

**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:

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНИХ
ДВИГУНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОМОДИФІКАТОРІВ ТЕРТЯ**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Мелещенко Владислав Володимирович

Керівник: _____ Васильєв Дмитро Леонідович

Рецензент: _____ Лисиця Микола Іванович

Дніпро 2025

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: Інженерингу технічних систем

Освітній ступінь: "Магістр"

Спеціальність: 208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

К.Т.П. ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

" " " " 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мелешенко Владиславу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація трибологічних характеристик дизельних двигунів із застосуванням наномодифікаторів тертя

керівник роботи д.т.н. доц., Васицьєв Д.Л.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.10.2025 року
№ 3182

2. Строк подання студентом роботи до 1.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Конструктивні та експлуатаційні параметри дизельного двигуна. Фізико-механічні властивості матеріалів деталей пар тертя. Характеристики мастильних матеріалів. Класифікація та функціональні властивості присадок

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз умов роботи та методів прискорення припрацювання деталей дизелів в період їх обкатки. Теоретичне обґрунтування підвищення якості та прискорення припрацювання деталей дизелів, що труться. Методика експериментальних досліджень. Організація безпечної роботи з маслами та антифрикційними присадками у виробничих умовах. Розрахунок порівняльного економічного ефекту від процесу прискореного обкатування дизелів ЯМЗ із застосуванням ШАФ-складу. Загальні висновки та пропозиції. Список літератури. Додатки

РЕФЕРАТ

роботі розглянуто проблему підвищеної інтенсивності зношування деталей дизельних двигунів у початковий період експлуатації та обґрунтовано доцільність застосування прискорених методів припрацювання із використанням модифікованих мастильних матеріалів. Проведено аналіз сучасних підходів до зниження тертя та втрат на зношування в парах тертя дизелів, а також здійснено класифікацію присадок, що впливають на формування граничних плівок. Запропоновано вдосконалену трибологічну установку для порівняльних випробувань мастил, яка дає змогу моделювати роботу різних пар металів (сталь–чавун, сталь–сталь) у умовах, наближених до реальної роботи двигуна. Досліджено ефективність застосування присадок типу ПІАФ - полімерний інгібітор абразивного та фрикційного зношування, що сприяють формуванню захисного шару та зменшенню адгезійної складової тертя. Отримані результати підтверджують, що використання активованих мастильних композицій забезпечує зниження масового зносу на 25–45 %, скорочення часу припрацювання та стабілізацію роботи трибосистеми. Наведено техніко-економічне обґрунтування впровадження методики прискореного припрацювання, яке демонструє її ефективність та доцільність використання у ремонтно-експлуатаційній практиці підприємств.

Ключові слова: дизельний двигун, припрацювання деталей, тертя, зношування, трибологічні випробування, присадки, мастильні матеріали, граничний шар, ПІАФ, економічна ефективність.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА МЕТОДІВ ПРИСКОРЕННЯ ПРИПРАЦЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛІВ У ПЕРІОД ЇХ ОБКАТКИ.....	10
1.1. Актуальність теми	10
1.2. Механізми зношування основних вузлів дизельних двигунів.....	13
1.3. Сучасні способи зниження тертя та зношування в дизельних двигунах .	18
1.3.1. Конструктивні методи.....	18
1.3.2. Технологічні методи.....	18
1.3.3. Експлуатаційні заходи.....	18
1.3.4. Хімічні методи — використання присадок до мастил	19
1.3.5. Застосування наномодифікаторів тертя — сучасний тренд.....	19
1.4. Наноматеріали як модифікатори тертя	20
1.4.1. Механізм дії наночастинок	20
1.4.2. Поширені типи наномодифікаторів.....	20
1.4.3. Переваги наномодифікаторів.....	21
1.4.4. Обмеження та особливості використання.....	21
1.5. Припрацювальні присадки.....	22
1.6. Висновки та задачі дослідження.....	25
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ПРИСКОРЕННЯ ПРИПРАЦЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛІВ, ЩО ТРУТЬСЯ	27
2.1. Взаємозв'язок процесів тертя та поверхневих явищ.....	27
2.2. Теоретичні основи застосування робочих складів, що містять наночастинки серпентину	32

	6
2.3. Механізм дії припрацювального масла, що містить найдрібніші частинки серпентину.....	35
2.4. Висновки.....	41
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	43
3.1. Обґрунтування критеріїв оцінки якості припрацювання деталей дизелів.....	43
3.2. Лабораторні дослідження	44
3.2.1. Установка для трибологічних випробувань.....	44
3.2.2. Визначення коефіцієнта тертя і періоду його стабілізації	48
3.2.3. Визначення зносу зразків.....	50
3.2.4. Визначення шорсткості та температури поверхонь тертя. Визначення корозійного впливу мастил.....	51
3.3. Лабораторні дослідження присадок	52
3.3.1. Розчинність присадок у моторній оливі М-10ДМ	52
3.3.2. Антифрикційні властивості оливо з присадками.....	53
3.3.3. Зносостійкість зразків	58
3.3.4 Зміна шорсткості поверхні зразків	60
3.4. Висновок	62
РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ З МАСЛАМИ ТА АНТИФРИКЦІЙНИМИ ПРИСАДКАМИ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ	64
4.1. Загальні відомості про охорону праці при роботі з маслами та присадками	64
4.2. Шкідливі та небезпечні фактори при використанні антифрикційних присадок до масел	65
4.3. Заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів при роботі з маслами та присадками.....	67
4.4. Висновок	68

	7
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ПОРІВНЯЛЬНОГО ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ПРОЦЕСУ ПРИСКОРЕНОГО ОБКАТУВАННЯ ДИЗЕЛІВ ЯМЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПІАФ СКЛАДУ	69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	74
Література.....	76
Додатки	79

ВСТУП

На даний час в сільському господарстві більшість машин і агрегатів зношені, потребують поточного і капітального ремонту. В умовах господарств дані ремонтні роботи зробити практично неможливо, оскільки відсутня розвинена ремонтна база, немає кваліфікованих фахівців, якісних запасних частин, заробітна плата робітників дуже низька. Нової техніки випускається мало, немає необхідних коштів на її закупівлю.

На тракторах, зернозбиральних комбайнах експлуатується близько двох млн. двигунів, причому більша частина після капітального ремонту. Післяремонтний ресурс їх становить 50% ресурсу нових двигунів. У період експлуатації машин до капітального ремонту їх двигуни піддаються капітальному ремонту 2-6 разів. На частку запасних частин за термін служби припадає 75-115 % вартості нового двигуна. Аналіз експлуатації машин показує, що 34-45 % відмов припадає на двигуни [1, 2, 3].

У процесі ремонту та подальшої експлуатації дизельних двигунів застосовується комплекс ремонтно-технологічних заходів, спрямованих на подовження їх ресурсу та зменшення витрат на підтримання працездатного стану. Важливим етапом забезпечення якості ремонту є виконання обкатування двигуна, яке виступає завершальною операцією ремонтного циклу. Саме ефективність припрацювання деталей у період обкатки значною мірою визначає довговічність елементів дизеля та величину його міжремонтного напрацювання. Для повного формування стабільних контактів у з'єднаннях тракторних дизелів, як правило, необхідно 30–60 годин роботи. Водночас можливості ремонтних підприємств не дозволяють довести процес припрацювання до завершення в умовах стендової обкатки. Унаслідок цього значна частина припрацювання переноситься в експлуатаційні умови господарств, де робота двигуна здійснюється зі зниженими на 25 % швидкостями та навантаженнями, що не завжди є технологічно прийнятним. Подальша експлуатація дизеля за номінальних і максимальних навантажень за умов неповного припрацювання деталей призводить до інтенсифікації зносу, виникнення задирів і зачеплень, що,

в кінцевому підсумку, негативно позначається на міжремонтному ресурсі двигуна в цілому. У зв'язку з цим вкрай важливо припрацювання деталей дизелів завершувати на заводі, виключивши її в експлуатації [4].

Дана проблема охоплює широке коло питань, які цікавлять не тільки дослідників, конструкторів, але і споживачів техніки. Тому підвищення якості припрацювання деталей дизелів при їх ремонті за допомогою сучасних припрацювальних рзчинів є актуальним науково-технічним завданням.

Мета досліджень - підвищення якості та прискорення припрацювання деталей дизелів під час стендового обкатування за допомогою припрацювального масла, що містить наночастинки серпентину.

Об'єкт досліджень - дизель ЯМЗ-238.

Предмет досліджень - припрацювання деталей КШМ і ЦПГ дизеля.

Методика досліджень базується на застосуванні сучасних методів, технічних засобів, вимірювальних приладів. Програма включає в себе лабораторні дослідження трибологічних властивостей деталей КШМ і ЦПГ дизелів з використанням різних присадок і припрацювального масла зі складом, що містить наночастинки серпентину (полімерний інгібітор абразивного та фрикційного зношування ПДФ розчин); стендові випробування дизелів на ремонтних підприємствах; ресурсні випробування в експлуатаційних умовах.

Апробація роботи. Мелешенко В.В. (2025). Вплив мастильних присадок на тертя, знос і ефективність роботи двигунів внутрішнього згорання. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 року), ДДАЕУ, Дніпро, с. 58-60.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА МЕТОДІВ ПРИСКОРЕННЯ ПРИПРАЦЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛІВ У ПЕРІОД ЇХ ОБКАТКИ

1.1. Актуальність теми

Актуальність теми підвищення ресурсу різних машин і механізмів останнім часом не тільки не знижується, а навпаки неухильно зростає. На роботи з відновлення зношених деталей, забезпечення працездатності рухомих з'єднань у важких умовах експлуатації, зниження інтенсивності різних видів зношування деталей машин у технічно розвинених країнах щорічно витрачається до 4-5 % національного доходу [5].

Таке становище пов'язане не тільки з посиленням режимів експлуатації двигунів внутрішнього згорання, але також з відсутністю в багатьох випадках методів обґрунтованого вибору конструкційних і мастильних матеріалів, захисних покриттів і способів хіміко-термічної обробки за досить об'єктивними критеріями для конкретних умов роботи трибоз'єднань.

Встановлено, що шляхом поліпшення якості поверхонь тертя при відновленні деталей і вибору раціональних режимів експлуатації машин, можна значно підвищити ресурс відремонтованих дизелів.

Ресурс - напрацювання (тривалість або обсяг робіт) об'єкта від початку експлуатації або її відновлення після капітального ремонту до настання граничного стану.

Ресурс дизеля в цілому залежить від зносостійкості та працездатності окремих складових елементів. Від властивостей елементів системи залежить і її стан. Для вирішення завдання збільшення ресурсу відремонтованих дизелів необхідно знайти способи збільшення ресурсу їх з'єднань.

За останні роки машинобудівні заводи провели велику роботу щодо підвищення ресурсу та якості виготовлення дизелів. Однак в цілому міжремонтний ресурс дизелів становить 50 %, рідше 60 % від нормативного (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 - Дані про ресурси дизельних двигунів

Марка дизеля	Ресурс дизеля, мото-години		
	нового	відремонтованого	у % до нового
Д-245	5803	2920	50
СМД-62	3600	2200	61
Cummins	3974	2430	61
Deutz	3952	2370	60
ЯМЗ-238	2500	1611	64

Низький ресурс дизелів призводить до витрат від простою тракторів та машин. Ряд авторів пояснюють це недоліками технології ремонту, застосуванням неякісних матеріалів [5].

Найбільша кількість відмов дизелів спостерігається в початковий період експлуатації. Одна з причин такого явища - низька якість припрацювання деталей. Багато дослідників [6, 7, 8] надають великого значення припрацюванню деталей не тільки у зв'язку з необхідністю підготовки з'єднань до сприйняття експлуатаційних навантажень, але й тому, що правильне припрацювання має великий вплив на ресурс дизелів.

Таблиця 1.2 - Ресурсні відмови відремонтованих дизелів

Найменування відмови	Кількість відмов, %				
	СМД-60, СМД-62	Д-245	Cummins	Deutz	ЯМЗ
Знос деталей ЦПГ	44,0	40,0	53,0	35,0	45,0
Виплавлення шатунних вкладишів	25,0	19,0	5,0	40,0	-
Задир поршня	9,0	-	9,0	-	4,0
Знос корінних вкладишів	5,0	10,0	-	50,0	30,0
Кавітаційний знос блоку циліндрів	-	15,0	20,0	-	-

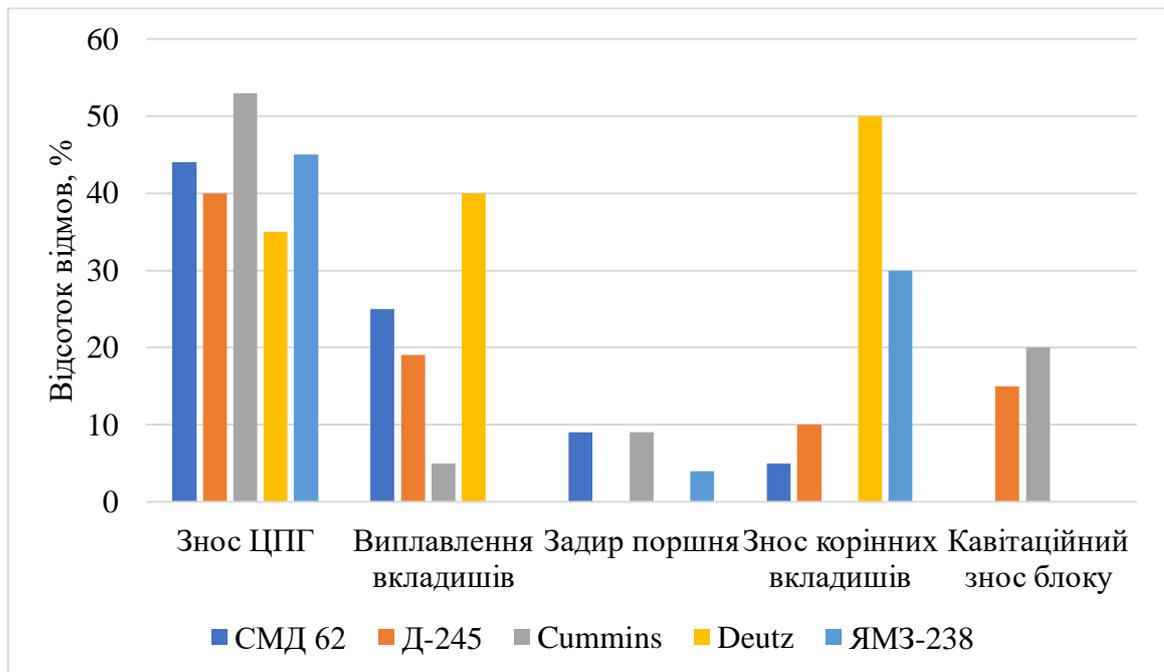


Рисунок 1.1 - Ресурсні відмови відремонтованих дизелів

Дослідження, проведені в нашій країні та за кордоном, показують, що одним з найбільш ефективних способів досягнення якості припрацювання деталей дизелів і зниження часу обкатки є застосування спеціальних антифрикційних покриттів і припрацювальних присадок до масла, палива і повітря [8]. Завдяки своїй простоті і економічності ці способи все більше привертають увагу дослідників і практиків.

Дослідженню процесів припрацювання деталей дизелів присвячено багато вітчизняних і зарубіжних робіт, в яких міститься значний обсяг інформації з різних аспектів розглянутої теми [8, 9, 10, 11].

Вивчення питань припрацювання особливо актуально для ремонтних підприємств, оскільки агрегати і вузли дизелів тут збирають з деталей з частковим зносом, відновлених і нових. Необхідність припрацювання, як технологічної операції, обумовлена тим, що навіть при досконалому складанні і відповідності шорсткості і хвилястості робочих поверхонь вимогам креслень, практично неможливо іншими технологічними операціями досягти оптимальних трибологічних характеристик поверхневих шарів деталей, що труться. Припрацювання значною мірою визначає безвідмовність дизеля, особливо в

початковий період експлуатації, і при мінімумі припрацювального і встановленого зносу трибоз'єднань забезпечує підвищення ресурсу дизеля.

В результаті досліджень визначено основні фактори, що впливають на шорсткість тертьових поверхонь, знайдено способи прискорення припрацювання, виявлено роль моторної оливи та окремих присадок до неї, проведено розрахункові дослідження режимів обкатки, розкрито деякі механізми фізико-механічних і хімічних явищ, що відбуваються в вузлах тертя.

1.2. Механізми зношування основних вузлів дизельних двигунів

Надійність і довговічність дизельного двигуна визначаються станом його трибоспряжень, де відбуваються процеси тертя та інтенсивні контактні взаємодії поверхонь. За даними аналітичних та експериментальних досліджень, тертя та зношування є причиною 20–40 % усіх відмов двигуна, а в окремих умовах експлуатації — до 50 %. Особливо критичними є вузли циліндро-поршневої групи (ЦПГ), підшипники колінчастого вала та елементи паливної системи.

Загальна структура відмов у дизельних двигунах.

У різних джерелах наводяться подібні статистичні дані:

- Відмови ЦПГ становлять 10–15 % від загальної кількості відмов двигуна; в окремих випадках — до 35 %.
- Відмови підшипників КШМ складають 5–25 %, залежно від умов мастила та навантаження.
- Система живлення (паливна) у тракторних дизелях формує 39,8–50 % усіх відмов.
- Система охолодження — близько 9–10 %.

Такі дані підтверджують нерівномірність розподілу навантажень та наявність порушень режимів змащування в окремих ділянках двигуна.

Таблиця 1.1 – Частка відмов окремих вузлів дизельного двигуна

Вузол двигуна	Частка відмов, %	Коментар
Циліндро-поршнева група	10–35	Найбільш чутлива до граничного тертя; абразив і перегрів прискорюють знос
Підшипники колінчастого вала	5–25	Залежить від тиску оливи та її температури
Паливна система	39,8–50	Несправності форсунок, насоса, забруднення палива
Охолоджувальна система	9–10	Призводить до перегріву ЦПГ та зниження в'язкості оливи

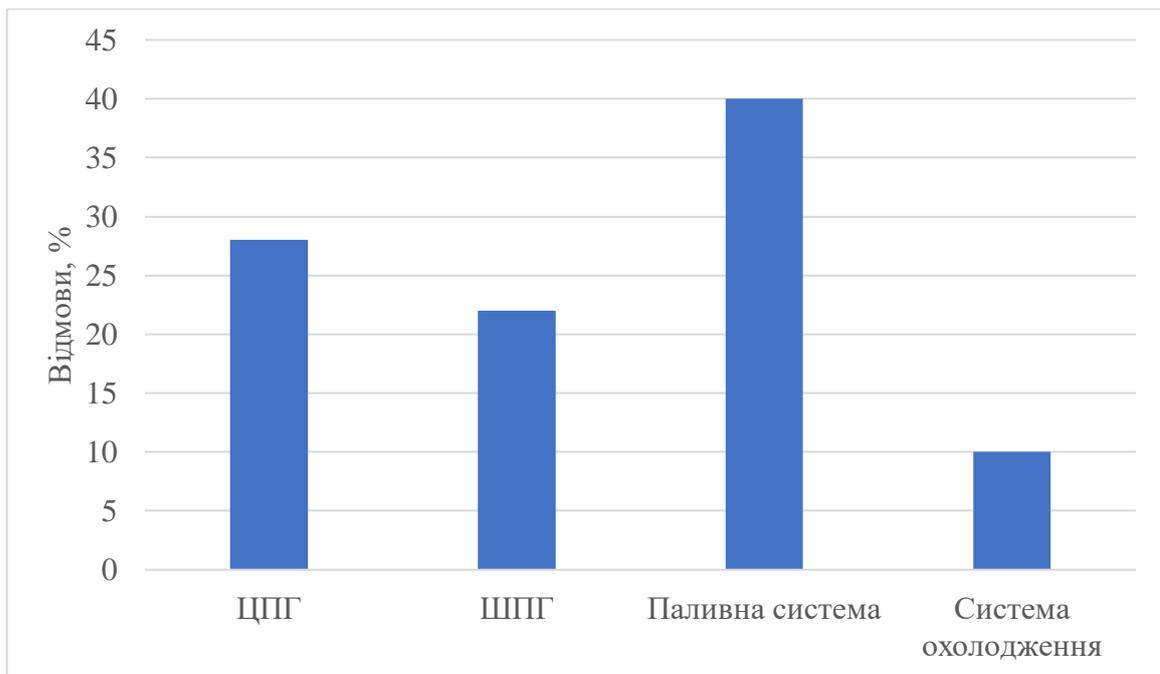


Рисунок 1.2 - Частка відмов окремих систем

Механізми зношування циліндро-поршневої групи (ЦПГ).

ЦПГ є одним з класичних об'єктів трибологічного аналізу, оскільки її елементи працюють у найжорсткіших умовах: висока температура (250–350 °С на стінках циліндра), високі питомі тиски та мінливі режими тертя — від гідродинамічного до граничного.

Основні механізми зношування ЦПГ (рис. 1.3):

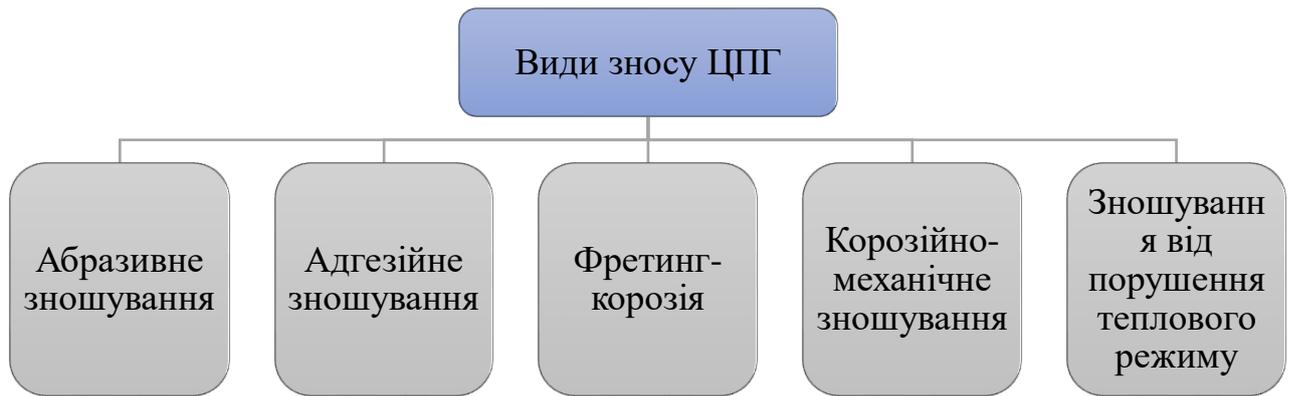


Рисунок 1.3 – Види зносу ЦПГ

1. Абразивне зношування. Викликане присутністю твердих частинок пилу, продуктів згоряння та металевих включень у мастильній плівці. Частки діють як мікрорізці, що формують борозни на поверхні.

2. Адгезійне зношування. Виникає при руйнуванні мастильної плівки, коли металеві поверхні частково зварюються між собою, утворюючи мікрозадири. Це характерно під час холодного старту та перегріву двигуна.

3. Корозійно-механічне зношування. Волога та продукти згоряння, що потрапляють на стінки циліндра, активують корозійні процеси, які супроводжуються локальним руйнуванням поверхні.

4. Фретинг-корозія. Зустрічається в поршневих пальцях та місцях мікроколивань, де часті циклічні мікрорухи провокують утворення оксидних шарів і подальше руйнування.

5. Зношування від порушення теплового режиму. Перегрів спричиняє втрату в'язкості оливи та руйнування мастильної плівки. На практиці відзначено значне збільшення зносу ЦПГ при роботі двигуна з забрудненим радіатором або низьким рівнем охолоджувальної рідини.

Статистично доведено, що інтенсивність зношування ЦПГ зростає у 2–3 рази при роботі двигуна з недостатньою кількістю оливи або з оливою, що втратила свої властивості.

Механізми зношування підшипників колінчастого вала (рис. 1.4).

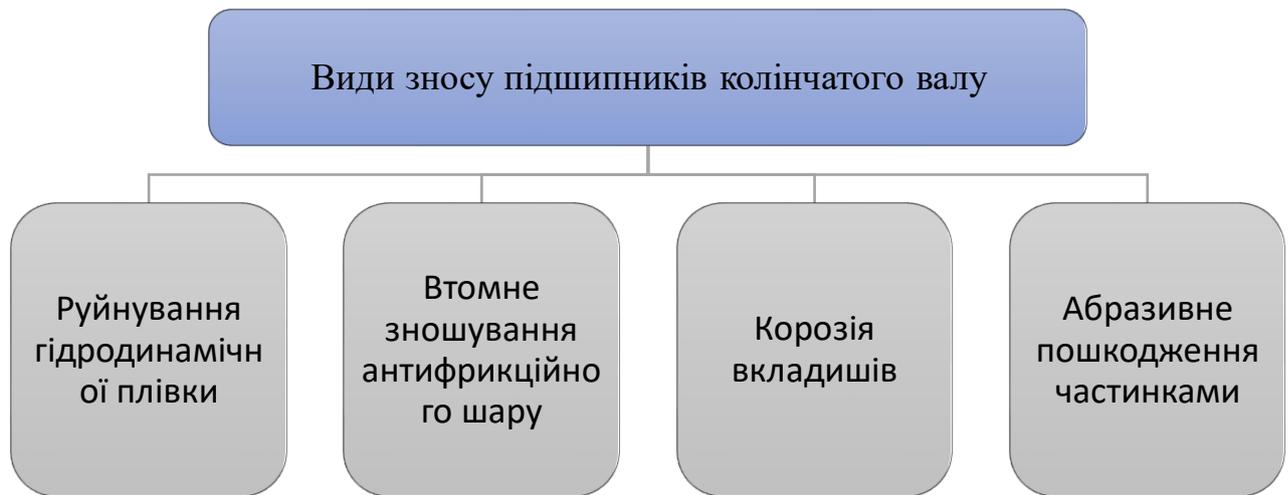


Рисунок 1.4 – Види зносу підшипників колінчатого валу

Підшипники ковзання працюють у режимах гідродинамічного та змішаного тертя. Основні причини їх пошкодження:

1. Руйнування гідродинамічної плівки. Відбувається при падінні тиску мастила, зниженні в'язкості, перегріві або перевищенні навантаження. Контакт метал–метал стає неминучим, утворюються задири.
2. Втомне зношування антифрикційного шару. Тривала дія циклічних навантажень призводить до відшаровування бабіту або алюмінієвих сплавів.
3. Корозія вкладишів. Наявність кислотних продуктів окиснення оливи прискорює руйнування поверхні.
4. Абразивне пошкодження частинками. Потрапляння частинок пилю чи металу в зону підшипника здатне викликати прискорене точкове руйнування.

Статистично доведено, що підшипники становлять від 5 % до 25 % відмов дизельного двигуна, що свідчить про їх критичну залежність від якості мастильних матеріалів.

Зношування та відмови паливної системи

Паливна система є найбільш «проблемним» вузлом дизельних двигунів:

- до 40–50 % усіх відмов двигуна пов'язані саме з нею.

Типові причини:

- Зношування плунжерних пар через забруднення палива.
- Кавітаційне руйнування елементів насосів.
- Корозія через воду в паливі.

- Зношування голки форсунки через неякісне змащення.

Знос елементів паливної системи опосередковано впливає і на знос ЦПГ - через порушення процесу згоряння та підвищення температурного навантаження.

Зношування у системах охолодження та змащування

Хоча ці системи не є трибологічними вузлами, їх відмова безпосередньо впливає на зношування всіх інших агрегатів.

- Перегрів двигуна зменшує товщину мастильної плівки в 1,5–2 рази.
- Зниження температури оливи збільшує її в'язкість, що підвищує втрати на тертя.
- Забруднення оливи абразивними частинками підвищує інтенсивність зношування у 3–5 разів.

Система охолодження відповідає за $\approx 10\%$ усіх відмов двигуна, але кожна така відмова викликає ланцюгове прискорене руйнування ЦПГ, підшипників і клапанного механізму.

Проведений аналіз показує, що:

1. Відмови дизельних двигунів розподіляються нерівномірно між вузлами.
2. Найбільш навантажені трибологічні вузли (ЦПГ та підшипники) відповідають за 15–60 % усіх відмов залежно від умов експлуатації.
3. Основні причини зношування: порушення режиму змащування, забруднення мастила, перегрів, агресивні продукти згоряння, механічні перевантаження.
4. Паливна система є домінуючим джерелом відмов і також впливає на інші вузли — через порушення якості згоряння.
5. Підвищення ресурсу двигуна потребує застосування сучасних трибологічних рішень, серед яких провідну роль відіграють наномодифікатори мастильних матеріалів.

1.3. Сучасні способи зниження тертя та зношування в дизельних двигунах

Для підвищення надійності дизельних двигунів сьогодні застосовують комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію втрат тертя і запобігання зношуванню поверхонь [12. 13]. До основних напрямів належать:

1.3.1. Конструктивні методи

- покращення мікрогеометрії поверхонь деталей (хонінгування, полірування, плазмове напилення);
- вибір оптимальних матеріалів та антифрикційних покриттів;
- удосконалення профілю поршневих кілець;
- забезпечення рівномірного тепловідведення від стінок циліндра.

Застосування твердосмазочних покриттів (молібден, графітові композиції, хромонікелеві сплави) дозволяє істотно зменшити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування, особливо під час обкатки.

1.3.2. Технологічні методи

- створення регулярних мікрорельєфів на поверхнях циліндрів та кілець;
- антифрикційно-деформаційне хонінгування;
- безабразивна обробка (ФАБ-технології);
- металоплакування поверхонь.

Такі методи сприяють формуванню стабільної мастильної плівки та покращують здатність поверхонь утримувати оливу.

1.3.3. Експлуатаційні заходи

- регулярна заміна мастильних матеріалів відповідно до регламенту;
- контроль температурного режиму двигуна;
- застосування високоякісних моторних олив;
- обкатка двигуна з використанням спеціальних присадок.

Порушення цих вимог значно прискорює руйнування поверхонь тертя та підвищує ризик аварійних відмов.

1.3.4. Хімічні методи — використання присадок до мастил

До складу моторних олів входять присадки різного призначення:

- антифрикційні,
- протизадирні,
- протизношувальні,
- миюче-диспергувальні,
- антиокислювальні,
- антикорозійні.

Сучасні присадки формують на поверхні металу захисні плівки, що зменшують тертя та стабілізують роботу двигуна. Однак традиційні присадки мають обмежений ресурс і не завжди здатні забезпечити необхідний рівень захисту в умовах високих навантажень.

1.3.5. Застосування наномодифікаторів тертя — сучасний тренд

Наночастинки мають унікальні властивості:

- здатність проникати в мікродефекти поверхні,
- формувати трибоплівки,
- забезпечувати самоорганізацію поверхневого шару,
- зменшувати коефіцієнт тертя до 30–40 %,
- знижувати температуру трибоконтатів,
- збільшувати ресурс мастила.

Саме наномодифікатори сьогодні є найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності та ресурсу дизельних двигунів.

1.4. Наноматеріали як модифікатори тертя

Нанотехнології дали поштовх розвитку нового покоління протизношувальних добавок. На відміну від традиційних присадок, наноматеріали діють не лише хімічно, але й фізико-механічно, змінюючи структуру поверхневого шару.

1.4.1. Механізм дії наночастинок

Основні процеси, що відбуваються в зоні контакту:

1. **Заповнення мікропорожнин** — наночастинки потрапляють у западини мікрорельєфу та вирівнюють поверхню.
2. **Формування захисної плівки** — створюється тонкий шар з високою міцністю, низьким коефіцієнтом тертя та підвищеною стійкістю до задирів.
3. **Термомеханічна самоорганізація** — наночастинки сприяють формуванню вторинних структур, які зберігають властивості навіть після зупинки двигуна.
4. **Зменшення температури контактів** — за рахунок зниження тертя.
5. **Антифрикційний ефект** — встановлення граничного режиму з мінімальними втратами.

1.4.2. Поширені типи наномодифікаторів

1. **Фулерени C₆₀ і нанокластери вуглецю**
 - сферична структура;
 - низька сила зчеплення;
 - здатність до перекочування між поверхнями, подібно до нанопідшипника;
 - високий антифрикційний ефект.
2. **Графен та оксид графену**
 - надзвичайно міцна двовимірна структура;
 - висока теплостійкість;
 - відмінні антифрикційні властивості в оливах.

3. Дисульфід молібдену (MoS_2)

- один із найкращих твердих мастильних матеріалів;
- шарувата структура;
- здатність до легкого зсуву шарів;
- ефективність у граничному режимі.

4. Наночастинки серпентину ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

- формують на поверхні трибокерамічний шар;
- відновлюють мікродефекти;
- зменшують зношування до 30–50 %. (Механізми підтверджені

низкою робіт та ілюструються в базовому файлі.)

5. Металеві наночастинки (Cu , Ag , Ni)

- покращують теплопровідність;
- підвищують антифрикційні властивості мастила.

6. Керамічні наночастинки Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2

- зміцнюють поверхню;
- забезпечують стабілізацію гідродинамічного змащування.

1.4.3. Переваги наномодифікаторів

- зниження коефіцієнта тертя на 20–50 %;
- зменшення зношування деталей на 15–60 %;
- покращення енергетичних показників двигуна;
- збільшення ресурсу моторної оливи на 30–40 %;
- зменшення витрати палива на 3–7 %;
- підвищення екологічних показників.

1.4.4. Обмеження та особливості використання

- необхідний контроль концентрації наночастинок;
- можливість агломерації за високих температур;
- чутливість до хімічного складу оливи;
- необхідність запобігання випадання осаду.

Сучасні дослідження показують, що найперспективнішими є гібридні нанодобавки, які поєднують властивості декількох наноматеріалів (наприклад, графен + MoS₂ або фулерени + серпентин).

1.5. Припрацювальні присадки

Припрацювальні присадки до моторних оливок становлять окрему групу спеціалізованих хімічних та композиційних сполук, призначених для покращення умов тертя в дизельних двигунах, зниження інтенсивності зношування та забезпечення формування захисних поверхневих структур у період припрацювання деталей. Їх використання дає змогу зменшити втрати на тертя, стабілізувати роботу трибоспряжень, підвищити компресію та загальний ресурс двигуна [14. 15]. Згідно зі схемою (рис. 1.5), припрацювальні присадки можна умовно поділити на кілька груп: реміталізанти, полімерні антифрикційні препарати, кондиціонери та рекондиціонери металу, шаруваті модифікатори тертя, епілами та металоорганічні антифрикційні сполуки, а також ремонтно-відновлюючі препарати на основі мінеральних порошків. Кожна з цих груп має власний механізм дії, специфіку застосування та особливості впливу на структурний стан поверхонь тертя.

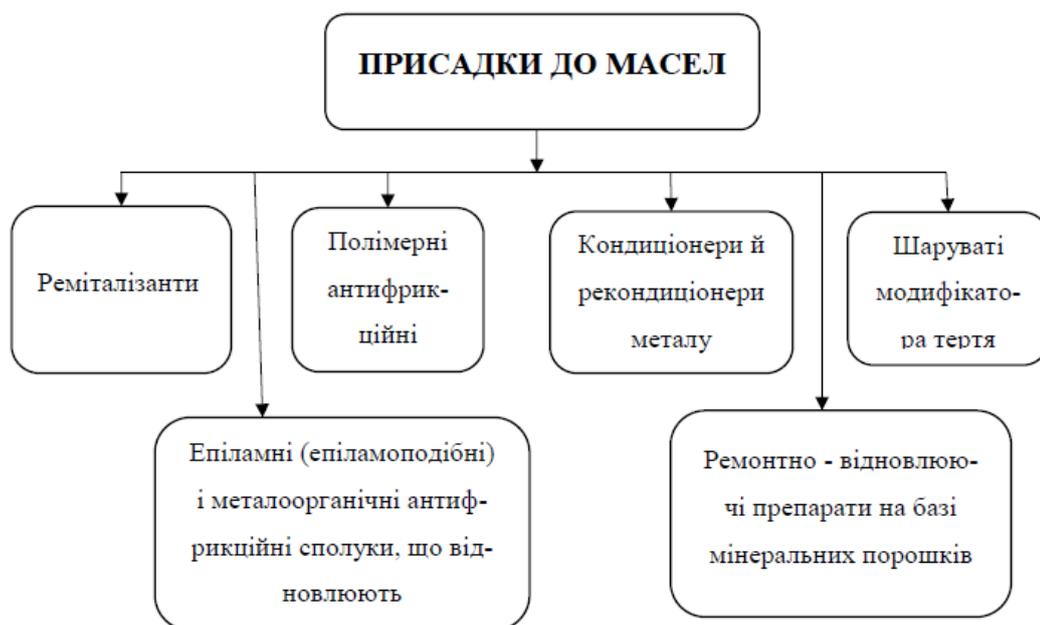


Рисунок 1.5 – Присадки до масел

Однією з найбільш ефективних та поширених груп на сучасному українському ринку є реметалізанти. Їхня робота ґрунтується на здатності активних компонентів присадки взаємодіяти з поверхневими шарами металу, утворюючи металокерамічний захисний шар, який відновлює мікрodefекти, зменшує коефіцієнт тертя та вирівнює мікрогеометрію деталей. Найбільш відомим представником цієї групи є продукція торгової марки ХАДО, яка базується на технології Revitalizant®. Активні наночастинки ревіталізанту потрапляють у зону контакту, де під дією високих температур і тисків ініціюють формування триботехнічного металокерамічного покриття. У результаті на поверхні утворюється самовідновлювана структура, здатна витримувати значні механічні та теплові навантаження. За даними виробника і незалежних тестувань, використання реметалізантів ХАДО забезпечує зменшення шуму і вібрацій двигуна, підвищення компресії на 10–25 %, зниження витрати оливи, стабілізацію холостого ходу та зменшення зношування у 1,5–3 рази. До найпоширеніших продуктів належать XADO 1 Stage Engine Revitalizant, Verylube Revitalizant, Atomic Metal Conditioner та інші модифікації для легкових і вантажних дизельних двигунів.

Поруч із реметалізантами важливе місце займають полімерні антифрикційні присадки. Їхній механізм дії базується на формуванні на поверхні металу тонкої полімерної плівки, яка знижує адгезійний контакт і забезпечує м'який граничний режим тертя. Такі препарати покращують роботу двигуна при нестачі мастила, підвищують плавність ходу та зменшують імовірність виникнення задирів у період припрацювання. На ринку України поширені продукти на кшталт Liqui Moly CeraTec, Wynn's Super Friction Proofing, Fenox AF та інші. Ця група не має виражених ремонтних властивостей, проте забезпечує стабільний антифрикційний ефект.

Кондиціонери й рекондиціонери металу також спрямовані на зміну фізико-хімічного стану поверхонь, але механізм їх роботи полягає у хімічному модифікуванні металу за рахунок утворення захисних фосфатних, сульфідних чи органічних плівок. Такі присадки зміцнюють поверхневий шар, підвищують його стійкість до мікрозадирів і корозії, забезпечують плавнішу роботу двигуна,

особливо при підвищених температурах. Серед доступних в Україні засобів цього типу — Liqui Moly Motor Protect, Bardahl Oil Additive та комбіновані засоби ХАДО Atomic Oil Conditioner.

Окрему групу становлять шаруваті модифікатори тертя, які містять тверді мастильні матеріали з шаруватою структурою, такі як дисульфід молібдену (MoS_2), дисульфід вольфраму (WS_2), графіт чи графенові наноструктури. Їхня ефективність зумовлена властивістю шарів легко переміщуватися один відносно іншого, що різко знижує опір зсуву та забезпечує роботу при екстремальних навантаженнях у граничному режимі. До найбільш популярних засобів належать Liqui Moly MoS_2 , Hi-Gear MoS_2 , Nanoprotech Graphene та інші. Вони відзначаються дуже низьким коефіцієнтом тертя, але не мають виражених ремонтних властивостей на відміну від реметалізаторів.

До групи припрацювальних присадок також належать епілами та металоорганічні антифрикційні сполуки — високоефективні поверхнево-активні речовини, здатні утворювати надтонкі плівки (10–20 нм), що зменшують адгезію та запобігають утворенню нагару. Ці речовини часто використовуються у складі сучасних пакетів присадок до моторних олів, таких як ZDDP (цинк-діалкілдитіофосфат), який забезпечує протизношувальні та антиокисні властивості.

Останню групу складають ремонтно-відновлюючі препарати на основі мінеральних порошків. Механізм їх дії пов'язаний переважно з фізичним заповненням мікродефектів на поверхнях тертя та формуванням зміцнювального шару за участю ультрадисперсних частинок. До таких засобів належать RVS Master, Suprotex, Xenum VX300 та інші препарати, які можуть містити силікатні мінерали, керамічні наночастинки або ультрадисперсні метали.

Аналізуючи наведені групи припрацювальних присадок, можна зробити висновок, що найбільш комплексний трибологічний ефект забезпечують саме реметалізанти, зокрема продукція ХАДО, яка не лише знижує тертя, але й відновлює поверхневі шари. Саме тому в межах подальших досліджень доцільно зосередити увагу на ефективності реметалізаторів у дизельних двигунах та їх впливі на трибологічні характеристики ЦПП та підшипникових вузлів.

1.6. Висновки та задачі дослідження

Проведений огляд літературних джерел, аналіз сучасних уявлень про трибологічні процеси та дослідження механізмів зношування дизельних двигунів дають підстави зробити низку узагальнюючих висновків. Встановлено, що трибологічні процеси в системах тертя дизельного двигуна мають комплексний характер, оскільки супроводжуються дією високих температур, змінних навантажень, абразивних частинок, продуктів неповного згорання та коливань режиму змащування. Найбільш інтенсивному зносу піддаються циліндро-поршнева група та підшипники колінчастого вала, частка відмов яких у структурі несправностей двигуна сягає відповідно 10–35 % і 5–25 %. Значну частку відмов (до 50 %) формують також елементи паливної системи, які опосередковано впливають на тепловий і трибологічний стан ЦПГ.

Проаналізовані сучасні методи зниження тертя і зношування — конструктивні, технологічні, експлуатаційні та хімічні — дозволяють частково компенсувати негативний вплив навантажень, однак відзначаються обмеженою ефективністю при граничних режимах тертя, особливо в період припрацювання. У зв'язку з цим особливу увагу привертає використання припрацювальних присадок до моторних олів, які здатні формувати захисні поверхневі структури та зменшувати інтенсивність зношування. Серед них найбільш перспективними виявилися реметалізанти, зокрема присадки торгової марки ХАДО, що забезпечують формування металокерамічного шару, відновлення мікродефектів, зниження коефіцієнта тертя та збільшення ресурсу двигуна. Аналіз ринку України показує, що технології на основі ревіталізаторів займають провідне місце та демонструють комплексний трибологічний ефект у дизельних двигунах різних типів.

Огляд літератури дозволив визначити наукові тенденції та прогалини у дослідженнях наномодифікаторів тертя, зокрема їх впливу на припрацювання деталей, стабільність мастильної плівки та динаміку зношування ЦПГ. Це сформувало необхідність проведення комплексного дослідження трибологічних характеристик дизельних двигунів із застосуванням сучасних

наномодифікаторів, насамперед реметалізаторів, з метою підвищення ресурсу та надійності силових установок.

Мета дослідження. Підвищення трибологічних характеристик та довговічності дизельного двигуна шляхом застосування припрацювальних наномодифікаторів тертя (реметалізаторів) і визначення їх впливу на інтенсивність зношування, умови формування захисних поверхневих структур та роботу основних вузлів ЦПГ і підшипникових опор.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати трибологічні процеси та визначити основні механізми зношування вузлів дизельного двигуна, що мають ключовий вплив на його ресурс та надійність.

2. Дослідити склад, властивості та механізми дії припрацювальних присадок, зокрема реметалізаторів, та визначити їх потенційну ефективність у зменшенні інтенсивності зношування.

3. Визначити оптимальні умови використання наномодифікаторів тертя в дизельному двигуні та оцінити їх вплив на параметри припрацювання, зміну мікрогеометрії та формування захисних триботехнічних шарів.

4. Провести експериментальні дослідження впливу реметалізаторів на трибологічні характеристики ЦПГ і підшипникових вузлів, визначивши коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування та стабільність мастильної плівки.

5. Оцінити ефективність застосування реметалізаторів на основі розрахункових та експериментальних даних і сформулювати рекомендації щодо їх використання з метою підвищення ресурсу дизельних двигунів.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ПРИСКОРЕННЯ ПРИПРАЦЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛІВ, ЩО ТРУТЬСЯ

2.1. Взаємозв'язок процесів тертя та поверхневих явищ

Поняття поверхні або міжфазної межі зазвичай трактують як тонкий шар речовини скінченної товщини, який відокремлює різні об'ємні фази матеріалу. Товщина такого шару визначається фізико-хімічними властивостями середовища та, як правило, відповідає кільком атомним шарам. Хоча при дослідженні поверхневих явищ часто застосовується спрощена модель однорідної поверхні, навіть для ідеальних кристалічних структур реальна поверхня характеризується значною неоднорідністю за структурними, електричними й хімічними параметрами. Сучасні уявлення про поверхневий шар сформувалися завдяки розвитку фізики, хімії та механіки, що дозволило розглядати його як складну багатошарову систему, яка включає дефектний шар основного матеріалу, утворений у процесі обробки, оксидні плівки, а також хемосорбовані й адсорбовані шари [14].

У роботах Ф. Боудена, Д. Тейбора та інших дослідників при аналізі контактної взаємодії вперше було акцентовано увагу на ролі молекулярних сил. Подальший розвиток цих уявлень пов'язаний з працями І.В. Крагельського, який доповнив класичне рівняння сили тертя молекулярною складовою поряд із механічною. Поєднання уявлень про молекулярну взаємодію та деформівність граничного шару привело до введення концепції так званого «третього тіла» в зоні контакту. Останніми роками кількість досліджень, у яких граничний шар мастильного середовища разом із прилеглими плівками на твердих поверхнях розглядається як ключовий елемент фрикційної взаємодії, суттєво зросла [16, 17].

Особливий інтерес становлять роботи, присвячені перенесенню наночастинок антифрикційних матеріалів, у яких застосовано комплексний

підхід до аналізу процесів тертя з позицій фізико-хімічної механіки, теоретичні засади якої були закладені П.А. Ребіндером.

Розвиток високочутливих фізичних методів дослідження — таких як растрова електронна мікроскопія, ОЖЕ-спектроскопія та мікрорентгеноструктурний аналіз — відкрив можливість детального вивчення структури й складу поверхневих шарів твердих тіл. Отримані результати дозволили розглядати зношування не як окремий акт руйнування, а як динамічний комплекс взаємопов'язаних процесів: деградації вихідних структур, формування нових поверхневих утворень та їх подальшого руйнування. Це стало основою для розвитку теорій фрикційної взаємодії, що базуються на описі масоперенесення в умовах тертя.

Однією з таких теоретичних моделей є концепція, запропонована Д.І. Рігні, у межах якої розроблено модель тертя та аналітичний вираз для коефіцієнта тертя.

$$\begin{aligned} \mu(h) = & [1 - f(h)] \frac{(n \cdot A)^e}{P} \left(\tau_{\max}^e \left[\frac{\tau_s^e}{\tau_{\max}^e} \right] - \exp(-\alpha^e \cdot h) \cdot F \left(\frac{\tau_i}{\tau_{\max}^e} \right) \right) + \\ & + \tau_{\max} \cdot \exp(-\alpha^e \cdot h) \cdot F \left(\frac{\tau_i}{\tau_{\max}} \right) + f(h) \frac{n \cdot A}{P} \cdot \tau_{\max} \cdot F \left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}} \right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

У наведеному рівнянні розглядається тертя з урахуванням перенесених на поверхню плівок. Функція $f(h)$ нормована так, що її значення при $h \rightarrow 0$, $f(h) \rightarrow 1$; при $h \rightarrow \infty$, $f(h) \rightarrow 0$.

Функція $F = \tau_i/\tau_{\max}$ монотонно зростає до одиниці при $\tau_i/\tau_{\max} \rightarrow 1$, а її вид залежить від форми кривої *напруження - деформація*. Експоненціальний затухаючий член введений з тієї причини, що в поверхневому шарі спостерігаються великі градієнти зсуву і зміщення.

Рівняння (2.1) характеризує фрикційну взаємодію за умови, що перенесена плівка надійно зчеплена з матеріалом основної поверхні, а процес ковзання реалізується безпосередньо на межі контакту між плівкою та контртілом. Водночас у реальних умовах зсуву можливі ситуації, коли зона ковзання зміщується всередину самої плівки або локалізується на межі її контакту з

матеріалом деталі. У такій ситуації виникають передумови для відокремлення частинок перенесеного матеріалу від поверхні. Тому більш універсальним варіантом фрикційної взаємодії слід вважати процес, за якого перенесена плівка формується одночасно на обох контактуючих поверхнях деталей тертя (рис. 2.1).

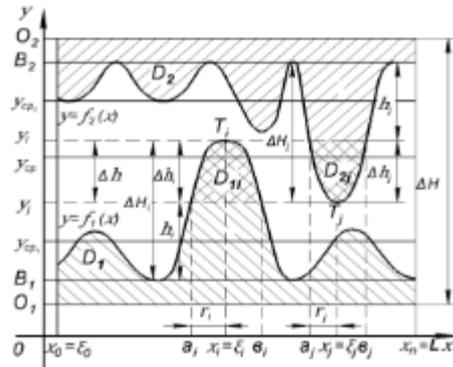


Рисунок 2.1 - Схема контактної взаємодії поверхонь, покритих антифрикційними плівками

Позначення на схемі: 1–1 та (1'–1') — межі контакту між перенесеною антифрикційною плівкою та поверхневим шаром металу деталей; 2–2 — межа взаємодії на рівні «плівка–плівка», сформованих на контактуючих поверхнях; 3 — шари перенесеного матеріалу, що покривають поверхні тертя; 4 — адсорбований і хемосорбований мастильний шар; P — прикладене навантаження, Н; dA — елементарна площа контакту, м²; h — товщина перенесених плівок, м.

У розглянутій моделі обидві контактуючі поверхні вкриті шарами перенесеної речовини однакової товщини. Процес ковзання може відбуватися або на межі взаємодії плівок (2–2) з коефіцієнтом тертя μ_1 , або на межі контакту плівки з металевою основою (1–1 та 1'–1') з коефіцієнтом тертя μ_2 . У випадку, коли $\mu_1 \geq \mu_2$, можливе часткове відшаровування плівки у вигляді окремих фрагментів. При цьому вважається, що антифрикційні плівки на обох поверхнях мають однакові властивості, а напруження в їх об'ємі є сталими по всій товщині та дорівнюють $\tau_{c,max}$. Аналітичний вираз для коефіцієнта тертя μ_1 за формою є близьким до рівняння (2.1).

$$\begin{aligned} \mu_1(h) = & [1 - f(h)] \frac{(n \cdot A)^e}{P} (2\tau_{\max}^e [1 - \exp(-\alpha^e \cdot h)] + \\ & + \tau_{\max} \cdot \exp(-\alpha^e \cdot h) \cdot F\left(\frac{\tau_{\max}^e}{\tau_{\max}}\right)) + f(h) \frac{n \cdot A}{P} \cdot \tau_{\max} \cdot F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right), \end{aligned} \quad (2.2)$$

Коефіцієнт 2 перед τ_{\max}^e визначає дію плівки на контртілі. Дві функції F , що входять до рівняння (2.1), відсутні у виразі (2.2), оскільки $\tau_s^e = \tau_i = \tau_{\max}^e$. У випадку, коли ковзання здійснюється на межі розділу 1-1 (1'-1'), загальна площа контакту дорівнює $(n \cdot A)^e$, вираз для μ_2 має вигляд:

$$\begin{aligned} \mu_2(h) = & [1 - f(h)] \frac{(n \cdot A)^{e1}}{P} (\tau_{\max}^e [1 - \exp(-2\alpha^e \cdot h)] + \\ & + \tau_{\max} \cdot F\left(\frac{\tau_{\max}^e}{\tau_{\max}}\right)) + f(h) \frac{(n \cdot A)^{e1}}{P} \cdot \tau_{\max} \cdot F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.2) і (2.3) спрощуються нормуванням за $\tau_{\max}^e (n \cdot A)^e / P$ і прийняттям $\tau_s = \tau_{\max}^e$. При цьому μ_1 і μ_2 залежать від h , відношення $\tau_{\max}^e / \tau_{\max}$ і α^e .

У цих формулах аналогічно враховується роль антифрикційних плівок у ковзанні та формуванні частинок зношування.

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp(U_0 - \gamma \cdot \sigma) / k \cdot T, \quad (2.4)$$

Наведене рівняння довговічності має універсальний характер і може бути застосоване до широкого кола матеріалів у значному діапазоні напружень і температур. Для більшості матеріалів, незалежно від їх хімічного складу, типу міжатомних зв'язків та структурного стану, характерний порядок величини параметра τ_0 становить приблизно 10^{-13} с. Водночас значення початкового енергетичного бар'єра U_0 , що відповідає енергії руйнування міжатомного зв'язку, є індивідуальним для кожного матеріалу і за своєю величиною наближається до енергії активації розпаду зв'язків у твердому тілі.

Параметр γ істотно визначається структурними особливостями матеріалу, зокрема режимами термічної обробки, наявністю та концентрацією домішок,

ступенем орієнтації й пластифікації (для полімерних матеріалів), а також кристалографічною орієнтацією та густиною дислокацій.

Подібний функціональний зв'язок кінетичних характеристик із температурою характерний і для багатьох інших фізико-хімічних процесів, таких як дифузія, випаровування або перебіг хімічних реакцій. Ці явища зумовлені хаотичним тепловим рухом атомів і, відповідно, нерівномірним розподілом теплової енергії між ними.

З огляду на це доцільним є поширення аналогічного підходу на процеси динамічної взаємодії тіл, зокрема на явища граничного тертя металів. У випадку перебігу трибохімічних реакцій параметр U_0 можна трактувати як надлишок енергії відносно середнього енергетичного рівня молекул за заданої температури, необхідний для їх участі в хімічній взаємодії.

Для коефіцієнта тертя μ рівняння аналогічної форми має вигляд [18]:

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp(U_0 - \gamma \cdot \sigma) / kT, \quad (2.5)$$

де μ_0 — коефіцієнт тертя між шарами плівки.

Експериментальні дослідження підтвердили, що наведене рівняння адекватно відтворює характер зміни коефіцієнта тертя в діапазоні контактних навантажень від 20 до 240 МПа. Активацією технологічних середовищ називають будь-який вплив на середовище, спрямований на підвищення його ефективності. Активність мастильного середовища, що містить наночастинки серпентину, залежить від температури, тиску, ступеня деформування поверхонь, каталітичного впливу металу та механічної активності приповерхневих шарів [16].

Таким чином, проведений аналіз кінетичної концепції руйнування поверхонь при терті показав, що в контактній зоні відбувається комплекс взаємопов'язаних процесів, а наночастинки серпентину в місцях контакту знаходяться в активованому стані. Все це доводить, що шляхом цілеспрямованої зміни зовнішніх умов і складу мастила, що містить наночастинки серпентину в

якості активних речовин, можна змінювати властивості поверхонь тертя в потрібному напрямку.

2.2. Теоретичні основи застосування робочих складів, що містять наночастинки серпентину

У ході зношування деталей реалізуються п'ять основних типів фрикційної взаємодії [18].

1. Пружна деформація, за якої контактні напруження не перевищують межі плинності матеріалу, а руйнування поверхні обумовлене накопиченням фрикційної втоми.

2. Пластичне витіснення матеріалу, при якому напруження досягають межі плинності, однак матеріал обтікає впроваджені мікронерівності; зношування при цьому є наслідком малоциклової фрикційної втоми.

3. Мікрорізання, що виникає за умов досягнення напружень, близьких до межі міцності, і супроводжується відокремленням мікростружок із поверхні.

4. Адгезійне порушення фрикційного зв'язку, зумовлене локальним злипанням контактуючих поверхонь і руйнуванням захисної адгезійної плівки на металі.

5. Когезійний відрив, за якого міцність фрикційного зв'язку перевищує міцність основного матеріалу, що призводить до схоплювання та глибинного виривання металу.

Оскільки мікровиступи реальних шорстких поверхонь відрізняються за формою та висотою, у процесі припрацювання деталей одночасно можуть проявлятися всі зазначені види фрикційної взаємодії.

Інтенсивність мікрорізання та пластичного витіснення матеріалу може бути знижена шляхом введення в мастильні матеріали пластифікуючих присадок. Адгезійні процеси піддаються корекції за рахунок застосування адгезійно-активних добавок, тоді як імовірність когезійного відриву зменшується при використанні мастил із вираженими протизадирними властивостями.

Таким чином, раціональний вибір і поєднання припрацювальних присадок дозволяє істотно зменшити інтенсивність зношування деталей дизельного двигуна.

У межах життєвого циклу машини зношування контактуючих елементів доцільно розглядати як суму двох випадкових складових [18].

$$Z(t) = f_1(t) + f_2(t), \quad (2.6)$$

де $f_1(t)$ - функція, що відображає припрацювальний знос; $f_2(t)$ - функція, що відображає знос при експлуатації.

Згідно з теорією І.В. Крагельського [17] інтенсивність зношування деталей розраховують за формулою:

$$I_h = \frac{k}{n\lambda} \sqrt{h/\rho} \cdot \frac{A_{ск}}{A}, \quad (2.7)$$

де n - кількість циклів впливу, що призводять до руйнування матеріалу поверхневого шару; $A_{ск}$ - фактична площа контакту деталей при ковзанні, м²; A - геометрична площа контакту, м²; h - величина зближення між поверхнями твердих тіл в межах номінальної площі, м; k - коефіцієнт, що враховує реальний деформований об'єм металу; ρ - радіус кривизни вершин мікронерівностей, м; X - коефіцієнт, що враховує зміну кількості циклів залежно від залишкової напруги.

Провівши ряд перетворень, А.Г. Суслов наводить залежність інтенсивності зносу I_h для періоду припрацювання:

$$I_h = \frac{2,5v^{1/2}Ra^{2/3}}{n\lambda(1+v)S_m \cdot t_m^{3/2}} \left(\frac{P}{k' \cdot \sigma_T} \right)^{7/6} \times \\ \times \sqrt{15\pi(2\pi W_z H_{max})^{1/3}} \left[1 + \frac{2\pi k' \cdot \sigma_T (1 - \mu_{II}^2)}{E} \right], \quad (2.8)$$

де k' - ступінь наклепу; v - параметр опорної кривої шорсткостей; Ra - середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості, мкм; S_m - середній шаг мікронерівностей профілю шорсткостей, мкм; t_m - відносна довжина опорної лінії, м; P - навантаження, Н; σ_T - напруження текучесті, МПа; W_z - середня

висота хвилястості, мкм; H_{\max} - максимальна величина макровідхилень, мкм; $\mu_{\text{П}}$ - коефіцієнт Пуассона; E - модуль пружності.

Інтенсивність зношування елементів машин у період припрацювання визначається сукупністю характеристик стану поверхонь тертя. Згідно з сучасними уявленнями про процес припрацювання контактуючих деталей, одним із його ключових результатів є формування рівноважної шорсткості, величина якої не пов'язана з початковими параметрами поверхні, а встановлюється виключно умовами тертя. Після досягнення такого рівноважного стану коефіцієнт тертя та швидкість зношування набувають мінімальних значень [14]. Однак несуча здатність поверхонь деталей залежить не тільки від шорсткості, але і від фізико-механічних властивостей поверхонь тертя, тому введено параметр оцінки рівноважного стану поверхневого шару контактуючих деталей:

$$C_x = \frac{0,5\tau_0\sigma_T\left(\frac{1}{v+4} - 6\right)}{\pi^2\left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)\alpha_T^4(1,4P)^{\frac{1}{v+4}}}, \quad (2.9)$$

де τ_0 - питома зсувна міцність молекулярних зв'язків; α_T - коефіцієнт, що враховує відмінність реальної площі контакту від геометричної; P - питома навантаження на контактуючі поверхні, Н.

Про завершення процесу припрацювання можна стверджувати лише після формування рівноважного стану поверхневого шару. Відповідно, підвищення ефективності припрацювання деталей зводиться до скорочення часу, необхідного для досягнення стабільного стану контактуючих поверхонь, який забезпечує оптимальні трибологічні характеристики з позицій подальшої експлуатації дизельного двигуна. З точки зору енергетичних перетворень за даними Н.А. Буше та ін. [16] настання рівноважного стану відбуватиметься пропорційно приросту енергії активації dA_a .

Цю залежність в одиницю часу визначають:

$$\alpha dA_a = \frac{dS}{dt} = \alpha \left(\frac{dA_T}{dt} - \frac{dA_0}{dt} \right) \quad (2.10)$$

За умов повного відведення енергії виконується співвідношення $dS/dt = 0$, а площа контакту залишається сталою, тобто $S(t) = \text{const}$, унаслідок чого система переходить у рівноважний стан. Під час припрацювання характер відведення енергії описується більш складною залежністю: при досягненні певного критичного значення площі контакту $S = S_{kr}$ вона може набувати граничного рівня та залишатися практично незмінною, при цьому різко зростає швидкість зміни dS/dt , що відповідає інтенсивному збільшенню площі реального фізичного контакту поверхонь. Величина dS/dt зростає більш інтенсивно при наявності антифрикційних покриттів. Це пояснюється наявністю антифрикційних плівок, а також тим, що наночастинки сприяють заповненню мікровпадин на поверхні тертя. Розділення поверхонь сервовітною плівкою покращує їх припрацьовуваність, перешкоджає металевому схопленню на ділянках контакту в початковий момент і підвищує несучу здатність тертьових пар. У процесі роботи опірність поверхонь зносу і задиру визначається властивостями матеріалів деталей, що труться, і використовуваних припрацьованих мастил.

2.3. Механізм дії припрацьовального масла, що містить найдрібніші частинки серпентину

Наночастинки серпентину, завдяки своїм надзвичайно малим розмірам, характеризуються дуже великою питомою площею поверхні. Практично непористі частинки розміром у кілька десятків нанометрів здатні мати питому поверхню до $400 \text{ м}^2/\text{г}$ [19], що зумовлює їх високу фізико-хімічну активність. За масштабом лінійних розмірів такі наночастинки є співмірними з довжиною вільного пробігу електрона, що додатково впливає на їх реакційну здатність. Серед механічних властивостей наночастинок і наноструктур необхідно відзначити високу твердість. Твердість матеріалу являє собою характеристику опору матеріалу пластичній деформації при вдавлюванні в нього більш міцного матеріалу. Механічні властивості наночастинок сильно відрізняються від масивних матеріалів. Перш за все, їх твердість зростає зі зменшенням розміру [80].

Прискоренню припрацювання та поліпшенню якості припрацьованих поверхонь сприяє склад ПДФ, оскільки він містить ефективні нанорозмірні частинки мастильної та пластично-деформуючої дії - наночастинки серпентину та магнетиту.

Таблиця 2.1 - Вміст речовин у складі ПДФ

Найменування компонента	Хімічна формула	Вміст, %
Серпентин (лізардіт і хризотил)	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$	77-86
Магнетит	Fe_3O_4	4-5
Хлорит	$(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{22}](OH)_{16}$	2-3
Амфібол	$Ca_2(Mg,Fe)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2$	1,5-2
Магнезит	$MgCO_3$	1-2
Амакін (гідроксид Mg/Fe)	$(Mg,Fe)(OH)_2$	1-2
Кальцит/доломіт	$CaMg(CO_3)_2$	0,5-1

Серпентин - мінерал, який відноситься до шаруватих силікатів. Він складається з двох шарів $[Si_2O_5]^{2-}$, з'єднаних разом катіонами Mg в компактні пакети складу $[Si_4O_{10}]^{4-}$. Особливістю кожного шару $[Si_2O_5]^{2-}$ є наявність некомпенсованого електростатичного заряду, обумовленого тим, що з одного боку шару кремнекисневі тетраедри мають одну вільну валентність, що визначає появу тільки на одній стороні шару тетраедрів негативного заряду. У здвоєних пакетах $[Si_4O_{10}]^{4-}$ негативні заряди обох сіток спрямовані всередину пакета і компенсовані катіонами Mg. Фактично в шаруватих пакетах $[Si_4O_{10}]^{4-}$ між двома сітками складу $[Si_2O_5]^{2-}$ розташовується шар $Mg(OH)_2$ (рис. 2.2).

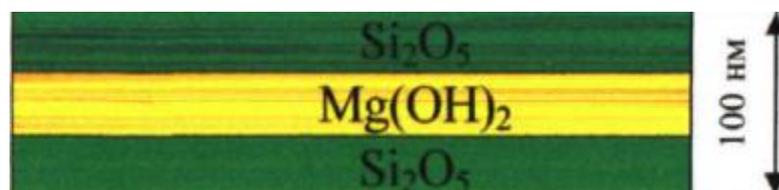


Рисунок 2.2 - Схема розташування шарів серпентину

Особлива шарувата структура силікатів, що характеризується наявністю пакетів із гексагональних шарів, з'єднаних між собою слабкими міжшаровими зв'язками, зумовлює їх характерні властивості. До них належать невисока

твердість та здатність легко розшаровуватися на тонкі пластини, що є подібним до поведінки класичних твердих мастильних матеріалів, таких як графіт, дисульфід молібдену та інші. При підвищенні температури поверхонь тертя наночастинки серпентину, за рахунок підвищеної фізико-хімічної активності покривають поверхні тертя, в місцях їх контакту, і утворюють тонку антифрикційну плівку, яка здатна витримати більш високе навантаження, ніж мастильна плівка моторного масла.

Магнетит - ферит з кристалічною структурою зворотної шпінелі. Кристалізується в кубічній системі, зазвичай утворює октаедричні, рідше додекаедричні кристали і зернисті агрегати.

Спайність відсутня, хрусткий, твердість за мінералогічною шкалою 5,5 - 6, щільність 4800-5300 кг/м³. Спайність відсутня, хрусткий, твердість за мінералогічною шкалою 5,5 - 6, щільність 4800-5300 кг/м².

Наявність твердих частинок магнетиту в маслі повинна призводити до інтенсивного зносу поверхонь тертя. Однак, на думку ряду дослідників, дрібні абразивні частинки не тільки не інтенсифікують зношування, але і гальмують його [17, 8]. У ряді випадків розмір частинок менше 5 мкм вважається безпечним і навіть корисним. Пояснюється це полірувальним ефектом. Механічні домішки, що містяться в олії, яка працювала, в якій ослаблена диспергуюча дія присадок, являють собою комплекси, в серцевині яких знаходяться тверді абразивні частинки, покриті багатошаровим колоїдним захистом, що складається з полярних активних продуктів окислення олії. Позитивний вплив цих частинок проявляється в тому, що вони інтенсифікують теплопередачу між поверхнями тертя, підвищують електропровідність масляної плівки, нівелюють шорсткості на поверхні.

Крім того, нанорозмірні частинки магнетиту підсилюють фізико-хімічні процеси в зоні тертя, викликаючи незначні деформації поверхневих шарів і появу нових поверхонь, які є активними ділянками протікання хімічних реакцій і дифузійних процесів.

Дослідження показали, що мікроабразивні частинки розміром менше 1000 нм прискорюють утворення сервовитного шару. Вміст до 1,5 % таких частинок

у мастилі знижує коефіцієнт тертя, прискорює утворення оптимального мікрорельєфу на всій площі дотику.

Наночастинки обволікаються полярними активними продуктами мастильного матеріалу. Збільшення кількості частинок призводить до посилення поліруючої дії, що істотно впливає на якість припрацьовуваних поверхонь.

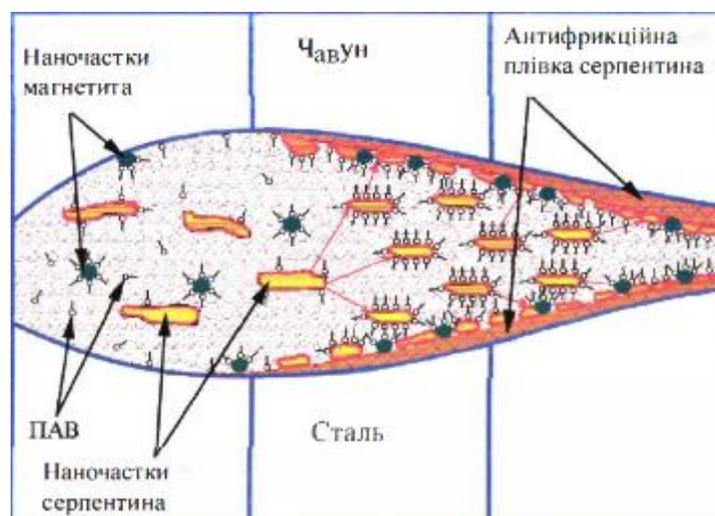
Крім того, взаємодія з поверхнею таких наночастинок призводить до збільшення ступеня наклепу поверхневого шару металу.

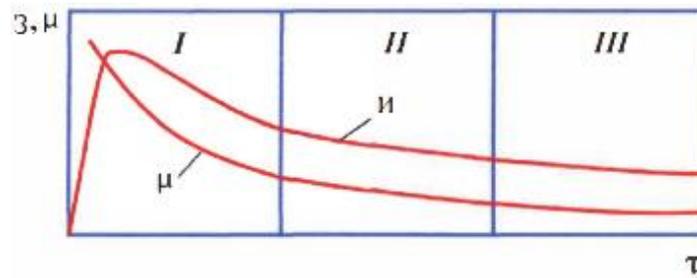
Інтенсивність зношування залежить від багатьох факторів, у тому числі від коефіцієнта тертя між наночастинкою і поверхнею, що зношується.

При утворенні на поверхні металу в процесі тертя антифрикційної плівки навіть малої товщини, зменшується коефіцієнт тертя між наночастинкою і металом, що призводить до зменшення пластичної і пружної деформації основного металу, а отже, і величини зносу. Виходячи з вищесказаного зроблено висновок про можливість використання механічного впливу наночастинок магнетиту для прискорення припрацювання поверхонь тертя на маслах з ПШФ складом.

У період холодного обкатування наночастинки магнетиту підсилюють фізико-хімічні процеси в зоні тертя, за рахунок зняття оксидів, сприяють більш інтенсивному згладжуванню мікронерівностей поверхонь тертя, полегшують і прискорюють процес припрацювання.

Дія наночастинок ПШФ складу на поверхнях тертя можна розділити на три етапи (рис. 2.3).





З - знос; μ - коефіцієнт тертя; τ - час; I- введення наночастинок ПДФ складу в масло; II - утворення антифрикційної плівки; III - усталений режим.

Рисунок 2.3 - Дія наночастинок ПДФ складу на поверхнях тертя

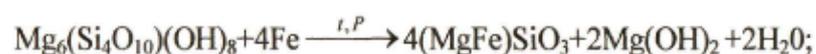
Перший етап полягає у введенні в масло наночастинок ПДФ складу. Наночастинки серпентину і магнетиту обволікаються поверхнево-активними речовинами мастильного матеріалу, великі частинки серпентину додатково розщеплюються на пластинки. Наночастинки магнетиту вирівнюють піки мікронерівностей, збільшуючи фактичну площу контакту, і заповнюють мікровпадини поверхні. Тут спочатку відбувається різке збільшення зносу припрацьовуваних поверхонь, потім зниження, також спостерігається зменшення коефіцієнта тертя. На другому етапі наночастинки серпентину покривають підготовлені ділянки поверхонь, утворюючи антифрикційну плівку. Значення зносу і коефіцієнта тертя знижуються.

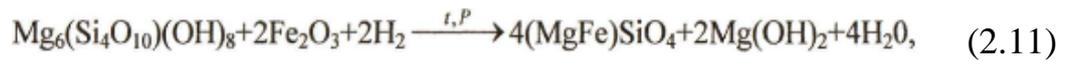
На третьому етапі наночастинки серпентину повністю покривають поверхні тертя і граничне тертя переходить в рідинне.

Тут криві зносу і коефіцієнта тертя представляють практично пряму лінію, що говорить про встановлений режим роботи.

Характер зміни тертя і зношування показує, що процес припрацювання протікає більш інтенсивно в порівнянні з чистим експлуатаційним маслом, тобто нанорозмірні частинки серпентину і магнетиту, що входять до ПДФ складу, дозволяють форсувати процес припрацювання деталей і отримати підвищені фізико-механічні властивості поверхонь тертя.

Основна реакція взаємодії наночастинок серпентину з металом і окисними плівками металу:





Поверхні деталей, що покриваються антифрикційною плівкою, графічно можна представити на рис. 2.4.

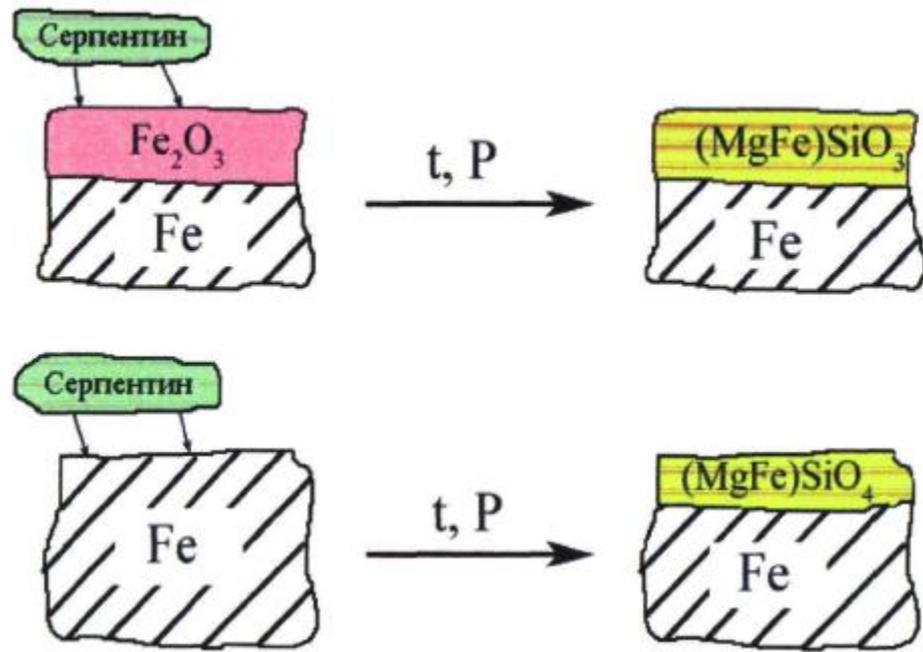


Рисунок 2.4 - Взаємодія наночастинок серпентину з поверхнями деталей

Таблиця 2.2 - Відомості про швидкості зношування деталей після обкатки v_0 , після експлуатаційної обкатки v_{40} і в період експлуатації v_e .

Контрольовані деталі після обкатки на маслах	v_0 , МКМ/ГОД	v_{40} , МКМ/ГОД	v_e , МКМ/ГОД
Гільзи циліндрів			
1.М-10ДМ типова технологія	6,55	0,125	0,057
2.М-10ДМ з ПІАФ	10,00	0,100	0,057
Поршневі кільця			
1.М-10ДМ типова технологія	21,00	0,40	0,120
2.М-10ДМ з ПІАФ	43,48	0,38	0,120

Розрахунки за наведеною методикою проводилися в додатку Microsoft Office Excel. Використовуючи дані таблиці 2.3, проведено розрахунок для двигунів ЯМЗ. Час обкатки двигунів при використанні чистого масла М-10ДМ, отримане за допомогою розрахунку, дорівнює 1,84 години. Цей час відповідає типовій технології обкатки.

Отримані розрахунком режими прискореної обкатки дизелів вказують на принципову можливість збереження умов тертя при гарячій обкатці постійними. Застосування припрацювального ПІАФ складу дозволяє організувати припрацювання деталей таким чином, щоб максимальна інтенсивність зношування була в період холодного обкатування з подальшим зниженням інтенсивності зношування при гарячому обкатуванні. Це дає можливість якісно припрацювати деталі і мати їх малий знос. Однак розрахунково-теоретичні положення вимагають експериментальної перевірки. Для цього проведені стендові випробування.

Таблиця 2.3 - Вихідні дані для розрахунку режимів прискореного обкатування дизелів ЯМЗ

Найменування показника	Умовне позначення	Числове значення
Кількість компресійних кілець у циліндрі, шт.	m	3
Хід поршня в циліндрі, м	S	0,200
Діаметр гільзи, м	D	0,150
Висота компресійного кільця, м	b	0,003
Номінальна частота обертання колінчастого валу, хв^{-1}	n_n	1250
Середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості гільз циліндрів, м	R_a^Γ	$0,32 \cdot 10^{-6}$
Середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості поршневих кілець, м	R_a^K	$0,32 \cdot 10^{-6}$
Середня експлуатаційна швидкість зношування гільз циліндрів, мкм/год	v_e^Γ	0,057
Середня експлуатаційна швидкість зношування поршневих кілець, мкм/год	v_e^K	0,120
Твердість матеріалу гільз	$HВ_\Gamma$	$220 \cdot 10^7$
Середня твердість компресійних кілець	$HВ_K$	$240 \cdot 10^7$

2.4. Висновки

1. Теоретично обґрунтовано явища і процеси фрикційної взаємодії пар тертя з урахуванням формування антифрикційних плівок, їх впливу на тертя і зношування.

2. Визначено властивості антифрикційних плівок, що забезпечують поліпшення триботехнічних характеристик поверхонь деталей, що труться.

3. Описано властивості та механізм дії нанорозмірних частинок серпентину та магнетиту – основних мінералів, що входять до складу ПДФ.

4. Запропоновано методику розрахунку тривалості обкатки, необхідної частоти обертання і кількості ступенів. На підставі розрахункових даних розроблено технологічний процес прискореної обкатки дизелів ЯМЗ, з застосуванням припрацювального масла, що містить наночастинки мінералів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для отримання достовірних результатів досліджень використано комплексний метод оцінки якості припрацювання деталей дизеля, що включає: лабораторні, стендові та експлуатаційні випробування.

3.1. Обґрунтування критеріїв оцінки якості припрацювання деталей дизелів

Якість припрацювання деталей дизеля визначають за комплексом показників, що відображають характер тертя, зношування та стабілізацію роботи основних трибоспряжень.

Одним із ключових параметрів є витрата потужності на тертя та час її стабілізації. Зменшення цих показників свідчить про завершення припрацювання та перехід до періоду сталого, втомленого зношування. Разом із цим стабілізуються температура деталей та мастила, що також вказує на встановлення нормального режиму тертя.

Важливим критерієм є зношування поверхонь, яке в період припрацювання характеризується прискореною втратою маси або зміною розмірів деталей. Про завершення припрацювання свідчить настання періоду сталого зношування, коли швидкість руйнування поверхні та умови контакту стабілізуються.

Одним із найважливіших показників є шорсткість поверхонь тертя. У результаті припрацювання формується рівноважний мікрорельєф, що залежить від умов тертя, а не від початкової шорсткості. У процесі роботи мікронерівності згладжуються, зменшується інтенсивність зношування і тепловиділення, покращується змочуваність поверхні мастилом. При надмірному вирівнюванні можливі мікрозадирі, після чого встановлюється стабільний мікрорельєф.

Стан поверхонь також оцінюють за площею припрацювання та результатами візуального огляду, що дозволяє визначити наявність рисок, задирів і дефектів. Профілографування поверхні доцільно поєднувати з безпосереднім оглядом.

Температура поверхонь тертя є одним з основних показників: її стабілізація означає завершення активних фізико-хімічних змін у поверхневому шарі.

Момент тертя та коефіцієнт тертя, а також час їх стабілізації є базовими критеріями лабораторних випробувань. У процесі припрацювання вони зменшуються до сталих значень, а введення припрацювальних присадок змінює їх динаміку і швидкість стабілізації, що дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність присадок і мастил.

Фізико-механічний стан поверхні характеризує мікротвердість, яка змінюється внаслідок деформаційного зміцнення та структурних перетворень у тонкому поверхневому шарі. У міру збільшення шляху тертя структура стабілізується, що відповідає завершенню припрацювання.

Стан циліндро-поршневої групи оцінюють за компресією, яку вимірюють до і після обкатки; різниця показує ступінь припрацювання кілець і циліндрів. Стан системи змащування контролюють за тиском оливи, який при нормальному припрацюванні знижується до стабільного значення. Погано припрацьовані деталі викликають надмірне падіння тиску вже на початкових етапах.

Комплексним показником є витрата оливи на випалювання, яка безпосередньо відображає якість припрацювання ЦПГ: менша витрата відповідає кращому стану поверхонь. Також важливими є ефективна потужність дизеля та витрата палива, що характеризують економічність двигуна й якість його обкатки.

3.2. Лабораторні дослідження

3.2.1. Установа для трибологічних випробувань

Для виконання експериментальних досліджень з оцінки впливу наномодифікаторів тертя на трибологічні характеристики дизельних двигунів використовувалася модернізована установка, створена на основі запатентованого пристрою для випробувань матеріалів на стирання рисунок 3.1 [20, 21].

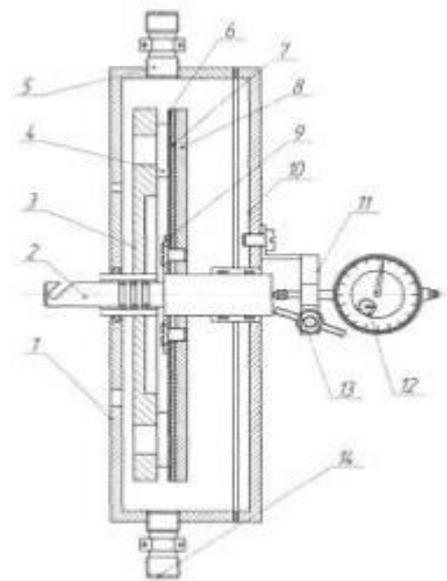


Рисунок 3.1 – Лабораторна установка

Барaban містить 1 - корпус, 2 - навантажувальний вал, 3 - привідний диск, 4 - зразки для випробування, 5 - штуцер для подачі масла, 6 - шліфувальна шкурка, 7 - гумова прокладка, 8 - тримач, 9 - фіксатор шкурки, 10 - кришка барабана, 11 - кронштейн, 12 - індикатор годинникового типу, 13 - фіксатор індикатора, 14 - штуцер для зливу масла з продуктами зносу.

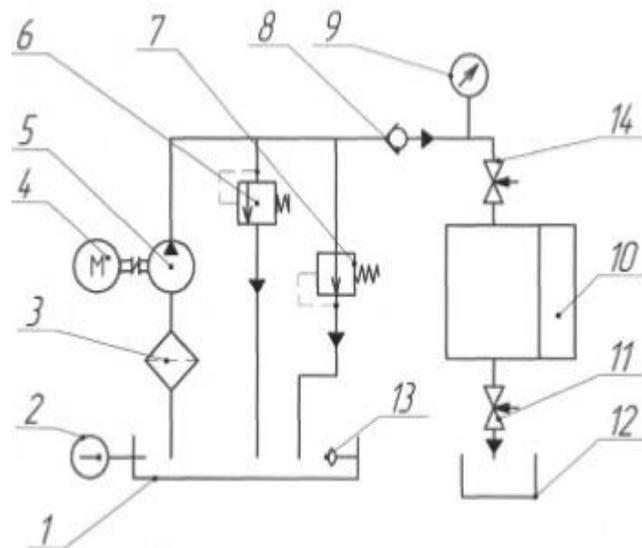


Рисунок 3.2 – Гідравлічна схема лабораторної установки

1 - гідробак, 2 - термометр, 3 - фільтр, 4 - електродвигун, 5 - насос типу НШ, 6 - запобіжний клапан, 7 - перепускний клапан, 8 - запірний клапан, 9 - манометр, 10 - установка, 11 - кран, 12 - ємність для збору та фільтрації рідини, 13 - нагрівальний елемент, 14 - кран.

Базова конструкція установки забезпечує можливість роботи в умовах рідинного тертя із регульованими параметрами температури, тиску та швидкості ковзання, що дає змогу моделювати експлуатаційні режими дизельних двигунів.

У нашій роботі функціональні можливості пристрою були адаптовані для випробувань пар тертя типу сталь–сталь та сталь–чавун, що відповідає конструкційним матеріалам циліндро-поршневої групи і підшипникових вузлів дизеля. Абразивну шліфувальну поверхню, передбачену конструкцією прототипу, замінено на контактні металеві зразки, що забезпечує імітацію реального зношування деталей у мастильному середовищі без штучного абразивного впливу.

Конструкція та елементи установки. Установка складається з герметичної камери (барабана), в яку подається підігріта до заданої температури моторна олива, що може містити або не містити припрацювальні присадки. Через систему гідравлічних патрубків забезпечується подача чистої оливи та відведення оливи з продуктами зношування, що дозволяє контролювати чистоту мастильного середовища та кількість зношених частинок у ньому.

У середині барабана розташований привідний диск, на якому закріплюються досліджувані зразки матеріалів. Контактний тиск створюється за допомогою навантажувального вала, що дозволяє моделювати різні режими навантаження. Лінійний знос фіксується індикатором годинникового типу, закріпленим на кронштейні, що забезпечує високу точність вимірювань при малих переміщеннях (до 0,001 мм).

Нагрівальний елемент, вбудований у маслоємність, забезпечує підтримання стабільної температури, що дозволяє моделювати робочі температури дизельного двигуна (70–120 °С). Швидкість обертання диска встановлюється електроприводом та зберігається сталою протягом випробування, а тиск у системі регулюється запірною та перепускною арматурою.

Принцип роботи установки. Перед початком випробування в барабан заливається моторна олива без присадок, яка підігрівається до заданої температури. Після виходу системи на стаціонарний режим запускається

обертання диска, і пара тертя (сталь–сталь або сталь–чавун) працює у контрольованих умовах мастильного середовища. Індикатором фіксується величина лінійного зношування зразків протягом певного часу та кількості обертів.

Далі установка промивається, після чого в барабан заливається олива з наномодифікатором тертя (наприклад, реметалізатором ХАДО). За аналогічних режимів навантаження та температури повторюється дослід, що дозволяє визначити зміну інтенсивності зношування, моменту тертя та стабільності трибологічної пари під дією присадки.

Після кожного випробування олива знімається через штуцер, а продукти зношування фільтруються для подальшого морфологічного аналізу. Зразки також піддаються повторному зважуванню або мікрометрії для визначення втрати маси та лінійного зносу.

Модернізована конструкція забезпечує низку суттєвих переваг:

- можливість випробування реальних металевих пар тертя, характерних для дизельних двигунів;
- відтворення умов рідинного тертя з регульованим температурним та силовим навантаженням;
- точне вимірювання лінійного та масового зношування;
- можливість порівняльних дослідів з присадкою та без неї;
- збирання продуктів зносу для подальшого мікроструктурного аналізу;
- моделювання припрацювання в умовах, максимально наближених до реальної роботи ЦПГ і підшипників;
- можливість отримання об'єктивних характеристик ефективності реметалізаторів і наномодифікаторів.

Таким чином, установка є ефективним експериментальним засобом для дослідження трибологічних властивостей матеріалів і мастильних композицій та забезпечує можливість комплексної оцінки впливу припрацювальних присадок на інтенсивність зношування, момент тертя та стабільність роботи трибоспряджень.

3.2.2. Визначення коефіцієнта тертя і періоду його стабілізації

Для градуювання установки тертя за тиском, що створюється на зразках, необхідно на установці тертя між парами тертя (диском і роликом) розмістити силовий динамометр, а на рукоятку ручної подачі помістити по черзі кілька вантажів у зростаючій послідовності вагою від 5 Н до 55 Н з інтервалом у 10 Н. Побудувати графік (рис. 3.3) залежності показів силового динамометра (F_d) від величини ваги вантажу (P). При цьому необхідно стежити за тим, щоб рукоятка ручної подачі була строго паралельна горизонтальній площині.

Для градуювання установки тертя за отриманим моментом сили тертя необхідно перевести курсор на Tenso_1 ехе, натиснути Enter, а потім до одного з упорних штифтів установки тертя, що знаходиться на відстані R_0 , через блок градуювання приєднуються вантажі вагою від 5Н до 55Н (F_n) з інтервалом в 10Н. Після появи внизу екрану написів з цифрами: min, Max, M, O, ще раз натиснути Enter, на екрані відображається величина моменту тертя, що спостерігається у вигляді відхилення прямої лінії від початкового положення

$$M = f(R_0 \cdot F_n), \quad (3.1)$$

де M - момент тертя, Нм; R_0 - відстань від центру обертання до упорного штифта, м; F_n - сила навантаження, Н.

За отриманими даними будується градуювальна залежність (рис. 3.3), при цьому вісь X градується в значеннях Н·м, значення амплітуди відхилення по осі Y знімаються вимірювачем (в мм) з екрану монітора.

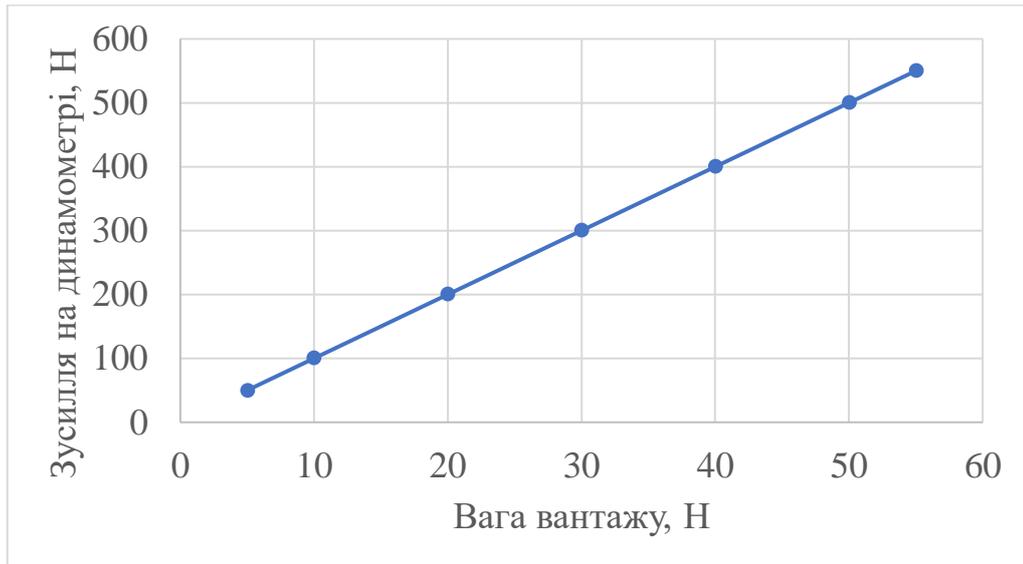


Рисунок 3.3 - Залежність показань силового динамометра (F_d) від величини ваги вантажу (P)

Приклад. Зважити на аналітичних вагах зразки, що складають пари тертя з відомим хімічним складом, наприклад Сталь 10 - Сталь 10.

Закріпити відповідно зразки - пластину і ролик - в установці тертя. У зоні тертя помістити мастило Літол-24 в кількості - 0,5 г - 1,0 г. На важіль регулятора подачі приводу установки тертя встановити навантаження $P_1 = 15\text{П}$.

Привести в зіткнення пару тертя і після 60 хв випробувань підняти важіль регулятора подачі, зняти встановлений вантаж, відключити установку тертя.

Використовуючи програмне забезпечення переключитися на режим обробки сигналу і виведення його на екран монітора. При цьому на екрані відображається тимчасова залежність моменту тертя.

З рисунка 3.4 визначаємо вимірювачем величину F_{d1} для заданого значення P_1 . Виміряти R_1 - середнє значення радіуса контактуючої поверхні ролика.

Визначити a - коефіцієнт переходу від моменту тертя до коефіцієнта тертя за формулою:

$$a = \frac{1}{R_1 \cdot F_{d1}} \quad (3.2)$$

Для отримання залежності зміни коефіцієнта тертя від часу випробувань необхідно значення моменту тертя (відображені на моніторі) помножити на отримане значення коефіцієнта a .

Визначити середнє значення, використовуючи отриману залежність від зміни коефіцієнта тертя, яке повинно дорівнювати коефіцієнту тертя ($K_{тр}$) для даної пари тертя і мастильного середовища.

Порівняти отриманий результат з табличними даними для даної пари тертя і мастильного середовища.

Протягом припрацювання зразків відбувалася зміна моменту тертя. За час припрацювання зразків брали середнє значення часу стабілізації коефіцієнта тертя п'яти зразків.

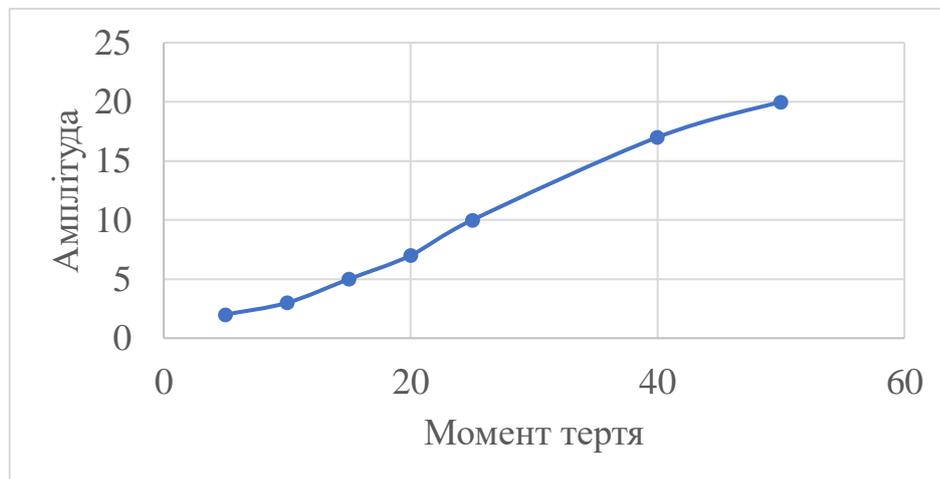


Рисунок 3.4 - Залежність моменту тертя від значення амплітуди відхилення на екрані монітора

3.2.3. Визначення зносу зразків

Перед випробуваннями на знос проводили попереднє зважування роликів на електронних вагах моделі Sartorius 1201, з точністю вимірювань $1 \cdot 10^{-4}$ г, і пластини на лабораторних вагах ВЛЕ 134, з точністю вимірювань $5 \cdot 10^{-3}$ г (рис. 3.5). Після проведення випробувань зразки промивали в розчиннику, висушували протягом 10 хвилин при температурі 353 К і знову зважували. Потім визначали середній знос за п'ятьма дослідженнями. Зважування зразків проводили через кожні 10 хвилин випробувань.



Рисунок 3.5 - Ваги лабораторні ВЛЕ 134 і ваги електронні моделі

3.2.4. Визначення шорсткості та температури поверхонь тертя. Визначення корозійного впливу мастил

Для вимірювання шорсткості поверхонь зразків і деталей дизеля до і після припрацювання використовують профілограф-профілометр мод.201 (рис.3.6).



Рисунок 3.6 - Профілограф-профілометр мод.201

Середньоарифметичне відхилення профілю R_a визначають за показаннями приладу, висоту мікронерівностей R_z з профілограм, записаних на приладі.

На початку визначали вихідну шорсткість поверхонь тертя пластини. Після закінчення припрацювання пластину промивали в розчиннику, висушували і вимірювали шорсткість припрацьованої поверхні.

Відомо, що за однакових умов охолодження температура мастила знаходиться в прямій залежності від температури поверхонь тертя. Тому зміну температури поверхонь тертя оцінювали за температурою мастила за допомогою штучної термопари *хромель-копель*, змонтованої в поліхлорвініловій трубці.

Склад хромелю - 90...91 % (Ni+Co) і 9... 10 % Cr, склад копелю 56 % Cu і 44 % Ni.

Вибір термопари хромель-копель обумовлений тим, що дана термопара розвиває найбільшу термоелектрорушійну силу (ТЕРС) 4,7...6,0 мВ при температурі від 223 К до 873 К, а відносні похибки ТЕРС невеликі (0,87% в межах вимірювання 273...873 К). Термопару підключали до потенціометра КСП-4. Перед проведенням випробування проводять тарування термопари.

Для цього ємність з припрацьовувальним маслом встановлюють на нагрівач, в масло опускають термопару, під'єднану до потенціометра. Температуру розігріваного масла фіксують термометром з межами вимірювання від 273 К до 573 К і одночасно роблять позначки на шкалі потенціометра через кожні 10 К.

Корозійний вплив обраних припрацьовувальних масел з присадками на вкладиші колінчастого вала визначали, використовуючи методику ДСТУ 20502-99. Для цього вирізали пластинки з вкладишів розміром 20x5x2 мм.

Кожну пластинку промивали, висушували і зважували з точністю $1 \cdot 10^{-4}$ г.

У пробірці з навісками припрацьовувальних масел підвішували пластинки таким чином, щоб вони знаходилися в центрі об'єму масла. Випробування проводили при температурі 373 К протягом 50 годин. Після випробування пластинки знову промивали, висушували і зважували.

3.3. Лабораторні дослідження присадок

3.3.1. Розчинність присадок у моторній оливі М-10ДМ

Однією з перших вимог до присадок, рекомендованих як обкатувальні, є їх повна розчинність у базових оливах і стабільність під час зберігання. Для визначення розчинності обраних присадок брали в пробірку пробу масла з рекомендованим виробником відсотковим вмістом присадки. Вміст пробірки перемішували ультразвуковим генератором ІЛ 10-0.63 протягом 5 хвилин. Потім отримана суміш відстоювалася протягом 50 годин при кімнатній температурі. Однорідність сумішей характеризує добавки як розчинні.

Результати випробувань (таблиця 3.1) показали, що додавання в моторне масло присадок АРВК, ХАДО, Римет дає нестабільний розчин в маслі, спостерігалось випадання осаду. При додаванні ПШФ складу в масло отримувалось стабільний колоїдний розчин в маслі. Дане явище пояснюється розміром частинок ПШФ складу (менше 100 нм), здатними перебувати в підвішеному стані завдяки броунівському руху молекул мастильного матеріалу.

Таблиця 3.1 - Розчинність присадок для припрацювання в маслі М-10ДМ

№ п /п	Присадки	Відсотковий вміст у маслі М-10ДМ за масою	Розчинність в маслі М-10ДМ
1	АРВК	2 %	Однорідний розчин, випадання осаду
2	ХАДО	0,2 %	Однорідний розчин, часткове випадання осаду
3	Римет	2 %	Однорідний розчин, випадання осаду
4	ПШФ розчин	0,05 %	Однорідний розчин зеленуватого відтінку

У зв'язку з тим, що вміст води в маслі на обкатувальних станціях досягає 5 % і більше [22], було проведено дослід з визначення стійкості розчинів масла з присадками при додаванні до них води. До складу додавали 50 % водопровідної води і ретельно перемішували. Після перемішування витримували протягом 1 місяця при кімнатній температурі.

В результаті досвіду виявлено, що у всіх складах утворюються стабільні розчини масел з присадками, тобто в пробірках чітко розділені масло і чиста вода, без утворення помутнінь.

3.3.2. Антифрикційні властивості олив з присадками

Зміна коефіцієнта тертя в процесі випробувань дозволяє судити про ступінь припрацювання тертьових поверхонь деталей. Дослідження коефіцієнта тертя проведено на машині тертя МТУ- 01М згідно з методикою випробувань.

В якості досліджуваних припрацювальних масел взяті наступні: М-10ДМ; М-10ДМ +2 % АРВК; М-10ДМ +0,2 % ХАДО; М-10ДМ +2 % Рімет; М-10ДМ + 0,05 % ПІАФ склад.

Концентрації присадок АРВК, ХАДО і Рімет взяті з керівництва по використанню даних препаратів, як рекомендовані виробником. Для вивчення впливу концентрації протизносного антифрикційного складу в маслі на триботехнічні характеристики пари тертя, були проведені попередні випробування, де його концентрацію змінювали від 0,01 до 1 % (рис. 3.7).

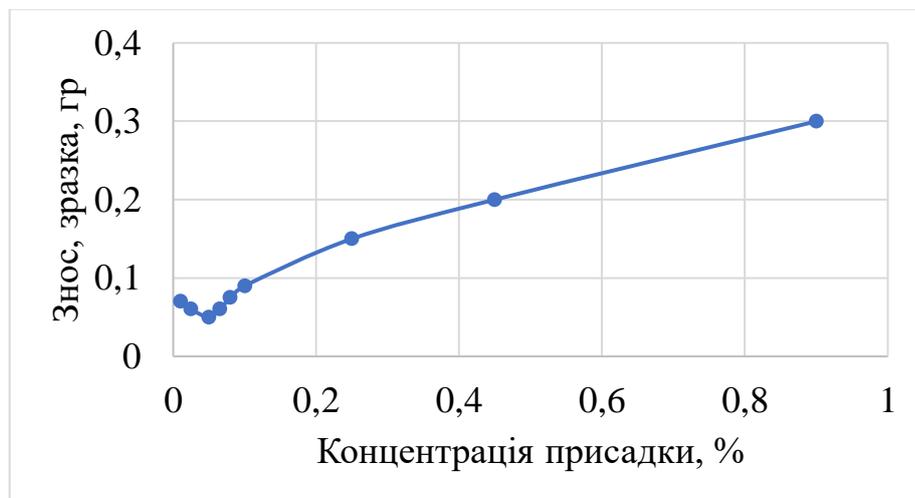


Рисунок 3.7 - Залежність зносу від концентрації ПІАФ складу в маслі М-10ДМ

Дослідження показують, що при концентрації 0,05 % триботехнічні характеристики пари тертя мають найкращі показники, збільшення концентрації більше 0,1 % призводить до зростання величини зносу і при 1% концентрації спостерігається абразивний ефект. У зв'язку з цим у подальших дослідженнях концентрація ПІАФ складу в маслі М-10ДМ дорівнювала 0,05 %.

Дослідження пари тертя поршневе кільце - гільза циліндра проводили при навантаженні $P = 400 \text{ Н}$ і частоті обертання зразків 650 хв^{-1} . Залежності зміни коефіцієнта тертя при використанні досліджуваних зразків масел наведені на рисунку 3.8. З графіків коефіцієнта тертя видно, що характер їх зміни в часі приблизно однаковий, відмінність полягає у величині та часі стабілізації.

На маслі М-10ДМ коефіцієнт тертя за час випробування не змінився і дорівнював 0,15, час стабілізації більше 60 хвилин. Стабілізація коефіцієнта

тертя відбувається в міру формування оптимальної шорсткості пар тертя при даному режимі випробування і збільшенні площі контакту тертьових поверхонь.

Введення присадок до моторної оливи активізує процес формування раціональної мікрогеометрії поверхонь тертя, що, у свою чергу, забезпечує інтенсивніше зниження коефіцієнта тертя та його швидшу стабілізацію. Так, на маслі М-10ДМ з присадкою ХАДО коефіцієнт тертя зменшився з 0,09 до 0,07, час стабілізації 30 хвилин. На маслі М-10ДМ з присадкою АРВК коефіцієнт тертя збільшився з 0,12 до 0,13, час стабілізації 30 хвилин. На маслі М-10ДМ з присадкою Рімет коефіцієнт тертя збільшився з 0,1 до 0,13. Збільшення коефіцієнта тертя можна пояснити збільшенням площі контакту деталей, що труться, та інтенсивним впливом ПАР і хімічно активними металами. Найкращі результати отримано на маслі М-10ДМ з ПІАФ складом. Так коефіцієнт тертя зменшився з 0,06 до 0,05, час стабілізації 20 хвилин, що більш ніж в 3 рази швидше, ніж на маслі М-10ДМ.

Отже, найкращим мастилом для припрацювання пари тертя поршневе кільце-гільза циліндра є мастило М-10ДМ, що містить 0,05% ПІАФ складу, який сприяє пластичній деформації мікронерівностей поверхонь тертя і тим самим прискоренню припрацювання.

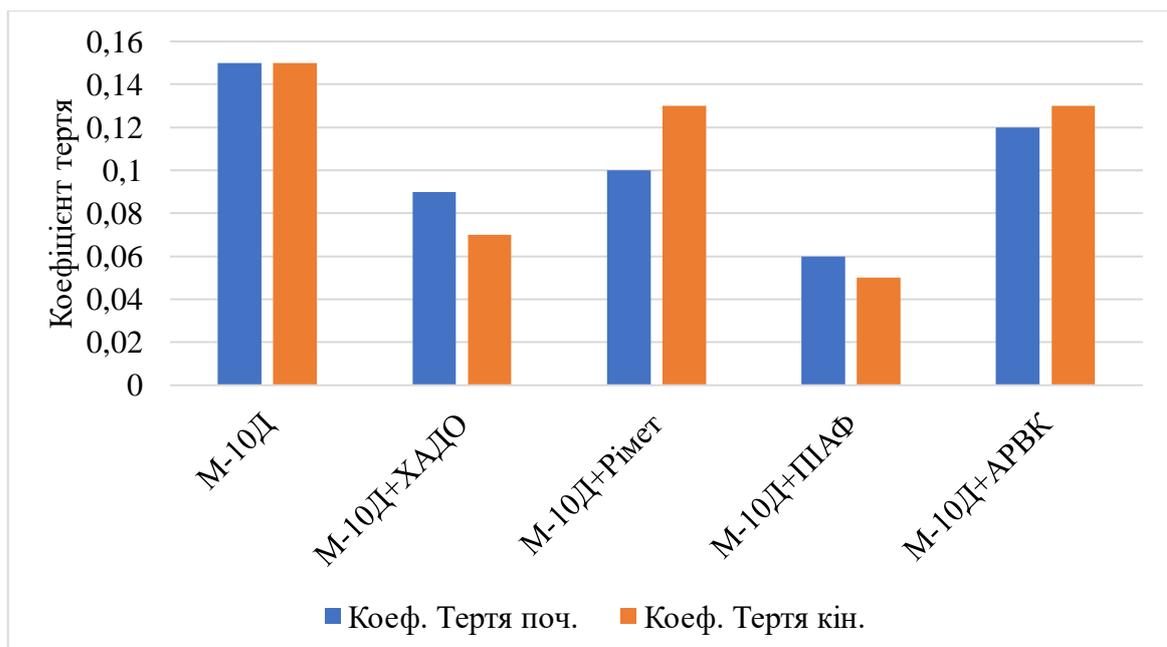


Рисунок 3.8 – Зміна коефіцієнта тертя в часі (зразки ЦПГ: поршневе кільце - гільза циліндра, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)

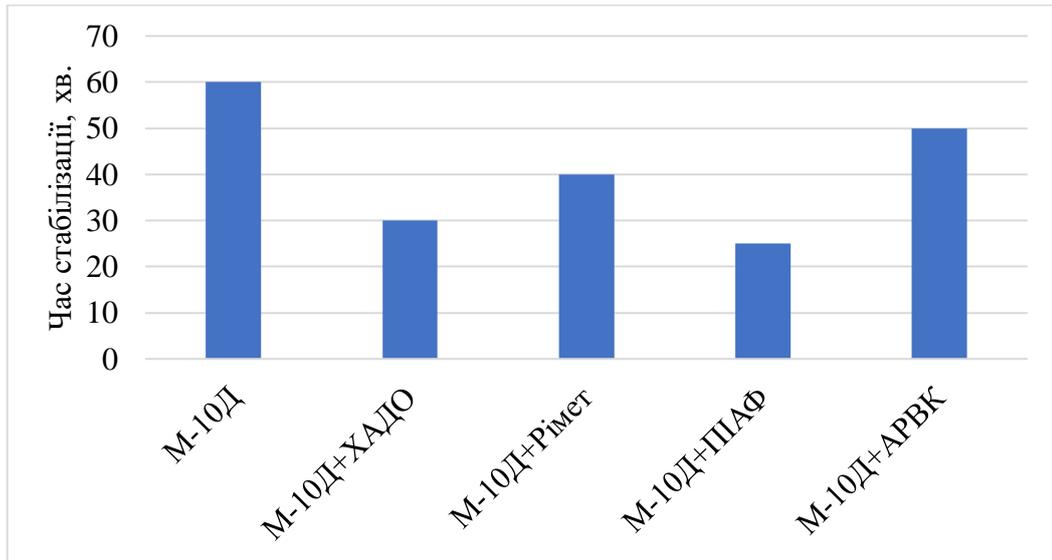


Рисунок 3.9 - Час стабілізації припрацьовувальних мастил (зразки ЦПГ: поршневе кільце - гільза циліндра, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)

Дослідження пари тертя поршневий палець — втулка верхньої головки шатуна проводили при навантаженні 400 Н і частоті обертання 650 хв⁻¹. Залежності зміни коефіцієнта тертя на досліджуваних зразках оливи представлені на рисунку 3.10, 3.11.

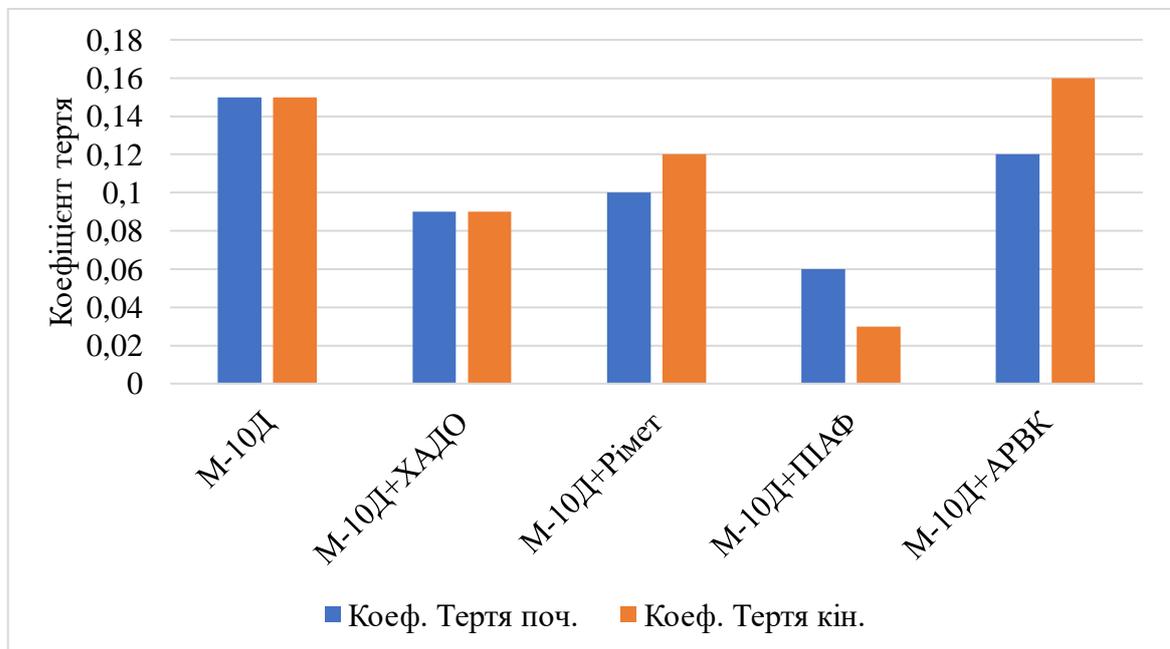


Рисунок 3.10 – Зміна коефіцієнта тертя в часі (зразки: поршневий палець — втулка шатуна, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)

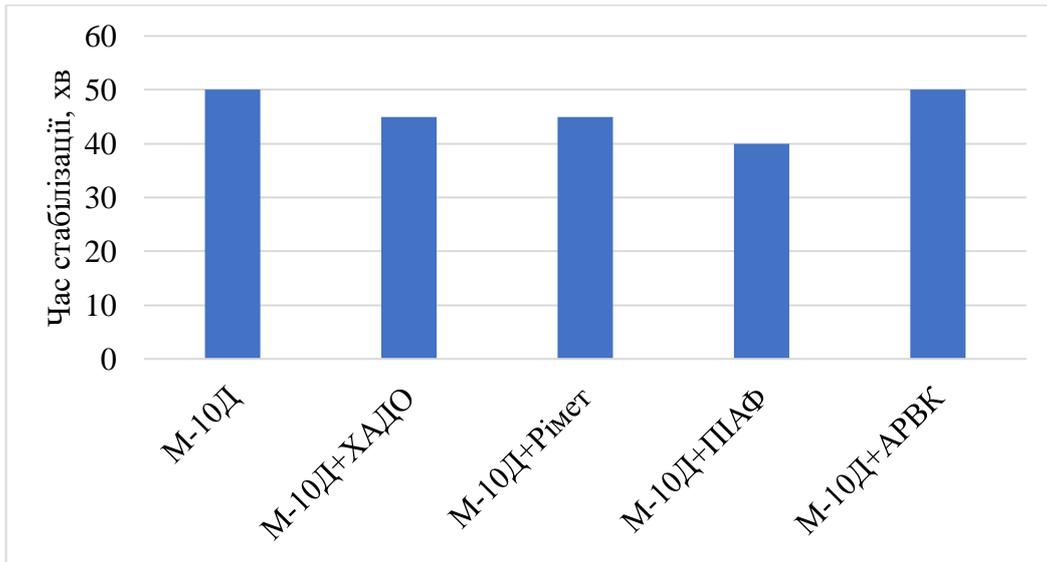


Рисунок 3.11 - Час стабілізації припрацьовувальних мастил (зразки: поршневий палець – втулка шатуна, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)

З діаграм коефіцієнтів тертя видно, що характер їх зміни в часі різний. Найбільш вдалий із застосуванням масла М-10ДМ з ПАФ складом, що свідчить про формування антифрикційної плівки між поверхнями, що труться.

На маслі М-10ДМ коефіцієнт тертя в кінці випробування дорівнював 0,15, час стабілізації більше 50 хвилин.

На маслі М-10ДМ з присадкою АРВК коефіцієнт тертя змінювався від 0,12 до 0,16. Час стабілізації 50 хв. Даний характер кривої пояснюється високим вмістом ХАВ в присадці, що викликає підвищення коефіцієнта тертя під час випробувань.

На маслі М-10ДМ з присадками: Рімет, ХАДО і ПАФ складом характер зміни коефіцієнта тертя приблизно однаковий. Значення коефіцієнтів тертя в кінці випробування мають, відповідно, такі значення: 0,12; 0,09 і 0,03, час стабілізації 45; 45 і 40 хвилин. Отже, найбільш ефективним припрацьовальним маслом для пари тертя поршневий палець-втулка верхньої головки шатуна є масло М-10ДМ з ПАФ складом.

3.3.3. Зносостійкість зразків

Припрацювання поверхонь є складним процесом, фізична сутність якого полягає в переході від нестабільного до стабільного режиму тертя.

У початковий період роботи тертьових поверхонь деталей здійснюється перехід від механічної до механіко-хімічної форми зносу. Ступінь хімічної спорідненості матеріалів, робоче середовище істотно впливають на процеси зносу деталей. Результати випробувань на знос наведені в таблиці 3.2.

З аналізу наведених даних видно, що знос пластини пари тертя поршневе кільце-гільза циліндра, на маслах з присадками, в порівнянні зі зносом на чистому маслі М-10ДМ, за 60 хвилин припрацювання склав:

- на маслі М-10ДМ з присадкою АРВК -61%;
- на маслі М-10ДМ з присадкою ХАДО - 47 %;
- на маслі М-10ДМ з присадкою Рімет - 56 %;
- на маслі М-10ДМ з ПШФ складом - 42 %.

Таблиця 3.2 - Знос зразків ЦПГ і КШМ двигуна за 60 хв випробувань

Припрацювальне масло	Назва пари тертя					
	Поршневе кільце Ст45 – гільза циліндра СЧ24		Поршневий палець Ст45- втулка верхньої головки шатуна БрОЦС5-5-5		Шатунна шийка колінчастого вала Ст45 - вкладиш БрСЗО	
	мг	% від М- 10ДМ	мг	% від М- 10ДМ	мг	% від М- 10ДМ
масло М-10ДМ	3,6	100%	38,6	100%	9,0	100%
масло М-10ДМ + АРВК	2,2	61%	20,1	52%	7,3	81%
масло М-10ДМ + Рімет	2,0	56%	18,5	48%	5,9	66%
масло М-10ДМ + ХАДО	1,7	47%	18,1	47%	5,5	61%
масло М-10ДМ + ПШФ склад	1,5	42%	15,3	40%	4,0	44%

Знос пластини пари тертя поршневий палець-втулка верхньої головки шатуна на маслах з присадками, у порівнянні зі зносом на чистому маслі М-10ДМ, за 60 хвилин припрацювання склав, у %:

- на маслі М-10ДМ з присадкою АРВК - 52 %;
- на маслі М-10ДМ з присадкою ХАДО - 47 %;
- на маслі М-10ДМ з присадкою Рімет - 48 %;
- на маслі М-10ДМ з ПШФ складом - 40 %.

Знос пластини пари тертя шатунна шийка колінчастого вала - вкладиш, на маслах з присадками, у порівнянні зі зносом на чистому маслі М-10ДМ, за 60 хвилин припрацювання склав, у %:

- на маслі М-10ДМ з присадкою АРВК - 81%;
- на маслі М-10ДМ з присадкою ХАДО - 61 %;
- на маслі М-10ДМ з присадкою Рімет - 66 %;
- на маслі М-10ДМ з ПШФ складом - 44 %.

На підставі даних порівняльного аналізу видно, що масло з ПШФ складом знижує припрацювальний знос зразків на 40 - 44 % у порівнянні з маслом М-10ДМ.

На рис. 3.12 показано залежності зносу пластин пари тертя поршневе кільце - гільза циліндра від часу випробувань на різних обкатувальних оливах. Введення в оливу М-10ДМ присадок по-різному впливає на інтенсивність зносу. Стабілізація зносу є одним з показників закінчення припрацювання на даному режимі. Знос на чистому маслі не стабілізується за 60 хвилин випробування і досягає 3,6 мг. Знос на маслі М-10ДМ з присадками: АРВК, ХАДО, Рімет в початковий період дещо вище і через 30-50 хвилин випробувань зменшується і практично стабілізується, що свідчить про завершення припрацювання. Інтенсивність зносу в початковий період пояснюється наявністю в присадках ПАР. Подальше зменшення зносу пояснюється дією складу присадок, що сприяють виділенню на поверхнях тертя сервобітних плівок.

На маслі М-10ДМ з ПШФ складом через 20 хвилин припрацювання знос зменшується і стабілізується. Зменшення зносу пластини при припрацюванні пояснюється дією шаруватих силікатів, що забезпечують не механічний зріз і виривання мікронерівностей, а їх пластичне деформування і згладжування.

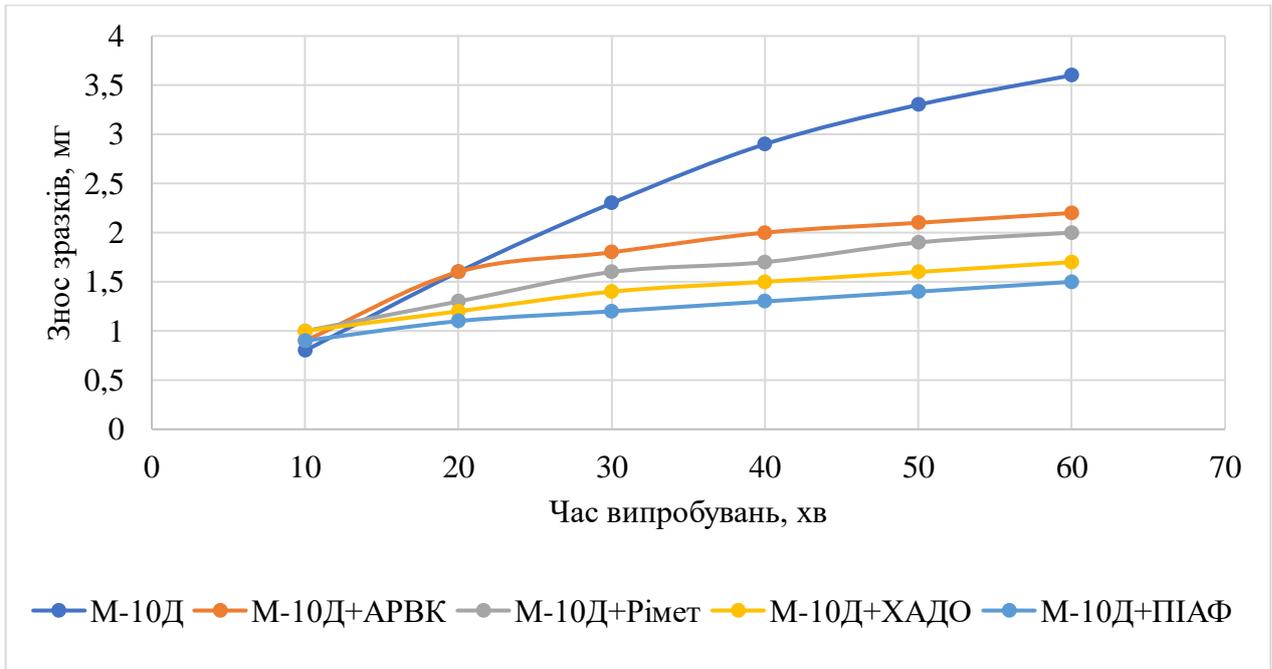


Рисунок 3.12 - Залежність зносу зразків деталей від часу випробувань припрацювальних мастил (зразки ЦПГ: поршневе кільце - гільза циліндра, $P = 400 \text{ Н}$, $n = 650 \text{ хв}^{-1}$)

3.3.4 Зміна шорсткості поверхні зразків

Якість припрацювання оцінюється також інтенсивністю зміни шорсткості поверхні залежно від часу випробування. Формування експлуатаційної шорсткості визначається сукупною дією різноманітних механічних, фізико-хімічних, електрохімічних та інших процесів, що реалізуються в зоні контакту взаємодіючих поверхонь тертя. У зв'язку з цим у даній роботі було досліджено параметри шорсткості поверхонь пари тертя «поршневе кільце – гільза циліндра» за умов змащування випробуваними обкатувальними оливами. Початкова шорсткість поверхонь тертя обох зразків $R_a = 0,63 \text{ мкм}$. У таблиці 3.3 наведено дані зміни шорсткості поверхні тертя пластини з сірого чавуну від часу випробування на різних обкатувальних оливах. На рисунку 3.13 наведено зміни шорсткості поверхонь зразків до і після обкатки.

Таблиця 3.3 - Результати зміни шорсткості чавунної пластини від часу випробувань R_a , мкм

№ з/П	Обкатувальна олива	Час випробувань, хв						
		0	10	20	30	40	50	60
1	М-10ДМ	0,63	0,54	0,47	0,43	0,4	0,37	0,35

2	М-10ДМ + АРВК	0,63	0,51	0,42	0,38	0,34	0,33	0,32
3	М-10ДМ + Римет	0,63	0,48	0,38	0,33	0,3	0,29	0,28
4	М-10ДМ + ХАДО	0,63	0,40	0,3	0,22	0,19	0,18	0,18
5	М-10ДМ + ПИАФ склад	0,63	0,3	0,2	0,16	0,14	0,14	0,14

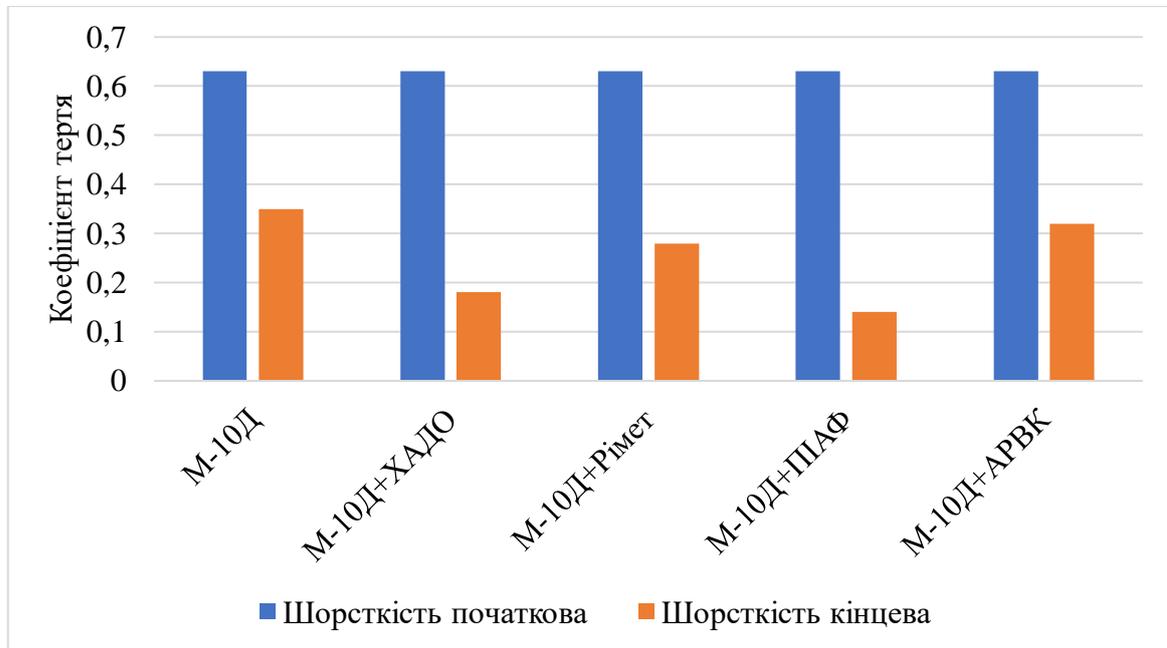


Рисунок 3.13 - Зміни шорсткості поверхонь зразків до і після обкатки

Під час випробувань на моторній оливі М-10ДМ за тривалістю 60 хвилин шорсткість поверхні пластин зменшилася з 0,63 до 0,35 мкм, що відповідає зниженню приблизно на 44 %. При цьому протягом зазначеного часу стабілізації параметра шорсткості не спостерігалось, що зумовлено процесом формування оптимальної мікрогеометрії пари тертя за даного режиму навантаження. Основним механізмом зменшення шорсткості в цьому випадку є механічне зрізання та виривання мікронерівностей поверхні під дією контактних напружень.

У разі використання оливи М-10ДМ з присадками АРВК, ХАДО та Римет зниження шорсткості відбувалося значно інтенсивніше. Наприкінці випробувань значення шорсткості становили відповідно 0,32; 0,18 та 0,28 мкм, що на 9 %, 49 % і 20 % менше порівняно з роботою на базовій оливі М-10ДМ. До завершення випробувань параметри шорсткості поверхонь практично досягали стабільного рівня. Прискорене формування оптимальної шорсткості при застосуванні оливи з

присадками пояснюється наявністю в їх складі поверхнево-активних і хімічно активних компонентів.

Поверхнево-активні речовини сприяють інтенсифікації процесу припрацювання тертьових поверхонь у початковий період експлуатації за рахунок ефекту адсорбційного зниження міцності поверхневих шарів матеріалу. У подальшому, зі збільшенням тривалості припрацювання, швидкість зміни шорсткості зменшується і стає нижчою, ніж у випадку роботи на чистій оливі без присадок.

3.4. Висновок

У третьому розділі було проведено комплексне експериментальне дослідження трибологічних характеристик деталей дизельних двигунів при застосуванні припрацювального масла з нанодобавками серпентину (ШАФ) у порівнянні зі звичайним мастильним матеріалом. Аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати такі узагальнюючі висновки.

1. Встановлено суттєве зниження інтенсивності зношування деталей, що труться, при використанні складів з наночастинками серпентину. Згідно з експериментальними даними, масовий знос зменшується в середньому на 25–45 % залежно від умов навантаження та пари тертя. Це свідчить про ефективність дії ШАФ у режимах граничного мастила.

2. Підтверджено формування захисної триботехнічної плівки на поверхні деталей, яка зменшує кількість прямих металевих контактів, стабілізує процес припрацювання та підвищує несучу здатність робочих поверхонь. Наявність такої плівки забезпечує поступовий перехід від нестабільних режимів тертя до сталого мінімального коефіцієнта тертя.

3. Показано, що наночастинки серпентину активно заповнюють мікродефекти і западини шорсткості, сприяючи швидшому досягненню рівноважного стану поверхневого шару. Це скорочує тривалість припрацювання та зменшує ймовірність утворення задирів у початковий період роботи дизеля.

4. Характер зміни коефіцієнта тертя у дослідах свідчить про стабілізацію процесу припрацювання при використанні ПІАФ: спостерігається менша амплітуда коливань тертя, зниження пікових навантажень та відсутність критичних температурних сплесків у зоні контакту.

5. Порівняльні дослідження різних металевих пар (сталь–сталь, сталь–чавун) підтвердили універсальність дії наноскладу: у всіх випадках припрацювання було інтенсивнішим і завершувалося раніше, ніж при використанні базового масла без присадок.

6. Результати дослідів узгоджуються з теоретичними положеннями, викладеними у попередньому розділі: наночастинки серпентину діють як центри утворення захисних плівок, мають високу твердість і активну поверхню, що підвищує їх ефективність у трибосистемах дизельних двигунів.

Отже, проведені експерименти підтверджують, що застосування припрацювального масла з наночастинками серпентину є ефективним засобом підвищення якості припрацювання деталей дизеля, зниження інтенсивності їхнього зношування та стабілізації процесів тертя. Отримані результати є достатніми для подальшого використання ПІАФ у стендових і ресурсних випробуваннях двигуна, а також слугують основою для техніко-економічної оцінки ефективності впровадження даної технології на ремонтних підприємствах.

РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ З МАСЛАМИ ТА АНТИФРИКЦІЙНИМИ ПРИСАДКАМИ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

4.1. Загальні відомості про охорону праці при роботі з маслами та присадками

Безпечні умови праці під час виконання робіт із моторними та трансмісійними маслами, а також спеціальними присадками до них, регламентуються чинними нормативними документами: Закон України Про охорону праці, НПАОП 0.00-1.28-10, ДСП 201-97, ДСТУ EN ISO 12100:2016, ДСТУ 3273-95, ПУЕ, Правила пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014). Роботи з мастильними матеріалами належать до процесів підвищеної небезпеки через можливість впливу хімічних речовин, газів, аерозолів, парів, високих температур, статичної електрики та ризиків займання.

Усі працівники, які виконують роботи із застосуванням масел та присадок, повинні пройти первинний інструктаж, перевірку знань правил охорони праці та навчання з безпечних прийомів роботи. До виконання операцій допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд і не мають протипоказань щодо роботи з хімічними речовинами.

Робоче місце має відповідати вимогам ергономіки та безпеки: наявність ефективної припливно-витяжної вентиляції, нормованого освітлення (не менше 300 лк), рівня шуму до 80 дБ, температури повітря у виробничому приміщенні в межах 18–24 °С та відносної вологості 40–60 % [23, 24].

Масла та присадки повинні зберігатися у щільно закритій тарі з обов'язковим маркуванням, у спеціалізованих складських приміщеннях з температурою не вище 25 °С і відсутністю джерел займання. Забороняється використання несправної тари або ємностей із пошкодженою герметичністю.

Перед початком роботи працівник повинен одягнути засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): захисні рукавиці з хімічностійкого матеріалу, окуляри або лицьовий щиток, фільтрувальний респіратор типу РПГ-67 для роботи з аерозолями та парами присадок, спецодяг із бавовняної тканини,

спеціальне взуття з нековзною підошвою. У разі роботи з нагрітими маслами додатково застосовуються термостійкі рукавиці.

Особливу увагу слід приділяти запобіганню електростатичних розрядів, які можуть виникати під час переливання або перекачування масел. Ємності повинні бути заземлені, а для перекачування використовуються антистатичні шланги з електропровідними вставками.

4.2. Шкідливі та небезпечні фактори при використанні антифрикційних присадок до масел

При роботі з антифрикційними присадками, що містять органічні та неорганічні компоненти (дисульфід молібдену, графіт, фулерени, борні та хлорорганічні сполуки, модифікатори тертя, протизадирні речовини), на працівника діє комплекс небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Основні небезпечні фактори:

Хімічна небезпека.

Пари масел, аерозолі присадок, оксидні сполуки та розчинені продукти термоокиснення можуть подразнювати слизові оболонки, дихальні шляхи та шкіру. Перевищення ГДК спричиняє головний біль, алергічні реакції, запаморочення, порушення функцій дихальної системи.

Висока температура масел.

Під час обробки масла нагріваються до 60–90 °С, що створює ризик термічних опіків при потраплянні крапель на шкіру або під час контакту з нагрітими поверхнями обладнання.

Пожежонебезпека.

Масла належать до горючих рідин з температурою спалаху 160–220 °С. У поєднанні з присадками, які можуть бути хімічно активними, ризик займання підвищується.

Електростатична небезпека.

Унаслідок перекачування та перемішування масел утворюються електростатичні заряди, що можуть викликати іскроутворення та займання.

Надмірний шум і вібрація.

Насосне обладнання, мішалки, ультразвукові пристрої створюють шум до 85–90 дБ та локальну вібрацію, що негативно впливає на опорно-руховий апарат і нервову систему.

Небезпека роботи з електрообладнанням.

Обладнання працює під напругою 220 або 380 В, що створює ризик ураження електричним струмом при пошкодженій ізоляції, неправильному заземленні або наявності вологи.

Недостатнє освітлення та вентиляція.

Недоліки мікроклімату спричиняють помилки працівників, зростання ризику уражень, перевищення ГДК шкідливих речовин.

В таблиці 4.1. наведені небезпечні та шкідливі фактори при роботі з маслами та присадками.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі фактори при роботі з маслами та присадками

№	Фактор	Джерело появи	Потенційні наслідки	Заходи захисту
1	Хімічні пари та аерозолі	Нагрівання, змішування, переливання	Отруєння, алергії, подразнення	Вентиляція, респіратори, ЗІЗ
2	Висока температура	Нагрівальні установки	Опіки, перегрів	Термостійкі рукавиці, контроль температури
3	Електростатика	Перекачування масел	Іскри, займання	Заземлення, антистатичні шланги
4	Електричний струм	Несправне обладнання	Ураження струмом	ПУЕ, ПЗВ, інструктаж
5	Пожежна небезпека	Наявність горючих рідин	Пожежа, вибух	Вогнегасники, заборона відкритого вогню
6	Вібрація та шум	Насосне обладнання	Втома, порушення слуху	Беруші, технічне обслуговування
7	Поганий мікроклімат	Недостатня вентиляція	Перевищення ГДК, гіпоксія	Примусова витяжка, контроль повітря

4.3. Заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів при роботі з маслами та присадками

Комплекс заходів безпеки має включати технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні рішення. Їх дотримання мінімізує ризик виникнення нещасних випадків, отруєнь та аварій.

1. Технічні заходи безпеки:

- обладнання повинно мати заземлення, справну ізоляцію, захисні автомати та пристрої захисного вимикання (ПЗВ).
- ємності для масел — металеві, заземлені, із кришками, що щільно закриваються.
- обов'язкове встановлення місцевої витяжної вентиляції над зонами нагріву або змішування.

Для перекачування використовуються антистатичні шланги. Для запобігання перегріву, необхідно встановити термодатчики та автоматичне відключення.

Всі рухомі механізми мають бути оснащені захисними кожухами.

2. Організаційні заходи:

- обов'язкове проходження інструктажів з охорони праці та протипожежної безпеки.
 - забезпечення працівників атестованими засобами індивідуального захисту.
 - заборона роботи з присадками у закритих непровітрюваних приміщеннях.
- Забезпечення наявності аптечки та засобів нейтралізації розливів (пісок, абсорбенти).

Проведення утилізації відпрацьованих масел відповідно до вимог екологічних стандартів.

3. Пожежна безпека:

- обладнання ділянки повинно бути оснащене вогнегасниками ВП-5 або ВП-9, ящиками з піском та покривалами для гасіння.

Слідкувати за використанням відкритого полум'я, курінням, проведенням зварювальних робіт поблизу місць зберігання масел.

Евакуаційні виходи мають бути позначені світловими покажчиками.

4. Санітарно-гігієнічні заходи: оснастити персонал захисними рукавицями, окулярами, респіраторами, спецодягом.

В робочих приміщеннях забезпечити обов'язкову наявність рукомийників, душових кабін та шаф для спецодягу.

Крім того, для працівників, які мають контакт із хімічними речовинами, проводити медичні огляди.

4.4. Висновок

Проведений аналіз небезпечних та шкідливих факторів свідчить, що роботи з мастильними матеріалами та антифрикційними присадками належать до технологічних процесів підвищеної небезпеки. Хімічні, термічні, електричні та пожежонебезпечні фактори вимагають комплексного підходу до організації безпечного виробничого середовища. Запровадження системи технічних, організаційних і санітарно-гігієнічних заходів дозволяє мінімізувати ризики для працівників, підвищити рівень безпеки та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Дотримання вимог охорони праці сприяє не лише захисту здоров'я персоналу, але й підвищенню якості проведених робіт, довговічності обладнання та загальній ефективності виробничої діяльності підприємства.

**РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ПОРІВНЯЛЬНОГО ЕКОНОМІЧНОГО
ЕФЕКТУ ВІД ПРОЦЕСУ ПРИСКОРЕНОГО ОБКАТУВАННЯ ДИЗЕЛІВ
ЯМЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПІАФ СКЛАДУ**

Розрахунок економічного ефекту наведено на прикладі впровадження технічного процесу прискореного обкатування дизелів ЯМЗ.

Прийmemo такі дані для обкатування дизелів ЯМЗ (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Найменування показників	Умовні позначення	Величина показника	
		Базовий варіант	Новий варіант
Кількість дизелів, що обкатуються за рік, шт/рік	N	20	20
Тривалість обкатування одного дизеля, год	$t_0, t_1,$	8	6
Годинна витрата палива під час обкатки, л/год	q_p	10	10
Ціна палива, грн/1 л	C_p	55,0	55,0
Погодинна тарифна ставка оператора стенду, грн/год	$C_{зп}$	150,0	150,0
Витрата присадки ПІАФ на один двигун (за вартістю), грн/дизель	$C_{ПІАФ,1}$	300,0	300,0
Додаткові капітальні вкладення у модернізацію стенду та організацію застосування ПІАФ (дозуючий пристрій, модернізація системи подачі масла, навчання персоналу тощо), грн	K_d		150000

Тоді річні витрати на присадку [25]:

$$C_{ПІАФ} = N \cdot C_{ПІАФ,1} \quad (5.1)$$

За рахунок зменшення кількості позапланових ремонтів дизелів після обкатки отримаємо додатковий ефект від підвищення надійності ресурсу (менше відмов, менше ранніх ремонтів) – умовно приймаємо економію $E_{надійн} = 20000$ грн/рік.

Проведемо розрахунок витрат на паливо при обкатуванні за формулами для базового варіанту та варіанту із прискореною обкаткою та ПШАФ відповідно:

$$C_{п0} = N \cdot t_0 \cdot q_{п} \cdot C_{п} \quad (5.2)$$

$$C_{п1} = N \cdot t_1 \cdot q_{п} \cdot C_{п} \quad (5.3)$$

Отже,

$$C_{п0} = 20 \cdot 8 \cdot 10 \cdot 55 = 88000 \text{ грн/рік}$$

$$C_{п1} = 20 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 55 = 66000 \text{ грн/рік.}$$

Виходячи з отриманих розрахунків, економія палива складе

$$\Delta C_{п} = C_{п0} - C_{п1} = 88000 - 66000 = 22000 \text{ грн/рік.}$$

Для розрахунку витрат на оплату праці оператора при обкатці використаємо формулу

$$C_{зп} = N \cdot t \cdot C_{зп} \quad (5.4)$$

$$C_{зп0} = 20 \cdot 8 \cdot 150 = 24000 \text{ грн/рік,}$$

$$C_{зп1} = 20 \cdot 6 \cdot 150 = 18000 \text{ грн/рік.}$$

Економія на оплаті праці за рахунок змін складе

$$\Delta C_{зп} = C_{зп0} - C_{зп1} = 24000 - 18000 = 6000 \text{ грн/рік.}$$

Розрахуємо річні витрати на присадку ПШАФ

$$C_{\text{ПАФ}} = N \cdot C_{\text{ПАФ},1} = 20 \cdot 300 = 6000 \text{ грн/рік.}$$

Необхідно провести порівняння прямих експлуатаційних витрат на обкатку. Для цього розрахуємо загальні витрати на обкатку (без урахування інших факторів).

У базовому варіанті (паливо + зарплата) витрати складуть:

$$C_0 = C_{\text{п0}} + C_{\text{зп0}} = 88000 + 24000 = 112000 \text{ грн/рік.}$$

У варіанті з ПАФ (паливо + зарплата + присадка) витрати складуть:

$$C_1 = C_{\text{п1}} + C_{\text{зп1}} + C_{\text{ПАФ}} = 66000 + 18000 + 6000 = 90000 \text{ грн/рік.}$$

Тобто пряма річна економія від зміни технології обкатування

$$\Delta C_{\text{експл}} = C_0 - C_1 = 112000 - 90000 = 22000 \text{ грн/рік.}$$

Отже, лише за рахунок паливо-енергетичних витрат та оплати праці вже маємо економію 22 000 грн/рік.

Можливо отримати додатковий економічний ефект від підвищення надійності дизелів.

При застосуванні ПАФ припускаємо, що зменшується кількість ранніх відмов / позапланових ремонтів дизелів, а також знижується інтенсивність зносу деталей ЦПГ, вкладишів, шийок колінчастого вала в період припрацювання.

Якщо припустити (умовно), що завдяки кращому припрацюванню кількість позапланових ремонтів за рік зменшилась, то річна економія на ремонтах і простоях техніки становить:

$$E_{\text{надійн}} = 20000 \text{ грн/рік,}$$

це може відповідати, наприклад, зменшенню 2 позапланових ремонтів по 10 000 грн кожен.

Щоб підрахувати загальний річний економічний ефект, необхідно підсумувати економію:

1. Економія на експлуатаційних витратах під час обкатки

$$\Delta C_{\text{експл}} = 22000 \text{ грн/рік};$$

2. Додатковий ефект за рахунок підвищення надійності:

$$E_{\text{надійн}} = 20000 \text{ грн/рік.}$$

Тоді загальний річний економічний ефект буде становити

$$E_{\text{річн}} = \Delta C_{\text{експл}} + E_{\text{надійн}} \quad (5.5)$$

$$E_{\text{річн}} = 22000 + 20000 = 42000 \text{ грн/рік.}$$

Розрахуємо термін окупності додаткових капітальних вкладень

$$T = \frac{K_{\text{д}}}{E_{\text{річн}}} \quad (5.6)$$

$$T = \frac{150000}{42000} = 3,6 \text{ роки.}$$

Висновок. Проведений розрахунок порівняльного економічного ефекту від упровадження технології прискореного обкатування дизелів ЯМЗ із застосуванням ПДФ-складу показав, що зміна технології дозволяє знизити річні експлуатаційні витрати на обкатку двигунів на 22 тис. грн за рахунок скорочення тривалості обкатування, зменшення витрат палива та оплати праці. Додатковий

економічний ефект у розмірі 20 тис. грн/рік досягається за рахунок підвищення надійності дизелів і зменшення кількості позапланових ремонтів у період експлуатації. Сумарний річний економічний ефект становить близько 42 тис. грн. За умов додаткових капітальних вкладень у модернізацію обкаточного стенду та організацію застосування ПШАФ на рівні 150 тис. грн розрахунковий термін окупності становить близько 3,6 року, що свідчить про економічну доцільність упровадження досліджуваної технології. Таким чином, застосування ПШАФ при прискореному обкатуванні дизелів ЯМЗ є ефективним заходом, який забезпечує як технічні, так і економічні переваги.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що із загальної кількості відмов машин на частку дизеля припадає 34-45 %. Ресурс дизеля визначається технічним станом з'єднань поршневе кільце - гільза циліндра і шийка колінчастого вала - вкладиш. Перспективним напрямком щодо збільшення ресурсу цих з'єднань, а отже і дизеля в цілому, є підвищення якості та інтенсифікація процесу їх припрацювання.

2. Теоретично обґрунтовано використання наночастинок серпентину для підвищення якості припрацювання деталей і поліпшення триботехнічних властивостей поверхонь тертя деталей, за рахунок комплексної дії твердих і шаруватих речовин ПШАФ складу. Вивчено механізм дії припрацювального складу в період припрацювання деталей. Пояснено поверхневі явища при утворенні припрацювальних антифрикційних плівок.

3. Встановлено, що коефіцієнт тертя на різних парах тертя, отриманий на припрацювальному маслі М-10ДМ з ПШАФ складом, дорівнює 0,03-0,05. Масло М-10ДМ з ПШАФ складом знижує припрацювальний знос зразків на 40-44 % у порівнянні з маслом М-10ДМ. Шорсткість стабілізувалася через 30 хвилин випробувань на величині $R_a = 0,14$ мкм, що на 60 % менше, ніж на маслі М-10ДМ.

4. Стендові випробування показали, що за рахунок підвищення якості припрацювання при стендовому обкатуванні знос деталей ЦПГ і КШМ зменшився до 59 %. Сумарний знос деталей зменшився до 56 %. Шорсткість гільз циліндрів за час обкатки і 40 годинних випробувань знизилася на 17 і 21 % відповідно. Ефективна потужність підвищилася на 5,3 %, а питома витрата палива зменшилася на 6,4 %, порівняно з дизелями, обкатаними на маслі М-10ДМ.

5. Розроблено технологічний процес прискореного обкатування дизелів на припрацювальному маслі, що містить наночастинки серпентину, магнетиту та інших мінералів (ПШАФ склад), що скорочує час стендової обкатки дизелів ЯМЗ

в 1,83 рази в порівнянні з типовою обкаткою на маслі М-10ДМ, час експлуатаційної обкатки може бути зменшений з 50 до 15 год, тобто в 3,3 рази.

6. Експлуатаційні випробування показали, що ресурс відремонтованих і обкатаних за прискореною технологією дизелів становить 1820 мотогодин, що на 10 % вище ресурсу дизелів, обкатаних за типовою технологією.

7. Загальний річний економічний результат становить орієнтовно 42 тис. грн. За умови здійснення капітальних вкладень у модернізацію обкаточного стенду та впровадження ПШФ у розмірі 150 тис. грн, розрахунковий строк їх окупності дорівнює близько 3,6 року, що підтверджує економічну доцільність впровадження нової технології. Отже, використання ПШФ під час прискореного обкатування дизелів ЯМЗ є доцільним заходом, який забезпечує суттєві технічні та економічні вигоди.

ЛІТЕРАТУРА

1. Черній О. Дослідження безвідказності тракторів John Deere серії 8R в експлуатаційних умовах України. Теоретичні та практичні питання аграрної науки : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2022. С. 117–120.
2. Черній О. Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. The 7 th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science”(March 2-4, 2022) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2022. С. 13–19.
3. Хлудеєв Б.С. Шляхи оптимізації роботи дилерсько-сервісних центрів техніки John Deere / Б.С. Хлудеєв, Є.В. Калганков // Інтеграція світових наукових процесів як основа суспільного прогресу: Матеріали Міжнародної науково - практичної конференції ГО "Інститут інноваційної освіти" Науково - навчальний центр прикладної інформатики НАН України. – 2019. – С. 180–185.
4. Мельянцов П. Т. Організація використання техніки за умов дефіциту матеріально - технічних ресурсів / П. Т. Мельянцов, Є. В. Калганков. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyk Sp. z o.o. «Diamond trading tou. – 2010. – С. 84–87.
5. 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.
6. Gritsenko A., et al. (2019). Gritsenko, A., Shalapko, J., Rogovskii, I., Hladkyi, O., Maruschak, P., Karpets, M., & Popov, S. (2019). *Parameters of internal combustion engine efficiency while using various nanoadditives*. Tribology in Industry, 41(4), 592–603.
7. Guangxi Dingbo Generator Set Manufacturing Co., Ltd. (2023). Guangxi Dingbo Generator Set Manufacturing Co., Ltd. (2023, August 19). *The function and precautions of running in of internal combustion engine*. Retrieved from <https://www.dbdieselgenerator.com>

8. Heavy Duty Pros. (n.d.). Heavy Duty Pros. (n.d.). *Diesel engine break-in tips & tricks*. Retrieved from <https://www.heavydutypros.com>7.
9. Дирда, В., Кобець, А., Лисиця, М., Заболотна, О., Твердохліб, Т., Калганков, Є. та Черній, О., (2021). Наноматеріали в механіці деформівного твердого тіла на прикладі гумових футеровок барабанних кульових млинів. *Geo-Technical Mechanics*. (157), 131–139.
10. Солодовник, О. та Калганков, Є., (2018). Підвищення довговічності підшипників кочення введенням в змазку наноматеріалів, що поліпшують умови тертя. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції*. 230–235.
11. Калганков, Є., (2022). Поліпшення фізико-механічних властивостей гуми шляхом її модифікації фулереном C₆₀. У: *Теоретичні та практичні питання аграрної науки, 18 травня 2022, Дніпро, Україна*. Дніпро: ДДАЕУ. с. 95–97.
12. Yao, H., Liu, Y., Zhang, Y., & Wang, J. (2024). *Effect of nano-graphene lubricating oil on particulate matter of a diesel engine*. *Scientific Reports*, 14, Article 61694. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61694-z>
13. Koshy, C. P., Nair, P. B., & Rajendrakumar, P. K. (2022). *Role of nano-sized materials as lubricant additives in internal combustion engines: A review*. *Wear*, 488–489, 204186. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204186>
14. Han, X., Li, Y., Zhang, Q., & Zhao, J. (2024). *Additives for lubricating oil and grease: Mechanism, types and applications*. *Lubricants*, 12(7), 243. <https://doi.org/10.3390/lubricants12070243>
15. Sequera, R., & Spikes, H. (n.d.). *The chemistry and function of lubricant additives*. Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE). https://www.stle.org/images/pdf/STLE_ORG/BOK/LS/Additives/The%20Chemistry%20and%20Function%20of%20Lubricant%20Additives.pdf
16. Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford University Press
17. Persson, B. N. J. (1993). *Theory of friction and boundary lubrication*. *Physical Review B*, 48, 18140–18153.

18 Калганков Є., Науменко М. Синергетична модель взаємодії поверхонь тіл за умови фрикційного контакту з'єднання "Пята плунжера-похила шайба" об'ємного гідропривода трансмісії мобільних машин. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 108. С. 164–173.

19. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.

20. 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.

21. Пат. 100401 Україна, МПК (2006.01) G01N 3/46. Спосіб визначення енергії руйнування гумових футерівок / Дирда В. І., Калганков Є. В, Черній О. А., Цаніді І. (Україна); № u 2015 00639; заявл. 27.01.2015; опубл. 27.07.15, Бюл. № 14. - 4 с

22. Мелещенко В.В. (2025). Вплив мастильних присадок на тертя, знос і ефективність роботи двигунів внутрішнього згорання. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 року), ДДАЕУ, Дніпро, с. 58-60.

23. Агальцов, Г. М., Лисиця, М. І., Новікова, А. В., & Калганков, Є. В. (2024). Оцінка та управління ризиками, пов'язаними з виробничим шумом та вібраціями на виробництві. У *«ПОТУРАЇВСЬКІ ЧИТАННЯ»: матеріали XXI Всеукр. наук.-техн. конф., присвяч. 102- річниці з дня народження акад. НАН України В.М. Потураєва* (с. 61-62). НТУ Дніпровська політехніка. <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10825>

24. Годяєв С. Г. Методичні вказівки до написання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентів інженерно-технологічного факультету, Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2016. – 21 с.

25. Економіка ремонтного підприємства: підручник. / [Аветісян В.К., Бантковський В.А., Луценко А.П. та інші] – Харків, ХНТУСГ, 2005 – 374 с.

ДОДАТКИ

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

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНИХ
ДВИГУНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОМОДИФІКАТОРІВ ТЕРТЯ**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24
Мелешенко Владислав Володимирович

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

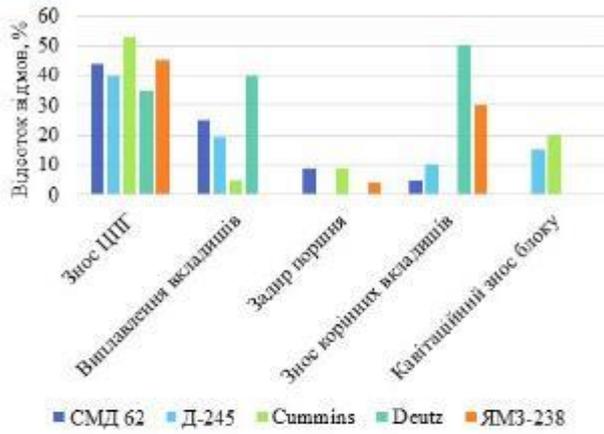
Дніпро-2025

МЕТА РОБОТИ

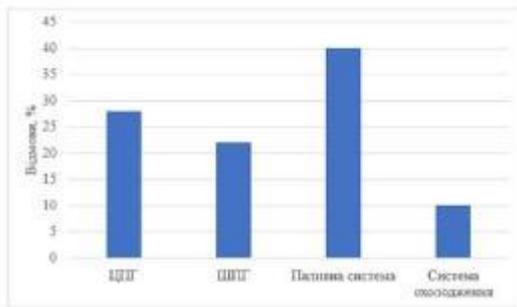
Підвищення трибологічних характеристик та довговічності дизельного двигуна шляхом застосування припрацювальних наномодифікаторів тертя (реметалізаторів) і визначення їх впливу на інтенсивність зношування, умови формування захисних поверхневих структур та роботу основних вузлів ЦПГ і підшипникових опор.

ЗАДАЧІ РОБОТИ

1. Проаналізувати трибологічні процеси та визначити основні механізми зношування вузлів дизельного двигуна, що мають ключовий вплив на його ресурс та надійність.
2. Дослідити склад, властивості та механізми дії припрацювальних присадок, зокрема реметалізаторів, та визначити їх потенційну ефективність у зменшенні інтенсивності зношування.
3. Визначити оптимальні умови використання наномодифікаторів тертя в дизельному двигуні та оцінити їх вплив на параметри припрацювання, зміну мікрогеометрії та формування захисних триботехнічних шарів.
4. Провести експериментальні дослідження впливу реметалізаторів на трибологічні характеристики ЦПГ і підшипникових вузлів, визначивши коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування та стабільність мастильної плівки.
5. Оцінити ефективність застосування реметалізаторів на основі розрахункових та експериментальних даних і сформулювати рекомендації щодо їх використання з метою підвищення ресурсу дизельних двигунів.



Ресурсні відмови відремонтованих дизелів



Частка відмов окремих систем





Інтенсивності зносу I_h для періоду припрацювання:

$$I_h = \frac{2,5v^{1/2}Ra^{2/3}}{\pi\lambda(1+v)S_m \cdot t_m^{3/2}} \left(\frac{P}{k' \cdot \sigma_T} \right)^{7/6} \times \sqrt[3]{15\pi(2\pi W_z H_{\max})^{1/3}} \left[1 + \frac{2\pi k' \cdot \sigma_T(1-\mu_{\Gamma}^2)}{E} \right]$$

де k' - ступінь наклепу; v - параметр опорної кривої шорсткостей; Ra - середнє арифметичне відхилення профілю шорсткостей, мкм; S_m - середній шаг мікронерівностей профілю шорсткостей, мкм; t_m - відносна довжина опорної лінії, м; P - навантаження, Н; σ_T - напруження текучесті, МПа; W_z - середня висота хвилястості, мкм; H_{\max} - максимальна величина макровідхилень, мкм; μ_{Γ} - коефіцієнт Пуассона; E - модуль пружності.

Параметр оцінки рівноважного стану поверхневого шару контактуючих деталей:

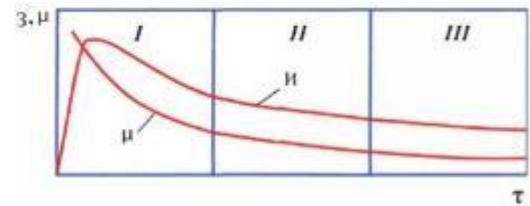
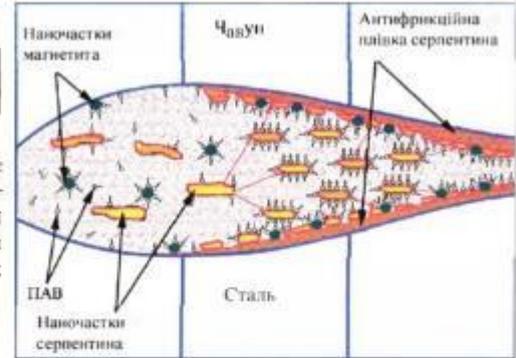
$$Cx = \frac{0,5\tau_0\sigma_T \left(\frac{1}{v+4} - 6 \right)}{\pi^2 \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \alpha_c^4 (1,4P)^{1/4}}$$

де τ_0 - питома зсувна міцність молекулярних зв'язків; α_c - коефіцієнт, що враховує відмінність реальної площі контакту від геометричної; P - питома навантаження на контактуючі поверхні, Н.

З точки зору енергетичних перетворень за даними Н.А. Буше та ін. [16] настання рівноважного стану відбуватиметься пропорційно приросту енергії активації dAa

$$\alpha dAa = \frac{dS}{dt} = \alpha \left(\frac{dA_T}{dt} - \frac{dA_0}{dt} \right)$$

де α - постійний коефіцієнт; dA_T - енергія тертя, Дж; dA_0 - відведена енергія, Дж; t - час, с; S - площа контакту, м².



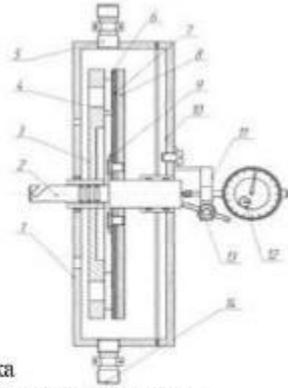
Z - знос; μ - коефіцієнт тертя; τ - час;

I - введення наночастинок ПІАФ складу в масло;

II - утворення антифрикційної плівки;

III - усталений режим.

Дія наночастинок ПІАФ складу на поверхнях тертя

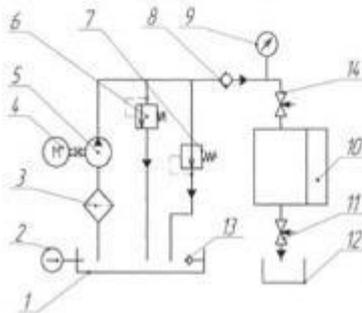


Лабораторна установка

Барабан містить 1 - корпус, 2 - навантажувальний вал, 3 - привідний диск, 4 - зразки для випробування, 5 - штуцер для подачі масла, 6 - шліфувальна шкурка, 7 - гумова прокладка, 8 - тримач, 9 - фіксатор шкурки, 10 - кришка барабана, 11 - кроиштейн, 12 - індикатор годинникового типу, 13 - фіксатор індикатора, 14 - штуцер для зливу масла з продуктами зносу.



Ваги лабораторні ВЛЕ 134



Гідравлічна схема лабораторної установки

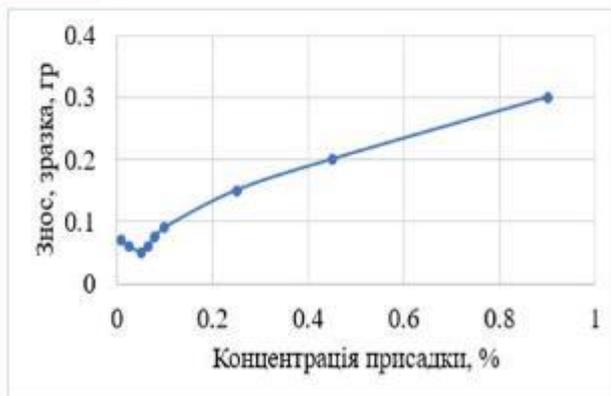
1 - гідробак, 2 - термометр, 3 - фільтр, 4 - електродвигун, 5 - насос типу НШ, 6 - запобіжний клапан, 7 - перепускний клапан, 8 - запірний клапан, 9 - манометр, 10 - установка, 11 - кран, 12 - ємність для збору та фільтрації рідини, 13 - нагрівальний елемент, 14 - кран.



Профілограф-профілометр мод.201

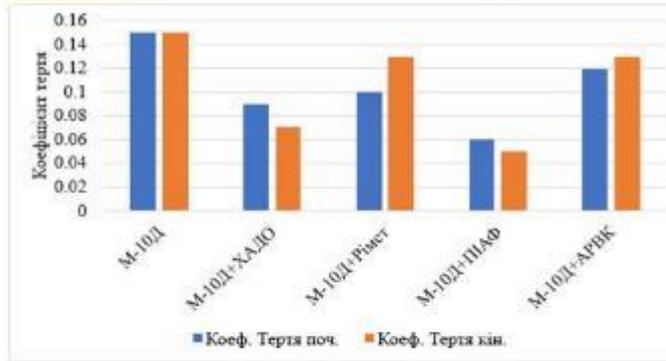
Розчинність присадок для припрацювання в маслі М-10ДМ

№ п /п	Присадки	Відсотковий вміст у маслі М-10ДМ за масою	Розчинність в маслі М-10ДМ
1	АРВК	2 %	Однорідний розчин, випадання осаду
2	ХАДО	0,2 %	Однорідний розчин, часткове випадання осаду
3	Римет	2 %	Однорідний розчин, випадання осаду
4	ПАФ розчин	0,05 %	Однорідний розчин зеленуватого відтінку

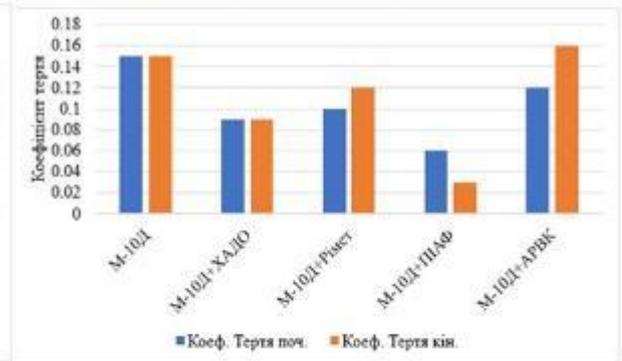


Залежність зносу від концентрації
ПАФ складу в маслі М-10ДМ

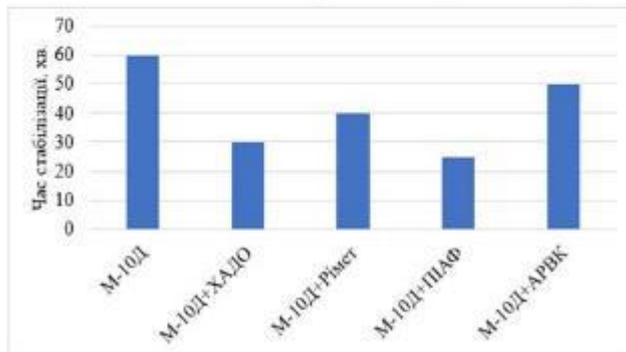
8 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



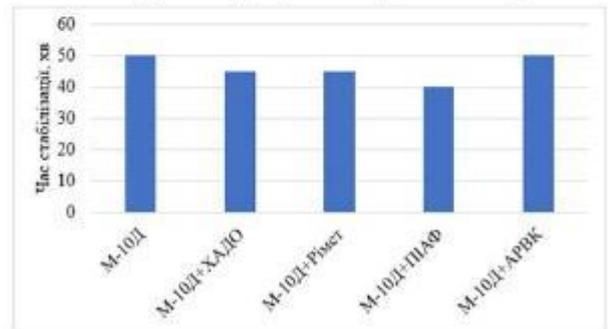
Зміна коефіцієнта тертя в часі (зразки ЦПГ: поршневе кільце - гільза циліндра, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)



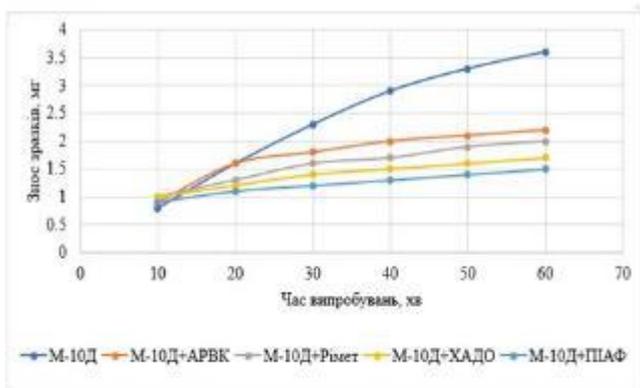
Зміна коефіцієнта тертя в часі (зразки: поршневий палець – втулка шатуна, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)



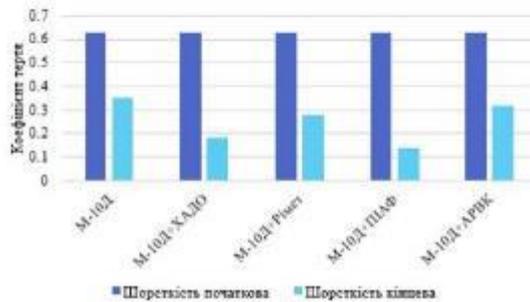
Час стабілізації припрацьовувальних мастил (зразки ЦПГ: поршневе кільце - гільза циліндра, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)



Час стабілізації припрацьовувальних мастил (зразки: поршневий палець – втулка шатуна, $P=400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)



Залежність зносу зразків деталей від часу випробувань припрацювальних мастил (зразки ЦПГ: поршневе кільце - гільза циліндра, $P = 400$ Н, $n = 650$ хв⁻¹)



Знос зразків ЦПГ і КШМ двигуна за 60 хв випробувань

Припрацювальне масло	Назва пари тертя					
	Поршневе кільце Ст45 - гільза циліндра СЧ24		Поршневий палець Ст45 - втулка верхньої головки шатуна БрОЦС5-5-5		Шатунна шийка колінчастого вала Ст45 - вкладиш БрСЗО	
	мг	% від М-10ДМ	мг	% від М-10ДМ	мг	% від М-10ДМ
масло М-10ДМ	3,6	100%	38,6	100%	9,0	100%
масло М-10ДМ + АРВК	2,2	61%	20,1	52%	7,3	81%
масло М-10ДМ + Ривсет	2,0	56%	18,5	48%	5,9	66%
масло М-10ДМ + ХАДО	1,7	47%	18,1	47%	5,5	61%
масло М-10ДМ + ПАФ склад	1,5	42%	15,3	40%	4,0	44%

Зміни шорсткості поверхонь зразків до і після обкатки

№	Фактор	Джерело появи	Потенційні наслідки	Заходи захисту
1	Хімічні пари та аерозолі	Нагрівання, змішування, переливання	Отруєння, алергії, подразнення	Вентиляція, респіратори, ЗІЗ
2	Висока температура	Нагрівальні установки	Опіки, перегрів	Термостійкі рукавиці, контроль температури
3	Електростатика	Перекачування масел	Іскри, займання	Заземлення, антистатичні шланги
4	Електричний струм	Несправне обладнання	Ураження струмом	ПУЕ, ПЗВ, інструктаж
5	Пожежна небезпека	Наявність горючих рідин	Пожежа, вибух	Вогнегасники, заборона відкритого вогню
6	Вібрація та шум	Насосне обладнання	Втома, порушення слуху	Беруші, технічне обслуговування
7	Поганий мікроклімат	Недостатня вентиляція	Перевищення ГДК, гіпоксія	Примусова витяжка, контроль повітря

№	Показник	Одиниця вимірювання	Значення
1	Кількість двигунів, що проходять обкатку за рік	шт	120
2	Витрати базового масла на один двигун	л	18
3	Витрати масла з ПІАФ-складом на один двигун	л	18
4	Вартість 1 л базового масла	грн/л	95
5	Вартість 1 л масла з ПІАФ-складом	грн/л	115
6	Витрати на базове масло на рік	грн	205 200
7	Витрати на масло з ПІАФ-складом на рік	грн	248 400
8	Зниження зносу деталей після обкатування	%	30-45
9	Економія на ремонті одного двигуна завдяки зниженню зношування	грн	850-1 100
10	Річна економія на ремонті парку двигунів	грн	102 000
11	Додаткові витрати на модернізацію обкаточного стенду	грн	150 000
12	Сумарний річний економічний ефект	грн	42 000
13	Терміни окупності проєкту	роки	3,6
14	Річне скорочення простоїв техніки	маш.-год	180
15	Додатковий прибуток від скорочення простоїв	грн	25 000

1. Аналіз літературних джерел показав, що із загальної кількості відмов машин на частку дизеля припадає 34-45 %. Ресурс дизеля визначається технічним станом з'єднань поршневе кільце - гільза циліндра і шийка колінчастого вала - вкладиш. Перспективним напрямком щодо збільшення ресурсу цих з'єднань, а отже і дизеля в цілому, є підвищення якості та інтенсифікація процесу їх припрацювання.

2. Теоретично обґрунтовано використання наночастинок серпентину для підвищення якості припрацювання деталей і поліпшення триб технічних властивостей поверхонь тертя деталей, за рахунок комплексної дії твердих і шаруватих речовин ПІАФ складу. Вивчено механізм дії припрацювального складу в період припрацювання деталей. Пояснено поверхневі явища при утворенні припрацювальних антифрикційних плівок.

3. Встановлено, що коефіцієнт тертя на різних парах тертя, отриманий на припрацювальному маслі М-10ДМ з ПІАФ складом, дорівнює 0,03-0,05. Масло М-10ДМ з ПІАФ складом знижує припрацювальний знос зразків на 40-44 % у порівнянні з маслом М-10ДМ. Шорсткість стабілізувалася через 30 хвилин випробувань на величині $Ra = 0,14$ мкм, що на 60 % менше, ніж на маслі М-10ДМ.

4. Стендові випробування показали, що за рахунок підвищення якості припрацювання при стендовому обкатуванні знос деталей ЦПГ і КШМ зменшився до 59 %. Сумарний знос деталей зменшився до 56 %. Шорсткість гільз циліндрів за час обкатки і 40 годинних випробувань знизилася на 17 і 21 % відповідно. Ефективна потужність підвищилася на 5,3 %, а питома витрата палива зменшилася на 6,4 %, порівняно з дизелями, обкатаними на маслі М-10ДМ.

5. Розроблено технологічний процес прискореного обкатування дизелів на припрацювальному маслі, що містить наночастинок серпентину, магнетиту та інших мінералів (ПІАФ склад), що скорочує час стендової обкатки дизелів ЯМЗ в 1,83 рази в порівнянні з типовою обкаткою на маслі М-10ДМ, час експлуатаційної обкатки може бути зменшений з 50 до 15 год, тобто в 3,3 рази.

6. Експлуатаційні випробування показали, що ресурс відремонтованих і обкатаних за прискореною технологією дизелів становить 1820 мото годин, що на 10 % вище ресурсу дизелів, обкатаних за типовою технологією.

7. Загальний річний економічний результат становить орієнтовно 42 тис. грн. За умови здійснення капітальних вкладень у модернізацію обкаточного стенду та впровадження ПІАФ у розмірі 150 тис. грн, розрахунковий строк їх окупності дорівнює близько 3,6 року, що підтверджує економічну доцільність впровадження нової технології. Отже, використання ПІАФ під час прискореного обкатування дизелів ЯМЗ є доцільним заходом, який забезпечує суттєві технічні та економічні вигоди.

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



**ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
АГРОПРОМИСЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ**

ЗБІРНИК ТЕЗ

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

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

21 листопада 2025 р.

Дніпро • 2025

*Рекомендовано до друку вченою радою
Інженерно-технологічного факультету
Дніпровського державного аграрно-економічного університету
(протокол № 3 від 25 листопада 2025 р.)*

*Захід внесено в реєстр УкрІНТЕІ
(посвідчення № 729 від 20 жовтня 2025 р.)*

Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро, ДДАЕУ, 2025. – 286 с.

Викладено матеріали наукових досліджень, виконаних вченими науково-дослідних установ та закладів вищої освіти з питань впровадження сучасного інжинірингу технологій і технічних систем агропромислового комплексу України. Видання представляє інтерес для науковців, викладачів, аспірантів, студентів аграрних і біологічних вузів та сільгоспвиробників.

Автори опублікованих тез доповідей відповідальні за патентну чистоту і точність наведених фактів, цитат, власних імен, географічних назв, а також за розголошення даних, які не підлягають публікації у відкритих засобах масової інформації.

УДК 621.43:621.892:621.89

Мелешенко В.В., здобувач вищої освіти СВО Магістр, ОПШ Агроінженерія¹⁰

dsau_nnm@ukr.net

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

ВПЛИВ МАСТИЛЬНИХ ПРИСАДОК НА ТЕРТЯ, ЗНОС І ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Підвищення ресурсу та надійності двигунів автомобільної, тракторної й сільськогосподарської техніки є одним з ключових завдань сучасного машинобудування, оскільки інтенсивні режими роботи, високі температури, ударні навантаження та дефіцит мастильного шару спричиняють прискорене зношування деталей тертя [1]. У таких умовах особливої актуальності набуває застосування протизносних і антифрикційних присадок, які формують захисні плівки, зменшують втрати на тертя, стабілізують роботу вузлів та знижують інтенсивність зношування металу. Їх використання у моторних і трансмісійних маслах є ефективним рішенням для техніки, що працює у важких умовах або має значний напрацьований ресурс, забезпечуючи покращення енергетичних характеристик тертя та підвищення компресії, що позитивно впливає на паливну економічність і довговічність машин.

Дослідження впливу присадок на умови тертя проводили на чотирикульковій машині МТ-4, де реєстрували зміну моменту тертя у вузлі (рис. 1а). При використанні присадки спостерігалося стале зменшення моменту тертя, що свідчить про покращення мастильного режиму та формування захисного шару на поверхнях тертя. Інтенсивність зношування зразків із чавуну СЧ та сталі 45 визначалася ваговим методом до і після випробувань (рис. 1б). Згідно з експериментальними результатами, додавання присадки знизило масові втрати металу у 1,38–1,45 рази порівняно з роботою на чистому маслі.

¹⁰ Науковий керівник – Васильєв Д.Л., доктор технічних наук, доцент кафедри інженірингу технічних систем

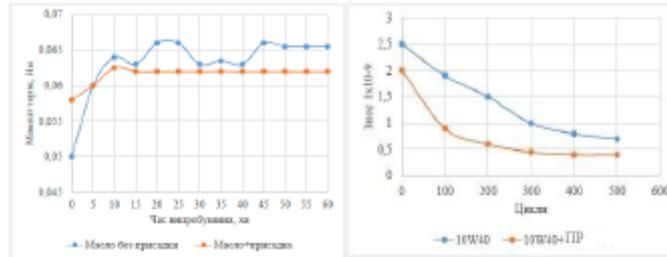


Рисунок 1 – Залежність моменту тертя від часу роботи з'єднання (а) та інтенсивність зношування зразків з чавуну СЧ (б)

Використання присадки привело до зменшення коефіцієнта тертя з 0,08 до 0,06 (рис. 2), що відповідає зниженню енергетичних втрат на тертя та підвищенню стабільності граничного мастильного шару.

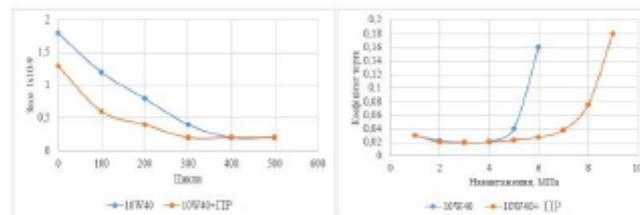


Рисунок 2 - Інтенсивність зношування зразків зі сталі 45 (а), та зміна коефіцієнта тертя в залежності від використання присадки (б)

Аналіз продуктів зношування у маслі показав зменшення їх концентрації на 12–15 %, що підтверджує зниження інтенсивності руйнування поверхонь тертя [2]. Мікрофотографії контактних ділянок (рис. 3) демонструють зменшення кількості борозен, подрятин і мікротріщин при використанні присадки, що вказує на перехід характеру зношування від абразивного до пом'якшеного механохімічного.

Експлуатаційні випробування присадки на двигуні автомобіля ВАЗ 21099 підтвердили її здатність вирівнювати та дещо підвищувати компресію у циліндрах.



Рисунок 3 - Сліди зносу поверхонь тертя; а - масло без присадки, б – масло + присадка (збільшення $\times 50$); в - масло без присадки, г – масло + присадка

Ефект став помітним після пробігу 520 км, а подальші заміри при 1800 км засвідчили стабілізацію параметрів та зменшення розкиду компресії між циліндрами. Таким чином, присадка забезпечує не лише зниження інтенсивності зношування вузлів тертя, але й покращення роботи кривошпинно-шатунного механізму, що є критично важливим для двигунів із підвищеним зносом.

Результати досліджень підтверджують доцільність використання мастильних присадок у системах змащення автотракторних двигунів. Встановлено зниження коефіцієнта тертя на 4–12 %, зменшення інтенсивності зношування у 1,38–1,45 раза, зменшення концентрації продуктів зносу у маслі на 12–15 %, а також вирівнювання компресії в циліндрах двигуна. Присадки підвищують несучу здатність підшипників коліщастого вала у 1,3–1,4 раза, що робить їх ефективним засобом продовження ресурсу техніки та зниження витрат на ремонт.

Список літератури

1. Калганков Є. В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин. Геотехнічна механіка. 2013. № 108. С. 133–142.
2. Мельянцов П.Т. Оцінка технічного стану робочої рідини агрегатів гідроприводу трансмісії кормо та зернозбиральних комбайнів умовах експлуатації / П.Т. Мельянцов, Є.В. Калганков, О.І. Кириленко // Вісник ДДАЕУ. – Дніпропетровськ: ДДАУ, 2008. – № 2. – С. 86 - 90.

Наукове видання

ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції
молодих вчених

Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва
(21 листопада 2025 р.)

Мови: українська, англійська

Редактор: Ельчин АЛІЄВ
Комп'ютерна верстка: Ілля БЛЮУС

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
49600, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25

Тел.: (056) 371-08-21
E-mail: technologyengineeringdsau@gmail.com
dsau.dp.ua
133phd.dsau.dp.ua