

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно–технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2025 р.
Зав. кафедри професор
(науковий ступінь, вчене звання)
В.В.Дідур
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

магістр

(освітній рівень)

**тема роботи: «Підвищення трибологічних властивостей підшипників
кочення шляхом застосування модифікованих мастильних матеріалів»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м–ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7

«Агроінженерія»

Шевчук Володимир Володимирович

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент, Петриченко Є.А.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно–технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____
Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

В.В. Дідур
“ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студенту _____ **Шевчуку Володимиру Володимировичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Підвищення трибологічних властивостей підшипників кочення шляхом застосування модифікованих мастильних матеріалів»

керівник роботи _____ доцент Петриченко Є.А. _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“14” листопада 2025 р. № 01–06/261 _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 25.11.2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: способи зниження коливань машинно–тракторних агрегатів; літературні джерела; шляхи підвищення тягово–зчіпних показників колісних тракторів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- дослідити підвищення трибологічних характеристик підшипників кочення шляхом використання модифікованих мастильних матеріалів;
- проаналізувати наявні на ринку автохімії присадки, що мають чинні ліцензії та сертифікати відповідності;
- знижити коефіцієнт тертя в підшипникових вузлах шляхом введення добавки ТМК до консистентного мастила Літол-24;
- розробити методику та алгоритм проведення випробувань і сформулювати практичні рекомендації щодо застосування добавок у сервісному обслуговуванні.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження; конструктивне рішення встановлення здвоєних коліс на тракторі ХТЗ–242К;

показники економічної ефективності;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко–економічне обґрунтування	Петриченко Є.А., доцент		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При– мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2025 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2025 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2025 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2025 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2025 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2025 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2025 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Шевчук В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Петриченко Є.А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

У дипломній роботі досліджено підвищення трибологічних характеристик підшипників кочення шляхом використання модифікованих мастильних матеріалів. Проаналізовано наявні на ринку автохімії присадки, що мають чинні ліцензії та сертифікати відповідності. Окрему увагу приділено зниженню коефіцієнта тертя в підшипникових вузлах шляхом введення добавки ТМК до консистентного мастила Літол-24. Розроблено методику та алгоритм проведення випробувань і сформульовано практичні рекомендації щодо застосування добавок у сервісному обслуговуванні. Робота містить пояснювальну записку обсягом 68 сторінок і 12 слайдів демонстраційних матеріалів.

Ключові слова: експлуатація, працездатність, присадки, гідросилікат магнію, підшипниковий вузол, мастильні оливи, добавка, коефіцієнт тертя, випробування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1.Загальні відомості про підшипники.....	9
1.2.Критерії працездатності підшипників кочення	13
1.3.Аналіз причин відмов підшипників кочення	13
1.4.Поліпшення антифрикційних і противозносних властивостей пластичних мастильних матеріалів за допомогою твердих та металоплакуючих добавок.....	20
1.5.Мастильні матеріали для підшипників кочення	23
2. ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА	30
2.1.Основні напрямки підвищення довговічності пар тертя	30
2.2.Досліджувані мастильні композиції	31
2.3.Будова та особливості підшипників кочення	33
2.4.Методика вибору типу підшипника кочення. Теоретична частина.....	37
3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	46
3.1.Методика проведення вимірів і дефектації підшипників кочення.....	46
3.2.Лабораторна установка для досліджень	50
3.3.Підготовка до випробування зразків.....	51
3.4.Методика проведення ресурсних випробувань підшипників кочення ...	53
3.5.Дослідження основних характеристик пластичних мащень з добавкою ТМК	54
3.6.Дослідження мастильних властивостей пластичних мащень, модифікованих добавкою ТМК	55
3.7.Рекомендації із застосування добавки ТМК із пластичними мащеннями в підшипниках кочення	57
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	59
4.1.Загальні відомості про охорону праці на підприємстві	59
4.2.Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів на ділянці з діагностування та технічного обслуговування.....	60
4.3.Заходи по забезпеченню захисту працівників від дії шкідливих та	

небезпечних факторів	62
4.4.Правила безпечного виконання робіт при діагностуванні та об- слуговуванні двигуна	63
4.5.Дії у разі настання надзвичайної ситуації	64
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	66
ВИСНОВОК.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69

ВСТУП

Довговічність автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин значною мірою визначається інтенсивністю зношування їхніх вузлів і деталей. Експлуатаційні спостереження показують, що 80–90 % відмов припадає саме на знос елементів конструкції [1, 2]. Суттєвим чинником зниження надійності виступають підшипники кочення, ресурс яких у більшості випадків обмежується втомними пошкодженнями.

Застосування підшипників кочення дає змогу замінити тертя ковзання тертям кочення, що знижує приведений коефіцієнт тертя до 0,0015–0,006 (умовна величина, яка враховує сукупні втрати в підшипнику й віднесена до діаметра вала). Стандартизована конструкція дозволяє організувати їх масове виробництво та суттєво здешевлює виготовлення. Крім того, підшипники кочення потребують меншої витрати мастильних матеріалів і мають менший осьовий габарит (за довжиною), ніж підшипники ковзання. Сукупність цих переваг забезпечила широке впровадження підшипників кочення, які в багатьох галузях машинобудування майже повністю витіснили підшипники ковзання [3].

Обсяги випуску підшипників кочення у провідних промислових країнах обчислюються сотнями мільйонів штук на рік. Вітчизняні підприємства виготовляють підшипники із зовнішнім діаметром від 1,5 до 2600 мм і масою від 0,5 г до 3,5 т. Розширення можливостей керування процесами тертя та зношування сьогодні пов'язують насамперед із застосуванням високоякісних мастильних матеріалів: відомо, що саме змащення не меншою мірою, ніж матеріал деталей, визначає ресурс підшипників кочення.

Без систематичного та якісного змащування транспортні засоби, сільськогосподарські машини й промислові механізми швидко виходять із ладу; отже, прогрес у техніці неможливий без удосконалення мастильних матеріалів. Тому поліпшення складу та властивостей мастил є одним із ключових шляхів підвищення надійності підшипникових вузлів тракторів і агромашин [3, 4].

Нині ринок пропонує широкий спектр присадок, що покращують протизадирні та протизносні властивості олив. Водночас інформації щодо

ефективних добавок саме для пластичних мастил усе ще бракує. Метою цієї роботи є перевірка можливості підвищення довговічності підшипників кочення автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин шляхом поліпшення мастильних характеристик пластичних мастил завдяки введенню добавки ТМК (тверда змащувальна композиція).

Актуальність магістерського дослідження зумовлена завданням зменшити сили тертя між тілами кочення та доріжками й обмежити знос елементів підшипника, у тому числі від проковзування, через використання добавки ТМК як компонента мастильного матеріалу. Достовірність отриманих результатів щодо збільшення ресурсу, зниження коефіцієнтів, сил і моментів тертя та підвищення зносостійкості забезпечується застосуванням випробувального обладнання, яке дає змогу з високою точністю вимірювати необхідні параметри в процесі тестувань, а також обробкою даних із використанням сучасних засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення.

1. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Загальні відомості про підшипники

Підшипник — це опора або напрямна, що сприймає навантаження і забезпечує відносне переміщення елементів механізму у заданому напрямку. Його головна функція — утримувати в просторі деталі, які обертаються, приймаючи на себе діючі навантаження [3, 4]. За характером тертя підшипники поділяють на два типи: ковзання та кочення. У підшипниках ковзання робочі поверхні шийки вала та вкладиша (повністю чи частково розділені мастильним матеріалом) переміщуються одна відносно одної в режимі ковзання.

Для підшипників кочення типовою є нижча вартість кулькових модифікацій порівняно з роликowymi тих самих габаритів, тож їх частіше застосовують за малих та помірних навантажень. Невелика площа контакту між доріжками та тілами кочення дає змогу працювати на високих швидкостях із меншими утомними руйнуваннями й нижчим тепловиділенням, ніж у роликowych підшипників.

Конструктивно підшипник кочення зазвичай містить зовнішнє і внутрішнє кільця, тіла кочення (кульки або ролики) та сепаратор, який фіксує їх взаємне розташування. У деяких виконаннях одне або обидва кільця відсутні — тоді тіла кочення котяться безпосередньо по валу чи по посадковій поверхні корпусу.

Класифікація та позначення підшипників кочення:

- за геометрією тіл кочення (рис. 1.1).

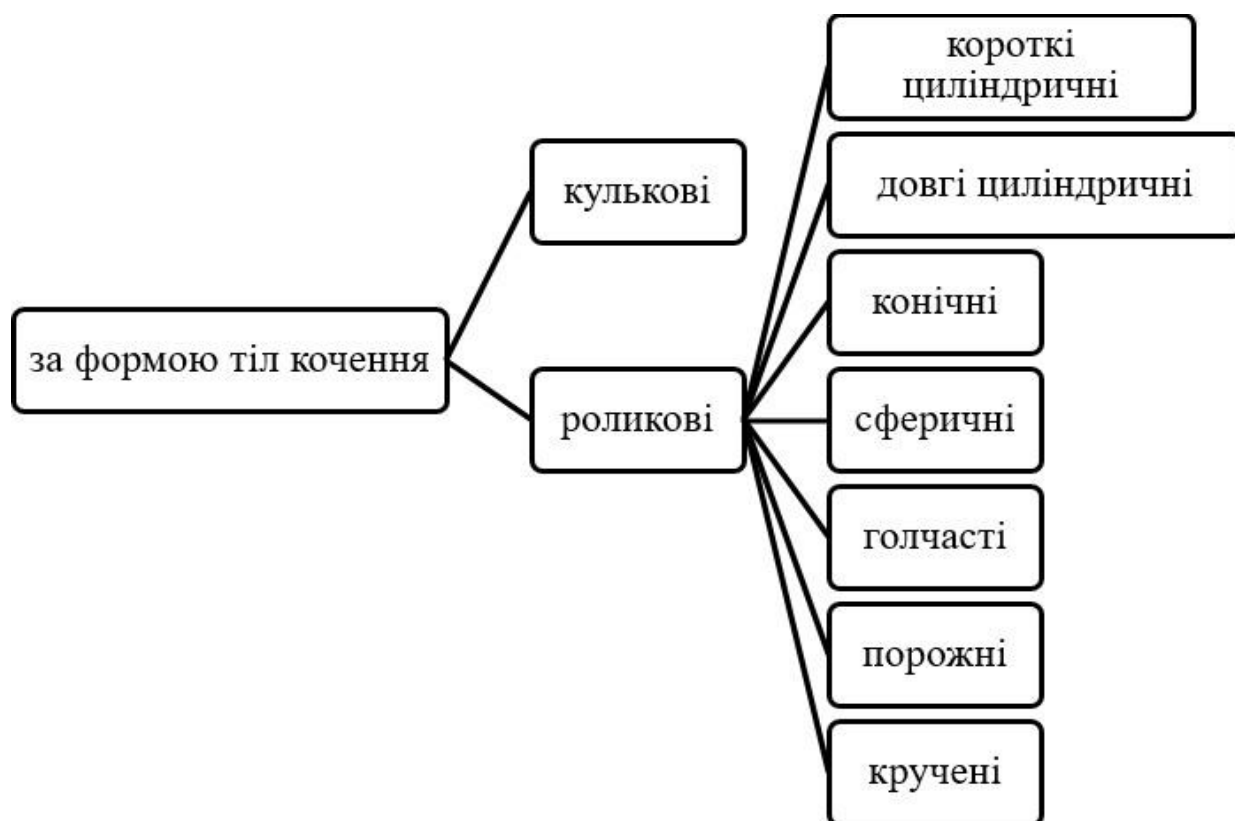


Рисунок 1.1 – Класифікація тіл кочення

— за напрямом сприйманого навантаження:

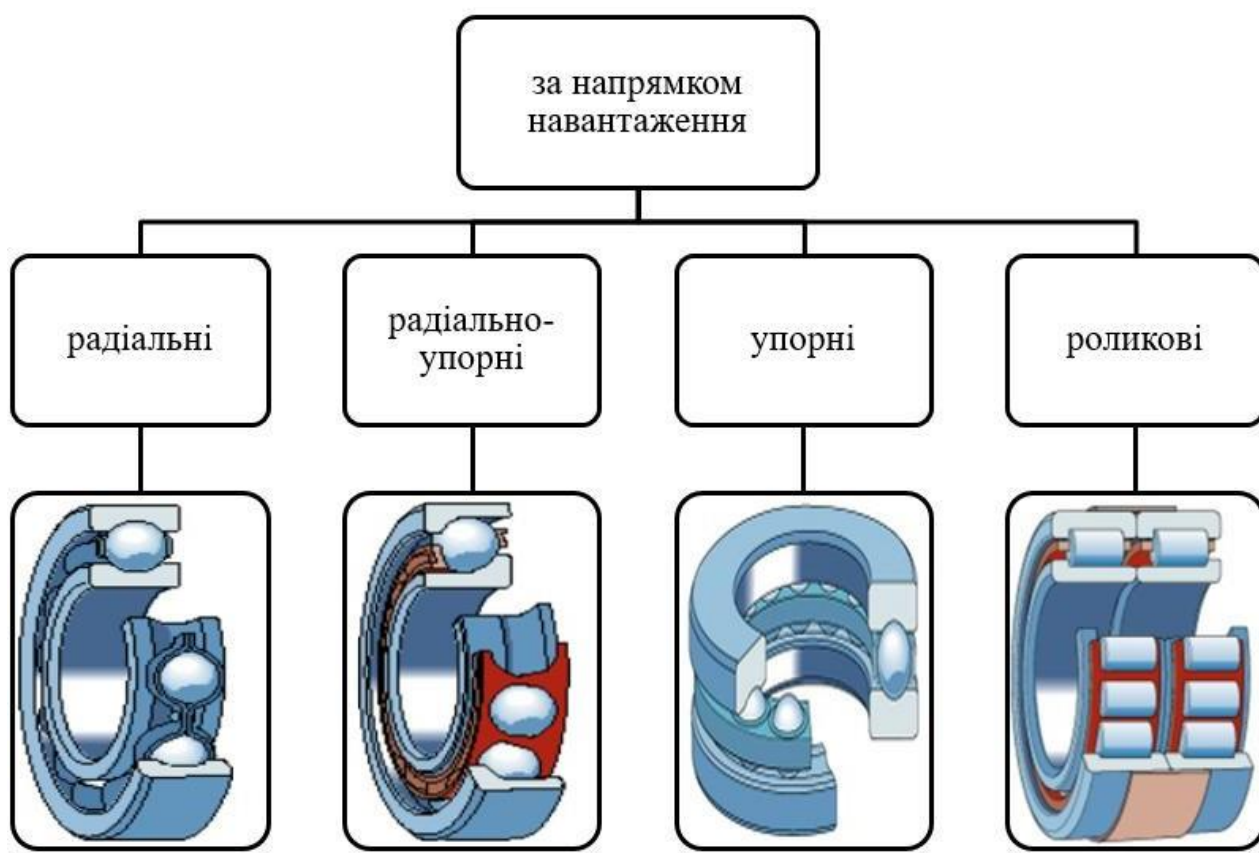


Рисунок 1.2 – Класифікація підшипників за напрямком навантаження

Радіальні кулькові підшипники. Виокремлюють два базові різновиди: з технологічною канавкою для введення кульок і без неї. Існують також спеціальні виконання під конкретні умови, зокрема дворядні підшипники, здатні сприймати підвищені радіальні навантаження. До окремого класу належать самоустановні (сферичні) підшипники, які компенсують невелику неспіввісність між валом і корпусом.

Радіально-упорні підшипники. Призначені для роботи з комбінованими навантаженнями. Співвідношення радіальної та осьової складових визначається кутом контакту між доріжками кочення та віссю підшипника.

Упорні підшипники. Основне призначення — сприймання осьових сил і фіксація вала за віссю. Конструктивною особливістю є взаємне розташування кільця, відстань між якими лежить у площині, перпендикулярній до осі обертання. Зазвичай комплект включає дві доріжки кочення (плоскі або з жолобками) та сепаратор із тілами кочення.

Роликові підшипники. Завдяки більшій площі контакту між роликами та кільцями вони, як правило, витримують вищі навантаження, ніж кулькові того самого габариту. Придатні для середніх і важких режимів, добре переносять ударні дії та менше деформуються, оскільки контактні напруження нижчі через збільшену контактну зону. Різновиди: циліндричні, голчасті, сферичні та конічні. Окремо виділяють підшипникові вузли, коли підшипник постачається у зібраному корпусі.

— за кількістю рядів тіл кочення розрізняють одно-, дво- та багаторядні підшипники.



Рисунок 1.3 – Класифікація підшипників за кількістю рядів тіл кочення

– за співвідношенням габаритних розмірів підшипники поділяють на серії. За однакового посадкового (внутрішнього) діаметра підшипники одного типу можуть відрізнятися зовнішнім діаметром і шириною, тобто належати до різних діаметральних і ширинних серій. Із ростом габаритів зростає вантажна здатність, але зменшується гранична частота обертання.

– класи точності встановлені стандартом (у порядку підвищення): 8, 7, 0, 6X, 6, 5, 4, 2, Т. Клас визначає допуски розмірів і точність геометричної форми елементів підшипника.

– за спеціальними вимогами випускають виконання: теплостійкі, високошвидкісні, мал шумні, корозійностійкі, немагнітні, а також такі, що працюють із самозмащенням.



Рисунок 1.4 – Класифікація підшипників за спеціальними вимогами.

1.2. Критерії працездатності підшипників кочення

Працездатність підшипників оцінюють за двома основними критеріями [3, 4].

Статична вантажопідйомність C_0 — це таке навантаження, за якого у найбільш навантаженому тілі кочення виникає сумарна залишкова деформація величиною $10^{-4}D_\omega$ (де D_ω — діаметр тіла кочення).

Динамічна вантажопідйомність C_r — постійне радіальне навантаження, яке підшипник здатен сприймати за ресурсі 10^6 обертів.

Номінальна динамічна вантажопідйомність C і номінальний строк служби пов'язані емпіричною залежністю, розраховується за формулою 1.1

де: L — номінальна довговічність, млн обертів;

C — номінальна динамічна вантажопідйомність, Н;

P — еквівалентне робоче навантаження, Н;

m — показник степеня: для кулькових підшипників $m = 3$, для роликових $m = 10/3 \approx 3,33$;

a_1 — коефіцієнт надійності;

a_2 — коефіцієнт, що враховує сукупний вплив якості металу та умов експлуатації; його значення лежить у межах 0,7 ... 1,40.

1.3. Аналіз причин відмов підшипників кочення

Ефективні способи підвищення довговічності можливі лише за умови чіткого розуміння причин пошкоджень поверхневих шарів деталей підшипника, їх фізичної природи та закономірностей розвитку процесів. На рис. 1.5 подано структуру причин вибракування підшипників кочення: провідною є зношування.

Другу позицію за питомою вагою займають руйнування сепараторів. Далі за значущістю йдуть провертання кілець на валах і в корпусах, втомні ушкодження, вм'ятини на доріжках кочення та відколи кілець, тощо.

Для підшипників уніфікованих редукторів характерні значні зноси, ознаки втомного руйнування, поломки сепараторів і випадки провертання кілець. Частки окремих видів дефектів у комбайнів різних марок (і навіть у різних вибірках однієї марки) можуть відрізнятися, адже співвідношення формують численні змінні чинники: рівень навантаження, властивості абразивних частинок, що потрапляють у мастило, а також ґрунтові умови в зоні роботи картоплезбирального комбайна.

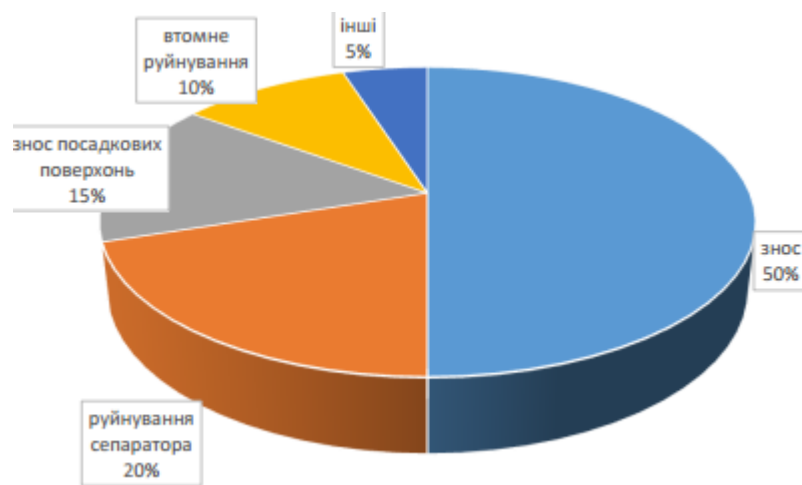


Рисунок 1.5 – Розподіл причин вибракування підшипників кочення сільськогосподарської техніки.

На рис. 1.6 подано класифікацію чинників, що зменшують довговічність підшипників кочення. Умовно їх поділяють на три групи: експлуатаційні, конструктивні та технологічні; останні дві зазвичай об'єднують у спільну категорію — конструктивно-технологічні.

Причини першої групи переважно зумовлені рівнем дотримання правил користування технікою. Суттєве подовження ресурсу підшипників можливе за рахунок підвищення кваліфікації ремонтного персоналу, застосування спеціальних стендів, знімачів і пристроїв під час розбирання/складання, своєчасного змащування та заміни фільтрувальних елементів системи змащення, а також оперативної заміни ущільнювальних (герметизуючих) елементів тощо.

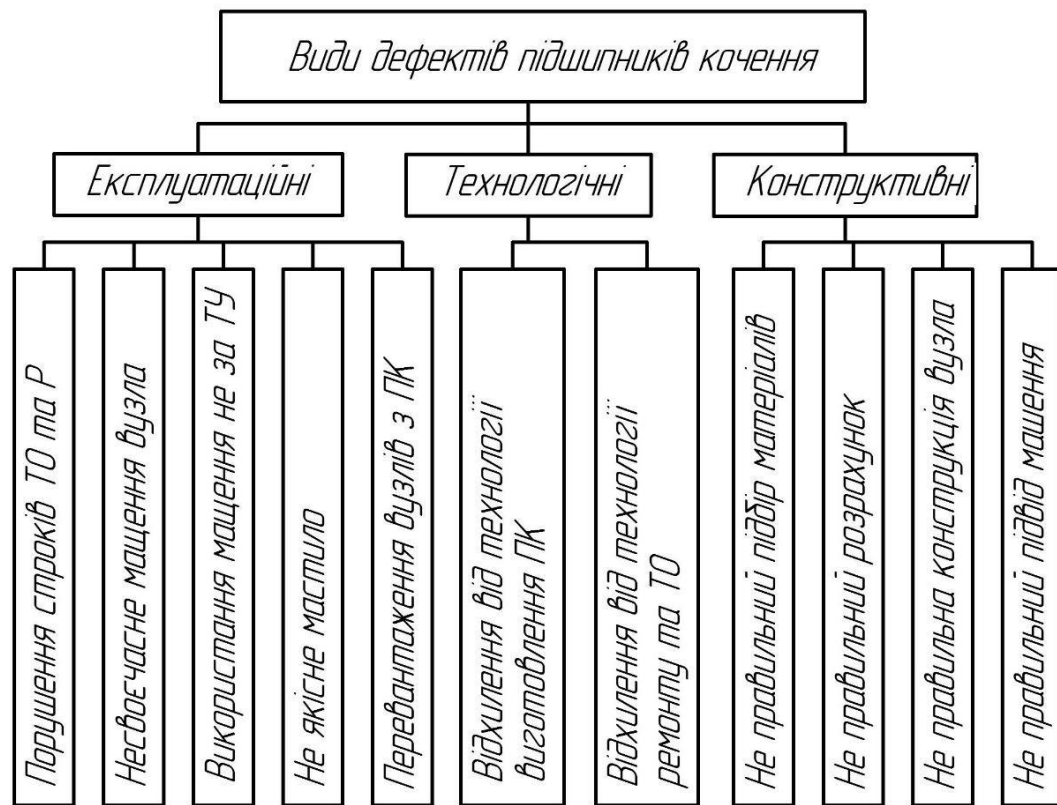


Рисунок 1.6 – Класифікація причин зниження довговічності підшипників.

До другої групи належать чинники, пов'язані зі стабільністю якості серійних підшипників і дотриманням технологій виготовлення та ремонту машин. Якість підшипника визначається: коректним добром матеріалів, мастил і конструктивної схеми; узгодженістю розмірів деталей та раціональними внутрішніми зазорами; правильним вибором режимів механічної й термічної обробки та способів отримання заготовок; належним операційним і вихідним контролем; достатнім рівнем автоматизації процесів виробництва й контролювання.

Ключовим фактором довговічності є також суворе дотримання технології виготовлення та ремонту деталей і вузлів, що визначають умови роботи підшипника: посадки, допуски, співвісність, а також геометричні похибки на кшталт овальності чи конусності. Надмірна шорсткість робочих поверхонь призводить до швидкого зростання радіального зазору на початку експлуатації (через змінання мікронерівностей), підсилює вібрації та сприяє передчасній відмові. Відхилення геометрії деталей викликають локальні контактні перенавантаження й прискорюють втомне викришування.

До типових причин другої групи відносять порушення технології виготовлення чи ремонту: овальність і конусність посадкових поверхонь, що спричиняють нерівномірний розподіл навантаження між тілами кочення та втомні пошкодження; порушення норм співвісності, що веде до перекосів, защемлення тіл кочення, інтенсивного зносу та поломок. Якісне складання, яке забезпечує оптимальні посадки кілець, істотно впливає не лише на ресурс самого підшипника, а й на довговічність усього вузла. Поширений дефект — ослаблені посадки, що викликають провертання кілець і прискорений знос посадкових поверхонь, доріжок кочення та кульок. Оскільки більшість гнізд під зовнішні кільця розміщені у корпусних деталях — складних та дорогих елементах сучасних машин — їх відновлення або заміна під час ремонту потребують значних витрат, які можуть сягати до 45 % вартості ремонту вузлів і агрегатів.

Основні види пошкоджень підшипників наведено на рис. 1.7–1.19.



Рисунок 1.7 – Втомне руйнування доріжки кочення.



Рисунок 1.8 – Викришування робочої поверхні.



Рисунок 1.9 – Абразивне зношування: пошкодження доріжки кочення.



Рисунок 1.10 – Атмосферна корозія поверхонь.



Рисунок 1.11 – Фретинг-корозійне ураження поверхонь.



Рисунок 1.12 – Відбитки (бринелювання) на доріжках кочення.



Рисунок 1.13 –Неправильне бринелювання: відбитки на доріжці кочення внаслідок передавання монтажного зусилля через тіла кочення.



Рисунок 1.14 – Електроерозійний пітінг доріжок кочення: кратери на кульках, спричинені проходженням сильного струму.

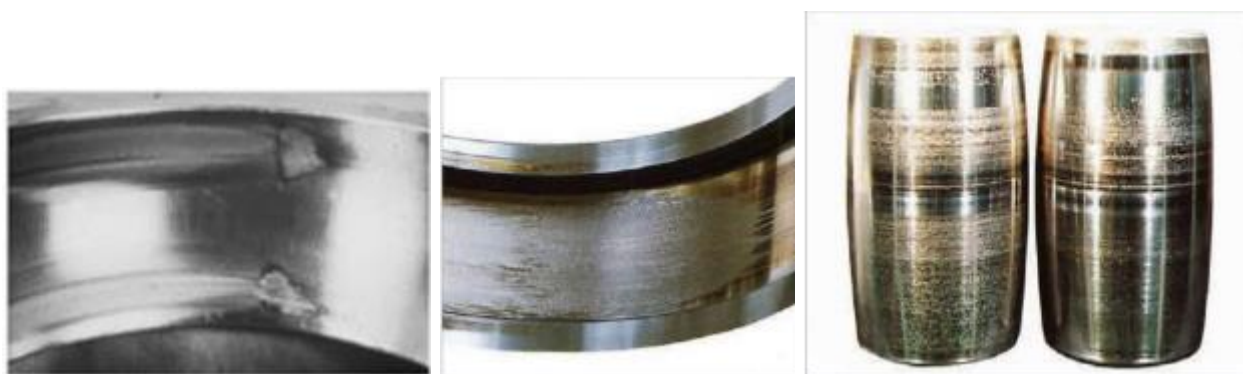


Рисунок 1.15 – Адгезійні пошкодження тіл і доріжок кочення внаслідок недостатнього змащення.

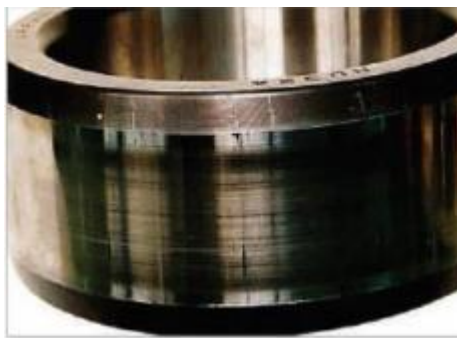


Рисунок 1.16 – Пошкодження підшипника, спричинені помилками під час складання (недостатня кваліфікація).

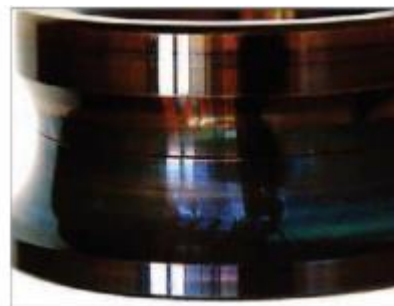
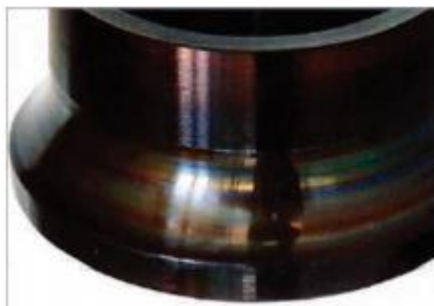


Рисунок 1.17 – Змінення кольору та термічні пошкодження металу через недостатнє змащення й перегрів.



Рисунок 1.18 – Розколювання елементів підшипника (тріщини та розколи).





Рисунок 1.19 – Пошкодження сепаратора підшипника.

1.4. Поліпшення антифрикційних і противозносних властивостей пластичних мастильних матеріалів за допомогою твердих та металоплакуючих добавок

Застосування твердих дисперсних добавок є перспективним шляхом удосконалення властивостей мастильних матеріалів. Водночас наукові засади їх використання для мастил різного складу поки що опрацьовані недостатньо [6].

До найрезультативніших і багатоцільових наповнювачів належать графіт, дисульфід молібдену (MoS_2) та нітрид бору (BN). Окрім них, у пластичні мастила вводять сульфіді й селеніди деяких металів (WS_2 , TiS_2 , CdS , WSe_2 , TiSe_2), інші солі «м'яких» металів і полімерні компоненти; епізодично застосовують також слюду й азбест [7, 8, 9].

Головна мета введення таких добавок — підвищити змазувальну здатність, зміцнити мастильну плівку в зоні контактів, покращити герметизувальні та захисні властивості, зменшити витискання мастила з підшипникового вузла, знизити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування елементів підшипника кочення [10].

Порошкоподібні тверді добавки мають відповідати низці вимог: висока адгезія до металевих поверхонь; добре змочування базовою оливою/згущувачем; висока чистота (98,5–99,5 %) без абразивних домішок; дрібна та вузькорозподілена дисперсність; хімічна, гідролітична й термічна стійкість.

Найчастіше використовують графіт, дисульфід молібдену та полімерну присадку ПТФЕ — їх ефективність у пластичних мастилах підтверджено значною кількістю публікацій.

Введення порошків «м'яких» металів, їх оксидів чи солей також істотно покращує триботехнічні параметри. До таких добавок належать високодисперсні порошки міді, олова, свинцю, цинку, бронзи, латуні, срібла, алюмінію та

відповідних сплавів. Їх дія зумовлена високою адгезійною здатністю частинок: дрібнозерниста фракція з великою питомою поверхнею підсилює змазувальну спроможність і подовжує ресурс мастильної плівки, що підвищує довговічність підшипникового вузла. Це пов'язано з явищами вибіркового переносу, «металоплакування» та формуванням мідьвмісних шаруватих сполук із високими антифрикційними властивостями.

Коли розчинення міді не відбувається і вибіркового переносу не реалізується, діє ефект металоплакування — на поверхні тертя утворюється зміцнювальна плівка, що також покращує трибологічні характеристики мастила. Це веде до зростання ресурсу підшипника кочення завдяки: зниженню контактних напружень (через збільшення фактичної площі контакту при заповненні мікронерівностей), захисній дії плівки від водневого зношування та від втомних руйнувань при циклічних навантаженнях.

Ультрадисперсний халькопірит одержують із природної сировини шляхом багаторазового подрібнення в кульовому млині. Склад халькопіриту можна подати як комбінацію $\text{Fe} + \text{CuS} + \text{S}$, а співвідношення компонентів варіює залежно від вихідної руди.

Останніми роками зростає інтерес до нанорозмірних матеріалів (порядку 0,0140 нм), синтезованих детонаційним методом у середовищі CO_2 [18]. Серед них — ультрадисперсний алмазо-графітовий порошок. Ряд дослідників припускає можливість його використання як твердої присадки для підвищення якості пластичних мастил [10–13].

Оскільки властивості таких порошоків у мастильних системах вивчені недостатньо, у роботі [14] запропоновано механізм дії алмазо-графіту: вуглець у порошок хімічно інертний і не взаємодіє безпосередньо з металом, але високі локальні температури в зоні контакту разом із поверхнево-активними речовинами мастила спричиняють насичення приповерхневих шарів атомарним вуглецем. Це знижує питому поверхневу енергію, зменшує адгезійну складову тертя та, відповідно, коефіцієнт тертя. Механічно частинки, заповнюючи мікропоглиблення, збільшують реальну площу контакту і підвищують адгезію мастильної плівки. Подібні висновки наведено й в інших публікаціях [15].

У [16] запропоновано класифікацію твердих присадок, що покращують антифрикційні та протизносні характеристики мастильних матеріалів — за розчинністю, типом компонентів і механізмом дії. Підсумкові дані подано в табл. 1.1. На думку авторів, найбільш перспективною є 7-ма група присадок, оскільки за своєю природою вони не каталізують окиснення базових олив, їх частинки легше проникають у зазори та ефективно розділяють пари тертя за високих питомих навантажень. Також висловлено припущення, що при зближенні поверхонь алмазні частинки можуть працювати як мікро-«кулькопідшипники».

Таблиця 1.1 — Групи добавок, застосовувані в мастильних матеріалах.

Номер групи	Тип, характеристика	Характер позитивного ефекту	Основна негативна дія
1	Маслонерозчинні колоїдні, що містять MoS_2 ,	Зниження сили тертя	Випадання присадки з масла
2	Олієрозчинні, що містять MoS_2 , Zn, S, P	Зниження сили тертя, величини зношування	Корозія деталей з кольорових металів і сплавів, забруднення фільтрів
3	Олієрозчинні беззольні, що містять S, P, N	Зниження сили тертя, величини зношування	Корозійна активність
4	Маслонерозчинні водорозчинні, колоїдні, що містять ПТФЕ	Зниження сили тертя, величини зношування, витрати масла	Ріст коксівності масла, випадання присадки з масла, токсичність відпрацьованих газів
5	Олієрозчинні, що містять бор	Зниження величини зношування	Немає даних

6	Олієрозчинні, металоплакуючі утримуючі мідь олово, свинець, нікель	Зниження сили тертя, величини зношування, витрати масла	Корозія деталей з кольорових металів і сплавів, погіршення термоокислювальної стабільності
7	Ультрадисперсні порошки графіту, алмаза, нітриду бору й карбіду бору	Збільшення противозадирних і припрацьовних властивостей	Немає даних
8	Рідкі кристали (холестиринові ефіри бензойної кислоти)	Зниження сили тертя	Немає даних

За підсумками досліджень встановлено, що додавання ультрадисперсного алмазграфітового порошку до пластичних мастил зменшує зношування пар тертя у 2–4 рази, а коефіцієнт тертя — на 14–40 % (у окремих випадках — до 60 %), що залежить від типу базового мастильного матеріалу.

1.5. Мастильні матеріали для підшипників кочення

1.5.1. Роль змащення в процесі тертя й зношування

Практично жоден механізм із рухомими елементами не працює без мастильних матеріалів. Навіть за відсутності виражених пар тертя металеві поверхні, як правило, захищають від корозії консерваційними мастилами. Змащення присутнє повсюдно — від побутових пристроїв до промислового обладнання.

Технічний прогрес неможливий без високоякісних мастил: варто припинити змащування сільськогосподарських машин, транспортних засобів чи індустріальних механізмів — і більшість із них швидко вийде з ладу [17].

Підшипники кочення також критично залежать від правильного змащення. Невдалий вибір мастильного матеріалу або його дефіцит неминуче спричиняє передчасну відмову підшипника та скорочення ресурсу. Визначальний вплив мастила на довговічність підшипників кочення щонайменше не поступається ролі

матеріалів деталей і зростає зі збільшенням навантаженості підшипникових вузлів.

1.5.2. Переваги й недоліки пластичних мащень перед маслами

Різноманітність експлуатаційних вимог до мастильних матеріалів унеможливорює застосування єдиного типу змащення; так само недостатньо використовувати лише пластичні мастила [17]. Нині використовують тверді, рідкі, газоподібні та пластичні мастильні матеріали. У техніці загального призначення, зокрема в аграрній, найбільше поширені рідкі й пластичні системи.

За обсягами виробництва лідирують оливи (понад 90 % ринку мастильних матеріалів). Основні їхні споживачі — двигуни внутрішнього згоряння; також оливи застосовують у редукторах (трансмісійні), компресорах, парових машинах і турбінах, а ще — як рекомендований варіант змащення підшипників кочення та зубчастих передач.

Пластичні мастила посідають проміжне місце між твердими та рідкими й являють собою м'які мазі щільної, густої консистенції, що утворюються шляхом загущення олив різними загусниками (переважно милами натрію, кальцію або літію).

Переваги пластичних мастил порівняно з оливами [17, 18]:

- надійно утримуються на похилих і вертикальних поверхнях; не видавлюються з вузлів тертя за високих навантажень;
- менша температурна залежність в'язкості;
- вищі протизносні та протизадирні характеристики (особливо в тяжких режимах);
- кращий захист металу від корозії;
- ефективна герметизація вузлів тертя та бар'єр від потрапляння забруднень;
- стабільна робота в жорстких умовах (високі температури й тиски, ударні навантаження, змінні швидкості);
- економічна доцільність завдяки тривалішій роботоздатності, меншій витраті та скороченню витрат на обслуговування.

Недоліки пластичних мастил:

- гірший відвід тепла від поверхонь тертя;
- складніша система подавання до вузла;
- обмежена окиснювальна стабільність мильних мастил і накопичення

продуктів зношування з часом.

1.5.3. Використання пластичних мащень

Марки, склад і експлуатаційні властивості мастил, що широко застосовуються в підшипниках кочення автотракторної та сільськогосподарської техніки, зведено в таблиці 1.2 [18, 19].

Серед пластичних мастил найбільше поширення мають солідоли. Різні їхні марки відрізняються типом загусника, а отже — і температурним діапазоном працездатності. Жирові та синтетичні солідоли зазвичай взаємозамінні й демонструють близькі експлуатаційні показники.

Разом з тим солідоли є прийнятним вибором лише для температур до 65–70 °С. Вони характеризуються недостатньою механічною стабільністю: мастило швидко видавлюється або витікає з негерметичних з'єднань. Тому використання солідолів у вузлах, де робоча температура часто сягає 70–90 °С (наприклад, у маточинах коліс), є недоцільним. Практика експлуатації вантажних автомобілів ГАЗ і ЗІЛ показує часті випадки «скидання» солідолу з підшипників і його витікання з маточин [20].

Таблиця 1.2 — Пластичні мастила, що застосовуються в підшипниках кочення тракторів і сільськогосподарських машин.

№	Марка	Склад	Ефективна в'язкість при 0 °С і швидкості деформації 10 с ⁻¹ , Па с	Межа міцності при 50 °С, Па с, не менш	Температура краплепадіння, °С, не нижче	Температурна межа працездатності	
						нижня	верхня
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Солідол-Ж (ГОСТ 1033-79 дійсний в Україні до 01-01-22)	Індустріальне масло, кальцієві мила бавовняного масла, саломас, вода	250	200	75	-25	65
2	Солідол-С (ГОСТТ 4366-76 дійсний в Україні до 01-01-22)	Індустріальне масло, кальцієві мила синтетичних жирних кислот, вода	200	100	75	-30	50
3	Літол-24 (ТУ-21150-87)	Мінеральне масло, літієве мило оксистеаринової кислоти, антиокислювальна й в'язкісна присадки	280	450 (при 20 °С)	180	-40	130
4	ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74 діючий)	Масло вазелінове приладове МВП, літієве мило стеаринової кислоти, антиокислювач	1100 (при 50 °С)	250...500	175	-60	90

5	Змащення №158 (ТУ 38.101320-77)	Масло авіаційне МС-20, літєво- калієве мило стеа- ринової кислоти, касторове масло, антиокислювальна й противосна при- садки	400	120	130	-40	120
---	------------------------------------	---	-----	-----	-----	-----	-----

У невеликих обсягах у тракторах і автомобілях, переважно в підшипниках генераторів та магнето, застосовують мастила №158 і ЦИАТИМ-201. Останнє рекомендують для вузлів, де потрібно мінімізувати опір за низьких температур (наприклад, гнучкі вали спідометра й тахометра). Мастило №158 також використовують у шарнірах рівних кутових швидкостей.

Сферу застосування високоякісного мастила Літол-24 суттєво розширено: воно успішно замінює інші мастила в агрегатах автотракторної та сільськогосподарської техніки й дозволяє подовжувати інтервали заміни у 2–4 рази.

Водночас переваги Літол-24 повною мірою проявляються лише у добре спроектованих і захищених вузлах тертя. У грубих, неущільнених з'єднаннях, відкритих для бруду та води, застосування високоякісних мастил недоцільне. За надійної герметизації, за температур 70–100 °С і середніх навантажень Літол-24 здатен убезпечити підшипники від зносу та забезпечити роботу до настання втомного руйнування.

Використання модернізованих вузлів із ефективними ущільненнями, заповнених стабільними високоякісними мастилами, дає змогу відмовитися від доливання чи заміни мастила щонайменше до капітального ремонту.

Строки заміни мастил у вузлах тракторів і автомобілів залежать від умов експлуатації — це особливо важливо для сільськогосподарської техніки. Вирішальним є стан дорожнього покриття: під час руху ґрунтовими дорогами, бездоріжжям тощо інтервали обслуговування слід скорочувати приблизно на 15 % відносно нормативів для стандартних умов; на дорогах із твердим покриттям

періодичність мастиння можна збільшувати на близько 15 % [21].

Висновки та задачі роботи

Надійність підшипників кочення істотно впливає на роботу механізмів і є одним із ключових показників технічного рівня машин та агрегатів. Під надійністю підшипника розуміють його здатність повністю задовольняти експлуатаційні вимоги протягом усього ресурсу за умови дотримання комплексу правил, що забезпечують коректну роботу вузла.

Довговічність підшипника формують три групи чинників.

Конструктивні чинники: коректний добір матеріалів, мастил і типорозмірів підшипників; погоджені співвідношення розмірів деталей і раціональні внутрішні зазори; створення нових конструкцій опор кочення.

Технологічні чинники: оптимальні режими механічної та термічної обробки, раціональні способи отримання заготовок; належний проміжний і вихідний контроль; автоматизація виготовлення та контролю.

Чинники застосування: правильний добір підшипника за характером навантажень, швидкості та температури; забезпечення потрібних посадок і співвісності; ефективне змащення та ущільнення; якісні монтаж і експлуатація.

На етапах експлуатації та ремонту саме остання група має визначальний вплив: грубі порушення базових вимог щодо монтажу, мастила й догляду різко скорочують ресурс підшипників [18]. Тому користувачі мають керуватися методиками вибору й регулювання підшипників з урахуванням статичних і динамічних навантажень різної величини та напрямку, а також методиками раціонального добору мастил і ущільнень. Потрібно мати довідкові дані щодо посадок на шийки валів і у корпуси з урахуванням навантажувальних умов, конструкції підшипників, способів їх регулювання та робочих швидкостей.

Розрахунковий ресурс забезпечується лише за умови коректного режиму змащення та відведення тепла; застосування високоякісних мастильних матеріалів є невід'ємним компонентом.

Мета роботи: підвищити ресурс підшипників кочення шляхом зниження сил тертя між тілами кочення та кільцями і мінімізації зносу елементів підшипника за

рахунок використання добавки ТМК (гідросилікат магнію) у складі мастильного матеріалу.

Основні завдання дослідження:

1. Теоретично обґрунтувати підвищення довговічності підшипників кочення за допомогою металоплакувальних добавок до пластичних мастил.
2. Змодельовати роботу підшипника кочення в лабораторних умовах на машині тертя та встановити вплив твердо-змащувальної композиції (ТМК).
3. Оцінити вплив ТМК на ресурс підшипників кочення, що працюють на пластичних мастилах.
4. Розробити рекомендації щодо застосування пластичних мастил із ТМК у підшипникових вузлах.
5. Опрацювати розділ з охорони праці.
6. Виконати техніко-економічну оцінку результатів.

2. ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Основні напрямки підвищення довговічності пар тертя

Відомо, що основною причиною відмов машин є зношування деталей: порушується нормальний режим роботи, падають ККД, точність, економічність і надійність. Тому завдання зменшення тертя та зношування є ключовими на етапах проєктування, виготовлення, експлуатації й ремонту.

Спираючись на аналіз процесів тертя і зносу, І. В. Крагельський сформулював два базові правила їх зниження [22]:

- Правило позитивного градієнта зсувного опору: фрикційний зв'язок має слабшати з глибиною, тобто легко зсувні шари повинні бути поверхневими.
- Правило мінімального занурення контртіла в поверхню сполучення: одна з поверхонь (зазвичай більша за площею) має бути максимально твердою й гладкою.

Забезпечити позитивний градієнт зсувного опору можна різними шляхами, головна ідея — сформувати на робочих поверхнях тонкі шари з малим опором зсуву, щоб локалізувати зсувні напруження в приповерхневій зоні. Для цього застосовують механічні, електролітичні та інші способи нанесення металевих і полімерних покриттів.

Широко використовується фінішна антифрикційна безабразивна обробка (ФАБО), коли на деталі наносять тонкі антифрикційні шари (мідь, латунь, бронза тощо) завдяки явищу перенесення металу під час тертя [23]. Переваги ФАБО — простота технології, високі триботехнічні показники покриттів і помірні витрати. Метод застосовують при виготовленні та ремонті деталей ДВЗ (поршні, гільзи, шийки колінчастих валів), паливної апаратури (плунжери, золотники) та інших пар тертя [23, 24].

Дослідження вітчизняних і закордонних науковців свідчать: поліпшення властивостей мастильних матеріалів часто ефективніше за зміну технології фінішної обробки поверхонь, якщо мета — підвищити зносостійкість; приріст допустимих питомих навантажень у парах тертя може сягати в 40–50 разів [25].

Підвищення протизносних і протизадирних властивостей мастил

здебільшого досягають присадками на основі активних сполук сірки, хлору, азоту й фосфору. Сучасні високоякісні оливи містять до 15 % різних присадок; за однакової концентрації вони зазвичай ефективніші в оливах, ніж у пластичних мастилах [18, 26]. Механізм дії протизносних/протизадирних добавок пояснюється фізико-хімічними процесами в зоні контакту — адсорбцією та хемосорбцією.

Все ширше впроваджуються твердомастильні композиції (ТМК) — у вигляді дисперсних порошків, присадок до олив і пластичних мастил, елементів самозмащування та твердих мастильних покриттів [18, 27]. Найтипівіші компоненти ТМК: м'які метали (срібло, свинець, барій тощо), неорганічні сполуки (графіт, дисульфід молібдену, оксид свинцю, дисульфід і диселенід вольфраму), а також композиції на кшталт ПТФЕ–графіт– MoS_2 , MoS_2 – WS_2 , Ag – WSe_2 тощо. Сучасні ТМК ефективні для змащування вузлів ковзання та кочення в умовах високих питомих навантажень і підвищених температур.

2.2. Досліджувані мастильні композиції

ТМК виготовляють на основі гідросилікату магнію — порошку світло-сірого кольору з дисперсністю 0,1–6 мкм. Зазвичай порошок у поєднанні із загусником вводять в оливу, утворюючи мастильну композицію; у нашому випадку гідросилікат магнію додають до вже готових мастильних складів, формуючи ТМК. Схему формування композиції наведено на рис. 2.1.

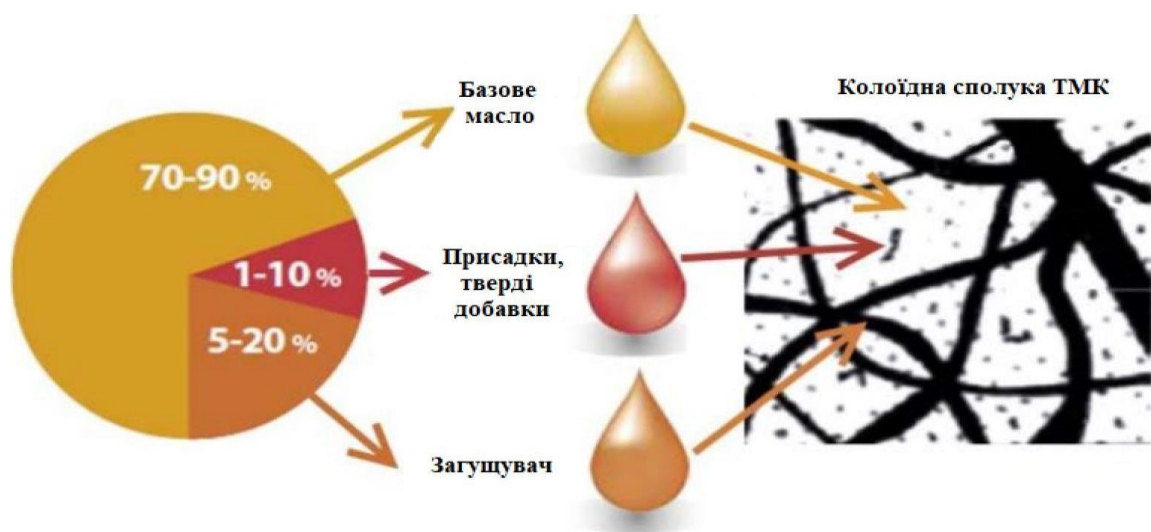


Рис. 2.1. Схема формування твердо-змащувальної композиції (ТМК).

Деякі додаткові фізико-хімічні характеристики добавки ТМК подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Фізико-хімічні показники добавки ТМК.

№	Показник	Значення
1	Масова частка вологи	не більш 10%
2	Корозійність на пластинках свинцю	10 г/м. кв
3	Коефіцієнт термічного розширення	13,6-14,2
4	Навантаження зварювання	3500 Н
5	Індекс задира	Не менш 55
6	Мікротвердість оброблених поверхонь	780-810 НV

За концепцією розробника сполуки Воробйова А. М., механізм дії ТМК відбувається у кілька стадій. На початку, завдяки легким абразивним властивостям композиції, з робочих поверхонь пар тертя знімається оксидна плівка, паралельно відбувається вирівнювання мікрорельєфу. Зі зменшенням шорсткості зростає реальна площа контакту, знижуються локальні напруження та ослаблюються атомні зв'язки, що деформуються.

Далі в текстурований шар і зону пластичних деформацій вбудовуються іони металів, унаслідок чого підвищуються мікротвердість і міцність приповерхневого прошарку. Одночасно у точках контакту протікають хімічні реакції, які формують на поверхні полікристалічний шар. Щоб керовано ініціювати кристалізацію та ріст зерен, до складу ТМК додають іони вибраних металів; вони інтенсивно деформуються в поверхневий шар, зміцнюючи його та утворюючи безперервну послідовність твердих розчинів на поверхні (див. рис. 2.2).

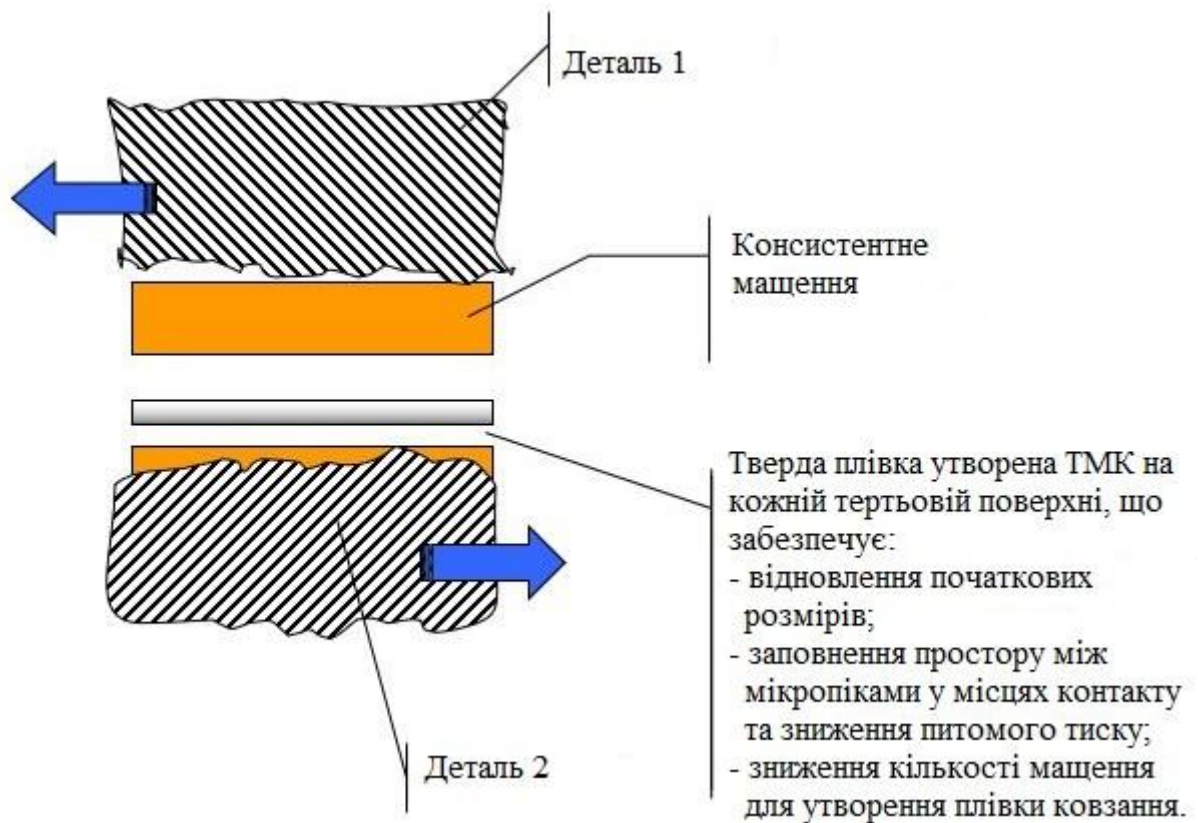


Рисунок 2.2 – Схематичне формування змащувального шару.

2.3. Будова та особливості підшипників кочення

Кулькові підшипники кочення — це опори для підтримання валів, осей та інших деталей, що здійснюють обертальний рух.

Підшипник (див. рис. 2.3) має у своєму складі: зовнішнє кільце 1, внутрішнє кільце 2, тіла кочення (кульки) 3 та сепаратор 4, який утримує кульки на заданій відстані й розділяє їх між собою [2, 3, 4, 28].

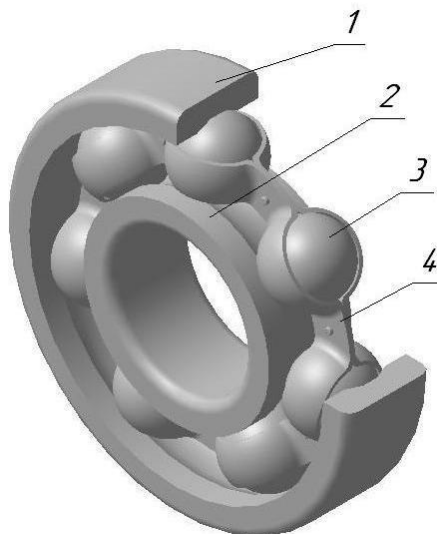
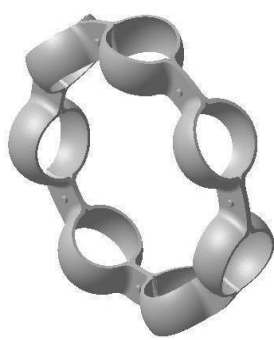


Рисунок 2.3 – Будова підшипника.

Кільця та тіла кочення виготовляють із підшипникових хромистих сталей ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15ГС або з хромонікелевих сталей 12ХН3А, 12Х2Н4А та ін. Після термооброблення до твердості HRC 62–65 деталі шліфують і полірують до високої чистоти. Сепаратори (див. рис. 2.4) виконують зі штампованої листової сталі (рис. 2.4а), з бронзи Бр.АЖМц 10-3-1,5 чи алюмінієвих сплавів методом лиття (рис. 2.4б), а також із текстоліту.

Переваги підшипників кочення порівняно з підшипниками ковзання:

- малі пускові втрати на тертя;
- вища стійкість до заїдання й підвищена пожежна безпека;
- здатність короткочасно працювати без змащення без аварійних наслідків;
- висока взаємозамінність елементів;
- менша витрата мастильних матеріалів;
- простіше технічне обслуговування.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Сепаратори:

а — штамповані; б — литі.

Недоліки підшипників кочення:

- підвищені контактні напруження через малу площу контакту;
- обмежений ресурс, особливо за високих навантажень і швидкостей;
- значна розбіжність строків служби навіть у межах однієї партії при однакових режимах;
- неможливість встановлення, зокрема, на шатунних і проміжних

корінних шийках колінчастих валів через нерознімність кілець [29, 30].

Класифікація за напрямком навантаження:

- радіальні — сприймають переважно радіальні сили (перпендикулярні осі вала);
- упорні (осьові) — працюють на осьові навантаження;
- радіально-упорні (комбіновані) — одночасно сприймають радіальні та осьові складові.

Серії за габаритними співвідношеннями (зовнішній діаметр D , внутрішній d , ширина B ; див. рис. 2.5):

- надлегка;
- легка;
- легка широка;
- середня;
- середня широка;
- важка.

Підшипники різних серій відрізняються насамперед граничною частотою обертання, а також динамічною і статичною вантажопідйомністю [30]. Зміни габаритів для серій за фіксованого d показано на рис. 2.5.

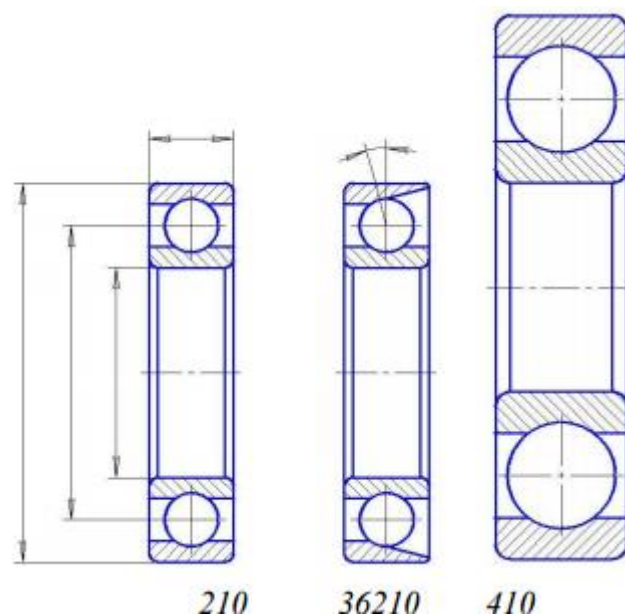


Рисунок 2.5 – Серії підшипників.

Кулькові підшипники маркують цифровими кодами, що фіксуються й на

кресленнях. Позначення складається зі знаків, кожен із яких несе певну ознаку підшипника.

Останні дві цифри праворуч відповідають номінальному внутрішньому діаметру (посадковому діаметру вала), мм, за правилом:

- для отворів 20 мм і більше — ці дві цифри є результатом ділення діаметра (у мм) на 5;
- для отворів 10–17 мм застосовують спеціальні коди:

00 → 10 мм, 01 → 12 мм, 02 → 15 мм, 03 → 17 мм.

Внутрішній діаметр підшипника в мм	10	12	15	17
Позначення	00	01	02	03

в) Для підшипників із внутрішнім діаметром до 9 мм останні дві цифри праворуч безпосередньо вказують фактичний розмір отвору в міліметрах.

Коли ці дві цифри задають реальний, а не умовний діаметр, на третьому місці проставляють 0. Третя і сьома цифри коду позначають серію підшипника: третя — діаметральну, сьома — ширинну. Прийняті позначення серій:

- особолегка — 1,
- легка — 2,
- середня — 3,
- важка — 4,
- легка широка — 5,
- середня широка — 6.

Четверта цифра визначає тип підшипника: наприклад, радіальний кульковий однорядний — 0, радіально-упорний кульковий — 6.

П'ята і шоста цифри відображають конструктивні особливості конкретного виконання.

Повний момент тертя у підшипнику кочення доцільно подати як суму окремих складових, за формулою 2.1:

де: T_0 — складова моменту тертя, що не залежить від навантаження;

TF — складова моменту тертя, що залежить від навантаження на

підшипник.

Безнавантажувальний момент T_0 зумовлений переважно опорами, пов'язаними з переміщенням мастила та впливом повітряно-масляного середовища. Тому він визначається кількістю й реологічними властивостями мастильного матеріалу, способом його подачі, конструкцією та габаритами підшипника, а також частотою обертання. Аналітично врахувати всі ці чинники наразі складно, тож T_0 зазвичай встановлюють експериментально.

Навантажувальна складова T_F формується головно опорами перекочування та просковзування тіл кочення у зонах контакту з кільцями. За дії радіального навантаження контактні сили між тілами кочення розподіляються відповідно до схеми на рис. 2.6.

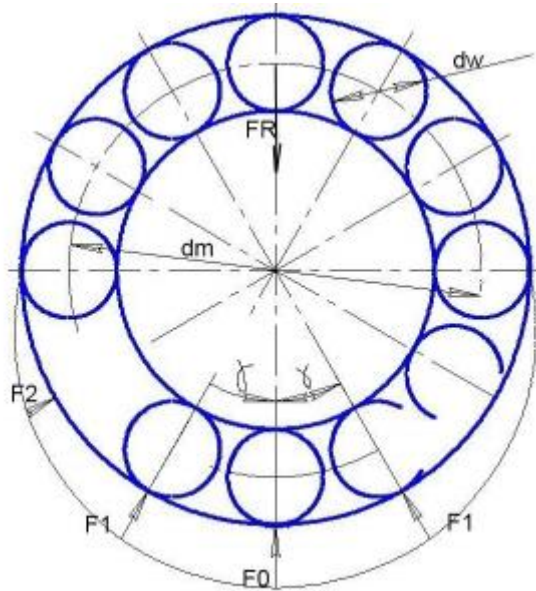


Рисунок 2.6 – Розподіл навантаження між тілами кочення.

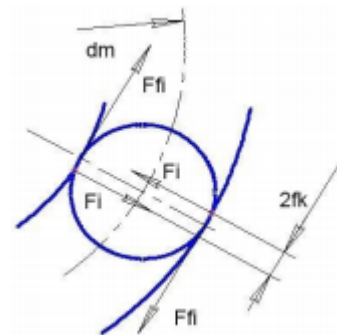


Рисунок 2.7 – Схема сил, що діють на кульку.

З умови рівноваги (див. рис. 2.6).

2.4. Методика вибору типу підшипника кочення. Теоретична частина

Підшипники кочення в редукторах є основним типом опор [3, 4, 5, 19, 30]. Під час розроблення компоновальної схеми редуктора орієнтовно задають діаметр посадкового місця вала під підшипник. Вибираючи тип підшипника, враховують величину та напрямок навантаження на опорі, габарити посадок на валу й у корпусі, жорсткість, а також економічні міркування. Рекомендації залежно від

відношення осьового до радіального навантаження F_a/F_r наведено у табл. 2.2. Довідкові дані для розрахунків подано у [3, 4, 31].

Порядок підбору за динамічною вантажністю:

У проектуванні машин підшипники не конструюють «з нуля», а підбирають зі стандартного ряду за відомими формулами. Методика вибору регламентована ГОСТ 18854-73 та ГОСТ 18855-73. Підбір за динамічною вантажністю (за заданим ресурсом) виконують за умови $n > 1$ об/хв.

Правило вибору:

$$C_{\text{розрах}} \leq C_{\text{катал}}$$

Таблиця 2.2 — Рекомендації щодо вибору типу підшипника (за F_a/F_r).

Відношення F_a/F_r	Тип підшипни- ку	Осьова складова радіального на- вантаження S (частина від Fr)	Примітки
0,35	Однорядні ра- діальні шари- кові		При можливості використання легкої серії одержуються кращі по швидкохідності
Від 0,35 до 0,7	3600, $\alpha = 12^\circ$	0,3 Fr	Дозволено використовувати особливо легку і надлегку серії
Від 0,71 до 1	4600, $\alpha = 26^\circ$	0,8 Fr	При дуже високих швидкостях переважно легка серія
Від 1 до 1,5	6600, $\alpha = 36^\circ$	0,9 Fr	Для високих швидкостей під- шипник з цим кутом контакту не підходить
При $F_a/F_r > 1,5$ рекомендується використовувати конусні радіально-упорні підшипники, або здвоєні радіально-упорні шарикові.			

Номінальна динамічна вантажопідйомність C для радіальних і радіально-упорних підшипників — це таке радіальне навантаження, яке підшипник із нерухомим зовнішнім кільцем витримує протягом номінального ресурсу 10^6

обертів внутрішнього кільця без проявів утомного руйнування на будь-якому кільці чи тілі кочення щонайменше у 90 % випробуваних виробів [3, 4, 5, 19, 30].

Для упорних та упорно-радіальних підшипників розрахунковою величиною приймають статичну вантажопідйомність C_0 .

Зв'язок між номінальною динамічною вантажопідйомністю C та номінальною довговічністю описують емпіричною залежністю 2.3:

де: L — номінальний ресурс, млн обертів;

C — номінальна динамічна вантажопідйомність, Н;

P — еквівалентне навантаження, Н;

m — показник степеня: для кулькових $m = 3$, для роликових $m = 10/3 \approx 3,33$;

a_1 — коефіцієнт надійності (див. табл. 2.4);

a_2 — коефіцієнт, що враховує сукупний вплив якості металу та умов експлуатації, $a_2 \in [0,7; 1,4]$.

Таблиця 2.4 — Коефіцієнт надійності a_1 .

Надійність, або частка підшипників, на які поширюється гарантійний ресурс	0,9	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
Коефіцієнт надійності, a_1	1,0	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

Номінальна тривалість роботи в годинах L_h визначається за формулою (2.4), де n — частота обертання, хв^{-1} .

Розрахункову динамічну вантажопідйомність приймають відповідно до заданої довговічності L_h .

Еквівалентне навантаження R для радіально-упорних підшипників трактують як умовне стало значення, яке, діючи на підшипник із рухомим внутрішнім і нерухомим зовнішнім кільцем, забезпечує ту саму довговічність, що й реальні комбіновані навантаження та режим обертання. Для упорних і радіально-упорних підшипників, відповідно, використовують постійну осьову

складову при схемі: рухоме кільце закріплене на валу, нерухоме — у корпусі розраховують за формулою 2.5:

де F_r, F_a — радіальна та осьова складові зовнішнього навантаження, Н;

X, Y — коефіцієнти радіальної та осьової складових (беруть із табл. 2.5);

V — коефіцієнт обертання: за обертання внутрішнього кільця $V = 1$, зовнішнього — $V = 1,2$;

k_δ — коефіцієнт запасу, що враховує характер навантаження (див. табл. 2.6);

k_t — температурний коефіцієнт (див. табл. 2.6).

За ступінчасто змінного режиму (змінюються навантаження і частота обертання) розрахунок ведуть за умовним еквівалентним навантаженням за формулою (2.6):

де R_i — еквівалентні навантаження, що діють протягом L_i млн обертів.

Особливості вибору радіально-упорних підшипників. Для регульованого радіально-упорного підшипника слід забезпечити, щоб осьова сила в підшипнику F_a була не меншою за S :

де S — мінімальна необхідна осьова сила, рівна осьовій складовій від радіального навантаження (див. рис. 2.8).

У радіально-упорному кульковому підшипнику радіальна реакція F_r породжує осьову реакцію $S = eF_r$; у конічному роликовому — $S = 0,83eF_r$. Відношення S/F не перевищує e .

Отже, за відсутності зовнішніх осьових сил доцільно приймати $X = 1, Y = 0$. Якщо ж прикладено зовнішнє осьове навантаження F_a , потрібно виходити з умов, що осьова сила підшипника не може бути меншою за S , а всі осьові складові, що діють на вал, мають взаємно врівноважуватися.

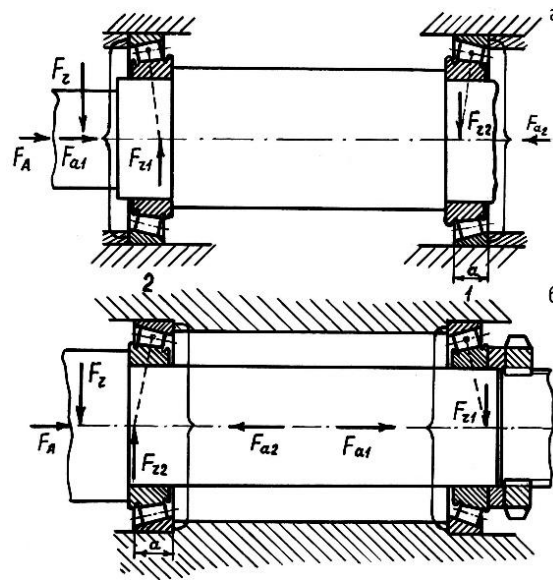


Рис. 2.8. Схеми навантаження радіально-упорних підшипників:

а — на розпір; б — на розтяг.

Таблиця 2.5 — Рекомендовані значення коефіцієнта запасу k_δ .

Характер навантаження	k_δ	Приклади
Спокійне (без поштовхів)	1	Ролики стрічкових транспортерів
Легкі ривки. Короткочасні перевантаження до 125 % від розрахункового навантаження	1 – 1,2	Прецензійні зубчасті передачі, блоки, легкі вентилятори та повітрянодувки
Помірні ривки та вібрації. Короткотривалі перевантаження до 150 % від розрахункового навантаження	1,3 – 1,5	Редуктори усіх конструкцій
Те ж в умовах підвищеної надійності	1,5 – 1,8	Центрифуги та розсіювачі, енергетичне обладнання
Значні ривки та вібрації. Короткотривалі перевантаження до 200 % від розрахункового навантаження	1,9 – 2,2	Валики середньосортних прокатних станів, подрібнювачі для руди та камінню, зубчасті передачі 9-го ступеня точності

Таблиця 2.6 – Значення температурного коефіцієнта k_t

Робоча температура підшипника, °C	До 100	125	150	175	200	225	250	300
kt	1.0	1,05	1,1	1,15	1,25	1,35	1,4	1,6

Результуючі осьові сили визначають із умов рівноваги та коректності регулювання за формулою 2.7. Отриману систему розв'язують методом послідовних наближень (див. табл. 2.7) за умови 2.8 і перевіряють виконання критерію 2.9.

Якщо розрахункове значення перевищує умову 2.10, приймають варіант, що відповідає умові 2.11.

У разі виконання умови 2.12 додатково визначають параметр за залежністю 2.13.

Еквівалентне навантаження R для кожної опори (1 та 2) обчислюють з урахуванням вимоги 2.14.

Для опор зі спареними конічними радіально-упорними підшипниками (рис. 2.10) еквівалентне навантаження опори 1 знаходять за відношенням 2.15.

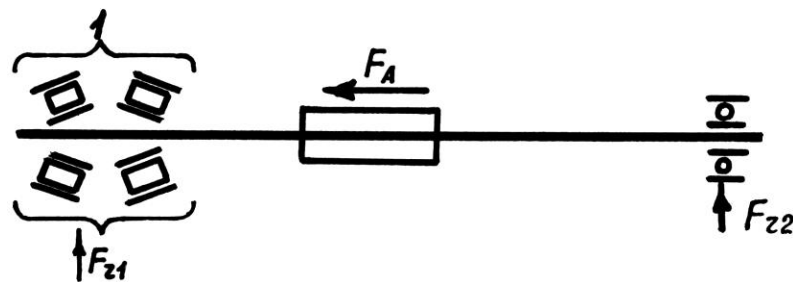


Рисунок 2.10– Вал зі спареними радіально-упорними підшипниками.

Осьову силу F_a розраховуємо за схемами, наведеними на рис. 2.11.





Рис. 2.11. Схеми навантаження підшипника:

а — на розпір, б — на розтяг.

Осьове навантаження «на розпір» виконується за формулами 2.16 та 2.17.

Осьове навантаження в розтяжку виконується за формулами 2.18 та 2.19.

Радіальну реакцію радіально-упорного підшипника вважають прикладеною до вала в точці перетину нормалей, проведених до середин контактних площадок. Її знаходять графічно або за відстанню a від зовнішнього кільця (див. рис. 2.4).

Для однорядних кулькових підшипників — за формулою 2.20.

Для конічних роликових — за формулою 2.21, де:

d, D — внутрішній і зовнішній діаметри підшипника;

B — ширина кулькопідшипника;

T — відстань між протилежними торцями кілець роликопідшипника.

Приклад розрахунку. За результатами розрахунку вала редуктора одержано: реакції опор $F_{r1} = 3600$ Н, $F_{r2} = 1800$ Н; осьова сила $F_a = 1400$ Н. Підшипники змонтовано за схемою «а» (рис. 2.10). Діаметр шийки вала під підшипники $d = 50$ мм, частота обертання $n = 1400$ хв⁻¹.

Оскільки осьове навантаження діє на другу опору, для неї визначаємо розрахункове відношення за відповідною залежністю:

$$F_a/F_r = 1400/1800 = 0,78.$$

Відповідно до рекомендацій табл. 2.7 обираємо кульковий радіально-упорний підшипник з кутом контакту $\alpha = 12^\circ$. Додатково перевіряємо варіант: підшипник середньої серії №46310 зі збільшеним кутом контакту $\alpha = 26^\circ$, для якого задано $C = 56\,300$ Н та $C_0 = 44800$ Н. За табл. 2.4 приймаємо $e = 0,68$.

Оскільки відношення:

$$F_a/F_r = 1400/1800 = 0,78 > e,$$

Отже, за даними табл. 2.4 приймаємо коефіцієнти $X = 0,41$ та $Y = 0,87$.
Осьова складова:

$$S_1 = eF_{r1} = 0,78 \cdot 3600 \cdot 2450 \text{ Н.}$$

Осьове розрахункове навантаження для другої опори:

$$F_{a2} = S_1 + F_a = 2450 + 1400 = 3850 \text{ Н.}$$

Розрахункове еквівалентне навантаження для другої опори:

$$R = (XVF_{r2} + YF_{a2})k_\delta k_t = (0,41 \cdot 1800 + 0,87 \cdot 3850) \cdot 1,4 \cdot 1 = 5700 \text{ Н.}$$

Довговічність розрахуємо так:

$$L = (C/R)^m = (56300/5700)^3 = 970 \text{ млн.об.}$$

Тобто наступний розрахунок має вигляд:

$$L_h = \frac{10^6 L}{60n} = \frac{10^6 \cdot 970}{60 \cdot 1400} = 11600 \text{ год}$$

Отриману розрахункову довговічність приймаємо, оскільки мінімально допустимий ресурс підшипників за умовами становить 10 000 год.

Оцінювання ресурсу підшипника кочення за умови застосування твердого мастильного матеріалу ТМК використовують як критерій працездатності й задають відповідною формулою 2.22 [19]:

де a_1 — коефіцієнт надійності (у нашому випадку $a_1 = 1$);

a_{23} — коефіцієнт, що враховує умови змащення та матеріал пари тертя (визначається за номограмами й графіками);

C — динамічна вантажопідйомність підшипника;

Q — еквівалентне навантаження на підшипник;

p — показник степеня (для роликів підшипників $p = 3,33$).

Ресурс розглянутого підшипника кочення, що працює на пластичному мастилі Літол-24, як критерій працездатності обчислюють за формулою (2.22).

$$L = 1 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{56300}{5700}\right)^3 = 1349 \text{ млн. обертів}$$

Тобто

$$L_h = \frac{10^6 L}{60n} = \frac{10^6 \cdot 1349}{60 \cdot 1400} = 16059 \text{ год}$$

Отже, введення модифікованої ТМК до пластичного мастила підшипника підвищує його довговічність на 27,7 %.

Висновок

За впровадження нових мастильних матеріалів і технологічних підходів до підвищення ресурсу деталей ключовим стає прогнозування довговічності. Коректно визначений термін служби дає змогу завчасно планувати регламентні операції, потребу в запасних частинах і чисельність персоналу для техобслуговування та ремонту.

Ресурс кулькових і роликових підшипників автотракторної та сільськогосподарської техніки може зрости приблизно на 27,7 % завдяки застосуванню присадок, які разом із базовим мастилом формують на контактних поверхнях захисний шар.

Використання таких добавок сприяє зменшенню шорсткості пар тертя, «підліковує» дрібні дефекти після механічної обробки та підвищує навантаження заїдання, що в підсумку покращує надійність і подовжує строк служби підшипникових вузлів.

3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

3.1. Методика проведення вимірів і дефектації підшипників кочення

Ми дотримувалися чіткої послідовності операцій контролю під час мікрометражу та дефектації підшипників кочення: зовнішній огляд, перевірка легкості обертання, контроль розмірів кілець, вимірювання радіального зазору (для кулькових і роликопідшипників з циліндричними роликами) або монтажної висоти (для радіально-упорних роликових і упорних кулькових підшипників).

Не допускаються: тріщини та викришування металу; відтінки мінливості (ознаки перегріву); забоїни й «лунки» на доріжках кочення; шелушіння, корозія, глибокі риси та надломи; наскрізні тріщини сепаратора; відсутні чи послаблені заклепки; вм'ятини на сепараторі, що заважають плавному ходу; нерівномірний знос доріжок; «ялинка» в упорних/радіально-упорних підшипниках; виступання роликів за край зовнішньої обойми кінцевого підшипника; відчутний пальцем ступінчастий знос робочих поверхонь кілець.

Допускаються: незначні подряпини та риси на посадкових поверхнях кілець; вм'ятини на сепараторі, які не погіршують плавність обертання; матовість доріжок і тіл кочення.

Шорсткість поверхні зовнішнього та внутрішнього кілець має бути $Ra < 2,5$ мкм. На ремонтних підприємствах її зазвичай оцінюють візуально за еталонними зразками шорсткості [29, 32, 33].

У техвимогах на капремонт зазначають: місце встановлення, стандартний номер, тип підшипника, допустимі діаметри (або поля допусків) кілець, а також значення радіального зазору (початкового, допустимого та граничного).

Мікрометраж і дефектацію кілець проводять універсальними засобами вимірювання; їх похибку оцінюють за формулою 3.1:

де T_k — допуск на діаметр кільця.

Засоби вимірювань:

— для зовнішнього кільця: оптиметр і мікрокатор у важкій стійці, важільна скоба, важільний мікрометр (у стійці);

– для внутрішнього кільця: горизонтальний оптиметр, інструментальний мікроскоп, індикаторний нутромір із ціною поділки $0,001 \dots 0,002$ мм.

Схеми вимірювань (див. рис. 3.1):

при мікрометражі — у двох крайніх перетинах $a - a$ та $b - b$ у двох площинах S_1 та S_2 ;

при дефектації — у двох площинах S_1 і S_2 в одному перетині 1-1.

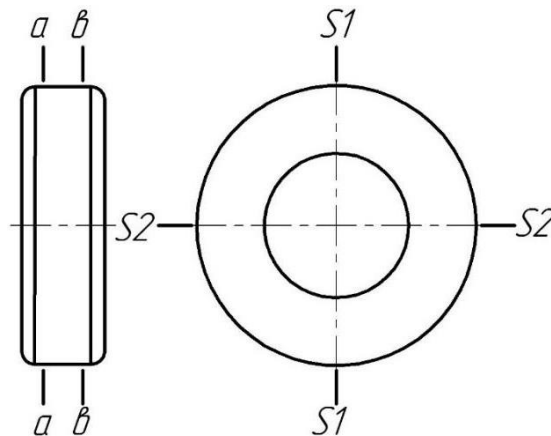


Рисунок 3.1 – Схема вимірювальних площин і перерізів підшипника.

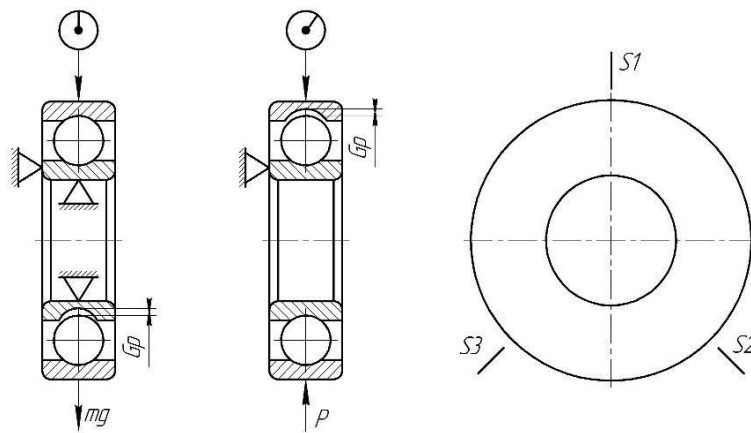


Рисунок 3.2 – Вимірювання радіального зазору підшипника кочення під час дефектації.

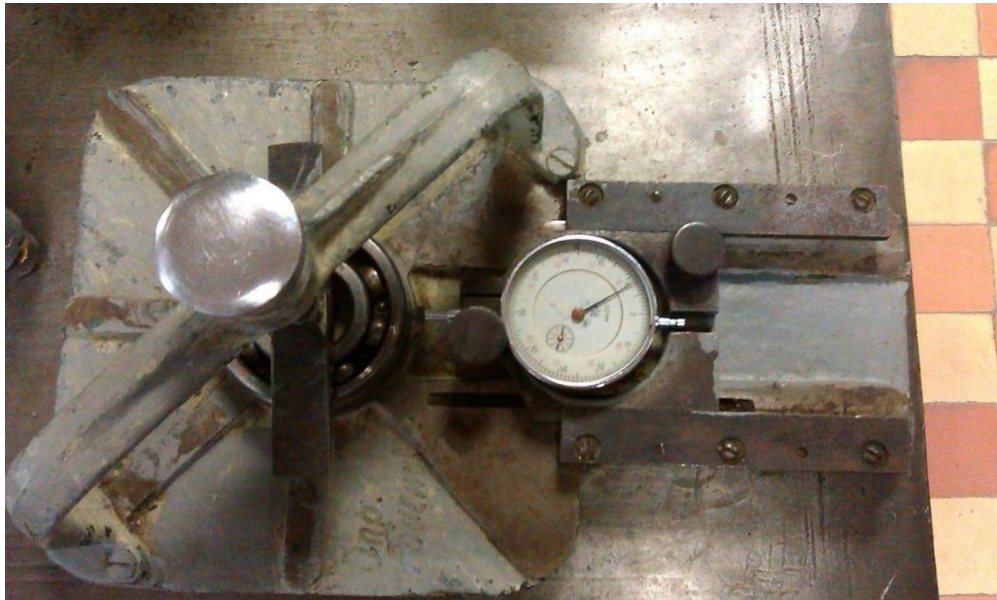


Рисунок 3.3 – Контроль радіального зазору підшипника кочення під час дефектації.

Кільця вважають придатними, якщо середні фактичні діаметри відповідають техвимогам за допустимими відхиленнями за формулою 3.2:

де d_{ij} — виміряні діаметри у площинах S_1 , S_2 та перетинах 1–1, 2–2.

Радіальний зазор G_p під час дефектації зазвичай контролюють простими пристроями (рис. 3.1, 3.2) з індикатором годинникового типу ИЧ-10 (ГОСТ 557-98), оскільки допуск понад 50 мкм відповідає можливостям обраних засобів вимірювання. У пристосуванні внутрішнє (інколи зовнішнє) кільце жорстко фіксують конусом чи іншим затискачем, індикатор підводять до верхньої точки рухомого кільця і задають початковий натяг 1 мм — у цьому положенні верхній зазор вибирається під дією ваги $m g m g m g$.

Далі в нижній точці на рухоме кільце прикладають зусилля 5...10 Н (0,5...1 кгс): нижній зазор вибирається, і кільце зміщується вгору. Зусилля має бути достатнім для повного переміщення, але без викликання помітних пружних деформацій доріжок і тіл кочення. Різниця показів індикатора до/після переміщення і є радіальним зазором. Вимір повторюють тричі, повертаючи кільце на 120° (рис. 3.2) через можливу неоднорідність зносу в місцево навантажених зонах.

Підшипник визнають придатним за умовою (3.3):

де: $G_p, G_{\text{рсп}}$ — середній вимірний радіальний зазор, мм;

G_1, G_2, G_3 — значення зазору у трьох положеннях, мм;

$G_{\text{рдоп}}$ — допустиме значення, мм.

Для радіально-упорних роликотпідшипників у процесі експлуатації знос доріжок і роликів змінює монтажну висоту H (рис. 3.3), тож їх дефектують не за радіальним зазором, а саме за H . Підшипник негайно бракують, якщо виявлено виступання роликів за точки А та Б.

Вимірювання монтажної висоти виконують індикатором ИЧ-10 (ГОСТ 577-98), закріпленим у стійці С-II (стіл 125×125 мм) — для підшипників із зовнішнім діаметром до 130 мм, або на перевірній плиті з використанням універсального штатива.



Рисунок 3.3 – Контроль осьового зазору підшипника.

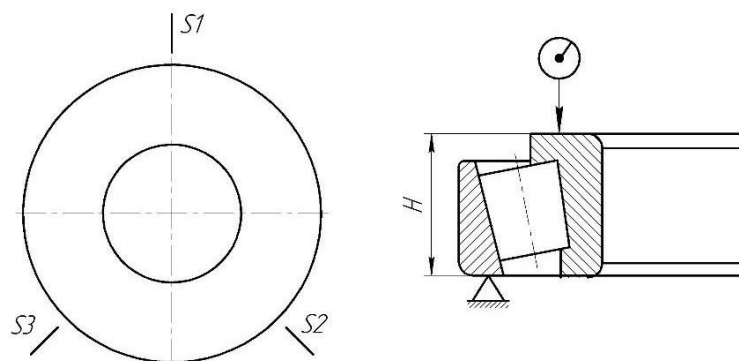


Рисунок 3.4 – Перевірка (контроль) осьового зазору підшипника.

Монтажну висоту цього типу підшипників визначають за умови одночасного контакту доріжок кочення внутрішнього та зовнішнього кілець і упорного бортика широкого торця внутрішнього кільця з усіма роликами. Прилад попередньо налаштовують кінцевими мірами на номінальне значення H_n із початковим «натягом» не менше, ніж вимагає умова 3.4:

де: $H_{\text{доп}}$ — допустима монтажна висота, мм;

$E_{\text{рдоп}}$ — допустиме відхилення монтажної висоти, мм.

Вимірювання виконують тричі, щоразу повертаючи внутрішнє (або зовнішнє) кільце на 120° (див. рис. 3.3). У підсумку фіксують фактичні відхилення від номіналу H_n .

Підшипник визнають придатним, якщо виконується критерій 3.5:

де: $E_{\text{рср}}$ — середнє відхилення монтажної висоти, мм;

$E_{\text{р1}}, E_{\text{р2}}, E_{\text{р3}}$ — відхилення, виміряні у трьох положеннях, мм.

3.2. Лабораторна установка для досліджень

Лабораторні випробування проводили на стенді ДМ-28 (див. рис. 3.5), який попередньо було модернізовано під потреби дослідження. Детальний опис установки наведено в джерелі [5].



Рис. 3.5. Установка ДМ-28:

1 — стенд ДМ-28; 2 — механізм навантаження; 3 — вузол контролю температури;
4 — ноутбук.

3.3. Підготовка до випробування зразків

Підготовка підшипників кочення до випробувань включала такі кроки (рис. 3.7):

Етап 1. Підшипники ретельно очищували від консерваційного мастила, промивали бензином і сушили теплим повітрям.

Етап 2. Перевіряли якість за радіальним зазором на приладі КИ-1223 (п. 3.1); до тестів допускали підшипники з зазором $\leq 0,01$ мм.

Етап 3. Відібрані підшипники повторно промивали бензином і сушили в потоці теплого повітря.

Етап 4. Закладали мастило в кожен підшипник у кількості 1А від вільного об'єму підшипника U , визначеного за формулою 3.6:

де: D — зовнішній діаметр, см;

d — внутрішній діаметр, см;

B — ширина, см;

G — маса підшипника, г;

γ — питома вага матеріалу, г/см².



Рисунок 3.7 – Послідовність підготовки зразків (підшипників) до випробувань.

Етап 5. Мастило спершу закладали з одного боку підшипника — до появи його крізь зазори між тілами кочення на протилежному боці (рис. 3.8). Далі решту мастила вводили з другої сторони. Важливо, щоб мастило повністю й рівномірно заповнило порожнину підшипника по всьому об'єму та відносно площини симетрії — без повітряних пустот.

Етап 6. Підготовлені підшипники напресовували на вісь за посадкою H_p (поле допуску вала $k6$ за СТ СЕВ 144–75) і додатково фіксували гайками. Зібраний вузол встановлювали в корпус випробувального стенда та закривали кришкою. Клеймо на зовнішньому кільці орієнтували в зоні дії радіального навантаження.

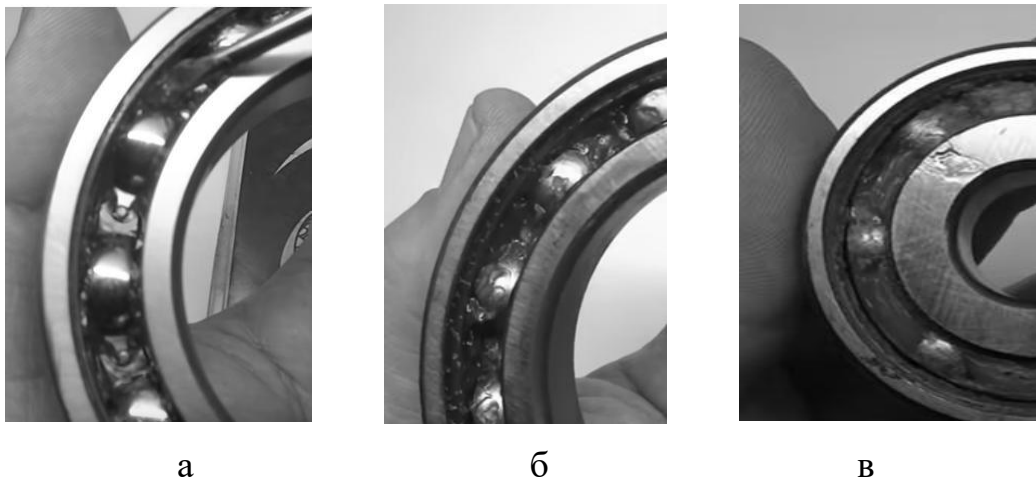


Рисунок 3.8 – Заповнення підшипників мастилом Літол-24 + ТМК:

а — $1/3$ об'єму; б — $2/3$; в — повне заповнення.

Під час порівняльних випробувань навантаження на підшипниковий вузол плавно підвищували після запуску стенда. Упродовж тесту безперервно контролювали температуру вузла й рівень вібрацій. Гранична робоча температура на зовнішньому кільці не перевищувала $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Випробування зупиняли за появи ознак відмови підшипника:

- істотне й тривале (понад 5 хв) зростання вібрацій/шуму;
- перевищення допустимої температури;
- заклинювання після паузи у роботі.

Після зупинки вузол розбирали, ідентифікували дефектний підшипник, спресовували його з вала, промивали бензином і сушили теплим повітрям. Далі

виконували зважування та детальний візуальний огляд на предмет дефектів. Окремо оцінювали стан мастила за такими критеріями:

- наявність і залишкова кількість мастила в підшипнику;
- зміни зовнішнього вигляду: ущільнення/розрідження, виділення вільної оливи, зміна кольору.

Мастило вважали таким, що успішно пройшло випробування, якщо воно забезпечувало штатну роботу підшипника, а руйнування вузла мало втомний характер. Адже, як і для більшості матеріалів, для мастил характерним є вихід із ладу через старіння [34].

3.4. Методика проведення ресурсних випробувань підшипників кочення

Для оцінювання фактичного ресурсу підшипників кочення при роботі на пластичному мастилi з добавкою ТМК виконано стендові випробування.

Об'єктом дослідження обрано радіальний однорядний кулькопідшипник №202 — один із найпоширеніших у сучасній автотракторній та сільськогосподарській техніці.

Виходячи з аналізу конструкцій випробувальних машин, наявний стенд ДМ-28 було модернізовано для тестування радіальних підшипників кочення; його принципову схему наведено на рис. 3.6.

Щоб забезпечити заданий тепловий режим при роботі на пластичному мастилi, виготовлено систему охолодження у вигляді теплообмінника з циркуляцією охолоджувальної рідини в порожнинах. Регулюючи витрату та температуру рідини, підтримували потрібну температуру в випробувальній головці.

Методику випробувань узгоджено з загальноприйнятими положеннями підшипникової промисловості щодо тестування підшипників і робочих мастил. Основному етапу передувало припрацювання: 25 хв при навантаженні 200 Н на підшипник, після чого вузол охолоджували на повітрі протягом 30 хв.

Основні випробування проводили так: 12 підшипників №202 тестували партіями по 4 шт. до настання відмови втомного характеру. Вузли, що вийшли з

ладу з інших причин, із підсумкової оцінки виключали. Паралельно випробовували два види мастил: еталонне (Літол-24) і експериментальне (Літол-24 + ТМК).

3.5. Дослідження основних характеристик пластичних мащень з добавкою ТМК

Для оцінювання ключових властивостей пластичних мастил із додатком ТМК виконано лабораторні випробування; підсумки подано в таблиці 3.1. За результатами тестів, введення ТМК не спричинило суттєвих змін показників пластичних мастил: усі значення повністю відповідають вимогам стандарту.

Таблиця 3.1 — Результати дослідження основних характеристик мастил Літол-24 та Літол-24 з ТМК.

№	Показник	Значення показників		
		Мащення		По ТУ-21150-87 для мащення Літол-24
		Літол-24	Літол-24 з до- бавкою ТМК	
1	Зовнішній вигляд	Однорідна мазь світложовтого кольору	При змішуван- ні з добавкою ТМК, змащен- ня здобуває сірий відтінок	Однорідна мазь від світложов- того до корич- невого кольору
2	Температура крапле- падіння, °С	198,3	197,7	Не менш 180
3	Пенетрація при 20°С з перемішуванням	238	236	220-250
4	Межа міцності на зрушення при 20 °С,	844	880	500-1000
5	Колоїдна стабільність, % виділеного масла	9,8	9,3	Не більш 12

3.6. Дослідження мастильних властивостей пластичних мащень, модифікованих добавкою ТМК

Під час дослідження антифрикційних властивостей пластичних мастил із додатком ТМК оцінювали залежність моменту тертя від навантаження. Підсумки випробувань наведено на рис. 3.9.

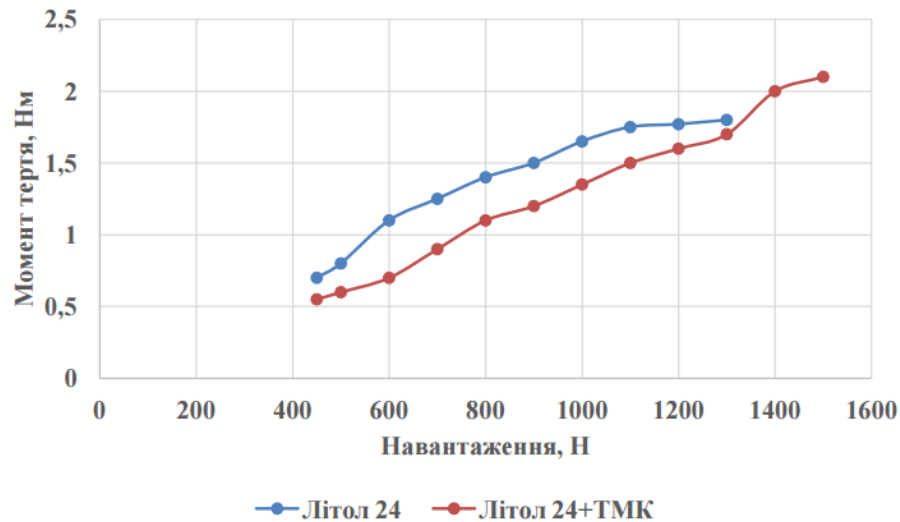


Рисунок 3.9 – Залежність моменту тертя від навантаження.

Отримані результати підтверджують високу ефективність добавки ТМК: її використання в середньому зменшує момент тертя на 20–25 % у вузлах кочення та підвищує навантаження заїдання приблизно у 1,2 раза.

Для оцінки протизадирних властивостей пластичних мастил визначали час роботи вузла кочення до появи задира. Підсумки таких випробувань подано на рис. 3.10 та рис. 3.11.

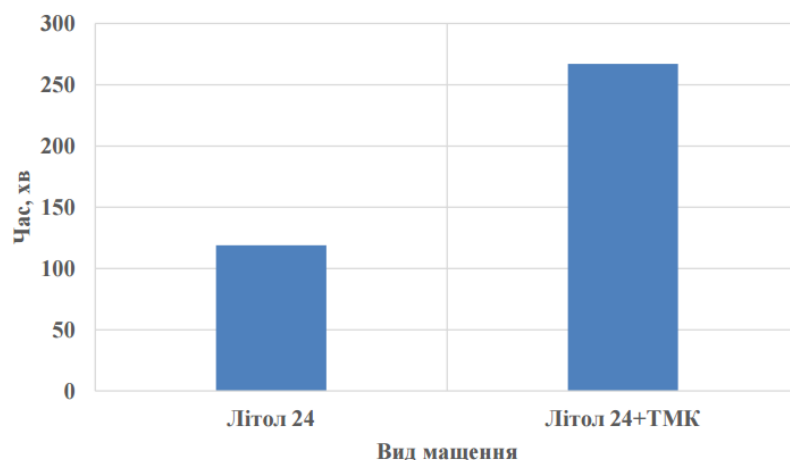


Рисунок 3.10 – Тривалість роботи вузла тертя до появи задира на поверхні.

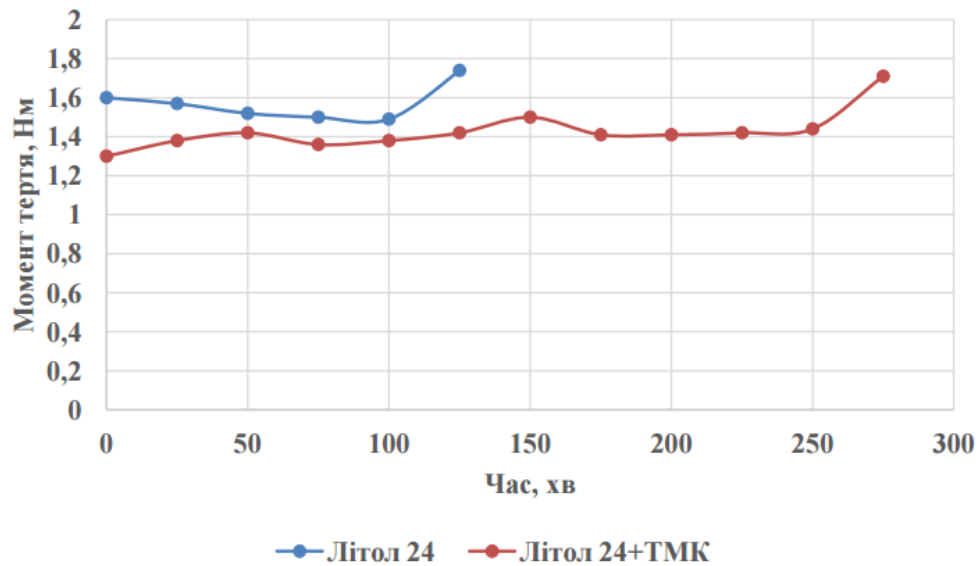


Рисунок 3.11 – Зміна моменту тертя під час випробування вузла до задиру робочих поверхонь.

Використання добавки ТМК збільшує тривалість роботи зразків до настання задиру на мастилі Літол-24 + ТМК у 2,2–2,5 раза.

Підсумкові дані випробувань і розрахунків подано в таблиці 21 та на рис. 3.12.

Таблиця 3.12 – Результати ресурсних випробувань підшипників кочення

№	Показник	Змащення	
		Літол-24	Літол-24 +ТМК
1	Обсяг вибірки, шт.	12	12
2	Мінімальне значення довговічності підшипника кочення, цикл. 10^6	3,0	5,1
3	Максимальне значення довговічності підшипника кочення, цикл. 10^6	10,8	12,7
4	Середній ресурс підшипників кочення, цикл. 10^6	5,4	9,1
5	Середнє квадратичне відхилення ресурсу, цикл. 10^6	2,6	2,3
6	Ресурс 90 %, цикл. 10^6	3,2	6,1
7	Відносний 90 % ресурс	1,0	1,9

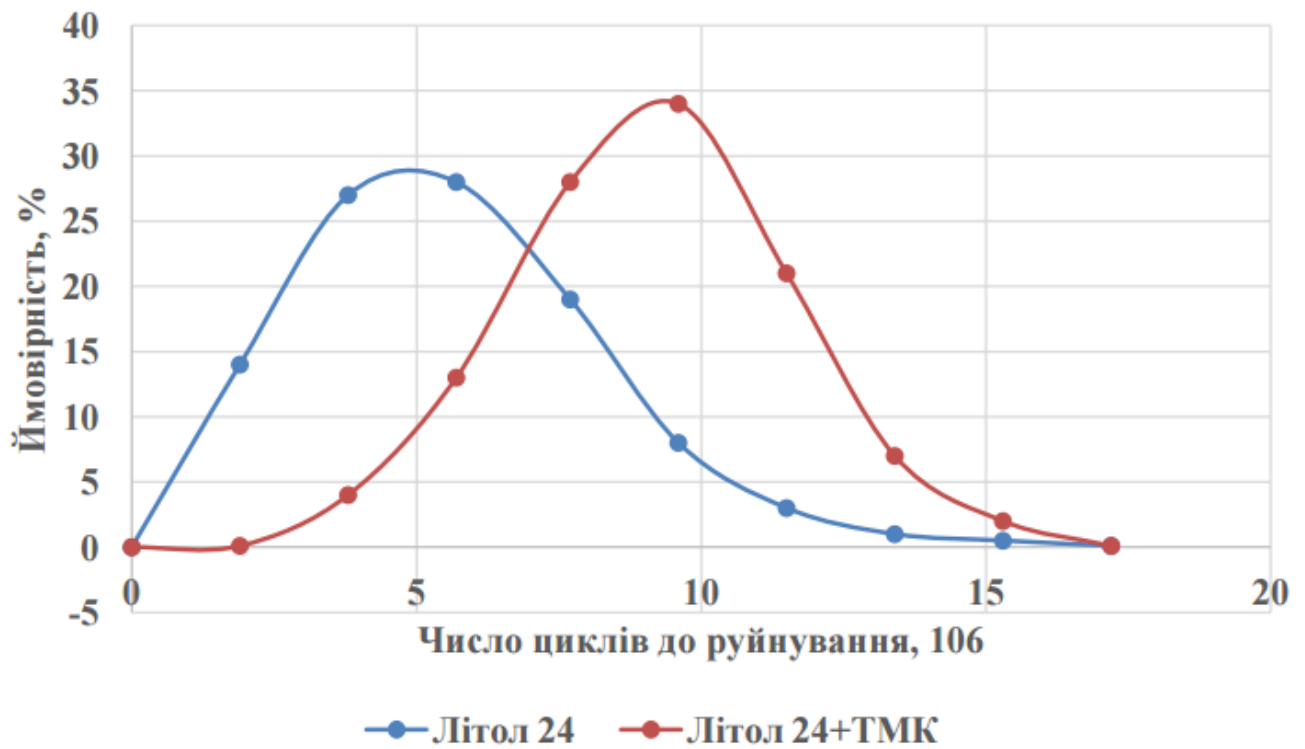


Рисунок 3.12 – Розподіл довговічності підшипників кочення за різних мастил.

Отже, стендові випробування повністю підтвердили висновки розділу 2 щодо ефективності добавки ТМК: її застосування підвищило ресурс підшипників кочення № 202 приблизно у 1,9 раза.

3.7. Рекомендації із застосування добавки ТМК із пластичними мащеннями в підшипниках кочення

Рекомендації щодо застосування добавки ТМК сформовано з урахуванням пп. 3.5 і 3.6 та базовано на коректному виборі концентрації присадки й режимів припрацювання підшипників, що обробляються цим складом.

Якщо ТМК вводиться як окремий компонент, слід:

- просіяти порошок через сито з діаметром отворів $\leq 0,1$ мм;
- рівномірно змішати 1,8–2,1 % мас. ТМК із пластичним мастилом.

Нижню межу концентрації доцільно застосовувати для нових підшипників, верхню — для частково зношених (за наявності помірно збільшеного радіального зазору).

Режим припрацювання підшипника з ТМК:

- повністю очистити підшипник від консерваційного/відпрацьованого мастила;

- заповнити підшипник підготовленою композицією у кількості $1/2-2/3$ від вільного об'єму;
- плавно навантажувати вузол, уникаючи високих навантажень упродовж 20–25 хв;
- після припрацювання забезпечити перерву не менше 30 хв.

Висновок

Отримані результати підтверджують високу ефективність добавки ТМК: у вузлах кочення вона в середньому зменшує момент тертя на 20–25 % та підвищує навантаження заїдання приблизно у 1,2 рази.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні відомості про охорону праці на підприємстві

Оскільки експериментальні дослідження проводилися на базі підприємства, розглянемо його як базовий майданчик. Відповідальність за стан охорони праці покладено на власника підприємства. Усі практичні заходи виконуються відповідно до чинного законодавства, зокрема Закону України «Про охорону праці» [35].

Згідно з НПАОП 0.00-6.03-93 «Порядок опрацювання і затвердження власником нормативних актів про охорону праці, що діють на підприємстві» [36], власником розроблено та затверджено такі документи:

- положення про систему управління охороною праці;
- положення щодо організації та проведення первинного і повторного інструктажів; положення про службу охорони праці;
- порядок забезпечення працівників спецодягом і засобами індивідуального захисту (на підставі ст. 8 Закону України «Про охорону праці» та ст. 163 КЗпП України) [37];
- інструкції з охорони праці;
- інструкції з пожежної безпеки.

Розроблення інструкцій з безпечного виконання робіт і ведення документації з охорони праці здійснює залучений фахівець з охорони праці (на договірних умовах) — на період проведення інструктажів, перевірок і підготовки звітності.

Під час відсутності цього спеціаліста функції з організації охорони праці виконує заступник директора з розвитку виробництва. Він готує заходи з поліпшення умов праці, інспектує обладнання станції технічного обслуговування та насосного сервісного центру, проводить інструктажі (на робочому місці, повторні, цільові). Інші види інструктажів (вступний, позаплановий) проводить запрошений позаштатний спеціаліст з охорони праці.

Для працівників організовано проходження медичних оглядів, особливо для водіїв і зварювальників, оскільки вони працюють у шкідливих умовах і належать

до груп підвищеного ризику [38].

На жаль, на підприємстві відсутня спеціалізована кімната з охорони праці; усі заходи проводяться в офісному приміщенні або в кабінеті заступника директора.

4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів на ділянці з діагностування та технічного обслуговування

Умови праці на підприємстві формуються сукупністю чинників виробничого середовища, що впливають на здоров'я та працездатність людини під час виконання робіт. Ці чинники відрізняються за природою, формою прояву та характером дії. Окремо виокремлюють небезпечні та шкідливі виробничі фактори: їх ідентифікація дає змогу попереджувати травматизм і профзахворювання, створювати безпечніші умови і, відповідно, підвищувати рівень безпеки праці.

Згідно з [39], небезпечні та шкідливі виробничі фактори на підприємстві поділяють за впливом на організм людини на такі групи:

- хімічні;
- фізичні;
- психофізіологічні;
- біологічні.

Під час діагностики та ремонту автомобілів можливі такі небезпечні й шкідливі фактори:

- рухомі транспортні засоби в зоні робіт;
- незахищені рухомі частини виробничого обладнання;
- підвищена загазованість приміщень відпрацьованими газами;
- ризик ураження електричним струмом під час роботи з електроінструментом тощо.

Працівник-діагност у ремонтній зоні зазвичай піддається комбінованому впливу кількох факторів: упродовж зміни він може працювати за верстатом (обробка деталей) або на іншому слюсарно-механічному обладнанні.

Нижче наведено типові роботи діагноста та відповідні основні небезпечні

фактори (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 — Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на дільниці діагностування і ТО.

№	Вид робіт	Небезпечний фактор
1	Кріпильні роботи	висока температура деяких деталей двигуна;
		заржавілі болти, що прикипіли гайки;
		розташування кріплення у важкодоступних місцях;
2	Мастильні роботи	висока температура масла, що заливається та що зливається, а також промивного;
		несправні дозуючі елементи змащувального встаткування, що замикають елементи систем мащення агрегатів автомобіля.
3	Регулювальні роботи	підвищена загазованість повітря робочої зони через те, що великий обсяг цих робіт проводиться при працюючому двигуні;
		підвищений рівень шуму на робочому місці;
		підвищений рівень вібрації;
		незахищені рухомі деталі двигуна (повітряний вентилятор з електричним або механічним приводом, причому електровентилятор небезпечніше, тому що невідомий момент його включення).
4	Електротехнічні роботи	контакти з небезпечними речовинами (кислоти, луги, гази);
		можливість утворення гримучого газу при зарядці акумуляторних батарей;
		значна маса АКБ;
		можливість розбризкування крапель кислоти при порушенні правил готування електроліту.
5	Слюсарні роботи	частини верстатів, що рухаються;
		рухомий ріжучий інструмент;

		стружка, що утворюється при обробці, пил;
		підвищений рівень шуму на робочому місці;
		підвищений рівень вібрації при роботі з електро- і пневмо інструментом.

Під час виконання різних операцій діагност ризикує ураженням електричним струмом у разі несправності обладнання, що працює від мережі до 220 В. За пробою ізоляції напруга може з'явитися на неструмовідних частинах, спричиняючи електротравми, електроудари та подальші захворювання.

Роботи на дільниці супроводжуються утворенням пилу: під час підготовки авто до ремонту, демонтажу вузлів, очищення, продування порожнин та інших технологічних операцій. Пил шкідливо впливає передусім на органи дихання, провокуючи хвороби верхніх дихальних шляхів і легенів. Накопичуючись у легеневій тканині та лімфатичних вузлах, він її уражає; проникаючи глибше, може призводити до фіброзних змін. Крім того, інгаляція пилу підвищує ризик запалення легенів.

Також пил чинить подразнювальну дію на шкіру: потрапляючи в протоки сальних і потових залоз, він їх закупорює, порушує нормальні функції шкіри, знижує її захисні властивості та полегшує проникнення мікроорганізмів.

4.3. Заходи по забезпеченню захисту працівників від дії шкідливих та небезпечних факторів

Основні дії для захисту працівників від шкідливих і небезпечних виробничих факторів – це приведення умов праці до нормативних, зокрема:

- удосконалення технологічних процесів технічного обслуговування та діагностування для зменшення викидів, шуму, вібрацій тощо;
- модернізація або заміна обладнання, що не відповідає чинним вимогам охорони праці та санітарно-гігієнічним нормам;
- оснащення приміщень, устаткування і робочих місць необхідними засобами захисту (вентиляція, достатнє освітлення, огороження тощо);
- своєчасне виконання ремонтних і профілактичних робіт на наявних

засобах, які частково або повністю втратили захисні властивості;

- огороження небезпечних зон для створення фізичного бар'єра, що унеможливило б наближення до джерел небезпеки, запобігає захопленню одягу або частин тіла рухомими елементами обладнання, а також опікам від нагрітих поверхонь та іншим ушкодженням.

На дільниці ТО та діагностування автомобілів слід розміщувати наочні плакати з правилами безпечного виконання відповідних робіт.

4.4. Правила безпечного виконання робіт при діагностуванні та обслуговуванні двигуна

Перевірку технічного стану автомобіля та його агрегатів переважно виконують при вимкненому двигуні й зафіксованих гальмах, за винятком випробувань гальмівної системи та контролю роботи систем живлення і запалювання.

Під час огляду дозволено користуватися переносною лампою із захисною сіткою напругою не більш як 42 В. Якщо огляд ведуть в оглядовій канаві, напруга переносної лампи має бути не вище 12 В.

Запуск двигуна зазвичай здійснюють електростартером. Перед ручним пуском перевіряють надійність кріплення штифта пускової рукоятки. Щоб уникнути травм кисті під час зворотного удару, рукоятку беруть так, аби всі пальці правої руки були з одного боку ручки. Колінчастий вал повертають лише знизу догори; обертанню «вниз» чи по колу слід запобігати.

На постах діагностування прилади та обладнання розміщують так, щоб оператор з робочого місця міг оглядати всі автомобілі на постах. Робоче місце оператора комплектують обертовим стільцем із регулюванням по висоті.

Діагностичні та інші пости, де двигун працює під час обслуговування, оснащують ефективними місцевими відсмоктувачами відпрацьованих газів. Процедури перевірки токсичності та димності мають відповідати загальним вимогам охорони праці та чинним нормативним документам.

Під час роботи з газоаналізаторами й димомірами інспектори діють згідно з інструкціями з безпеки, наведеними в експлуатаційній документації на прилади. Заборонено обслуговувати прилад, не відключивши його від електромережі.

Усі перевірки виконують лише на нерухомо зафіксованому транспортному засобі. Для цього: встановлюють автомобіль, переводять важіль перемикачів передач (або вибір режиму в АКП) у нейтральне положення, затягують стоянкове гальмо, підкладають упори (башмаки) під колеса ведучих осей.

Перед під'єднанням засобів вимірювання токсичності та димності до випускної системи візуально перевіряють її справність: не допускаються пошкодження, що спричиняють витік відпрацьованих газів або підсмоктування повітря.

Якщо контроль токсичності й димності проводять у закритих приміщеннях, вони повинні мати природну або примусову вентиляцію. Концентрації шкідливих речовин у повітрі робзони не можуть перевищувати норми, установлені ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [40].

За відсутності спеціально облаштованого поста місце проведення вимірювань обирають так, щоб унеможливити випадковий наїзд на персонал. Водіїв попереджають: від'їжджати з місця (або під'їжджати до нього) дозволено тільки за сигналом інспектора.

Наступний автомобіль під час очікування повинен зупинитися не ближче ніж за 2 м від транспортного засобу, що перебуває на контролі. Швидкість руху на під'їзних коліях — не більш як 10 км/год, у приміщеннях, вузьких проїздах і безпосередньо біля місця вимірювань — до 5 км/год.

Працівникам, які виконують вимірювання, суворо заборонено запускати двигун або керувати транспортним засобом.

4.5. Дії у разі настання надзвичайної ситуації

– Не панікуйте й заспокоюйте оточення. Паніка в НС провокує хаотичні дії, ускладнює роботу рятувальників, пожежних, медиків та інших служб і призводить до тяжких наслідків.

- За можливості негайно зателефонуйте «101» (рятувальники/пожежні) або «112» (єдиний номер екстрених служб). Говоріть спокійно й чітко: що сталося, точне місце (адреса, орієнтири). Якщо ви свідок і вам нічого не загрожує — залишайтеся на місці до прибуття служб.
- Якщо ви постраждали або поруч є потерпілий(і), надайте домедичну допомогу. Своєчасні дії зменшують ризик ускладнень і тяжких наслідків.
- Увімкніть радіо чи телевізор, прислухайтеся до оголошень із вуличних гучномовців. Повідомлення міститимуть суть події та основні рекомендації щодо поведінки.
- Дотримуйтеся вказівок фахівців (ДСНС, поліції, медиків). Це допоможе оперативно надати допомогу постраждалим і мінімізувати вплив небезпечних чинників.
- Не перешкоджайте роботі служб: пропускайте спецтранспорт із проблісковими маячками й спеціальним маркуванням, не створюйте заторів і перешкод на маршрутах їх руху.

Висновок

Проведений аналіз стану охорони праці на підприємстві виявив уразливі аспекти в роботі профільної служби. Також сформовано практичні рекомендації щодо усунення виявлених недоліків як у діяльності служби охорони праці, так і під час виконання діагностичних операцій та робіт з технічного обслуговування.

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Техніко-економічний результат від застосування пари тертя з додаванням ТМК (гідросилікату магнію) проявляється у такому:

1. можливість роботи підшипника за підвищених питомих тисків;
2. збереження високих антифрикційних властивостей вузла з низьким і стабільним коефіцієнтом тертя;
3. надійніша та довготриваліша експлуатація завдяки формуванню захисної плівки, яка запобігає прямому контакту сполучених поверхонь.

Економічний ефект E від використання добавки ТМК визначають за формулою (5.1) [41]:

де: Z_1, Z_2 — витрати на обслуговування підшипникових вузлів при застосуванні звичайного пластичного мащення та мащення з добавкою ТМК відповідно, грн;

N_1, N_2 — кількість підшипників, що вийшли з ладу протягом року за умови використання стандартного мащення та мащення з ТМК відповідно, шт;

V_{m1} — вартість мащення без добавки на один підшипник, грн;

V_{m2} — вартість мащення з ТМК на один підшипник, грн;

$V_{роб}$ — вартість робіт з обслуговування підшипникового вузла, грн;

$V_{пк}$ — вартість підшипника кочення, грн.

У таблиці 5.1 наведено приклад розрахунку економічного ефекту від використання пластичного мастила «Літол-24» із добавкою ТМК у підшипниках кочення за усередненими показниками, виконаний за формулою (5.1).

Таблиця 5.1 – Розрахунок економічної ефективності застосування пластичного мастила «Літол-24» із добавкою ТМК у підшипниках кочення (усереднені дані).

№	Показник	Значення показника при мащенні	
		Літол-24	Літол-24 + ТМК
1	Кількість підшипників N , шт.	100	53

2	Вартість підшипника $V_{\text{пк}}$, грн. (19 – 75)	50	50
3	Вартість мащення $V_{\text{м}}$, грн	1,1	2,4
4	Вартість робіт з обслуговування підшипникового вузла $V_{\text{роб}}$, грн.;	25	25
5	Загальні витрати, грн	7610	4102
6	Економічний ефект, Е	-	3508

Запровадження у виробництво мастила «Літол-24+ТМК» забезпечує економічний ефект у розмірі 3508 грн, що зумовлено збільшенням ресурсу підшипника у 1,9 раза.

ВИСНОВОК

Надійність підшипників кочення безпосередньо впливає на роботу механізмів і визначає технічний рівень машин та агрегатів. Її можна розуміти як здатність підшипника протягом усього ресурсу виконувати експлуатаційні вимоги за умови дотримання комплексу правил, що забезпечують роботу вузла.

Довговічність підшипника формується під впливом низки чинників, які доцільно поділити на три групи. За впровадження нових мастильних матеріалів і технологій важливим стає прогноз ресурсу: коректний розрахунок строку служби дозволяє планувати регламенти ТО, потребу в запасних частинах і залучення персоналу.

Для кулькових і роликових підшипників автотракторної та с/г техніки довговічність може зрости до 27,7 % завдяки присадкам, що разом із мастилом формують на тертьових поверхнях захисний шар. Такі добавки зменшують шорсткість, «підліковують» мікропошкодження після мехобробки та підвищують навантаження заїдання.

Теоретично обґрунтовано можливість підвищення ресурсу підшипників кочення через присадки до пластичних мастил. Показано ефективність ТМК (гідросилікату магнію) як добавки: оптимальна концентрація — 1,8–2,1 %. Оптимальний режим припрацювання вузла кочення на мастилі з ТМК: навантаження 40–60 % від номінального, тривалість припрацювання 20–25 хв, фіксація сформованого покриття — не менше 30 хв або до повного охолодження вузла.

Експерименти засвідчили високу результативність ТМК: середній момент тертя у вузлі кочення знижується на 20–25 %, навантаження заїдання зростає приблизно у 1,2 раза. Час до настання задиру на «Літол-24 + ТМК» збільшується у 2,2–2,5 раза. Стендові випробування підтвердили: ресурс підшипників кочення № 202 зростає у 1,9 раза.

Розроблено практичні рекомендації щодо застосування ТМК у підшипникових вузлах. Додатково проаналізовано та усунуто недоліки у роботі служби охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крагельський, І. В. Трение и износ. Москва: Машиностроение, 2016. 512 с.
2. Муравйов, В. В. Підшипники кочення: будова, розрахунок і діагностика. Київ: Ліра-К, 2020. 284 с.
3. ГОСТ 18854-73. Подшипники качения. Метод расчета динамической грузоподъемности. Москва, 1973. 32 с.
4. ГОСТ 18855-73. Подшипники качения. Метод расчета статической грузоподъемности. Москва, 1973. 18 с.
5. ТУ 21150-87. Пластичне мастило Літол-24. Москва, 1987. 24 с.
6. Дідур, В. В. Трибологічні властивості мастильних матеріалів у деталях машин. Умань: УНУС, 2019. 168 с.
7. Воробйов, А. М. Модифікатори тертя для підшипникових вузлів. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. 144 с.
8. Плешаков, І. А., Рибак, М. В. Підшипники машин: надійність та довговічність. Київ: Кондор, 2018. 240 с.
9. Шмат, О. І. Мастильні матеріали: властивості, класифікація, застосування. Київ: Основа, 2017. 200 с.
10. Паливода, О. М. Пластичні мастила: технології та напрямки розвитку. Львів: Новий Світ-2000, 2019. 176 с.
11. Hamrock, B. J., Schmid, S. R., Jacobson, B. O. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. New York: CRC Press, 2018. 680 p.
12. Blau, P. J. Friction Science and Technology. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 540 p.
13. Erdemir, A., Martin, J. Tribology of Lubricants and Lubrication Systems. Tribology International, 2019, vol. 137, pp. 1–12.
14. Wang, Q., Li, S. Wear Behavior of Rolling Bearings Lubricated with

Nano-Modified Greases. *Wear*, 2021, vol. 474–475, 203881.

15. Holmberg, K., Andersson, P. The Role of Lubricants in Reducing Friction and Wear in Machines. *Tribology International*, 2017, vol. 115, pp. 116–130.

16. Neville, A., Morina, A. *Tribology of Bearing Systems*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021. 352 p.

17. Stachowiak, G. W., Batchelor, A. J. *Engineering Tribology*. 5th ed. Elsevier, 2021. 892 p.

18. Yu, H., Xu, B. Tribological Performance of Magnesium Silicate Additives in Lubricating Greases. *Lubrication Science*, 2020, vol. 32, pp. 45–58.

19. Zhang, X., Liu, W. Nanoparticle-Based Lubricant Additives: Mechanisms and Applications. *Wear*, 2018, vol. 406–407, pp. 71–90.

20. Roylance, M. *Bearings: Tribology, Materials and Reliability*. London: Springer, 2019. 248 p.