

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка
до дипломної роботи

бакалавра
Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань **13 Механічна інженерія**
Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): **132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»**

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Використання модифікованих мастильних матеріалів
для збільшення ресурсу підшипників кочення»**

Шифр **ДРМТВАТАМ 23.20172.000 ПЗ**

Виконав: студент 3-го курсу,
група *МТВАс-20-2*



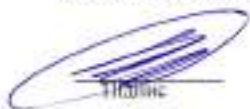
М. В. Антипчук
Ініціали, прізвище

Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*



С. Ф. Посонський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.



О. В. Духа
Ініціали, прізвище

9 06

2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*

Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*

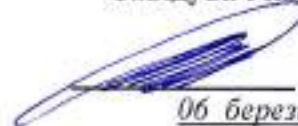
Освітній рівень *бакалавр*

Спеціальність *132 «Матеріалознавство».*

Спеціалізація *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ



Диха О.В.

06 березня 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Антипчуку Максиму Вікторовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Використання модифікованих мастильних матеріалів для збільшення ресурсу підшипників кочення.*

керівник роботи: *Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.*

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

Затверджено наказом університету від *1.03.2023 р. № 5 (Д 14)*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру *20.06.2023 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів та робіт.*

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

1) *Аналіз питань довговічності підшипникових опор кочення*

2) *Змащувальні матеріали підшипників кочення.*

3) *Вплив втомних процесів на довговічність підшипників кочення.*

4) *Розрахунок підшипника кочення при змащуванні пластичними мастильними матеріалами*

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 6 березня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Промітки
1	Аналіз питань довговічності підшипникових опор кочення	24.04.23	вик
2	Змащувальні матеріали підшипників кочення	16.05.23	вик
3	Вплив втомних процесів на довговічність підшипників кочення	26.05.23	вик
4	Розрахунок підшипника кочення при змащуванні пластичними мастильними матеріалами	14.06.23	вик
5	Захист роботи	17.06.23	

Студент


Підпис

Антинчук М. В.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посонський С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент гр. МТВАс-20-2 Антипчук М.В.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «**Використання модифікованих мастильних матеріалів для збільшення ресурсу підшипників кочення**» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 19 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 22 сторінках. Роботу викладено на 78 сторінках, з них 73 сторінок основного тексту, на яких розміщено 23 рисунки і 9 таблиць.

Виробництво підшипників кочення промисловими країнами нараховує сотні мільйонів штук на один рік. В Україні виготовляються підшипники кочення з зовнішнім діаметром від 1,5 до 2600 мм, вагою від 0,5 г до 3,5 т.

Також не стоїть на місці промисловість з виробництва і застосуванням високоякісних нових мастильних матеріалів, що дають широкі можливості керування процесами тертя та зношування. Слід відмітити, що змащення вузлів тертя визначає ресурс підшипників кочення не менше, ніж матеріали його деталей.




На сьогодні на ринку мастильних матеріалів можна знайти широкий асортимент добавок (присадок), що дозволяють значно підвищити мастильні властивості мастильних матеріалів за рахунок покращення їх протизносних та протизадирних властивостей. За рахунок використання добавок можливо зменшення сил тертя між контактуючими поверхнями тіл кочення, а також зниження зношування підшипників, що є наслідком проковзування тіл кочення по доріжкам. Однак питанням про добавки для пластичних мастильних матеріалів приділено не достатньо уваги.

Метою даної дипломної роботи є виявлення можливості підвищення ресурсу підшипників кочення машин, шляхом модифікації мастильних матеріалів.

Перелік ключових слів: ПІДШИПНИК КОЧЕННЯ, ВТОМНЕ ЗНОШУВАННЯ, НАПРУЖЕННЯ, МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, МОДИФІКАТОРИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ПИТАНЬ ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ ОПОР КОЧЕННЯ	7
1.1 Загальні відомості про підшипники кочення	7
1.2 Критерії працездатності підшипників кочення	10
1.3 Аналіз причин відмов підшипників кочення	11
1.4 Методи підвищення терміну служби підшипників кочення	18
2 ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ	23
2.1 Пластичні мастильні матеріали підшипників кочення	23
2.2 Згущувачі пластичних мастил	25
2.3 Модифікатори змащувальних матеріалів	30
3 ВПЛИВ ВТОМНИХ ПРОЦЕСІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ	47
3.1 Поняття механічної втоми	47
3.2 Механізм втомного руйнування	49
3.3 Вплив сил тертя на процеси втоми	52
РОЗРАХУНОК ПІДШИПНИКА КОЧЕННЯ ПРИ ЗМАЩУВАННІ ПЛАСТИЧНИМИ МАСТИЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ	57
4.1 Розрахунок майданчика контакту ролик – кільце	57
4.2 Розрахунок режиму змащення підшипника кочення	68
4.3 Розрахунок довговічності підшипника кочення	71
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТОК	78

ДРМТВАТАМ 23.20172.000 ПЗ									
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Використання модифікованих мастильних матеріалів для збільшення ресурсу підшипників кочення	Літера	Аркуш	Аркушів	
Виконав		Антипчук						4	78
Перевір.		Посонський							
Н.контр. Затвер.		Бабак Диха							ХНУ МТВАс-20-2

ВСТУП

Довговічність машин та агрегатів у значній мірі залежить від інтенсивності зношування їх окремих деталей. Експлуатаційний досвід показує, що 80-90 % вузлів тертя виходять з ладу через зношування [1, 2].

Одним з таких елементів, що знижують показники надійності агрегатів, є підшипники кочення, довговічність яких, у більшості випадків, обумовлена причинами втомного зношування.

Використання підшипників кочення дає можливість замінити тертя ковзання на тертя кочення, що суттєво знижує коефіцієнт тертя між деталями орієнтовно до 0,0015 - 0,006 (це вважається умовна величина, що враховує втрати в підшипнику і співставляється до діаметра валу). Підшипники кочення виготовляють у масових масштабах, як стандартну продукцію, що значно знижує собівартість виробництва. Витрата затрат на змащення підшипників також зменшується. Габарити підшипників кочення (за довжиною) значно менші ніж габарити підшипників ковзання. Суттєві переваги підшипників кочення забезпечили їм широке використання в машинобудуванні. У більшості випадків вони майже повністю замінили підшипники ковзання [3].

Виробництво підшипників кочення промисловими країнами нараховує сотні мільйонів штук на один рік. В Україні виготовляються підшипники кочення з зовнішнім діаметром від 1,5 до 2600 мм, вагою від 0,5 г до 3,5 т.

Також не стоїть на місці промисловість з виробництва і застосуванням високоякісних нових мастильних матеріалів, що дають широкі можливості керування процесами тертя та зношування. Слід відмітити, що змащення вузлів тертя визначає ресурс підшипників кочення не менше, ніж матеріали його деталей.

Без застосування високоякісних мастильних матеріалів технічний прогрес унеможлиблюється, тому вдосконалювання мастильних матеріалів є

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

найбільш ефективним шляхом підвищення довговічності підшипників кочення машин та агрегатів [3, 4].

На сьогодні на ринку мастильних матеріалів можна знайти широкий асортимент добавок (присадок), що дозволяють значно підвищити мастильні властивості мастильних матеріалів за рахунок покращення їх протизносних та протизадирних властивостей. За рахунок використання добавок можливо зменшення сил тертя між контактуючими поверхнями тіл кочення, а також зниження зношування підшипників, що є наслідком проковзування тіл кочення по доріжкам. Однак питанням про добавки для пластичних мастильних матеріалів приділено не достатньо уваги.

Метою даної дипломної роботи є виявлення можливості підвищення ресурсу підшипників кочення машин, шляхом модифікації мастильних матеріалів.

На виконання поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- виконати інформаційний пошук з тематики роботи, проаналізувати причини виходу з ладу підшипникових вузлів;
- провести аналіз методів підвищення терміну служби підшипникових вузлів;
- виконати аналіз існуючих матеріалів, що застосовуються як функціональні добавки до мастильних матеріалів;
- провести розрахунок напружень і тисків у зоні контакту підшипника;
- виконати оцінку режиму роботи підшипникового вузла на підставі якої приймається рішення щодо використання модифікованого мастильного матеріалу.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1 АНАЛІЗ ПИТАНЬ ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ ОПОР КОЧЕННЯ

1.1 Загальні відомості про підшипники кочення

Підшипник - це напрямна або опора, що сприймає навантаження та дозволяє відносно переміщення деталей механізму в заданому напрямку. Основним призначенням підшипників є підтримка обертової деталі в просторі, що сприймає діючі навантаження [3, 4]. В залежності від виду тертя підшипники поділять на два типи: кочення та ковзання. В підшипниках ковзання робочі поверхні опори і вала частково або повністю розділені шаром мастильного матеріалу.

Підшипники кочення бувають кулькові та роликові. Кулькові підшипники мають меншу вартість, чим роликові підшипники подібних розмірів але й нижчу вантажопідємність, тому вони використовуються для незначних навантажень. У таких підшипників не велика площа контакту між тілами кочення і доріжками. Така конструкція забезпечує роботу на високих швидкостях із мінімальним втомним руйнуванням та меншим нагріванням ніж роликові підшипники.

Підшипники кочення складаються із внутрішнього та зовнішнього кілець, тіл кочення (роликів або кульок) та сепаратора, що утримує тіла кочення на певній відстані одне від одного. Іноді одне або обидва кільця відсутні і тоді тіла кочення котяться безпосередньо по корпусу або валу.

Позначення і класифікація підшипників кочення наведено на рисунках 1.1 – 1.2.

- за формою тіл кочення,
- за напрямком діючого навантаження.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

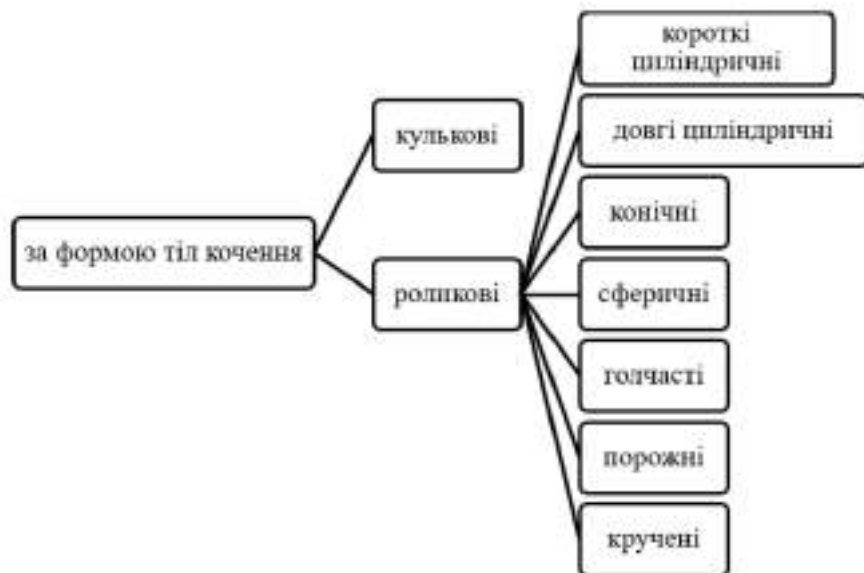


Рисунок 1.1 – Класифікація підшипників кочення за формою тіл кочення.

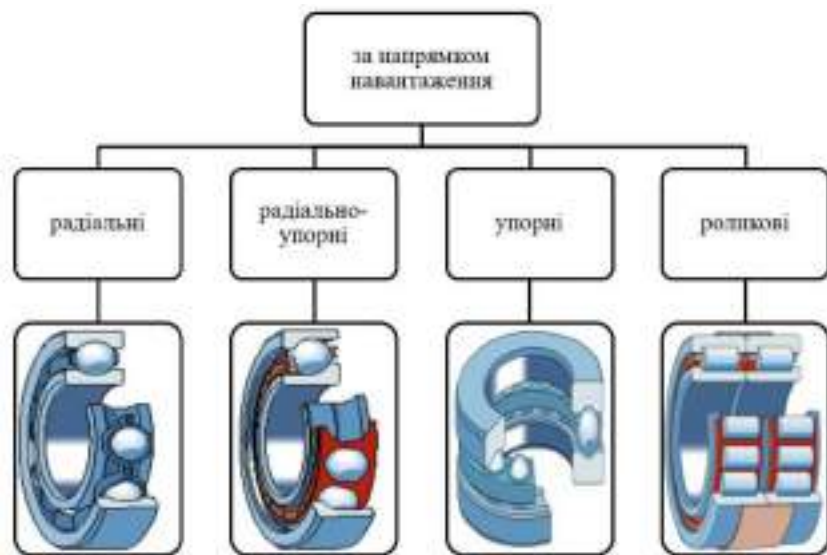


Рисунок 1.2 – Класифікація підшипників кочення за напрямком діючого навантаження.

Радіальні кулькові підшипники бувають з канавкою і без канавки для введення кульок. Крім того, виготовляють спеціальні підшипники для специфічних областей застосування, наприклад, дворядний підшипник, що може сприймати більші радіальні навантаження. Також є

самовстановлюючийся роликовий підшипник, що може компенсувати неспіввісність між корпусом і валом.

Радіально-упорні підшипники створені, щоб сприймати комбіноване навантаження. Відношення осьового і радіального навантаження залежить від кута контакту між віссю підшипника і доріжками кочення.

Упорні підшипники забезпечують точне осьове положення вала та сприймають упорне навантаження. Упорні підшипники мають дві доріжки кочення, що можуть бути плоскі або з поглибленням для тіл кочення, розділені сепаратором з тілами кочення.

В роликових підшипниках контактна поверхня тіл кочення із зовнішнім і внутрішнім кільцем більше, вони сприймають більші навантаження ніж кулькові підшипники. Роликові підшипники сприймають навантаження від середніх до важких та здатні гасити ударні навантаження. Вони менше піддаються деформації, ніж кулькові підшипники, так як тиск на ролики, при зіткненні при рівному навантаженні, значно менший за рахунок збільшену площі контакту. Роликові підшипники поділяються на сферичні, конічні, циліндричні та голчасті. Окремо виділяють підшипникові вузли, якщо підшипник поставляється вмонтованим в корпус.

- за кількістю рядів тіл кочення бувають одно -, двох - і багаторядні підшипники (рис. 1.3).

- серії підшипники розділяють по співвідношенню габаритних розмірів. При однаковому внутрішньому діаметрі підшипники одного типу можуть мати різну ширину і зовнішній діаметр, тобто, різні серії по ширині і діаметру. Зі збільшенням габаритних розмірів підвищується навантажувальна здатність, але знижується гранична частота обертання підшипника.

- стандартом встановлено декілька класів точності підшипників (в порядку підвищення): 8, 7, 0, 6X, 6, 5, 4, 2, Т. Клас точності відповідає і визначає точність розмірів та форми деталей підшипників.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- за спеціальними вимогами випускають підшипники термостійкі, корозійностійкі, високошвидкісні, немагнітні, зниженого шуму, що само змазуються (рис. 1.4).



Рисунок 1.3 – Класифікація підшипників по числу рядів кочення



Рисунок 1.4 – Класифікація підшипників по спеціальним вимогам

1.2 Критерії працездатності підшипників кочення

Працездатність підшипників кочення визначається за двома критеріями.

Статична вантажопідйомність [3, 4] (C_0) - навантаження, що викликає залишкову загальну деформацію найбільш навантаженого тіла кочення з величиною $10^{-4} D_w$ (діаметр тіла кочення).

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Динамічна вантажопідйомність (c_r) - постійне радіальне навантаження, що може сприймати підшипник кочення при довговічності 10^6 обертів.

Номінальний період роботи і номінальна динамічна навантаженість c взаємопов'язані емпіричною залежністю:

$$L = a_1 a_2 \left(\frac{C}{P} \right)^m \quad \text{або} \quad C = P \sqrt[m]{\frac{L}{a_1 a_2}}, \quad (1.1)$$

де L - номінальний термін служби, млн. обертів; c - номінальна динамічна навантаженість, Н; P - еквівалентна навантаженість, Н; m - показник ступеня, для роликових підшипників $m = 10/3 = 3,33$, для кулькових підшипників $m = 3$; a_1 - коефіцієнт надійності; a_2 - коефіцієнт спільного впливу умови експлуатації і якості металу, його значення знаходиться в діапазоні: 0,7...1,4.

1.3 Аналіз причин відмов підшипників кочення

Ефективні заходи щодо збільшення довговічності можна розробляються на основі причин пошкоджень поверхневих шарів елементів підшипника, фізичної сутності та закономірності розвитку процесів руйнування.

На рис. 1.5 наведено розподіл вибракування підшипників кочення за причинами відмов. В цьому випадку, основною причиною відмови виступає зношування підшипників кочення. Наступне місце, по питомій вазі, займає руйнування сепараторів. Далі слідують причини, пов'язані із провертанням кілець підшипників в корпусах і на валах, ушкодженнями втомного характеру та вм'ятинами на контактуючих поверхнях підшипників; потім руйнування кілець, тощо.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

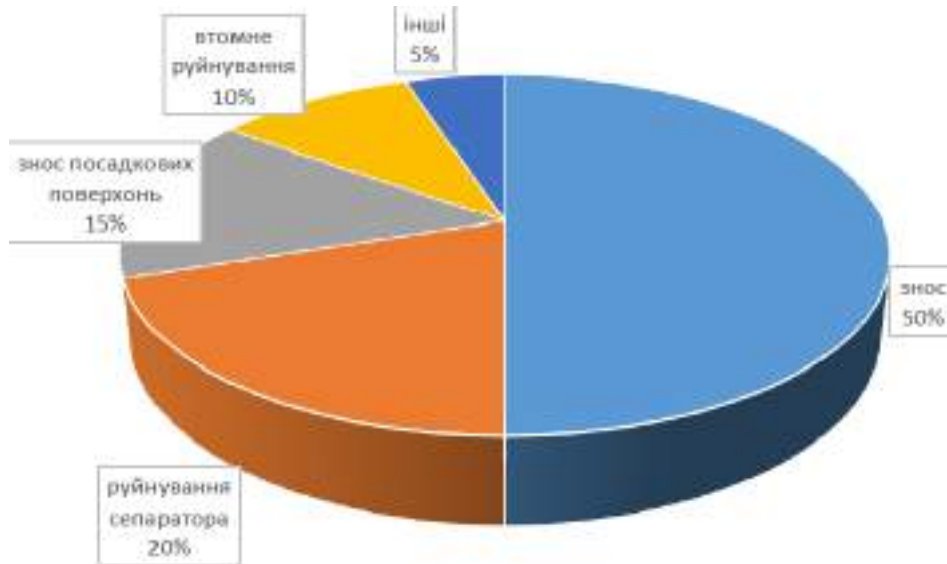


Рисунок 1.5 – Розподіл відмов підшипників кочення.

На рисунку 1.6 зображено класифікацію причин, що приводять до зниження ресурсу підшипників кочення. Умовно їх можна розділити на три групи: 1) експлуатаційні, 2) конструктивні; 3) технологічні. Технологічні та конструктивні дефекти, як правило, об'єднують в одну групу: конструктивно-технологічні.

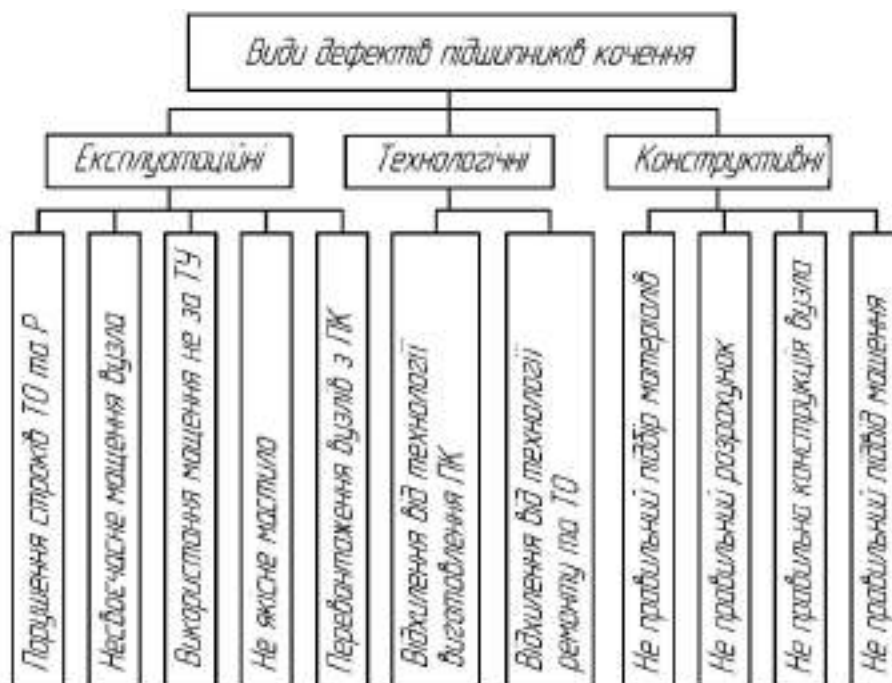


Рисунок 1.6 – Класифікація видів причин зниження ресурсу підшипників

Причини першої групи обумовлені дотримання правил експлуатації машин. При належному відповідному дотриманні правил експлуатації машин можна досягти значного підвищення довговічності підшипників кочення. Це можливо шляхом застосування спеціальних стендів, знімачів, пристосувань для розбирання та складання; підвищенням кваліфікації ремонтників, своєчасному змащенні і заміні фільтруючих елементів центральних системи змащення, своєчасній заміні сальників, тощо.

Причини групи другої базуються на стабільності якості підшипників, котрі випускаються промисловістю, дотриманням технічних вимогам виготовлення і ремонту машин. Якість виготовлення підшипників, передусім, обумовлюється наступними факторами: відповідним вибором матеріалів, мастила і конструкції підшипників; вірним співвідношенням розмірів деталей і, особливо, раціональними внутрішніми зазорами; вірним вибором режимів термомеханічної обробки та раціональних методів виготовлення заготовель; забезпеченням необхідного операційного і остаточного контролю; системою автоматизації процесів виготовлення і контролю.

Важливим фактором, що впливає на ресурс підшипників, є дотримання технології виготовлення і ремонту складальних одиниць машин, від якої залежать задані умови роботи підшипників, що пов'язані з допусками, посадками, відхиленнями, співвісністю, овальністю, конусоподібністю та іншими дефектами посадочних поверхонь. Шорсткість контактуючих робочих поверхонь деталей підшипника, що перевищує припустиму, буде сприяти суттєвому збільшенню радіального зазору саме в початковий період експлуатації за рахунок стискання (зминання) мікровиступів з послідуєчим збільшенням коливальних процесів і відмови підшипника. Геометричні відхилення розмірів деталей підшипника можуть стати причиною місцевого контактного перенавантаження, що призводить до втомного викрашування металу.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Підшипниковий вузол піддається найбільшому зносу внаслідок високих навантажень, коливань, робочих тисків, температур, що змінюються, швидкостей відносного кочення, агресивності навколишнього середовища, що призводить до виникнення певного виду зношування та як наслідок – до зниження працездатності та зменшення довговічності підшипникового вузла загалом. Накопичення пошкоджень визначається, як правило, не одним будь-яким явищем, а деякою їх сукупністю.

Особливо впливають на підшипники кочення процеси втоми [5]. Поява перших ознак втомних ушкоджень залежить від частоти обертання підшипника, величини навантаження, ефективності змащування. Втомне зношування породжує тріщини. Перекочування тіл кочення по тріщинам призводить до відколювання дрібних частинок матеріалу підшипника, у зв'язку з чим виникають ділянки з шорсткою та крупнозернистою структурою поверхні. Цей процес називається втомне викришування (рисунок 1.7 і 1.8).



Рисунок 1.7 – Втомне викришування доріжок підшипника

Втомне викришування поверхонь кочення кілець і тіл кочення може виникати: внаслідок недостатньої працездатності підшипника для дійсних умов експлуатації (через дію на підшипник збільшених навантажень); при перекосі кілець підшипника; на поверхнях кочення в зонах механічного їх ушкодження (ризки, вм'ятини), пов'язаного з засмічення продуктами зносу мастильного матеріалу [5].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14



Рисунок 1.8 – Втомне викришування кульок підшипника

При недостатньому змащуванні дві контактуючі поверхні ковзають одна щодо іншої під навантаженням, відбувається перенесення частинок металу з однієї поверхні на іншу і відбувається задир (рисунок 1.9). Також задир може утворюватися при незначних заклинюваннях.



Рисунок 1.9 – Внутрішнє кільце конічного наполегливого роликпідшипника із задирами на поверхні буртика внутрішнього кільця

Скіл являє собою утворення дрібних частин, які відламуються в результаті надмірного навантаження або ударного навантаження, що діє локально на частину кута ролика або буртика кільця з доріжкою кочення (рисунок 1.10).

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



Рисунок 1.10 – Внутрішнє кільце сферичного роликopідшипника з розломом на великому буртику

Ще одним видом ушкодження є тріщини на кільці з доріжкою кочення та на елементах кочення (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Зовнішнє кільце дворядного циліндричного роликopідшипника з тріщинами, спрямованими назовні в осьовому та периферійному напрямках від осередку розвитку втомного викришування на поверхні доріжки кочення.

У тих випадках, коли сили монтажу передаються на кільця через тіла кочення, на доріжках кочення та тілах кочення можуть виникати вм'ятини.

Так само вм'ятини виникають при надмірно великих навантаженнях на підшипникові вузли тоді, коли підшипники не обертаються. Причиною вм'ятин може бути проникнення в підшипник сторонніх частинок.

Повзучість це явище, у якому має місце відносне ковзання на поверхнях посадки і, у зв'язку з цим, виникає зазор на посадкових поверхнях. Повзучість призводить до глянсуватого зовнішнього вигляду поверхні, іноді зі зносом або утворенням задири (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Повзучість по всій поверхні зовнішнього кільця підшипника кочення

Ушкодження сепаратора включають деформації сепаратора, розлом та знос (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Руйнування перемичок сепаратора конічного роликового підшипника

Таким чином, при всій різноманітності ушкоджень найчастіше мають місце втомні руйнування та зношування, що знижують довговічність підшипників.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.4 Методи підвищення терміну служби підшипників кочення

Довговічність машини залежить від сукупності впливу різноманітних факторів, що виявляються на всіх етапах її створення та експлуатації. Найчастіше довговічність машини знижується внаслідок зносу, тому для підвищення довговічності слід підвищувати зносостійкість вузлів тертя та деталей машин. Накопичені світовою практикою методи та способи запобігання зносу можна поділити на такі групи: матеріалознавчі; технологічні; конструкційні; виробничі та експлуатаційні [4-5].

Матеріалознавчі методи включають спрямований синтез зносостійких конструкційних та мастильних матеріалів, вибір раціональних конструкційних та мастильних матеріалів у вузлах тертя, вивчення та управління процесами, що протікають у матеріалах при зношування. Матеріали деталей та вузлів тертя крім зносостійкості повинні мати комплекс інших властивостей, що забезпечують надійну роботу конструкції загалом [6].

Конструкційні методи забезпечують зносостійкість на етапі проектування машин. Ці методи спрямовані на таке:

- пом'якшення режимів роботи матеріалів у деталях та вузлах тертя (зменшення навантаження, температури, швидкості);
- захист деталей, що труться, від контакту з абразивним та агресивним середовищем;
- виключення режимів тертя без мастильного матеріалу або умовах граничного мастила; компенсацію зносу деталей; забезпечення рівномірного зношування деталей;
- виключення катастрофічних видів зношування деталей при схоплюванні;
- забезпечення ремонтпридатності деталей та вузлів тертя.

Це досягається наступним: раціональним підбором поєднання матеріалів у поєднанні; вибором раціональної геометрії та кінематики вузла;

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

заміною опор ковзання на опори кочення; застосування різних способів змащення, різних ущільнень, затворів, фільтрів, економічність та ефективністю агрегату, забезпеченням рівномірності деталей та вузлів; доступністю та простотою обслуговування, ремонту і заміною деталей та вузлів.

Технологічні методи попередження зносу засновані на великих технологічних можливостях управління зносостійкими властивостями деталей на етапі їх виготовлення та ремонту. Це фізико-хімічна, теплова, механічна дія на поверхневі шари матеріалів; плакування, покриття, наплавлення робочих поверхонь деталей, наклеп, модифікація поверхневих структур під впливом різноманітних фізичних полів та частинок, що несуть високу енергію [6].

Виробничі та експлуатаційні методи забезпечення зносостійкості реалізуються у процесі виробництва та експлуатації на етапі створення техніки, де необхідне точне дотримання технології виготовлення деталей. У процесі виготовлення контролюють такі параметри: якість поверхонь тертя; відхилення форми деталей; твердість поверхонь; точність збирання; биття; регламентовані зазори та інше.

В умовах реальної експлуатації для забезпечення зносостійкості та збільшення ресурсу машин необхідне дотримання режимів експлуатації, правил технічного обслуговування, своєчасне та якісне діагностування стану деталей та вузлів тертя, ремонт та заміна зношених деталей та вузлів, ресурс яких вичерпано.

Великий вплив на інтенсивність зношування відповідальних деталей машини надає якість догляду за машиною в експлуатації, особливо своєчасне змащування тертьових частин, захист їх від забруднення.

Правила технічного обслуговування повинні включати періодичність змащування, технічної діагностики та контролю зносу вузлів тертя, періодичність поточних ремонтів та оглядів, карту точок змащування, періодичність поповнення та заміни мастильного матеріалу. При заміні

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

мастильного матеріалу необхідно контролювати відповідність технічним умовам, відсутність забруднень, абразивних частинок.

Ресурс вузлів тертя машин та механізмів значною мірою визначається працездатністю застосовуваних мастильних матеріалів. Використання мастильних матеріалів, не передбачених технічною документацією, може спричинити інтенсивне зношування вузлів тертя, втрату мастила [6].

Для підшипників кочення найбільш ефективним та реалізованим є метод підвищення надійності, який полягає у застосуванні мастильних матеріалів, які сприяють підвищенню зносостійкості за рахунок своїх властивостей. Якщо не торкатися конструкції підшипникового вузла, його довговічність пов'язана із збільшенням тривалості термінів служби пластичних мастильних матеріалів, і може бути вирішена шляхом модифікування мастильного матеріалу.

Проблема створення та застосування мастильних матеріалів вивчається вченими вже дуже давно, проте залишається актуальною досі. Мастильні матеріали забезпечують нормальну роботу і збереження машин та механізмів. Основними функціями мастильних матеріалів є:

- зменшення інтенсивності зношування тіл, що труться;
- зниження тертя до необхідного рівня;
- запобігання заїданню вузла тертя;
- забезпечення відведення теплоти із зони фрикційного контакту та винесення продуктів зносу чи корозії;
- захист поверхонь тертя та інших елементів конструкції від дії зовнішнього середовища (агресивних рідин, газів, парів та абразивних матеріалів - пилу, бруду та інше) або ущільнення зазорів [6].

У багатьох механізмах застосування та правильний підбір мастильних матеріалів дозволяють суттєво зменшити тертя, що знижує енерговитрати та дає значну економію.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Для забезпечення необхідної надійності функціонування вузла тертя слід прагнути до того, щоб мастильний матеріал найповніше відповідав умовам роботи трибосистеми.

Мастильний матеріал повинен зберігати свої властивості у всьому діапазоні умов експлуатації, не впливаючи на контактуючі при цьому матеріали. Мастильні матеріали, що застосовуються по агрегатному стану, ділять на такі види: рідкі (олії); пластичні (пластичні мастила); тверді; газоподібні.

У підшипниках кочення застосовуються і рідкі, і пластичні, і тверді мастильні матеріали. Найчастіше застосовуються пластичні мастильні матеріали (далі ПММ).

За реологічними властивостями пластичні мастила займають проміжне положення між оліями та твердими мастильними матеріалами, вони поєднують у собі властивості твердого тіла та рідини, що пов'язані з їх будовою. ПММ є високо структурованими тиксотропними дисперсіями.

У загальному випадку пластичні мастила можна розглядати як двокомпонентні колоїдні системи, які складаються з тривимірного структурного каркаса, утвореного твердими частинками загусника (дисперсна фаза) і включеної в комірки цього каркасу масла (дисперсійне середовище – рідка основа), яке утримується капілярними, адсорбційними та іншими фізичними зв'язками. Реологічні властивості пластичних мастил визначаються насамперед особливостями тривимірного структурного каркасу [8].

В пластичних мастилах вміст загусника може становити 5-25 %. В якості твердого загусника можуть виступати високомолекулярні солі карбонових кислот, тверді вуглеводні (парафін, церезин тощо), високодисперсні неорганічні (силікагель, бентоніти, графіт тощо) та органічні (сажа, пігменти, полімери, похідні сечовини тощо) матеріали з добре розвиненою питомою поверхнею, здатні до структуроутворення в неводних середовищах [7, 8].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Мастило, що не відповідає вимогам вузла за реологічними характеристикам і не забезпечує підтримку цього шару, навіть при наявності високоефективних присадок, виявляється малоефективним. Але й при виконанні цих умов одні і ті ж мастила можуть сильно відрізнятись за тривалості безвідмовної роботи та рівнем несучої здатності в залежності від конструкції підшипника.

Пластичні мастила належать до середовищ, у яких пружні деформації зневажливо малі. Однак саме пружні деформації надають істотний вплив на характер деформаційної поведінки тиксотропних пластичних дисперсних середовищ, що обумовлює особливість їх зсувної течії у робочих каналах вимірювальних приладів та технологічного обладнання [8].

Застосування пластичних мастил дозволяє спростити конструкцію змащувального сполучення, знизити витрати на обслуговування, однак пластичне мастило суттєво гірше відводить теплоту від місця фрикційного контакту та практично не виносить продуктів зносу.

Усі компоненти пластичного мастила повинні характеризуватись високою трибо стабільністю та хорошими протизносними властивостями.

Реологічні характеристики мають забезпечувати надходження оптимальної кількості пластичного мастила в зону тертя [8].

Для покращення експлуатаційних властивостей мастильного матеріалу застосовують спеціальні добавки, які називаються присадками. Необхідно, щоб метал пари тертя вступав у реакцію з активною частиною присадки, а сама присадка рівномірно розподілялася по мастильному матеріалу і не осідала на поверхнях тертя. За призначенням присадки бувають різні, наприклад, антифрикційні, протизносні, протизадирні, в'язкісні, депресорні, антикорозійні, миючі, багатофункціональні [8].

Мастильний матеріал, що містить присадки, називають модифікованим.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

2.1 Пластичні мастильні матеріали підшипників кочення.

Серед пластичних змащувальних матеріалів найбільшого поширення отримали солідоли. Основною відмінною рисою різних марок солідолів є вид загущувача і, відповідно, температурний діапазон працездатності. Синтетичні і жирові солідоли взаємозамінні, у них приблизно схожі експлуатаційні властивості.

Солідоли (таблиця 2.1) цілком задовольняють мастильним властивостям для температур до 65-70 °С. Але вони мають недостатню механічну стабільність, досить швидко випливають або видавлюються з негерметичного простору, що обмежує їх застосування наприклад в маточинах автомобілів та інших вузлах, де температура досягає 70-90 °С. Так, при експлуатації вантажних автомобілів, у більшості випадків, відбувається скидання солідолу з підшипників та витікання його з маточин [8].

В підшипниках генераторних машин і магнето зазвичай застосовують мастило № 158 і ЦИАТИМ-201. Воно, рекомендоване для всіх вузлів тертя, де необхідно забезпечити мінімальний опір при низьких температурах. Також його застосовують у карданах постійної кутової швидкості.

Більш розширена область застосування високоякісного мастила Літол-24, що заміняє інші, в складальних одиницях автотракторної і сільськогосподарської техніки. Це мастило рекомендується до застосування у вузлах зі збільшеним строком зміни (2 – 4 рази). Але слід враховувати, що переваги Літол-24 проявляються лише в досить точних вузлах тертя. У грубих, незахищених від води і бруду, вузлах тертя застосовувати високоякісне мастило Літол-24 недоцільно.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таблиця 2.1 – Пластичні мастильні матеріали для підшипників кочення

Марка	Склад	Ефективна в'язкість, Па с.	Межа міцності, Па с.	Температура краплепадіння, °С	Температурна межа працездатності	
					нижня	верхня
Солідол-С (ГОСТТ 4366-76)	Індустріальне масло, кальцієві мила синтетичних жирних кислот, вода	200	100	75	- 30	50
Солідол-Ж (ГОСТ 1033-79)	Індустріальне масло, кальцієві мила бавовняного масла, саломас, вода	250	200	75	- 25	65
ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74)	Масло вазелінове приладове МВП, літєве мило стеаринової кислоти, антиокислювач	1100 (при - 50 °С)	250... 500	175	- 60	90
Мастило №158 (ТУ 38.101320-77)	Масло авіаційне МС-20, літєво-калієве мило стеаринової кислоти, касторове масло, антиокислювальна і протизносна присадки	400	120	130	- 40	120
Літол-24 (ТУ-21150-97)	Мінеральне масло, літєве мило оксистеаринової кислоти, антиокислювальна і в'язкісна присадки	280	450 (при 20 °С)	180	- 40	130

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Літол-24 запобігає передчасному зношуванню підшипників та забезпечує їх роботу до появи втомного руйнування в герметизованих вузлах, з робочою температурою 70 - 100 °С і середніх навантаженнях.

Застосування модифікованих вузлів тертя із встановленими надійними ущільненнями, що заповнені високоякісним мастилом, стабільним змащуванням дозволяє відмовитися від заміни мастила або поповнення його до капітального ремонту машини.

2.2 Згущувачі пластичних мастил.

Температурний інтервал застосування пластичних мастил визначають не базові мастила згущувачі, що входять у склад в кількості 5,0...15,0 % за вагою. За своєю природою усі згущувачі можна поділити на неорганічні і органічні, мильні і вуглеводневі. При виробництві мастил використовують вже готові загусники (наприклад, мила або сечовина), або процес приготування відбувається безпосередньо в дисперсійному середовищі. Частинки згущувача повинні бути рівномірно розподілені в базовому мастилі – таким чином формується однорідна суміш. Приготування згущувача під час виробництва пластичних мастил відбувається в результаті змішування реагентів в рідкому середовищі. Найбільше поширення у технології виробництва пластичних мастил, отримали мильні згущувачі – солі, що отримують при нейтралізації природних жирів, вищих жирних (органічних) кислот гідроокисами металів (Li, Na, Mg, Ba, Ca, Al, Zn та ін.) за реакціями, наступного вигляду [9, 10]



де Me – катіон металу; R – аліфатичний радикал.

Основні характеристики мильних згущувачів, що найчастіше застосовують у складі пластичних мастил, наведено у табл. 2.2.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

До вуглеводневих згущувачів відносять тверді вуглеводні, представлені парафіном, церезином, петролатумом. Ці згущувачі є побічними продуктами в процесах депарафінізації паливних та мастильних фракцій, що реалізуються на нафтопереробних підприємствах. Зважаючи на це, вони мають найнижчу вартість у порівнянні з іншими згущувачами.

Високі водостійкість і захисні властивості визначили їх широке використання як компоненти консерваційних матеріалів. Такі органічні загусники, як пігменти, похідні сечовини, покращують експлуатаційні властивості мастил. Пігментні мастила (Pg-мастила) відрізняються досить високою термічною стійкістю. Багато з них зберігають стабільність за температури 250-300 °С і вище. Зовні Pg-мастила відрізняються яскравим кольором [8].

Основним похідним сечовини, що застосовується в якості згущувача у пластичних мастилах, є полі сечовина, яка має рівний, трохи мутнуватий зовнішній вигляд, високу температуру краплепадіння (до 230 °С) та антиокиснювальні властивості. Полісечовинні комплексні мастила називають також поліуретановими мастилами, або поліуретановими комплексними мастилами [11].

Крім того, до органічних загущувачів можна віднести полімерні перфторовані вуглеводні. Подрібнений до мікронних розмірів порошкоподібний політетрафторетилен (ПТФЕ) зазвичай використовують як загусник для мастил, що застосовуються при температурах понад 220 °С з верхньою робочою температурною межею близько 270 °С [11].

Що стосується неорганічних згущувачів, то для застосування у пластичних мастилах їх необхідно попередньо обробити реакційно-здатними органічними сполуками з концентрацією не менше ніж 5-10 % маси. Лише така обробка дозволяє їм функціонувати в якості олеофільного згущувача, без цього вони лише за концентрації понад 40 % маси будуть утворювати більш стійкі однорідні системи з олівами (пасти). Подібні згущувачі стабільні

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

при температурах до 300 °С, а одержувані суміші (гелі) застосовують при робочих температурах до 200 °С у випадках, коли немає необхідності у посиленому опорі зсуву. Дисперсна структура пластичних мастил з неорганічним згущувачем не є стабільним у часі внаслідок низької спорідненості дисперсної фази та дисперсійної середовища. Як наслідок, такі мастила схильні до затвердіння та відділення мастила при зберіганні. Тому для їх стабілізації додають функціональні полімерні агенти.

Таблиця 2.2 – Згущувачі мастил

№	Згущувач	Властивості
1	Мило кальцію	Рівний маслянистий вигляд, добра водостійкість, низька температура краплепадіння.
2	Мило літію	Грубі волокна, гарний опір розм'якшення і витікання, помірна водостійкість, досить висока температура краплепадіння.
3	Літєвий комплекс	Гладкий маслянистий вигляд, водостійкий, гарний опір сепарації.
4	Алюмінієвий комплекс	Зовні схожий на гель, температура краплепадіння вище за 230 °С, вологостійкий (навіть у морській воді), при високих температурах термін служби скорочується.
5	Сульфонаткальцієвий комплекс	Гладкий і каламутний, добре переносить екстремальний тиск і навантаження, володіє водовідштовхувальними властивостями, температура краплепадіння близька до 260 °С

Серед неорганічних загущувачів можна виділити силікагель, який є стійким до окиснення і дії агресивних середовищ, але Si – мастила відзначаються низькими захисними та протизношувальними властивостями.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

До неорганічних загущувачів відноситься і бентоніт, що має високу температуру краплепадіння (вище від 260 °С), вологостійкість, високі антиокислювальні властивості [10].

Пластичні мастила у своєму складі містять до 10 % маси наповнювачів – різних за складом та походженням твердих порошкоподібних продуктів, не розчинних у базовому мастилі, що вводяться до мастила для покращення його експлуатаційних властивостей (в'язкості, стабільності та герметизуючі властивостей), а іноді і з економічних міркувань. Наповнювачами можуть виступати органічні (метилта етилцелюлоза, фторопласт тощо) і неорганічні матеріали (графіт, сажа, асбест, слюда, тальк). В окремих випадках можуть застосовуватись порошки, окиси, карбонати, сульфіді та сульфати металів [10].

Присадки (добавки) розчиняються в дисперсійному середовищі, впливаючи на формування структури і істотно покращують експлуатаційні властивості пластичних мастил. Концентрація присадок у пластичних мастилах дорівнює 0,1...5,0 % маси.

До основних видів присадок можна віднести [10-12]:

Антиокислювальні – дозволяють мастилу працювати при високих температурах, не окислюючись.

Адгезійні – підвищують здатність мастила утримуватися на поверхнях тренування.

Протизношувальні – зменшують знесення поверхонь тертя, підвищують ефективність роботи мастила.

Протизадирні – запобігають появі заїдань та задирів на поверхнях пари тертя.

Антифрикційні – знижують коефіцієнт тертя між поверхнями дотикання.

Антикорозійні – оберігають від корозії деталі, відлиті з металів (зокрема з кольорових). Активними речовинами зазвичай є полярні

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

поверхнево-активні речовини (ПАР), що утворюють на поверхні захисну плівку.

Металоплакуючі – містять порошки металів, їх оксидів або інших сполук, знижують втрати енергії на тренування.

В'язкісні, або загущуючі – покращують в'язкісно-температурні властивості мастила за рахунок відповідної зміни властивостей дисперсійного середовища.

При виробництві пластичних мастил зазвичай використовують комплекс присадок і наповнювачів, які у сукупності здатні забезпечити захист обладнання у відповідності зі всіма сучасними технічними вимогами.

Основні вимоги щодо підбору присадок до пластичних мастил у наступному [10]:

- здатність покращувати експлуатаційні властивості мастила;
- стійкість до вологості;
- здатність розчинюватися у базовій оліві;
- відсутність хімічної взаємодії з матеріалами конструкцій, з якими вони контактують;
- низьке випаровування (леткість) при тривалому зберіганні;
- добре поєднання з іншими компонентами мастила.

Найчастіше як антиокислювальні та антикорозійні присадки у пластичних мастилах застосовують жирні кислоти, їх мила, деякі аміні, солі нафтонових та сульфонових кислот. Протизношувальними присадками зазвичай виступають сполуки сірки, хлору та фосфору в різних поєднаннях, з'єднання деяких металів. У ряді випадків використовують рослинні і тваринні жири, оброблені сірчаною кислотою.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.3 Модифікатори змащувальних матеріалів.

Послідовність розвитку на пряму зниження тертя та зносу елементів машин і механізмів тертя, за рахунок спеціальних триботехнічних добавок виглядає так:

- металоплакувальні добавки (дрібнодисперсні порошки м'яких металів та їх солей);
- порошкові наповнювачі шаруватих силікатів (порошки мінералів серпентинітів);
- композиції з оксидів (оксидів).

Останні десятиліття велику популярність як добавки до мастильних матеріалів придбали препарати, що містять так звані природні геомодифікатори тертя (далі ГМТ), які представляють собою порошкоподібні шаруваті гіросилікати (серпентин, серпентиніт, хлорит тощо). Застосування цих препаратів забезпечує підвищення протизносних та антифрикційних властивостей мастильних матеріалів та в ряді випадків – відновлювальний ефект – залікування зношених ділянок поверхонь тертя, і тим самим збільшення ресурсу роботи зміщуваних вузлів тертя.

При використанні мастильної композиції з ГМТ значно знижуються втрати енергії на тертя у рухомих з'єднаннях (за рахунок утворення на поверхнях тертя захисних металокерамічних плівок); у 1,5...2,5 рази підвищується зусилля схоплення, тобто, задиростійкість вузлів тертя та довговічність деталей. Авторами [13] встановлено, що ГМТ, доданий в мастильний матеріал у певному співвідношенні, наприклад, у співвідношенні 1:10, забезпечує суперфінішну обробку поверхонь тертя, доводячи параметр шорсткості цих поверхонь до 0,04...0,16 мкм.

Зменшення шорсткості покращує мікрогеометрію трибосполучень (забезпечує кращу прилеглість деталей), знижує витрату мастильного

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

матеріалу. В опорах кочення та ковзання знижується зношування та збільшується несуча здатність трибосполучень [13].

В останні роки з'явилася низка технічних рішень, згідно з якими як наповнювач твердозмащувальних композицій використовуються шаруваті природні гідросилікати: серпентиніт, тальк, серпентин, нефрит та інші.

Серпентиніт – метаморфічна гірська порода, що складається з серпентину $[(Mg_{6-x}Al_x)(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_8]$, хризотилу, антигориту, магнітного та хромистого залізняків та залишків олівіну та піроксенів [14].

Серпентини $Mg_3[(Si_2O_5](O)_4$ – це триоктаедральні (1:1) філосилікати. Шаруваті лусочки можуть легко ковзати один по одному і по поверхні металу. Тому частинки серпентину можуть деформуватися та розтягуватися на западинах металевої поверхні, що призводить до утворення на тертьових металевих поверхнях так званої само відновлювальної плівки – сервовітної плівки, що суттєво зменшує їх знос. Міцні та антифрикційні характеристики сервовітної плівки залежать, зокрема, від умови виготовлення, складу композиції, припрацювання після введення її між поверхнями тертя, стану останніх тощо.

Гідроксильний силікат магнію має багато активних груп, які можуть реагувати з новоутвореною в трибологічному процесі металевою поверхнею.

Коефіцієнт тертя сталей серед мінерального масла становить 0,127, у той час як коефіцієнт тертя в маслі, що містить наночастки серпентину, після короткого припрацювання знижується до 0,05, тобто, зниження коефіцієнта тертя становить у порівнянні з чистим мастилом приблизно 60,6 %. Це показує, що дисперсність та стабільність присадки хороші, але через підвищення температури мастила коефіцієнт тертя починає поступово зростати. Як відомо, поверхнева температура пар тертя при змащуванні чистим мастилом може бути досить високою і збільшується із збільшенням часу випробування. Однак при змащуванні мастилом, що містить серпентин, температура поверхні знижується на 35 % [14].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Триботехнічна добавка №1 (таблиця 2.3) до мастил та пластичних мастил, що включає двоокис кремнію та мінеральну сировину, додатково містить полієдральні багаточарові вуглецеві наноструктури фуллероїдного типу, суміш фулеренів загальної формули C60 і C70 і аморфний вуглець, а як мінеральної сировини – мусковіт $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$, альбіт $NaAlSi_3O_8$ та мікроклін $KAlSi_3O_8$ при наступному співвідношенні компонентів, маси % [15]:

Таблиця 2.3 – Компоненти триботехнічної добавки №1

1	Двоокис кремнію	40-45
2	Мусковіт	2-3
3	Альбіт	3,5-4,0
4	Мікроклін	2-3
5	Полієдральні багаточарові вуглецеві наноструктури фуллероїдного типу	0,001-1
6	Суміш фулеренів C60 і C70	0,2-5,0
7	Аморфний вуглець	інше

Триботехнічна добавка має вигляд дрібнодисперсного порошку з розміром частинок 0,001-0,1 мкм. Як аморфний вуглець композиція містить сажу. Фулерени загальної формули C60 та C70 можна вводити окремо, але можна використовувати фуллереновмісну сажу, отриману, наприклад, методом дугового розряду у атмосфері інертного газу [15].

При використанні добавки, що заявляється, вихідний коефіцієнт тертя не росте, навіть дещо знижується.

Триботехнічна добавка №2 (табл. 2.4) до мастил та пластичних мастил для формування антифрикційного покриття з компенсацією зносу поверхонь вузлів тертя містить, маси % [14-15]:

Таблиця 2.4 – Компоненти триботехнічної добавки №2

1	аморфний діоксид кремнію	40...60
2	аморфний оксид алюмінію	5...15
3	аморфний вуглець	6...10
4	аморфний оксид магнію	5...15
5	кремнійорганічна сполука алюмінію та цинку	5...15
6	органічний розчинник	інше

При цьому компоненти представлені переважно: аморфний діоксид кремнію у вигляді SiO_2 ; аморфний оксид алюмінію як Al_2O_3 ; аморфний вуглець у вигляді сажі; оксид магнію у вигляді MgO , кремнійорганічна сполука алюмінію та цинку у вигляді цинкалюмосилоксану в рідкій фазі, органічний розчинник у вигляді толуолу. Без розчинника добавка є гомогенізовано суміш порошків компонентів з розмірами частинок трохи більше 1 мкм [15].

Основна ідея складу триботехнічної добавки саме у компенсації (відновлення) зносу поверхонь тертя. Але при цьому антифрикційні властивості також мають значення. Наведені випробування показали, що заявлений склад добавки для формування антифрикційного покриття з компенсацією зносу поверхонь вузлів тертя забезпечує значне зниження тертя порівняно з базовим мастилом.

Модифіковане мастило №3 (таблиця 2.5) для вузлів тертя підшипників кочення та ковзання. До складу мастила на основі загущених милами масел, що містить багатофункціональну присадку та графітоколоїдний препарат, додатково введені дисульфід вольфраму та поліізобутилен П-20, а в як багатофункціональна присадка 1,4-ди (N - арилсульфоніламіно) – 2 (тіобезтіазол) бензол при наступному співвідношенні компонентів, маси % [15]:

										Арк.
										33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ					

Таблиця 2.5 – Компоненти мастила №3

1	Графітоколоїдний препарат	4-8
2	Дисульфід вольфраму	3-9
3	Поліізобутилен П-20	2-4
4	Багатофункціональна присадка	0,5-2
5	Загущені милами мастила	до 100

Графітоколоїдний препарат забезпечує стабільну антифрикаційну властивість мастила в інтервалі температур до 250 °С. Графітоколоїдний препарат забезпечує протизадирні та антикорозійні властивості мастила.

Дисульфід вольфраму - ефективна антифрикаційна присадка, застосування якої покращує умови роботи важко навантаженого вузла тертя в умовах високої температури, багаторазово підвищує ресурс роботи мастила та обладнання. При вмісті дисульфиду вольфраму нижче 3 маси антифрикційні властивості мастила різко зменшуються, а при вмісті вище 9 маси вони залишаються практично незмінними.

Як в'язкісні присадки використовують поліізобутилен П-20. Ця присадка додається залежно від основи, що використовується [15]. Багатофункціональна присадка є органічним з'єднанням. Багатофункціональна присадка підвищує:

- антикорозійні властивості мастила за підвищених температур;
- протизадирні та протизносні властивості мастила, особливо в важко навантажених вузлах тертя, підшипників кочення та ковзання.

Обробка статистичних даних після проведених випробувань, протизносних властивостей консистентних мастил на основі Li-, Na-, Ca-милів та запропонованого мастила різних складів дозволяє стверджувати, що його протизносні властивості вищі, ніж у мастил типу Літол-24, що збільшує термін служби пар, що труться, і що підтверджується прикладами реалізації мастил [15].

										Арк.
										34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ					

Пластичне мастило для підшипників кочення №4 (таблиця 2.6). Пластичне мастило для підшипників кочення містить пластичну основу - мастило Літол-24 та присадку у вигляді порошку наноалмазу детонаційного синтезу, очищеного до вмісту вогнетривких домішок менше 0,1% від маси наноалмазу, з розміром частинок не більше 5 нм при наступному співвідношенні компонентів, маси % [14-15]:

Таблиця 2.6 – Склад пластичного мастила №4

1	наноалмаз детонаційного синтезу	0,01-0,05
2	мастило літол-24	інше

Пластичне мастило для підшипників кочення готують простим перемішуванням двох комерційно готових компонентів: мастила Літол-24 та порошку наноалмазу до гомогенного стану.

Відомо, що наноалмази, завдяки своїм різноманітним та незвичайним властивостям, які обумовлені нанометровим масштабом їх структурних елементів, що знайшли широке застосування у створенні нових матеріалів та технологій для практичного використання в біології, медицині та промисловості.

Основою пропонованого винаходу є одержання композиційного матеріалу - пластичного мастила для підшипників кочення з використанням порошку наноалмазу детонаційного синтезу, властивості частинок якого дозволяють при мінімальній їх концентрації в мастилі (менше 0,05 маси %) досягти збільшення терміну служби мастила у кілька разів.

Ці властивості частинок наноалмазу отримані за рахунок глибокого хімічного очищення алмазо-графітової шихти детонаційного синтезу до отримання основної фракції порошку наноалмазу розміром частинок 3-5 нм з виходом до 60%.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Також встановлено, що отримані порошки наноалмазу зберігають у протягом тривалого періоду (понад 15 років) незмінними свої фізико-хімічні властивості, в той час як порошки наноалмазу, очищені по іншим технологіям, починають графітизуватися набагато раніше і втрачають свої цінні характеристики [16].

Порошок наноалмазу, отриманий з алмазо-вуглецевої шихти методом детонаційного синтезу та глибокого хімічного очищення є готовим продуктом, що не потребує технологічної обробки. Він має найменшу кількість вогнетривких домішок (менше 0,1%), які є практично забруднювачами мастила. Частинки наноалмазу розміром 3-5 нм рівномірно розподіляються в обсязі пластичного мастила Літол-24 і при введенні в підшипники кочення проникають у всі мікродефекти поверхні (пори, мікротріщини, подряпини). В результаті створюється рівна антифрикційна поверхня кочення підшипників. При цьому для досягнення такого ефекту досить невеликої кількості порошку наноалмазу (0,01-0,05% від маси мастила), що пояснюється найбільшою каталітичною активністю поверхні наночастинок зазначених розмірів.

Додавання наноалмазу розміром частинок 3-5 нм в базове мастило Літол-24 концентраціях близько 0,01-0,05 маси % більш ніж у 3 рази зменшує шорсткість та кількість дефектів доріжок кочення, внаслідок чого термін служби підшипників кочення зростає більш ніж у два рази, порівняно з використанням лише Літол-24.

Для експериментальної перевірки заявленого мастила було підготовлено чотири склади мастил, наведених у таблиці 2.7. Проводились виміри середніх значення шорсткості (R_a , мкм), кількості дефектів (V , шт.), доріжок кочення підшипників та номінальний термін служби (L , година).

Результати дослідження показали, що при зменшенні концентрації з 0,1% до 0,01% шорсткість зменшується в середньому на 30%, а кількість дефектів – 40% [16].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Таблиця 2.7 – Результати досліджень мастила №4

№	Вид мастила	Ra, мкм	V, шт.	L, год
1	Літол 24	0,0917	9	1000
2	Літол 24+0,5% мас. наноалмазів	0,0583	15	1360
3	Літол 24+0,1% мас. наноалмазів	0,0487	11	1500
4	Літол 24+0,05% мас. наноалмазів	0,0387	4	1900
5	Літол 24+0,01% мас. наноалмазів	0,0293	3	2200

Таким чином, просте додавання порошку наноалмазів до базової мастила Літол-24 в оптимальних концентраціях 0,01-0,05 маси % значно спрощує технологію виготовлення і багаторазово покращує властивості мастила, а додавання понад 0,1 маси % порошку суттєво погіршує якість поверхні кочення підшипників і подорожчає отримане мастило.

Пластична мастило № 5 (таблиця 2.8) для важконавантажених вузлів тертя кочення. Заявлене пластичне мастило для важконавантажених вузлів тертя кочення на основі суміші синтетичної вуглеводневої олії та складного ефіру пентаеритритового спирту та синтетичних жирних кислот фракції C5-C9, що характеризується тим, що містить комплексне кальцієве мило стеаринової та оцтової кислот, графіт дрібнодисперсний, феніл-альфа-нафтиламін, іонол, із застосованим як синтетичний вуглеводневої олії поліальфаолефінова олія з більшою в'язкістю, при наступному співвідношенні компонентів у масових частках [14-15]:

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Таблиця 2.8 – Склад пластичного мастила №5

1	кислота стеаринова	7,0-16,0
2	оцтова кислота	2,0-4,0
3	гідрат окису кальцію	5,0-10,0
4	графіт дрібнодисперсний	7,0-15,0
5	фенілальфу-нафтиламін	0,1-0,5
6	поліальфаолефінова олія з в'язкістю 23-28 сСт (при 100°C)	12,0-19,9
7	складний ефір пентаеритритового спирту та синтетичних жирних кислот фракції C5-C9	інше

Пропоноване мастило, зокрема, готують шляхом омилення кислот розчином гідроксиду кальцію, випарювання води та термообробки при нагрівання до температури 220-250 °С з наступною гомогенізацією одержаного складу. Антиокислювальні присадки вводяться на стадії охолодження мастила. Графіт вводиться в готову основу з наступною механічною обробкою мастила.

Перспективним напрямом у галузі мастильних матеріалів є використання тонкодисперсних порошкових композицій, що вводяться в склад як рідких, так і густих мастил. Однією з найпоширеніших сухих мастильних речовин є графіт. Основна перевага графіту в тому, що він утворює міцні плівки на поверхнях тертя.

Технічний вуглець так само є перспективною антифрикційною добавкою до пластичного мастила. Для порівняння були вивчені особливості мастил на базі графіту та дисульфиду молібдену. Ці матеріали забезпечують дуже низький коефіцієнт тертя – менше 0,1. Важливе значення має ретельне подібнення твердих добавок. Зазвичай намагається отримання твердих

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

порошкоподібних добавок з частинками розміром менше 10 мкм, а нерідко менше 1 мкм [15].

Так як вартість графіту значно перевищує вартість сажі, то створення пластичного мастила з додаванням сажі або графітизованої сажі буде актуальним. В даний час випускається цілий ряд, різних по властивостям марок технічного вуглецю. Одним із шляхів підвищення ефективності приготування пластичних мастил є підбір технічного вуглецю, який мав би антифрикційні характеристиками не гірше, ніж графіт.

Для кожного поставленого конкретного завдання (підвищення антифрикційних, протизадирних та протизносних властивостей олії, підвищення колоїдної стабільності, покращення приробіткових властивостей, покращення трибологічних характеристик пар тертя, збільшення адгезійної міцності покриття на металах, забезпечення високих експлуатаційних характеристик мастильних матеріалів, забезпечення довговічності та ефективності роботи мастила, стабільності роботи двигуна, відновлення зношених поверхонь тертя, підвищення рівномірності, стабільності та довговічності антифрикційного покриття) потрібна конкретна добавка, за допомогою однієї будь-якої добавки неможливо покращити відразу всі параметри та експлуатаційні показники [16].

Добавка до мастил №6. Завданням цього винаходу є створення добавки такого компонентного складу, використання якого в мастильному матеріалі забезпечує зниження витрати палива у двигунах внутрішнього згорання пропонується добавка являє собою дрібнодисперсний порошок, містить суміш діоксиду кремнію з синтетичним вуглецем (рисунок 2.1). Вміст діоксиду кремнію із середнім розміром частинок 10 нм у суміші становить 99,0-99,9% маси, вміст вуглецю синтетичного із середнім розміром частинок 30 нм – 0,1-1,0 % маси [14-15]:

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

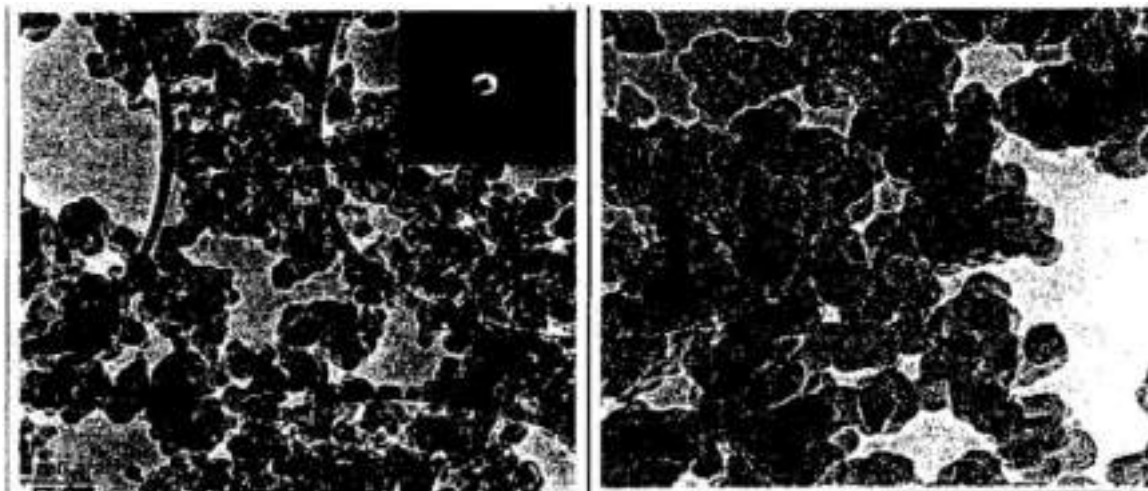


Рисунок 2.1 – Загальний вид порошку та відповідна даній галузі дифракційна картина, ділянка агломерату порошку

Особливістю вуглецю синтетичного є те, що він представляє собою агломерати, що складаються з наночастинок «цибулинної» структури (рис. 2.2).

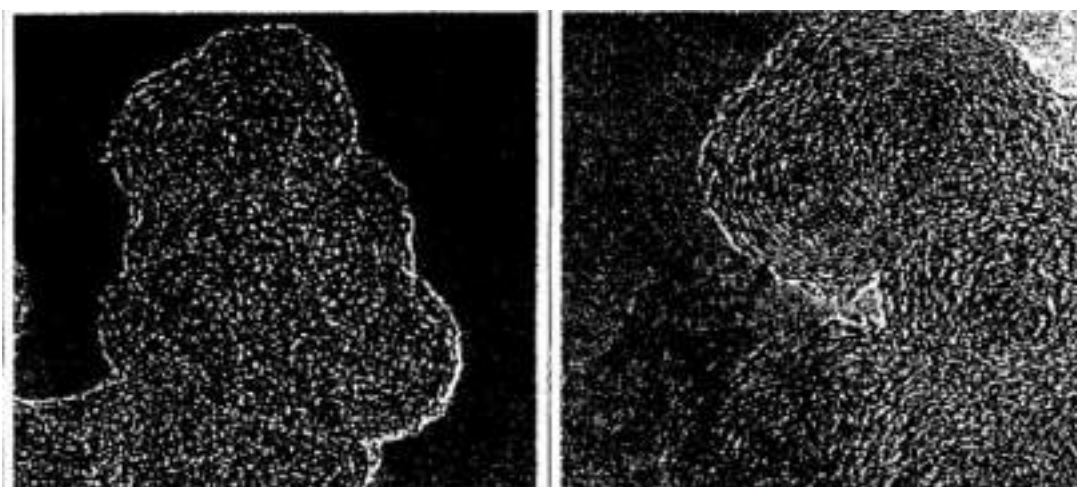


Рисунок 2.2 – Цибулинна структура наночастинок

Добавка вводиться у кількості 0,005-0,01% маси в мастило, в кількості 0,01-0,02% маси у пластичні мастила. Дрібнодисперсний порошок діоксиду кремнію одержують кислотним гідролізом тетраалкоголятів кремнію з подальшим висушуванням.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Вуглець синтетичний одержують методом низькотемпературної плазми при дії хлору на вуглеводні (метан). В результаті реакції отримано дрібнодисперсний порошок вуглецю.

Добавка, що заявляється, готується шляхом перемішування компонентів при заданому масовому співвідношенні [16].

Добавка хімічно нейтральна до мастильного матеріалу, що забезпечує безпеку застосування в будь-яких вузлах та механізмах. Тверді мастильні матеріали та ряд мінеральних наповнювачів так само застосовують як добавки до пластичних мастильних матеріалів. Як відомо, наявність безперервної мастильної плівки, що розділяє тіла тертя, необхідне забезпечення беззносного режиму роботи вузла тертя. Однак утворення безперервного мастильного шару утруднюється при збільшенні навантаження та при високих температурах, коли внаслідок зниження в'язкості зменшується товщина плівки, а при подальшому збільшенні температури відбувається десорбція мастильного матеріалу, що призводить до заїдання та катастрофічного зносу [15].

Присадки до мастил дозволяють створювати найтонші нанорозмірні поверхневі адсорбовані плівки полярних молекул газів і рідин або тверді плівки, міцно з'єднані з поверхнею в наслідок хімічної реакції. Переваги останніх в тому, що при механічному пошкодженні вони відновлюються у процесі роботи вузла тертя при достатньому часі взаємодії мастильного матеріалу з пошкодженою ділянкою, запобігають схоплюванню контактуючих поверхонь та знижують втрати на тертя.

Як тверді мастильні матеріали (далі ТЗМ) застосовують халькогеніди тугоплавких металів, фториди кальцію та церію, йодид срібла, графіт, високодисперсний вуглець, м'які метали, серпентини, високомолекулярні полімери (нейлон, ПТФЕ та ін.). Найбільш поширеними ПММ є дисульфід молібдену, графіт, високодисперсний вуглець та політетрафторетилен (ПТФЕ). ПТФЕ має унікальними антифрикційними властивостями – з усіх ПММ він забезпечує найнижчий коефіцієнт тертя як у статичних, так і в динамічних

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

умовах, що дозволяє використовувати його як антискачкову присадку до мастильних матеріалів [14].

Вимоги до експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів, застосовуваних у підшипниках кочення, а також поява сучасних нанофазних матеріалів із універсальними властивостями сформували новий напрямок у галузі створення мастильних матеріалів. Введення у пластичні мастильні матеріали подібних добавок підвищує їх протизносні та антифрикційні властивостей, що покращує реологічні властивості, збільшує міцність мастильного шару.

Останнім часом широко застосовують як добавки до мастильних матеріалів сполуки, що містять такі метали, як Pb, Sn, Cu, Mo, Cd, Ni та інші, що покращують протизносні та протизадирні показники вузлів тертя машин. Ефективність цих металів зростає від введення їх у мастило на іонному рівні (металоплакуючі присадки) [15].

Відомі металоплакуючі мастильні матеріали [15] принцип дії яких полягає у формуванні на ділянках фактичного контакту захисних плівок на основі м'яких металів Cu, Sn, Pb, Zn, Mo та інших, які зменшують силовий вплив та інтенсивність зношування сполучених поверхонь. За фазовою ознакою металоплакуючі мастильні матеріали поділяються на гомогенні та гетерогенні. Перші, як присадки містять розчинні в базовому мастильному середовищі з'єднання металів, другі містять метал або його оксиди у вигляді порошків. Однак ці матеріали мають ряд недоліків (залежність ефективності формування плівки від концентрації металів у середовищі, низька стійкість дисперсій металевих порошків, високий ступінь чистоти порошків та інші), через які їх застосування обмежується головним чином пластичними мастилами для певних вузлів тертя.

Як відомо, ефективність дії присадок на працездатність сталеві пари тертя може помітно змінюватись в залежності від концентрації та складу присадки, а також хімічного складу базової олії.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Одним із способів покращення корисних властивостей пластичних мастильних матеріалів є введення до складу сполук міді. У науковій літературі ряд робіт присвячено вивченню впливу добавок: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, CuS , CuO , Cu_2O , CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$, ультрадисперсного порошку міді, отриманого плазмовим конденсаційним методом, – на антифрикційні властивості пластичних мастильних матеріалів [14-15].

Практично будь-які добавки, що містять мідь, покращують антифрикційні властивості основи за рахунок утворення на поверхні тертя тонкої мідної плівки. Л.І. Погодаєвим [8] виконані комплексні дослідження впливу добавок до пластичного мастила "Літол 24" тонкодисперсних порошоків цинку, кадмію та бронзи на зносостійкість та триботехнічні властивості пар тертя. Виявлено, що найбільший вплив на зусилля схоплювання надає цинк, що міститься в мастильній композиції кількості 10 маси %. За такого ж вмісту кадмію спостерігається найбільший критичний тиск (критичне зусилля руйнування мастильної плівки). Дія мастильного матеріалу, наповненого міддю, мабуть, засноване на вдавлюванні її частинок у нерівності поверхні тертя та розмазуванні їх по ній (плакування), внаслідок чого збільшується фактична площа контакту, знижуються коефіцієнт тертя та знос тертьових деталей. У разі використання сполук міді плівка виходить більш ефективною внаслідок того, що взаємодія міді з поверхнею тертя відбувається в момент "трибовідновлення". При цьому, найбільш ефективною добавкою є оксид міді [8, 14, 15].

Ефективність сполук, що містять сірку, фосфор, хлор, азот пов'язана з формуванням на поверхнях тертя вторинних захисних плівок структур, які забезпечують позитивний градієнт механічних властивостей за глибиною. При цьому інтенсивне адгезійне зношування змінюється більш помірним – корозійно-механічним, але зношування все-таки має місце.

Враховуючи, що вміст алюмінію в природі в кількісному Відношенні значно перевершує наявність таких елементів, як мідь і олово, а також що

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

вартість алюмінію в кілька разів нижча, ніж вищевказаних металів, Авторами [14] була розроблена маслорозчинна мастильна композиція, що містить алюміній та проведено дослідження її триботехнічної ефективності. Результати досліджень наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення шорсткості при різних мастильних матеріалах

№	Мастильний матеріал	Шорсткість Ra
1	До роботи	0,14
2	Олія індустріальна I-50A	0,22
3	Олія індустріальна I-50A + мідно вмісна присадка	0,22
4	Олія індустріальна I-50A + алюмінієва композиція	0,16

Наявність алюмінію в композиції веде до підвищення контактної витривалості тіл кочення в 1,3 рази порівняно з базовим мастильним матеріалом (рисунок 2.3). Наявність на контактуючих поверхнях м'якої плівки, до складу якої входить алюміній особливою структури та властивостей, що лежить на зміцненій підкладці, забезпечує локалізацію процесу тертя у найтоншому поверхневому шарі та перешкоджає залучення у процес деформації глибших шарів металу. При цьому низький коефіцієнт тертя та висока зносостійкість рухомих сполучення як при ковзанні, так і кочення, пов'язані в основному з наявністю в мастильному матеріалі алюміній містить композиції, яка забезпечує формування антифрикційної та протизносної плівки, а також розширює діапазон питомих навантажень, у яких вузол тертя працює в нормальному режимі.

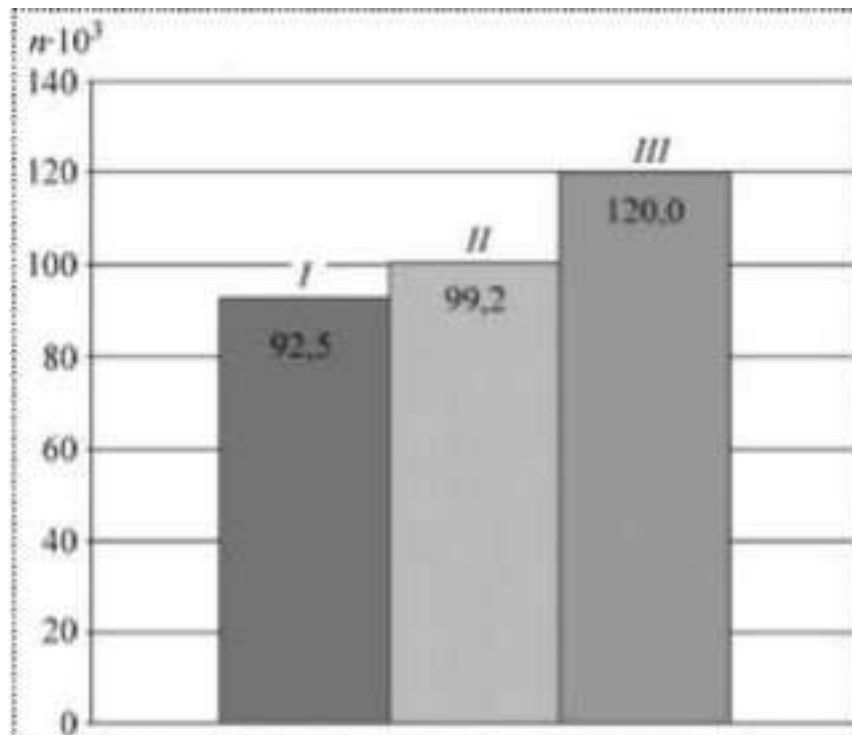


Рисунок 2.3 – Вплив мастильних матеріалів на контактну витривалість тіл кочення: I - олія індустріальна I-40; II - олія індустріальна I-40 + 0,1% мідь містка присадка; III - олія індустріальна I-40 + 2,5% алюмінієва композиція

Відомо, що деякі мінерали шаруватої будови (типу слюди, каоліну, графіту і т.д.) широко використовують як загущаючі і протизносних присадок. Їхній позитивний ефект обумовлений здатністю цих мінералів утворювати на поверхнях тертя тонкі плівки, що складаються з лускатих частинок, орієнтованих паралельно поверхні тертя. Ці плівки (або шари) розділяють поверхні, що труться, згладжують їх мікрорельєф, а у разі сухого тертя переводять його в тертя внутрішнє, у якому зсув відбувається всередині шару частинок [14]. Таким чином, здійснюється чисто механічний захист поверхонь, що труться від зносу.

Великий практичний інтерес є завдання підібрати такий мастильний матеріал, який поряд із зазначеним позитивними властивостями володів би здатністю хімічно та механохімічно взаємодіяти з матеріалом деталей трибосполучень, створюючи на їх поверхнях плівки з покращеними трибологічними властивостями.

Під час вивчення механохімічних реакцій за участю мінеральних частинок, поверхнево-активних речовин, нанорозмірних частинок та первинної сажі було виявлено важливу роль їх композицій у механоактивації металевих поверхонь при терті, здатних при їх руйнуванні вступати у взаємодію з новоствореними активними фрагментами середовища та металом третьових тіл [15].

На підставі багатьох проведених досліджень видно, що фулерени і фулеренові сажі можуть успішно застосовуватися як антифрикційні, протизносних та антизадирних добавок. Відомо, що мінерали цієї групи силікатів мінералізуються у вигляді тонких платівок та виявляють досконалу спайність паралельно структурним верствам [15]. Фулерени та фулеренові сажі відносяться до ультра дисперсних добавок, вивчення яких у час актуально.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВПЛИВ ВТОМНИХ ПРОЦЕСІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

3.1 Поняття механічної втоми.

Втома - явище поступової та незворотної зміни складу, будови та властивостей матеріалу під впливом мінливої в часі навантаження, що призводить до утворення втомних тріщин, взаємодія та розвиток яких завершується або відділенням та винесенням з поверхні частинок матеріалу, або виникненням магістральної тріщини та руйнуванням об'єкта – поділом його на частини. Небезпека руйнування деталей машин при багаторазово повторюваному навантаженні, для якого поряд з величиною навантаження вирішальне значення мають її частота та число циклів, відома з початку розвитку промислового машинобудування у IX столітті [17-18].

Втома матеріалу – процес поступового накопичення пошкоджень у матеріалі під тривалою дією циклічно змінюються у часі напружень та деформацій, що призводять до зміни будови, механічних та фізичних властивостей матеріалу, утворенню тріщин у матеріалі та руйнування.

Поверхнєве втомне ушкодження реалізується при контактній взаємодії двох твердих тіл, що притискаються один до одного контактним навантаженням у процесі відносного руху; ці тіла складають специфічний об'єкт – пару тертя. Характеристика опору механічної втоми є повна крива втоми (рис. 3.1) $0 \leq \sigma \leq \sigma_b$ МПа та $1 \leq N\sigma \leq 10^{10}$.

Повна крива втоми складається з чотирьох (I, II, III, IV) характерних ділянок (областей) та має три (L, K, G) точки перелому; координати точок перелому дають відповідні критичні значення граничних напружень і довговічностей (межа квазістатичної втоми σ_L , $N_L\sigma$ межа малоциклової втоми K, $N_K\sigma$; межа багатоциклової втоми σ_G , $N_G\sigma$); I – квазістатична втома, II –

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

3.2 Механізм втомного руйнування.

Механізм втомного руйнування багато в чому пов'язаний з неоднорідністю реальної структури матеріалів (відмінність розмірів, контурів, орієнтації сусідніх зерен металу; дефекти кристалічних ґрат). Реальний технічний метал має дефекти будови, зокрема точкові дефекти, (наприклад, вакансії) та лінійні дефекти (наприклад, дислокації). При контактуванні твердих тіл із шорсткими поверхнями відбувається використання більш жорстких мікронервностей в менш жорстке контртіло. Під дією циклічних напружень відносно ковзання мікронервностей та дефектів супроводжується інтенсивним деформуванням поверхневих шарів. Деформації самих мікронервностей при цьому в кілька разів менше і ними можна знехтувати. На величину деформації поверхневих шарів істотно впливає напружений стан в зоні торкання, що залежить від геометричного контуру мікронервностей, прикладеного до них нормального навантаження та механічних властивостей взаємодіючих тіл. Інтенсивність руйнування поверхневих шарів при терті сильно залежить від виникаючих у них розтягуючих напружень. У зв'язку з неоднорідністю при змінних напруженнях на межах окремих включень та поблизу мікроскопічних порожнин і різних дефектів виникає концентрація напружень [17-18].

Кожен виступ шорсткої поверхні "жене" перед собою хвилю, деформує матеріал, тобто під час руху мікронервності перед нею виникає хвиля з деформованого матеріалу поверхневого шару, окремі ділянки якого піддаються складним напруженням. Виступ (мікронервність) стискає матеріал перед собою, розтягуючи на деякій відстані попереду (гребінь хвилі) і значно розтягуючи позаду себе за рахунок сили тертя, що складається з деформаційної та адгезійної складової. Через утворення адгезійних зв'язків, внаслідок зміни напруженого стану збільшуються опір деформуванню і сам деформований об'єм, так як висота хвилі тим більша, чим значніше величина

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

адгезії. Таким чином, кожен переріз тіла, що стирається під спільною дією нормальної та тангенціальної сил послідовно піддається стискаючим і розтягуючим напруженням. Багаторазова знакозмінна деформація навіть при невеликому навантаженні може призвести до втомного руйнування [17-18].

Поверхневі шари матеріалу характеризуються наявністю різного роду включень та підвищеним вмістом в одиниці об'єму дефектів будови: дислокацій, вакансій мікротріщин. Інтенсивне їх деформування зароджує лінії течії. Смуги течії, що виникають у більш деформованих ділянках поверхні тертя, є зонами підвищеної концентрації дислокацій. Дислокації, переміщаючись усередині смуг тертя, накопичуються біля меж зерен, включень, перетинів цих смуг.

Взаємодія дислокацій в осередках скупчення призводить до розпушування поверхневих шарів та появи мікропор (рис. 3.2) [17-18].

Мікропори, що утворюються в процесі тертя в поверхневих шарах з'єднуються, що призводить до появи мікротріщин. Краї тріщини під дією змінного навантаження притираються один об одного, і тому зона зростання тріщини відрізняється гладкою (полірованою) поверхнею.

Втомні тріщини виникають на дефектах, які завжди є в твердому тілі. Вони є концентраторами напружень і можуть бути пов'язані як з недосконалістю структури твердих тіл, так і з їх пошкодженням внаслідок механічних впливів, теплових напружень. При виникненні тріщин на поверхні кочення вони розширюються углиб.

Визначальний вплив на зростання мікро та малих тріщин надають структурні бар'єри (кордони блоків, фрагментів, кристалітів, включень), локалізовані обсягом матеріалу. Їх вплив призводить до того, що зростання тріщин є серією періодичних сплесків, відповідних їх прориву в суміжні кристаліти, та зупинок, викликаних їх ефективною блокуванням бар'єрами.

Поширюючись і взаємодіючи між собою, мікро тріщини обумовлюють появу макротріщин, які призводять до зношування матеріалу та утворення

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

частинок зносу. Відбувається поверхнєве руйнування матеріалу. Виникають мікроскопічні виступи та западини.

Важливою ознакою, що характеризує перетворення малих тріщин на макротріщини, є припинення впливу мікроструктурних бар'єрів на їхнє зростання. На цьому етапі процес руйнування локалізується у вершині найбільш макротріщини, що швидко розвивається, просувається по найменш міцним ділянцям матеріалу.

При взаємодії мікровиступів доріжок та тіл кочення виникають значні локальні напруження, що призводять до пластичних деформацій та виникнення нових тріщин.

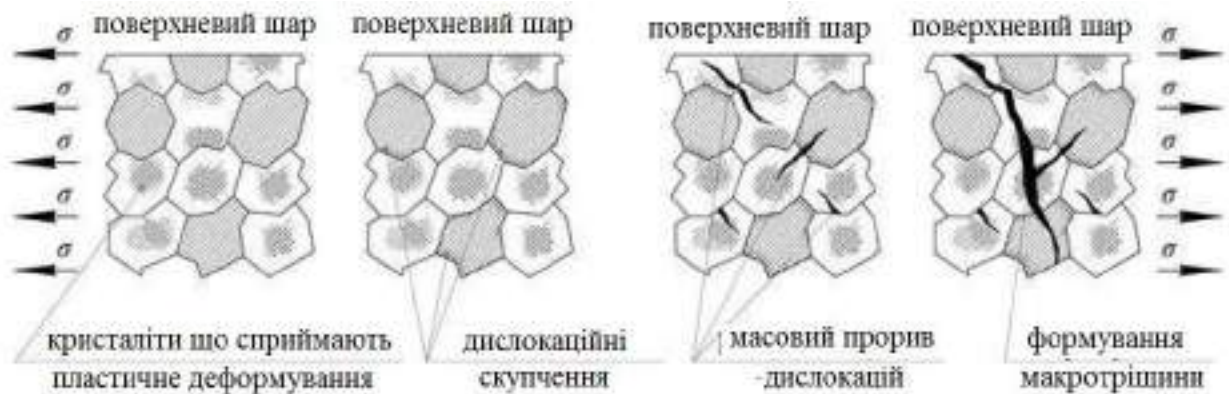


Рисунок 3.2 – Розвиток втомного руйнування

Висока концентрація напружень у вершини тріщини призводить до того, що вона розвивається при напруженнях набагато нижчих, ніж напруження необхідні для подолання структурних бар'єрів. Крім того, нагрівання, що відбувається при локальному руйнуванні, розм'якшує матеріал, що, у свою чергу, полегшує зростання макротріщини [17-18].

У міру зростання тріщини поперечний переріз деталі дедалі більше послаблюється, і нарешті, відбувається раптове крихке руйнування деталі, при цьому зона крихкої долини має грубозернисту кристалічну структуру (як при крихкому руйнуванні).

3.3 Вплив сил тертя на процеси втоми.

На зношування твердих тіл, що взаємодіють, суттєво впливає сила тертя. У процесі тертя під впливом високих температур і великих динамічних впливів відбувається суттєва зміна поверхневих шарів матеріалів. Необхідність враховувати явища, що протікають у поверхневих шарах при терті, призвела до формулювання поняття про тристадійний розвиток процесу зношування:

- 1) взаємодія поверхонь;
- 2) зміна під впливом сил тертя властивостей поверхневих шарів контактуючих матеріалів;
- 3) руйнування та відділення частинок зносу.

Найбільш важливим етапом тристадійного процесу є взаємодія поверхонь. При його оцінці необхідно враховувати подвійну природу тертя та дискретність контакту.

Численними дослідженнями показано, що відділення матеріалу є наслідком накопичення пошкоджень, пов'язаних із багаторазовим знакозмінним впливом. Поняття багато - та малоциклової втоми обумовлене умовами взаємодії залежності розподілу напружень та деформацій по глибині, що пояснюються різноманіттям частинок зносу (їх розміру, форми, складу) та інтенсивність відокремлення їх від поверхні.

Узагальнюючи багато сучасних теоретичних уявлень і експериментальні дані, можна відзначити, що процеси зародження та розвитку втомних ушкоджень обумовлені явищами генерування, переміщення та накопичення рухомих дефектів у тілі при його циклічному деформуванні. Енергія (теплова та механічна) та час (число циклів навантаження) є двигуном цих явищ і процесів [17-18].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Під зовнішнім тертям розуміється комплекс явищ у зонах контактів мікронерівностей двох твердих тіл при їх русі один щодо одного, пов'язаних із виникненням сили тертя.

Геометричне місце точок дотику тіла та контр тіла внаслідок їхнього місцевого деформування при силовій взаємодії – стиснення контактним навантаженням називають контактним майданчиком. Як тільки починається відносний рух тіла та контртіла, на контактному майданчику виникає внутрішня сила опору цьому руху – сила тертя.

Отже, сила тертя – це сила зсуву у сфері фізичного контакту тіла і контртіла [17-18].

За кінематичною ознакою зовнішнє тертя поділяють на тертя: ковзання, кочення та обертання. Сила тертя кочення принаймні в 10 разів менша за силу тертя ковзання, оскільки при коченні фактична площа торкання тіл тертя менше. Тертя кочення менш енерговитратно. Кочення визначається як вид руху контактуючих тіл з деякою відносною кутовою швидкістю навколо осі, що лежить у дотичній площині. Процес кочення полягає в тому, що поверхні, що стикаються і взаємно переміщаються безперервно змінюють ділянки контакту без видимого ковзання при повороті одного або обох тіл щодо осей [17-18].

Специфіка контактної взаємодії тіла та контртіла при терті кочення полягає в тому, що контактний майданчик сильно локалізований, тому має сприймати високі питомі навантаження. Виникнення сили тертя під час кочення обумовлено ковзанням сполучених поверхонь.

Процес тертя з урахуванням молекулярно-механічної теорії складається з деформаційної або механічної частини та частини, яка залежить від взаємодії тертьових тіл. Сила опору відносного ковзання складається з опору, обумовленого деформуванням тонкого поверхневого шару, що впроваджуються мікронерівностями та опором, що виникає внаслідок міжмолекулярних взаємодій у досить зближених твердих ділянках тіл. При

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

цьому процес тертя можна розглядати як втрату механічної енергії за період відносного руху дотичних областей матеріалу [17-18].

Відомо, що контакт тіл тертя, є завжди дискретним і реалізується у зонах фактичних плям дотику. Зближення тіл тертя відбувається під навантаженням відповідно до мікрогеометрії поверхонь тіл, і при терті утворюються фрикційні зв'язки у напрямку руху та нові плями фактичного контакту. Пляма контакту відчуває багаторазовий вплив інших плям контакту. У цих місцях контакту можуть утворюватися адгезійні зв'язки завдяки молекулярним взаємодіям між тілами тертя. В результаті в матеріалі утворюється тріщина та відбувається його руйнація [17-18].

Отже, основним процесом, що виникає при терті, є механічна взаємодія поверхонь твердих тіл, що призводить до зношування. Процеси ушкодження при терті кочення локалізуються: або дуже в тонкому поверхневому шарі, або в підповерхневих зонах. Процеси зношування обумовлені знакозмінними циклічними деформаціями (напруженнями) при терті і, отже, руйнування поверхневих шарів матеріалу в таких специфічних контактних умовах має втомний характер.

Отже, сила тертя впливає на втомний знос наступним чином: чим більший коефіцієнт тертя, тим інтенсивніше відбувається втомне зношування.

Раніше кочення було визначено як рух (обертання) двох контактуючих тіл, щодо осей, паралельних їх загальної дотичної площини. У системі відліку, що рухається разом із точкою контакту, поверхні «протікають» через область контакту з тангенціальними швидкостями. Якщо ці тангенціальні швидкості різні і довжина шляху, який проходить навантажений ролик при коченні, не дорівнює довжині кола складеного з точок торкання, то кочення супроводжується ковзанням. Кочення без прослизання зазвичай називається "вільним" [17].

Різниця між пружними деформаціями двох тіл в області зчеплення призводить до реалізації макропрослизу тіл, званого ковзанням.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Мікропроковзування, що з'являється при терті в галузі взаємодії, є одним із джерел опору перекочування тіл [17].

У разі прослизання тіл кочення втомні руйнування деталей підшипники починаються на поверхні. Зниження сили тертя на контакті змінюватиме форму утворення втомних тріщин на глибинну, що збільшує час експлуатації підшипникових опор на початок втомного руйнування доріжок і тіл кочення підшипників [18].

Відносно прослизання поверхонь кочення призводить до зношування тіл кочення та доріжки кочення обертового кільця підшипника. Прослизання частіше виникає в роликоті підшипниках.

Великий вплив на прослизання роликоті підшипників має осьовий зазор роликів щодо напрямних бортів. При малому або збільшеному осьовому зазорі обертання роликів супроводжується їх підвищеним тертям. Оптимальний осьовий зазор роликів щодо напрямних бортів дорівнює 0,02-0,03 мм.

Для зменшення або запобігання прослизання та зношування поверхонь кочення доцільно:

- підвищити навантаження на підшипник;
- зменшити радіальний зазор у підшипнику;
- обмежити допуск на шахове розташування гнізд сепаратора величиною трохи більше 0,05 мм;
- не застосовувати мастильні матеріали з підвищеною в'язкістю.

Прослизання може бути усунуто або суттєво знижено шляхом зменшення числа роликів у підшипнику [17-18].

На силу тертя в підшипниках кочення впливають в'язкість мастильного матеріалу, тертя в сепараторі підшипника, розмір тіл кочення, шорсткість поверхні та ін.

Значення коефіцієнтів тертя у різних видах підшипників кочення перебувають у діапазоні 0,002-0,008 [17].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

При терті у мастильних середовищах на процес втомного руйнування може істотно впливати мастильний матеріал. Взаємодія між мастилом та пошкодженнями поверхні, визначальними місцями концентрації напружень, дуже важливо для розуміння явищ поверхневої втоми підшипників кочення.

Швидкість розвитку втомних тріщин залежить від напруженого стану та виду виникаючих деформацій поверхневих та приповерхневих шарів, властивостей мастильного матеріалу та товщини мастильної плівки, появою мікропластичних деформацій при пружному контактуванні деталей.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

4 РОЗРАХУНОК ПІДШИПНИКА КОЧЕННЯ ПРИ ЗМАЩУВАННІ ПЛАСТИЧНИМИ МАСТИЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

4.1 Розрахунок майданчика контакту ролик – кільце.

Для того, щоб оцінити умови взаємодії тіл під час тертя кочення використовують як експериментальні методи, так і методи математичного моделювання. Відомі у наш час підходи до вирішення цієї проблеми можна знайти у монографіях К. Джонсона, І. Г. Горячової, С.В. Пінегіна [19].

Внаслідок деформованості реальних тіл їх контакт здійснюється не в точці, а всередині деякої області контакту, яка за наявності мікрорельєфу поверхні складається з сукупності дискретних плям контакту. У сфері взаємодії поверхонь та її околиці виникає напружений стан, який істотно впливає на процеси тертя та зношування.

У вузлах тертя характеристики контактної взаємодії змінюються у часі в міру накопичення деформацій чи зношування поверхні. У контактних задачах з тертям важлива історія навантаження, а не лише поточні значення нормальних та зсувних навантажень [19].

Наявність контактної тертя при циклічному навантаженні загалом у разі призводить до зниження циклічної міцності виробів. Одним з найважливіших завдань є визначення та аналіз напружено деформованого стану систем, у яких одночасно реалізується контактна взаємодія з тертям (кочення, ковзання) між твердими деформованими тілами та неконтактне (об'ємне) деформування по принаймні одного з елементів системи [19].

Напруження, що виникають на майданчику контакту під час передачі стискаючих зусиль через одне тіло на інше, називаються контактним напруженням. Від контактних напружень залежить стан поверхні, виникнення

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

адгезійних зв'язків у галузі взаємодії, накопичення пошкодження поверхневих шарів та їх руйнування.

Завдання визначення напружень, що виникають при стисканні двох дотичних тіл називають контактною. Вирішення контактних задач дозволяють вивчити залежність контактних характеристик (контактний тиск, форму та розмір області контакту, зближення тіл) та напруженого стану поблизу області взаємодії від навантаження, що додається до контактуючих тіл, форми поверхонь, механічних властивостей взаємодіючих тіл та умов контакту (наявності тертя) [19].

Характерною умовою навантаження деталей підшипників кочення є обмеженість величини майданчиків дотику до деталей, через які передаються робочі зусилля від одного елемента до іншого.

Розрахунок контактуючих деталей підшипників, а саме напружено деформованого стану доріжки кочення кілець підшипників добре описується класичною теорією контактної взаємодії.

При взаємодії двох циліндрів, що мають два радіуси кривизни, кожен, початковий дотик відбувається у точці. Якщо один радіус кривизни, тоді контакт відбувається лінією. Через свої пружні властивості тіла деформуються та створюють майданчики контакту кінцевих розмірів. В разі точкового контакту майданчик набуває форми еліпса. У разі торкання по лінії форма майданчика стає прямокутною [19].

Для визначення геометрії майданчика контакту, розподілу тиску на ньому і знаходження складових напруженого стану в контактній зоні з прийнятною точністю, зазвичай застосовується теорія Герца-Беляєва [19]. Однак у разі прямокутного майданчика ця теорія має сенс тільки для середньої частини циліндра кінцевої довжини, тому що на краях з'являється різке збільшення контактних тисків обумовлене крайовим ефектом, що викликає підвищення напружень по краях ліній, що обмежують область контакту, і не визначається методиками, викладеними у працях вітчизняних та зарубіжних

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

учених [19]. Для обліку крайових ефектів необхідно залучати чисельні методи на основі програмних комплексів. Вважатимемо, що крайові ефекти поширюються на невеликі ділянки контактних ліній.

Завдання про пружний контакт деталей простої форми (у нашому випадку циліндрів) мають рішення у замкнутій формі. У такому завданні розглядаються лише місцеві напруження та деформації у зоні контакту.

Розглянемо область контакту між циліндричним роликом та поверхнею кочення внутрішнього кільця підшипника кочення [19].

На відстані від площини, що проходить через осі циліндрів беремо дві точки A1 та A2 (рисунок 4.1). Зважаючи на те, що початковий контакт циліндричних тіл відбувається по лінії, то майданчик у зоні контакту має прямокутну форму.

Контакт циліндрів по лінії, паралельній їх осям і проходить через точку, відстань між точками A1 і A2 вздовж осі у:

$$\eta_1 + \eta_2 \approx \frac{\xi^2}{2R_1} + \frac{\xi^2}{2R_2} = \frac{\xi^2}{2R}, \quad (4.1)$$

де R_1 та R_2 – радіуси першого та другого циліндрів; R – середній радіус кривизни:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (4.2)$$

Майданчик контакту утворений пружними деформаціями. Під впливом навантаження «р» відбудеться деформація циліндрів у зоні контакту, а їх осі перемістяться до цієї зони величини Δ_1 і Δ_2 . Загальне кінематичне переміщення осей координат, пов'язаних з циліндрами, $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$. Точки A1 та A2 займуть при цьому нове положення A1' і A2'.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

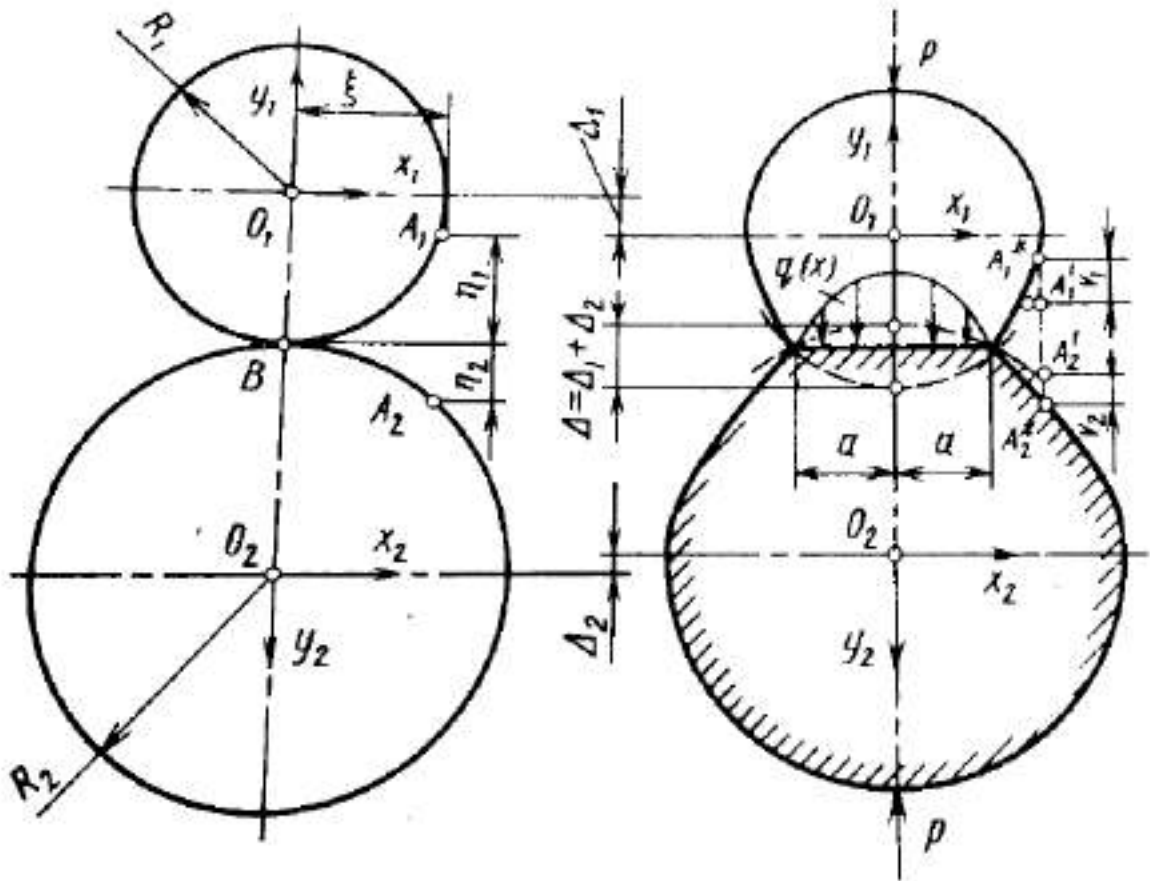


Рисунок 4.1 – До розрахунку контактуючих циліндрів

Тиск у зоні контакту деформує прилеглі не контактуючі поверхні циліндрів та точки $A1'$ і $A2'$, отримавши переміщення $v1$ і $v2$, займуть положення $A1_{\zeta}$ та $A2_{\zeta}$.

Якщо в зоні контакту на півширина смужки контакту $a \geq \xi$, то точки $A1_{\zeta}$ та $A2_{\zeta}$ співпадуть, тому:

$$\Delta_1 - v_1 + \Delta_2 - v_2 = \Delta - v_1 - v_2 = \eta_1 + \eta_2 = \frac{\xi^2}{R}. \quad (4.3)$$

Співвідношення (4.3) є умовою спільності переміщень контактуючих точок циліндрів і показує, що кінематичні переміщення циліндрів під навантаженням компенсуються їх зсувами в наслідок деформації.

Умова рівноваги має вигляд:

									Арк.
									60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ				

$$\int_a^{-a} q(x) dx = p \quad (4.4)$$

Для вирішення задачі необхідно виразити зміщення у рівнянні (4.3) через контактний тиск.

Так як ширина смужки контакту мала в порівнянні з радіусами циліндрів, то кожен з них можна розглядати як пружну напівплощину під впливом тиску $q(x)$.

Зсув точки А з координатою $x=\xi$ (рисунок 4.2) можна обчислити, використовуючи відоме рішення задачі Фламана про дію сили на напівплощина:

$$v_i = \frac{2(1-\nu_i^2)}{\pi E_i} \left[\int_{-a}^a q(x) |\xi - x| dx + \left(\frac{1}{2 - (1-\nu_i^2)} - \ln R_i \right) p \right] \quad (4.5)$$

де E_i та ν_i – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона i -го циліндра.

Підставивши співвідношення (4.5) в умову (4.3) та враховуючи (4.4), отримаємо:

$$(\Theta_1^i + \Theta_2^i) \int_{-a}^a q(x) |\xi - x| dx = \frac{\xi^2}{R} + C, \quad (4.6)$$

де

$$C = (\Theta_1^i + \Theta_2^i) \cdot \left[\ln \left(R_1 R_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1-\nu_1} + \frac{1}{1-\nu_2} \right) \right) \right] p - \Delta;$$

$$\Theta_1^i = \frac{2}{\pi E_1} (1-\nu_1^2); \Theta_2^i = \frac{2}{\pi E_2} (1-\nu_2^2) \quad (4.7)$$

Якщо продиференціюємо рівняння (4.6) по ξ , то отримаємо:

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

$$(\Theta_1^c + \Theta_2^c) \int_{-a}^a \frac{q(x)}{\xi - x} dx = 2 \frac{\xi}{R}. \quad (4.8)$$

Завдання зводиться до знаходження функції $q(x)$, що задовольняє умові (4.4) та рівнянню (4.8) при всіх значеннях $-a \leq x \leq a$.

Можна показати, що цим вимогам задовольнятиме вираз:

$$q(x) = \frac{q_{\max}}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (4.9)$$

$$q_{\max} = \frac{2p}{\pi a}; \quad (4.10)$$

$$a = \sqrt{pR(\Theta_1^c + \Theta_2^c)}. \quad (4.11)$$

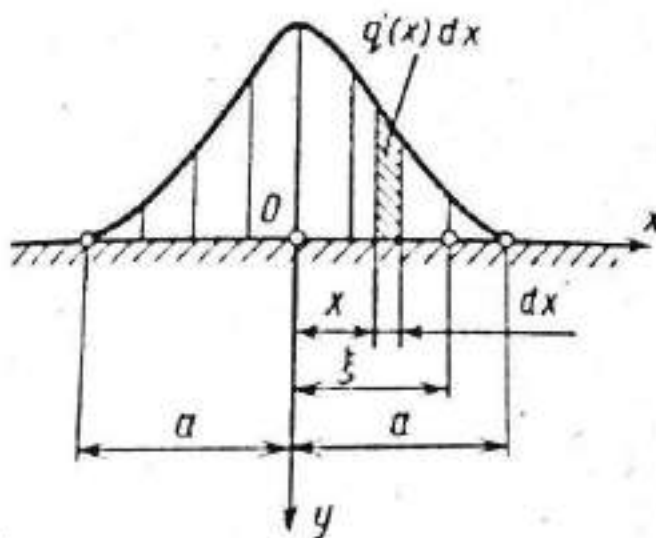


Рисунок 4.2 – До розрахунку переміщень точок напівплощини

Підставляючи в рівність (4.10) і (4.11) значення величин, що в них входять отримаємо:

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$q_{\max} = 0,798 \sqrt{\frac{p \frac{R_1 + R_2}{2 R_1 R_2}}{\Theta_1 + \Theta_2}} ; \quad (4.12)$$

$$a = 0,798 \sqrt{p \frac{R_1 + R_2}{2 R_1 R_2} (\Theta_1 + \Theta_2)} \quad (4.13)$$

де

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} \Theta_1^c; \quad \Theta_1^c = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} ; \quad \Theta_2 = \frac{\pi}{2} \Theta_2^c; \quad \Theta_2^c = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (4.14)$$

За формулою (4.12) максимальний тиск (напруга) у зоні контакту ролик-кільце рівне (МПа):

$$q_{\max} = 0,798 \sqrt{\frac{417 \cdot 10^3 \cdot 56 \cdot \frac{28 + 220}{2 \cdot 28 \cdot 220}}{\frac{1 - 0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}}}} = 186,29$$

Напівширина майданчика контакту ролик-кільце за формулою (4.13) дорівнює (мм):

$$a = 0,798 \sqrt{417 \cdot 10^3 \cdot 56 \cdot \frac{28 + 220}{2 \cdot 28 \cdot 220} \left(\frac{1 - 0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} \right)} = 0,0016$$

Майданчик контакту має ширину $2a = 0,0032$ мм та довжину l , рівну довжина ролика – 27 мм. Область контакту, як згадувалося раніше, складається з двох зон (рис. 4.3). Перша зона, розташована на боці набігання

									Арк.
									63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ				

циліндра, є зоною зчеплення, інша на виході – зоною прослизання. Ширина ділянки ковзання, може бути визначена з наступної формули:

$$\frac{c}{a} = 1 - \frac{1}{\pi} \arctg \frac{1-2\nu}{f(2-2\nu)}, \quad (4.15)$$

де f - коефіцієнт тертя ковзання.

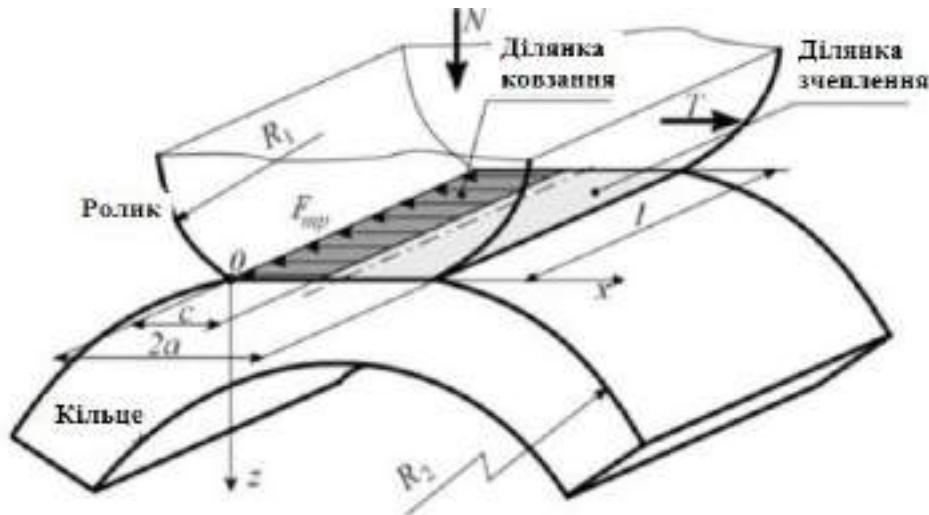


Рисунок 4.3 – Область контакту ролика з доріжкою кочення.

Оцінка впливу контактних напружень на довговічність проводиться з врахуванням сили тертя, що виникає при взаємодії тіл. Максимальні дотичні напруження τ_{\max} пов'язані зі збільшенням сили тертя і підвищують значення нормальних напружень на майданчику контакту, що призводить до появи втомного зношування поверхонь.

Максимальне дотичне напруження знаходиться за формулою:

$$\tau_{\max} = 0,304 \cdot q_{\max}, \quad (4.16)$$

$$\tau_{\max} = 0,304 \cdot 186,29 \cdot 10^6 = 56,63, \text{ МПа}$$

Глибина залягання τ_{\max} :

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

$$h_{\tau \max} = 0,786 \cdot a \quad (4.17)$$

$$h_{\tau \max} = 0,786 \cdot 0,0016 = 0,0013, \text{ мм}$$

Присутність сили тертя переміщує точку, у якій дотичні напруги будуть максимальними до поверхні.

При збільшенні сил тертя на ділянці ковзання зменшується глибина, на якій розташовується точка максимального дотичного напруження, відбувається її наближення до поверхні у напрямку дії сили тертя.

При одночасній дії дотичних та нормальних напружень найбільш значущими при визначенні довговічності підшипників кочення по критерієм втомного зношування є не максимальні дотичні напруження на глибині, а поверхневі напруження на контурі контакту, безпосередньо пов'язані з силами тертя.

Максимальне дотичне напруження, пов'язане зі збільшенням сили тертя, підвищує значення нормальних напружень на майданчику контакту. Таке зростання призводить до появи втомного зношування поверхонь [19]. Якщо на ділянці ковзання виконується закон тертя Кулона – Амонтона, то дотичні та нормальні навантаження пов'язані залежністю:

$$\tau(x) = f \cdot \sigma(x), \quad (4.18)$$

де $\tau(x)$ – тангенційна напруга; $\sigma(x)$ – нормальні напруження; f – коефіцієнт тертя.

З формули (4.18) видно, щоб знизити вплив втоми, необхідно знижувати коефіцієнт тертя. Для прикладу, були взяті графіки залежності зміни нормальних та дотичних напружень для заданого радіального

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

навантаження 2,5 кН, побудованих за допомогою комп'ютерного моделювання (рис. 4.4, 4.5) [19].

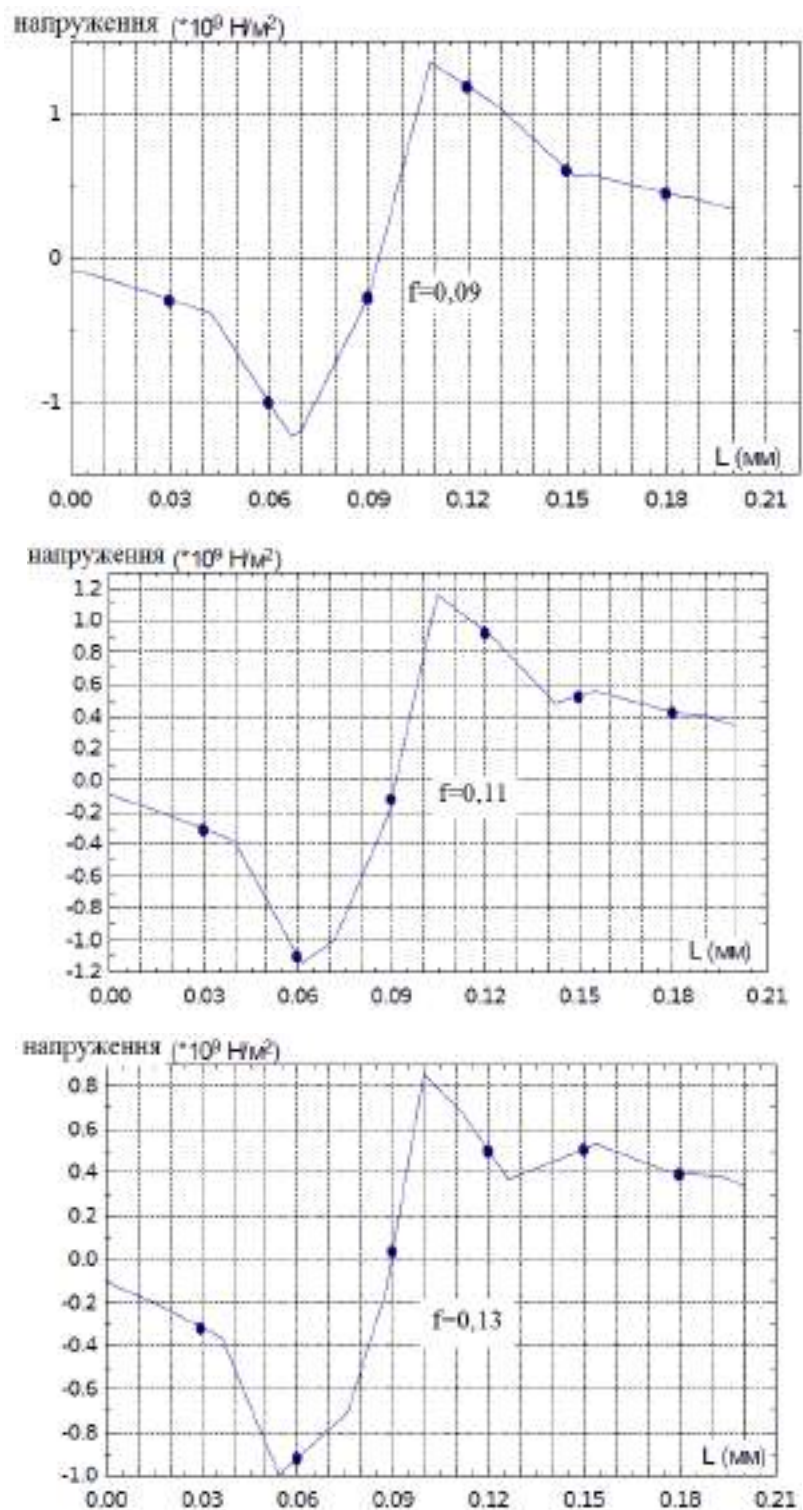


Рисунок 4.4 – Залежність розподілу дотичних напружень по ширині майданчика контакту при коефіцієнтах тертя 0,09; 0,11 та 0,13 відповідно.

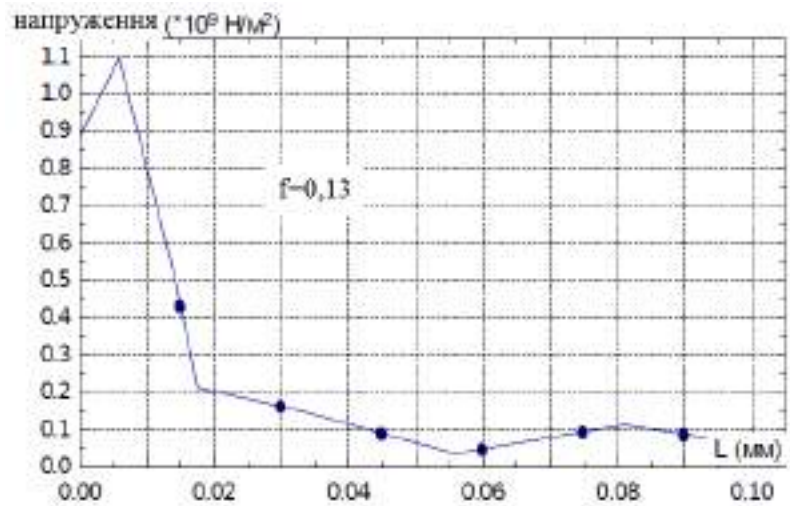
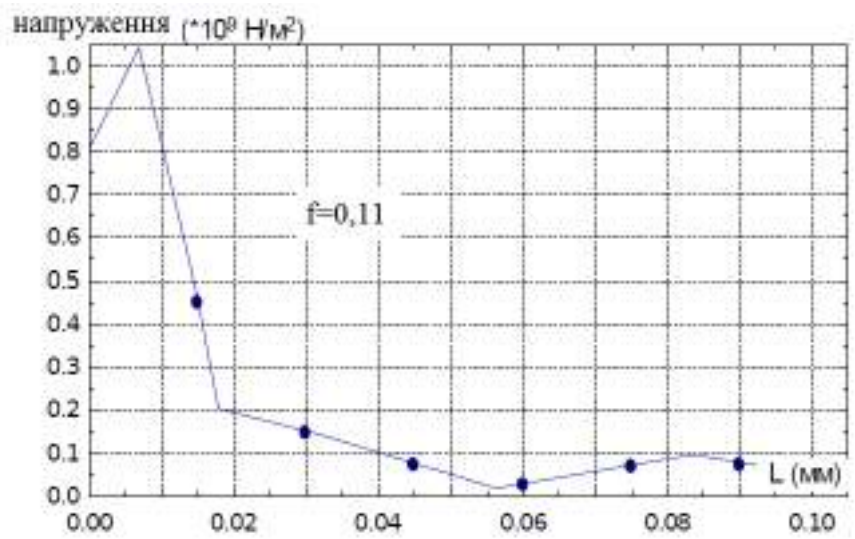
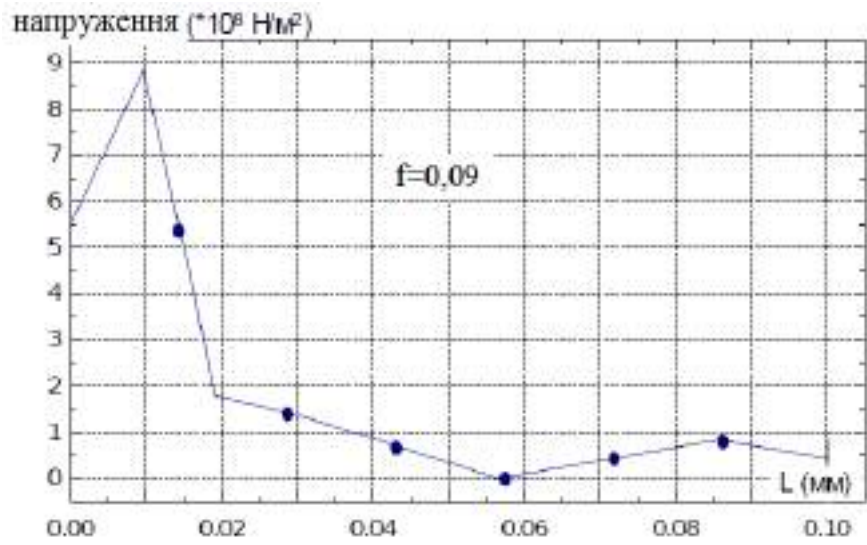


Рисунок 4.5 – Залежність розподілу нормальних напружень по глибині кільця підшипника при коефіцієнтах тертя 0,09; 0,11 та 0,13 відповідно.

Можна помітити на графіках, що зі збільшенням сил тертя ділянки ковзання зменшується глибина, на якій розташовується точка максимальних дотичних напружень, відбувається її наближення до поверхні, у напрямку дії сили тертя, а поверхнєве напруження збільшується. Це скорочує час експлуатації підшипникових опор через початок втомного руйнування доріжок і тіл кочення підшипників.

Швидкість розвитку втомних тріщин залежить від напруженого стану та виду виникаючих деформацій поверхневих та приповерхневих шарів, властивостей мастильного матеріалу та товщини мастильної плівки, появою деформацій при пружному контактуванні деталей.

Щоб вирішити це питання і реалізувати стабільну і тривалу роботу вузлів із тертям кочення, можна застосувати нові мастильні матеріали з високими антифрикційними властивостями.

Щоб правильно підібрати ефективні присадки до мастильних матеріалів необхідно визначити режим роботи мастила для вузла тертя.

4.2 Розрахунок режиму змащення підшипника кочення.

На відміну від ковзання під час кочення тривалість контактування будь-якої нерівності, що належить одній поверхні, з елементами іншої поверхні різко скорочується. Як зазначено у роботі Т. Тальяна [18-19], відносна частка часу відсутності контактування зростає із зусиллям гідродинамічного ефекту, досягаючи 100% при рідинному терті. При неповному рідинному терті вона знаходиться між 0 і 100 %, причому є явно виражена залежність між часткою часу відсутності контакту та відношенням товщини мастильного шару до середнього квадратичного відхилення профілю поверхонь тертя [19].

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Якщо підсумувати всі наявні результати експериментальних та теоретичних робіт з цього питання, то як параметр λ , характеризує режим тертя в контактi кочення, слід прийняти наступне відношення:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}, \quad (4.19)$$

де R_{a1}^2 і R_{a2}^2 – середні арифметичні відхилення профілю контактуючих поверхонь.

Результати експериментів Т. Тальяна показали, що при $\lambda=1$ діє режим граничного мастила, значно ушкоджуються поверхні тертя та не можна забезпечити працездатність підшипника [19].

При $1 < \lambda < 1,5$ відбувається зношування поверхні. В цих умовах існує змішане тертя - поєднання граничного та рідинного; при цьому довговічність підшипника може іноді бути дещо меншою за розрахункову.

При $1,5 < \lambda < 3$ короткочасно виникає контактне тертя, проте режим мастила близький до рідинного, та контактнo-гiдродинамічна теорія мастила вже дає цілком прийнятні та підтвержені практикою результати. Довговічність підшипника тут дорівнює чи навіть більше розрахункової.

При $3 < \lambda < 4$ мастило майже повністю рідинне, зношування вкрай незначне; довговічність суттєво перевищує розрахункову.

При $\lambda < 4$ мастило повністю рідинне та довговічність підшипника, щонайменше вдвічі перевищує розрахункову.

Автором Кодніра Д.С. [19] запропоновано дещо інший метод розрахунку критерію для визначення впливу мастила та робочої температури на працездатність підшипника. Критерій λ розраховується за формулою (4.20) та зіставляється із заданими бажаними значеннями. При невідповідності та необхідності збільшити критерій переходять до іншого мастила та до іншого температурного рівня за рахунок застосування більш інтенсивного охолодження підшипника.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Критерій λ визначається як:

$$\lambda = K_0 \frac{0,176}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} d_m^{0,55} (d_m n)^{0,75} \nu P_0^{0,15}, \quad (4.20)$$

де K_0 - конструктивний коефіцієнт, що залежить від типу підшипника (для шарикопідшипників радіальних та радіально-упорних однорядних всіх серій при $\alpha = 12...36^\circ$ K_0 дорівнює відповідно 70 та 75; для роликотпідшипників всіх серій $K_0 = 100$); ν - параметр мастила $\nu = \mu_0^{0,75} \alpha^{0,6}$ (визначається залежно від температури); P_0 - еквівалентне статичне навантаження, Н; d_m - середній діаметр підшипника.

$$d_m = 0,5(d + D), \quad (4.21)$$

де d - Внутрішній діаметр підшипника, мм; D - зовнішній діаметр підшипник, мм. $d_m = 0,5(220 + 340) = 280$ мм.

Параметр λ придатний насамперед для оцінки впливу мінеральних та синтетичних масел на довговічність підшипника кочення. При застосуванні пластичних мастильних матеріалів параметр λ придатний для оцінки в'язкості того мастила, на базі якої виготовляється відповідний пластичний мастильний матеріал. Нами наведено, що пластичне мастило Літол 24 є сумішшю масел: індустриальне масло І-50А і веретена АУ щодо 3:1, у розрахунки беремо вихідну в'язкість масла І-50А при 50°C $\nu_{50} = 32-35$ мм²/с. Середнє арифметичне відхилення профілю контактуючих поверхонь дорівнює 1,25 мкм.

Еквівалентне статичне навантаження розраховується за формулою:

$$P_0 = X \cdot R + Y \cdot A; \quad (4.22)$$

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

де X і Y – коефіцієнти радіального та осевого навантаження відповідно: $X=0,4$; $Y=0,22\text{ctg}\alpha$; R , A – радіальне та осеве навантаження. Частоту обертання досліджуваного підшипника кочення приймаємо 600 об/хв.

При підстановці чисельних значень формулу (4.20) було отримано значення параметра λ , що дорівнює 1,1, що відповідає режиму змішаного тертя – поєднання граничного та рідинного. При такому режимі мастила відбувається зношування поверхні. Значить, необхідно застосовувати мастильні матеріали з такими властивостями, які зможуть забезпечити знижений знос поверхонь тертя, або модифікувати використовуваний мастильний матеріал для його більш ефективної роботи при змішаному терті.

4.3 Розрахунок довговічності підшипника кочення.

Під довговічністю (ресурсом) окремого підшипника кочення мається на увазі кількість обертів, яке одне з кілець підшипника здійснює щодо іншого кільця до появи перших ознак контактної втоми металу на будь-якому з кілець або тіл кочення.

Оцінка ресурсу роботи підшипника кочення під час використання пластичного мастильного матеріалу використовується як критерій працездатності та описується формулою [19]:

$$L = a_1 a_{23} \left(\frac{C}{Q} \right)^p, \quad (4.23)$$

де a_1 - коефіцієнт надійності $a_1 = 1$; a_{23} – коефіцієнт мастила та матеріалу, що визначається за номограмами та графіками; C – динамічна вантажопідйомність підшипника; Q – еквівалентне навантаження на підшипник; p – статичний коефіцієнт (для роликів підшипників кочення $p=3,33$).

Еквівалентне навантаження розраховується за такою формулою:

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

$$Q = (X \cdot F_r \cdot K_k + Y \cdot F_a) \cdot K_b \cdot K_m, \quad (4.24)$$

де X і Y – коефіцієнти радіального та осевого навантаження відповідно: $X = 0,4$; $Y = 1,882$; F_r, F_a – навантаження радіальне та осеве відповідно $F_r = 7,4$ кН, $F_a = 0,8$ кН; $K_b = 1$; $K_m = 1$; $K_k = 1$.

Підставивши чисельні значення параметрів формулу (4.24), отримаємо еквівалентне навантаження рівне 44,7 кН.

Зв'язок між мастильною композицією, працездатністю підшипника визначається параметром K , що враховує вихідну в'язкість мастильної композиції. K визначається як відношення кінематичних в'язкостей:

$$K = \frac{\nu}{\nu_1}, \quad (4.25)$$

де ν – в'язкість мастильного матеріалу, необхідна для створення режиму гідродинамічного тертя; ν_1 – фактична в'язкість мастильного матеріалу у підшипнику.

$$\nu = \exp \left[2,3 \cdot \frac{A \cdot \ln \nu_{50} + B \cdot t^{1/3}}{C - D \cdot \ln \nu_{50}} \right]; \quad \nu_1 = \frac{41690}{d_m^{0,5} \cdot n^{0,824}}, \quad (4.26)$$

де d_m – середній діаметр підшипника; n – частота обертання підшипника; ν_{50} – вихідна кінематична в'язкість при 50 °С; t – температура підшипника; A, B, C, D – емпіричні незмінні.

Для пластичного мастильного матеріалу методика передбачає застосування у розрахунках в'язкість дисперсійної фази. Беремо вихідну

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

в'язкість олії I-50A, як основного компонента дисперсійної фази при 50 °С
 $\nu_{50}=32-35 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Емпіричні постійні знаходяться за таблицею, залежно від в'язкості мастильного матеріалу при 50 °С. Для $\nu_{50} = 32-35 \text{ мм}^2/\text{с}$ $A = 0,114$; $B = 5,644$; $C = 3602$; $D = 0,507$. Температуру підшипника приймемо рівну 60 °С.

$$\nu = \exp \left[2,3 \cdot \frac{0,114 \cdot \ln(35) + 5,644 - 60^{1/3}}{3,602 - 0,507 \cdot \ln(35)} \right] = 15,373 \text{ мм}^2/\text{с}$$

$$\nu_1 = \frac{41690}{280^{0,5} \cdot 600^{0,824}} = 12,802 \text{ мм}^2/\text{с}$$

$$K = \frac{15,373}{12,802} = 1,2$$

Коефіцієнт мастила та матеріалу a_{23} визначається за емпіричною формулою:

$$a_{23} = (a \cdot K^b + c \cdot K^d) \cdot K_{\text{кн}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{тп}}, \quad (4.27)$$

де a , b , c , d – емпіричні постійні, приймаємо $a = 0,869$; $b = 0,57$; $c = 0,375$; $d = 0,888$; K – відношення в'язкостей за формулою (4.24); $K_{\text{кн}}$ - коефіцієнт конструкції $K_{\text{кн}} = 1$; $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт впливу присадки до мастильного матеріалу, визначається за даними фірми SKF і при $K=1$, $K_{\text{пр}} = 1$; $K_{\text{тп}}$ - коефіцієнт класу точності $K_{\text{тп}} = 1$.

$$a_{23} = (0,869 \cdot 1,2^{0,57} + 0,375 \cdot 1,2^{0,888}) \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,4$$

Ресурс роботи підшипника кочення, при вихідних даних, що прийняті в роботі, з пластичним мастильним матеріалом Літол-24, як критерій працездатності, розраховується за формулою (4.23).

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

$$L = 1 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{770 \cdot 10^3}{44,7 \cdot 10^3} \right)^{3,33} = 1,83 \cdot 10^4 \text{ годин.}$$

При застосуванні нових мастильних матеріалів та технологічних методів підвищення терміну служби деталей важливим є прогнозування їх ресурсу.

Правильно розрахований термін служби дозволить спланувати регламентні роботи, необхідну кількість запасних частин та робітників, зайнятих технічним обслуговуванням та ремонтом техніки.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ВИСНОВКИ

1. Втомне зношування є основною причиною втрати працездатності підшипників кочення.

2. Для зниження зношування при втомі необхідно зменшувати силу тертя. Цього можна досягти при використанні спеціальних присадок (антифрикційних), введених у пластичний мастильний матеріал.

3. У роботі було розраховано значення параметра, яким було визначено режим мащення підшипників кочення. В результаті, було визначено режим змішаного тертя – поєднання граничного та рідинного. При такому режимі мастила відбувається зношування поверхні. Цей розрахунок режиму мастила ще раз підтвердив необхідність зниження втомного зносу в підшипниках кочення.

4. Як видно з розрахунку, довговічність підшипника кочення безпосередньо залежить від мастильного матеріалу, при цьому значення має в'язкість мастильного матеріалу та вплив присадок у мастильному матеріалі.

5. Застосування різних добавок для покращення властивостей мастильних матеріалів стало основним напрямом у галузі розробки нових пластичних змащувальних матеріалів. Для підбору добавок необхідні дослідження у сфері впливу добавок на реологічні властивості мастильних матеріалів та на механохімічні властивості матеріалів пари тертя, а також оцінка ефективного відсоткового вмісту добавки в мастильному матеріалі. Одним із перспективних напрямів розробки нових пластичних змащувальних матеріалів є мастильні матеріали з ультрадисперсними добавками.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войтюк Д.Г. Моніторинг комбайнового ринку України (Частина I)/ Войтюк Д.Г., Надточій О.В., Войтюк В.Д., Демко А.А., Демко О.А. // Науковий вісник НУБіП України, 144 (4). - С 58-69.
2. Діденко М. М. Вплив розмірно-точносних характеристик посадок підшипників кочення на їх довговічність / М. М. Діденко, Є. В. Калганков. // Zbiór artykułów naukowych Sp. z o.o. «Diamond trading tour». - 2017. - С. 38-43.
3. Дирда В.И. Детали машин [Підручник] / за редакцією Дирди В.И.- .: Дніпропетровськ-Герда, 2011. - 338 с.
4. Иванчук, А. В. Детали машин: навч. посібник [для студ. вищ. пед. навч. закл.] / Анатолий Васильович Иванчук. - Вінниця: ТОВ фірма «Планер», 2010. - 336 с.
5. Овчаренко Ю.М. Детали машин: практикум / Овчаренко Ю.М. - Дніпропетровськ, 2003. - 68 с.
6. Ян Д.О. Підвищення довговічності підшипників кочення поліпшенням умов мащення / Ян Д.О. // матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. Пріоритети сучасної науки (частина I): Київ : МЦНД, 2021. - С. 64-65.
7. Semenyuk. N. Analysis of the efficiency of purification of gas flows in a centrifugal filter / T.Boyko, D.Skladanyu, A.Abramova, S.Plashykhin, N.Semenyuk. //Восточно-европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774 – 2016. – №2/10(80). – С. 4–9
8. Григоров А.Б. Виробництво пластичних мастил з вторинної сировини / А.Б. Григоров. – Харків-Тернопіль: НТУ «ХПІ», Видавництво «Крок», 2023. – 188 с.
9. Rizvi S.Q.A. Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design / S.Q.A. Rizvi. - ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2009. – 443p.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

10. Modern Technology of Petroleum, Greases, Lubricants & Petro Chemicals (2nd Revised Edition) / NIIR Board of Consultants & Engineers/ NIIR project consultancy services, 2015. – 704 p.

11. Casserly E. The Effect of Base Oils on Thickening and Physical Properties of Lubricating Greases / E. Casserly, T. Langlais, S. P. Springer, A. Kumar // The european lubricants industry magazine –Tech. – 2018. – №.144. – pp. 32-37.

12. De Laurentis N. The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts / N. De Laurentis, A. Kadiric, P.M. Lugt, P.M. Cann // Tribol. Int. – 2016. – №94. – pp.624–632.

13. Усачев В.В. Разработка технологии упрочняющей обработки трибосопряженный природными геомодификаторами трения / В.В. Усачев, Л.И. Погодаев, Э.Ю. Крюков // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. - №11. – С. 8-22.

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

15. Антипенко А.М. Властивості та якість паливо-мастильних матеріалів. / А.М. Антипенко, С.П. Сорокін, С.О. Поляков – Харків: ЧП Червяк, 2006. – 213 с.

16. Титаренко В.В. Вплив частинок ультрадисперсних алмазів на структуру та властивості електролітичних нікелевих покриттів / В. В. Титаренко, В. А. Заблудовський // Металофізика та новітні технології, 2016. - № 38. – С. 519-529.

17. 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.

18. Закалов, О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин: О.В. Закалов. – Тернопіль: ТДТУ, 2000. – 354 с.

19. Методи розв'язування прикладних задач механіки де формівного твердого тіла / збірник наукових праць / Дніпровський національний університет. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2010. – вип. 11. – 352 с.

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

ДОДАТОК

					ДРМТВАТАМ 23.20172.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

**КАФЕДРА ТРИБОЛОГІЇ, АВТОМОБІЛІВ
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА**

***Використання модифікованих
мастильних матеріалів для
збільшення ресурсу
підшипників кочення***

Виконав ст. гр. МТВАс-20-2:

Максим АНТИПЧУК

*наук. керівник: доц. каф. ТАМ
Сергій ПОСОНСЬКИЙ*

Мета та завдання роботи.

Виробництво підшипників кочення промисловими країнами нараховує сотні мільйонів штук на один рік. В Україні виготовляються підшипники кочення з зовнішнім діаметром від 1,5 до 2600 мм, вагою від 0,5 г до 3,5 т.

Без застосування високоякісних мастильних матеріалів технічний прогрес унеможлиблюється, тому вдосконалювання мастильних матеріалів є найбільш ефективним шляхом підвищення довговічності підшипників кочення машин та агрегатів



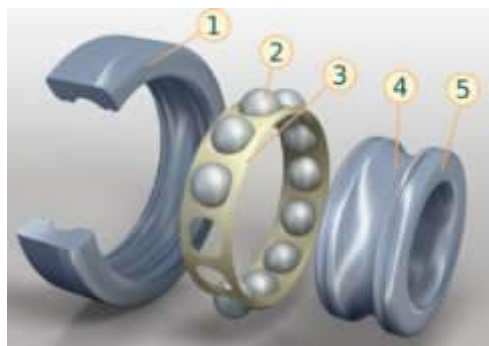
Метою даної дипломної роботи є виявлення можливості підвищення ресурсу підшипників кочення машин, шляхом модифікації мастильних матеріалів.

Завданнями випускної кваліфікаційної роботи є:

- виконати інформаційний пошук з тематики роботи, проаналізувати причини виходу з ладу підшипникових вузлів;*
- провести аналіз методів підвищення терміну служби підшипникових вузлів;*
- виконати аналіз існуючих матеріалів, що застосовуються як функціональні добавки до мастильних матеріалів;*
- провести розрахунок напружень і тисків у зоні контакту підшипника;*
- виконати оцінку режиму роботи підшипникового вузла на підставі якої приймається рішення щодо використання модифікованого мастильного матеріалу.*

Підшипник - це напрямна або опора, що сприймає навантаження та дозволяє відносне переміщення деталей механізму в заданому напрямку.

Класифікація підшипників кочення за формою тіл кочення



за формою тіл кочення

кулькові

роликові

короткі
циліндричні

довгі
циліндричні

конічні

сферичні

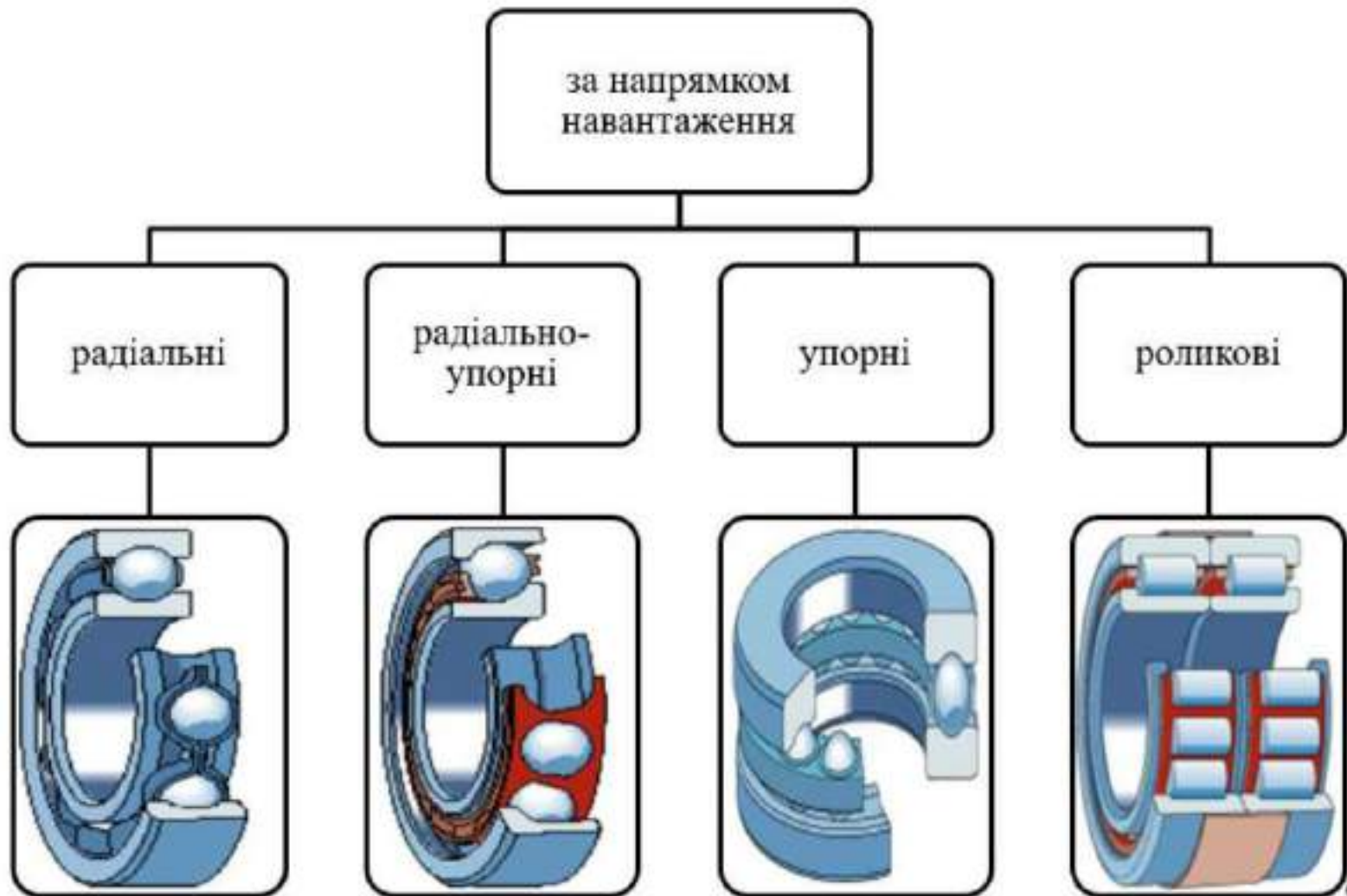
голчасті

порожні

кручені



Класифікація підшипників кочення за напрямком діючого навантаження



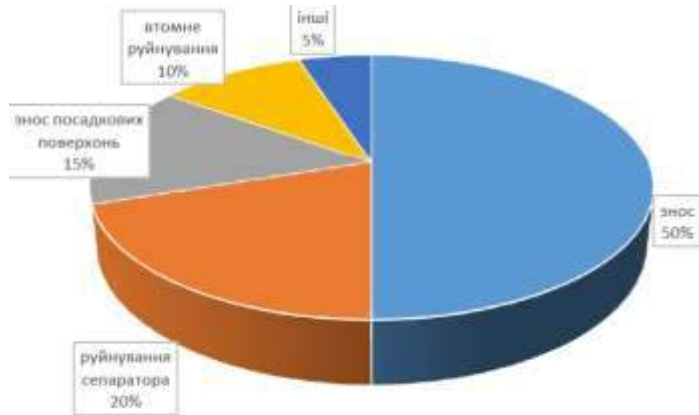
Класифікація підшипників по числу рядів кочення



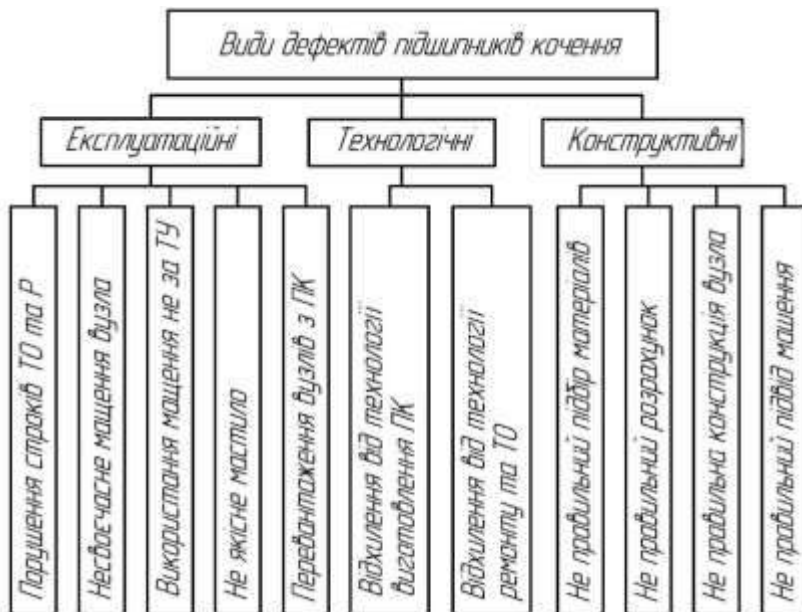
Класифікація підшипників по спеціальним вимогам:



Аналіз причин відмов підшипників кочення

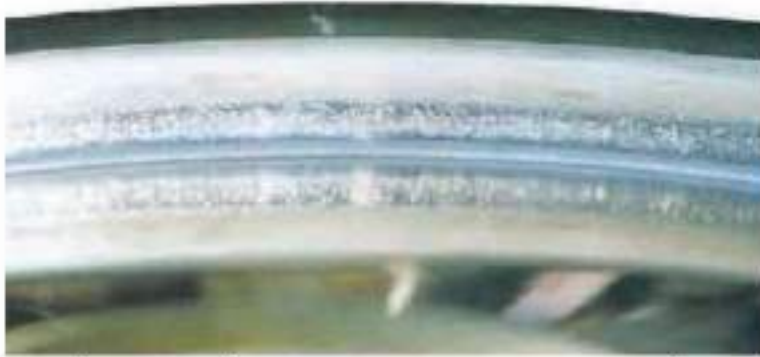


Втомне викришування доріжок підшипника



Втомне викришування кульок підшипника

Аналіз причин відмов підшипників кочення



Внутрішнє кільце конічного наполегливого роликопідшипника із задирками на поверхні буртика внутрішнього кільця



Внутрішнє кільце сферичного роликопідшипника з розломом на великому буртику



Зовнішнє кільце дворядного циліндричного роликопідшипника з тріщинами, спрямованими назовні в осьовому та периферійному напрямках від осередку розвитку втомного викришування на поверхні доріжки кочення.



Повзучість по всій поверхні зовнішнього кільця



Руйнування перемичок сепаратора

ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Марка	Склад	Ефективна в'язкість, Па·с.	Межа міцності, Па·с.	Температура краплепадіння, °С	Температурна межа працездатності	
					нижня	верхня
Солідол-С (ГОСТТ 4366-76)	Індустріальне масло, кальцієві мила синтетичних жирних кислот, вода	200	100	75	- 30	50
Солідол-Ж (ГОСТ 1033-79)	Індустріальне масло, кальцієві мила бавовняного масла, саломас, вода	250	200	75	- 25	65
ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74)	Масло вазелінове приладове МВП, літєве мило стеаринової кислоти, антиокислювач	1100 (при - 50 °С)	250... 500	175	- 60	90
Масило №158 (ТУ 38.101320-77)	Масло авіаційне МС-20, літєво-калієве мило стеаринової кислоти, касторове масло, антиокислювальна і протизносна присадки	400	120	130	- 40	120
Літол-24 (ТУ-21150-97)	Мінеральне масло, літєве мило оксистеаринової кислоти, антиокислювальна і в'язкісна присадки	280	450 (при 20 °С)	180	- 40	130

Згущувачі пластичних мастил

Температурний інтервал застосування пластичних мастил визначають не базові мастила згущувачі, що входять у склад в кількості 5,0...15,0 % за вагою. Найбільше поширення у технології виробництва пластичних мастил, отримали мильні згущувачі – солі, що отримують при нейтралізації природних жирів, вищих жирних (органічних) кислот гідроокисами металів (Li, Na, Mg, Ba, Ca, Al, Zn та ін.) за реакціями, наступного вигляду



№	Згущувач	Властивості
1	Мило кальцію	Рівний маслянистий вигляд, добра водостійкість, низька температура краплепадіння.
2	Мило літію	Грубі волокна, гарний опір розм'якшення і витікання, помірна водостійкість, досить висока температура краплепадіння.
3	Літійовий комплекс	Гладкий маслянистий вигляд, водостійкий, гарний опір сепарації.
4	Алюмінієвий комплекс	Зовні схожий на гель, температура краплепадіння вище за 230 °С, вологостійкий (навіть у морській воді), при високих температурах термін служби скорочується.
5	Сульфонаткальцієвий комплекс	Гладкий і каламутний, добре переносить екстремальний тиск і навантаження, володіє водовідштовхувальними властивостями, температура краплепадіння близька до 260 °С

Модифікатори змащувальних матеріалів

Послідовність розвитку напрямку зниження тертя та зносу елементів машин і механізмів тертя, за рахунок спеціальних триботехнічних добавок виглядає так:

- металоплакувальні добавки (дрібнодисперсні порошки м'яких металів та їх солей);
- порошкові наповнювачі шаруватих силікатів (порошки мінералів серпентинітів);
- композиції з оксидів (оксидів).

Компоненти триботехнічної добавки №1

1	Двоокис кремнію	40-45
2	Мусковіт	2-3
3	Альбіт	3,5-4,0
4	Мікроклін	2-3
5	Поліедральні багатошарові вуглецеві наноструктури фулероїдного типу	0,001-1
6	Суміш фулеренів C60 і C70	0,2-5,0
7	Аморфний вуглець	інше

має вигляд дрібнодисперсного порошку з розміром частинок 0,001-0,1 мкм. Як аморфний вуглець композиція містить сажу. Фулерени загальної формули C60 та C70 можна вводити окремо, але можна використовувати фуллереновмісну сажу, отриману, наприклад, методом дугового розряду у атмосфері інертного газу

Компоненти триботехнічної добавки №2

1	аморфний діоксид кремнію	40...60
2	аморфний оксид алюмінію	5...15
3	аморфний вуглець	6...10
4	аморфний оксид магнію	5...15
5	кремнійорганічна сполука алюмінію та цинку	5...15
6	органічний розчинник	інше

Основна ідея складу триботехнічної добавки саме у компенсації (відновлення) зносу поверхонь тертя.

Модифікатори змащувальних матеріалів

Компоненти мастила №3

1	Графітоколоїдний препарат	4-8
2	Дисульфід вольфраму	3-9
3	Поліізобутилен П-20	2-4
4	Багатофункціональна присадка	0,5-2
5	Загущені милами мастила	до 100

Графітоколоїдний препарат забезпечує стабільну антифрикаційну властивість мастила в інтервалі температур до 250 °С., має протизадирні та антикорозійні властивості мастила.

Склад пластичного мастила №4

1	наноалмаз детонаційного синтезу	0,01-0,05
2	мастило літол-24	інше

властивості частинок наноалмазів дозволяють, при мінімальній їх концентрації в мастилі (менше 0,05 маси %) досягти збільшення терміну служби мастила у кілька разів

Результати досліджень мастила №4

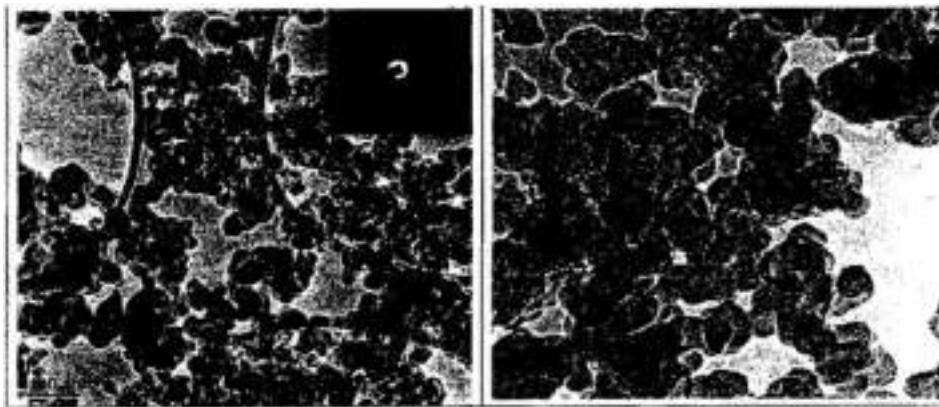
№	Вид мастила	Ra, мкм	V, шт.	L, год
1	Літол 24	0,0917	9	1000
2	Літол 24+0,5% мас. наноалмазів	0,0583	15	1360
3	Літол 24+0,1% мас. наноалмазів	0,0487	11	1500
4	Літол 24+0,05% мас. наноалмазів	0,0387	4	1900
5	Літол 24+0,01% мас. наноалмазів	0,0293	3	2200

Модифікатори змащувальних матеріалів

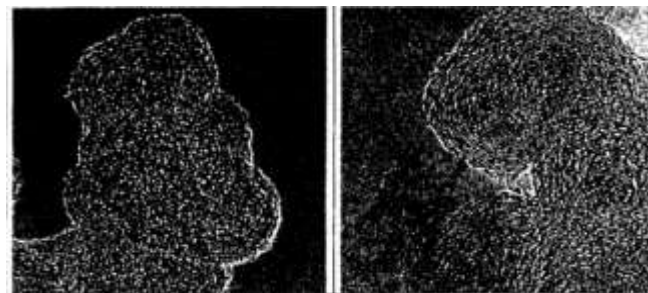
Склад пластичного мастила №5

1	кислота стеаринова	7,0-16,0
2	оцтова кислота	2,0-4,0
3	гідрат окису кальцію	5,0-10,0
4	графіт дрібнодисперсний	7,0-15,0
5	фенілаьфу-нафтиламін	0,1-0,5
6	поліальфаолефіноване мастило з в'язкістю 23-28 сСт (при 100°C)	12,0-19,9
7	складний ефір пентаеритритового спирту та синтетичних жирних кислот фракції C5-C9	інше

Добавка до мастил №6 являє собою дрібнодисперсний порошок, містить суміш діоксиду кремнію з синтетичним вуглецем



Особливістю вуглецю синтетичного є те, що він представляє собою агломерати, що складаються з наночастинок «цибулинної» структури

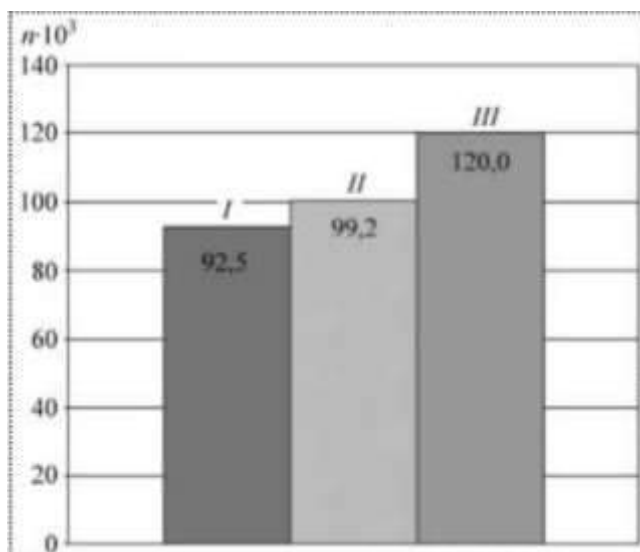


пластичне мастило для важконавантажених вузлів тертя кочення на основі суміші синтетичної вуглеводневої олії та складного ефіру пентаеритритового спирту та синтетичних жирних кислот фракції C5- C9, що характеризується тим, що містить комплексне кальцієве мило стеаринової та оцтової кислот, графіт дрібнодисперсний, фенілаьфу- нафтиламін, іонол, із застосованим як синтетичний вуглеводневої олії поліальфаолефінова олія з більшою в'язкістю

Відомі металоплакуючі мастильні матеріали принцип дії яких полягає у формуванні на ділянках фактичного контакту захисних плівок на основі м'яких металів Cu, Sn, Pb, Zn, Mo та інших, які зменшують силовий вплив та інтенсивність зношування сполучених поверхонь.

Значення шорсткості при різних мастильних матеріалах

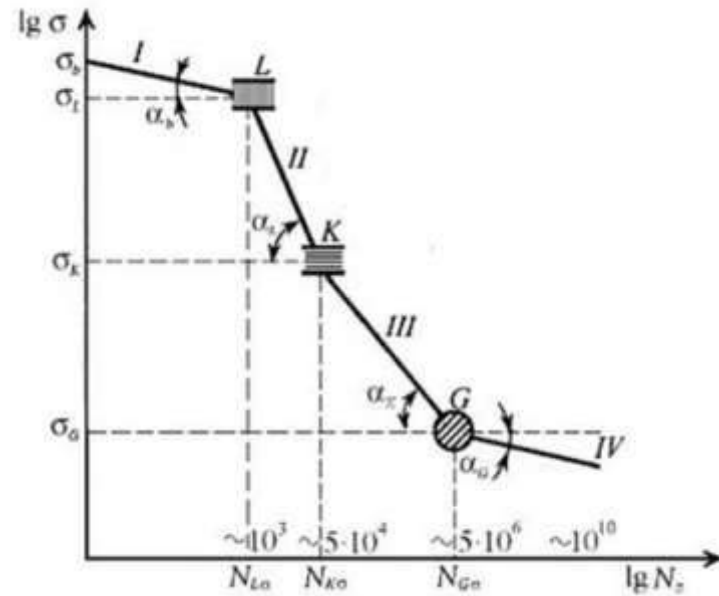
№	Мастильний матеріал	Шорсткість Ra
1	До роботи	0,14
2	Олія індустріальна I-50A	0,22
3	Олія індустріальна I-50A + мідно вмісна присадка	0,22
4	Олія індустріальна I-50A + алюмінієва композиція	0,16



Вплив мастильних матеріалів на контактну витривалість тіл кочення:
 I - олія індустріальна I-40; II - олія індустріальна I-40 + 0,1% мідь містка присадка; III - олія індустріальна I-40 + 2,5% алюмінієва композиція

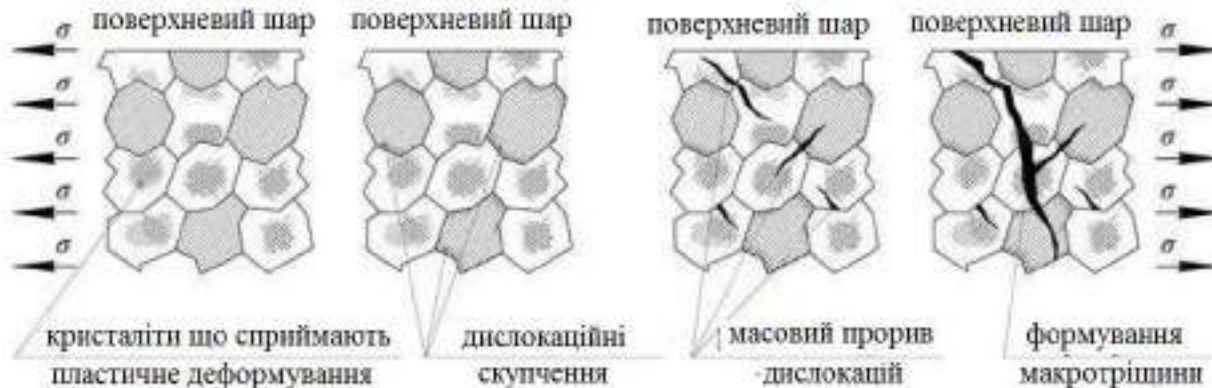
Механізм втомного руйнування

Поверхнєве втомне ушкодження реалізується при контактній взаємодії двох твердих тіл, що притискаються один до одного контактним навантаженням у процесі відносного руху; ці тіла складають специфічний об'єкт – пару тертя. Характеристика опору механічній втоми є повна крива втоми

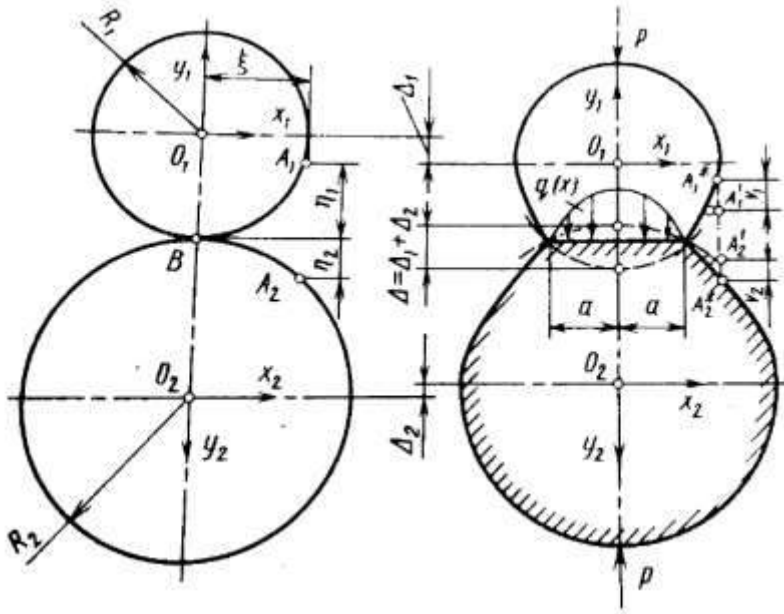


Поверхнєві шари матеріалу характеризуються наявністю різного роду включень та підвищеним вмістом в одиниці об'єму дефектів будови: дислокацій, вакансій мікротріщин.

Взаємодія дислокацій в осередках скупчення призводить до розпушування поверхневих шарів та появи мікропор.



Розрахунок майданчика контакту ролик – кільце



максимальний тиск у зоні контакту ролик-кільце рівне (МПа)

$$q_{\max} = 0,798 \sqrt{\frac{p}{2 R_1 R_2} (\Theta_1 + \Theta_2)} ; \quad q_{\max} = 0,798 \sqrt{\frac{417 \cdot 10^3 \cdot 56 \cdot \frac{28+220}{2 \cdot 28 \cdot 220}}{\frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} + \frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}}}} = 186,29$$

$$a = 0,798 \sqrt{p \frac{R_1 + R_2}{2 R_1 R_2} (\Theta_1 + \Theta_2)} \quad a = 0,798 \sqrt{417 \cdot 10^3 \cdot 56 \cdot \frac{28+220}{2 \cdot 28 \cdot 220} \left(\frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} + \frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} \right)} = 0,0016$$

умова спільності переміщень контактуючих точок циліндрів і показує, що кінематичні переміщення циліндрів під навантаженням компенсуються їх зсувами в наслідок деформації.

Умова рівноваги має вигляд:

$$\int_a^{-a} q(x) dx = p$$

Для вирішення задачі необхідно виразити зміщення у рівнянні через контактний тиск

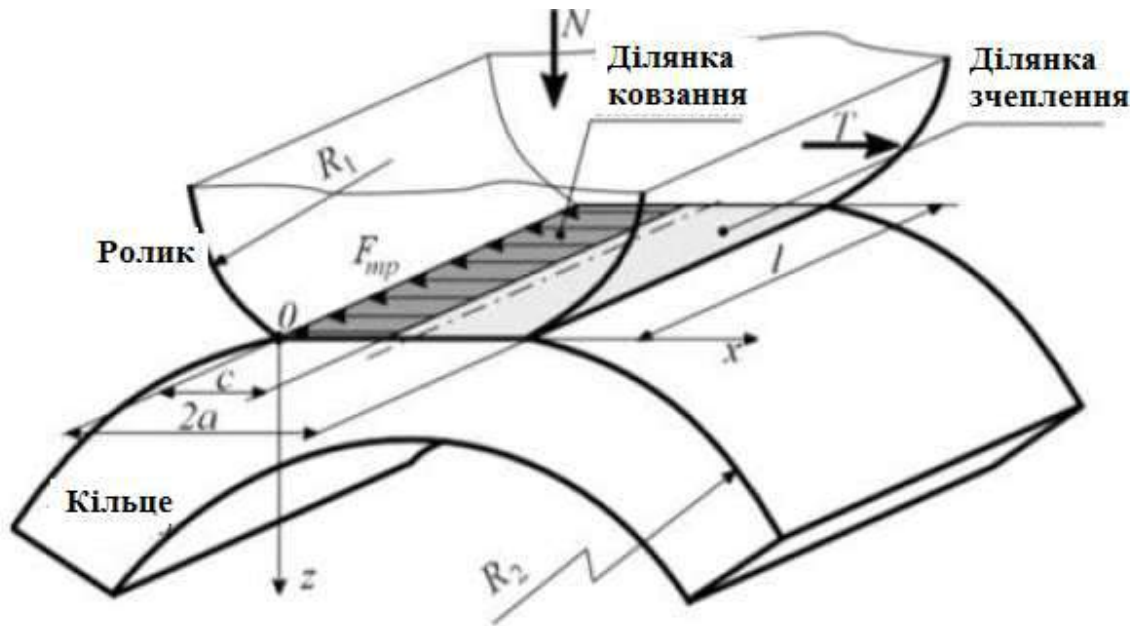
Зсув точки А з координатою $x = \xi$ можна обчислити, використовуючи відоме рішення задачі Фламана про дію сили на напівплощину:

$$v_i = \frac{2(1-\nu_i^2)}{\pi E_i} \left[\int_a^{-a} q(x) |\xi - x| dx + \left(\frac{1}{2 - (1-\nu_i^2)} - \ln R_i \right) p \right]$$

Напівширина майданчика контакту ролик-кільце (мм):

Майданчик контакту має ширину $2a = 0,0032$ мм та довжину l , рівну довжині ролика – 27 мм. Область контакту, як згадувалося раніше, складається з двох зон. Перша зона, розташована на боці набігання циліндра, є зоною зчеплення, інша на виході – зоною прослизання. Ширина ділянки ковзання, може бути визначена з наступної формули:

$$\frac{c}{a} = 1 - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1-2\nu}{f(2-2\nu)}, \quad \text{Де } f \text{ – коефіцієнт тертя}$$



Максимальне дотичне напруження (МПа):

$$\tau_{\max} = 0,304 \cdot q_{\max}$$

$$\tau_{\max} = 0,304 \cdot 186,29 \cdot 10^6 = 56,63$$

Глибина залягання, мм

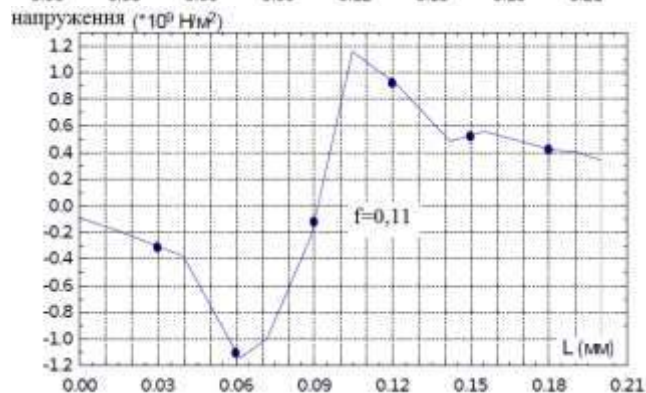
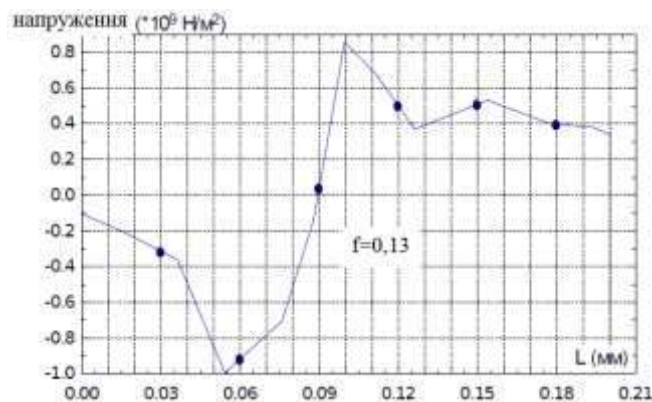
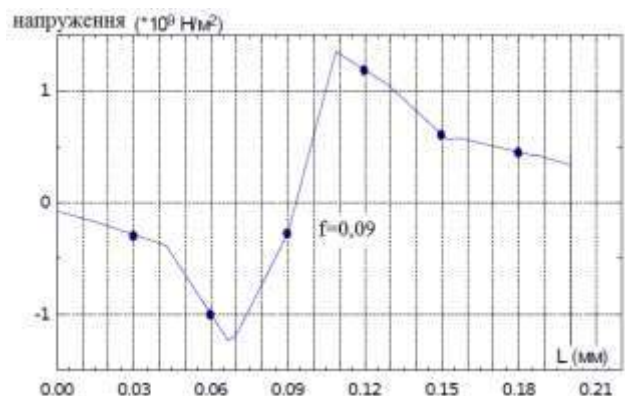
$$h_{\tau \max} = 0,786 \cdot a$$

$$h_{\tau \max} = 0,786 \cdot 0,0016 = 0,0013$$

Максимальне дотичне напруження, пов'язане зі збільшенням сили тертя, підвищує значення нормальних напружень на майданчику контакту. Таке зростання призводить до появи втомного зношування поверхонь. Якщо на ділянці ковзання виконується закон тертя Кулона – Амонтона, то дотичні та нормальні навантаження пов'язані залежністю:

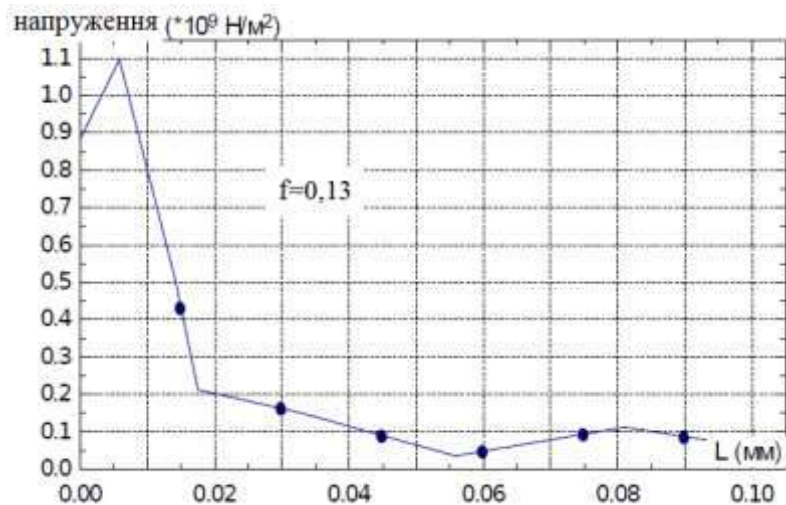
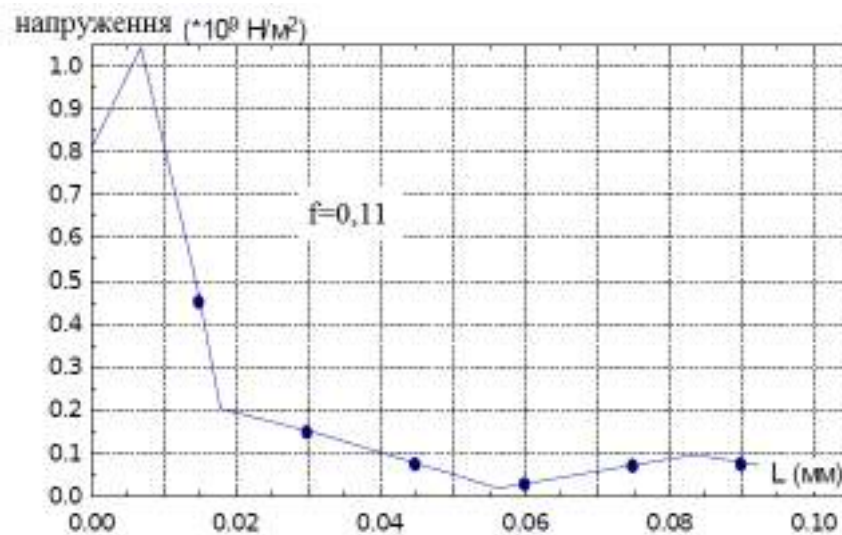
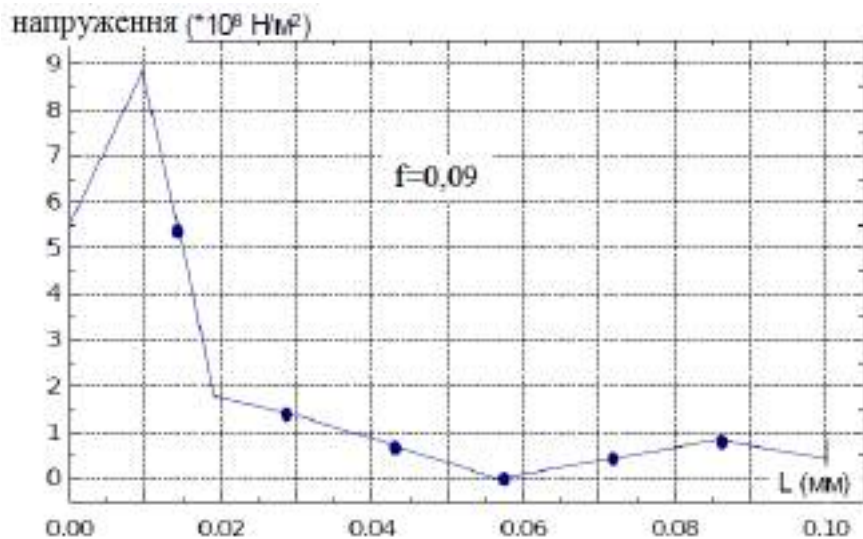
$$\tau(x) = f \cdot \sigma(x),$$

щоб знизити вплив втоми, необхідно знижувати коефіцієнт тертя. Для прикладу, були взяті графіки залежності зміни нормальних та дотичних напружень для заданого радіального навантаження 2,5 кН, побудовані за допомогою комп'ютерного моделювання



Залежність розподілу дотичних напружень по ширині майданчика контакту при коефіцієнтах тертя 0,09; 0,11 та 0,13 відповідно

Залежність розподілу нормальних напружень по глибині кільця підшипника при коефіцієнтах тертя 0,09; 0,11 та 0,13 відповідно



зі збільшенням сил тертя ділянки ковзання зменшується глибина, на якій розташовується точка максимальних дотичних напружень, відбувається її наближення до поверхні, у напрямку дії сили тертя, а поверхневе напруження збільшується. Це скорочує час експлуатації підшипникових опор через початок втомного руйнування доріжок і тіл кочення підшипників.

Розрахунок режиму змащення підшипника кочення

Якщо підсумувати всі наявні результати експериментальних та теоретичних робіт з цього питання, то як параметр λ , характеризує режим тертя в контактї кочення, слід прийняти наступне відношення

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}, \quad R_{a1}^2, R_{a2}^2 \quad \text{середні арифметичні відхилення профілю контактуючих поверхонь.}$$

$$\lambda = K_0 \frac{0,176}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} d_m^{0,55} (d_m n)^{0,75} \nu P_0^{0,15},$$

де K_0 - конструктивний коефіцієнт, що залежить від типу підшипника (для шарикопідшипників радіальних та радіально-упорних однорядних всіх серій при $\alpha = 12...36^\circ$ K_0 дорівнює відповідно 70 та 75; для роликотпідшипників всіх серій $K_0 = 100$); ν – параметр мастила визначається залежно від температури); P_0 – еквівалентне статичне навантаження, Н; d_m – середній діаметр підшипника.

При $1 < \lambda < 1,5$ відбувається зношування поверхні. В цих умовах існує змішане тертя - поєднання граничного та рідинного; при цьому довговічність підшипника може іноді бути дещо меншою за розрахункову.

При $1,5 < \lambda < 3$ короткочасно виникає контактне тертя, проте режим мастила близький до рідинного, та контактнo-гiдродинамічна теорія мастила вже дає цілком прийнятні та підтверджені практикою результати. Довговічність підшипника тут дорівнює чи навіть більше розрахункової.

При $3 < \lambda < 4$ мастило майже повністю рідинне, зношування вкрай незначне; довговічність суттєво перевищує розрахункову.

При $\lambda < 4$ мастило повністю рідинне та довговічність підшипника, щонайменше вдвічі перевищує розрахункову.

Розрахунок довговічності підшипника кочення

Оцінка ресурсу роботи підшипника кочення під час використання пластичного мастильного матеріалу використовується як критерій працездатності та описується формулою

$$L = a_1 a_{23} \left(\frac{C}{Q} \right)^p,$$

де a_1 - коефіцієнт надійності $a_1 = 1$; a_{23} – коефіцієнт мастила та матеріалу, що визначається за номограмами та графіками; C – динамічна вантажопідйомність підшипника; Q – еквівалентне навантаження на підшипник; p – статичний коефіцієнт (для роликів підшипників кочення $p=3,33$).

Еквівалентне навантаження розраховується за такою формулою:

$$Q = (X \cdot F_r \cdot K_k + Y \cdot F_a) \cdot K_b \cdot K_m,$$

де X і Y – коефіцієнти радіального та осьового навантаження відповідно: $X = 0,4$; $Y = 1,882$; F_r, F_a – навантаження радіальне та осьове відповідно $F_r = 7,4$ кН, $F_a = 0,8$ кН; $K_b = 1$; $K_m = 1$; $K_k = 1$.

Підставивши чисельні значення параметрів формулу, отримаємо еквівалентне навантаження рівне 44,7 кН.

Зв'язок між мастильною композицією, працездатністю підшипника визначається параметром K , що враховує вихідну в'язкість мастильної композиції. K визначається як відношення кінематичних в'язкостей

$$K = \frac{v}{v_1} \quad v = \exp \left[2,3 \cdot \frac{A \cdot \ln v_{50} + B - t^{1/3}}{C - D \cdot \ln v_{50}} \right]; \quad v_1 = \frac{41690}{d_m^{0,5} \cdot n^{0,824}}, \quad v_1 = \frac{41690}{280^{0,5} \cdot 600^{0,824}} = 12,802 \text{ мм}^2/\text{с}$$

$$v = \exp \left[2,3 \cdot \frac{0,114 \cdot \ln(35) + 5,644 - 60^{1/3}}{3,602 - 0,507 \cdot \ln(35)} \right] = 15,373 \text{ мм}^2/\text{с} \quad K = \frac{15,373}{12,802} = 1,2$$

$$a_{23} = (a \cdot K^b + c \cdot K^d) \cdot K_{кл} \cdot K_{np} \cdot K_{mn}, \quad a_{23} = (0,869 \cdot 1,2^{0,57} + 0,375 \cdot 1,2^{0,888}) \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,4$$

Ресурс роботи підшипника кочення, при вихідних даних, що прийняті в роботі, з пластичним мастильним матеріалом Літол-24, як критерій працездатності складає

$$L = 1 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{770 \cdot 10^3}{44,7 \cdot 10^3} \right)^{3,33} = 1,83 \cdot 10^4 \text{ годин.}$$

ВИСНОВКИ

- **1. Втомне зношування є основною причиною втрати працездатності підшипників кочення.**
- **2. Для зниження зношування при втомі необхідно зменшувати силу тертя. Цього можна досягти при використанні спеціальних присадок (антифрикційних), введених у пластичний мастильний матеріал.**
- **3. У роботі було розраховано значення параметра, яким було визначено режим мащення підшипників кочення. В результаті, було визначено режим змішаного тертя – поєднання граничного та рідинного. При такому режимі мастила відбувається зношування поверхні. Цей розрахунок режиму мастила ще раз підтвердив необхідність зниження втомного зносу в підшипниках кочення.**
- **4. Як видно з розрахунку, довговічність підшипника кочення безпосередньо залежить від мастильного матеріалу, при цьому значення має в'язкість мастильного матеріалу та вплив присадок у мастильному матеріалі.**
- **5. Застосування різних добавок для покращення властивостей мастильних матеріалів стало основним напрямом у галузі розробки нових пластичних змащувальних матеріалів. Для підбору добавок необхідні дослідження у сфері впливу добавок на реологічні властивості мастильних матеріалів та на механохімічні властивості матеріалів пари тертя, а також оцінка ефективного відсоткового вмісту добавки в мастильному матеріалі. Одним із перспективних напрямів розробки нових пластичних змащувальних матеріалів є мастильні матеріали з ультрадисперсними добавками.**

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!