівка надто тонка, для повного розділення поверхонь тертя, найвищі частинки при русі все одно задівають одне одного, при чому виникає їх деформація.

В режимах сухого та граничного тертя поверхні контактують одна з другою та спрацьовуються. По характеру, спрацювання можуть знаходитись в великому діапазоні, від необхідних (спеціальне притирання, чи полірування) до заїдання та руйнування. Також погіршення стану поверхонь тертя збільшується за рахунок абразивних часточок, що відірвалися від матеріалу контактної пари.

Можна з впевненістю сказати, що робота механізмів в умовах граничного тертя небажана по таким причинам: через втрати енергії та ризику відмови елементів тертя. Для кращої роботи системи необхідно щоб поверхні тертя при русі та при зупиненні руху завжди розділялись шаром мастила.

Поверхні тертя розділяються відносно великим шаром мастила при рідинному терті. Рідинне тертя виникає коли рухомі поверхні повністю розділені товстою плівкою мастила та їх контакт одне відносно другого повністю відсутній.

Різницю між граничним та рідинним тертям можна побачити на рисунку 3.3.

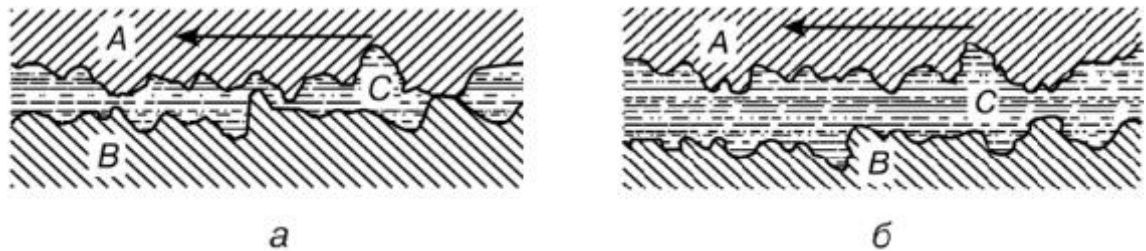


Рисунок 3.3 – Випадки граничного (а) та рідинного (б) тертя. А – рухома поверхня; В – нерухома поверхня; С – плівка мастила

При обертанні вала в підшипнику в умовах рідинного тертя за рахунок внутрішнього тиску рідини автоматично підтримується товщина плівки мастильного матеріалу при якій поверхні вала та підшипника не доторкаються одне до одного. коли машина зупиняється тиск рідини падає та товщина плівки мастила під валом зменшується внаслідок її видавлювання під силою тяжіння вала. Як би не інерція валу, це було б не страшно, але при наступному включенні початковий період роботи підшипника знаходиться знову в умовах граничного тертя.

Отже за весь період роботи турбокомпресора спряження ротор-підшипник турбокомпресора працюють в різних умовах тертя, а саме це можна побачити на рисунку 3.4.

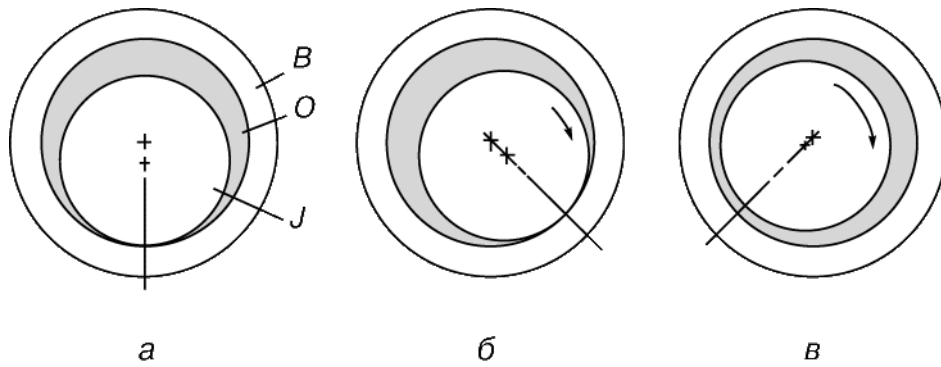


Рисунок 3.4 – Положення валу в підшипниках ковзання під час різних видів тертя: сухе тертя (а), граничне тертя(б) та рідинне тертя (в). В – підшипник ковзання, J – вал, що обертається, О – мастило.

Розглянемо приклад розрахунків величин зношування  $\Delta H$  для першої корінної шийки й підшипника КВ двигуна ЯМЗ 238. Автомобільний ДВЗ працює в широкому діапазоні режимів, тому розрахунки необхідно проводити для всіх режимів, де порушується гідродинамічний вид тертя. Один з таких режимів це режим номінального навантаження при  $=1000 \text{ хв}^{-1}$ . Зміна навантажень і толщин мастильного шару у вузлі показаний на рис. 3.5.

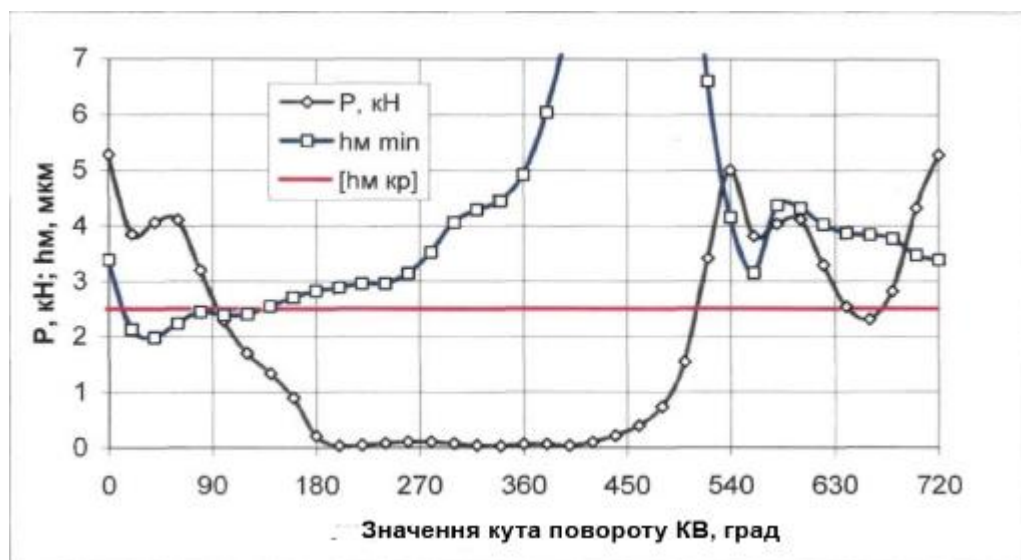


Рисунок 3.5 - Зміна навантаження на 1-ой корінній шийці й товщини масляного шару

### 3.4. Лабораторні випробування

Для досліджень використаний комплексний метод оцінки зносостійкості деталей двигуна ( на прикладі двигуна ЯМЗ-238), що включає лабораторні, стендові й експлуатаційні випробування. На рис. 3.6 представлена схема проведення досліджень.

Для лабораторних випробувань на машині тертя обрані зразки, що представляють наступні деталі двигуна: гільза - поршневе кільце, колінчатий вал - вкладиш, розподільний вал - втулка розподільного вала. Для оцінки зносостійкості використовуються наступні показники:

- величина моменту механічних втрат на тертя й період його стабілізації;
- величина коефіцієнта тертя;
- час опору схоплюванню;

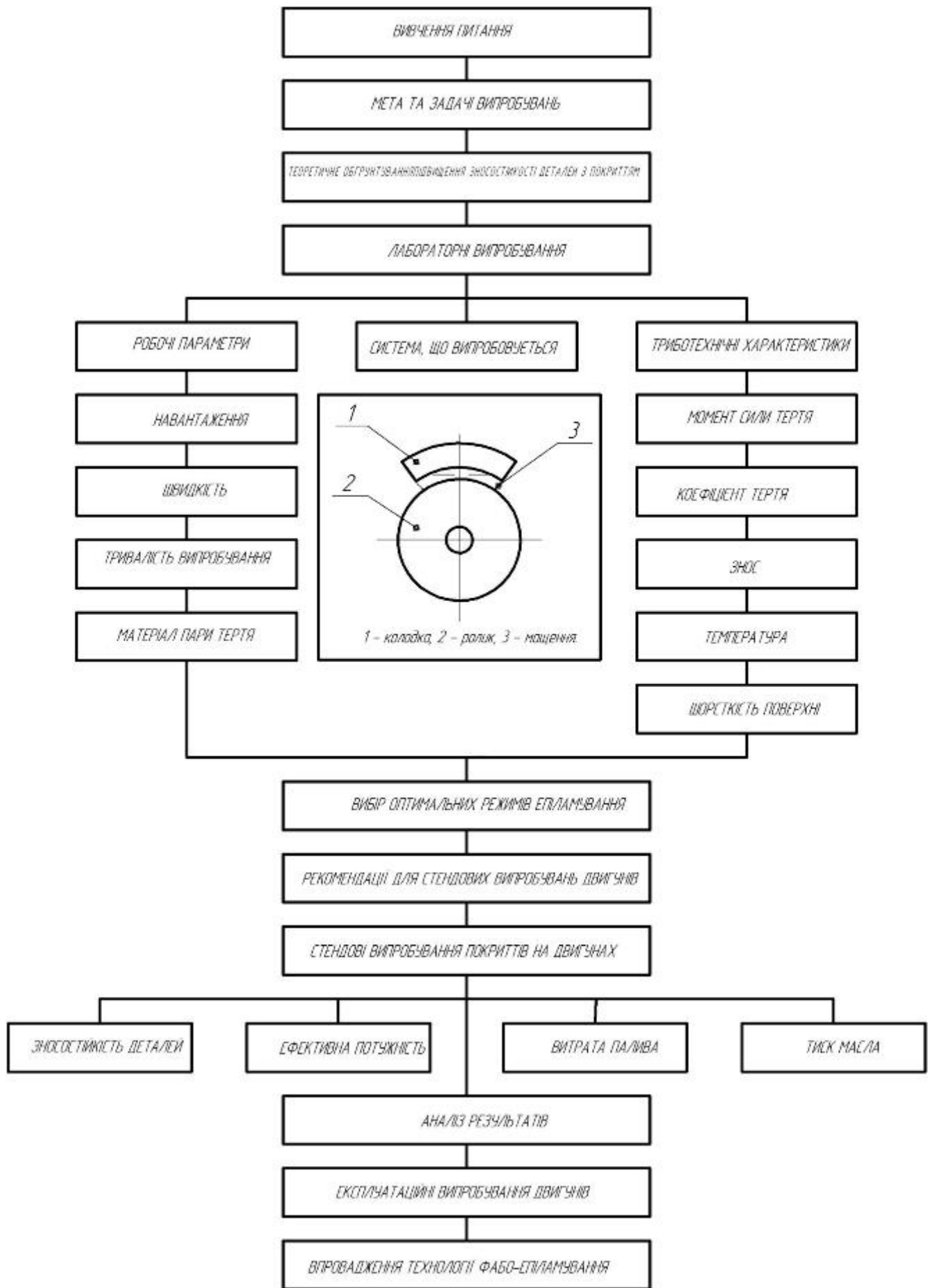


Рисунок 3.6 - Схема проведення досліджень

- температура масла;
- зношування зразків;
- шорсткість поверхонь тертя.

### **3.4.1. Машина тертя СМЦ-2**

Лабораторні дослідження проводяться на машині тертя СМЦ-2 за схемою “колодка - ролик”. Частота обертання вала, на якому закріплений ролик, рівна  $500 \text{ хв}^{-1}$ . Випробування проводяться при навантаженнях, наближених до діючих навантажень у двигуні внутрішнього згоряння.

### **3.4.2. Зразки й матеріали**

Зразки пара тертя виготовляються з конструкційних матеріалів і безпосередньо з деталей кривошипно-шатунного механізму, циліндропоршневої групи й газорозподільного механізму двигуна ЯМЗ-238. Зразки для випробувань були виготовлені з матеріалу, близького по властивостях матеріалу гільзи, і безпосередньо з компресійного кільця, колінчатого вала, вкладиша, розподільного вала й втулки розподільного вала.

Гільзи циліндрів двигуна ЯМЗ-238 виготовляють із сірого чавуну марки СЧ 25, модифікованого порошковим феросиліцієм. Цей чавун має певні антифрикційні властивості через наявність графітових включень. Зміст графіту коливається від 3,15 до 3,35 %.

Поршневі кільця виготовляють із сірого легованого чавуну з мелкопластинчатим графітом. Основу його становить сорбований перліт, який має трохи більшу твердість у порівнянні зі звичайним сірим чавуном. Перше поршневе кільце покрите шаром гальванічного хрому, товщина якого коливається від 100 до 200 мкм. Таке покриття знижує зношування, як кілець, так і гільз циліндрів, через зниження коефіцієнта тертя в 2 рази. Друге поршневе кільце покрите шаром олова товщиною від 60 до 200 мкм для поліпшення припрацювання.

Колінчаті вали двигуна роблять зі сталі штамповкою. У якості матеріалу вкладиша використовують антифрикційні кольорові сплави, такі як

олов'янисто-свинцеві бронзи, алюмінієві сплави типу АЛ, АН, АСМ. У табл.

3.1 наведені характеристики зразків.

Таблиця 3.1 - Характеристика деталей двигуна ЯМЗ-238

| №<br>п/п | Деталь                                      | Матеріал                                                     | Твердість        | Шорсткість<br>поверхні<br>Ra, мкм | Примітки                                                    | Характерний<br>розмір,<br>мм                                            |
|----------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Гільза ци-<br>ліндра<br>ДСТУ                | СЧ 25 ДСТУ<br>1412-95                                        | HB-<br>170...241 | 0.32                              |                                                             | Внутрішній<br>діаметр 130                                               |
| 2        | Компре-<br>сійне кі-<br>льце ДСТУ<br>846-93 | Сталь 45<br>ДСТУ 1050-<br>94                                 | HRC-<br>54...68  | 0.32-0.16                         | Лудити пі-<br>сля мех.<br>обробки<br>товщиною<br>0.05- 0.01 | Зовнішній ді-<br>аметр при за-<br>зорі в стику<br>$0.4 \pm 0.1$ , 130,5 |
| 3        | Колінчатий<br>вал                           | Сталь 50Г<br>ДСТУ 1050-<br>94                                | HB-<br>207...249 | 0.634                             |                                                             | Діаметр шату-<br>нної<br>шийки $88_{-0.03}$                             |
| 4        | Вкладиш                                     | Сталь 08 кп<br>ОСТ<br>37001045                               | HB-<br>207...249 | 0.634                             | Основа<br>сталь 08<br>КП                                    | Внутрішній<br>радіус<br>$44 \pm 0.05$                                   |
| 5        | Розподіль-<br>ний вал<br>ДСТУ<br>3007-95    | Сталь 45<br>ДСТУ 1050-<br>94                                 | HRC-<br>54...68  | 0.32                              | Загарту-<br>вання ТВЧ<br>$2.5 \dots 5.0$<br>мм              | Діаметр опор-<br>ної шийки<br>$50^{+0.07}$                              |
| 6        | Втулка роз-<br>подільного<br>вала           | Сталебабі-<br>това стрічка<br>по ТУ<br>110021-2000<br>основа | HRB>60           | 0.32                              | Покриття<br>КД 1...2                                        | Внутрішній<br>діаметр $50^{+0.05}$                                      |

Зразки для випробувань деталей по пп. 1,3,5 виготовляли у вигляді роликів (рис 3.7), колодки (рис 3.8) .

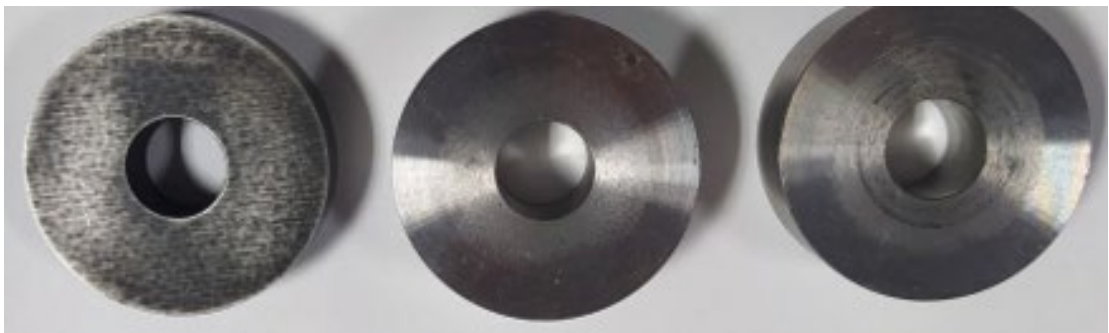
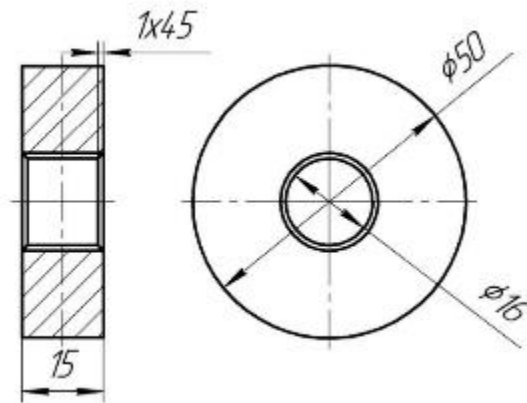


Рисунок 3.7 - Ролик для випробувань на машині тертя СМЦ-2

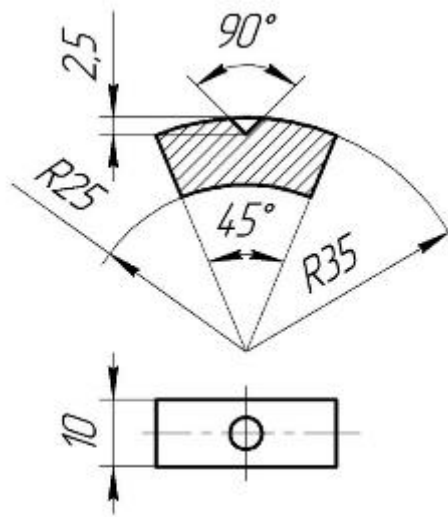


Рисунок 3.8 - Колодка для випробувань на машині тертя СМЦ-2

### 3.4.3. Нанесення епілама

Для епіламування трибозеднань використовується мастильна композиція 6 СФК-180-05 (ТУ 6-02-1229-92), що представляє собою 2,0 % розчин перфторполіефіра карбонової кислоти 6 МФК-180 (ТУ-6-02-2-610-2000) загального виду  $R_fCOOH$  ( $R_f$  - фторвмісткий радикал) у хладону 113 (ДСТУ 23344-99) [27, 28, 29]. Передбачається розглянути кілька можливих способів нанесення епілама. Способи нанесення епілама залежать від величини, конфігурації деталі й розташування її у вузлі або агрегаті. На підставі аналізу стану питання обрані наступні способи нанесення епіламу:

- кистю або тампоном з білого дрантя,
- розпиленням з пульверизатора,
- витримкою в епіламі протягом доби,
- кип'ятінням в епіламі.

У першому й третьому варіантах (нанесення кистю, тампоном або пульверизатором) деталі знежирюють, висушують у сушильній шафі при температурі  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 20 хв, потім на робочі поверхні наносять епілам. Після нанесення епіламу, зразки витримують у сушильній шафі при температурі  $t = 60 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 1,5 - 2,0 год або на повітрі протягом 24 г.

При обробці деталей кип'ятінням діють наступним чином: добре знежирені й просушені зразки опускають у герметично закриту ємність з епіламом, нагрівають до температури ( $t = 45^{\circ}$ ) і витримують 30-60 хв. Після цього зразки виймають і сушать у термошафі протягом 1,5 - 2,0 г.

Схема установки для нанесення епіламу наведена на рис. 3.9., 3.10.

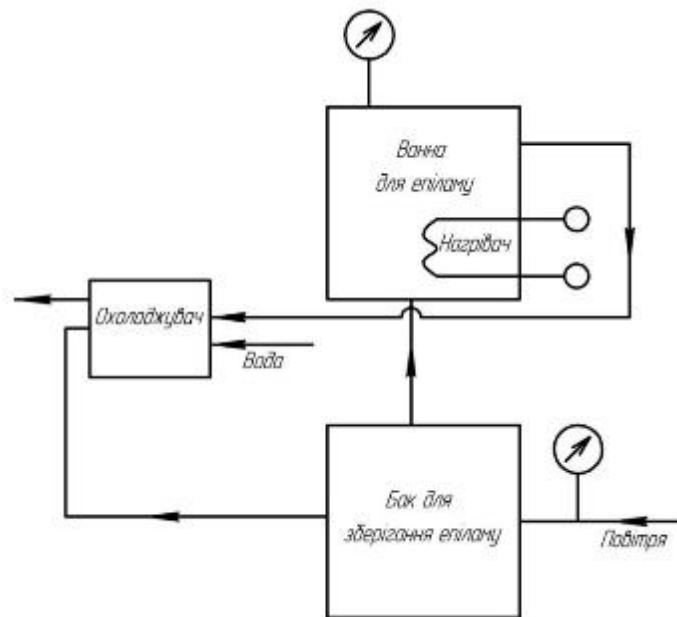


Рисунок 3.9 - Схема установки для епіламування зразків



Рисунок 3.10 - Обладнання для епіламування

Ванни й бак виготовляються з нержавіючої сталі або алюмінію. Установка працює в такий спосіб: ретельно знежирені деталі завантажують у тару й поміщають у ванну для епіламу й герметично закривають. Потім пускають повітря в бак і з нього епілам витісняє у ванну. Тривалість епіламування - 10-15 хв. Після чого деталі сушать, а потім оцінюють якість обробки. На поверхню

наносять краплю масла, вона повинна втримуватися на поверхні під кутом  $72^\circ$ , зберігаючи форму близьку до сферичної.

#### 3.4.4. Технологія ФАБО

У нашому випадку проводили ФАБО зразків, близьких за матеріалами гільзі й компресійному кільцю. Обраний спосіб фрикційного латунування ролика з використанням пристосування, встановленого в різцетримачі верстата й представленого на рис. 3.11 і рис. 3.12.

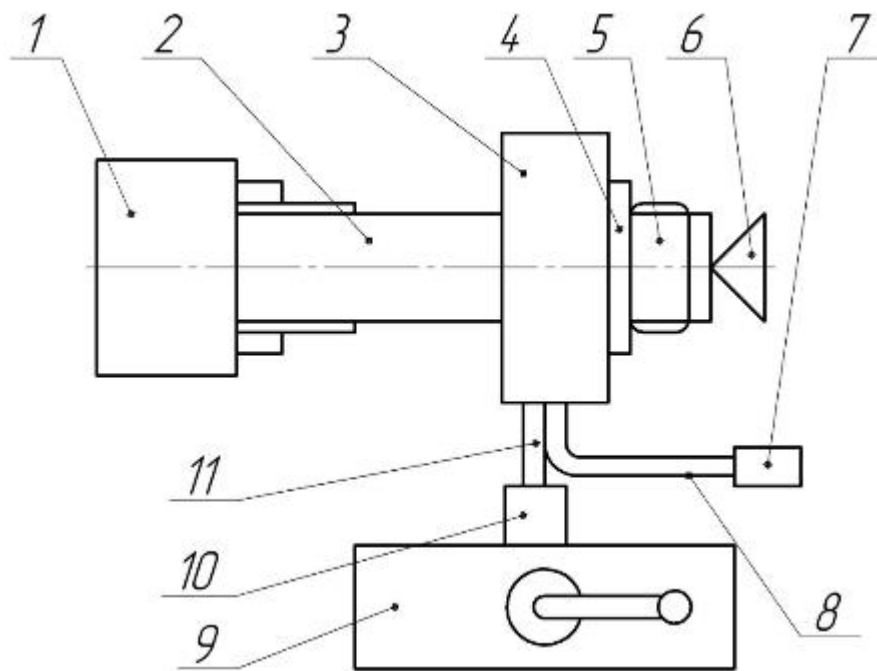


Рисунок 3.11 - Схема нанесення антифрикційного покриття на ролик

1 - патрон трикулачковий самоцентруючий; 2 - оправка; 3 - оброблюєма деталь; 4 - шайба; 5 - гайка; 6 - рухомий центр задньої бабки; 7 – пристрій для подачі плакуючого середовища; 8 - патрубок; 9 - різцетримач; 10 - оправка; 11 - притир

При обраному способі ФАБО захисна металева плівка формується в результаті фізико-хімічних процесів, при механічній активації поверхні інструментом (терті). Активація поверхні проводиться неметалічним інструментом (наприклад повстяним). Необхідні питомі навантаження при цьому у два рази менше, чим при ФАБО прутковим інструментом і становлять 0,5...1,0 МПа.

Обрані на підставі літературного огляду режими фрикційно-хімічної обробки наведені в табл. 3.2.

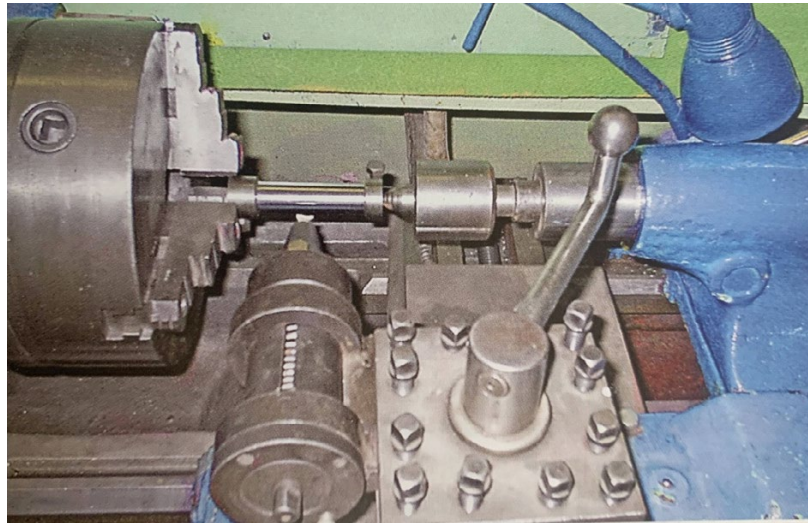


Рисунок 3.12 - Проведення ФАБО ролика

Таблиця 3.2 Режими фрикційно-хімічної обробки

| Матеріал                    |             | Режими обробки |            |          |                          |                                                           |
|-----------------------------|-------------|----------------|------------|----------|--------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Оброблюваної<br>поверхні    | Інструмента | V<br>м/с       | З<br>мм/об | P<br>МПа | Число робо-<br>чих ходів | Мастильне середовище. %                                   |
| Сталь 45<br>ГОСТ<br>1050-74 | Повсть      | 2              | 0.2        | 1.0      | 3...4                    | Хлорид міді (2)<br>СiС12*2НoО ..... 3                     |
| СЧ 25<br>ГОСТ               |             |                |            |          |                          | Емульсол<br>НГЛ-205 .....3                                |
|                             |             |                |            |          |                          | Гліцерин<br>СН <sub>2</sub> ОНСНОНСН <sub>2</sub> ВІН..35 |
|                             |             |                |            |          |                          | Вода Н <sub>2</sub> О ..... 59                            |

Нанесення антифрикційних покриттів проводили на токарно-гвинторізному верстаті моделі 1К62. Ролики встановлювали на оправку, закріплену в трикулачковому патроні й підгорнуту центром задньої бабки. До проведення дослідів ролики шліфували для одержання шорсткості  $Ra = 0,63...0,32$  мкм.

### 3.4.5. Визначення коефіцієнта тертя

Коефіцієнт тертя для кожного режиму випробувань обчислюється по формулі:

$$f = \frac{M_{\text{терт}}}{P \cdot \frac{d}{2}} \quad (3.6)$$

де  $M_{\text{терт}}$  - середнє арифметичне значення моменту тертя;

$P$  - нормальне навантаження на колодку, Н;

$d$  - діаметр ролика, м.

### 3.4.6. Визначення зношування зразків

Зношування зразків визначається методом зважування на аналітичних вагах ВЛР-200 М з точністю 0,00001 г. Перед зважуванням зразки промивають у розчиннику, висушують у термошафі протягом 10 хв при  $T = 373$  К. Зважування зразків проводять два рази: перед випробуванням і після випробувань на зношування.

### 3.4.7. Оцінка шорсткості поверхні тертя

Шорсткість поверхні тертя зразків оцінюють за допомогою мікроскопа МБС-1 методом порівняння при збільшенні в 35 і 56 раз. Використання профілометра-профілографа М 201 у цьому випадку недоцільно через малу площу контакту зразка й контрзразка.

## 3.5. Результати лабораторних досліджень

### 3.5.1. Коефіцієнт тертя

Коефіцієнт тертя для кожного режиму випробувань обчислюється по формулі:

$$f = \frac{M_{\text{терт}}}{P \cdot \frac{d}{2}}, \quad (3.7)$$

Вплив епіламування й Фабо-Епіламування на коефіцієнт тертя з'єднань колодка (СЧ 25) - ролик (Сталь 45) можна оцінити по кривих, представлених на рис. 3.13. Епіламування знижує коефіцієнт тертя на початковому етапі в порівнянні з вихідною парою тертя в 1,6 рази, наприкінці експерименту в 1,95 рази. Використання Фабо-Епіламування зменшує коефіцієнт тертя на початковому етапі в 2,11 рази в порівнянні з вихідною парою тертя й наприкінці експерименту в 3,25 рази. У порівнянні з епіламуванням, Фабо-Епіламування зменшує коефіцієнт тертя в 1,33 рази на початку дослідів й в 1,66 рази наприкінці дослідів (рис. 3.13).

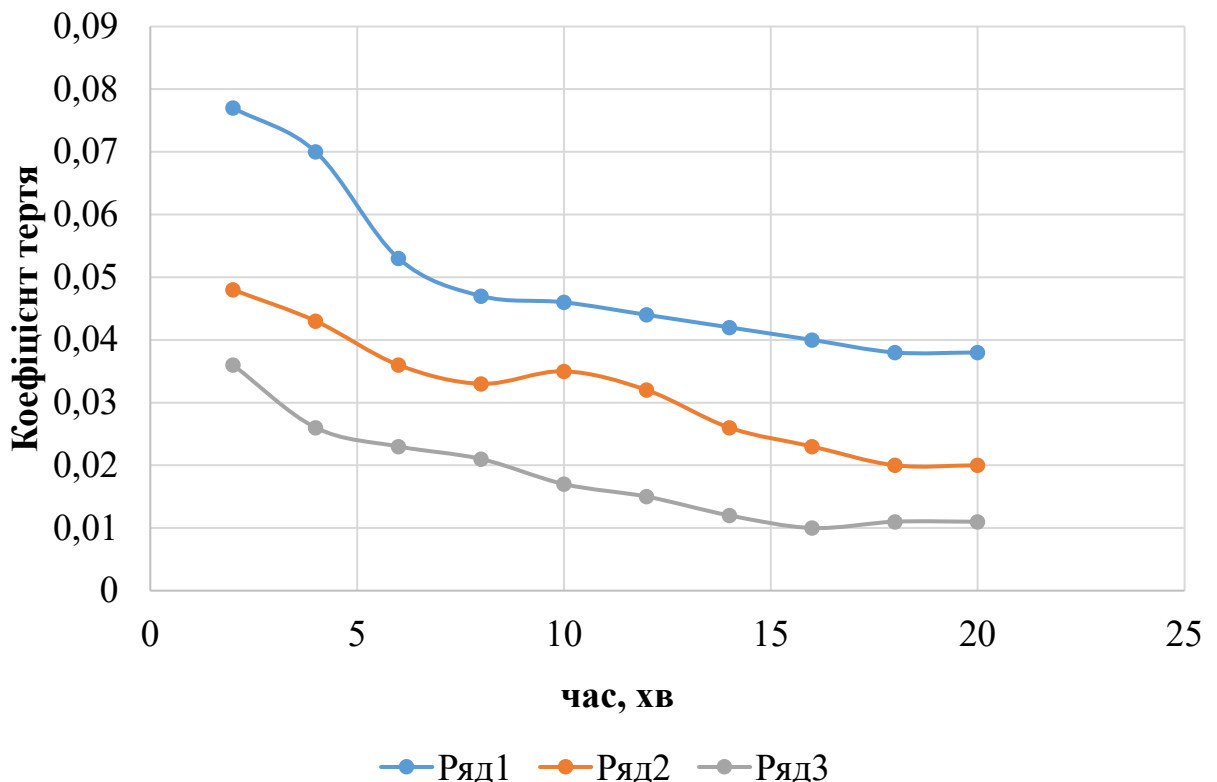


Рисунок 3.13 - Залежність коефіцієнту тертя від поєднання ФАБО та епіламування на поверхнях тертя:

1 – вихідне з'єднання, 2 – з'єднання з епіламуванням, 3 – з'єднання з ФАБО-Епіламуванням.

Таким чином, Фабо-Епіламування поверхонь тертя зразків зменшує коефіцієнт тертя в середньому ( у порівнянні з неопрацьованими зразками):

- для з'єднань Сталь 45 - чавун СЧ 25 в 2, 5 рази;

### 3.5.2. Шорсткість поверхонь тертя

Діаграми зміни шорсткості поверхні колодки (СЧ 25) і ролик (Сталь 45) до й після випробувань представлені на рис.3.13, 3.14. Перед експериментом шорсткість поверхонь тертя; вихідної пари - колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,63$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 1,25$  мкм; епіламованої пари - колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,6$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 1,22$  мкм.

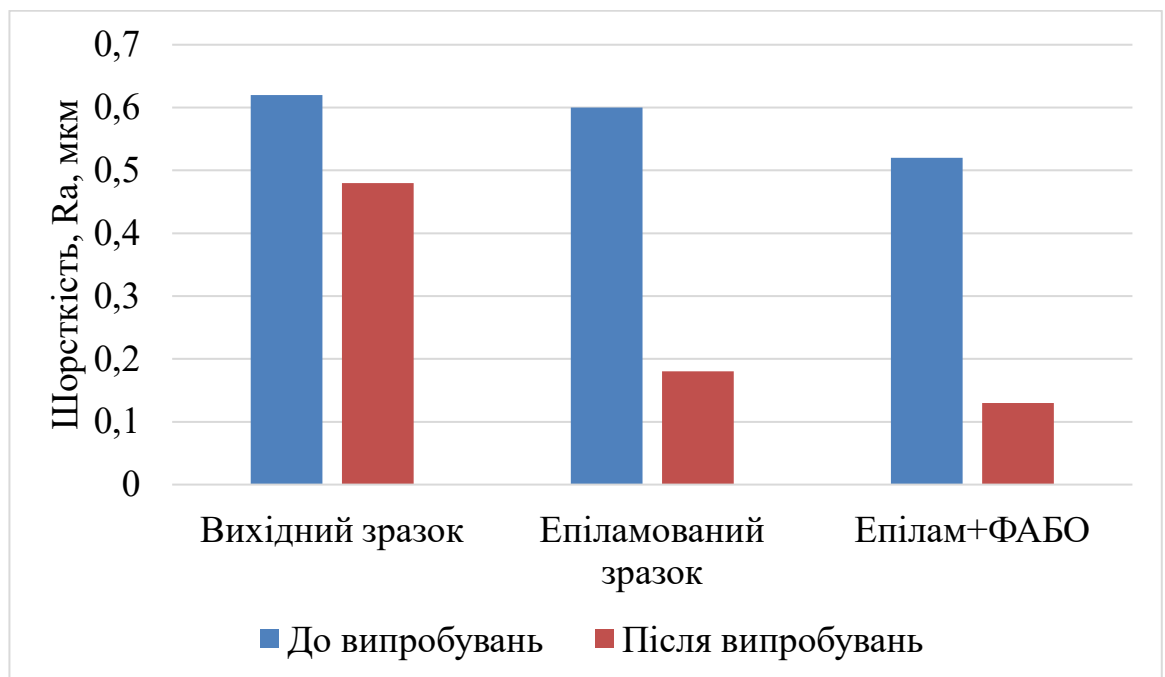


Рисунок 3.14 - Шорсткість поверхні тертя колодки (СЧ 25) до й після випробувань:

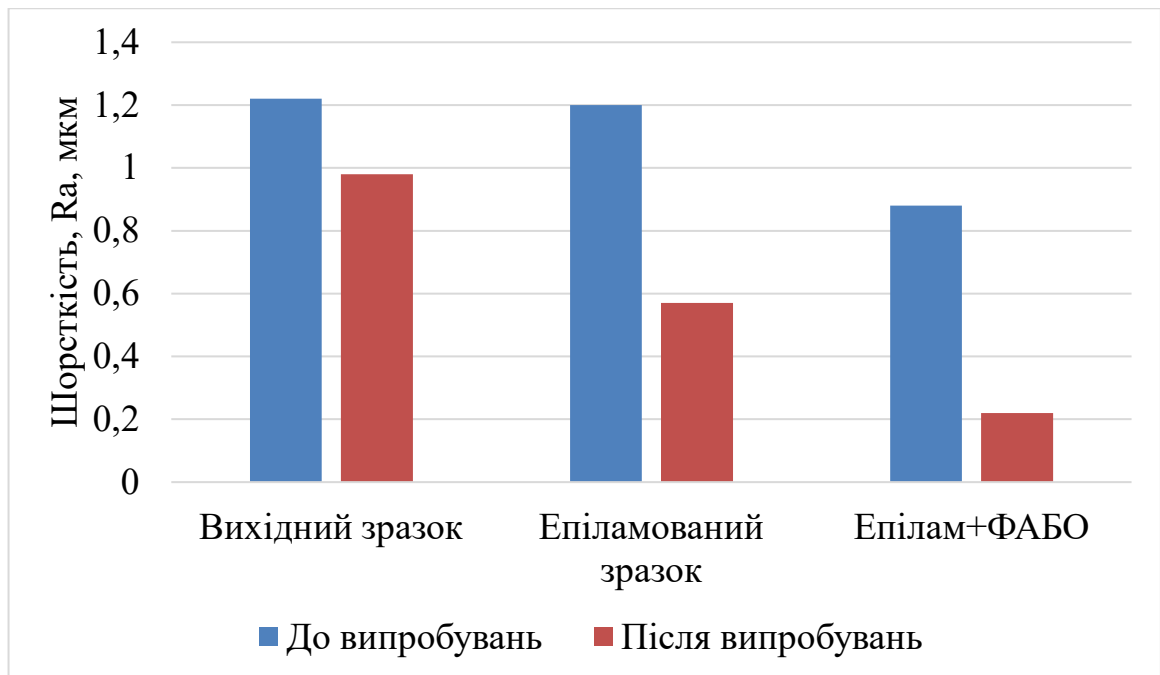


Рисунок 3.15 - Шорсткість поверхні тертя ролика (Сталь 45) до й після випробувань: 1 - вихідний зразок; 2 – епіламований зразок; 3 - зразок після ФАБО-Епіламування.

Найкраща якість поверхні тертя перед експериментом мають пари тертя, піддані ФАБО-Епіламуванню: шорсткість поверхні колодки (СЧ 25)  $Ra = 0,52$  мкм, ролика (Сталь 45)  $Ra = 0,88$  мкм. Після експерименту шорсткість поверхонь вихідної пари тертя становила: колодки (СЧ 25)  $Ra = 0,47$  мкм, ролика (Сталь 45)  $Ra = 0,95$  мкм. Шорсткість епіламованої пари тертя після експерименту: колодки (СЧ 25)  $Ra = 0,16$  мкм, ролика (Сталь 45)  $Ra = 0,55$  мкм. Після експерименту шорсткість пари, підданої ФАБО й епіламуванню становила: колодки (СЧ 25)  $Ra = 0,14$  мкм, ролика (Сталь 45)  $Ra = 0,23$  мкм.

У порівнянні з епіламуванням ФАБО-Епіламування поверхонь тертя є більш ефективним. Шорсткість поверхні колодки, підданої ФАБО-Епіламуванню, після експерименту  $Ra = 0,14$  мкм у порівнянні з епіламованою колодкою після експерименту  $Ra = 0,16$  мкм знизилася в 1, 2 рази. Шорсткість поверхні ролика, підданого ФАБО-Епіламуванню, після експерименту  $Ra = 0,23$  мкм, у порівнянні з епіламованим роликом ( $Ra = 0,55$  мкм) знизилася в 2, 3 рази.

### 3.5.3. Зношування зразків залежно від часу випробування

Випробування проводили протягом 10 годин. Зразки були виготовлені з матеріалу, близького по властивостях матеріалу гільзи (СЧ 25), і безпосередньо з компресійного кільця (Сталь 45). Сумарне зношування з'єднання колодка-ролик, отриманий шляхом додавання зносів ролика (Сталь 45) і колодки (СЧ 25), представлений на рис. 3.16.

Відношення сумарного зношування з'єднання без покриття до сумарного зношування епіламованого з'єднання після години випробування рівно 3,8. Відношення зносів з'єднань без покриття й епіламованого після 10 год випробування рівно 3,72. Видно, що після 10 год випробування на машині тертя відношення зносів з'єднань без покриття й епіламованого зменшилось приблизно на 2,1 %. Тобто, позитивний ефект від епіламування зберігається досить тривалий час.

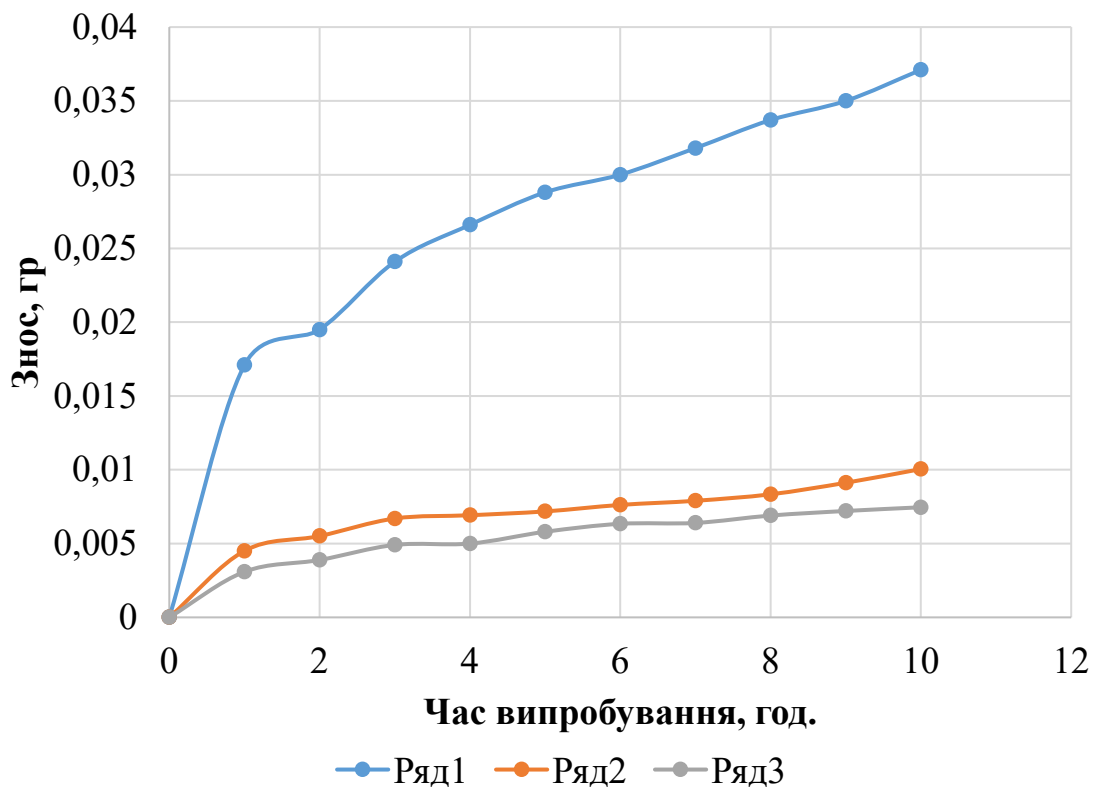


Рисунок 3.16 - Залежність зношування з'єднання колодка-ролик від часу випробування:

1 - з'єднання без покриттів; 2 - епіламоване з'єднання; 3 - з'єднання після Фабо-Епіламування.

На рис 3.17 наведено зразки деталей з нанесеним покриттям.



Рисунок 3.17 - Зразки деталей з нанесеним покриттям

### 3.6. Висновок

За результатами розробки розрахунково-експериментальної методики оцінки швидкості зношування підшипників ковзання КВ поршневого ДВЗ можна зробити наступні висновки:

1. Методика базується на принципі поетапного розрахункового визначення шуканих величин, початком якого вважається пошук газових навантажень

робочого процесу двигуна, а закінченням- визначення величин швидкостей зношування поверхонь тертя.

2. Нерівномірність зношування робочих поверхонь шийок і вкладишів КВ ураховується в методиці шляхом покрокового по куту ПКВ розрахунків інтенсивностей зношування.

Обґрунтований спосіб розрахункової оцінки зношування підшипникових вузлів двигуна через поняття швидкості зношування поверхні тертя за період експлуатації ДВЗ внаслідок мінливості інтенсивності зношування в часі.

Запропоновано спосіб зменшення тертя у вузлах двигуна, а саме нанесення зносостійкого покриття шляхом епіламування. В результаті отримаємо відношення сумарного зношування з'єднання без покриття до сумарного зношування епіламованого з'єднання після години випробування рівно 3,8. Відношення зносів з'єднань без покриття й епіламованого після 10 год випробування рівно 3,72. Видно, що після 10 год випробування на машині тертя відношення зносів з'єднань без покриття й епіламованого зменшилось приблизно на 2,1 %. Тобто, позитивний ефект від епіламування зберігається досить тривалий час.

## **4. ОБЕЗПЕКА ПРАЦІ**

### **4.1. Безпека праці при проведенні експериментальних досліджень**

Наукові дослідження, особливо ті, що проводяться на експериментальних установках, потребують підвищеної уваги до питань охорони праці. Це обумовлено високим рівнем невизначеності, експлуатацією нестандартного або модифікованого обладнання, а також участю персоналу, який може працювати в умовах підвищеного ризику. У випадку застосування установки для нанесення фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО) на токарному верстаті важливість дотримання вимог охорони праці визначається такими аспектами:

Обробка деталей на токарному верстаті передбачає роботу з рухомими частинами механізму та високоточними інструментами. Це створює небезпеку травмування рук, очей або інших частин тіла оператора у випадку недотримання правил безпеки.

Нанесення антифрикційних покриттів може передбачати використання спеціальних установок, які не пройшли масового тестування. Це збільшує ймовірність виникнення технічних несправностей або аварійних ситуацій.

У процесі нанесення покриття можуть застосовуватися хімічні речовини, мастила або оливи, які є потенційно небезпечними для здоров'я (шкідливі випари, контакт зі шкірою).

Токарний верстат і додаткове обладнання для ФАБО підключені до електромережі, що створює ризик ураження електричним струмом через пошкодження кабелів, неправильну експлуатацію чи відсутність заземлення.

Робота з експериментальною установкою може супроводжуватися підвищеним рівнем шуму, вібрацій, пилу або теплового випромінювання, що впливає на здоров'я оператора.

Наукові дослідження нерідко виходять за рамки регламентованих процедур, що може призводити до недотримання стандартів охорони праці.

## Висновок

Забезпечення безпеки під час наукових досліджень на експериментальних установках, зокрема при роботі з установкою для ФАБО, є важливим для збереження здоров'я та життя працівників, а також для успішного виконання досліджень. Це передбачає розробку інструкцій з охорони праці, навчання персоналу, використання засобів індивідуального захисту, регулярний контроль за технічним станом обладнання та проведення оцінки ризиків перед початком роботи.

## 4.2. Заходи безпеки

Для мінімізації впливу шкідливих та небезпечних факторів необхідно вживати наступних заходів:

- Вентиляція робочих місць: Забезпечення ефективної вентиляції для відведення шкідливих речовин.
- Засоби індивідуального захисту: Використання респіраторів, захисних окулярів, рукавичок та іншого спецодягу.
- Медичні огляди: Регулярні медичні огляди працівників для виявлення ранніх ознак професійних захворювань.
- Автоматизація виробничих процесів: Заміна ручної праці на автоматизовані процеси там, де це можливо.
- Оптимізація організації робочого місця: Створення комфортних умов праці, що сприяють зниженню фізичного та психологічного навантаження на працівників.
- Навчання працівників: Проведення інструктажів з питань охорони праці та пожежної безпеки.

Таблиця 4.1 - Заходи безпеки

| Фактор          | Заходи безпеки                                                                               |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Хімічні фактори | Використання витяжних шаф, респіраторів, захисного одягу, регулярне провітрювання приміщення |

|                           |                                                                                                                       |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фізичні фактори           | Звукоізоляція обладнання, використання віброізолюючих матеріалів, застосування інструментів з низьким рівнем вібрації |
| Психофізіологічні фактори | Оптимізація режиму роботи та відпочинку, ротація робочих місць, психологічна підтримка працівників                    |

Основним чинником нормальної безпечної роботи є мікроклімат в приміщенні, одним із складових мікроклімату є вентиляція, яка може бути природна і штучна.

#### **4.2.1. Розробка організаційно – технологічної карти безпечної роботи на установці для ФАБО обробки**

При проведенні експериментальних досліджень виникає необхідність у розробці установок та стендів за допомогою яких будуть проводитись експериментальні дослідження.

Представлена конструкція стенду призначена для зміцнення деталей ФАБО обробкою.

Стенд базується на токарно-гвинторізному верстаті 1К62 на якому в різцетримач встановлено головку за допомогою якої відбувається вібрація електроду.

Розроблена конструкція стенда підходить для використання на спеціалізованих ділянках з ремонту деталей машин, а також на ремонтних підприємствах, що займаються відновленням двигунів.

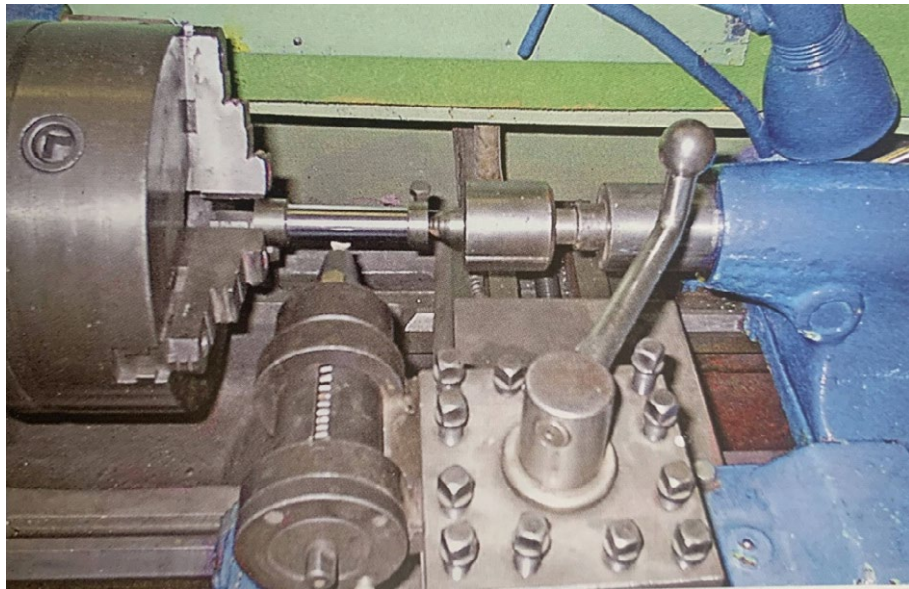


Рисунок 4.2 - Проведення ФАБО ролика

Для створення карти небезпечних зон та вимог безпечної роботи для установки нанесення фінішної антифрикційної безабразивної обробки на токарному верстаті, пропоную структуру таблиці з ключовими аспектами:

Таблиця 4.5 - Небезпечні зони та вимоги по забезпеченню безпечної роботи на установці ФАБО

| Зона                      | Потенційна небезпека                               | Причина небезпеки                                      | Вимоги до безпеки                                                               | Додаткові заходи                                          |
|---------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Робоча зона оператора     | Можливість травмування рук під час обробки деталей | Контакт з рухомими частинами верстата та інструментами | Використовувати захисні рукавички, уникати контакту з деталями, що обертаються. | Інструктаж з безпеки, застосування екрану або огорожень.  |
| Зона завантаження деталей | Ризик защемлення пальців або ударів важкими        | Недостатній контроль під час маніпуляцій з деталями    | Використовувати захвати, рукавички, дотримуватись правил                        | Застосування підйомного обладнання, тренування персоналу. |

|                      |                                                            |                                                                  |                                                                                             |                                                                              |
|----------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                      | деталлями під час завантаження                             |                                                                  | завантаження деталей.                                                                       |                                                                              |
| Зона обробки         | Ураження оливами, мас-тилами, попадання абразивного пилу   | Неправильне налаштування обладнання, витoki матеріалів           | Використовувати спецодяг, окуляри та респіратори для захисту від пилу та олив.              | Регулярне технічне обслуговування та прибирання робочого місця.              |
| Зона електроживлення | Ураження електричним струмом                               | Контакт з пошкодженими кабелями або елементами електрообладнання | Перевіряти справність ізоляції, дотримуватись норм роботи з електроустановками.             | Забезпечити маркування небезпечних зон і наявність інструментів для ремонту. |
| Зона рухомих частин  | Захоплення одягом або волосся рухомими частинами механізму | Робота без засобів індивідуального захисту                       | Одягати спецодяг, уникати звисаючого одягу та прикрас, прибирати волосся під головний убір. | Встановити аварійну кнопку зупинки обладнання поблизу оператора.             |

### 4.3. Висновок

Забезпечення безпеки під час наукових досліджень на експериментальних установках, зокрема при роботі з установкою для ФАБО, є важливим для збереження здоров'я та життя працівників, а також для успішного виконання досліджень. Це передбачає розробку інструкцій з охорони праці, навчання персоналу, використання засобів індивідуального захисту, регулярний контроль

за технічним станом обладнання та проведення оцінки ризиків перед початком роботи.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1. Розрахунок економічної ефективності технології відновлення металізацією з нанесенням ФАБО покриття

Розрахунки проведемо для колінчастого валу двигуна ЯМЗ 238 у якого 4 шатунні та 5 корінних шийок, загальна площа відновлення складає 21,5 дм<sup>2</sup>.

Собівартість відновлення 1 дм<sup>2</sup> зношеної поверхні [32].

$$C_{\Pi} = 3\Pi + \Pi_{\text{м}}, \quad (5.1)$$

де 3Π - витрати на зарплату робітників ремонтного персоналу, грн/дм<sup>2</sup>;

Π<sub>м</sub> - ціна матеріалів для відновлення зношеної площі підшипникового гнізда в 1 дм<sup>2</sup>, грн/дм<sup>2</sup>.

Витрати на заробітну плату робітників ремонтного персоналу

$$3\Pi = 3\Pi_0 + 3\Pi_{\text{д}} + \text{Н}_{\text{св}}, \quad (5.2)$$

де 3Π<sub>0</sub> - витрати на основну заробітну плату робітників ремонтного персоналу, грн;

3Π<sub>д</sub> - витрати на додаткову заробітну плату робітників ремонтного персоналу, грн;

Н<sub>св</sub> - витрати на нарахування соціального внеску, грн.

Основну заробітну плату робітників ремонтного персоналу розраховано за формулою

$$3\Pi_0 = T_{0\text{б}} \cdot T_{\text{год}}, \quad (5.3)$$

де Т<sub>об</sub> - загальні витрати праці на відновлення 1 дм<sup>2</sup> зношеної поверхні, год;

$T_{\text{год}}$  - годинний тариф, грн/год.

Трудовіткість відновлення 1 дм<sup>2</sup> зношеної поверхні шийок валу  $T_{\text{об}}$ , що дорівнює нормі на виконання всіх робіт із відновлення, зафіксували методом хронометражу (таблиця 5.1). Розрахунок виконували для колінчастого валу ЯМЗ 238 з діаметральним зносом отворів у 0,20 мм.

Для операцій технологічного процесу відновлення прийнято четвертий розряд слюсаря з відрядною оплатою праці та годинним тарифом у 92 грн/год.

Так як нанесення ФАБО покриття також складає 0,03 години на 1 дм<sup>2</sup> тому кінцеву суму помножимо на 2.

$$ЗП_0 = (92 \cdot 0,03) \cdot 2 = 5,52 \text{ грн І дм}^2.$$

Додаткова заробітна плата

$$ЗП_д = ЗП_0 - К_{\text{дп}}, \quad (5.4)$$

де  $К_{\text{дп}}$  - коефіцієнт додаткової оплати, що становить 10 % від витрат на основну зарплату робітників ремперсоналу.

$$ЗП_д = (5,52 \cdot 0,1) \cdot 2 = 1,1 \text{ грн І дм}^2$$

Нарахування на соціальний внесок визначали за формулою

$$Н_{\text{св}} = (ЗП_0 + ЗП_д) \cdot К_{\text{сс}}, \quad (5.5)$$

де  $К_{\text{св}}$  - коефіцієнт нарахувань соціального страхування, що становить 18 % від суми витрат на основну і додаткову зарплати ремонтного персоналу.

$$Н_{\text{св}} = ((5,52 + 1,1) \cdot 0,18) \cdot 2 = 2,4 \text{ грн І дм}^2$$

Таблиця 5.1- Норма часу на відновлення 1дм<sup>2</sup> зношеної поверхні колінчастого валу

| №п/п | Найменування операції     | Норма часу, хв/дм <sup>2</sup> |
|------|---------------------------|--------------------------------|
| 1    | Проточка поверхні         | 0,3                            |
| 2    | Електродугова металізація | 1,8                            |
| 3    | Проточка поверхні         | 0,30                           |
| 4    | Шліфівка                  | 1,4                            |
| 5    | ФАБО обробка              | 1,8                            |
| 6    | Контроль якості           | 0,25                           |
| 7    | Всього                    | 5,85 (0,1 г/дм <sup>2</sup> )  |

Заробітна плата робітників під час відновлення 1 дм<sup>2</sup> зношеної поверхні підшипникових отворів корпусних деталей

$$ЗП = 5,52 + 1,1 + 2,4 = 9 \text{ грн I дм}^2$$

Ціна матеріалів для відновлення площі в 1 дм<sup>2</sup> зношеної поверхні

$$C_M = H_M \cdot C_M \quad (5.6)$$

де  $H_M$  - норма витрати матеріалів на відновлення площі в 1дм<sup>2</sup> зношеної поверхні, кг/дм<sup>2</sup>;

$C_M$  - ціна одиниці ремонтних матеріалів, грн. за кг:

Ціна матеріалів для відновлення колінчастого валу показана в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Вартість матеріалів для відновлення 1 дм<sup>2</sup> підшипникових отворів корпусних деталей

| №<br>п/п | Найменування матеріала                        | Ціна, грн | Витрата,<br>Кг, літр/дм <sup>2</sup> | Вартість,<br>грн/дм <sup>2</sup> |
|----------|-----------------------------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1        | Дріт наплавочний, кг.                         | 256       | 0,1                                  | 25,6                             |
| 2        | Захисний газ, літр                            | 32,5      | 1,2                                  | 39                               |
| 3        | Електроенергія, кВт                           | 11        | 4,1                                  | 45,1                             |
| 4        | Епілам для ФАБО ЕФРЕН-2 ТУ 6-02-1163-93, літр | 96000     | 0,001                                | 96                               |
|          | Всього                                        |           |                                      | 205,7                            |

$$C_m = 205,7 \text{ грн I дм}^2$$

Собівартість відновлення площі 1 дм<sup>2</sup> колінчастого валу

$$C_n = 9 + 205,7 = 214,7 \text{ грн/дм}^2$$

Річні витрати на відновлення зношених поверхонь складають

$$Z_H = (N \cdot C_n) + C_{obl}, \quad (5.7)$$

де N - річна програма відновлення поверхні КВ, дм<sup>2</sup>.

$C_{obl}$  – ціна обладнання для нової технології, грн.

За результатами вибракування КВ загальна площа зношеної поверхні, що підлягає відновленню, склала  $N = 2150 \text{ дм}^2$ .

Річний обсяг витрат при відновленні КВ за розробленою новою технологією складе

$$Z_H = (2150 \cdot 214,7) + 120000 = 581605 \text{ грн.}$$

Частота заміни валів:

$$\Delta_{\text{зам}} = 1 - \frac{L_{\text{річн.безобр.}}}{L_{\text{річн.зобр}}} = 1 - \frac{380000}{513000} = 0,26 \text{ замін / вал}, \quad (5.8)$$

де  $L_{\text{річн.безобр.}}$  - пробіг до капремонту колінчатого валу без обробки, км.

$L_{\text{річн.зобр}}$  - пробіг до капремонту колінчатого валу з урахуванням ФАБО епіламування (ресурс валу збільшується на 35-37%), км.

Для програми у 100 валів

$$\Delta_{\text{зам}} = 0,26 \cdot 100 = 26 \text{ замін} \quad (5.9)$$

Економія замін колінчастих валів:

$$E_{\text{зам}} = \Delta_{\text{зам}} \cdot (\Pi_{\text{кв}} + \Pi_{\text{зам}}) = 26 \cdot (36000 + 5200) = 1071200 \text{ грн}, \quad (5.10)$$

де  $\Pi_{\text{кв}}$  – Ціна колінчастого валу, грн.

$\Pi_{\text{зам}}$  – Ціна заміни колінчастого валу, грн.

Чиста річна економія:

$$E_{\text{еф}} = E_{\text{зам}} - Z_{\text{н}} = 1071200 - 581605 = 489595 \text{ грн} \quad (5.11)$$

Термін окупності обладнання:

$$T_o = \frac{\Pi_{\text{обл}}}{E_{\text{еф}}} = \frac{120000}{489595} = 0,3 \text{ року} \quad (5.12)$$

Таблиця 5.3 – Економічні показники

| № | Назва параметру                                                  | Величина параметру |
|---|------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1 | Вид робіт                                                        | Відновлення        |
| 2 | Площа зношеної поверхні, що підлягає відновленню дм <sup>2</sup> | 2150               |
| 3 | Заробітна плата робітників під час відновлення 1 дм <sup>2</sup> | 9                  |
| 4 | Вартість матеріалів для відновлення 1 дм <sup>2</sup>            | 205,7              |
| 5 | Собівартість відновлення площі 1 дм <sup>2</sup>                 | 214,7              |
| 6 | Річний обсяг витрат, грн.                                        | 581605             |
| 7 | Економія заміन колінчастих валів, грн.                           | 1071200            |
| 8 | Річний економічний ефект, грн.                                   | 489595             |
| 9 | Термін окупності, років                                          | 0,3                |

## 5.2. Висновок

Використання ФАБО + епіламування дозволяє зменшити кількість замінів валів та значно скоротити витрати на їх заміну. Впровадження ФАБО забезпечує економію майже 500000 грн на рік при обробці 100 валів. Витрати на обладнання окупляться менш ніж за 4 місяці.

Це доводить, що ФАБО є надзвичайно вигідним і ефективним рішенням для збільшення ресурсу колінчастих валів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На сьогодні не існує єдиної загальновизнаної теорії зношування й практичні інженерні розрахунки на зношування можливі лише за допомогою розрахунково-експериментальних методів. У підшипниках ковзання колінчатих валів ДВЗ реалізуються різні види зношування (окисне, абразивне й ряд інших), але основна частка зношування припадає на втомне зношування при терті сполучених поверхонь.

Вивчення колінчастих валів базових двигунів ЗМЗ-511, ММЗ 245.7 і ЯМЗ-236 під час використання їх на автомобілях дало змогу встановити, що зносостійкість корінних і шатунних шийок доволі висока.

Корінні та шатунні шийки зношуються порівняно рівномірно як по колу, так і по довжині. Технічний ресурс колінчастих валів перевищує встановлені норми пробігів деталей до першого капітального ремонту. Також після відновлення валів рекомендовано проводити антифрикційну обробку.

ФАБО дає можливість підвищити зносостійкість дзеркала гільзи до 2 разів, скоротити час припрацювання, усунути задирки, збільшити ресурс двигуна. Процес ФАБО не тільки надає елементам пар тертя антифрикційних властивостей, а й захищає оброблені поверхні від проникнення водню, зменшуючи водневе зношування.

Методика базується на принципі поетапного розрахункового визначення шуканих величин, початком якого вважається пошук газових навантажень робочого процесу двигуна, а закінченням- визначення величин швидкостей зношування поверхонь тертя. Нерівномірність зношування робочих поверхонь шийок і вкладишів КВ урахується в методиці шляхом покрокового по куту ПКВ розрахунків інтенсивностей зношування.

Обґрунтований спосіб розрахункової оцінки зношування підшипникових вузлів двигуна через поняття швидкості зношування поверхні тертя за період експлуатації ДВЗ внаслідок мінливості інтенсивності зношування в часі.

Запропоновано спосіб зменшення тертя у вузлах двигуна, а саме нанесення зносостійкого покриття шляхом епіламування. В результаті отримаємо відношення сумарного зношування з'єднання без покриття до сумарного зношування епіламованого з'єднання після години випробування рівно 3,8. Відношення зносів з'єднань без покриття й епіламованого після 10 год випробування рівно 3,72. Видно, що після 10 год випробування на машині тертя відношення зносів з'єднань без покриття й епіламованого зменшилось приблизно на 2,1 %. Тобто, позитивний ефект від епіламування зберігається досить тривалий час.

Забезпечення безпеки під час наукових досліджень на експериментальних установках, зокрема при роботі з установкою для ФАБО, є важливим для збереження здоров'я та життя працівників, а також для успішного виконання досліджень. Це передбачає розробку інструкцій з охорони праці, навчання персоналу, використання засобів індивідуального захисту, регулярний контроль за технічним станом обладнання та проведення оцінки ризиків перед початком роботи.

Використання ФАБО + епіламування дозволяє зменшити кількість замін валів та значно скоротити витрати на їх заміну. Впровадження ФАБО забезпечує економію майже 500000 грн на рік при обробці 100 валів. Витрати на обладнання окупляться менш ніж за 4 місяці.

Це доводить, що ФАБО є надзвичайно вигідним і ефективним рішенням для збільшення ресурсу колінчастих валів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Афанасьєв І. А. Шляхи підвищення післяремонтної надійності турбокомпресорів автотракторних двигунів / І. А. Афанасьєв, Є. В. Калганков // Zbior artykulow naukowych. Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej. – Warszawa – 2016. – С. 6-11.
2. Дорошенко О. В. Обґрунтування методів та параметрів діагностування паливних систем мобільних сільськогосподарських машин / О. В. Дорошенко, Є. В. Калганков. // Zbior artykulow naukowych z Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Nowy sposob rozwoju Inzynieria i Technologia» Sp. Z o.o. «Diamond trading tour» Warszawa. – 2017. – С. 44–50
3. Калганков, Є.В. Технічне діагностування об'ємних гідроприводів трансмісії як об'єктивна необхідність / Є.В. Калганков // Сучасна наука: теорія і практика. – Запоріжжя, 2012. – Т. 2. – С. 88-90
4. Проектування сервісних підприємств ремонту машин та агрегатів АПК: навчальний посібник / [Дирда В.І., Калганков Є.В., Мельянцов П.Т. та інші] – Д.: «Герда», 2014. – 100 с.
5. Діденко М. М. Вплив розмірно-точносних характеристик посадок підшипників кочення на їх довговічність / М. М. Діденко, Є. В. Калганков. //Zbior artykulow naukowych Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2017. – S. 38–43.
6. Герінг І.А. Теорія і практика гідроабразивно-втомного зноса деталей об'ємного гідропривода трансмісії / Герінг І.А., Калганков Є.В., Кириленко О.І. Аграрна наука та харчові технології Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Сільськогосподарські науки Випуск 4, 2015, - С 52 – 61.
7. Зношування [онлайн], (2023). <https://uk.wikipedia.org>. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Зношування>
8. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.

9. Ремонт машин та обладнання: підручник для вищих навчальних закладів / [Дирда В.І., Мельянцов П.Т., Калганков, Є.В. та ін.]. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2015. – 292 с.

10. Gnecco, E. та Meyer, E., ред., (2007). *Fundamentals of friction and wear* [онлайн]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [Дата звернення 29 листопада 2024]. Режим доступу: doi: 10.1007/978-3-540-36807-6

11. Калганков, Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин / Калганков, Є.В. Геотехнічна механіка, (108), 133-142.

12. V.I. Dyrda, A.V. Tolstenko E.V. Kalgankov, Determination of the durability of elastic hereditary materials using generalized failure criteria, Vost. Evrop. Zh. Pered. Tekhnol., 4, No. 7, 4-7 (2013).

13. Обобщенная теория износа упруго-наследственных сред / А. С.Кобец, В. И. Дырда, Е. В. Калганков, И. Н. Цаниди. // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2012. – №2. – С. 81–84.

14. Fleischer G. Energetische Methode der Bestimmung des Verschleipes. Schmierungstechnik, Bend 4, S. 9.

15. Tribologie: Energetische Betrachtungsweise [онлайн], (без дати). Hoogis Homepage. [Дата звернення 29 листопада 2024]. Режим доступу: <https://www.hoogi.de/tribo/verschleiss.html>

16. Bayer, R. G. та Ku, T. C.. *Handbook of analytical design for wear* [онлайн]. Редактор С. W. MacGregor. Boston, MA: Springer US. [Дата звернення 29 листопада 2024]. Режим доступу: doi: 10.1007/978-1-4684-7167-0.

17. Терехов В. Ю. Визначення технічного стану моторного масла та його вплив на трибоспряження двигуна / В. Ю. Терехов, Є. В. Калганков, В. І. Дирда. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projekty hipotezę. „, Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2014. – С. 102–105.

18. Мельянцов П.Т. Оцінка технічного стану робочої рідини агрегатів гідроприводу трансмісії кормо- та зернозбиральних комбайнів в умовах

експлуатації / П.Т. Мельянцов, Є.В. Калганов, О.І.Кириленко // Вісник ДДАУ, №2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 86 – 90

19. Causes and measurement of crankshaft wear [онлайн], (2020). <https://www.hc-enginepart.com>. Режим доступу: <https://www.hc-enginepart.com/news/causes-and-measurement-of-crankshaft-wear.html>

20. Нижняк Д. В. Визначення показників надійності колінчатих валів автотракторних двигунів / Д. В. Нижняк, Є. В. Калганков, В. І. Дирда. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projekty hipotezę., Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2014.. – 2014. – С. 8–13.

21. Puchin E.A. Nadezhnost' tehnikeskikh sistem : ucheb. posobie dlja inzh. special'nostej vuzov [Reliability of technical systems: a manual for engineering specialties universities] / E.A. Puchin, A.V. Kolomejchenko, V.N. Logachev and others – Orel, Izd-vo OrelGAU, 2012. – 96 p.

22. Karpenkov V. F. Finishnaja antifrikcionnaja bezabrazivnaja obrabotka (FABO) detalej [Finish anti-friction non-abrasive treatment (FABO) details] / V. F. Karpenkov, V. V. Strel'cov, I. L. Prihod'ko and others – Pushhino, 1996. – 108 p.

23. Шульц В. В. Форма природного зносу деталей машин та інструменту. - К.: Машинобудування, 1990. - 208 с.

24. Калганков Є.В. Розробка ТПВД / Калганков Є.В. – ДДАЕУ, 2013. – 75 с.

25. Григор'єв А. Н., Шабанов А. Ю., Черепанов Д. А. Розрахункові методи та проблеми прогнозування зносу трибологічних сполучень ДВЗ. // XXX Ювілейний Тиждень науки. Матеріали міжвузівської наукової конференції, 2002. - Ч. III. - с. 7-9.

26. Кавун, В., (2024). Дослідження впливу фінішної антифрикційної безрозбірної обробки на коефіцієнт тертя та шорсткість поверхні деталі. У: *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*, 15 листопада 2024, Дніпро, Україна. Дніпро: ДДАЕУ. с. 98–100.

27. Некрасов С.С. Антифрикційні покриття деталей та ефективність їх застосування/ Некрасов С.С., Паршин І.П., Приходько І.Л. // Оглядова інформація. - , 1998. - 25 с.

28. Застосування фінішної безобразивної обробки і металопластичної присадки МКФ - 18У при обкатці двигунів, що пройшли капітальний ремонт. - 1988, 8 с.

29. Пат. № 144310 Україна, G01N 3/56 (2006.01) Машина тертя / Калганков Є.В.; Грачова В.М.; Косенко А.В. - u202001408; заявл. 20.03.2020; опубл. 25.09.2020, бюл. № 18; 4 с.

30. Годяев С. Г. Методичні рекомендації до написання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» в дипломних роботах для студентів інженерно-технологічного факультету денної і заочної форми навчання спеціальності: 208 «Агроінженерія» / Годяев С. Г., Дмитрюк С. П., Січко І. М.. Дніпро: ДДАЕУ, 2018 – 24с.

31. Беліков А.С. Основи охорони праці: [Підручник для студентів вищих навчальних закладів України III-IV рівня акредитації] / За ред., д.т.н., професора О.С. Белікова. - Дніпропетровськ: «Журфонд», 2007. - 494 с.

32. Лебеденко О.В. Методичні рекомендації з економічного обґрунтування дипломних проектів і робіт для студентів факультету механізації сільськогосподарства, (кафедра надійності і ремонту машин) за напрямом підготовки "Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва" / Лебеденко О.В. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2011. – 16 с.

33. Калганков Є.В. Методичні рекомендації до виконання і оформлення дипломних проектів ОС "Бакалавр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" і дипломних робіт ОС "Магістр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" / Калганков Є.В. – Д.: ДДАЕУ, 2021. – 36 с.

## **ДОДАТКИ**

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра інжинірингу технічних систем

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ  
АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-3-23  
Кавун Володимир володимирович

**Керівник:** доцент, д.т.н.  
Васильєв Дмитро Леонідович

Дніпро-2024

## 2

## Мета та задачі роботи

### Мета роботи

Побудова розрахунково-експериментальної моделі прогнозування швидкостей зношування в підшипниках ковзання й шийках колінчатих валів ДВЗ.

### Задачі роботи

1. Провести аналіз існуючих методів визначення зносу деталей ДВЗ.
2. Провести аналіз надійності колінчатих валів двигунів та визначити межі появи дефектів чи відмов.
3. Обґрунтувати параметри для визначення швидкості зношування підшипникових вузлів колінчатих валів двигунів та встановити алгоритм розрахунку процесу зношування.
4. Зробити розрахунково-експериментальне дослідження процесів зношування підшипників колінчатого вала та провести дослідження нанесеного покриття методом фабо-епіламування.
5. Визначити показники стану охорони праці та розробити заходи їх покращення.
6. Виконати розрахунок економічних показників роботи.

## 3

## Аналіз існуючих теорій тертя

**Механічна теорія тертя** була запропонована Гільйомом Амонтоном в 1699 році і описувала закон тертя при контакті тіл без мащення тобто сухого тертя:

$$F = f \cdot N$$

F - сила тертя, f- коефіцієнт тертя,  
N- нормальне до площини тертя навантаження.

**Молекулярна теорія** базується на роботі Ш. Кулона (1775 р) який перший пояснив різницю між тертям покою та тертям руху, довівши, що тривалість контакту тіл впливає на силу тертя.

$$F = A + f \cdot N$$

A- характеристика молекулярного зчеплення.

**Молекулярно-механічна теорія** була запропонована І.В. Крагельським (1946 р) суть якої полягає в тому, що процес тертя представляється як результат контактуючих мікронерівностей та молекулярної взаємодії матеріалів на пятнах фактичного контакту.

Сила тертя

Коефіцієнт тертя

$$F = F_{\text{мех}} \cdot F_{\text{мол}} \quad f = \frac{F_{\text{мех}} + F_{\text{мол}}}{N} = f_{\text{мех}} + f_{\text{мол}}$$

Основоположником **гідродинамічної теорії тертя** є російський вчений Н.А. Петров який у 1883 році відкрив закон тертя при мащенні і започаткував основи математичної теорії мащення.

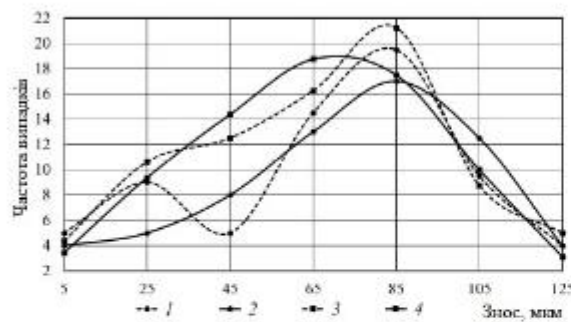
$$F = \frac{Q \cdot U}{\delta + \frac{\mu}{\lambda_1} + \frac{\mu}{\lambda_2}}$$

Енергетична теорія тертя

$$F \cdot s = W$$

## 4

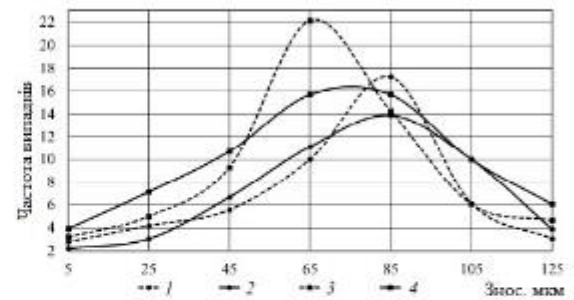
## Розподіл зносу шатунних та корінних шийок



Розподіл зносу шатунних (●) і корінних (■) шийок  
двигуна ЗМЗ-511 після середнього пробігу 162 тис.

км:

1, 3 - експериментальні криві; 2, 4 - теоретичні криві



Розподіл зносу шатунних (●) і корінних (■) шийок  
двигуна ЯМЗ-236 після середнього пробігу 152,5 тис.

км:

1, 3 - експериментальні криві; 2, 4 - теоретичні криві

## 5

## Дефекти колінчастих валів



Знос і задири



Знос торцевих поверхонь



Подряпини



Вироблення та подряпини



Знос шпонкового пазу



Знос маслосвітної різьби

6

Загальна принципова блок-схема побудови методики  
розрахункового прогнозування зношування підшипникових  
вузлів ДВЗ



## 7

## Обладнання та зразки

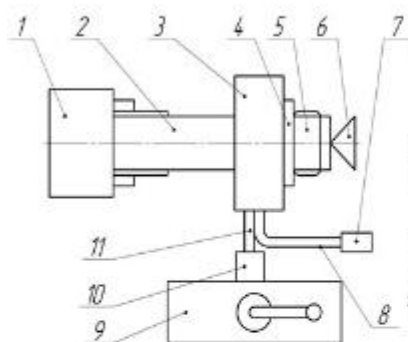
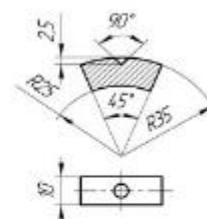
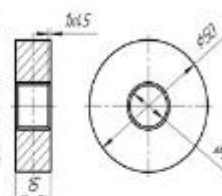


Схема нанесення  
антифрикційного покриття на  
ролик

1 - патрон трикулачковий  
самоцентруючий; 2 - оправка; 3  
- оброблюєма деталь; 4 - шайба;  
5 - гайка; 6 - рухомий центр  
задньої бабки; 7 - пристрій для  
подачі плавучого середовища;  
8 - патрубок; 9 - різдотримач; 10  
- оправка; 11 - притир



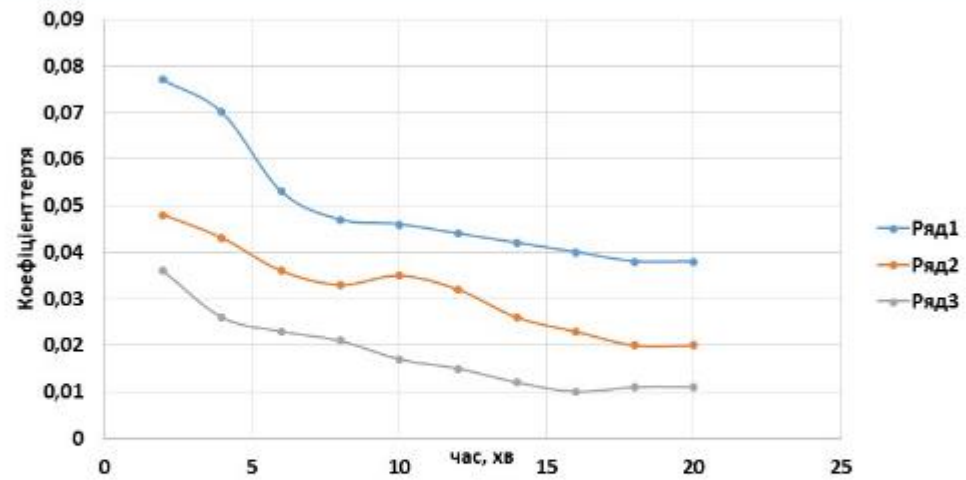
Проведення ФАБО ролика



Колодка та ролик для  
випробувань на машині тертя

## 8

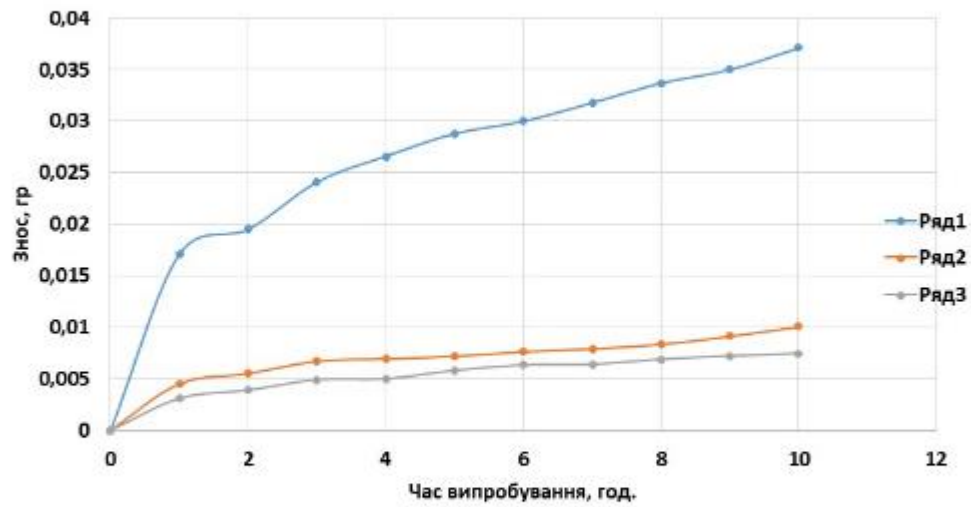
## Лабораторні випробування



Залежність коефіцієнту тертя від поєднання ФАБО та епіламування на поверхнях тертя:  
1 – вихідне з'єднання, 2 – з'єднання з епіламуванням, 3 – з'єднання з ФАБО-Епіламуванням.

## 9

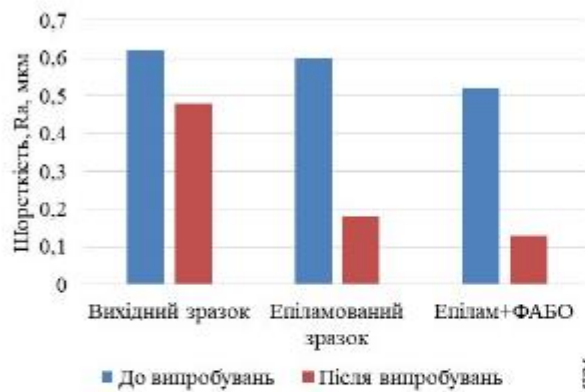
## Лабораторні випробування



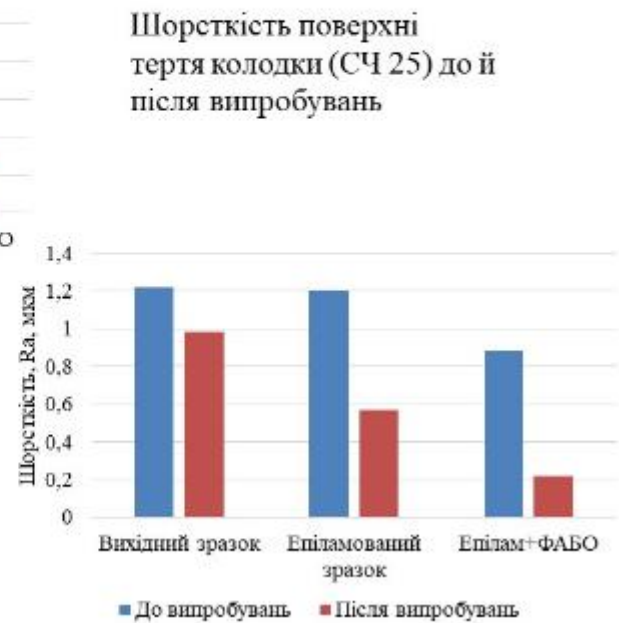
Залежність зношування з'єднання колодка-ролик від часу випробування: 1 - з'єднання без покриттів; 2 - епіламоване з'єднання; 3 - з'єднання після Фабо-Епіламування.

## 10

## Лабораторні випробування



Шорсткість поверхні тертя ролика (Сталь 45) до й після випробувань



| № | Назва параметру                                                  | Величина параметру |
|---|------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1 | Вид робіт                                                        | Відновлення        |
| 2 | Площа зношеної поверхні, що підлягає відновленню дм <sup>2</sup> | 2150               |
| 3 | Заробітна плата робітників під час відновлення 1 дм <sup>2</sup> | 9                  |
| 4 | Вартість матеріалів для відновлення 1 дм <sup>2</sup>            | 205,7              |
| 5 | Собівартість відновлення площі 1 дм <sup>2</sup>                 | 214,7              |
| 6 | Річний обсяг витрат, грн.                                        | 581605             |
| 7 | Економія заміन колінчастих валів, грн.                           | 1071200            |
| 8 | Річний економічний ефект, грн.                                   | 489595             |
| 9 | Термін окупності, років                                          | 0,3                |

На сьогодні не існує єдиної загально визнаної теорії зношування й практичні інженерні розрахунки на зношування можливі лише за допомогою розрахунково-експериментальних методів. У підприємствах ковання колінчастих валів ДВЗ реалізуються різні види зношування (окисне, абразивне й ряд інших), але основна частка зношування припадає на втомне зношування при терті сполучених поверхонь.

Вивчення колінчастих валів базових двигунів ЗМЗ-511, ММЗ 245.7 і ЯМЗ-236 під час використання їх на автомобілях дало змогу встановити, що зносостійкість корінних і шатунних шийок досить висока.

Корінні та шатунні шийки зношуються порівняно рівномірно як по колу, так і по довжині. Технічний ресурс колінчастих валів переважно встановлений норми пробігів деталей до першого капітального ремонту. Також після відновлення валів рекомендовано проводити антифризційну обробку.

ФАБО дає можливість підвищити зносостійкість дзеркала гільзи до 2 разів, скоротити час протрапцювання, усунути задири, збільшити ресурс двигуна. Процес ФАБО не тільки надає елементам пар тертя антифризційних властивостей, а й захищає оброблені поверхні від проникнення води, зменшуючи водневе зношування.

Методика базується на принципі постійного розрахункового визначення шуканих величин, початком якого вважалось пошук газосих навантажень робочого процесу двигуна, а закінченням – визначення величин швидкостей зношування поверхонь тертя. Нерівномірність зношування робочих поверхонь шийок і валах ший КВ урахується в методиці шляхом покровового по куту ПКВ розрахунків інтенсивностей зношування.

Обґрунтований спосіб розрахункової оцінки зношування підшипникових вузлів двигуна через поняття швидкості зношування поверхні тертя за період експлуатації ДВЗ внаслідок мінливості інтенсивності зношування в часі.

Запропоновано спосіб зменшення тертя у вузлах двигуна, а саме нанесення зносостійкого покриття шляхом епітамування. В результаті отримаємо відношення сумарного зношування з'єднання без покриття до сумарного зношування епітамованого з'єднання після години випробування рівно 3,8. Відношення зносів з'єднань без покриття й епітамованого після 10 год випробування рівно 3,72. Видно, що після 10 год випробування на машині тертя відношення зносів з'єднань без покриття й епітамованого зменшилось приблизно на 2,1 %. Тобто, позитивний ефект від епітамування зберігається досить тривалий час.

Забезпечення безпеки під час наукових досліджень на експериментальних установках, зокрема при роботі з установкою для ФАБО, є важливим для збереження здоров'я та життя працівників, а також для успішного виконання досліджень. Це передбачає розробку інструкцій з охорони праці, навчання персоналу, використання засобів індивідуального захисту, регулярний контроль за технічним станом обладнання та проведення оцінки ризиків перед початком роботи.

Використання ФАБО – епітамування дозволяє зменшити кількість замін валів та значно скоротити витрати на їх заміну. Впровадження ФАБО забезпечує економію майже 500000 грн на рік при обробці 100 валів. Витрати на обладнання окупляться менш ніж за 4 місяці.

Це доводить, що ФАБО є надзвичайно вигідним і ефективним рішенням для збільшення ресурсу колінчастих валів.

Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
Інженерно-технологічний факультет



# **ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

**ЗБІРНИК ТЕЗ**

**III Всеукраїнської науково-практичної конференції  
молодих вчених**

**Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового  
виробництва**

*15 листопада 2024 р.*

**Дніпро • 2024**

УДК 620.192.46:621.7.044

Кавун В.В., здобувач вищої освіти СВО Магістр<sup>17</sup>, ОПІ Агроінженерія

dsau\_nrm@ukr.net

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІНІШНОЇ АНТИФРИКЦІЙНОЇ БЕЗРОЗБІРНОЇ ОБРОБКИ НА КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ ТА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ

Фінішна антифрикційна безбразивна обробка (ФАБО) виконується шляхом фрикційної взаємодії інструменту з поверхнею деталі з метою покращення припрацювання й підвищення зносостійкості [1]. Перевага фінішної антифрикційної безбразивної обробки в порівнянні з іншими фінішними операціями в тому, що вона дуже проста і не потребує складного обладнання. Також вона надає обробленій поверхні високі антифрикційні властивості.

При ФАБО захисна металева плівка формується в результаті фізико-хімічних процесів, при механічній активації поверхні інструментом (терті). Активация поверхні проводиться неметалічним інструментом (наприклад повстяним). Необхідні питомі навантаження при цьому у два рази менше, чим при ФАБО прутковим інструментом і становлять 0,5...1,0 МПа.

Коефіцієнт тертя для кожного режиму випробувань обчислюється по формулі:

$$f = \frac{M_{\text{терт}}}{P \cdot \frac{d}{2}} \quad (1)$$

Вплив епілізування й Фабо-Епілізування на коефіцієнт тертя з'єднань колеса (СЧ 25) - ролик (Сталь 45) можна оцінити по кривих, представлених на рис. 1. Епілізування знижує коефіцієнт тертя на початковому етапі в порівнянні з вихідною

---

<sup>17</sup> Науковий керівник – Васильєв Д.Л., доктор технічних наук, доцент кафедри інженірингу технічних систем

парою тертя в 1,6 рази, наприкінці експерименту в 1,95 рази. Використання Фабо-Епіламування зменшує коефіцієнт тертя на початковому етапі в 2,11 рази в порівнянні з вихідною парою тертя й наприкінці експерименту в 3,25 рази. У порівнянні з епіламуванням, Фабо-Епіламування зменшує коефіцієнт тертя в 1,33 рази на початку дослідів й в 1,66 рази наприкінці дослідів (рис. 1).

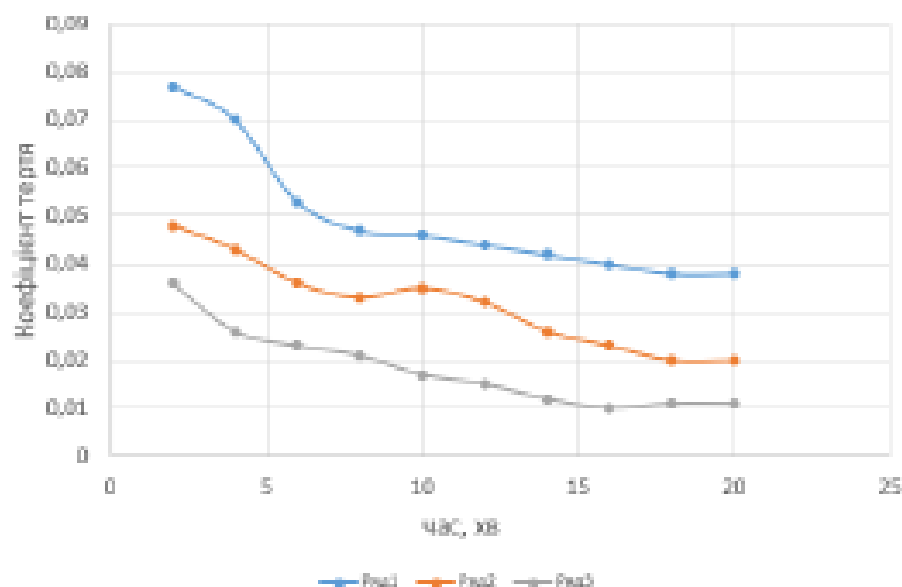


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту тертя від поєднання ФАБО та епіламування на поверхнях тертя: 1 – вихідне з'єднання, 2 – з'єднання з епіламуванням, 3 – з'єднання з ФАБО-Епіламуванням

Таким чином, Фабо-Епіламування поверхонь тертя зразків зменшує коефіцієнт тертя в середньому ( у порівнянні з неопрацьованими зразками), для з'єднань Сталь 45 - чавун СЧ 25 в 2, 5 рази.

Діаграми зміни шорсткості поверхні колодки (СЧ 25) і ролика (Сталь 45) до й після випробувань представлені на рис. 2. Перед експериментом шорсткість поверхонь тертя; вихідної пари - колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,63$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 1,25$  мкм; епіламованої пари - колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,6$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 1,22$  мкм.

Найкраща якість поверхні тертя перед експериментом мають пари тертя, піддані ФАБО-Епіламуванню: шорсткість поверхні колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,52$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 0,88$  мкм.

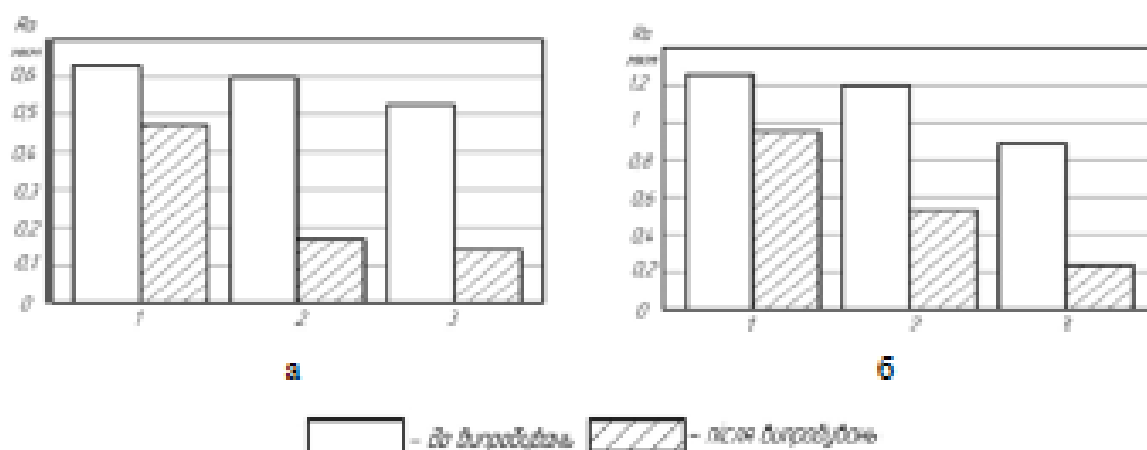


Рисунок 2 – Шорсткість поверхні тертя (а) колодки (СЧ 25) і (б) ролика до й після випробувань: 1 - вихідний зразок; 2 – епітамований зразок; 3 - зразок після ФАБО-Епітамування

Після експерименту шорсткість поверхонь вихідної пари тертя становить: колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,47$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 0,95$  мкм. Шорсткість епітамованої пари тертя після експерименту: колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,16$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 0,55$  мкм. Після експерименту шорсткість пари, підданої ФАБО й епітамуванню становить: колодки (СЧ 25)  $R_a = 0,14$  мкм, ролика (Сталь 45)  $R_a = 0,23$  мкм.

У порівнянні з епітамуванням ФАБО-Епітамування поверхонь тертя є більш ефективним. Шорсткість поверхні колодки, підданої ФАБО-Епітамуванню, після експерименту  $R_a = 0,14$  мкм у порівнянні з епітамованою колодкою після експерименту  $R_a = 0,16$  мкм знизилася в 1, 2 рази. Шорсткість поверхні ролика, підданого ФАБО- Епітамуванню, після експерименту  $R_a = 0,23$  мкм, у порівнянні з епітамованим роликом ( $R_a = 0,55$  мкм) знизилася в 2, 3 рази.

#### Список літератури

1. Дирда В. І. Ремонт машин та обладнання. Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Дирда, П. Т. Мельянцов, О. І. Кириленко та ін. – Днівськ, Журофонд, 2015. – 292 с.