

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастил»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр **КвРМТВА. 22140.01.26.00**

Виконав студент 4 курсу група *МТВА-22-1*


Підпис

Тарас КОСТУР

Керівник *д-р.техн.наук, проф. каф. ТАМ*


Підпис

Павло КАПЛУН

Нормоконтролер *канд.техн.наук,
доц. каф. ТАМ*


Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026р

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


15.04 2026 р. Диха О.В.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Костуру Тарасу Володимировичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастил.**

Керівник роботи: Каплун Павло Віталійович, д-р.техн.наук, проф. каф. ТАМ.

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

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 14)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

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

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

1) Проведення аналітичного огляду літературних джерел.

2) Опрацювання теоретичних основ сучасних наукових досліджень предметної області.

3) Визначення матеріалів та методики випробувань.

4) Опрацювання отриманих результатів та формулювання рекомендацій.

5) Висновки.

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 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Проведення аналітичного огляду літературних джерел	28.05.2026	вик
2	Опрацювання теоретичних основ сучасних наукових досліджень предметної області	4.06.2026	вик
3	Визначення матеріалів та методики випробувань	8.06.2026	вик
4	Опрацювання отриманих результатів та формулювання рекомендацій	12.06.2026	вик
5	Висновки	14.06.2026	вик
6	Захист роботи	16.06.2026	

Студент

Коссеф

Тарас КОСТУР

Керівник роботи

Павло

Павло КАПЛУН

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВА-22-1: Костур Т.В.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему **«Підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастил»** складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 14 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 12 сторінках. Роботу викладено на 66 сторінках, з них 63 сторінок основного тексту, на яких розміщено 9 рисунків і 9 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню впливу сучасних полімерних матеріалів та синтетичних мастильних матеріалів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання.

У першому розділі визначено об'єкт дослідження, проведено аналіз наукових джерел з триботехнічного матеріалознавства, розглянуто сучасні полімерні матеріали та мастильні середовища для підшипників ковзання, а також механізми тертя і зношування.

У другому розділі проаналізовано режими мащення, трибологічні параметри та вплив властивостей матеріалів і мастильних матеріалів на роботу підшипників. Обґрунтовано вибір полімерних матеріалів і синтетичних мастил.

Третій розділ містить опис трибологічних випробувань та застосованого обладнання. Наведено методики визначення коефіцієнта тертя, зношування та температури в зоні контакту, а також оцінки режимів мащення і товщини мастильної плівки.

У четвертому розділі наведено результати порівняльного аналізу матеріалів та мастильних середовищ. Встановлено, що полімерні матеріали типу UHMWPE та PEEK у поєднанні з синтетичними мастилами забезпечують зниження коефіцієнта тертя до 0,05–0,08 та зменшення інтенсивності зношування у 3–5 разів. Для PTFE характерний мінімальний коефіцієнт тертя, проте підвищений знос без наповнювачів. Встановлено, що використання PA6-мастил сприяє формуванню більш стійкої мастильної плівки та зниженню втрат на тертя.

Ключові слова: ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ, ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ, СИНТЕТИЧНІ МАСТИЛА, ТРИБОЛОГІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	8
1.1. Загальна характеристика підшипників ковзання	8
1.2. Основні види зношування	11
1.3. Режими мащення (крива Штрибека)	15
1.4. Традиційні матеріали підшипників ковзання	17
1.5. Сучасні полімерні матеріали	20
1.6. Вплив мастильних матеріалів на триботехнічні характеристики	24
1.7. Аналіз сучасних досліджень	26
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ	30
2.1. Основи гідродинамічного мащення	30
2.2. Основні трибологічні параметри	33
2.3. Вплив властивостей матеріалу на триботехнічні характеристики	37
2.4. Вплив мастила на триботехнічні характеристики	39
2.5. Критерії зносостійкості підшипників ковзання	43
3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА	46
3.1. Вибір матеріалів для підшипників ковзання	46
3.2. Характеристика мастильних матеріалів для підшипників	49
3.3. Обладнання для дослідження триботехнічних характеристик	54
4 РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ	58
4.1. Результати випробувань матеріалів	58
4.2. Практичні рекомендації щодо підвищення зносостійкості	60
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64
ДОДАТКИ	66

					КВРМТВА, 22140.01.26.00			
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастил	Літера	Арквш	Арквнів
Виконав	Костур	<i>Костур</i>					4	66
Перевір.	Каплун	<i>Каплун</i>						
Н.контр.	Бабак	<i>Бабак</i>				ХНУ, МТВА-22-1		
Затвер.	Диха	<i>Диха</i>						

ВСТУП

Підшипники ковзання є одними з ключових елементів сучасних машин і механізмів, що забезпечують підтримання обертових валів та передачу навантажень у вузлах тертя. Вони широко застосовуються у двигунах внутрішнього згоряння, турбомашинах, гідроенергетичних установках та іншому енергетичному обладнанні, де працюють в умовах високих навантажень, швидкостей та температур. Надійність і довговічність таких вузлів безпосередньо визначають ефективність функціонування машин, їх ресурс та економічні показники експлуатації [1].

У сучасних умовах розвитку машинобудування особливої актуальності набуває проблема зменшення втрат енергії та підвищення зносостійкості трибологічних систем. За даними сучасних досліджень, значна частка енергетичних втрат у технічних системах пов'язана саме з процесами тертя та зношування, що зумовлює необхідність удосконалення матеріалів і мастильних середовищ у вузлах ковзання [1]. Особливо це стосується підшипників ковзання, які працюють у різних режимах мащення – від граничного до гідродинамічного, що супроводжується складними фізико-хімічними процесами на поверхнях контакту.

Підшипники ковзання в енергетичних установках функціонують переважно в умовах гідродинамічного мащення, однак у перехідних режимах (пуск, зупинка, зміна навантаження) відбувається контакт мікронерівностей поверхонь, що призводить до інтенсивного зношування та підвищеного коефіцієнта тертя. Це зумовлює необхідність використання матеріалів, здатних забезпечити надійний захист поверхонь у таких умовах, а також мастильних матеріалів із стабільними реологічними властивостями [2].

Традиційно для виготовлення вкладишів підшипників ковзання застосовуються металеві матеріали, зокрема бабітові сплави та бронзи, які характеризуються задовільними антифрикційними властивостями та

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічністю. Однак вони мають низку суттєвих недоліків, серед яких обмежена теплостійкість, схильність до адгезійного зношування та обмежена несуча здатність при підвищених навантаженнях. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях значна увага приділяється застосуванню полімерних матеріалів і композицій на їх основі, які можуть забезпечити зниження коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості та покращення демпфувальних властивостей вузлів тертя [2].

Як зазначено у [1], використання полімерних матеріалів, зокрема композицій на основі політетрафторетилену (PTFE) та інших високотехнологічних полімерів, дозволяє суттєво знизити пускове тертя та інтенсивність зношування у порівнянні з традиційними металевими матеріалами. Водночас важливим фактором є теплопровідність і термостійкість таких матеріалів, що впливає на формування мастильної плівки та температурний режим роботи підшипника. Таким чином, оптимальний вибір матеріалу має враховувати комплекс фізико-механічних і трибологічних характеристик [2].

Не менш важливим чинником, що визначає ефективність роботи підшипників ковзання, є мастильний матеріал. Сучасні тенденції розвитку трибології передбачають використання синтетичних мастил із високим індексом в'язкості, що забезпечують стабільні властивості у широкому діапазоні температур. Встановлено, що застосування таких мастил дозволяє зменшити втрати потужності, знизити температуру в зоні контакту та підвищити довговічність підшипників [2], [3]. Крім того, сучасні мастильні матеріали можуть містити функціональні присадки, які формують захисні трибоплівки на поверхнях тертя, зменшуючи зношування та покращуючи антифрикційні властивості.

Сучасні наукові дослідження підтверджують, що комплексний підхід до підвищення зносостійкості підшипників ковзання, який передбачає одночасне вдосконалення матеріалів і мастильних середовищ, є найбільш

					<i><u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ефективним. Зокрема, врахування трибодинамічних процесів, що відбуваються під час пуску та роботи підшипника, дозволяє більш точно прогнозувати його ресурс та оптимізувати конструктивні й експлуатаційні параметри [3].

Отже, актуальність даної роботи зумовлена необхідністю підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастил, що дозволить зменшити енергетичні втрати, підвищити надійність машин та продовжити термін їх експлуатації.

Метою роботи є підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастильних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі трибології підшипників ковзання;
- дослідити властивості традиційних і полімерних матеріалів;
- оцінити вплив мастильних матеріалів на триботехнічні характеристики;
- провести аналіз умов роботи підшипників та факторів зношування;
- сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення зносостійкості.

Об'єктом дослідження є підшипники ковзання як елементи трибологічних систем.

Предметом дослідження є триботехнічні характеристики матеріалів і мастильних середовищ у вузлах ковзання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування сучасних полімерних матеріалів і синтетичних мастил для підвищення довговічності та енергоефективності підшипників ковзання у різних галузях машинобудування.

					<i><u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальна характеристика підшипників ковзання

Підшипники ковзання є одним із найпоширеніших типів опор обертових валів, які забезпечують їхнє позиціонування та сприйняття радіальних і осьових навантажень у машинах і механізмах. На відміну від підшипників кочення, у даному типі вузлів контакт між поверхнями здійснюється через проміжний шар мастильного матеріалу або безпосередньо між поверхнями, що ковзають одна відносно одної. Саме характер взаємодії контактуючих поверхонь визначає триботехнічні властивості підшипників ковзання, включаючи коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування та енергоефективність роботи вузла [2].

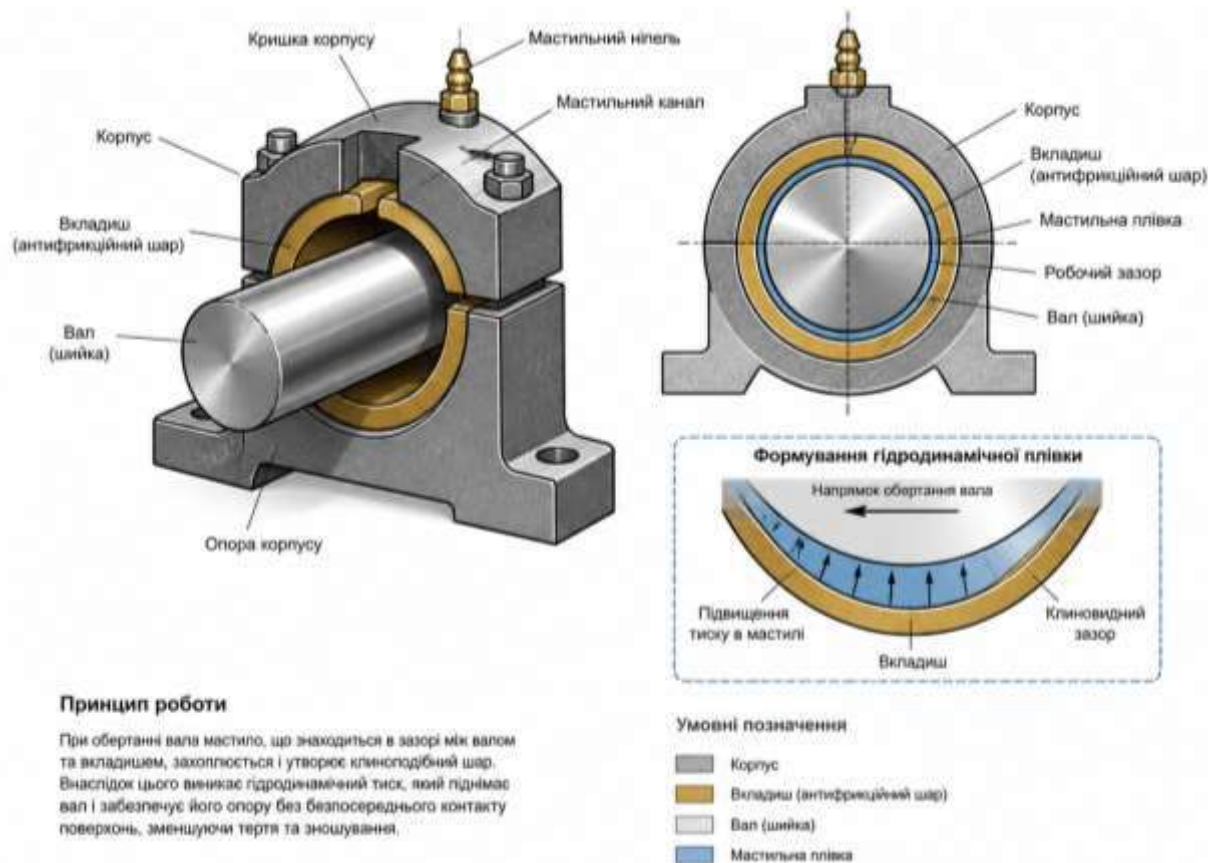


Рис. 1 – Схема підшипника ковзання

Конструктивно підшипник ковзання складається з корпусу, вкладиша (антифрикційного шару) та вала (шійки), між якими формується робочий зазор, заповнений мастильним матеріалом. У процесі роботи при обертанні

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА. 22140.01.26.00

Арк.

8

вала у зазорі виникає гідродинамічний тиск, який забезпечує розділення контактних поверхонь і формування мастильної плівки. Згідно з [1], при достатній швидкості обертання та відповідних параметрах мастила відбувається повний перехід до гідродинамічного режиму мащення, що супроводжується різким зменшенням коефіцієнта тертя і практично повною відсутністю зношування.

Залежно від умов роботи підшипники ковзання можуть функціонувати в різних режимах мащення: граничному, змішаному та гідродинамічному. У граничному режимі мастильна плівка є недостатньою для повного розділення поверхонь, що призводить до контакту мікронерівностей і значного зростання сил тертя. Зі збільшенням швидкості або в'язкості мастила відбувається перехід до змішаного режиму, де частина навантаження сприймається мастильною плівкою, а частина – поверхнями контакту. У гідродинамічному режимі навантаження повністю передається через мастильну плівку, що забезпечує мінімальний рівень тертя та зношування [2], [4].

Важливою особливістю підшипників ковзання є залежність їх експлуатаційних характеристик від параметрів системи «матеріал – мастило – режим роботи». Зокрема, згідно з [1], формування гідродинамічного тиску у зазорі підшипника визначається геометрією вузла, швидкістю ковзання, навантаженням та в'язкістю мастильного матеріалу. При цьому навіть незначні зміни цих параметрів можуть суттєво впливати на товщину мастильної плівки та умови тертя.

Класифікація підшипників ковзання здійснюється за різними ознаками, зокрема за напрямком навантаження (радіальні, упорні), за конструкцією (суцільні, роз'ємні, сегментні), а також за типом мастильної системи (з рідинним, твердим або комбінованим мащенням). Одним із найпоширеніших типів у сучасному машинобудуванні є радіальні підшипники ковзання, які широко застосовуються у двигунах внутрішнього згорання, турбінах, компресорах та електрогенераторах [4].

					<i><u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Для узагальнення конструктивних та експлуатаційних особливостей різних типів підшипників ковзання доцільно провести їх порівняння за основними параметрами, що визначають умови роботи, ефективність та зносостійкість (табл. 1.1).

Особливе місце серед підшипників ковзання займають гідродинамічні підшипники, в яких несуча здатність забезпечується виключно за рахунок тиску мастильної плівки. У таких підшипниках вал зміщується відносно центру вкладиша, утворюючи клиноподібний зазор, у якому під дією руху мастила формується тиск, здатний сприймати зовнішнє навантаження. Як зазначено у [1], саме цей ефект є основою роботи більшості підшипників у енергетичних установках, де забезпечується стабільний режим мащення при номінальних умовах експлуатації.

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика підшипників ковзання

Параметр	Граничний режим мащення	Змішаний режим мащення	Гідродинамічний режим мащення
Характер контакту	Безпосередній контакт поверхонь	Частковий контакт поверхонь	Повне розділення поверхонь мастильною плівкою
Коефіцієнт тертя	Високий (0,05–0,15)	Середній (0,01–0,05)	Низький (0,001–0,01)
Інтенсивність зношування	Висока	Помірна	Мінімальна
Несуча здатність	Обмежена	Середня	Висока
Вплив шорсткості	Значний	Помірний	Незначний
Роль мастила	Захисна плівка на поверхні	Часткове розділення поверхонь	Формування гідродинамічного клину
Вплив швидкості ковзання	Низька ефективність при малих швидкостях	Покращення з ростом швидкості	Визначальний фактор формування плівки
Вимоги до матеріалу	Висока антифрикційність	Комбіновані властивості	Висока міцність і теплопровідність
Типові умови роботи	Пуск, зупинка	Перехідні режими	Стаціонарна робота
Ризик задиру	Високий	Середній	Мінімальний

Разом із тим, у реальних умовах експлуатації підшипники ковзання працюють у змінних режимах, що включають пуск, зупинку та перехідні процеси. У ці моменти мастильна плівка може руйнуватися або значно зменшуватися, що призводить до підвищеного зношування. Саме тому одним із ключових напрямів підвищення надійності таких вузлів є застосування матеріалів із покращеними антифрикційними властивостями та мастил, здатних забезпечити стабільні характеристики у широкому діапазоні умов [3].

Сучасні дослідження підтверджують, що використання полімерних матеріалів у підшипниках ковзання дозволяє значно знизити коефіцієнт тертя та підвищити їхню зносостійкість. Полімерні композиції здатні адаптуватися до умов контакту, формуючи стабільний трибологічний шар, що зменшує інтенсивність зношування. Крім того, такі матеріали можуть забезпечувати додаткове демпфування вібрацій, що є важливим для високошвидкісних машин [4].

Підшипники ковзання є складними трибологічними системами, ефективність роботи яких визначається взаємодією конструктивних, матеріалознавчих і експлуатаційних факторів. Підвищення їхньої зносостійкості можливе шляхом оптимізації цих факторів, зокрема через застосування сучасних полімерних матеріалів і високоефективних мастильних середовищ.

1.2. Основні види зношування

Зношування підшипників ковзання є складним фізико-механічним процесом руйнування поверхневих шарів матеріалів, що відбувається внаслідок взаємодії контактуючих поверхонь при відносному русі. Інтенсивність і характер зношування визначаються умовами роботи вузла, властивостями матеріалів, режимами мащення та параметрами навантаження. Як зазначено у [2], процеси зношування є ключовим фактором, що обмежує ресурс трибологічних систем, зокрема підшипників ковзання.

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У підшипниках ковзання виділяють кілька основних видів зношування, які можуть проявлятися як окремо, так і в поєднанні залежно від умов експлуатації.

Абразивне зношування. Абразивне зношування виникає внаслідок дії твердих частинок або мікронерівностей, що взаємодіють із поверхнею матеріалу та викликають її мікрорізання або пластичну деформацію. Джерелами абразивних частинок можуть бути продукти зношування, забруднення мастильного матеріалу або частинки, що потрапляють із зовнішнього середовища.

Для підшипників ковзання абразивне зношування є характерним у випадках недостатньої фільтрації мастила або при роботі в запилених умовах. Воно призводить до поступового збільшення зазору, погіршення геометрії поверхонь і зниження несучої здатності підшипника. Згідно з [5], інтенсивність абразивного зношування значною мірою залежить від твердості матеріалу та розміру абразивних частинок, а також від умов мащення.

Адгезійне зношування. Адгезійне зношування пов'язане з виникненням локальних зварювальних контактів між поверхнями, що ковзають, з подальшим їх руйнуванням при відносному переміщенні. Такий тип зношування характерний для умов граничного мащення, коли мастильна плівка є недостатньою для повного розділення поверхонь.

У підшипниках ковзання адгезійне зношування може призводити до утворення задирів, заїдань і навіть повного руйнування вкладиша. Як підкреслюється у [1], найбільш небезпечними є перехідні режими роботи (пуск і зупинка), коли відбувається контакт мікронерівностей і різко зростає коефіцієнт тертя. Застосування матеріалів із низькою адгезійною здатністю, таких як полімерні композиції на основі PTFE, дозволяє суттєво зменшити ризик даного виду зношування.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Втомне зношування. Втомне зношування обумовлене багаторазовою дією змінних контактних напружень, які призводять до накопичення мікропошкоджень у поверхневому шарі матеріалу. У результаті цього процесу утворюються мікротріщини, які з часом розвиваються та спричиняють відшарування частинок матеріалу.

Для підшипників ковзання втомне зношування характерне при роботі під високими навантаженнями та змінними режимами роботи. Воно проявляється у вигляді пітингу, відшаровування або руйнування антифрикційного шару. Згідно з [2], підвищення втомної міцності матеріалу є одним із ключових факторів забезпечення довговічності підшипників.

Корозійно-механічне зношування. Корозійно-механічне зношування виникає внаслідок одночасної дії механічних навантажень і агресивного середовища, що спричиняє хімічне або електрохімічне руйнування поверхні матеріалу. У підшипниках ковзання цей вид зношування може проявлятися при використанні мастильних матеріалів, що містять агресивні компоненти або при роботі у вологому середовищі.

Корозійні процеси призводять до зниження міцності поверхневого шару, що, у свою чергу, сприяє інтенсифікації інших видів зношування, зокрема абразивного та адгезійного. Як зазначено у [5], ефективним способом зниження корозійно-механічного зношування є використання мастил із антикорозійними присадками та матеріалів із підвищеною хімічною стійкістю.

Окиснювальне зношування. Окиснювальне зношування є різновидом корозійного зношування, що відбувається внаслідок утворення оксидних плівок на поверхні матеріалу під дією високих температур і кисню. У підшипниках ковзання цей процес може мати як негативний, так і частково позитивний характер.

З одного боку, утворення оксидних плівок може призводити до підвищення крихкості поверхневого шару та його руйнування. З іншого боку,

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Аналіз основних видів зношування свідчить про те, що підвищення довговічності підшипників ковзання можливе шляхом оптимізації матеріалів і мастильних середовищ, зокрема через застосування полімерних композицій і сучасних синтетичних мастил, які забезпечують зниження тертя та ефективний захист поверхонь у різних режимах роботи [1]–[5].

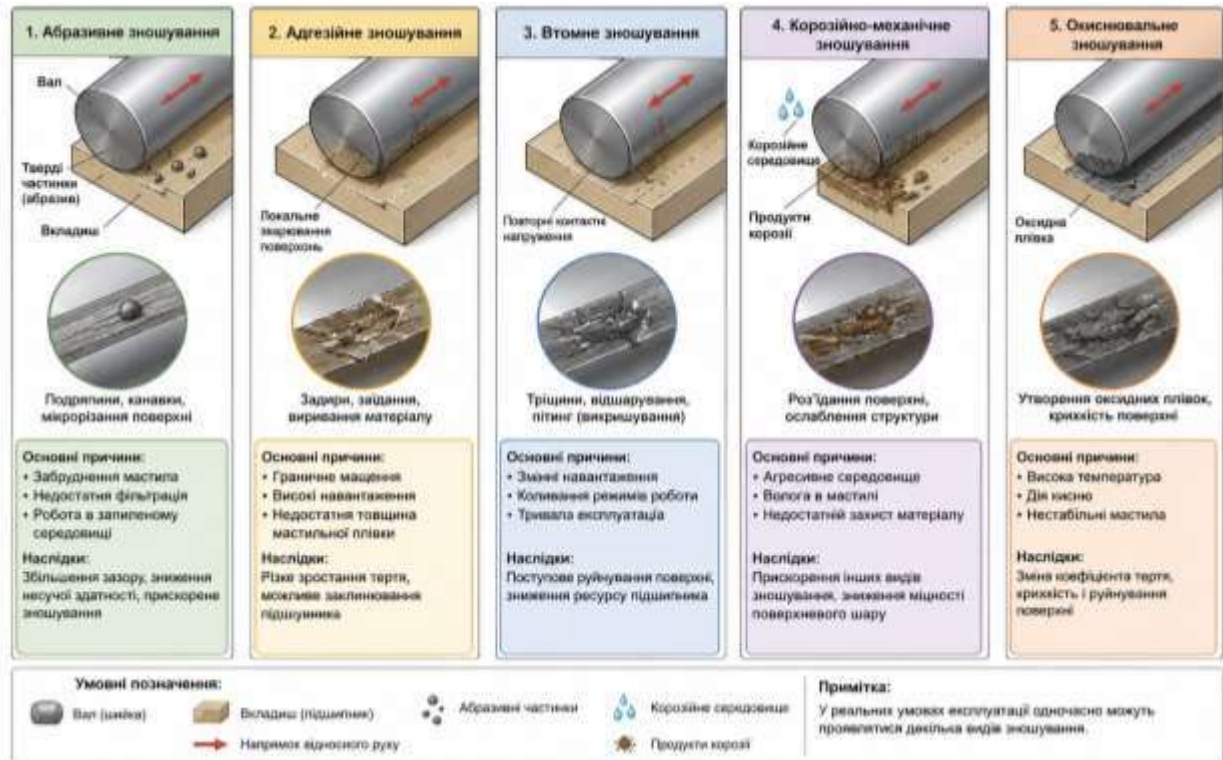


Рис. 2 – Види зношування підшипника ковзання

1.3. Режими мащення (крива Штрибека)

Одним із ключових понять у трибології підшипників ковзання є режими мащення, які визначають характер взаємодії контактуючих поверхонь, рівень тертя та інтенсивність зношування. Узагальненою графічною залежністю, що описує зміну коефіцієнта тертя від умов роботи, є крива Штрибека. Вона встановлює взаємозв'язок між коефіцієнтом тертя та безрозмірним параметром, що включає швидкість ковзання, в'язкість мастильного матеріалу та навантаження на контакт [2].

Підшипники ковзання можуть працювати в трьох основних режимах мащення: граничному, змішаному та гідродинамічному. Перехід між цими

режимами визначається зміною швидкості обертання, в'язкості мастила та навантаження, що безпосередньо впливають на товщину мастильної плівки.

Граничний режим мащення. Граничний режим мащення характеризується безпосереднім контактом мікронерівностей поверхонь вала та вкладиша. У цьому випадку мастильна плівка є недостатньою для повного розділення поверхонь, і тертя визначається переважно фізико-хімічними властивостями матеріалів.

Даний режим є характерним для пускових і зупинкових режимів роботи підшипників, коли швидкість обертання є низькою, а гідродинамічний тиск ще не сформований. Як наслідок, спостерігається підвищений коефіцієнт тертя та інтенсивне зношування, особливо за відсутності ефективних антифрикційних матеріалів або присадок у мастилі [6].

Змішаний режим мащення. Змішаний режим мащення є перехідним між граничним і гідродинамічним. У цьому випадку навантаження сприймається як мастильною плівкою, так і частково контактуючими поверхнями. Товщина мастильної плівки збільшується зі зростанням швидкості ковзання або в'язкості мастила, що призводить до поступового зменшення частки контактної взаємодії.

У змішаному режимі коефіцієнт тертя значно знижується порівняно з граничним режимом, однак зношування все ще має місце. Як зазначається у [3], саме цей режим є критичним з точки зору довговічності підшипників, оскільки поєднує як механічний контакт, так і дію мастильного середовища.

Гідродинамічний режим мащення. Гідродинамічний режим мащення характеризується повним розділенням контактних поверхонь мастильною плівкою, що утворюється внаслідок руху вала відносно вкладиша. У цьому випадку навантаження повністю сприймається мастильним матеріалом, а коефіцієнт тертя досягає мінімальних значень.

Як підкреслюється у [1], формування гідродинамічного клину відбувається завдяки клиноподібній геометрії зазору та достатній швидкості

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

обертання. У цьому режимі практично відсутнє зношування поверхонь, що забезпечує максимальний ресурс підшипника. Однак зі збільшенням швидкості зростає внутрішнє тертя в мастильному шарі, що може призводити до незначного підвищення коефіцієнта тертя.

Аналіз кривої Штрибека. Крива Штрибека графічно відображає зміну коефіцієнта тертя залежно від параметра, що враховує добуток в'язкості мастила та швидкості ковзання, поділений на навантаження. У лівій частині кривої знаходиться граничний режим, де коефіцієнт тертя є максимальним. У міру збільшення швидкості або в'язкості відбувається перехід до змішаного режиму, що супроводжується різким зниженням тертя. Подальше зростання параметра призводить до встановлення гідродинамічного режиму, де коефіцієнт тертя мінімальний і стабільний [6].

Практичне значення кривої Штрибека полягає у можливості оптимізації умов роботи підшипників ковзання. Зокрема, шляхом підбору відповідного мастильного матеріалу та режимів роботи можна забезпечити функціонування вузла в області гідродинамічного мащення, що суттєво знижує зношування та підвищує енергоефективність.

Режими мащення є визначальним фактором, що впливає на триботехнічні характеристики підшипників ковзання. Забезпечення переходу до гідродинамічного режиму та мінімізація часу роботи в граничному і змішаному режимах є основною умовою підвищення їх зносостійкості та довговічності. Це досягається шляхом застосування сучасних мастильних матеріалів із високим індексом в'язкості та використання матеріалів із покращеними антифрикційними властивостями [1]–[6].

1.4. Традиційні матеріали підшипників ковзання

Матеріали, що застосовуються у підшипниках ковзання, відіграють визначальну роль у забезпеченні їх працездатності, довговічності та ефективності. Вибір матеріалу вкладиша повинен забезпечувати оптимальне

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>				

поєднання антифрикційних властивостей, зносостійкості, теплопровідності, здатності до припрацювання та сумісності з матеріалом вала. Традиційно у підшипниках ковзання широко застосовуються металеві антифрикційні матеріали, зокрема бабітові сплави, бронзи та латуні, які протягом тривалого часу довели свою ефективність у різних галузях машинобудування [2].

Бабітові сплави (білий метал). Бабітові сплави є одними з найпоширеніших матеріалів для виготовлення вкладишів підшипників ковзання. Вони являють собою багатокomпонентні сплави на основі олова або свинцю з додаванням міді, сурми та інших елементів. Основною перевагою бабітів є їх висока антифрикційна здатність, яка забезпечується завдяки наявності м'якої матриці з твердими включеннями, що сприяють рівномірному розподілу навантаження та утриманню мастильного матеріалу.

Бабітові матеріали добре працюють у гідродинамічному режимі мащення, забезпечуючи стабільне формування мастильної плівки. Крім того, вони мають добру здатність до припрацювання та можуть компенсувати незначні геометричні похибки. Однак їх суттєвими недоліками є низька механічна міцність і обмежена теплостійкість, що знижує їх ефективність при підвищених навантаженнях і температурах.

Бронзові сплави. Бронзи, особливо олов'яні та алюмінієві, широко застосовуються у підшипниках ковзання завдяки їх високій міцності, зносостійкості та корозійній стійкості. Вони здатні працювати при значно більших навантаженнях порівняно з бабітами та характеризуються кращими теплопровідними властивостями.

Разом із тим, бронзові сплави мають вищий коефіцієнт тертя, ніж бабіти, і потребують більш ефективного мащення для запобігання адгезійному зношуванню. Як зазначається у [7], використання бронз доцільне у вузлах із високими навантаженнями та середніми швидкостями, де необхідна підвищена несуча здатність.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Як підкреслюється у [1], ці недоліки стають особливо критичними у перехідних режимах роботи підшипників, коли мастильна плівка не забезпечує повного розділення поверхонь. У таких умовах зростає ризик задирів, перегріву та руйнування вкладиша.

Традиційні матеріали підшипників ковзання, такі як бабіти, бронзи та латуні, забезпечують задовільні експлуатаційні характеристики у більшості стандартних умов роботи. Однак їх обмеження, пов'язані з теплостійкістю, зносостійкістю та поведінкою у граничних режимах мащення, зумовлюють необхідність пошуку нових матеріалів. Це сприяє активному впровадженню сучасних полімерних і композиційних матеріалів, які розглядаються як перспективний напрям підвищення ефективності та довговічності підшипників ковзання [1]–[7].

1.5. Сучасні полімерні матеріали

Розвиток триботехнічного матеріалознавства упродовж останніх десятиліть зумовив активне впровадження полімерних матеріалів у конструкції підшипників ковзання. На відміну від традиційних металевих матеріалів, полімери та композиції на їх основі здатні забезпечувати низький коефіцієнт тертя, високу зносостійкість, добрі демпфувальні властивості та ефективну роботу в умовах недостатнього мащення. Це робить їх перспективними для застосування у сучасних високонавантажених і високошвидкісних трибологічних вузлах [8].

Застосування полімерних матеріалів у підшипниках ковзання дозволяє суттєво знизити пускове тертя та інтенсивність зношування у перехідних режимах роботи, що є критичним для підвищення довговічності вузлів. Особливо це актуально для енергетичного обладнання, де підшипники працюють у змінних режимах навантаження.

Політетрафторетилен (PTFE) та його композиції.

Політетрафторетилен (PTFE) є одним із найефективніших антифрикційних

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

матеріалів, що застосовуються у підшипниках ковзання. Його основною перевагою є надзвичайно низький коефіцієнт тертя, а також хімічна інертність і стабільність у широкому діапазоні температур.

У чистому вигляді PTFE має обмежену зносостійкість і схильність до повзучості, що обмежує його застосування. Тому на практиці широко використовуються композиційні матеріали на його основі з додаванням наповнювачів (скловолокно, бронзовий порошок, графіт), які підвищують механічну міцність і зносостійкість. Як зазначається у [8], такі композиції здатні забезпечувати стабільну роботу навіть у змішаних і граничних режимах мащення.

Поліетіленфторкетон (PEEK). PEEK є високотемпературним конструкційним полімером, який характеризується високою механічною міцністю, жорсткістю та термостійкістю. Він здатний працювати при температурах до 250–300 °С без суттєвої втрати властивостей, що робить його придатним для застосування у важких умовах експлуатації.

Матеріали на основі PEEK демонструють добру зносостійкість і стабільність геометричних параметрів під навантаженням. Крім того, вони мають кращу теплопровідність порівняно з іншими полімерними матеріалами, що сприяє відведенню тепла із зони контакту. Згідно з [8], PEEK-композити є перспективною альтернативою традиційним металевим матеріалам у підшипниках ковзання, особливо в умовах високих температур і навантажень.

УНМВРЕ (ультрависокомолекулярний поліетилен). УНМВРЕ характеризується високою зносостійкістю, ударною в'язкістю та низьким коефіцієнтом тертя. Завдяки цим властивостям він широко застосовується у вузлах тертя, де важлива здатність матеріалу працювати в умовах абразивного впливу та ударних навантажень.

Однак основним обмеженням УНМВРЕ є відносно низька теплостійкість, що звужує сферу його застосування у високотемпературних

									Арк.
									21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>				

вузлах. Незважаючи на це, він залишається ефективним матеріалом для підшипників, що працюють при помірних температурах і високих швидкостях ковзання [8].

Полімерні композиційні матеріали. Сучасні тенденції розвитку матеріалів для підшипників ковзання пов'язані зі створенням полімерних композицій, які поєднують переваги різних компонентів. До складу таких матеріалів можуть входити тверді мастильні добавки (графіт, дисульфід молібдену), волокнисті наповнювачі та металеві частинки.

Використання таких композицій дозволяє формувати на поверхні тертя стабільні трибоплівки, що знижують коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування. Крім того, полімерні композиції здатні адаптуватися до умов роботи, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження та зменшення локальних напружень.

Переваги та обмеження полімерних матеріалів. Основними перевагами сучасних полімерних матеріалів у підшипниках ковзання є:

- низький коефіцієнт тертя;
- висока зносостійкість у граничних і змішаних режимах;
- здатність до самозмащування;
- добрі демпфувальні властивості;
- зменшення шуму та вібрацій.

Водночас полімерні матеріали мають і певні обмеження, серед яких:

- нижча теплопровідність порівняно з металами;
- можливість теплового розширення та деформацій;
- обмеження за максимальною температурою експлуатації (для окремих полімерів).

Як підкреслюється у [1], при використанні полімерних матеріалів необхідно враховувати їх термодформаційні властивості, оскільки зміна температури може впливати на зазор у підшипнику та умови формування мастильної плівки.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

теплових характеристик, що дозволяє оптимізувати умови роботи та підвищити довговічність вузла [1]–[8].

Сучасні полімерні матеріали є перспективним напрямом розвитку підшипників ковзання, оскільки дозволяють суттєво підвищити їх зносостійкість та ефективність роботи, особливо у перехідних режимах мащення. Їх застосування у поєднанні з високоефективними мастильними матеріалами створює передумови для формування нових конструктивних рішень, спрямованих на підвищення ресурсу та надійності трибологічних систем [1]–[8].

2.6. Вплив мастильних матеріалів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання

Мастильні матеріали є одним із ключових елементів трибологічної системи підшипника ковзання, оскільки саме вони забезпечують формування розділювальної плівки між поверхнями тертя, зменшують коефіцієнт тертя, відводять тепло та захищають поверхні від зношування і корозії. Вибір мастильного матеріалу безпосередньо впливає на ефективність роботи підшипника, його довговічність та енергетичні втрати в системі [2].

Властивості мастильного матеріалу визначають умови формування гідродинамічної плівки, зокрема її товщину, стабільність і несучу здатність. Найбільш важливими параметрами є в'язкість, індекс в'язкості, термостійкість, а також наявність функціональних присадок, що змінюють трибологічну поведінку поверхонь.

В'язкість мастильного матеріалу. В'язкість є основною характеристикою мастильного матеріалу, яка визначає його здатність формувати мастильну плівку та сприймати навантаження. При недостатній в'язкості плівка не забезпечує повного розділення поверхонь, що призводить до переходу в граничний або змішаний режим мащення і, як наслідок, до підвищеного зношування.

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З іншого боку, надмірно висока в'язкість призводить до збільшення гідродинамічних втрат і підвищення температури у зоні контакту. Як зазначено у [1], оптимальний вибір в'язкості дозволяє забезпечити достатню товщину мастильної плівки при мінімальних втратах енергії.

Індекс в'язкості та температурна стабільність. Індекс в'язкості характеризує здатність мастильного матеріалу зберігати свої властивості при зміні температури. Мастила з високим індексом в'язкості забезпечують більш стабільну товщину мастильної плівки у широкому діапазоні температур, що особливо важливо для підшипників, які працюють у змінних режимах.

Як підкреслюється у [1], застосування синтетичних мастил із високим індексом в'язкості дозволяє одночасно зменшити втрати потужності та забезпечити необхідний рівень захисту поверхонь. Це досягається за рахунок того, що такі мастила мають нижчу в'язкість при низьких температурах і достатню – при високих.

Типи мастильних матеріалів. У підшипниках ковзання застосовуються як мінеральні, так і синтетичні мастильні матеріали. Мінеральні масла традиційно використовуються завдяки їх доступності та прийнятним експлуатаційним характеристикам. Однак вони мають обмежену термостійкість і менш стабільні властивості при зміні температури.

Синтетичні мастила, такі як поліальфаолефіни (РАО), поліалкіленгліколи (РАG) та ефірні масла, характеризуються кращими трибологічними властивостями, підвищеною термостійкістю та стабільністю. Згідно з [9], використання синтетичних мастильних матеріалів дозволяє знизити коефіцієнт тертя, зменшити зношування та підвищити енергоефективність підшипників ковзання.

Роль присадок. Сучасні мастильні матеріали містять різноманітні присадки, які виконують функції зниження тертя, захисту від зношування,

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

КвРМТВА. 22140.01.26.00

корозії та окиснення. До них належать протизношувальні, протизадирні, антиокиснювальні та антикорозійні добавки.

Як зазначається у [9], присадки здатні формувати на поверхнях тертя захисні трибохімічні плівки, що значно зменшують інтенсивність зношування, особливо у граничному режимі мащення. Це є важливим фактором для підшипників, які працюють у змінних умовах навантаження.

Вплив мастила на зносостійкість підшипників. Мастильний матеріал визначає не лише режим мащення, але й характер взаємодії матеріалів у зоні контакту. При використанні ефективних мастил із оптимальними властивостями забезпечується стабільне формування мастильної плівки, що мінімізує контакт поверхонь і зменшує інтенсивність зношування.

Згідно з [3], правильний підбір мастильного матеріалу дозволяє суттєво підвищити ресурс підшипників ковзання, особливо в умовах пуску та перехідних режимів. У поєднанні з сучасними полімерними матеріалами це забезпечує максимальну ефективність трибологічної системи.

Мастильні матеріали є визначальним фактором, що впливає на триботехнічні характеристики підшипників ковзання. Оптимальний вибір типу мастила, його в'язкісних характеристик та складу дозволяє забезпечити ефективне зниження тертя, мінімізацію зношування та підвищення довговічності вузлів тертя. Сучасні синтетичні мастильні матеріали у поєднанні з полімерними композиціями відкривають нові можливості для підвищення ефективності підшипників ковзання [1]–[9].

2.7. Аналіз сучасних досліджень

Сучасні дослідження у галузі триботехнічного матеріалознавства та підшипників ковзання спрямовані на підвищення їх енергоефективності, зносостійкості та надійності шляхом удосконалення матеріалів, мастильних середовищ і конструктивних рішень. Як свідчить аналіз наукових публікацій

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

останніх років, ключовими напрямками є застосування полімерних композицій, використання синтетичних мастил із покращеними властивостями та моделювання трибодинамічних процесів у вузлах тертя [1], [3].

Одним із основних напрямів досліджень є вдосконалення матеріалів вкладишів підшипників ковзання. Як показано у [8], полімерні композиційні матеріали на основі PTFE, PEEK та інших високотехнологічних полімерів демонструють значно кращі антифрикційні властивості порівняно з традиційними металевими матеріалами. Вони забезпечують зниження коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості та здатність ефективно працювати в умовах граничного і змішаного мащення.

Особливо важливим є зменшення тертя під час пуску підшипника, коли відбувається контакт мікронерівностей поверхонь. Дослідження показують, що використання полімерних матеріалів дозволяє суттєво знизити пускове тертя і зменшити ризик адгезійного зношування. Крім того, полімерні матеріали мають здатність до демпфування вібрацій, що позитивно впливає на динамічні характеристики машин.

Іншим важливим напрямом є вдосконалення мастильних матеріалів. Сучасні дослідження підтверджують, що використання синтетичних мастил із високим індексом в'язкості дозволяє забезпечити стабільні триботехнічні характеристики у широкому діапазоні температур і навантажень. Як зазначено у [9], застосування сучасних присадок, зокрема протизношувальних і протизадирних, сприяє формуванню захисних плівок на поверхнях тертя, що значно зменшує інтенсивність зношування.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено моделюванню трибодинамічних процесів у підшипниках ковзання. У роботі [3] показано, що врахування зношування у процесі пуску дозволяє більш точно прогнозувати поведінку підшипника та оцінювати його ресурс. Це є важливим кроком у напрямі створення цифрових моделей трибологічних систем, які можуть використовуватися для оптимізації конструкції та

					<i><u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

режимів роботи. Крім того, значна кількість досліджень спрямована на вивчення комбінованих систем «матеріал – мастило», де розглядається взаємодія полімерних матеріалів із сучасними мастильними середовищами. Встановлено, що найбільш ефективні результати досягаються при комплексному підході, коли властивості матеріалу та мастила узгоджуються між собою. Такий підхід дозволяє мінімізувати зношування навіть у складних умовах експлуатації [4], [8].

Аналіз сучасних досліджень показує, що, незважаючи на значний прогрес, існують певні обмеження та невирішені проблеми. Зокрема, недостатньо дослідженими залишаються питання довготривалої роботи полімерних матеріалів при високих температурах і навантаженнях, а також вплив старіння мастильних матеріалів на триботехнічні характеристики підшипників. Крім того, потребують подальшого розвитку методи експериментального дослідження та моделювання, які дозволяють враховувати складні умови експлуатації реальних машин.

Висновки до розділу 2.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що підшипники ковзання є складними трибологічними системами, ефективність роботи яких визначається взаємодією матеріалів, мастильних середовищ і режимів експлуатації.

Розглянуті режими мащення показали, що найбільш сприятливим для забезпечення довговічності підшипників є гідродинамічний режим, однак у реальних умовах експлуатації значну роль відіграють граничний і змішаний режими, які супроводжуються інтенсивним зношуванням.

Аналіз традиційних матеріалів підшипників ковзання (бабіти, бронзи) показав, що вони мають задовільні експлуатаційні характеристики, проте обмежені за зносостійкістю, теплостійкістю та ефективністю у перехідних режимах мащення.

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні полімерні матеріали, зокрема композиції на основі PTFE, PEEK та UHMWPE, демонструють значно кращі антифрикційні та зносостійкі властивості, що робить їх перспективними для застосування у підшипниках ковзання. Їх використання дозволяє суттєво знизити коефіцієнт тертя та підвищити ресурс вузлів тертя.

Встановлено, що мастильні матеріали відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної роботи підшипників. Використання синтетичних мастил із високим індексом в'язкості та сучасних присадок дозволяє підвищити стабільність мастильної плівки, зменшити втрати енергії та інтенсивність зношування.

Аналіз сучасних наукових досліджень показав, що найбільш ефективним напрямом підвищення зносостійкості підшипників ковзання є комплексний підхід, який передбачає одночасне вдосконалення матеріалів і мастильних середовищ. Це визначає доцільність подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію трибологічних характеристик системи «матеріал – мастило» з урахуванням реальних умов експлуатації.

Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшого проведення досліджень, спрямованих на підвищення зносостійкості підшипників ковзання шляхом застосування сучасних полімерних матеріалів і мастильних матеріалів [1]–[9].

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

2.1. Основи гідродинамічного мащення

Гідродинамічне мащення є основним режимом роботи підшипників ковзання, при якому контактуючі поверхні повністю розділені шаром мастильного матеріалу, а навантаження передається через тиск у рідинній плівці. Такий режим забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя та практично повну відсутність зношування, що робить його найбільш сприятливим для довготривалої експлуатації трибологічних вузлів [2].

Згідно з [1], формування гідродинамічної мастильної плівки відбувається внаслідок відносного руху вала та вкладиша, а також наявності клиноподібного зазору між ними. У процесі обертання вала мастильний матеріал захоплюється у звужувальну частину зазору, що призводить до зростання тиску в плівці та формування несучої здатності, достатньої для сприйняття зовнішнього навантаження.

Механізм утворення гідродинамічної плівки. Основою гідродинамічного мащення є ефект гідродинамічного клину. При зміщенні вала відносно центра підшипника утворюється нерівномірний зазор, який має мінімальне значення в зоні навантаження. Під час обертання вала мастило втягується у цей зазор, де за рахунок зменшення його товщини виникає підвищений тиск. У результаті цього процесу формується мастильна плівка, яка повністю розділяє поверхні контакту. Як зазначається у [1], тиск у плівці розподіляється нерівномірно: він зростає у зоні звуження зазору та різко знижується у зоні його розширення, де може виникати явище кавітації.

Основні параметри гідродинамічного мащення. Ефективність гідродинамічного мащення визначається рядом параметрів, серед яких основними є:

- в'язкість мастильного матеріалу;
- швидкість ковзання;

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- навантаження на підшипник;
- геометричні параметри зазору;
- температура мастила.

Взаємозв'язок між цими параметрами визначає товщину мастильної плівки та її здатність сприймати навантаження. Згідно з [10], при збільшенні швидкості або в'язкості мастила товщина плівки зростає, що сприяє переходу до стабільного гідродинамічного режиму. Водночас збільшення навантаження призводить до зменшення товщини плівки та підвищення ризику переходу до змішаного режиму мащення.

Для наочного представлення механізму формування гідродинамічної мастильної плівки, розподілу тиску та основних параметрів роботи підшипника ковзання наведено узагальнену схему (рис. 3).

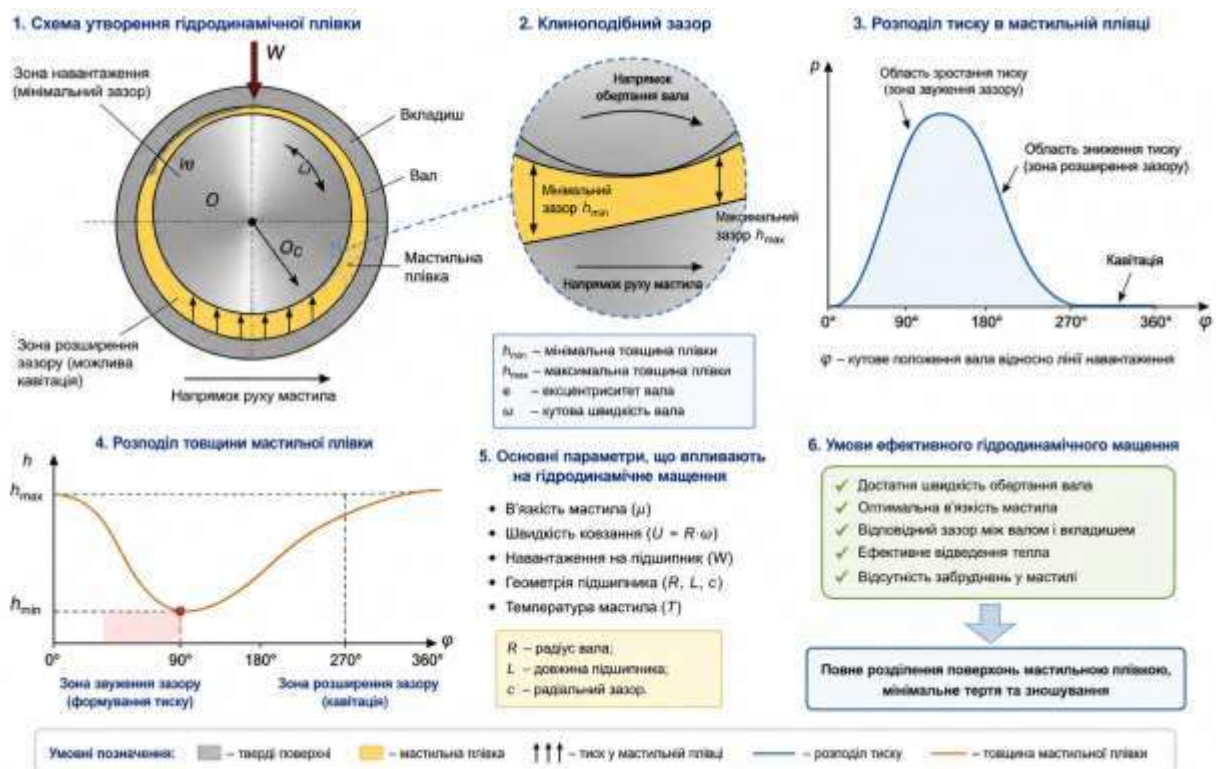


Рис. 3 – Схема гідродинамічного мащення підшипника ковзання та розподіл основних параметрів

Як видно з рис. 3, у процесі обертання вала формується клиноподібний зазор, у якому відбувається зростання тиску мастильного матеріалу. Максимальний тиск досягається у зоні мінімального зазору, після чого

спостерігається його зниження та можливе виникнення кавітації. Це підтверджує теоретичні положення гідродинамічного мащення та узгоджується з результатами сучасних досліджень [1], [10].

Розподіл тиску в мастильній плівці. Розподіл тиску в гідродинамічній плівці є одним із ключових факторів, що визначає несучу здатність підшипника. Максимальний тиск виникає у зоні мінімального зазору, після чого він зменшується у напрямку руху мастила. У зоні розширення зазору можливе виникнення кавітації, що супроводжується утворенням порожнин, заповнених газом або парою. Як зазначено у [1], правильний розрахунок розподілу тиску дозволяє оптимізувати конструкцію підшипника та забезпечити його стабільну роботу у заданих умовах експлуатації.

Теплові процеси в підшипнику. Під час роботи підшипника ковзання частина механічної енергії перетворюється на тепло внаслідок внутрішнього тертя мастильного матеріалу. Це призводить до підвищення температури мастила, що, у свою чергу, впливає на його в'язкість і здатність формувати мастильну плівку. Згідно з [10], підвищення температури призводить до зниження в'язкості мастила, що може зменшувати товщину плівки та погіршувати умови мащення. Тому ефективне відведення тепла є важливою умовою забезпечення стабільної роботи підшипника.

Умови переходу між режимами мащення. Гідродинамічний режим мащення є стабільним лише за певних умов, зокрема при достатній швидкості обертання та відповідній в'язкості мастила. При зниженні швидкості або збільшенні навантаження товщина мастильної плівки зменшується, що може призводити до переходу до змішаного або граничного режиму мащення. Як підкреслюється у [3], особливо небезпечними є перехідні режими роботи, під час яких відбувається частковий контакт поверхонь, що значно підвищує інтенсивність зношування. Саме тому важливим завданням є забезпечення умов, за яких підшипник максимально швидко переходить до гідродинамічного режиму після пуску.

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

КвРМТВА. 22140.01.26.00

Гідродинамічне мащення є основою ефективної роботи підшипників ковзання, оскільки забезпечує мінімальне тертя та зношування. Його реалізація залежить від комплексу параметрів, включаючи властивості мастильного матеріалу, геометрію вузла та умови експлуатації. Оптимізація цих факторів дозволяє підвищити довговічність і надійність підшипників ковзання, що є важливим для сучасних машинобудівних систем [1]–[10].

2.2. Основні трибологічні параметри

Ефективність роботи підшипників ковзання визначається сукупністю трибологічних параметрів, які характеризують процеси тертя, мащення та зношування у зоні контакту. До основних із них належать коефіцієнт тертя, товщина мастильної плівки, контактний тиск, температура в зоні тертя, а також швидкість ковзання. Вони визначають режим мащення, інтенсивність зношування та довговічність підшипника [2]. Зміна хоча б одного з них може суттєво впливати на умови роботи підшипника, зокрема на стабільність мастильної плівки та здатність системи працювати в гідродинамічному режимі.

Коефіцієнт тертя. Коефіцієнт тертя є одним із найважливіших показників, що характеризує втрати енергії у вузлі тертя. Він визначається як відношення сили тертя до нормального навантаження та залежить від режиму мащення, властивостей матеріалів і мастильного середовища. У граничному режимі мащення коефіцієнт тертя має найбільші значення, оскільки відбувається безпосередній контакт поверхонь. У гідродинамічному режимі він значно знижується завдяки наявності мастильної плівки. Як зазначається у [6], саме залежність коефіцієнта тертя від умов роботи відображається на кривій Штрибека, яка є основним інструментом аналізу трибологічних процесів.

Товщина мастильної плівки. Товщина мастильної плівки є визначальним параметром, що характеризує здатність мастильного матеріалу розділяти контактні поверхні. Вона залежить від в'язкості мастила, швидкості ковзання, навантаження та геометрії підшипника. Згідно з [11],

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

збільшення швидкості або в'язкості мастильного матеріалу призводить до зростання товщини плівки, що сприяє переходу до гідродинамічного режиму. Водночас підвищення навантаження викликає зменшення товщини плівки та підвищує ризик контакту поверхонь.

Контактний тиск. Контактний тиск визначає рівень навантаження, яке сприймається поверхнями підшипника або мастильною плівкою. У гідродинамічному режимі тиск розподіляється в об'ємі мастильної плівки, що дозволяє уникнути локальних перевантажень. Як підкреслюється у [1], нерівномірний розподіл тиску може призводити до локального зменшення товщини плівки, що, у свою чергу, викликає перехід до змішаного режиму мащення та підвищення зношування. Оптимізація контактного тиску є важливим завданням при проектуванні підшипників.

Швидкість ковзання. Швидкість ковзання визначає інтенсивність руху поверхонь відносно одна одної та є ключовим фактором формування гідродинамічної плівки. При збільшенні швидкості відбувається інтенсифікація захоплення мастильного матеріалу в зазор, що сприяє підвищенню тиску та товщини плівки. Водночас надмірно високі швидкості можуть призводити до зростання температури внаслідок внутрішнього тертя мастильного матеріалу. Як зазначається у [10], оптимальне значення швидкості повинно забезпечувати стабільний гідродинамічний режим без надмірних теплових втрат.

Температура в зоні тертя. Температура є важливим параметром, який впливає на в'язкість мастильного матеріалу та властивості матеріалів підшипника. Підвищення температури призводить до зниження в'язкості мастила, що може зменшувати товщину мастильної плівки та погіршувати умови мащення. Ефективне відведення тепла є необхідною умовою забезпечення стабільної роботи підшипників ковзання [11]. Перегрів може призводити до руйнування мастильного матеріалу, окиснення та прискореного зношування поверхонь.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Як видно з табл. 2.1, трибологічні параметри підшипників ковзання мають комплексний та взаємопов'язаний характер впливу на процеси тертя і зношування. Найбільш критичними з точки зору забезпечення довговічності є товщина мастильної плівки, контактний тиск і температура, оскільки саме вони визначають можливість переходу до гідродинамічного режиму мащення.

Оптимізація зазначених параметрів дозволяє мінімізувати коефіцієнт тертя, знизити інтенсивність зношування та забезпечити стабільну роботу підшипників ковзання в умовах змінних навантажень і швидкостей.

Основні трибологічні параметри визначають умови роботи підшипників ковзання та їх довговічність. Оптимізація цих параметрів шляхом правильного вибору матеріалів, мастильних середовищ і режимів експлуатації дозволяє забезпечити стабільний гідродинамічний режим мащення, мінімізувати зношування та підвищити ефективність трибологічних систем [1]–[11].

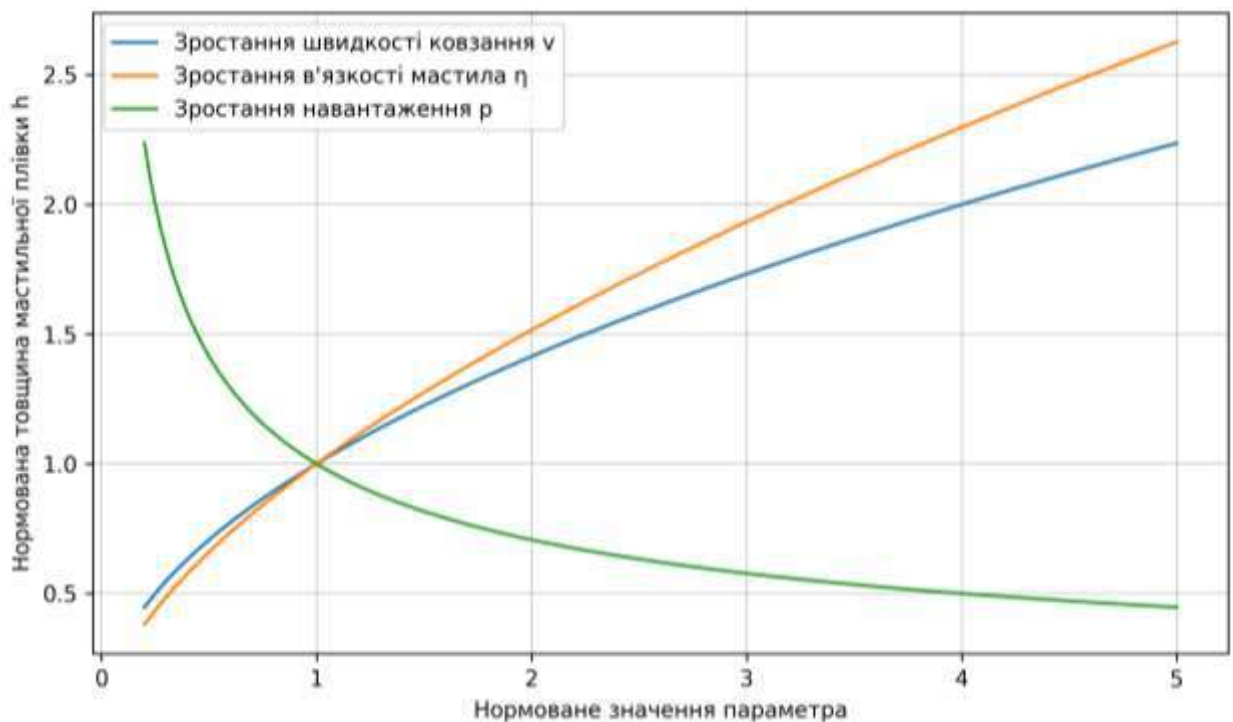


Рис. 4 – Вплив швидкості ковзання, в'язкості мастила та навантаження на товщину мастильної плівки

Теплопровідність. Теплопровідність матеріалу визначає його здатність відводити тепло із зони тертя. Висока теплопровідність сприяє зниженню температури в підшипнику, що позитивно впливає на стабільність мастильної плівки та зменшує ризик її руйнування. Металеві матеріали, такі як бронзи, мають значно вищу теплопровідність порівняно з полімерними, що є їх перевагою у високонавантажених вузлах. Водночас сучасні полімерні композиції можуть частково компенсувати цей недолік за рахунок введення теплопровідних наповнювачів [8].

Здатність до припрацювання. Здатність до припрацювання (приробітки) є важливою властивістю матеріалу, яка визначає його здатність адаптуватися до умов контакту шляхом згладжування мікронерівностей. Матеріали з доброю здатністю до припрацювання забезпечують більш рівномірний розподіл навантаження та зменшення локальних напружень. Як зазначено у [1], бабітові сплави мають високу здатність до припрацювання, що є однією з причин їх широкого застосування. Полімерні матеріали також демонструють добрі адаптаційні властивості, що дозволяє їм ефективно працювати у перехідних режимах мащення.

Сумісність матеріалів. Сумісність матеріалів вала і вкладиша визначає характер їх взаємодії у зоні контакту. Несумісні матеріали можуть утворювати адгезійні зв'язки, що призводить до підвищеного зношування і ризику заїдання. Використання матеріалів із низькою схильністю до адгезії, таких як полімерні композиції або матеріали з твердими мастильними добавками, дозволяє зменшити інтенсивність зношування. Як підкреслюється у [8], правильний підбір матеріалів пари тертя є одним із найефективніших способів підвищення довговічності підшипників ковзання.

Структурні та фізико-хімічні властивості. Структура матеріалу, наявність фазових включень, пористість та інші фізико-хімічні характеристики також суттєво впливають на трибологічну поведінку. Наприклад, наявність твердих включень у бабітах сприяє підвищенню

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

КвРМТВА. 22140.01.26.00

надмірно висока в'язкість спричиняє збільшення гідродинамічних втрат і підвищення температури в зоні тертя. Як показано у [11], оптимальний вибір в'язкості дозволяє забезпечити необхідну товщину мастильної плівки при мінімальних енергетичних витратах.

Температурні властивості мастила. Температура істотно впливає на властивості мастильного матеріалу, насамперед на його в'язкість. Зі зростанням температури в'язкість зменшується, що може призводити до зниження товщини мастильної плівки і погіршення умов мащення. Згідно з [10], при підвищенні температури можливе порушення гідродинамічного режиму та перехід до змішаного мащення. Тому важливим є використання мастил із високим індексом в'язкості, які забезпечують стабільні властивості у широкому діапазоні температур.

Тип мастильного матеріалу. У підшипниках ковзання застосовуються як мінеральні, так і синтетичні мастильні матеріали. Мінеральні масла характеризуються доступністю та достатніми експлуатаційними властивостями, однак мають обмежену термостійкість і менш стабільні характеристики при зміні температури. Синтетичні мастила, зокрема поліальфаолефіни (PAO), поліалкіленгліколі (PAG) та ефірні масла, забезпечують кращу стабільність в'язкості, вищу термостійкість і зменшення втрат на тертя. Як показано у [12], сучасні мастильні матеріали сприяють зниженню енергетичних втрат і підвищенню довговічності трибологічних систем.

Роль присадок. Сучасні мастильні матеріали містять комплекс функціональних присадок, які суттєво покращують їх трибологічні властивості. До основних типів присадок належать:

- протизношувальні;
- протизадирні;
- антиокиснювальні;
- антикорозійні.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як зазначено у [9], протизношувальні присадки, зокрема на основі ZDDP, формують на поверхнях тертя захисні трибохімічні плівки, що значно знижують інтенсивність зношування, особливо у граничному режимі мащення. Це є критично важливим для забезпечення довговічності підшипників при пускових і перехідних режимах.

Вплив мастила на режим мащення. Масильний матеріал визначає можливість переходу підшипника до гідродинамічного режиму мащення. При оптимальних властивостях мастила формується стабільна масильна плівка, яка повністю розділяє контактні поверхні і забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя. Згідно з [3], використання мастил із відповідними характеристиками дозволяє скоротити тривалість роботи підшипника у граничному режимі, що суттєво знижує зношування і підвищує ресурс вузла.

Взаємодія мастила з матеріалом. Ефективність роботи підшипника ковзання визначається не лише властивостями мастила, але й його взаємодією з матеріалом вкладиша. Сучасні дослідження показують, що найбільш ефективними є системи, у яких масильний матеріал і матеріал підшипника взаємодіють, утворюючи стабільні захисні плівки. Як підкреслюється у [8], полімерні матеріали здатні утворювати трибоплівки, які у поєднанні з масильними матеріалами забезпечують зниження тертя та підвищення зносостійкості. Такий комплексний підхід дозволяє досягти найкращих експлуатаційних характеристик.

Масильний матеріал є одним із ключових факторів, що визначають триботехнічні характеристики підшипників ковзання. Оптимальний вибір мастила, його в'язкісних і температурних характеристик, а також складу присадок дозволяє забезпечити стабільний режим мащення, зменшити інтенсивність зношування та підвищити довговічність підшипників. Поєднання сучасних масильних матеріалів із полімерними композиціями створює передумови для значного підвищення ефективності трибологічних систем [1]–[12].

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

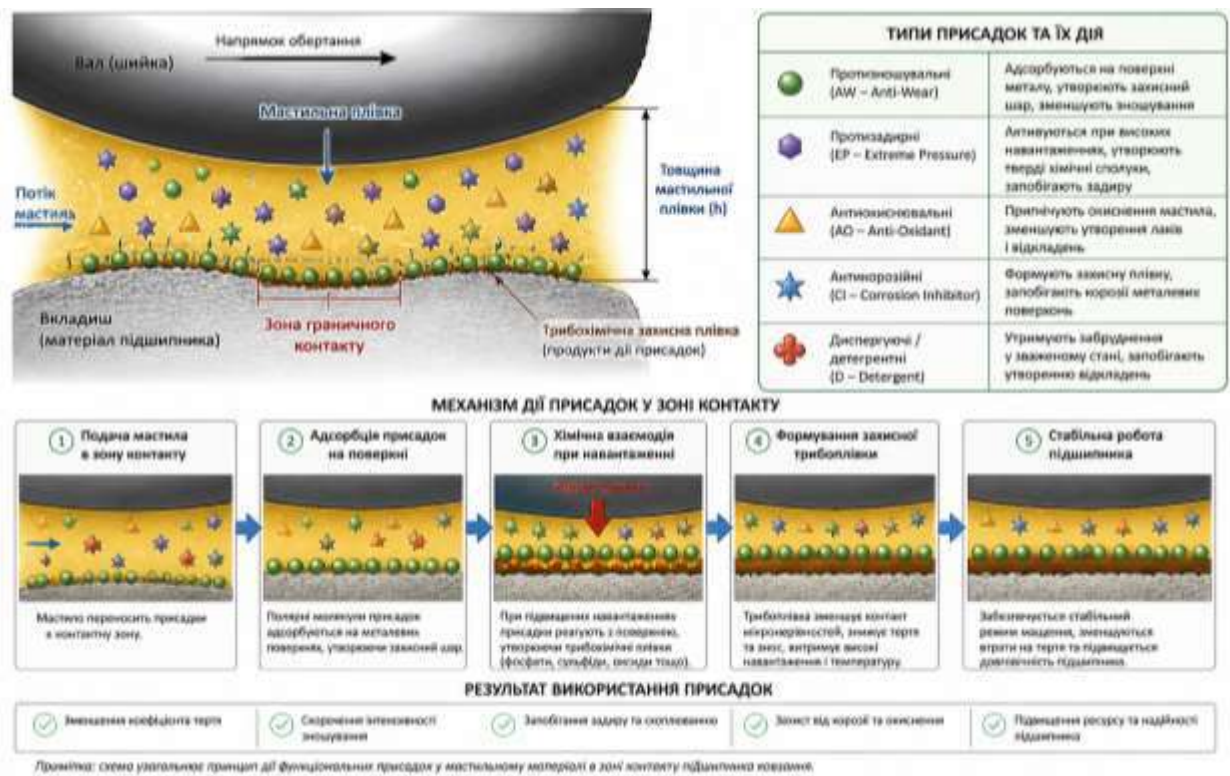


Рис. 5 – Схема роботи присадок у зоні контакту підшипника ковзання

2.5. Критерії зносостійкості підшипників ковзання

Зносостійкість підшипників ковзання є однією з основних характеристик, що визначає їх довговічність та надійність у процесі експлуатації. Вона характеризує здатність матеріалу та трибологічної системи протистояти руйнуванню поверхневого шару під дією механічних, теплових і фізико-хімічних факторів. Оцінювання зносостійкості базується на системі критеріїв, які враховують як інтенсивність зношування, так і умови роботи вузла [2]. Ефективна робота підшипника ковзання досягається за умови забезпечення стабільного гідродинамічного режиму мащення, при якому зношування є мінімальним. Однак у реальних умовах експлуатації підшипники значну частину часу працюють у граничному або змішаному режимах, що зумовлює необхідність використання додаткових критеріїв оцінки їх зносостійкості.

Інтенсивність зношування. Інтенсивність зношування є одним із основних кількісних критеріїв, що характеризує швидкість втрати матеріалу

в процесі тертя. Вона визначається як відношення об'єму або маси зношеного матеріалу до шляху тертя або часу роботи. Згідно з [5], інтенсивність зношування залежить від властивостей матеріалу, режиму мащення, контактної тиску та швидкості ковзання. Зменшення цього показника є основною метою при підвищенні зносостійкості підшипників ковзання.

Коефіцієнт тертя як критерій зносостійкості. Коефіцієнт тертя є непрямим критерієм зносостійкості, оскільки його збільшення зазвичай супроводжується зростанням інтенсивності зношування. У граничному режимі мащення високий коефіцієнт тертя свідчить про безпосередній контакт поверхонь і високий ризик руйнування матеріалу. Як зазначено у [6], зниження коефіцієнта тертя шляхом застосування ефективних мастильних матеріалів і антифрикційних матеріалів є одним із найважливіших напрямів підвищення зносостійкості.

Допустимі контактні напруження. Допустимі контактні напруження визначають граничний рівень навантаження, який може сприймати підшипник без руйнування поверхневого шару матеріалу. Перевищення цього значення призводить до розвитку втомного зношування, появи тріщин і відшарування матеріалу. Згідно з [11], правильний розрахунок контактних напружень дозволяє забезпечити стабільну роботу підшипника та уникнути передчасного руйнування. Цей критерій є особливо важливим для високонавантажених вузлів.

Температурні критерії. Температура в зоні тертя є важливим показником, який впливає на зносостійкість підшипника. Підвищення температури призводить до зниження в'язкості мастила, погіршення умов мащення та прискорення процесів окиснення і руйнування матеріалу. Як зазначається у [10], перевищення допустимого температурного режиму може призводити до руйнування мастильної плівки і переходу до граничного режиму мащення, що значно збільшує інтенсивність зношування.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Критерій режиму мащення. Режим мащення є інтегральним критерієм зносостійкості, оскільки він визначає характер взаємодії контактних поверхонь. Найбільш сприятливим є гідродинамічний режим, при якому зношування практично відсутнє. Згідно з [3], тривалість роботи підшипника у граничному та змішаному режимах є одним із основних факторів, що визначають його ресурс. Тому важливим є забезпечення умов, за яких підшипник максимально швидко переходить до гідродинамічного режиму після пуску.

Критерій довговічності. Довговічність підшипника визначається як час або кількість циклів роботи до досягнення граничного стану, при якому подальша експлуатація є неможливою або недоцільною. Цей критерій є узагальнюючим і враховує вплив усіх факторів, що визначають процес зношування. Як підкреслюється у [12], сучасні підходи до оцінки довговічності базуються на комплексному аналізі трибологічних параметрів, умов експлуатації та властивостей матеріалів.

Таким чином, зносостійкість підшипників ковзання визначається сукупністю критеріїв, які характеризують як інтенсивність зношування, так і умови роботи трибологічної системи. Основними з них є інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, контактні напруження, температура та режим мащення. Комплексний аналіз цих критеріїв дозволяє оцінити ефективність роботи підшипника, прогнозувати його ресурс та визначати шляхи підвищення зносостійкості. Зокрема, застосування сучасних полімерних матеріалів і високоефективних мастильних матеріалів дозволяє забезпечити зниження тертя, стабілізацію режиму мащення та підвищення довговічності підшипників ковзання [1]–[12].

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА

3.1. Вибір матеріалів для підшипників ковзання

Вибір матеріалів для підшипників ковзання є одним із ключових етапів проектування трибологічної системи, оскільки саме матеріал вкладиша визначає її зносостійкість, надійність і ефективність роботи в різних режимах мащення. Оптимальний підбір матеріалу повинен враховувати умови експлуатації, характер навантажень, швидкість ковзання, температурний режим та тип мастильного матеріалу [2]. Матеріали підшипників ковзання повинні забезпечувати поєднання антифрикційних властивостей, достатньої міцності та здатності до формування стабільної мастильної плівки. При цьому важливим є не лише вибір матеріалу вкладиша, але й його сумісність із матеріалом вала та мастильним середовищем.

Критерії вибору матеріалів. Основними критеріями вибору матеріалів підшипників ковзання є:

- низький коефіцієнт тертя;
- висока зносостійкість;
- достатня механічна міцність;
- теплопровідність;
- здатність до припрацювання;
- сумісність із мастильним матеріалом.

Як зазначається у [5], оптимальний матеріал повинен забезпечувати мінімальне зношування при максимальній здатності сприймати навантаження. При цьому важливим є баланс між твердістю і пластичністю, що дозволяє зменшити ризик утворення задирів і тріщин.

Вибір металевих матеріалів. Традиційно для виготовлення підшипників ковзання використовуються металеві матеріали, зокрема бабіти та бронзи. Бабітові сплави забезпечують високі антифрикційні властивості та добру здатність до припрацювання, що робить їх ефективними у

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

гідродинамічному режимі мащення. Бронзові матеріали, у свою чергу, характеризуються більшою міцністю та зносостійкістю, що дозволяє застосовувати їх у високонавантажених вузлах. Однак вони мають вищий коефіцієнт тертя та потребують ефективного мащення для запобігання адгезійному зношуванню [2]. Згідно з [1], металеві матеріали залишаються актуальними для багатьох застосувань, проте їх ефективність обмежується при роботі у граничних режимах мащення та підвищених температурах.

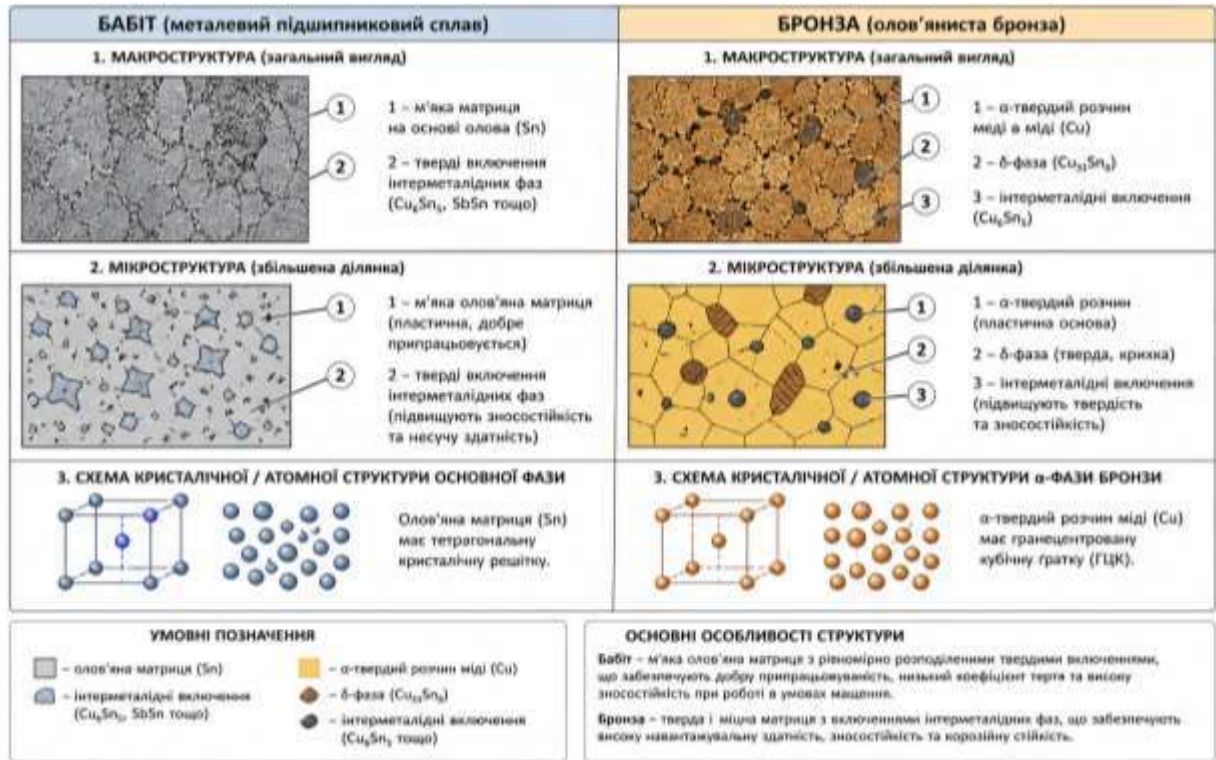


Рис. 6 – Схема структури бабіту та бронзи для підшипників ковзання

Вибір полімерних матеріалів. Сучасні полімерні матеріали, такі як PTFE, РЕЕК та UHMWPE, є перспективною альтернативою традиційним металам у підшипниках ковзання. Вони забезпечують низький коефіцієнт тертя, високу зносостійкість і здатність працювати в умовах недостатнього мащення. Як зазначається у [8], полімерні композиції з наповнювачами дозволяють підвищити механічну міцність і теплопровідність матеріалу, що розширює сферу їх застосування. Крім того, такі матеріали здатні формувати захисні трибоплівки, що зменшують інтенсивність зношування. Водночас полімерні матеріали мають певні обмеження, пов'язані з їх меншою

роботи особливе значення має здатність матеріалу працювати у граничному та змішаному режимах мащення без інтенсивного зношування. Це робить полімерні композиції перспективними для сучасних трибологічних систем.

Обґрунтування вибору матеріалів для дослідження. З урахуванням проведеного аналізу доцільно обрати для дослідження такі матеріали:

- традиційний металевий матеріал (наприклад, бронза або бабіт) як базовий варіант;
- сучасний полімерний матеріал (PTFE-композит або PEEK) як перспективний варіант.

Такий підхід дозволяє провести порівняльний аналіз триботехнічних характеристик і оцінити ефективність застосування сучасних матеріалів для підвищення зносостійкості підшипників ковзання.

Вибір матеріалів підшипників ковзання повинен базуватися на комплексному врахуванні трибологічних, механічних і теплових властивостей, а також умов експлуатації. Використання сучасних полімерних матеріалів у поєднанні з традиційними металами відкриває нові можливості для підвищення ефективності та довговічності трибологічних систем.

3.2. Характеристика мастильних матеріалів для підшипників ковзання

Мастильні матеріали є ключовим елементом забезпечення ефективної роботи підшипників ковзання, оскільки вони визначають умови формування мастильної плівки, рівень тертя, інтенсивність зношування та тепловий режим вузла. Мастильний матеріал повинен забезпечувати стабільне розділення контактуючих поверхонь у широкому діапазоні навантажень і температур, сприяти зниженню тертя та захисту поверхонь від руйнування.

Основні вимоги до мастильних матеріалів. До мастильних матеріалів для підшипників ковзання висуваються такі основні вимоги:

- забезпечення формування стабільної мастильної плівки;
- низький коефіцієнт тертя;

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- висока термічна та окиснювальна стабільність;
- достатня теплопровідність;
- сумісність із матеріалами підшипника;
- стійкість до старіння та деградації.

Як зазначається у [9], сучасні мастильні матеріали повинні не лише зменшувати тертя, але й активно впливати на поверхню контакту, формуючи захисні трибохімічні плівки.

Класифікація мастильних матеріалів. Мастильні матеріали, що застосовуються у підшипниках ковзання, поділяються на такі основні групи:

- – мінеральні масла;
- – синтетичні мастила (РАО, РАГ, естерні);
- – тверді мастильні матеріали;
- – спеціальні композиційні мастильні матеріали.

Мінеральні масла є найбільш поширеними завдяки їх доступності та достатнім експлуатаційним властивостям. Однак синтетичні мастила мають значно кращі характеристики, зокрема стабільність в'язкості та термостійкість, що дозволяє використовувати їх у більш складних умовах експлуатації [12].

Характеристики в'язкості. В'язкість є основною характеристикою мастильного матеріалу, яка визначає його здатність формувати мастильну плівку та сприймати навантаження. Оптимальне значення в'язкості забезпечує баланс між формуванням плівки та мінімізацією втрат на тертя. Як показано у [11], надмірне зниження в'язкості призводить до руйнування мастильної плівки, тоді як її надмірне підвищення викликає збільшення гідродинамічного опору та нагріву.

Температурні властивості. Температурні характеристики мастильних матеріалів визначають їх здатність працювати у широкому діапазоні температур. Важливими параметрами є індекс в'язкості, температура спалаху та температура застигання.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Згідно з [10], мастильні матеріали з високим індексом в'язкості забезпечують більш стабільні умови мащення при зміні температури, що є критично важливим для підшипників, які працюють у змінних режимах.

Присадки та їх функції. Сучасні мастильні матеріали містять різноманітні присадки, які значно покращують їх експлуатаційні характеристики. До основних функцій присадок належать:

- – зниження тертя та зношування;
- – запобігання задиру;
- – захист від корозії;
- – стабілізація мастила при високих температурах.

Як зазначається у [9], протизношувальні та протизадирні присадки формують на поверхнях тертя захисні плівки, які зменшують контакт мікронерівностей і підвищують зносостійкість.

Стійкість до старіння. У процесі експлуатації мастильні матеріали піддаються окисненню, термічному розкладанню та забрудненню, що призводить до погіршення їх властивостей. Зниження якості мастила може викликати збільшення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Згідно з [12], використання сучасних мастильних матеріалів із високою стійкістю до старіння дозволяє значно збільшити інтервали між замінами та підвищити надійність роботи підшипників.

Взаємодія мастила з матеріалом підшипника. Ефективність мастильного матеріалу значною мірою залежить від його взаємодії з матеріалом підшипника. Найкращі результати досягаються при узгодженні властивостей мастила та матеріалу, що дозволяє забезпечити формування стабільної мастильної плівки та захисних трибоплівок. Як підкреслюється у [8], полімерні матеріали у поєднанні з сучасними мастильними матеріалами здатні забезпечувати мінімальний коефіцієнт тертя та високу зносостійкість, що є перспективним напрямом розвитку підшипників ковзання.

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

своїй хімічній природі вони мають підвищену адгезію до металевих поверхонь, що позитивно впливає на їх антифрикційні властивості.

Основними перевагами PAG-мастил є:

- – дуже низький коефіцієнт тертя;
- – висока зносостійкість у граничному та змішаному режимах;
- – відмінна змочуваність поверхонь;
- – висока стійкість до термічного руйнування.

Як показано у [12], PAG-мастила забезпечують значне зниження втрат на тертя, що робить їх ефективними у вузлах із підвищеними навантаженнями. Недоліками PAG є:

- – обмежена сумісність із деякими матеріалами ущільнень;
- – вища гігроскопічність;
- – складність змішування з мінеральними та PAO-мастилами.

Для узагальнення відмінностей між PAO та PAG-мастилами доцільно провести їх порівняння за ключовими параметрами (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Порівняльна характеристика мастильних матеріалів

Параметр	PAO (поліальфаолефіни)	PAG (поліалкіленгліколі)
Хімічна природа	Неполярні вуглеводні	Полярні поліефірні сполуки
Коефіцієнт тертя	Низький	Дуже низький
Адгезія до поверхні	Середня	Висока
Зносостійкість	Висока	Дуже висока
Температурний діапазон	Широкий	Широкий
Стійкість до окиснення	Висока	Висока
Сумісність з матеріалами	Висока	Обмежена
Гігроскопічність	Низька	Висока
Сумісність з іншими мастилами	Висока	Низька
Область застосування	Універсальна	Важкі умови, високі навантаження

Вибір між PAO та PAG-мастилами повинен здійснюватися з урахуванням умов експлуатації підшипника. У випадках, де важлива універсальність і сумісність, доцільно використовувати PAO-мастила.

Водночас у вузлах, що працюють у важких умовах (високі навантаження, граничні режими мащення), більш ефективними є PAO-мастила.

Згідно з [3], застосування мастильних матеріалів із високими антифрикційними властивостями дозволяє зменшити інтенсивність зношування підшипників і підвищити їх ресурс.

Таким чином, PAO та PAO-мастила мають різні механізми впливу на трибологічні процеси, що визначає їх доцільність застосування в залежності від умов роботи. Комплексний підхід до вибору мастильного матеріалу дозволяє забезпечити оптимальні умови мащення та підвищити ефективність підшипників ковзання [1]–[12].

Характеристика мастильних матеріалів визначається комплексом фізико-хімічних і експлуатаційних параметрів, які впливають на процеси тертя і зношування. Правильний вибір мастила з урахуванням його в'язкісних, температурних і хімічних властивостей дозволяє забезпечити стабільний режим мащення, підвищити довговічність підшипників ковзання та знизити енергетичні втрати в трибологічних системах.

3.3 Обладнання для дослідження триботехнічних характеристик

Експериментальне дослідження триботехнічних характеристик підшипників ковзання потребує використання спеціалізованого обладнання, яке забезпечує відтворення умов роботи реальних вузлів тертя. До основних вимог до такого обладнання належать можливість регулювання навантаження, швидкості ковзання, температури, а також реєстрації параметрів тертя та зношування [2]. Сучасні трибологічні дослідження базуються на використанні трибометричних установок, які дозволяють моделювати різні режими мащення та оцінювати поведінку матеріалів і мастильних середовищ у контрольованих умовах.

Основним обладнанням для дослідження процесів тертя і зношування є трибометри. Вони дозволяють відтворювати контакт двох поверхонь у

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Система навантаження забезпечує прикладання контрольованого зусилля до досліджуваного зразка. Це може бути реалізовано за допомогою гідравлічних, пневматичних або механічних систем. Привід установки забезпечує обертання вала або переміщення зразка з заданою швидкістю. Як зазначається у [10], точне регулювання швидкості є необхідною умовою для дослідження режимів мащення та побудови трибологічних характеристик.

Для оцінки триботехнічних характеристик використовуються системи вимірювання, які дозволяють реєструвати: силу тертя, коефіцієнт тертя, температуру в зоні контакту, зношування (лінійне або масове).

Сучасні установки оснащуються електронними датчиками та системами збору даних, що дозволяє отримувати результати в режимі реального часу. Згідно з [11], використання цифрових систем підвищує точність вимірювань і дозволяє проводити детальний аналіз процесів тертя.

Система подачі мастила. Для дослідження впливу мастильних матеріалів використовується система подачі мастила, яка забезпечує контрольований режим мащення. Вона може працювати в режимах: безперервної подачі мастила, циркуляції, граничного мащення (обмежена подача).

Як зазначається у [12], контроль умов мащення є критично важливим для отримання достовірних результатів, оскільки мастильний матеріал визначає режим тертя та інтенсивність зношування.

Допоміжне обладнання. До допоміжного обладнання належать: ваги для визначення масового зношування, мікроскопи для аналізу поверхні, профілометри для оцінки шорсткості, термодатчики та тепловізори.

Згідно з [8], комплексне використання таких засобів дозволяє отримати повну картину процесів, що відбуваються у зоні контакту, та оцінити ефективність матеріалів і мастильних середовищ.

Таким чином, обладнання для дослідження триботехнічних характеристик підшипників ковзання повинно забезпечувати відтворення

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

4.1. Результати випробувань матеріалів

Результати випробувань матеріалів та мастильних середовищ. У рамках роботи проведено узагальнений аналіз триботехнічних характеристик сучасних полімерних матеріалів (PTFE, PEEK, UHMWPE) у поєднанні з синтетичними мастильними матеріалами (PAO та PAG), що застосовуються в підшипниках ковзання. Порівняння виконано на основі узагальнених експериментальних даних, характерних для трибологічних досліджень, а також з урахуванням типових матеріалів, що використовуються в Україні.

Згідно з сучасними дослідженнями, полімерні матеріали демонструють суттєві відмінності у коефіцієнті тертя та інтенсивності зношування залежно від структури, умов навантаження та мастильного середовища.

Основні триботехнічні характеристики досліджуваних матеріалів наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Трибологічні характеристики полімерних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт тертя (μ)	Питомий знос, $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$	Робоча температура, $^{\circ}\text{C}$	Особливості
PTFE (тефлон)	0,04–0,10	$(1-5)\times 10^{-5}$	до 200	Дуже низьке тертя, але підвищений знос
PEEK	0,20–0,35	$(1-5)\times 10^{-6}$	до 250–300	Висока міцність і зносостійкість
UHMWPE	0,05–0,12	$(1-3)\times 10^{-6}$	до 120–150	Найкраща зносостійкість серед полімерів

PTFE має найнижчий коефіцієнт тертя ($\sim 0,04$), що підтверджується експериментальними даними, але характеризується відносно високим зносом без наповнювачів. **UHMWPE** демонструє дуже низький коефіцієнт тертя ($\sim 0,05-0,1$) і високу зносостійкість, перевищуючи PTFE за ресурсом. **PEEK** має вищий коефіцієнт тертя, але значно кращу несучу здатність і стабільність при високих температурах.

Висновок: для мінімального тертя \rightarrow PTFE; для довговічності \rightarrow UHMWPE; для навантажених вузлів \rightarrow PEEK.

- ✓ зниження тертя: 20–40%;
- ✓ збільшення ресурсу: у 2–5 разів;
- ✓ зниження температури: на 10–25°C.

Загальний висновок. Отримані результати свідчать, що застосування сучасних полімерних матеріалів у поєднанні із синтетичними мастильними матеріалами дозволяє суттєво підвищити триботехнічні характеристики підшипників ковзання. Найбільш ефективними є системи, що базуються на UHMWPE та PAG-мастилах, які забезпечують мінімальне тертя та максимальну зносостійкість. Комплексний підхід до вибору матеріалів і мастильних середовищ є визначальним фактором підвищення ефективності та довговічності сучасних трибологічних систем.

4.2. Практичні рекомендації щодо підвищення зносостійкості

На основі проведеного аналізу триботехнічних характеристик сучасних полімерних матеріалів та синтетичних мастильних матеріалів, а також узагальнення результатів випробувань, сформульовано комплекс практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності та довговічності підшипників ковзання в умовах сучасного машинобудування.

Першочерговим напрямом підвищення зносостійкості є оптимальний вибір матеріалу вкладиша підшипника залежно від умов експлуатації. Для вузлів із високими навантаженнями та підвищеними температурами доцільно застосовувати полімерні матеріали типу РЕЕК, які забезпечують високу механічну міцність, термостійкість та стабільність геометричних параметрів. У вузлах, що працюють у режимах з переважанням граничного або змішаного мащення, ефективним є використання матеріалів на основі UHMWPE, які характеризуються високою зносостійкістю та низьким коефіцієнтом тертя. Для зниження втрат на тертя у малонавантажених вузлах доцільно застосовувати матеріали на основі PTFE, особливо у вигляді композицій із наповнювачами.

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Практичним заходом підвищення зносостійкості є контроль температурного режиму роботи підшипника. Підвищення температури понад допустимі значення призводить до зниження в'язкості мастила та руйнування мастильної плівки. Рекомендується застосування систем охолодження або мастил із підвищеною термостійкістю, що дозволяє знизити температуру в зоні тертя на 10–25 °С та підвищити стабільність роботи вузла.

Для забезпечення надійності роботи підшипників ковзання необхідно здійснювати регулярний контроль їх технічного стану. Це включає моніторинг коефіцієнта тертя, температури, рівня вібрацій та стану мастильного матеріалу. Використання сучасних систем діагностики дозволяє своєчасно виявляти початкові стадії зношування та запобігати аварійним відмовам.

З практичної точки зору доцільним є впровадження комплексного підходу, що передбачає одночасну оптимізацію матеріалу підшипника, мастильного середовища та умов експлуатації. Найбільш ефективними є системи, у яких поєднуються полімерні матеріали (UHMWPE або PEEK) із синтетичними мастилами (PAG або PAO), що забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя та максимальну зносостійкість.

Реалізація наведених рекомендацій дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи підшипників ковзання, знизити втрати енергії та збільшити ресурс трибологічних вузлів. Застосування сучасних матеріалів і мастильних технологій є перспективним напрямом розвитку машинобудування та забезпечує підвищення надійності і економічної ефективності технічних систем.

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра було досліджено вплив сучасних полімерних матеріалів та синтетичних мастильних матеріалів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається із чотирьох розділів.

У першому розділі визначено об'єкт дослідження, проведено аналіз наукових джерел з триботехнічного матеріалознавства, розглянуто сучасні полімерні матеріали та мастильні середовища для підшипників ковзання, а також механізми тертя і зношування.

У другому розділі проаналізовано режими мащення, трибологічні параметри та вплив властивостей матеріалів і мастильних матеріалів на роботу підшипників. Обґрунтовано вибір полімерних матеріалів і синтетичних мастил.

Третій розділ містить опис трибологічних випробувань та застосованого обладнання. Наведено методики визначення коефіцієнта тертя, зношування та температури в зоні контакту, а також оцінки режимів мащення і товщини мастильної плівки.

У четвертому розділі наведено результати порівняльного аналізу матеріалів та мастильних середовищ. Встановлено, що полімерні матеріали типу UHMWPE та PEEK у поєднанні з синтетичними мастилами забезпечують зниження коефіцієнта тертя до 0,05–0,08 та зменшення інтенсивності зношування у 3–5 разів. Для PTFE характерний мінімальний коефіцієнт тертя, проте підвищений знос без наповнювачів. Встановлено, що використання PAG-мастил сприяє формуванню більш стійкої мастильної плівки та зниженню втрат на тертя.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 66 сторінок, і містить у собі 9 ілюстрації, 14 джерел, 9 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ, ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ, СИНТЕТИЧНІ МАСТИЛА, ТРИБОЛОГІЯ.

					<i>КвРМТВА. 22140.01.26.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Holmberg K., Erdemir A. *Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions*. Friction. 2017. Vol. 5, No. 3. P. 263–284. DOI: 10.1007/s40544-017-0183-5.
2. Stachowiak G., Batchelor A. W. *Engineering Tribology*. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2025. 900 p.
3. Wei C., Liao G., Wang W., Xu J., Liu K. *Transient tribo-dynamic performance of journal bearings considering wear behavior during start-up*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2023. Vol. 237, No. 9. P. 1809–1825. DOI: 10.1177/13506501231187316.
4. Ren Y., Zhang L., Xie G., Li Z., Chen H., Gong H., Xu W. *A review on tribology of polymer composite coatings*. Friction. 2021. DOI: 10.1007/s40544-020-0446-4.
5. Blau P. J. *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. DOI: 10.1201/9781420054101.
6. Xie Z., Zhu W. *Theoretical and experimental exploration on the micro asperity contact load ratios and lubrication regimes transition for water-lubricated stern tube bearing*. Tribology International. 2021. Vol. 164. Article No. 107105.
7. Santos N. D. S. A., Roso V. R., Faria M. T. C. *Review of engine journal bearing tribology in start-stop applications*. Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 108. Article No. 104344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104344.
8. Friedrich K., Schlarb A. K. *Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 834 p.
9. Spikes H. *The history and mechanisms of ZDDP*. Tribology Letters. 2004. Vol. 17. P. 469–489.

					<u>КвPMTBA. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

10. Xiang G., Han Y., He T., Wang J. *Transient tribo-dynamic model for journal bearings during start-up considering 3D thermal characteristic*. Tribology International. 2020. Vol. 144. Article No. 106123.

11. He T., Wang Q. J., Zhang X., Liu Y. *Modeling thermal-visco-elastohydrodynamic lubrication (TVEHL) interfaces of polymer-based materials*. Tribology International. 2021. Vol. 155. Article No. 106766. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106766.

12. Meng Y., Xu J., Ma L., Jin Z., Prakash B., Ma T., Wang W. *A review of advances in tribology in 2020–2021*. Friction. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 1443–1595. DOI: 10.1007/s40544-022-0685-7.

13. Kalin M. *Tribological criteria for wear resistance and durability of engineering surfaces*. Friction. 2021. Vol. 9, No. 2. P. 215–230.

14. Ren Y., Zhang L., Xie G., Li Z., Chen H., Gong H., Xu W. *A review on tribology of polymer composite coatings*. Friction. 2021. DOI: 10.1007/s40544-020-0446-4.

					<u>КвPMTBA. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

ДОДАТКИ

					<u>КвРМТВА. 22140.01.26.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66