

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Дослідження впливу мастильного середовища на
зносостійкість бронзових вкладишів в режимі роботи
старт – зупинка»

Рівень вищої освіти другий магістерський

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 132 Матеріалознавство

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 24331.01.20.00

Виконав студент 2 курсу група МТВАм-24-1


Підпис

Віталій МІЗЕРНИЙ

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

05.12.2025

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти другий магістерський
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Диха О.В.
13 жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мізерному Віталію Вікторовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Дослідження впливу мастильного середовища на зносостійкість бронзових вкладишів в режимі роботи старт – зупинка.
керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25.08.2025 р. № 65 (Д 27)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали курсових проектів, робіт, практики.

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

1) Зношування змащуваних деталей, що працюють у режимі «старт - зупинка» та при реверсивному русі.

2) Методика експериментальних досліджень.

3) Тертя та зношування пар тертя при різних режимах мащення і навантаження.

4) Технологія виготовлення масла з певним комплексом присадок.

5) Висновки, рекомендації.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 13 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Зношування змащуваних деталей, що працюють у режимі «старт - зупинка» та при реверсивному русі	30.10.25	вик
2	Методика експериментальних досліджень	18.11.25	вик
3	Тертя та зношування пар тертя при різних режимах мащення і навантаження	30.11.25	вик
4	Технологія виготовлення масла з певним комплексом присадок	8.12.25	вик
5	Висновки, рекомендації	11.12.25	вик
6	Оформлення пояснювальної записки	20.12.25	вик
7	Захист дипломної роботи	22.12.25	

Студент


Підпис

Віталій МІЗЕРНИЙ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Стр
«Дослідже
вкладив
чотирьох
найменува
сторінках.
тексту, на
Мет
навантаж
деталей т
роботи.
Пр
експлуата
на його і
до робоч
надходит
визначає
формува
інтенсив
задач суч
Д
зупинка
поршне
Н
мастиль
спеціаль
темпера
тонку м
що вве
коефіціє
зношува
I
СТАРТ-
ЗНОШ

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-24-1 Мізерний Віталій Вікторович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Дослідження впливу мастильного середовища на зносостійкість бронзових вкладишів в режимі роботи старт – зупинка» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 21 найменування, розміщених на 3 сторінках, та 2 додатків розміщених на 20 сторінках. Роботу викладено на 78 сторінках, з них 70 сторінок основного тексту, на яких розміщено 27 рисунків і 27 таблиць.

Мета роботи - встановити закономірності впливу режимів навантаження на товщину мастильного шару та інтенсивність зношування деталей трибосполучень при безперервному та «старт - зупинка» режимах роботи.

Пускове зношування деталей двигуна є важливою проблемою при експлуатації транспортних засобів. Одним із головних чинників, що впливає на його інтенсивність, виступає час затримки подачі мастильного матеріалу до робочих поверхонь. На початковому етапі запуску двигуна масло ще не надходить до контактних зон, і в цей період швидкість зношування визначається адгезійними властивостями мастила, зокрема його здатністю формувати захисні граничні плівки з полярно-активних молекул. Зменшення інтенсивності зношування в умовах такого режиму є однією з пріоритетних задач сучасного машинобудування.

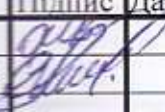
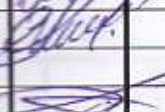


До деталей, що зазнають навантаження при роботі в умовах «пуск-зупинка», належать елементи двигуна внутрішнього згорання: циліндро-поршнева група, колінчастий вал, його підшипники, шийки та вкладиші.

На основі проведених досліджень рекомендовано застосовувати в мастильних матеріалах, що працюють у вузлах тертя з реверсивним рухом, спеціальну антистрибкову присадку – форміат металу. Під дією підвищених температур ця речовина розкладається та формує на контактних поверхнях тонку металеву плівку з низьким опором зсуву. Експериментально доведено, що введення форміату алюмінію до індустриального масла зменшує коефіцієнт тертя приблизно на 40 % та у три рази знижує інтенсивність зношування.

Ключові слова: *МАСТИЛО, МАСТИЛЬНА ПЛІВКА, ВКЛАДИШ, ВАЛ, СТАРТ-ЗУПИКА, РЕВЕРСИВНИЙ РУХ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, ЗНОШУВАННЯ, ПРИСАДКИ.*

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ЗНОШУВАННЯ ЗМАЦЬОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У РЕЖИМІ «СТАРТ - ЗУПИНКА» ТА ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ РУСІ	8
1.1 Особливості зношування деталей у режимі «старт - зупинка»	8
1.2 Види та закономірності зношування деталей у режимі «старт - зупинка» та при реверсивному русі	11
1.3 Оцінка впливу властивостей моторних оливо на зношування у важких умовах роботи вузлів тертя.	17
1.4 Шляхи підвищення ресурсу пар тертя з реверсивним рухом.	26
2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
2.1 Матеріали для дослідження.	28
2.2 Схема контакту та випробувальна установка.	32
2.3 Методика проведення експерименту.	34
3 ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ МАЦЕННЯ І НАВАНТАЖЕННЯ	39
3.1 Вплив навантаження на процес тертя сталі по бронзі.	39
3.2 Вплив навантаження на масову втрату матеріалу вкладиша та ролика.	49
3.3 Тертя та зношування при охолодженні мастильного матеріалу для пари «сталь – бронза»	59

КвРМТВА. 24331.01.20.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Мізерний		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Ватвер.		Диха		
<i>Дослідження впливу мастильного середовища на зносостійкість бронзових вкладишів в режимі роботи старт – зупинка</i>			Літера	Аркуш
			4	78
ХНУ МТВАм-24-1				

4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МАСЛА З ПЕВНИМ КОМПЛЕКСОМ ПРИСАДОК	63
4.1 Технологія отримання базового масла	63
4.2 Технологія виробництва масел із присадками	66
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ	79

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування та транспорту вимагає підвищення надійності і довговічності деталей тертьових вузлів, що працюють у складних умовах експлуатації. Особливої уваги потребують трибосполучення, які функціонують у режимах «старт - зупинка» та реверсивного руху, оскільки в цей період відбувається інтенсивне зношування робочих поверхонь через нестабільність мастильного шару та підвищену ймовірність граничного тертя.

Одним із ключових чинників, що визначають ресурс вузлів тертя, є ефективність роботи мастильної системи, властивості моторних масел та використання присадок антифрикційної, протизношувальної й протизадирної дії. Незважаючи на значні досягнення у галузі мастильних матеріалів, до цього часу залишаються недостатньо дослідженими вплив тривалості зупинок, навантажувальних режимів, в'язкісних характеристик і складу масла на параметри мастильного шару, інтенсивність тертя та характер зношування деталей.

З огляду на це, актуальним є проведення експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей роботи трибосполучень у режимах «старт - зупинка» та при реверсивному русі. Результати таких досліджень можуть стати основою для вдосконалення систем мащення, підбору оптимальних мастильних матеріалів і підвищення надійності машинобудівної техніки.

На сучасному етапі розвитку трибології недостатньо вивченим залишається вплив тривалості зупинок, характеру навантажувальних режимів, а також в'язкісних параметрів і компонентного складу мастильних матеріалів на формування товщини мастильного шару, інтенсивність тертя та швидкість зношування елементів трибосполучень, що функціонують у

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

режимах «старт - зупинка» та реверсивного руху. У зв'язку з цим у межах даної дипломної роботи поставлено такі завдання:

1. Дослідити вплив режимів тертя (періодичного та безперервного) на коефіцієнт тертя та зношування бронзових вкладишів у парі зі сталлю.

2. Встановити залежність коефіцієнта тертя від навантаження, швидкості ковзання та температури мастильного матеріалу.

3. Оцінити вплив в'язкості масла на процес змащування та інтенсивність зношування.

4. Визначити ефективність використання антистрибкових присадок у мастильних матеріалах та обґрунтувати їх доцільність у режимі «старт-зупинка».

Мета дослідження – встановити закономірності впливу режимів навантаження на товщину мастильного шару та інтенсивність зношування деталей трибосполучень при безперервному та «старт - зупинка» режимах роботи.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ЗНОШУВАННЯ ЗМАЩУВАНИХ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У РЕЖИМІ «СТАРТ - ЗУПИНКА» ТА ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ РУСІ

1.1. Особливості зношування деталей у режимі «старт - зупинка»

Однією з головних причин погіршення технічного стану автомобіля є зношування його деталей, вузлів та механізмів. На інтенсивність цього процесу впливають різні фактори: умови руху, рівень навантаження, якість дорожнього покриття та пального, кліматичні особливості, своєчасність технічного обслуговування та кваліфікація водія.

Особливо несприятливим для вузлів тертя є змінний режим експлуатації, коли автомобіль часто прискорюється, гальмує або зупиняється. Такі умови найчастіше спостерігаються під час руху в міських умовах з високою інтенсивністю трафіку. Часті коливання частоти обертання колінчастого вала призводять до підвищеного зношування підшипників, що пов'язано з погіршенням надходження мастила у зону контакту [1].

Важливим чинником довговічності трибосполучень є особливості запуску двигуна, оскільки саме в пусковий період швидкість зношування деталей є максимальною. Наприклад, знос циліндрів і поршневих кілець дизельного двигуна за один запуск може відповідати 3–5 годинам його безперервної роботи в нормальних умовах. Це пояснюється тим, що після зупинки двигуна мастило витікає із зазорів, і в момент наступного запуску контакт поверхонь відбувається у режимі граничного тертя. Крім того, зниження температури мастильного матеріалу під час зупинки навіть до +20 °C суттєво знижує його змащувальні властивості [2].

Інтенсивність зношування деталей двигуна на етапі підготовки до навантаження визначається низкою чинників: в'язкістю масла під час зупинки двигуна, тривалістю простою, технічним і тепловим станом вузлів тертя при пуску, режимом прогріву після запуску, конструктивними

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

особливостями мастильної та паливної систем, якістю пального і мастильних матеріалів, а також іншими експлуатаційними параметрами.

Після зупинки двигуна мастило, що має низьку в'язкість, швидко стікає в основну магістраль і далі в піддон картера. Найбільш інтенсивне витікання відбувається протягом перших 5–6 годин простою. Умови роботи тертьових пар при наступному запуску визначаються залишковою товщиною і міцністю масляної плівки: чим вона тонша, тим вища ймовірність прямого контакту поверхонь.

В'язкість масла прямо залежить від температури. При зниженні температури вона зростає, що ускладнює подачу мастила до зон тертя, оскільки воно погано захоплюється валом. При підвищенні температури, навпаки, відбувається розрідження масла, що сприяє його витіканню із зазорів. У результаті після пуску вузли тертя певний час працюють із нестачею мастила. Використання загущених масел дозволяє частково усунути ці недоліки: вони повільніше стікають у піддон після зупинки двигуна та швидше надходять до вузлів тертя при запуску, формуючи більш стійку плівку і знижуючи зношування [3].

У міру прогріву двигуна швидкість подачі масла в зони тертя зростає, що сприяє зменшенню інтенсивності зношування. Найбільш критичним є період перших 10 секунд після включення стартера, коли формується режим змащування.

Пусковий режим впливає на зношування також через частоту обертання колінчастого вала: при підвищених обертах прискорюється нагрів масла і охолоджувальної рідини, проте можливе різке підвищення температури підшипників і тиску в системі змащування, що здатне викликати задири та порушення в роботі вкладишів.

За низьких температур додатковим фактором підвищення зношування є збіднення мастильної плівки через надлишок рідкого пального. При цьому крапельно-рідка фракція палива потрапляє на стінки циліндра, зменшуючи

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщину масляної плівки або навіть повністю її змиваючи. У мороз (-20...-10 °С) вміст пального в маслі, що стікає зі стінок, може сягати 10–40 %. Часткове розрідження мастила паливом зменшує його в'язкість, завдяки чому поліпшується подача в зони тертя і відведення тепла, але цей ефект є обмеженим.

Рівень зношування залежить також від стану паливної апаратури та способів полегшення запуску. Найменший знос у карбюраторних двигунах спостерігається при оптимальному збагаченні паливо-повітряної суміші. Використання пускових рідин і передпусковий підігрів двигуна дозволяють зменшити тривалість запуску, уникнути змивання мастильної плівки паливом та знизити знос циліндрів. Ефект передпускового підігріву пояснюється також зниженням в'язкості масла в картері.

Доцільність вибору конкретного способу запуску та мастильно-паливних матеріалів оцінюється за часткою пускових зносів у загальному зносі двигуна. Для різних типів двигунів ця частка становить 2–25 %. Еквівалент пробігу автомобіля одному запуску двигуна із прогрівом становить улітку 3–16 км, а взимку — 12–100 км. Ці значення є умовними, оскільки залежать від конкретних умов пуску, режимів подальшої роботи і навантаження.

Зменшення частки пускових зносів у сучасних двигунах пояснюється застосуванням високоякісних палив і моторних масел, загущених мастил та ефективних засобів полегшення пуску. Скорочення тривалості запуску дозволяє підвищити надійність роботи двигунів у зимових умовах і збільшити коефіцієнт використання автотракторної техніки.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Види та закономірності зношування деталей у режимі «старт - зупинка» та при реверсивному русі.

До деталей, що зазнають найбільшого впливу режиму «старт - зупинка», належать елементи двигунів внутрішнього згорання: циліндро-поршнева група, колінчастий вал, його шийки, вкладиші та підшипники.

Колінчастий вал працює під дією значних навантажень, що викликають скручування, вигин і зношування поверхонь. Розвинутий ним крутний момент передається трансмісії автомобіля та використовується для приводу допоміжних механізмів двигуна. На вал діють сили від тиску газів і інерційні навантаження рухомих мас, причому найбільші з них виникають у момент вимикання зчеплення. Основні несправності цієї деталі пов'язані зі зношуванням опорних шийок через пошкодження вкладишів, а також із викривленням валу внаслідок перегріву. У результаті зростають зазори в підшипниках, погіршуються умови змащування, що прискорює зношування.

Процес руйнування деталей супроводжується комплексом фізико-хімічних явищ і залежить від багатьох факторів: матеріалу та якості поверхонь, характеру контакту, рівня навантажень і швидкості відносного руху. Згідно з ДСТУ 2823-94 [4], у машинах виділяють три основні групи зношування: механічне, молекулярно-механічне та корозійно-механічне. Провідним видом є механічне, яке охоплює абразивне й втомне руйнування, тоді як молекулярно-механічне виступає як супутнє.

Для колінчастих валів найбільш характерні такі форми зношування:

Абразивне зношування – виникає під дією твердих частинок, які дряпають поверхню або діють як ріжучі елементи. Абразивними можуть бути не тільки домішки, що потрапляють ззовні, а й частинки продуктів зносу та нагару всередині двигуна. Якщо вони зосереджені в мастильній рідині, таке руйнування називається гідроабразивним. Найбільше воно проявляється на

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шатуних і корінних шийках колінчастого вала та вкладишах підшипників ковзання.

Втомне зношування – пов’язане з дією циклічних напружень, амплітуда яких не перевищує межі пружності матеріалу. У поверхневих шарах виникають мікропластичні деформації, відбувається їхнє зміцнення та утворення залишкових стискуючих напружень. При багаторазовому навантаженні ці шари руйнуються: з’являються мікро- і макротріщини, які поступово розвиваються у вибоїни та западини. Глибина дефектів залежить від міцності матеріалу, питомих контактних тисків та розмірів поверхонь.

Схоплювання – ще один характерний вид зношування, що виникає при високих навантаженнях та недостатньому змащуванні, коли поверхні деталей частково зварюються між собою з подальшим відривом матеріалу.

Таким чином, закономірності зношування деталей у режимах «старт - зупинка» і реверсивного руху визначаються поєднанням механічних і фізико-хімічних процесів, а провідними видами руйнування є абразивний, втомний знос та схоплювання.

Молекулярно-механічний механізм виникає внаслідок молекулярної взаємодії між тісно зближеними металевими поверхнями. У місцях контакту відбувається їхнє міцне «схоплювання», що спричиняє виривання частинок матеріалу та їх перенесення з однієї поверхні тертя на іншу. Інтенсивність такого процесу різко підвищується при великих навантаженнях і відсутності захисної масляної плівки [5].

Закономірності зношування вкладишів. У процесі експлуатації на вкладишах з часом з’являються ознаки різних пошкоджень, тоді як у період припрацювання нового елемента окремі дефекти проявляються більш виразно [6].

Найпоширеніші дефекти вкладишів та шийок колінчастого вала:

- овальність та конусність (порушення циліндричності);
- зміна геометричних розмірів;

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- поява рисок і подряпин;
- задирки та тріщини.

Дослідження показують, що практично всі колінчасті вали мають дефекти у вигляді відхилень від правильної геометрії та наявності дрібних подряпин. Задирки спостерігаються приблизно у третини валів, сліди розплавлення вкладишів — менш ніж у 5 %, а корозійні пошкодження — приблизно у 10 %.

Перевищення допустимих відхилень від круглої чи циліндричної форми шийок може призвести до утворення тріщин, викришування антифрикційного шару, збільшення витрати масла, а також до прискореного зносу вкладишів. Зростання діаметрального зазору між шийкою та вкладишем знижує тиск масла, спричиняє збільшення динамічних навантажень та інтенсивності зношування, а у критичних випадках — аварійні пошкодження через перехід від гідродинамічного до граничного тертя. Це супроводжується підвищенням температури, збільшенням коефіцієнта тертя та можливим задиром або розплавленням робочого шару.

Нерівномірність зношування по колу шийки пояснюється низкою причин: низькою якістю або недостатньою фільтрацією масла, нерівномірними навантаженнями тощо. Подряпини та задирки найчастіше виникають унаслідок підплавлення підшипників або потрапляння абразивних частинок у зону контакту. Порушення режиму мащення призводить до зменшення товщини масляної плівки, що різко підвищує ризик задирів.



Для зменшення швидкості зношування та ймовірності виникнення пошкоджень необхідно забезпечувати безперервну та достатню подачу мастила, підтримувати його чистоту, а також підвищувати твердість і зносостійкість робочої поверхні шийок валів [6].


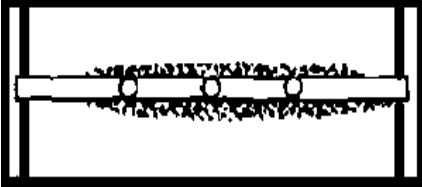
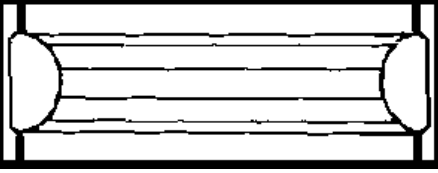
Найтипівіші прояви зношування вкладишів підшипників зведені в таблиці 1.1. Основним фактором, що спричиняє руйнування робочої поверхні, є втрата суцільності мастильної плівки, внаслідок чого підшипник

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

переходить у режим граничного тертя. Це відбувається при надмірних навантаженнях, нестачі або перегріві масла, а також при підвищеній шорсткості шийки. Такий режим тертя є неминучим у момент запуску та зупинки двигуна [7].

Таблиця 1.1 – Найбільш розповсюджені ознаки зношування вкладишів підшипників ковзання.

№	Зображення	Причини
1		<p>Локальне зношування проявляється у вигляді чітко окресленої блискучої плями, що виникає вже після відносно короткого періоду роботи. Основною причиною є потрапляння сторонньої частинки в зазор між валом і вкладишем.</p>
2		<p>Зношування робочої поверхні підшипника по всій його ширині в ділянці найбільшого навантаження може виникати внаслідок кількох факторів. До основних причин належать: порушення співвісності між підшипником і шийкою вала, недостатня подача мастильного матеріалу або його перегрів, а також підвищена шорсткість поверхні шийок вала.</p>

№	Зображення	Причини
3		<p>Налипання частинок металу в напрямку обертання шийки виникає внаслідок роботи підшипника в умовах граничного тертя, що зумовлено недостатнім заповненням системи мастилом перед запуском двигуна.</p>
4		<p>По краях мастильної канавки можуть з'являтися сліди припрацювання, що виникають у разі похибок виготовлення вкладиша. Щоб запобігти порушенню подачі мастила, необхідно усунути ділянки, які спричиняють тертя по краях канавки.</p>
5		<p>Ризики та подряпини на поверхні утворюються внаслідок потрапляння в мастило забруднюючих частинок.</p>

Граничне тертя виникає тоді, коли між деталями бракує мастильного матеріалу. Це одна з основних причин виходу з ладу пар тертя, яка починається з руйнування масляної плівки. Такий процес може бути спричинений кількома факторами:

- Порушення подачі мастила. Якщо відбувається витікання масла через пошкоджений піддон, знос шліців привода маслососа або засмічення маслоприймача, то мастильна плівка руйнується. У результаті поверхні деталей починають безпосередньо контактувати, підвищується температура, що призводить до плавлення матеріалу. Подібні наслідки викликає і занадто

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

малий зазор у підшипнику або його дефекти форми, які різко збільшують навантаження та вичавлюють масло із зазору між вкладишем і шийкою вала.

- Зниження в'язкості мастила через потрапляння пального чи охолоджувальної рідини. Коли масло розріджується, воно втрачає здатність утримуватись у зоні тертя. Після зупинки двигуна воно швидко стікає з поверхонь, і під час наступного запуску механізм працює без належного змащування, в режимі граничного тертя, що значно прискорює зношування.

Механізми, які супроводжують роботу вузлів у режимі «старт - зупинка», мають багато спільного з процесами при реверсивному терті. Відмінність полягає головним чином у тривалості зменшення товщини мастильної плівки в зоні контакту. Якщо в'язкість мастила низька, цей процес відбувається подібним чином у обох випадках.

Дослідженням реверсивного тертя докладно займався David Tabor (британський фізик, один із основоположників трибології. У співпраці з F. P. Bowden він створив фундаментальні праці, зокрема книгу «The Friction and Lubrication of Solids». Tabor досліджував механізм контакту поверхонь і дотикові сили, що є важливими для реверсивного тертя) [8], який встановив, що під час нього виникають пружні деформації поза контактною зоною. Він також експериментально показав відмінності між реверсивним і одностороннім тертям.

При такому навантаженні поверхні деталей зазнають змін, пов'язаних з пружнопластичними та пластичними деформаціями. Оскільки перші проявляються раніше, ніж пластичні, зміна напрямку деформування насамперед впливає на пружні переміщення, а вже з їхнім зростанням – на пластичні. Тому дію знакозмінного навантаження при терті доцільно розглядати як прояв пружних деформацій поверхневих шарів.

Критерії зносостійкості, втомного руйнування та зсувних деформацій, а також їхнє місце в узагальненому законі тертя, тісно пов'язані з пружними реакціями поверхні в умовах тертя. Це зумовило необхідність дослідження

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

пружних деформацій не лише за постійного напрямку дії сили тертя, а й у випадках її періодичної зміни знака.

Експериментальні дані показують, що під час тривалого тертя частина пружних деформацій поверхневих шарів поза контактною зоною не зникає повністю, а накопичується й переходить у залишкові внаслідок пластичних деформацій у самій зоні контакту та поблизу неї. При цьому величина деформацій залежить від напрямку ковзання, що дозволяє зробити висновок: реверсивне тертя суттєво впливає на формування залишкових внутрішніх напружень як у приповерхневих, так і у глибинних шарах тіла.

Під час дослідження експлуатаційних та фізико-механічних характеристик машинних деталей, зокрема підшипникових матеріалів, особливу увагу приділяють залишковим напруженням першого роду. Їх величина і характер (стиснення чи розтяг) по-різному впливають на зносостійкість. Найбільш сприятливим є створення в поверхневих шарах стискаючих напружень, які підвищують опір зношуванню. Доведено, що режим тертя визначає рівень і характер внутрішніх напружень у поверхневих і глибинних шарах металу [6].

1.3 Оцінка впливу властивостей моторних олів на зношування у важких умовах роботи вузлів тертя.

Моторне масло є невід’ємним елементом роботи двигуна внутрішнього згоряння, оскільки воно забезпечує змащування деталей, знижує інтенсивність зношування та виконує функцію охолодження.

На рисунку 1.1 наведено залежність інтенсивності зносу пари тертя від пробігу автомобіля при роботі на одному й тому самому маслі. Найбільш тривалим та стабільним є другий період (режим сталої роботи), у якому знос практично не проявляється. Це пояснює важливість контролю ресурсу моторного масла та дотримання оптимальних термінів його заміни.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передчасна чи запізнiла заміна змащувальної рiдини призводить до iнтенсифiкацiї процесiв спрацювання деталей двигуна. Використання якiсного масла, його правильний добiр, своєчасна заміна у поєднаннi з дотриманням правил експлуатацiї дозволяють суттєво збiльшити ресурс роботи автомобiльного двигуна [9].

Вiдомо, що тертя, корозiйнi процеси та спрацювання суттєво скорочують ресурс деталей двигуна внутрiшнього згорання. Практичний досвiд експлуатацiї показує: за вiдсутностi ефективних мастильних матерiалiв елементи, що працюють у парах тертя, дуже швидко виходять з ладу.

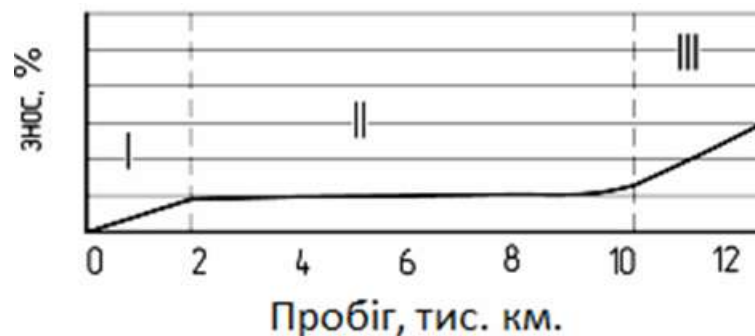


Рисунок 1.1 – Залежність інтенсивності зношування у вузлі тертя від пробігу автомобіля до заміни масла:

I – період припрацювання; II – стабільна робота; III – інтенсивне руйнування.

Найбiльшi енергетичнi втрати на тертя виникають у цилiндро-поршневлй групi, особливо пiд час запускiв i зупинок двигуна, а також при роботi в умовах низьких температур. При забрудненнi моторного масла рiзко зростає зношування сполучених деталей, посилюється утворення нагару. Твердi домiшки здатнi засмiчувати канали подачi мастила, перевантажувати фiльтри системи мащення та порушувати тепловий режим двигуна.

У поршневих двигунах найбiльш поширеним механiзмом руйнування є абразивне зношування, яке характерне для шийок колiнчастого вала, пiдшипникiв, поршнiв та цилiндрiв [10]. Воно виникає внаслiдок

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Пiдпис	Дата		

проникнення твердих частинок у масляну плівку, що розділяє поверхні тертя. Ступінь зношування визначається їх розмірами, відповідністю зазорам між деталями, а також твердістю, формою та міцністю частинок. Доведено, що неорганічні домішки у моторному маслі є значно небезпечнішими для довговічності деталей, ніж сторонні забруднення, які потрапляють до двигуна іншим шляхом [11].

Найбільш інтенсивний абразивний знос спричиняють частинки розміром 8–60 мкм, при цьому найбільш руйнівними вважаються ті, що мають діаметр 18–30 мкм. Залежність швидкості зношування від розміру частинок наведена на рис. 1.2.

Несвоєчасна заміна моторного масла також створює несприятливі умови роботи пар тертя. Це обумовлено погіршенням його фізико-хімічних властивостей: зміною в'язкості, підвищенням схильності до утворення відкладень як у системі змащення, так і на поверхнях деталей двигуна.

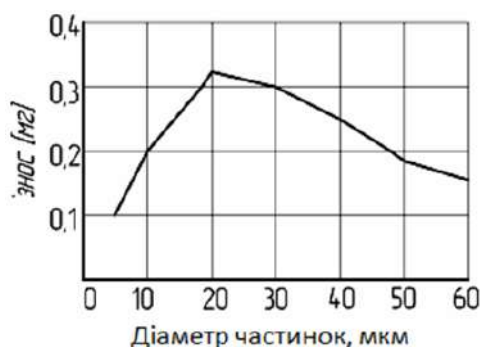


Рисунок 1.2 – Діаграма абразивного зношування.

Застосування неякісних моторних масел призводить до інтенсивного зношування деталей та передчасного виходу двигуна з ладу. Якщо мастило не має необхідного комплексу експлуатаційних характеристик, воно не забезпечує надійного розділення поверхонь тертя, що спричиняє утворення задирів і руйнування робочих поверхонь вкладишів колінчастого вала. Крім того, підвищена схильність таких масел до утворення смолистих відкладень

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може викликати засмічення або навіть повне перекриття масляних каналів, що залишає пари тертя без змащення і провокує їх інтенсивне спрацювання, задири й заклинювання.

На ресурс двигуна значний вплив мають режими та умови його експлуатації. Перевищення граничної частоти обертання колінчастого вала призводить до руйнування деталей, а близько 70 % зношування припадає на фазу запуску. Найбільш небезпечним є холодний пуск, особливо коли використовується масло з невідповідною в'язкісно-температурною характеристикою. Так, один пуск при температурі $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ еквівалентний за рівнем зношування кільком сотням кілометрів пробігу. Це пояснюється підвищеною в'язкістю мастила за низьких температур, через що воно надходить до зон тертя із затримкою. Короткі поїздки на непрогрітому двигуні в зимовий період сприяють утворенню відкладень у системі мащення та розвитку корозійного зносу поршнів, циліндрів і кілець.

В'язкість масла визначає товщину мастильної плівки між поверхнями, що труться: зі збільшенням в'язкості плівка стає товщою, зі зменшенням – тоншою. Основні вимоги до цього параметра такі:

1. Занадто низька в'язкість призводить до контакту «метал–метал», що викликає пошкодження деталей.
2. Надмірно висока в'язкість ускладнює рух поверхонь відносно одна одної та перешкоджає прокачуванню масла каналами, що викликає «сухе тертя» і підвищує витрати **пального** [12].

Особливе значення для зношування в режимі «старт - зупинка» має температура, адже саме вона визначає фактичну в'язкість мастила. Від цього залежить, чи зможе масло своєчасно надійти у зону тертя під час запуску, та чи збережеться мастильна плівка на деталях після зупинки. Залежність в'язкості від температури наведено на рис. 1.3.

За низьких температур моторні масла відзначаються підвищеною в'язкістю, проте зі зростанням температури їх в'язкість зменшується, і

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мастило стає рідшим. Швидкість зниження кінематичної в'язкості при нагріванні характеризується індексом в'язкості. Цей показник відображає, наскільки інтенсивно масло «розріджується» зі зміною температури. Якщо індекс в'язкості низький, мастильна рідина швидко втрачає свої властивості, товщина захисної плівки різко зменшується, що призводить до підвищеного спрацювання деталей. Високий індекс, навпаки, означає менше зниження в'язкості та стабільне формування мастильної плівки, здатної ефективно захищати поверхні тертя від зносу. Графічна залежність зношування деталей від показника в'язкості масла наведена на рис. 1.4.

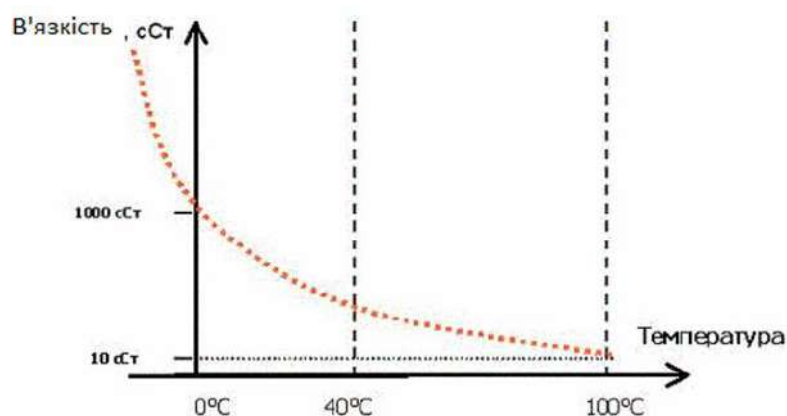


Рисунок 1.3 – Діаграма залежності в'язкості від температури.

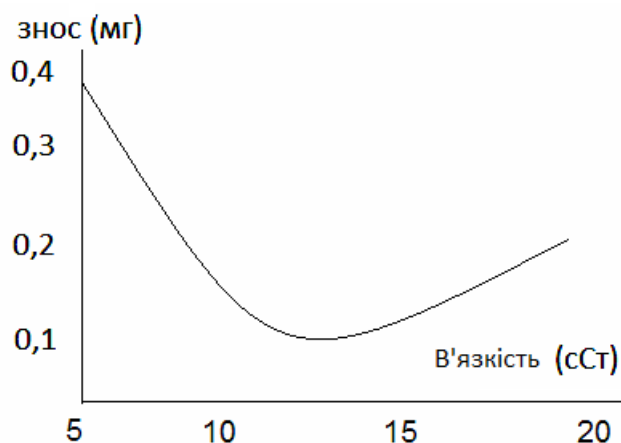


Рисунок 1.4 – Діаграма залежності зносу від в'язкості масла.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У реальних умовах експлуатації двигуна індекс в'язкості моторного масла відіграє вирішальну роль. Низьке його значення призводить або до ускладненого запуску при низьких температурах, або до недостатнього захисту деталей від зношування при високих. Високий індекс, навпаки, забезпечує стабільні властивості мастила в широкому діапазоні температур: легший пуск холодного двигуна та формування достатньої товщини мастильної плівки при високих навантаженнях, що мінімізує знос [13].

Під час пуску важливим фактором є в'язкість масла: зі зменшенням цього показника двигун легше запускається, а мастило швидше надходить до поверхонь циліндра. Разом з тим підвищення в'язкості збільшує товщину масляної плівки, здатної витримувати більші питомі навантаження при зростанні швидкості обертання вала. Це позитивно впливає на процеси ущільнення, зменшує прорив газів у картер через зношені поршневі кільця та підвищує компресію, що в результаті сприяє покращенню згоряння паливно-повітряної суміші. Водночас використання надмірно в'язких масел низької якості, які мають невисокий індекс в'язкості, ускладнює запуск двигуна в холодних умовах і може створювати ризик роботи без достатнього мастила на початковому етапі. Тому правильний вибір в'язкості масла повинен враховувати комплекс вимог до умов експлуатації.

Для оптимізації характеристик у мастильні матеріали додають спеціальні в'язкісні присадки. Вони знижують чутливість масла до температурних коливань, дозволяючи поєднувати переваги малов'язких масел (добрі пускові та антифрикційні властивості при холодному старті) з властивостями високов'язких масел (надійний захист при високих температурах). При цьому базові масла з присадками мають нижчу в'язкість на холоді, але забезпечують необхідну стабільність у робочому діапазоні.

Крім того, на знос і пружні деформації поза зоною контакту впливають не лише в'язкісні властивості, а й наявність поверхнево-активних речовин у складі мастила. Наприклад, касторове масло, попри відносно невисоку

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в'язкість, завдяки високій поверхневій активності істотно зменшує деформації [13].

На процес зміцнення як поверхневих, так і глибинних шарів металевих зразків у зіставних умовах реверсивного та одностороннього тертя значний вплив справляють мастильні матеріали та поверхнево-активні присадки. Дослідження показали, що при використанні вазелінової олії або індустріальних масел криві наклепу під час реверсивного тертя розташовані нижче від аналогічних кривих при односторонньому терті. Введення до складу мастила поверхнево-активних добавок, зокрема органічних спиртів, зберігає загальну тенденцію, але змінює мікротвердість матеріалу. Найпомітніший ефект зафіксовано при застосуванні 2 % олеїнової кислоти як присадки [14].

Знакозмінні деформаційні процеси, що виникають під час реверсивного руху, активізують прояв адсорбційного ефекту. У результаті цього зниження міцності поверхневих шарів через адсорбцію змінюється на їх додаткове зміцнення. Вплив поверхнево-активних речовин проявляється не лише за умов сталого ковзання, а й на початковому етапі, коли тертя має статичний характер. Встановлено також, що присадки типу олеїнової кислоти в концентрації 0,5–2,0 % зменшують пікові значення статичної сили тертя та знижують величину пружних деформацій поза зоною контакту.

Експериментальні дані (табл. 1.2) для зразків зі сталі 45 за умов навантаження 3 МПа свідчать, що при реверсивному ковзанні знежирених зразків або тих, що змащені маслом без присадок, величина сили тертя та деформацій поверхневих шарів поза зоною контакту є більшою, ніж при односторонньому терті (рис. 1.5) [15].

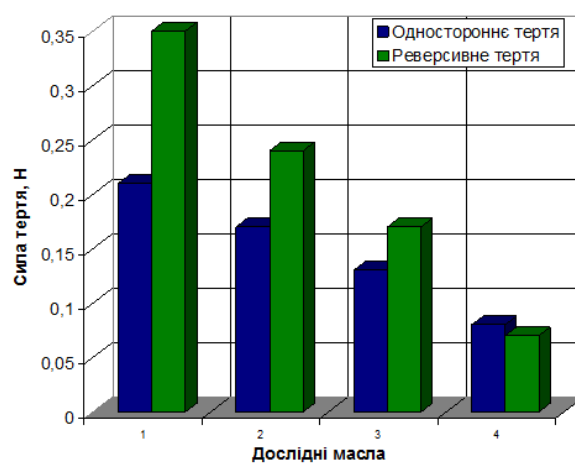
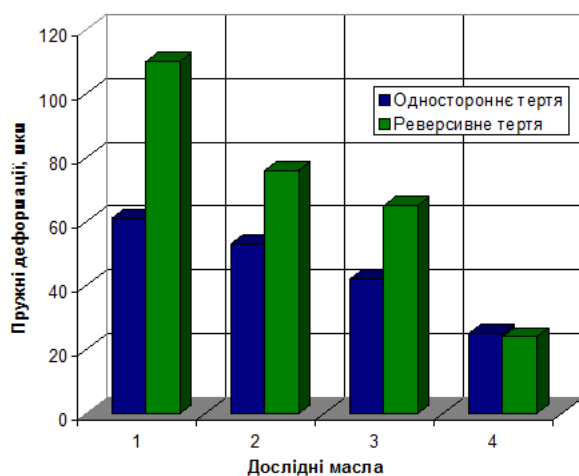
Ця специфічна особливість реверсивного тертя впливає не лише на силу тертя й пружні деформації, а й на інші характеристики поверхневих і внутрішніх шарів. Використання мастил із поверхнево-активними присадками в умовах реверсивного ковзання може бути корисним у вузлах,

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де потрібна висока точність і плавність мікропереміщень, наприклад у прецизійних верстатах.

Таблиця 1.2 – Результати впливу реверсивності тертя на силу тертя та пружні деформації.

Змащування	Одностороннє тертя		Реверсивне тертя	
	Δ , мкм	F, Н	Δ , мкм	F, Н
Масло індустріальне 12	0,21	61	0,35	110
Масло індустріальне, без присадки	0,17	53	0,24	76
Масло індустріальне , з 0,5% олеїнової кислоти	0,13	42	0,17	65
Масло індустріальне, з 2 % олеїнової кислоти	0,08	25	0,07	24



а)

б)

Рисунок 1.5 – Результати вимірювання при різних видах тертя:

а - пружних деформацій, б - сили тертя;

1 - індустріальне масло I-12A; 2 - I-12A, без присадки; 3 - I-12A, з 0,5% кислоти олеїнової; 4 - I-12A, з 2 % кислоти олеїнової

Загальна тенденція до зниження сили тертя та пружних деформацій за межами контактної зони при використанні мастильних матеріалів із поверхнево-активними присадками, незалежно від напрямку тертя, пояснюється адсорбційними явищами. Основну роль при цьому відіграє пластифікація металу в області контакту, що сприяє перенесенню пластичних деформацій у тонкий поверхневий шар.

У зоні розтягування дія поверхнево-активних присадок призводить не лише до зменшення ділянки інтенсивного наклепу, а й частково знижує мікротвердість нижче початкового рівня. Це можна пояснити тим, що при наявності відкритих мікропор і тріщин умови розтягування є більш сприятливими для прояву адсорбційного ефекту, ніж у зоні стиснення, де дефекти залишаються закритими.

Дослідження показали, що реверсивне тертя з мастильними матеріалами не забезпечує настільки вираженого глибинного зміцнення, як сухе тертя, тоді як глибина зміцненого шару при реверсивному і односторонньому терті залишається приблизно однаковою, а інколи навіть більшою в умовах одностороннього тертя. Це пояснюється тим, що при використанні мастила сила тертя зменшується, а пластичні деформації концентруються у більш тонкому приповерхневому шарі, тому максимальна глибина їх проникнення визначається дією нормального тиску вже з початку процесу.

Аналіз епюр внутрішніх напружень при реверсивному терті з мастилом свідчить про існування ділянок майже рівних значень напруженості, що вказує на наявність певного об'єму металу, в якому властивості змінюються нерівномірно, навіть попри плавне зменшення мікротвердості з глибиною. Ймовірно, методика визначення внутрішніх напружень є чутливішою до залишкових змін у структурі металу, ніж вимірювання мікротвердості.

Для більш детального дослідження впливу реверсивного тертя на процес зміцнення застосовувалися й інші трибологічні пари та спеціальні

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експериментальні установки. Особливу цінність мають випробування тонких пластин, де переважаючими стають пружно-пластичні деформації, менш залежні від об'ємних характеристик матеріалу.

Наявність пружних деформацій поза контактною зоною, а також домінування пластичних деформацій у самій зоні тертя визначає перехідний інтервал, де пружно-пластичні деформації поступово переходять у пружні. Відмінності у характері пластичних деформацій пояснюють залежність пружних змін поверхні від напрямку тертя. Оскільки мікротвердість виступає індикатором інтенсивності пластичних деформацій, можна вважати, що реверсивність процесу безпосередньо впливає на її зміну [16].

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що надійність роботи деталей трибосполучень під час запуску двигуна визначається кількома ключовими чинниками:

1. Якість моторного масла, а саме його здатність формувати стійкі адсорбційні або хімічно модифіковані захисні шари, які знижують коефіцієнт тертя та зменшують частку металевого контакту в широкому інтервалі температур.

2. Швидкість надходження мастила до поверхонь тертя в момент запуску. Вона залежить від конструкції системи змащування та в'язкісно-температурних характеристик масла.

3. Умови роботи двигуна на етапі «пуск-прогрів», де вирішальними параметрами виступають навантаження та частота обертання колінчастого вала.

1.4 Шляхи підвищення ресурсу пар тертя з реверсивним рухом.

Деталі, що функціонують у режимі «старт - зупинка», піддаються підвищеним навантаженням. Для їх стабільної роботи необхідно забезпечити постійне надходження мастильного матеріалу та формування безперервного

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

мастильного шару між поверхнями. Оскільки в умовах тертя можливе утворення задирок, застосовуються спеціальні присадки: антифрикційні, протизносні та протизадирні.

Присадки антифрикційні знижують або стабілізують коефіцієнт тертя, підвищують маслянистість та усувають явище переривчастого ковзання. Найчастіше використовуються поверхнево-активні речовини — природні жири, жирні кислоти (стеаринова, лауринова, олеїнова), їхні солі та ефіри. Їх молекули орієнтуються на поверхні металу таким чином, що полярні групи взаємодіють із металом, а вуглеводневі ланцюги, спрямовані назовні, утворюють захисний шар. Це запобігає безпосередньому контакту поверхонь, що труться, та зменшує коефіцієнт тертя.

Протизадирні і протизносні присадки діють інакше — вони не лише утворюють адсорбційні шари, а й вступають у хімічну взаємодію з поверхнею металу. У результаті на робочих поверхнях формуються плівки, які перешкоджають зносу та схоплюванню. Тонкий орієнтований шар масла, збагачений активними компонентами, має підвищену в'язкість і витримує значні питомі навантаження.

Такі присадки отримують шляхом обробки триізобутилену сіркою при температурі 182–260 °С і тиску 0,1–0,8 МПа з продувкою інертним газом. Найбільш ефективними вважаються сірковмісні сполуки: продукти осірнення мінеральних масел, олефінові полімери, дисульфіді та полісульфіді. При високих температурах і навантаженнях вони взаємодіють із металом, утворюючи на поверхні шар сульфідів заліза, який значно підвищує зносостійкість і захищає деталі від задирів.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали для дослідження.

У дослідженнях застосовувалася пара матеріалів: сталь 45 та бронза БрОФ10-1. Основний елемент був виготовлений зі сталі 45, яка належить до групи якісних конструкційних вуглецевих сталей. Її хімічний склад наведено у таблиці 2.1, а механічні та фізичні характеристики подано в таблицях 2.2–2.3 [17].

Сполучний елемент виконували з бронзи БрОФ10-1, що є олов'янистим сплавом із додаванням фосфору. Завдяки такому складу бронза характеризується високою зносостійкістю, гарними антифрикційними властивостями та підвищеною твердістю, що робить її придатною для роботи у вузлах тертя.

Таблиця 2.1 – Хімічні елементи сталі 45, у %, залишок залізо.

Cr	C	Al	Ni	Si	Mn	P	S	Cu
< 0,25	0,42- 0,5	< 0,08	< 0,3	0,17- 0,37	0,5- 0,8	< 0,035	< 0,04	< 0,3

Таблиця 2.2 – Властивості фізичні сталі 45.

T	E 10 ⁻⁵	α 10 ⁶	l	г	C
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)
20	2			7826	
300	1.9	13.4	44	7735	515
500		14.6	39	7662	583
600		14.9	36	7625	578
700		15.2	31	7587	611

Сталь 45 використовують у машинобудуванні для виготовлення деталей, що працюють під підвищеними навантаженнями. З неї виробляють вал-шестерні, колінчасті та розподільні вали, зубчасті колеса, шпинделі, бандажі, циліндри, кулачки та інші елементи, які після нормалізації, поліпшення чи термічної обробки повинні мати високу міцність і довговічність [17].

Таблиця 2. – Властивості механічні сталі 45.

Сортамент	Розмір	s_b	s_T	d_5	y	КСУ	Термообр.
-	мм	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Лист горячекатан.	80	590		18			
Полоса горячекатан.	6 - 25	600		16	40		
Поковки	100 - 300	470	245	19	42	390	Нормалізація
Поковки	300 - 500	470	245	17	35	340	Нормалізація
Поковки	500 - 800	470	245	15	30	340	Нормалізація
Твердість матеріалу сталь 45 горячекатаного та відпаленого							НВ 10 ⁻¹ = 170 МПа
Твердість матеріалу сталь 45 каліброваного та гартованого							НВ 10 ⁻¹ = 207 МПа

БрОФ10-1 належить до групи олов'яно-фосфорних бронз, у складі яких міститься приблизно 10 % олова та близько 1 % фосфору. Такий хімічний склад забезпечує матеріалу поєднання високої міцності, твердості та добрих антифрикційних властивостей. Хімічний склад сплаву наведений у

таблиці 2.4, а його основні механічні та фізико-хімічні характеристики – у таблицях 2.5–2.6 [17].

Завдяки присутності олова бронза БрОФ10-1 демонструє підвищену зносостійкість і стабільність структури, що робить її ефективною для роботи у вузлах тертя з підвищеним навантаженням. Фосфор у складі сприяє підвищенню твердості та зміцненню матриці сплаву, а також покращує оброблюваність.

Особливо важливими для практичного застосування є високі антифрикційні властивості, стійкість до заїдання, низька схильність до схоплювання та добра корозійна стійкість у різних середовищах. Завдяки цим властивостям БрОФ10-1 широко використовується у виготовленні вкладишів підшипників, втулок, черв'ячних коліс та інших деталей, що працюють у режимі ковзання.

У трибосполученнях даний матеріал забезпечує стабільну роботу при змінних режимах навантаження, знижує інтенсивність зношування пари тертя та продовжує термін служби вузлів. Саме тому його вибір у даному дослідженні є обґрунтованим і доцільним.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад БрОФ10-1

Fe	Si	P	Al	Cu	Pb	Zn	Sb	Sn
до 0.2	до 0.02	0.4 - 1.1	до 0.02	86.9 - 90.6	до 0.3	до 0.3	до 0.3	9 - 11

Таблиця 2.5 – Фізичні властивості БрОФ10-1

Сортамент	s_b	s_T	d_5	y	Термообр.
-	МПа	МПа	%	%	-
лиття в кокіль, ГОСТ 613-79	245		3		Без термообр.
лиття в <u>песчану</u> форму, ГОСТ 613-79	215		3		Без термообр.

Таблиця 2.6 – Механічні властивості бронзи БрОФ10-1

Т	$E \cdot 10^{-5}$	$a \cdot 10^6$	ρ
Град	МПа	1/Град	кг/м ³
20	1.03	17	8760
Твердість БрО10Ф1 без термообробки, литтяв кокіль ГОСТ 613-79			
НВ $10^{-1} = 90$ МПа			
Твердість БрО10Ф1 без термообробки, лиття в пісчану форму ГОСТ 613-79			
НВ $10^{-1} = 80$ МПа			

У якості мастильного матеріалу під час експериментів застосовувалося індустріальне масло И-8А у чистому вигляді. Даний вид масел отримують шляхом переробки дистилятних фракцій малосірчистих і сірковмісних нафт із використанням технології селективного очищення.

Масло И-8А знаходить широке застосування у різних галузях промисловості. Воно використовується для змащування легконавантажених і високошвидкісних деталей та механізмів, а також у виробництві мастильних матеріалів, мастик та гумових виробів. Окремі сфери господарства застосовують його як робочу рідину в гідравлічних системах будівельної техніки, у шпинделях шліфувальних верстатів, контрольно-вимірювальних приладах та інших точних механізмах.

Основні технічні показники індустріального масла И-8А наведені в таблиці 2.7. [18]

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики індустриального масла И-8А

Показники	И-8А
Щільність при 20 °С, кг/м ³ , не більше	880
Щільність кінематична, при 40 °С, мм ² /с	9-11
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	0,02
Температура застигання, °С: не більше	-15
Температура запалювання, °С: не менше	130
Стабільність проти окислення: - приріст кислотного числа, мг КОН/г, не більше	0,2 (0,3)
- приріст смол, %, не більше	1,5
Зольність, %, не більше	0,005
Вміст механічних домішок	відсутній
Вміст води	сліди

2.2 Схема контакту та випробувальна установка.

Дослідження процесів тертя та зношування зразків за схемою «ролик – частковий вкладиш» (рис. 2.1) проводилися з використанням машини тертя СМТ-1. Дана установка застосовується для експериментальної оцінки характеристик тертя та зносостійкості матеріалів, а також для аналізу трибологічних властивостей металів, сплавів і жорстких полімерних конструкцій. Машина СМТ-1 експлуатується в умовах лабораторій та науково-дослідних центрів.

Принцип роботи машини СМТ-1 ґрунтується на взаємному стиранні зразків, притиснутих один до одного силою Р. У процесі випробувань здійснюється реєстрація моменту тертя на нижньому зразку.

Дана установка дозволяє проводити експерименти як у середовищі сухого тертя, так і за наявності мастильних матеріалів, у режимах кочення без прослизання або з контрольованим ковзанням. Конструкція машини

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

забезпечує плавне регулювання швидкості обертання зразків, широкий діапазон вимірювання моменту тертя та швидкостей ковзання. Для підвищення точності застосовано малоінерційні сенсори моменту тертя і температури [19].

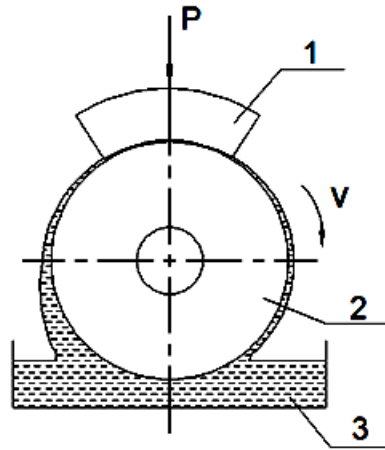


Рисунок 2.1 – Схема трибо технічного випробування:

1 - частковий вкладиш; 2 - ролик; 3 - ємність з мастильним матеріалом

Основні технічні параметри СМТ-1:

- частота обертання валу нижнього зразка: $75\text{--}1500 \text{ хв}^{-1}$;
- діапазон А – $75\text{--}750 \text{ хв}^{-1}$, діапазон Б – $150\text{--}1500 \text{ хв}^{-1}$;
- похибка вимірювання частоти обертання – $\pm 3 \%$;
- допустима похибка лічильника сумарного числа обертів – ± 100 обертів;
- мінімальна ціна поділки лічильника – 100 обертів;
- кількість розрядів лічильника – 6;
- максимально допустимий момент тертя: для пари «диск – диск» у діапазонах А і Б, а також для пар «вал – втулка» та «диск – колодка» в діапазоні А – $20 \text{ Н}\cdot\text{м}$; у діапазоні Б для «вал – втулка» та «диск – колодка» – $10 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- діапазон вимірювання моменту тертя: I – $1\text{--}10 \text{ Н}\cdot\text{м}$, II – $2\text{--}20 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- граничне середньоквадратичне відхилення випадкової похибки вимірювача моменту тертя в умовах статичного навантаження – не більше 1 %;

- діапазон зусиль на зразки: для пар «диск – диск» і «диск – колодка» – 200–2000 Н, для пари «вал – втулка» – 500–5000 Н.

2.3 Методика проведення експерименту.

Перед початком досліджень поверхні ролика та вкладиша очищували бяззю, змоченою у гасі. Далі ролик закріплювався на валу машини тертя, а вкладиш встановлювався у тримач за допомогою гвинтів. Після цього його підводили до ролика таким чином, щоб робочі поверхні обох елементів щільно стикалися. Під місцем контакту розміщувалася ємність із мастильною рідиною, якою слугувало індустріальне масло.

Навантаження задавалося в межах 100...500 Н. Після ввімкнення установки вал починав обертатися зі швидкістю в діапазоні 0,52...1,0 м/с. У процесі руху ролик захоплював мастильний матеріал і подавав його у зону контакту, завдяки чому пара тертя працювала в умовах гідродинамічного змащування чистим індустріальним маслом.

Коефіцієнт тертя визначався за показами електромагнітного датчика, інтегрованого у кінематичну схему машини, та обчислювався за виразом [19]:

$$f = \frac{M}{P \cdot r}, \quad (2.1)$$

де P – прикладене навантаження на вкладиш, Н; r – радіус ролика (0,025 м).

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температуру в зоні контакту фіксували за допомогою термопари, розташованої в спеціальному отворі у вкладиші на відстані приблизно 2 мм від поверхні ролика.

Ступінь зношування оцінювали за втратою маси зразків, яку вимірювали на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю 0,0001 г. Інтенсивність зношування розраховувалася за формулою:

$$I = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S \cdot v \cdot t}, \quad (2.2)$$

де v – швидкість обертання ролика, м/с; Δm – зміна маси зразка внаслідок зношування; S – номінальна площа контакту, м²; ρ – густина матеріалу (для сталі 45 – 7800 кг/м³, для бронзи БрОФ10-1 – 8760 кг/м³); t – час контактування під навантаженням.

Для визначення товщини мастильного шару застосовувався спеціальний пристрій, принцип роботи якого базувався на використанні чотирипровідної електричної схеми (рис. 2.2) [19]. Основою методу є положення, що електричний струм між поверхнями, які контактують, а також величина контактної опору безпосередньо залежать від товщини мастильного шару в зоні **тертя** [19].

Зміни у структурі мастильного шару, його руйнування або відновлення зумовлюють коливання товщини плівки, що, у свою чергу, відображається у варіаціях контактної опору. Останній визначався за значенням падіння напруги на контакті, яке вимірювалося вольтметром.

Після обробки сигналів аналого-цифровим перетворювачем (АЦП 6) отримані дані щодо моменту тертя, температури та падіння напруги автоматично фіксувалися у програмному забезпеченні на персональному комп'ютері (рис. 2.3).

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

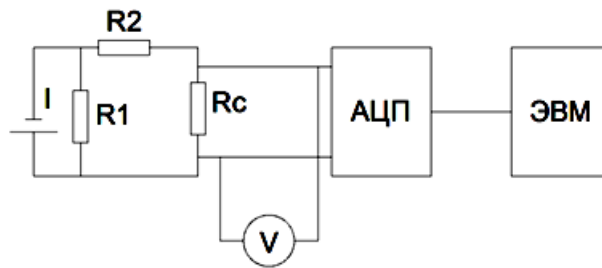


Рисунок 2.2 – Чотирьох провідна електрична схема реєстрації контактного опору: I - джерело струму; R1 - каліброване опір, R2 - магазин опорів; R2 - контактний опір; V - вольтметр

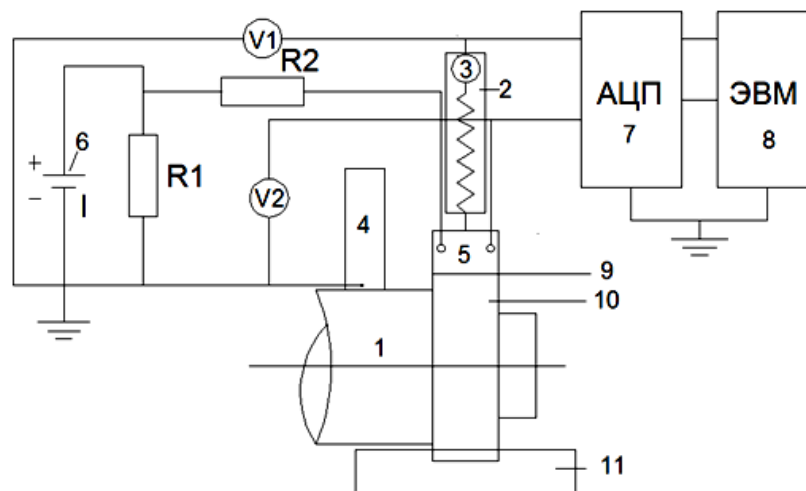


Рисунок 2.3 – Блок-схема пристрою для визначення контактної опору: 1 - вал; 2 - вузол навантаження; 3 - датчик навантаження; 4 - мідно-графітова щітка (1-й струмознімач); 5 - вкладиш (2-й струмознімач); 6 - джерело струму; 7 - аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 8 - електронно-обчислювальна машина (ЕОМ); 9 - мастильний шар; 10 - ролик; 11 - ємність з мастильним матеріалом

У ході експериментів робочі цикли склалися з чергування періодів роботи та пауз. На рисунках 2.4–2.7 наведено графіки, що відображають послідовність інтервалів експлуатації та зупинки.

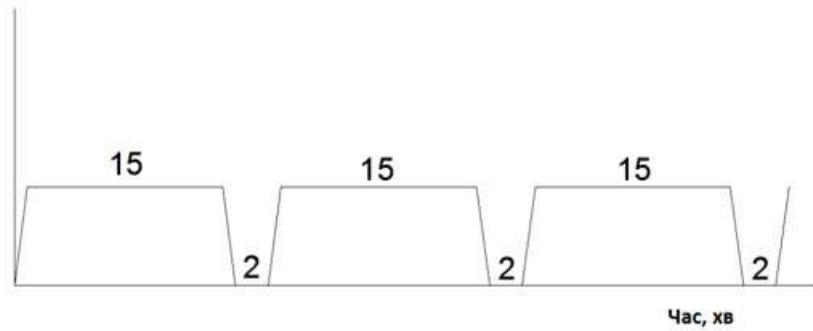


Рисунок 2.4 – Режим випробувань:

15 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт

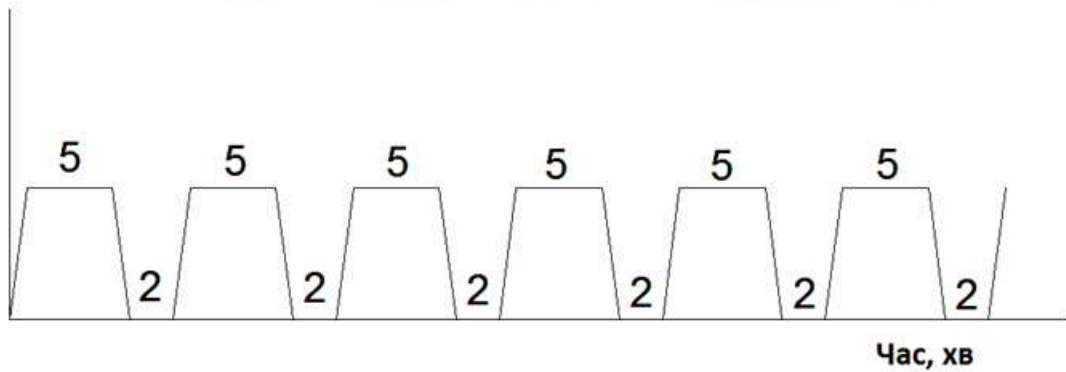


Рисунок 2.5 – Режим випробувань:

5 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт

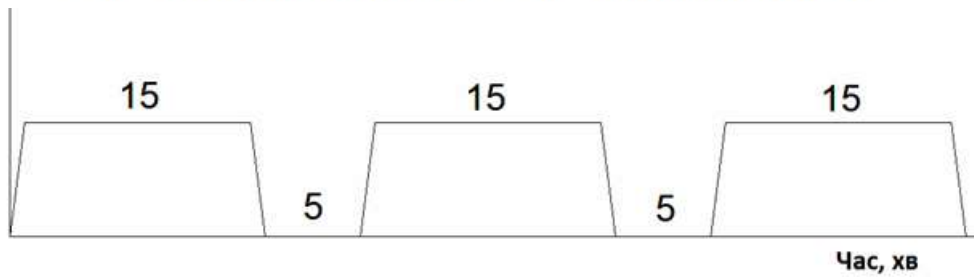


Рисунок 2.6 – Режим випробувань:

15 хв - динамічний контакт, 5 хв - статичний контакт

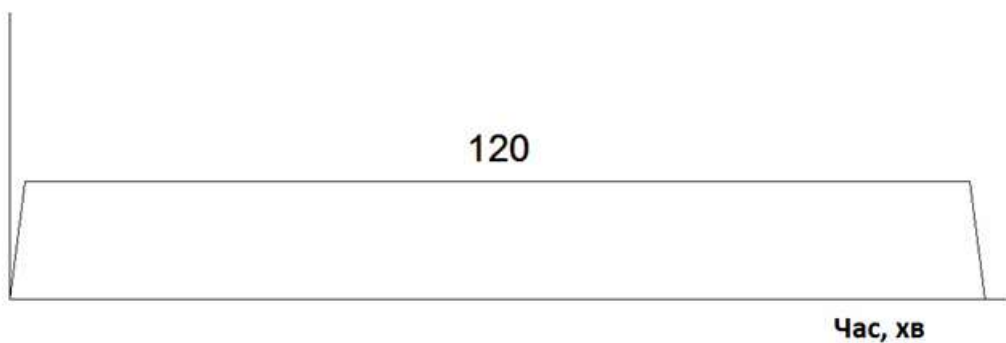


Рисунок 2.7 – Режим випробувань: динамічний контакт – безперервно

Після запуску установки задавали необхідні параметри: частоту обертання ролика та величину навантаження. Тривалість динамічного контакту ролика з вкладишем становила 15 або 5 хвилин, після чого установка відключалася, і обертання припинялося. Далі забезпечувався статичний контакт тривалістю 2 або 5 хвилин, після якого установка знову запускалася, і ролик відновлював рух відносно вкладиша з тими ж режимними параметрами протягом 15 або 5 хвилин. Загальна тривалість динамічної взаємодії у всіх дослідах дорівнювала 2 годинам.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ МАЩЕННЯ І НАВАНТАЖЕННЯ

3.1 Вплив навантаження на процес тертя сталі по бронзі.

Дослідження виконувалися за швидкості ковзання 0,5 м/с у двох режимах: переривчастому («пуск–зупинка») та безперервному. Навантаження встановлювали на рівні 1; 1,5; 2 та 2,5 МПа. Узагальнені результати визначення коефіцієнта тертя наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти тертя при різних режимах навантаження

N, МПа	<i>f</i>			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	<i>v</i> = 0,5 м/с			
1	0,064	0,062	0,084	0,07
1,5	0,070667	0,042667	0,070667	0,114667
2	0,073	0,034	0,073	0,119
2,5	0,088	0,136	0,1368	0,1576

Графік залежності коефіцієнта тертя від навантаження (за результатами таблиці) наведено на рисунку 3.1.

Зі збільшенням нормального навантаження, у випробуваннях з режимами «5 хв – динамічний контакт, 2 хв – статичний» та «15 хв – динамічний контакт, 2 хв – статичний», коефіцієнт тертя при граничному змащенні змінюється за нелінійним законом і проходить через мінімальне значення. На початкових етапах при малих навантаженнях величина тертя в основному визначається реальною площею контакту (ФПК) та опором зсуву граничного шару мастильного матеріалу. Зі зростанням стискального зусилля

цей опір підвищується, що відображається у зростанні п'єзокоефіцієнта та молекулярної складової тертя. Проте фактична площа контакту та п'єзокоефіцієнт збільшуються повільніше, ніж величина прикладеного навантаження, тому значення коефіцієнта тертя на цьому етапі знижується. При подальшому підвищенні навантаження площа контакту та глибина проникнення різко зростають, і сила тертя починає збільшуватися швидше за прикладене навантаження. У результаті коефіцієнт тертя знову підвищується.

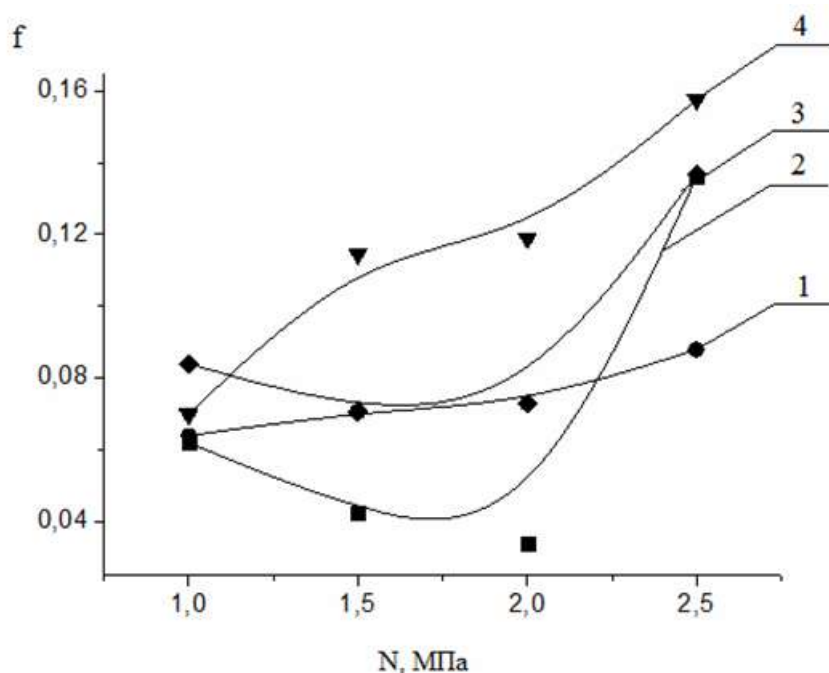


Рисунок 3.1 – Графік залежності коефіцієнта тертя від навантаження при різних режимах навантаження:

- 1 - режим випробувань: 15 хв - динамічний контакт, 5 хв - статичний контакт;
- 2 - режим випробувань: 15 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт;
- 3 - режим випробувань: 5 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт;
- 4 - режим випробувань: динамічний контакт - безперервно

У режимі випробувань з 5 хвилинами динамічного контакту та 2 хвилинами статичного коефіцієнт тертя виявляється більшим порівняно з режимом 15 хв динамічного контакту і 2 хв статичного. Це пояснюється тим,

що коротший час динамічного контакту не дозволяє мастильному матеріалу сформувати міцну та рівномірну масляну плівку на поверхні тертя. Внаслідок цього виступи поверхонь тертьових тіл стикаються безпосередньо, що призводить до підвищення коефіцієнта тертя.

У безперервному режимі тертя коефіцієнт тертя виявляється вищим, ніж у режимі з чергуванням 15 хв динамічного та 5 хв статичного контактів. Це пояснюється впливом температури на процеси тертя: при безперервній роботі температура поверхні поступово підвищується, що знижує в'язкість мастильного матеріалу. Як наслідок, міцність масляної плівки зменшується, і контактні виступи сполучених поверхонь частково стикаються, підвищуючи коефіцієнт тертя.

У режимах з чергуванням динамічного та статичного контакту, а також у безперервному режимі, коефіцієнт тертя зростає зі збільшенням навантаження. При низьких навантаженнях коефіцієнт тертя невеликий, оскільки мастильний шар товстіший, а виступи поверхонь контакту менше взаємодіють. Зі збільшенням навантаження частина мастила видавлюється з контакту, товщина граничного шару зменшується, і контактні нерівності починають взаємодіяти. При високих навантаженнях відбувається руйнування граничного шару, формуються містки зварювання між виступами, що підвищує температуру контактних плям і сприяє ще більшому руйнуванню шару, збільшуючи площу металевого контакту та коефіцієнт тертя.

При підвищенні нормального навантаження товщина граничного шару зменшується, проте опір шару зовнішньому навантаженню зростає, оскільки зв'язок мономолекулярних та прилеглих до них шарів міцніший, ніж у верхніх шарах. Коефіцієнт тертя також залежить від швидкості ковзання.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

За даними таблиці 3.2 побудовано графік залежності коефіцієнта тертя від навантаження для різних режимів роботи (рис. 3.2), де лініями показано залежність при швидкості $v = 0,5$ м/с, а точками — при $v = 1$ м/с.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта тертя при різних режимах навантаження

N, МПа	<i>f</i>			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	<i>v</i> = 1 м/с			
2	0,215	0,175	0,14	0,19

При швидкості 0,5 м/с коефіцієнт тертя коливається в межах 0,01...0,1, навіть за умови рясного змащування ролика в масляній ванні. Це пояснюється тим, що кількість мастильної рідини, яку ролик подає в зону контакту, менша за обсяг рідини, що витікає з цієї зони. Внаслідок цього формується масляний шар, товщина якого менша за сумарну висоту нерівностей контактуючих поверхонь, і відбувається прямий контакт виступів, що забезпечує умови граничного тертя.

При швидкості 1 м/с спостерігається підвищення коефіцієнта тертя. З одного боку, збільшення швидкості сприяє формуванню більш товстого мастильного шару, який здатний повністю розділяти контактуючі виступи, що в теорії має знижувати коефіцієнт тертя. З іншого боку, підвищена швидкість призводить до зростання температури в зоні контакту, що зменшує в'язкість мастила. Зниження в'язкості ослаблює міжмолекулярну взаємодію та опір мастильного шару зсуву, у результаті чого виступи поверхонь можуть стикатися, що збільшує коефіцієнт тертя. При контактному тиску 2 МПа саме другий фактор домінує, що пояснює зростання коефіцієнта тертя на більшій швидкості. Цю закономірність підтверджує рисунок 3.3, де показана залежність температури від

навантаження для різних режимів, а точками відзначено значення температури при швидкості 1 м/с.

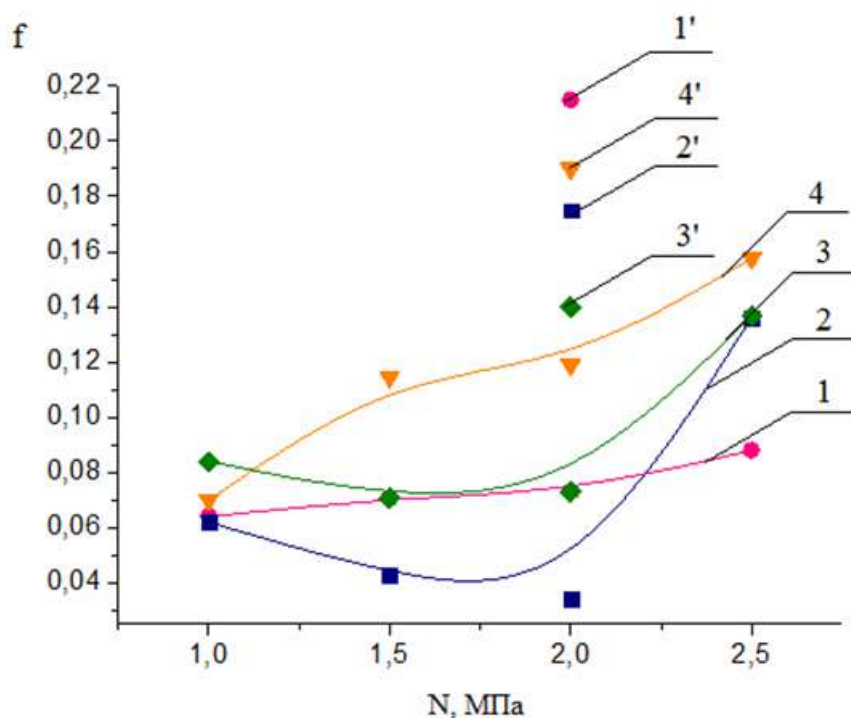


Рисунок 3.2 – Графіки залежності коефіцієнта тертя від навантаження при різних режимах навантаження, лінії - $v = 0,5$ м/с, точки - $v = 1$ м/с:

1,1'- режим випробувань: 15 хв - динамічний контакт, 5 хв - статичний контакт; 2,2'- режим випробувань: 15 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт; 3,3'- режим випробувань: 5 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт; 4,4'- режим випробувань: динамічний контакт - безперервно

Температура має значний вплив на коефіцієнт тертя, оскільки саме від неї прямо залежить в'язкість мастильного матеріалу (табл. 3.3).

Температура відіграє ключову роль у зміні в'язкості мастильного матеріалу, а отже, впливає на процеси тертя, оскільки вона сприяє адсорбції або десорбції граничних шарів і зміні їхніх властивостей.

На основі даних таблиці побудовано графік залежності температури від навантаження для різних режимів навантаження: лініями показано значення при швидкості $v = 0,5$ м/с, а точками — при $v = 1$ м/с.

Таблиця 3.3 – Значення температури при різних режимах навантаження

N, МПа	T, °C			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	v = 0,5 м/с			
1	34	32	33	31
1,5	35	34	34	55
2	38	32	36	67
2,5	78	42	71	72
	v = 1 м/с			
2	101	111	71	115

Графік показує, що підвищення навантаження призводить до зростання температури в зоні контакту, що, у свою чергу, зменшує в'язкість мастильного матеріалу. В'язкість масла безпосередньо впливає на товщину масляного шару між поверхнями тертя: чим більша в'язкість, тим товщій шар плівки. Це пояснюється посиленням міжмолекулярних зв'язків у рідині, що дозволяє більшій кількості молекул пройти через зазор і зменшити число контактуючих виступів, а відповідно, зменшити коефіцієнт тертя.

Навпаки, при низькій в'язкості масляний шар стає тоншим. Через слабкі міжмолекулярні взаємодії молекули масла легко відриваються від поверхні і не встигають заповнити контактну область. Це призводить до збільшення числа контактуючих виступів і, як наслідок, до різкого підвищення коефіцієнта тертя.

Таблиця 3.4 – Значення інтенсивності зношування при різних режимах навантаження

N, МПа	$I_h, \cdot 10^{-8}$			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	$v = 0,5 \text{ м/с}$			
1	0,00152	0,0709	0,0717	0,00152
1,5	0,00305	0,00915	0,0419	0,319
2	0,0625	0,0313	0,162	0,803
2,5	0,35	0,61	0,452	0,893
	$v = 1 \text{ м/с}$			
2	0,0629	0,0344	0,0877	1,03

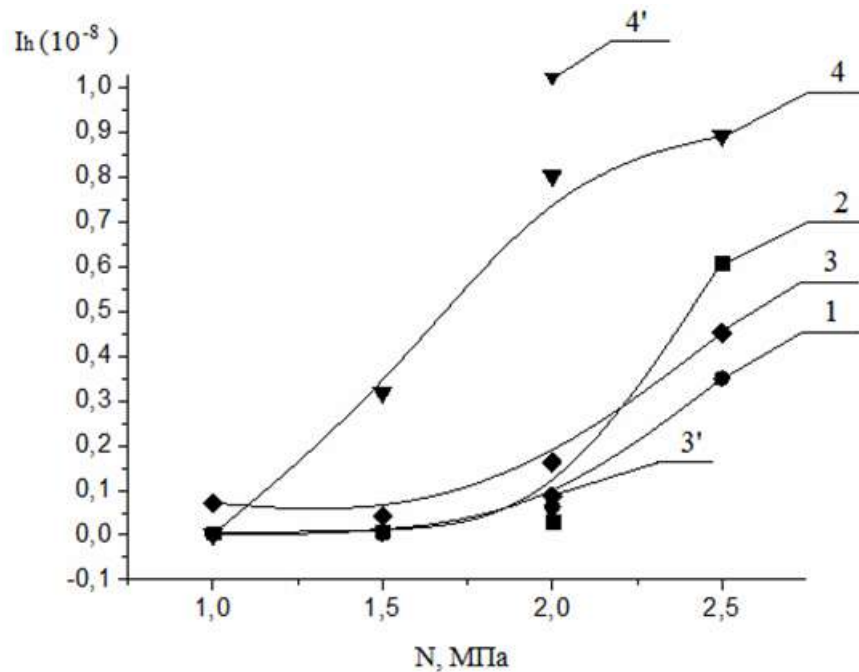


Рисунок 3.4 – Графік залежності інтенсивності зношування від навантаження при різних режимах навантаження, лінії - $v = 0,5 \text{ м/с}$, точки - $v = 1 \text{ м/с}$.
 1,1'- режим випробувань: 15 хв - динамічний контакт, 5 хв - статичний контакт;
 2,2'- режим випробувань: 15 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт;
 3,3'- режим випробувань: 5 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт;
 4,4'- режим випробувань: динамічний контакт - безперервно

Аналіз графіка показує, що інтенсивність зношування зростає зі збільшенням навантаження. Це пояснюється впливом таких факторів, як підвищення температури контактуючих поверхонь та зменшення в'язкості мастильного матеріалу.

При збільшенні навантаження зростає тиск на контактних ділянках та площа цих ділянок, що призводить до збільшення кількості і міцності зварювальних містків, а отже – до підвищення числа пошкоджень і, як наслідок, інтенсивності зношування. Подальше збільшення навантаження зближує атоми контактуючих поверхонь, сприяючи утворенню ще більшої кількості таких містків, що ще інтенсивніше підвищує зношування.

Основним видом зношування, що визначає його інтенсивність, є адгезійне. Його швидкість залежить від навантажень, швидкостей ковзання, температури, матеріалу тертьових поверхонь та властивостей оточуючого середовища. З підвищенням навантаження інтенсивність адгезійного зношування швидко зростає, а при великих навантаженнях ця тенденція посилюється через збільшення числа, розмірів та міцності адгезійних зв'язків між деталями. Підвищена температура в зоні контакту призводить до більш активного перенесення менш міцного матеріалу на сполучені поверхні, підвищуючи ризик катастрофічного зношування і заїдання.

При безперервному режимі роботи інтенсивність зношування вища, ніж у режимі «пуск-зупинка», оскільки деталі під час зупинок встигають охолонути, а в безперервному русі температура постійно зростає, що може сприяти утворенню локально розплавлених ділянок і міцних адгезійних зв'язків.

У режимі «пуск-зупинка» значну роль відіграє втомне зношування. Зі збільшенням нормального навантаження зростає частка пластичної деформації поверхневого шару, підвищується ймовірність незворотного зміщення атомів або макромолекул, формування мікрodefektів і розростання мікротріщин. Вплив навантаження на інтенсивність зношування

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проявляється також через силу тертя та підвищення температури, що знижує опір матеріалу втомному руйнуванню.

Крім того, знос відбувається через виникнення залишкових напружень на певній глибині поверхневого шару, викликаних скупченням дислокацій під впливом ковзання контактної деталі. Вигляд поверхні вкладиша після адгезійного та втомного зношування представлений на рис. 3.5.

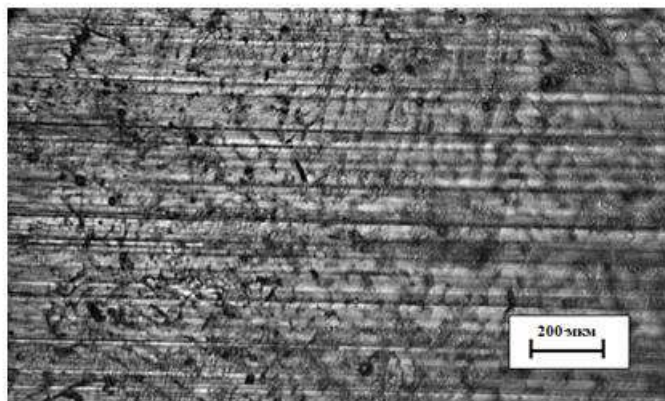


Рисунок 3.5 – Поверхня вкладиша після зношування

Окисне зношування виступає супутнім процесом. Зі зростанням навантаження підвищується ймовірність руйнування оксидної плівки виступами контактуючих поверхонь, що збільшує частку адгезійного зношування і, як наслідок, сприяє підвищенню загальної інтенсивності зношування. При подальшому збільшенні навантаження температура в зоні контакту підвищується, що сприяє утворенню більш товстих оксидних шарів, які легко руйнуються під дією виступів контртіла, що також веде до зростання інтенсивності зношування.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Вплив навантаження на масову втрату матеріалу вкладиша та ролика.

Випробування проводилися при швидкостях 0,5 м/с і 1 м/с у режимах «пуск-стоп» та безперервного руху. При цьому прикладали навантаження 2 МПа. Результати експериментів наведені в таблицях 3.5 – 3.8.

Таблиця 3.5 – Ваговий знос ролика і вкладиша після випробування в режимі «пуск-стоп»: 15 хв динамічний контакт, 5 хв – статичний

Контактний тиск: 2 МПа		
Швидкість ковзання, м/с	Ваговий знос (втрата маси), гр. (10^{-5})	
	вкладиш	ролик
0,5	0,41	- 0,09
1	0,595	0,685

Таблиця 3.6 – Ваговий знос ролика і вкладиша після випробування в режимі «пуск-стоп»: 15 хв динамічний контакт, 2 хв – статичний

Контактний тиск: 2 МПа		
Швидкість ковзання, м/с	Ваговий знос (втрата маси), гр. (10^{-5})	
	вкладиш	ролик
0,5	0,205	-0,035
1	0,325	-0,26

Таблиця 3.7 – Ваговий знос ролика і вкладиша після випробування в режимі «пуск-стоп»: 5 хв динамічний контакт, 2 хв – статичний

Контактний тиск: 2 МПа		
Швидкість ковзання, м/с	Ваговий знос (втрата маси), гр. (10^{-5})	
	вкладиш	ролик
0,5	1,06	0,01
1	0,83	0,445

Таблиця 3.8 – Ваговий знос ролика і вкладиша після випробування при безперервному режимі

Контактний тиск: 2 МПа		
Швидкість ковзання, м/с	Ваговий знос (втрата маси), гр. (10^{-5})	
	вкладиш	ролик
0,5	5,26	-1,7
1	9,76	-0,96

Аналіз результатів експериментів дозволяє зробити кілька висновків. Згідно з даними таблиць, які відображають залежність масового зносу від зміни швидкості, можна стверджувати, що пара тертя функціонувала в умовах змішаного (напіврідинного) тертя. У цьому режимі контактуючі поверхні в основному розділені мастильним шаром, проте окремі виступи нерівностей можуть безпосередньо контактувати між собою. Цьому виду тертя відповідає ділянка 2 на діаграмі Герсі–Штрибек, яка ілюструє перехід від сухого тертя до граничного та вихід на гідродинамічний режим.

Дані таблиць також показують, що при безперервному режимі роботи масовий знос при тих же умовах значно перевищує значення в режимі «пуск-стоп». Це пояснюється кількома факторами. Під час безперервного тертя температура в зоні контакту постійно підвищується, що призводить до появи міцних адгезійних містків між атомами контактуючих тіл. Руйнування таких містків спричиняє видалення матеріалу з поверхні одного з елементів. Одночасно підвищення температури знижує в'язкість мастильного шару, що зменшує його товщину та порушує суцільність плівки. Як наслідок, число контактів виступів поверхонь істотно зростає. Про зменшення товщини мастильного шару свідчать результати експериментів і рисунок 3.6 (табл. 3.9).

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

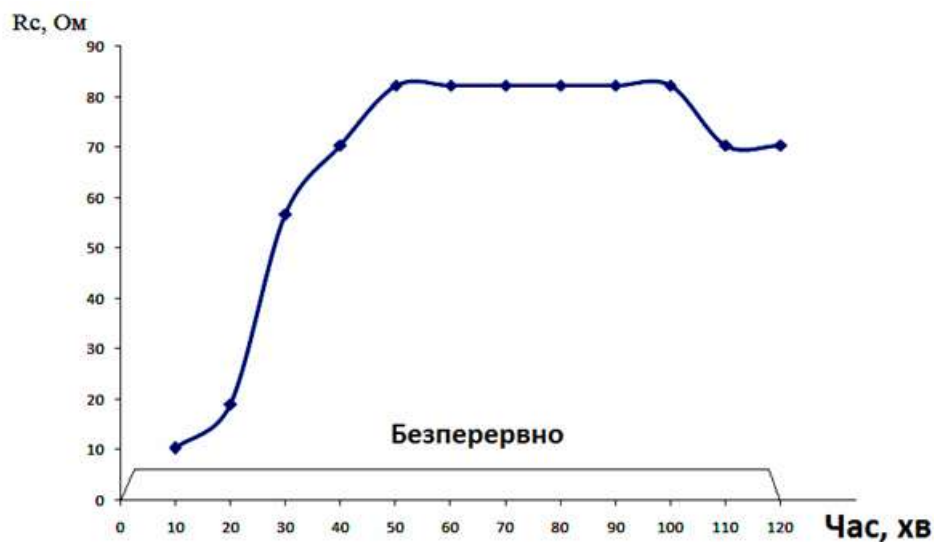


Рисунок 3.6 – Режим випробувань: динамічний контакт - безперервно. При навантаженні 2 МПа, швидкість 0,5 м/с.

Таблиця 3.9 – Значення контактної опору в залежності від режиму випробування

Тривалість випробувань: 120 хв (динамічний контакт)	Значення контактної опору: Rc, Ом
10	10,36364
20	19
30	56,7891
40	70,42857
50	82,33333
60	82,33333
70	82,33333
80	82,33333
90	82,33333
100	82,33333
110	70,42857
120	70,42857

На рисунку 3.6 спостерігається поступове зростання контактного опору R_c , що свідчить про збільшення товщини мастильної плівки до досягнення стабільного значення. Після приблизно 100 хв випробувань контактний опір починає знижуватися. До цього моменту температура контактуючих тіл і мастильного матеріалу піднялася до рівнів, при яких зменшується в'язкість і, відповідно, порушується цілісність мастильної плівки. Порушення суцільності плівки під навантаженням призводить до утворення зварювальних містків на контактних ділянках, що є проявом адгезійного зношування.

Також вагомий внесок у процес зношування роблять абразивні механізми (частинки зносу в мастилі) та втомне зношування. Супутнім видом зношування є окисне, оскільки мастильний матеріал містить кисень.

Результати випробувань показують, що втрата маси ролика має негативне значення, оскільки частини матеріалу вкладиша переміщуються на його поверхню. Для всіх режимів «пуск-стоп» це відображає переважання адгезійного зношування, а додатковим фактором є втомне зношування. Поверхня ролика після випробувань наведена на рисунку 3.7.

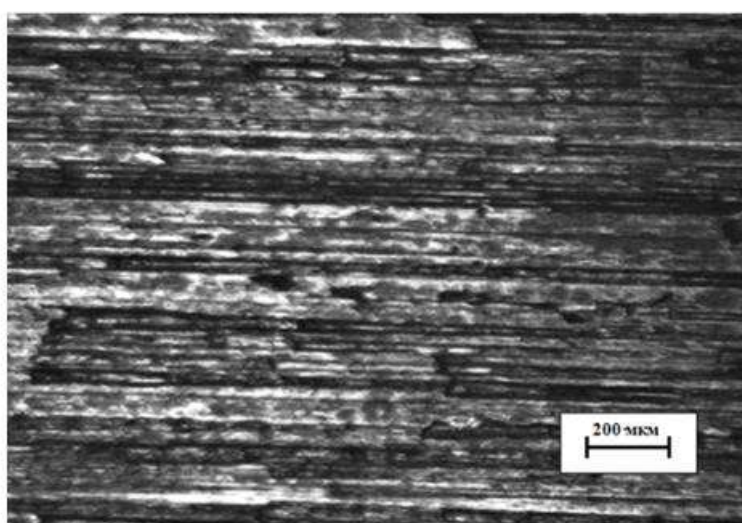


Рисунок 3.7 – Поверхня ролика після зношування

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Це можна пояснити такими причинами: після зупинки приводу машини тертя мастильний матеріал під дією навантаження виходить із зони контакту. Це наочно відображено на рисунках 3.8–3.10, побудованих на основі результатів випробувань (табл. 3.10–3.12).

Таблиця 3.10 – Контактний опір, режим 1.

Режим випробувань 15 хв – динамічний контакт; 5 хв – статичний контакт	Значення контактного опору, R _c , Ом
15	4,10204
5	0,00604
15	7,62069
5	0,00806
15	10,90476
5	0,00402
15	13,70588
5	0,002
15	14,625
5	0,002
15	20,73913
5	0,00402
15	20,73913
5	0,00402
15	20,73913

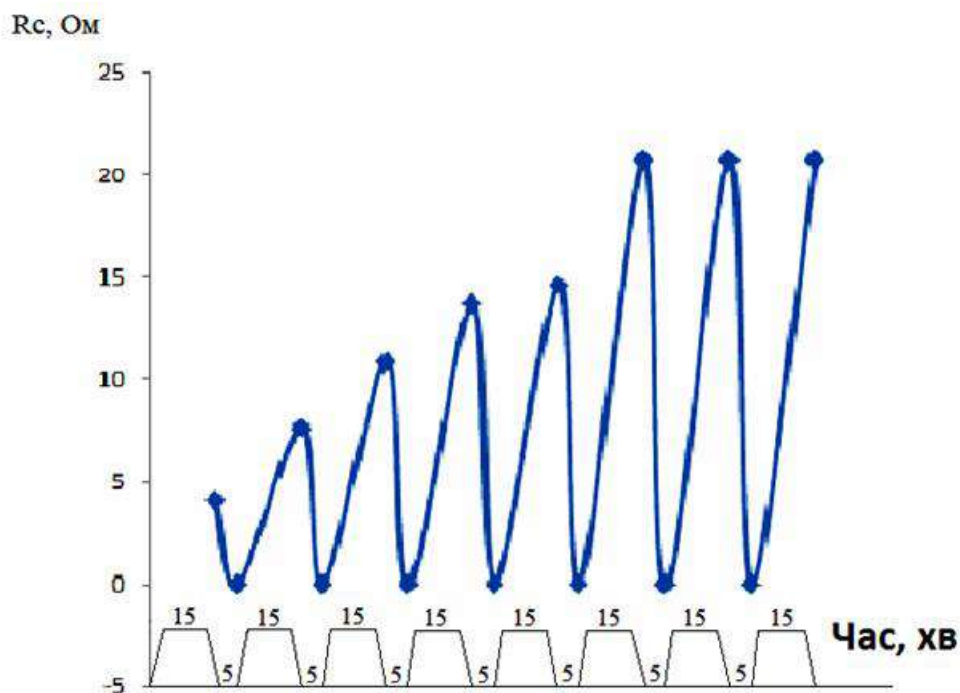


Рисунок 3.8 – Режим випробувань:

15 хв – динамічний контакт, 5 хв – статичний контакт. При навантаженні 2 МПа, швидкість 0,5 м/с

Таблиця 3.11 – Контактний опір, режим 2.

Режим випробувань 15 хв – динамічний контакт; 2 хв – статичний контакт	Значення контактного опору, R_c , Ом
15	6,14286
2	0,0142
15	11,82051
2	0,00806
15	44,45455
2	0,0142
15	82,33333
2	0,01626

Закінчення таблиці 3.11	
15	124
2	0,01833
15	124
2	0,01626
15	124
2	0,01626
15	124

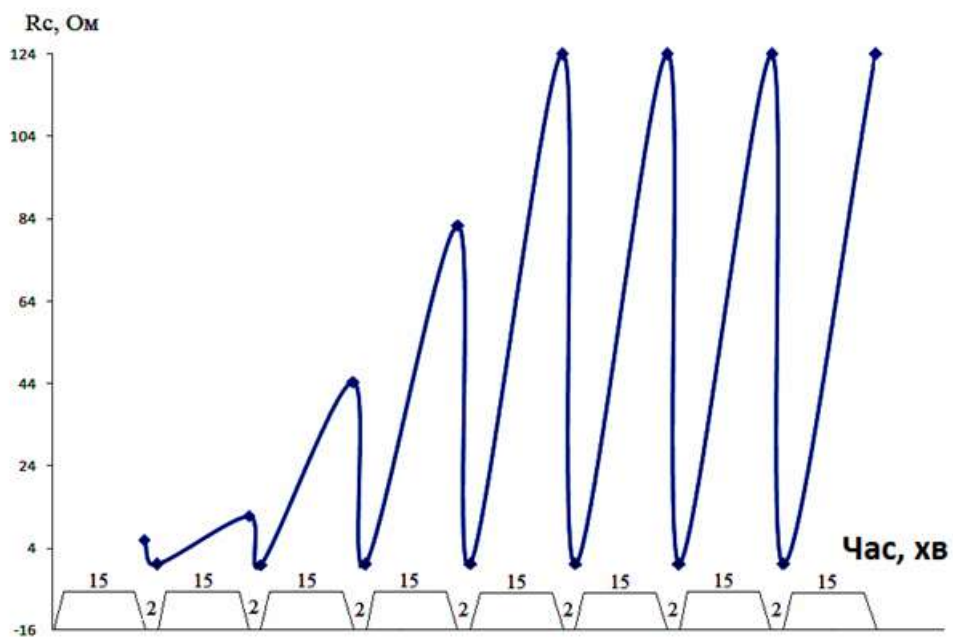


Рисунок 3.9 – Режим випробувань:

15 хв - динамічний контакт, 2 хв - статичний контакт. При навантаженні 2 МПа, швидкість 0,5 м/с

Таблиця 3.12 – Контактний опір, режим 3.

Режим випробувань 5 хв – динамічний контакт; 2 хв – статичний контакт	Значення контактного опору, $R_{\text{д}}$ Ом
5	8,25926
2	0,01215
5	26,77778
2	0,01215
5	30,25
2	0,00806
5	34,71429
2	0,02041
5	44,45455
2	0,0101
5	54,55556
2	0,01215
5	70,42857
2	0,00806
5	99
2	0,01626
5	99
2	0,0101
5	99
2	0,02041
5	99
2	0,0101

Закінчення таблиці 3.12

5	99
2	0,0142
5	99
2	0,01833
5	99
2	0,01626
5	99
2	0,02249
5	99
2	0,01215
5	99
2	0,0395
5	99
2	0,02041
5	99
2	0,02669
5	99
2	0,02881
5	99
2	0,01215
5	99
2	0,02249
5	99

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

вкладиша та його переносу на поверхню ролика. Порівняння результатів випробувань показує, що при однакових навантаженнях знос у безперервному режимі значно вищий, ніж у переривчастому.

3.3 Тертя та зношування при охолодженні мастильного матеріалу для пари «сталь – бронза».

Випробування проводилися при швидкості $v = 1$ м/с та навантаженні 2 МПа у режимах «старт - зупинка» і безперервного руху. Для контролю температури мастильного матеріалу його активно перемішували. Це дозволяло охолодженому нижньому шару змішуватися з нагрітим верхнім шаром, знижуючи середню температуру рідини та контактних поверхонь. Отримані результати наведені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Значення температури для різних режимів навантаження при перемішуванні мастильного матеріалу

N, МПа	T, °C			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	$v = 1$ м/с (з перемішуванням)			
2	37	54	41	105
N, МПа	$v = 1$ м/с (без перемішування)			
2	101	111	71	115

Очікувалося, що при зниженні температури мастильного шару та контактних поверхонь зменшаться коефіцієнт тертя і швидкість зношування. Проте, згідно з даними таблиць 3.14 і 3.15, після перемішування мастильного матеріалу спостерігається збільшення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування порівняно з випробуваннями без перемішування.

Таблиця 3.14 – Значення коефіцієнта тертя для різних режимів навантаження при перемішуванні мастильного матеріалу

N, МПа	f			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	v = 1 м/с (з перемішуванням)			
2	0,22	0,183	0,182	0,205
N, МПа	v = 1 м/с (без перемішування)			
2	0,215	0,175	0,14	0,19

Таблиця 3.15 – Значення інтенсивності зношування вкладиша для різних режимів навантаження при перемішуванні мастильного матеріалу

N, МПа	I _h , · 10 ⁻⁸			
	15-5	15-2	5-2	безперервно
	v = 1 м/с (з перемішуванням)			
2	0,42	0,33	0,023	0,77
N, МПа	v = 1 м/с (без перемішування)			
2	0,0629	0,0344	0,0877	1,03

Отримані результати можна пояснити таким чином: при підвищенні температури мастильного матеріалу відбувається його перемішування. У процесі цього охолоджений нижній шар піднімається вгору разом із частками зносу, що накопичилися на дні. Ці частки потрапляють у зону контакту разом із мастилом і виступають у ролі абразиву. Вони заглиблюються у більш м'який матеріал і дряпають тверду поверхню сполучених деталей. Крім того, якщо сила тертя між абразивною часткою та більш твердим тілом перевищує міцність м'якого матеріалу, відбувається його додаткове ушкодження.

При безперервному режимі та режимі «5 хв – динамічний контакт; 2 хв – статичний контакт» без перемішування інтенсивність зношування була

вищою. Дані таблиці 3.13 показують, що різниця температур при перемішуванні та без нього була незначною, тому постійне перемішування масла під час випробувань не було критично необхідним. Це означає, що частки зносу не піднімалися до поверхні мастильного шару, і провідним видом зношування залишалося поєднання абразивного та адгезійного.

На основі цих спостережень доцільно застосовувати антистрибкові присадки в мастильних матеріалах для вузлів тертя з періодичним режимом роботи. Такою присадкою, наприклад, може бути металевий форміат. При підвищеній температурі присадка розкладається і утворює на контактних плямах металеву плівку з низьким опором зсуву, що дозволяє зменшити коефіцієнт тертя (рис. 3.11) і інтенсивність зношування (рис. 3.12) під час випробувань масла И-8А за навантаження 2 МПа і швидкості 0,5 м/с.

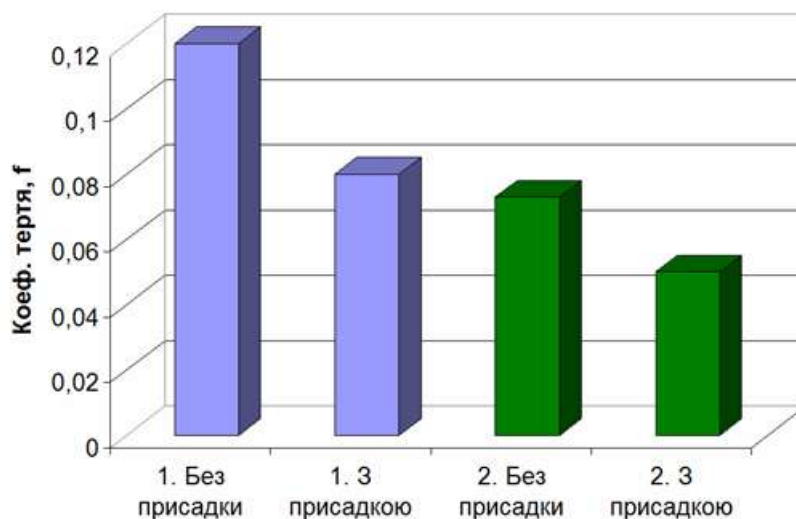


Рисунок 3.11 – Значення коефіцієнта тертя з анти стрибковою присадкою і без неї: 1 – динамічний контакт (безперервно); 2 – динамічний контакт 5 хв, статичний контакт 2 хв;

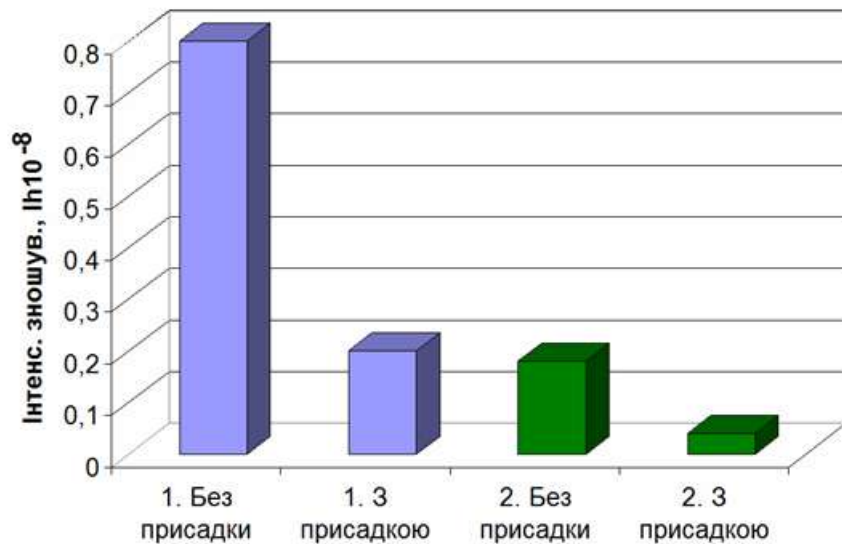


Рисунок 3.12 – Значення інтенсивності зношування з анти стрибковою присадкою і без неї: 1 – динамічний контакт (безперервно); 2 – динамічний контакт 5 хв, статичний контакт 2 хв;

Дослідження показали, що додавання форміату алюмінію до базового масла дозволяє зменшити коефіцієнт тертя приблизно на 40 % та скоротити інтенсивність зношування втричі.

4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МАСЛА З ПЕВНИМ КОМПЛЕКСОМ ПРИСАДОК

4.1 Технологія отримання базового масла.

Процес, під час якого нафтопродукти розділяють за температурою їх кипіння, називається прямою перегонкою або дистиляцією. Фракції, які отримують у результаті цього процесу, прийнято називати дистилятами. Атмосферна дистиляція нафти є обов'язковим початковим етапом її переробки.

Сучасні нафтопереробні установки працюють у безперервному режимі. Вони включають атмосферні та вакуумні ректифікаційні колони, де створюються умови для ефективного випаровування сировини. Основними регулюючими параметрами є температура та тиск. Нафту за допомогою насосів подають у піч, де її нагрівають до 330–350 °С. Після цього гаряча нафта з парами потрапляє у середню частину атмосферної колони, де відбувається додаткове випаровування, а вуглеводні відокремлюються від рідкої частини – мазуту [20].

Пари вуглеводнів піднімаються вгору колони, а рідкий залишок стікає вниз. На шляху руху парів розташовані ректифікаційні тарілки, на яких конденсується частина парів. Температура по висоті колони знижується від максимальної в зоні введення сировини до мінімальної у верхній частині. Таким чином, у колоні відбувається поділ нафтопродуктів на фракції за температурою кипіння: у верхній частині збираються бензинові фракції (30–180...205 °С), нижче – легроїновий дистилят (120–240 °С), гасовий дистилят (150–315 °С), дизельний дистилят (150–360 °С) та газойлевий дистилят (230–360 °С) [20].

Мазут, залежно від свого хімічного складу, може використовуватися або як паливо, або піддаватися подальшій обробці у вакуумній

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ректифікаційній колоні. Перед подачею у вакуумну колонку його нагрівають до температури 420–430 °С. Тиск у вакуумній колоні підтримується на рівні 5300–7300 Па, що дозволяє знизити температуру кипіння важких вуглеводнів і випарувати їх без ризику термічного розкладу. Перевищення температури 430 °С може спричинити розпад вуглеводнів.

У вакуумній колоні вгорі відбирають соляровий дистилят із температурою кипіння 300–400 °С, нижче – масляні фракції, а внизу залишається напівгудрон або гудрон, з якого після глибокого очищення отримують високов'язкі залишкові масла. Продукти первинної переробки нафти називають продуктами прямого вигону.

Перед використанням у виробництві товарних палив і мастильних матеріалів всі нафтопродукти проходять спеціальну очистку. Метод очищення обирають залежно від початкової якості сировини та вимог до кінцевих експлуатаційних характеристик продукту. Глибина та спосіб очищення безпосередньо впливають на властивості мастильних матеріалів.

Після вакуумної дистиляції масляний дистилят за допомогою насоса транспортують у установку кислотного контактного очищення. Цей процес полягає у обробці нафтопродукту розчином сірчаної кислоти концентрацією 96–98 %. В результаті реакції з кислотою асфальтосмолисті речовини та нафтеніві кислоти перетворюються на осаджені продукти. Для підвищення ефективності очищення сірчану кислоту застосовують у пропановому розчині, що зменшує в'язкість нафтопродукту та підвищує розчинність смолисто-асфальтових речовин. Після кислотного очищення продукт додатково обробляють відбілюючою землею, здійснюючи адсорбційне очищення.

Після обробки сірчаною кислотою покращуються в'язкісно-температурні характеристики нафтопродуктів та зменшується їх схильність до коксування.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Кислотно-контактне очищення з використанням відбілюючих глин полягає у тому, що після кислотної обробки масло надходить у контактну установку для взаємодії з адсорбентом. Глину безпосередньо змішують з очищеним продуктом, що забезпечує видалення з нього небажаних полярно-активних компонентів, зокрема органічних і сульфокислот, залишків сірчаної кислоти та кислого гудрону. Для цих цілей застосовують природні глини, такі як гумбрин і зікеєвську землю, або штучно синтезовані адсорбенти, наприклад силікагель. Кількість адсорбенту зазвичай становить 2–5 % від об'єму масла [21].

На схемі установки кислотного контактного очищення (рис. 4.1) показано технологічний процес: масло спершу обробляють сірчаною кислотою у кислотній мішалці з аерацією, після чого кислотний гудрон відділяється, а продукт подається в контактну мішалку. Там масло підігрівається за допомогою парового підігрівача та обробляється відбілюючою глиною.

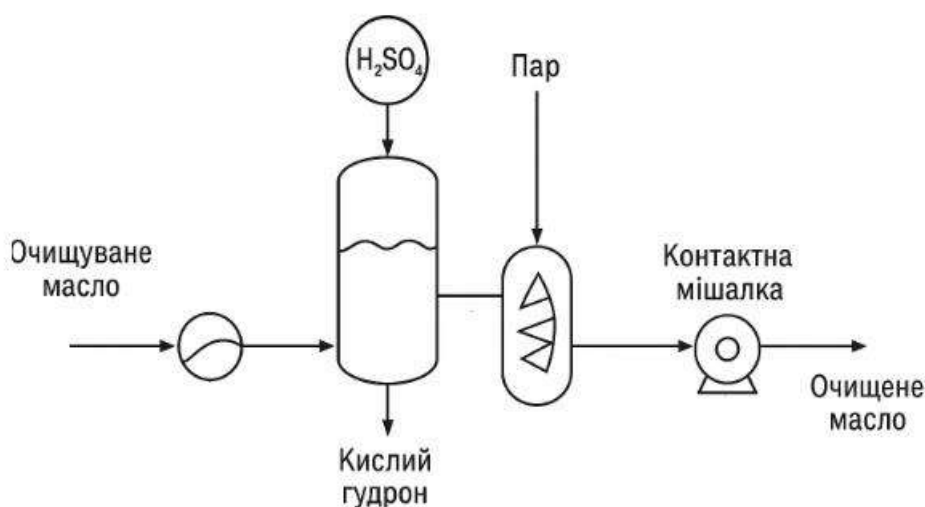


Рисунок 4.1 – Принципова схема регенерації масел за методом очищення відбілюючими землями.

Принцип адсорбційного очищення заснований на здатності пористих мінеральних адсорбентів поглинати домішки з нафтопродуктів. Цей метод ефективно видаляє смоли, нафтеніві кислоти, кисень, сульфокислоти та

					КВРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

залишки розчинників. В якості адсорбентів використовують природні глини, силікагель, синтетичні алюмосилікати та активований окис алюмінію. Ці полярні матеріали, здебільшого складаються з оксидів кремнію та алюмінію, усувають речовини, що надають нафтопродуктам темне забарвлення, через що процес називають очищенням відбілюючими землями.

Процес здійснюється шляхом фільтрації попередньо нагрітого продукту крізь нерухомий шар дрібнодисперсного адсорбенту, розміщеного в колонному апараті. Підігрів необхідний для зменшення в'язкості масла, що сприяє легшому проникненню його у пори адсорбенту. Як сорбційний матеріал застосовують синтетичні алюмосилікати з розміром частинок 0,25–0,50 мм або відбілювальні глини із зернами 0,3–2,0 мм.

Мастила, що пройшли таку адсорбційну очистку, характеризуються підвищеною стійкістю до окислювальних процесів.

4.2 Технологія виробництва масел із присадками.

Найрезультативнішим методом підвищення експлуатаційних характеристик мастильних матеріалів є введення в їх склад спеціальних присадок. При цьому максимальна ефективність досягається у випадку використання попередньо очищених масел [21].

Після завершення кислотного-контактного очищення масло спрямовується в спеціальну ємність (рис. 4.2, позиція 5), звідки надходить у змішувач (6). У цьому апараті відбувається поєднання базового масла з комплексом присадок.

Змішування застосовують для отримання проміжних сортів товарних масел та консистентних мастил на основі стандартних марок, що випускаються підприємствами. Процес проводиться у резервуарах, обладнаних системами підігріву та мішалками. Операція виконується виключно в чистих ємностях. Спочатку готують концентрат присадки, який

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури в ємності (10), після чого відправляється на фасування (11). У другому випадку суміш подають у ємність (14), де до неї додають 1–1,5 % антистрибкової присадки з ємності (13), попередньо підігрітої на установці (12). Після перемішування і витримки при 80 °С протягом 10–15 хв готовий склад спрямовується в ємність (15) для природного охолодження та подальшої фасовки на столах (16) [20, 21].

Заключним етапом є перевірка якості виготовленого продукту. Для цього застосовують машину тертя СМТ-1 та чотирикулькову установку, а також визначають температуру застигання, температуру спалаху, в'язкість мастила та його антистрибкові характеристики. Відібрані зразки масла розміщуються на столі (17) (рис. 4.2).

Антифрикційні властивості оцінюють за допомогою коефіцієнта тертя на машині СМТ-1 (18), що працює за принципом «ролик – частковий вкладиш». Під час випробування обертовий ролик занурюють у ванночку з тестованим мастилом і з'єднують із вкладишем. Дослід проводять при постійному навантаженні 1000 Н та частоті обертання 300 с^{-1} протягом 2 годин. Аналіз здійснюють на основі комплексу показників: моменту тертя, температури вкладиша під час експерименту та інтенсивності зношування деталей. Зміни моменту сили фіксуються на пульті керування й відображаються на діаграмі у вигляді графіка, що спрощує інтерпретацію результатів. Ступінь зношування ролика та вкладиша визначають за втратою їхньої маси на аналітичних вагах з точністю $1 \cdot 10^{-4}$ г. Температуру вкладиша контролюють за допомогою вбудованої терморпари, тоді як температуру мастила в камері – за допомогою терморпари у поєднанні з потенціометром КСП-4 із температурним калібруванням.

Перед початком випробувань контактні поверхні ролика та вкладиша припрацьовують до стану, коли площа фактичного контакту перевищує 50 % від номінальної.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Протизносні та антипінтингові характеристики мастильних матеріалів визначають за допомогою чотири кулькової машини тертя (19). Її конструкція являє собою піраміду з чотирьох сталевих кульок, що контактують одна з одною. Три нижні кульки нерухомо фіксуються в чашці, наповненій досліджуваним мастилом, а верхня, закріплена у шпинделі, обертається відносно них під дією заданого навантаження при частоті обертання $(1460 \pm 70) \text{ хв}^{-1}$. Оскільки проковзування кульок під час випробувань не допускається, процес відбувається в умовах тертя ковзання.

Перед проведенням дослідження усі кульки та деталі машини, що контактують із мастильним матеріалом (чашка з кріпленням нижніх кульок, а також вузол кріплення верхньої кульки), ретельно очищають від залишків мастила розчинником і висушують.

Випробування здійснюють за температурами, визначеними нормативно-технічною документацією для конкретного мастильного матеріалу. Кульки закріплюють у шпинделі та чашці, після чого чашку заповнюють мастилом так, щоб воно повністю покривало кульки. Потім поступово прикладають навантаження і вмикають електродвигун. Температуру в зоні тертя, де розташована термопара, підтримують із допустимим відхиленням не більше $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Час нагрівання вузла тертя до $300 \text{ }^\circ\text{C}$ не має перевищувати 35 хв.

Режим роботи машини залежить від типу випробування: при визначенні критичного навантаження, навантаження зварювання та індексу задирів тривалість роботи становить $(10,0 \pm 0,2) \text{ с}$, а при оцінюванні показника зносу – $(60,0 \pm 0,5) \text{ хв}$. Після завершення дослідів вузол охолоджують до температури нижче $40 \text{ }^\circ\text{C}$, мастило зливають, а у випадку появи задирок на краях плям зносу їх видаляють шабером.

Діаметр плям зносу на трьох нижніх кульках вимірюють у двох взаємно перпендикулярних напрямках із точністю не менше $0,01 \text{ мм}$. За кінцевий результат приймають середнє арифметичне значення вимірів.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Критичне навантаження визначають послідовним збільшенням прикладеного навантаження: починають із мінімального значення ряду і поступово підвищують його, доки не буде досягнуто граничного діаметра плями зносу. Навантаження R_k , при якому шар мастильного покриття руйнується і різко зростає інтенсивність зношування, вважається критичним.

Навантаження зварювання (Рзв) – це таке навантаження, при якому між твердими тілами виникають міцні з'єднання внаслідок руйнування мастильного шару. Його визначають поступовим підвищенням прикладеного навантаження доти, поки не відбудеться різке збільшення сили тертя, що свідчить про схоплювання поверхонь.

Оцінювання антипінгових властивостей проводять на чотирикульковій машині тертя, але за іншою схемою: нижні три кульки не фіксуються в кюветі, а вільно переміщуються в кільцевому жолобі за її межами. У цьому випадку створюються умови тертя кочення. Випробування тривають до появи коливань коефіцієнта тертя, що пов'язано з утворенням на поверхнях кульок пітингових вибоїн. Дослідження можуть виконуватися у два етапи – при низькому та підвищеному навантаженні.

Температура застигання характеризує працездатність масла за низьких температур і визначається за критерієм його прокачуваності. Для випробувань використовують масло, яке попередньо не нагрівали. Прилад для визначення цієї характеристики складається з двох скляних стаканів: зовнішнього та внутрішнього. Зовнішній заповнюють охолоджувальною сумішшю і теплоізолюють ватою чи тканиною, а у внутрішній наливають спирт, що виконує роль проміжної охолоджувальної ванни.

У суху пробірку наливають шар масла висотою приблизно 3 см, вставляють термометр так, щоб його ртутна кулька розташовувалась у центрі шару, і охолоджують у спиртовій ванні. Коли температура охолоджувального спирту досягає значення, встановленого стандартом, пробірку з маслом витримують вертикально 5 хв, після чого нахиляють під кутом 45° і

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

залишають ще на 5 хв. Потім пробірку знову ставлять вертикально і протягом 1–2 хв спостерігають за рівнем масла. Якщо його поверхня залишається нерухомою, масло вважають загуслим; якщо ж рівень зсунувся – воно ще не загусло.

Температура спалаху – це температура, при якій під час нагрівання масла його пари утворюють з повітрям вибухонебезпечну суміш, що спалахує при піднесенні відкритого полум'я. Прилад для визначення цього показника являє собою металеву (мідну або сталеву з мідним покриттям) посудину з досліджуваним зразком, яку нагрівають газовим пальником. Коли температура масла досягає значення на 10 °С нижче очікуваної, відкривається заслінка, і лампочка автоматично нахиляється над отвором. Якщо пари спалахують і на поверхні з'являється блакитне полум'я, зафіксовану температуру приймають як температуру спалаху.

Цей показник є одним із ключових для оцінки мастильних матеріалів, адже разом із в'язкістю він визначає фракційний склад нафти, з якої отримано масло, а також характеризує його випаровуваність. Під час інтенсивного випаровування об'єм масла зменшується, в'язкість зростає, а гази, що утворюються, можуть бути токсичними та вибухонебезпечними.

В'язкість — це властивість мастильного матеріалу чинити опір переміщенню його шарів відносно один одного. Вона є однією з головних характеристик масла, оскільки безпосередньо впливає на його змащувальну здатність, рівномірність розподілу по поверхнях тертя та, як наслідок, на інтенсивність зношування деталей. Крім того, від величини в'язкості залежать енергетичні втрати при роботі двигунів та інших механізмів.

Значення в'язкості визначається як внутрішніми факторами — хімічним складом і будовою молекул, так і зовнішніми умовами: температурою, тиском і швидкістю зсуву. Тому разом із числовим показником завжди зазначаються умови, за яких проводилось вимірювання. Найбільш важливими для роботи двигуна є температура та швидкість зсуву,

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тому випробування проводять у режимах, максимально наближених до експлуатаційних.

Для визначення в'язкості застосовують два основні типи приладів (віскозиметрів):

1. Віскозиметри закінчення — використовуються для вимірювання кінематичної в'язкості шляхом визначення часу вільного витікання рідини через капіляр або калібрований отвір. Дослідження проводять при стандартних температурах 40 °С та 100 °С. Одиниця виміру — сСт (мм²/с).

2. Ротаційні віскозиметри — застосовуються для визначення динамічної в'язкості. Випробуване масло заливають у простір між двома коаксіально розташованими циліндрами. При обертанні внутрішнього циліндра рідина створює зусилля, яке передається на зовнішній циліндр, закріплений на підшипниках. Внаслідок цього виникає деформація пружної балки. За величиною цієї деформації, враховуючи попереднє калібрування, визначають сили внутрішнього тертя рідини відповідно до закону Ньютона.

$$\eta = \frac{F(D-d)}{2\pi^2 n D^2 L}, \quad (4.3)$$

де F - сила тертя; D - діаметр зовнішнього циліндра; d - діаметр внутрішнього циліндра; n - частота обертання; L - висота циліндра (мастильного шару).

Ось відредагований варіант тексту без плагіату, збережено технічний зміст:

Антистрибкові властивості масел визначають за допомогою установки, що забезпечує зворотно-поступальний рух однієї деталі відносно іншої. У випробуванні використовують два зразки: один виконаний у формі пластини, інший — має клиноподібний поперечний переріз. На поверхню

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

плоского елемента наносять 9 мл досліджуваного масла, після чого зразки зводять у контакт, навантажують і вимірюють коефіцієнт тертя.

У крайових ділянках контакту фіксується підвищене значення статичного коефіцієнта тертя ($f_{ст}$), тоді як у центральній частині, де швидкість відносного руху найбільша, значення кінематичного коефіцієнта ($f_{кін}$) зменшується. Показником антистрибкових властивостей вважають співвідношення $f_{ст} / f_{кін}$: чим ближче воно до одиниці, тим вища якість масла за цим параметром.

Після завершення кожного циклу випробувань використане масло відводять у спеціальну ємність для відходів.

Принципова схема процесу виробництва мастильного матеріалу із заданим комплексом присадок подана на рисунку 4.3 [21].

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

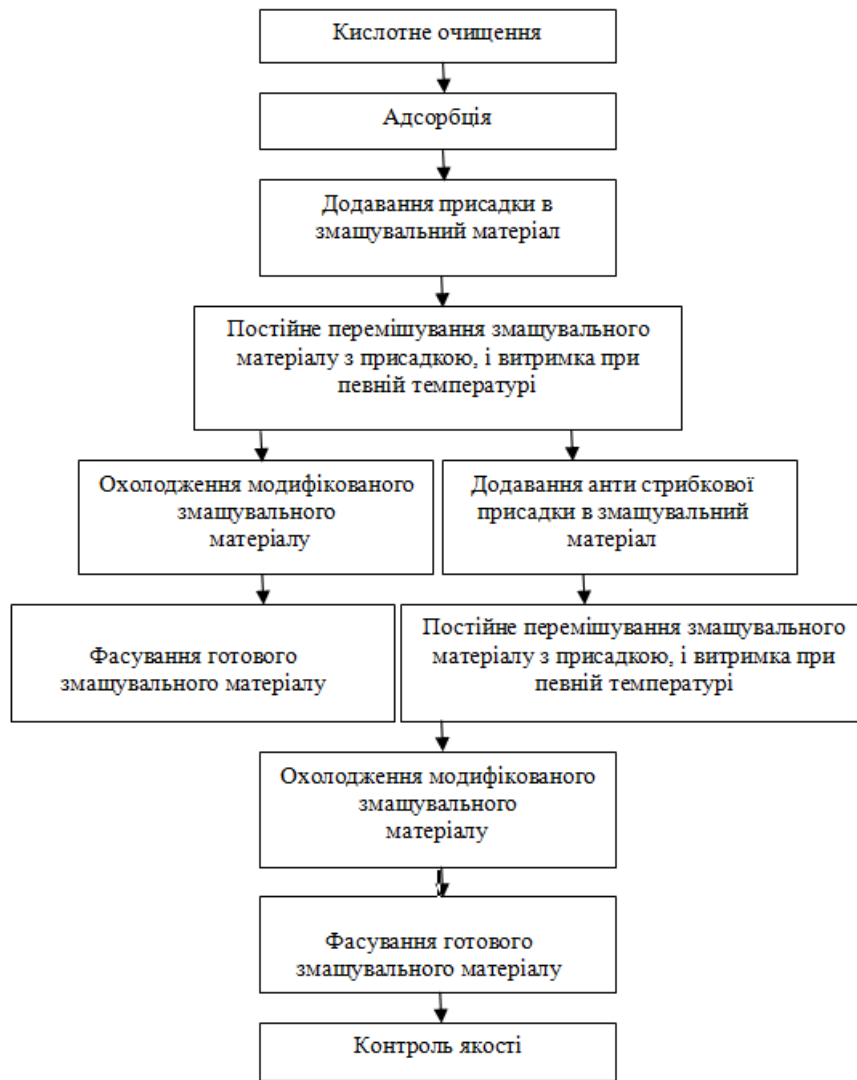


Рисунок 4.3 – Блок - схема виробництва масел з присадками.

					КВРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Коефіцієнт тертя бронзи по сталі зростає при зменшенні часу динамічного контакту та досягає максимуму при безперервному ковзанні через нагрівання і зниження в'язкості масла.

2. Із підвищенням навантаження та швидкості тертя коефіцієнт тертя й інтенсивність зношування вкладиша зростають через руйнування граничного шару, утворення зварних містків та падіння в'язкості мастильного матеріалу.

3. У безперервному режимі без охолодження масло перегрівається, що у 1,5–2 рази знижує його в'язкість і до 100 разів підвищує зношування.

4. Запропоновано застосування антистрибкових присадок на основі форміатів металів, зокрема алюмінію, які формують захисну плівку й зменшують коефіцієнт тертя на 40%, а зношування — утричі.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Транспортні енергетичні установки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 264 с.

2. Орисенко О.В. Експериментальні дослідження змащувальних властивостей моторної оливи nissan motor oil 10w–30 за критерієм міцності адсорбованої плівки / О. В. Орисенко, А. І. Криворот, М. В. Шаповал, М. О. Скорик // Вісник ВПІ, 2025, вип. 3, С. 161–167.

3. Пашечко М. (2024). Аналіз ринку мастильних матеріалів. Економіка та суспільство, (68). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-48>

4. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення (62330). – Київ : Держстандарт України, 1994. – 27 с

5. Внуков Ю. М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навчальний посібник / Ю. М. Внуков, В. О. Залого. – 2-ге вид., стер. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 273 с.

6. Обертюх, Р. Р. Триботехніка машинобудівної галузі : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий. – [Вид. 2-ге, перероб. та доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 123 с.

7. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.

8. Bowden F. P. (1951) The Friction and Lubrication of Solids Available to Purchase F. P. Bowden; D. Tabor; Frederic Palmer Am. J. Phys. 19, p. 429 <https://doi.org/10.1119/1.1933017>

9. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л.,

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гудь В.З., Левкович М.Г., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 544 с.

10. Dziejczak A., Lubas J., Bochnowski W., Adamiak S.: The mechanisms of tribological wear in lubricated sliding bearings composed of soft bearing alloys with borided steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology vol. 230, 2016, 350–363.

11. Триботехніка і надійність машин : навчальний посібник / Ю. О. Харламов та ін. Сєвєродонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. - 184 с.

12. J. Lubas. The Effect of Engine Oil on Friction and Wear of Surface Layers / J. Lubas, W. Szczypiński-Sala // TRIBOLOGIA, 2/2017, p. 107–112

13. Sala R, Węglarz K, Suchecki A. Analysis of lubricating oil degradation and its influence on brake specific fuel consumption of a lightduty compression-ignition engine running a durability cycle on a test stand. Combustion Engines. 2023;195(4):109-115. <https://doi.org/10.19206/CE-169488>

14. Devlin M. Common properties of lubricants that affect vehicle fuel efficiency: A North American historical perspective. Lubricants. 2018;6(3):68. <https://doi.org/10.3390/lubricants6030068>

15. Idzior M. Aging of engine oils and their influence on the wear of an internal combustion engine. Combustion Engines. 2021;185(2):15-20. <https://doi.org/10.19206/CE-138033>

16. Kardos S, Pietrikova A. Evaluation of motor oil characteristics and degradation factors for possibilities of continuous diagnostics. Acta Electrotechnica et Informatica 2016;16: 20-24. <https://doi.org/10.15546/aei-2016-0010>

17. Матеріалознавство. Навчальний посібник: навчально-методичний комплекс для студентів денної і заочної форм навчання / А.В. Галико, О.В. Кузик, В.М. Кропивний, А.В. Кропивна, Л.А. Молокост – Кіровоград: КОД, 2015. – 168 с.

					КВРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Захарчук О.В. Аналіз ринку пально-мастильних матеріалів в Україні. Науковий вісник Херсонського державного університету. 2014. Вип. 5(1). С. 181-184. URL: http://www.ej.kherson.ua/journal/economic_05/44.pdf

19. Савуляк В. І. Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 76 с.

20. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення. Упор. В.Я.Чабанний. – Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2008. – 353 с.

21. Сучасні паливно-мастильні матеріали: стан та поступ розвитку. Ч.1. Паливні матеріали: Монографія. [За ред. Г.О. Сіренка]. – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2016. – 208 с.

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 24331.01.20.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79