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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Вплив структури та складу поверхневих шарів на зносостійкість підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння»

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

Шифр ***КвРМТВА. 22147.01.26.00***

Виконав студент *4* курсу група *МТВА-22-1* Підпис *Максим ЧЕБАН*

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
10.06.2026
Дата Підпис *Олександр ДИХА*

Хмельницький, 2026

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

Диха О.В.
15.04 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Чебану Максиму Олександровичу
Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Вплив структури та складу поверхневих шарів на зносостійкість підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння.**
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) Аналіз конструкції та умов роботи підшипників ковзання ДВЗ.
2) Дослідження впливу структури (зернистість, фази, включення) на знос.
3) Аналіз технології формування поверхневих шарів.
4) Вплив складу матеріалу на коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування.
4 *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 *17.04 2026 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	*Аналіз конструкції та умов роботи підшипників ковзання ДВЗ*	*28.05.2026*	*вик*
2	*Дослідження впливу структури (зернистість, фази, включення) на знос*	*4.06.2026*	*вик*
3	*Аналіз технології формування поверхневих шарів.*	*8.06.2026*	*вик*
4	*Вплив складу матеріалу на коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування*	*12.06.2026*	*вик*
5	*Висновки*	*14.06.2026*	*вик*
6	*Захист роботи*	*16.06.2026*	

Студент Чебан *Максим ЧЕБАН*

Керівник роботи _____ *Павло КАПЛУН*

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВА-22-1: Чебан М.О.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему **«Вплив структури та складу поверхневих шарів на зносостійкість підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння»** складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 17 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 10 сторінках. Роботу викладено на 62 сторінці, з них 59 сторінок основного тексту, на яких розміщено 34 рисунків і 13 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена досліджено вплив структури та складу поверхневих шарів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння.

Проведено аналіз наукових джерел з триботехнічного матеріалознавства, розглянуто сучасні матеріали та покриття для підшипників ковзання, а також механізми тертя і зношування.

Особливу увагу приділено дослідженню складу, структури та технології отримання поверхневих шарів, зокрема методи лазерного наплавлення, PVD/CVD-покриттів та дифузійного зміцнення. Обґрунтовано вибір матеріалів – бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками (графіт, MoS_2) як антифрикційного матеріалу та сталі 40Х як контртіла.

У роботі наведено результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Встановлено, що бронза БрО10Ф1 з твердими мастильними фазами забезпечує стабільний коефіцієнт тертя, низький рівень зношування та формування захисного трибологічного шару. Для сталі 40Х характерні підвищений коефіцієнт тертя, розвиток абразивного зношування та утворення борозен. Встановлено, що формування гідродинамічного режиму мащення відбувається при швидкостях понад 4 об/с..

У результаті виконаної роботи обґрунтовано що підвищення зносостійкості підшипників ковзання досягається шляхом оптимізації структури матеріалу та застосуванням комплексного підходу до вибору матеріалів дозволяє значно підвищити ефективність роботи вузлів тертя.

Ключові слова: ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ, ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, МАСТИЛЬНА ПЛІВКА, ЛАЗЕРНЕ НАПЛАВЛЕННЯ, SEM-АНАЛІЗ, ГІДРОДИНАМІЧНЕ МАЩЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВЗ	8
1.1 Загальна характеристика підшипників ковзання.	8
1.2 Умови роботи підшипників ковзання у двигунах.	10
1.3 Режими мащення та їх вплив на зношування.	10
1.4 Основні механізми зношування.	12
2 СУЧАСНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПОКРИТТЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ	16
2.1 Характеристика матеріалів підшипників ковзання.	16
2.2 Традиційні матеріали підшипників ковзання.	17
2.3 Сучасні композиційні матеріали	17
2.4 Покриття та методи модифікації поверхні	18
2.5 Вплив структури покриттів на зносостійкість	23
3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ	28
3.1 Загальна характеристика методів дослідження.	28
3.2 Методи дослідження мікроструктури.	28
3.3 Визначення механічних властивостей.	31
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	34
4.1 Вплив структури матеріалів на триботехнічні властивості	34
4.2 Аналіз процесів зношування досліджуваних матеріалів.	38
4.3 Аналіз поверхні.	48
4.4 Твердість матеріалів.	55
4.5 Режим мащення	56
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ	62

ВСТУП

Сучасний розвиток транспортного машинобудування та підвищення вимог до екологічності і енергоефективності двигунів внутрішнього згоряння обумовлюють необхідність удосконалення їх основних вузлів, зокрема підшипників ковзання. Умови експлуатації таких вузлів суттєво ускладняються внаслідок впровадження систем типу «start-stop», які призводять до багаторазових циклів запуску та зупинки двигуна. Це, у свою чергу, збільшує тривалість роботи підшипників у режимах граничного та змішаного мащення, за яких відбувається безпосередній контакт поверхонь тертя і різко зростає інтенсивність зношування.

Підшипники ковзання широко застосовуються у вузлах двигунів завдяки їх високій надійності, здатності працювати при значних навантаженнях і відносно низькій вартості. У гідродинамічному режимі між поверхнями формується масляна плівка, яка повністю розділяє контактуючі елементи та забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя. Проте при зниженні швидкості обертання або в момент пуску та зупинки товщина мастильного шару зменшується, що призводить до контакту мікронерівностей поверхонь, локальних перевантажень і розвитку зношування. У таких умовах визначальним фактором довговічності підшипника стають структура та склад поверхневих шарів матеріалу.

Традиційні матеріали підшипників ковзання часто містять свинець, який забезпечує високі антифрикційні властивості та здатність до вбудовування твердих частинок. Однак сучасні екологічні вимоги обмежують використання свинцю, що стимулює пошук альтернативних матеріалів із покращеними триботехнічними характеристиками. Перспективними напрямами є застосування алюмінієвих сплавів, нікелевих композицій, а також матеріалів із твердими мастилами, які здатні знижувати коефіцієнт тертя та підвищувати зносостійкість навіть у складних режимах роботи [1, 2].

Особливу роль у формуванні експлуатаційних властивостей підшипників відіграє мікроструктура поверхневого шару: розмір зерен, наявність фазових складових, дисперсність зміцнюючих включень, пористість та характер розподілу компонентів. Саме ці параметри визначають механічні характеристики матеріалу, його здатність протистояти зношуванню, утримувати мастило та адаптуватися до умов тертя. Крім того, значний вплив має технологія формування поверхневих шарів, зокрема лазерне наплавлення, яке забезпечує отримання тонких функціональних покриттів із мінімальною зоною термічного впливу та контрольованим складом [1].

Актуальність теми полягає у необхідності підвищення ресурсу підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння за рахунок оптимізації структури та складу їх поверхневих шарів, а також у пошуку нових матеріалів, здатних ефективно працювати в умовах змінних навантажень і недостатнього мащення. Дослідження взаємозв'язку між структурними характеристиками матеріалу та його триботехнічними властивостями є важливим завданням сучасного матеріалознавства і трибології.

Метою роботи є дослідження впливу структури та складу поверхневих шарів на зносостійкість підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати умови роботи та режими мащення підшипників ковзання;
- дослідити сучасні матеріали та покриття, що застосовуються для підвищення їх зносостійкості;
- встановити вплив мікроструктури та фазового складу на триботехнічні характеристики;
- розглянути технології формування поверхневих шарів і їх вплив на властивості матеріалів;

- провести аналіз факторів, що визначають інтенсивність зношування в умовах граничного та змішаного мащення;
- сформулювати рекомендації щодо підвищення довговічності підшипників ковзання.

Об’єктом дослідження є підшипники ковзання двигунів внутрішнього згоряння.

Предметом дослідження є структура, склад та властивості поверхневих шарів матеріалів підшипників ковзання, що визначають їх зносостійкість.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання встановлених закономірностей для вибору матеріалів та технологій зміцнення поверхневих шарів підшипників ковзання з метою підвищення їх ресурсу та надійності роботи в реальних умовах експлуатації.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

1.1. Загальна характеристика підшипників ковзання

Підшипники ковзання є одним із найпоширеніших типів опор обертових деталей у сучасних двигунах внутрішнього згоряння. Вони застосовуються у вузлах колінчастого вала, розподільчого механізму, балансирних валів та інших елементах, що працюють в умовах значних навантажень і змінних швидкостей. Основною функцією підшипників ковзання є забезпечення надійного обертання валів із мінімальними втратами на тертя та високою довговічністю.

Конструктивно підшипник ковзання являє собою пару тертя «вал – вкладиш», у якій навантаження передається через шар мастильного матеріалу. У більшості випадків застосовуються роз'ємні підшипники, що складаються з двох піввкладишів, які встановлюються у корпусі. Така конструкція забезпечує зручність монтажу та обслуговування, а також дозволяє реалізувати оптимальні умови підведення мастила.

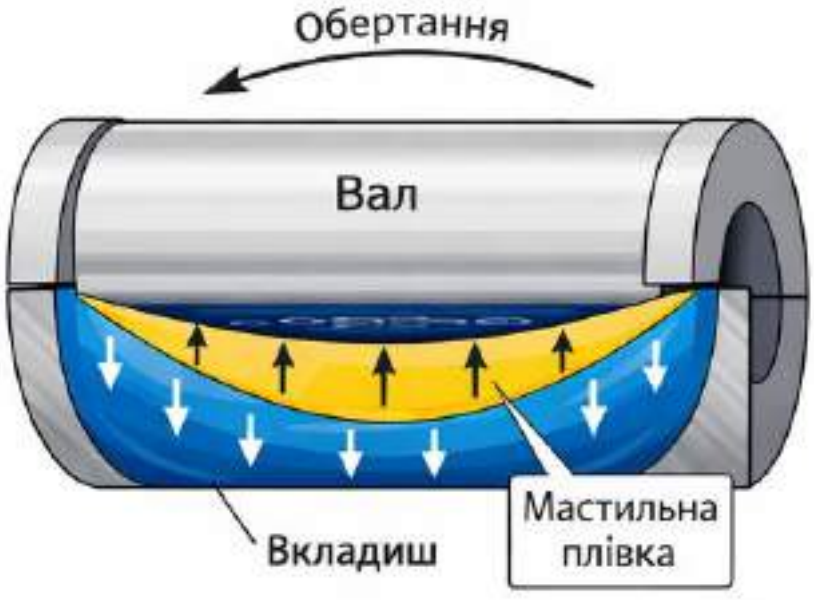

Рис. 1 – Схема роботи гідродинамічного підшипника ковзання

Сучасні підшипники ковзання, як правило, мають багатошарову структуру. Основою є сталевий каркас, що забезпечує механічну міцність і жорсткість конструкції. На нього наноситься антифрикційний шар, виготовлений з алюмінієвих або мідних сплавів, який безпосередньо контактує з валом. У деяких конструкціях додатково застосовуються покривні шари, що підвищують зносостійкість, зменшують коефіцієнт тертя та покращують приробку поверхонь.

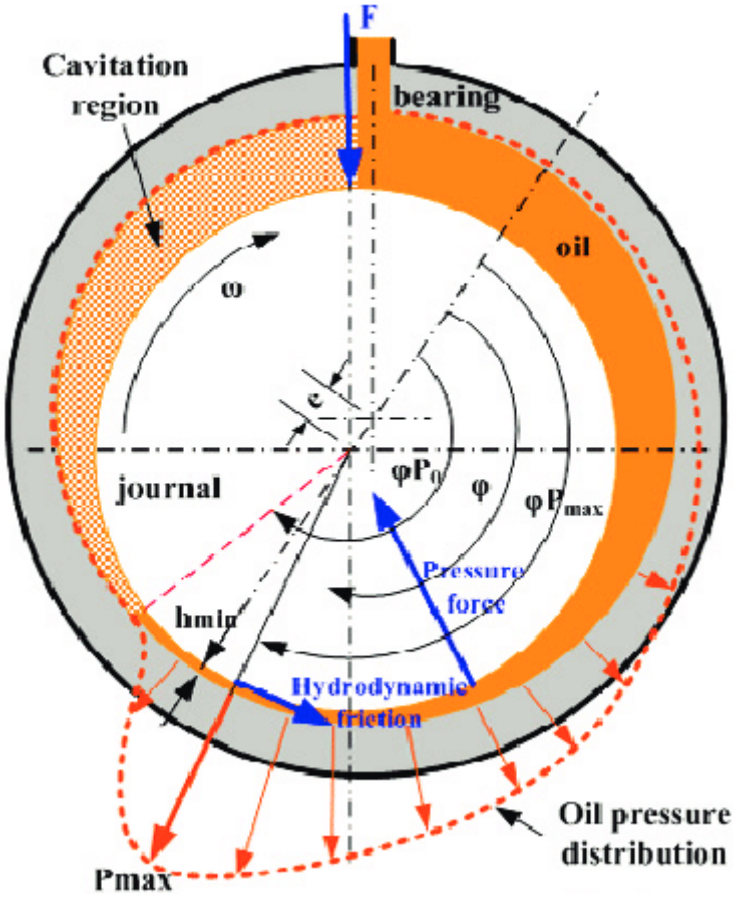

Рис. 2 – Схема розподілу сил у гідродинамічному підшипнику ковзання

Вибір матеріалу підшипника визначається сукупністю вимог, серед яких основними є: висока зносостійкість, низький коефіцієнт тертя, здатність до вбудовування твердих частинок, хороша теплопровідність та сумісність із матеріалом вала. Особливо важливою є здатність матеріалу адаптуватися до умов тертя, що досягається завдяки оптимальному поєднанню твердих і м’яких фаз у структурі.

1.2. Умови роботи підшипників ковзання у двигунах

Підшипники ковзання в двигунах внутрішнього згоряння працюють у складних умовах, що характеризуються дією змінних навантажень, високих температур і значних швидкостей ковзання. У процесі роботи двигуна навантаження на підшипники змінюється циклічно, що пов’язано з роботою кривошипно-шатунного механізму. Максимальні навантаження виникають у моменти згоряння паливно-повітряної суміші, коли тиск газів у циліндрі досягає пікових значень.

Важливим фактором є також вплив температури. Під час роботи двигуна температура мастила та деталей може досягати 80–120 °C, що призводить до зміни в’язкості мастильного матеріалу та умов формування мастильної плівки. Зниження в’язкості негативно впливає на несучу здатність мастильного шару, що підвищує ймовірність переходу до змішаного або граничного мащення.

Особливу проблему становлять режими запуску та зупинки двигуна. У цей період швидкість обертання є недостатньою для формування повноцінної гідродинамічної плівки, що призводить до контакту поверхонь і інтенсивного зношування. Впровадження систем «start-stop» значно збільшує кількість таких циклів, що суттєво знижує ресурс підшипників [3].

Крім того, на роботу підшипників впливають сторонні частинки, що потрапляють у мастило, а також похибки геометрії поверхонь. Наявність твердих частинок може призводити до абразивного зношування, тоді як нерівності поверхонь спричиняють локальні концентрації напружень.

1.3. Режими мащення та їх вплив на зношування

Робота підшипників ковзання визначається умовами мащення, які характеризують ступінь розділення контактуючих поверхонь мастильним шаром. Виділяють кілька основних режимів мащення: граничний, змішаний та гідродинамічний.

У граничному режимі між поверхнями існує лише тонкий адсорбційний шар мастила, який не забезпечує повного розділення поверхонь. Контакт відбувається між мікронерівностями, що призводить до високого коефіцієнта тертя і інтенсивного зношування. Цей режим характерний для запуску та зупинки двигуна.

Змішаний режим мащення є перехідним і характеризується частковим розділенням поверхонь. Частина навантаження сприймається мастильною плівкою, а частина – безпосереднім контактом поверхонь. У цьому режимі спостерігається зниження тертя порівняно з граничним режимом, однак зношування все ще має значний рівень.

Гідродинамічний режим є найбільш сприятливим. У цьому випадку між поверхнями формується суцільна мастильна плівка, яка повністю розділяє їх і сприймає навантаження. Коефіцієнт тертя при цьому мінімальний, а зношування практично відсутнє. Формування такого режиму залежить від швидкості обертання, в’язкості мастила та геометричних параметрів підшипника.

Перехід між режимами мащення описується кривою Стрібека, яка відображає залежність коефіцієнта тертя від умов роботи. Аналіз цієї залежності дозволяє оцінити ефективність роботи підшипника та визначити критичні режими, що призводять до зношування.

Рис. 3 – Крива Стрібека

Крива Стрібека відображає залежність коефіцієнта тертя від умов мащення і дозволяє виділити режими роботи підшипника. У граничному режимі спостерігається високий рівень тертя, тоді як у гідродинамічному режимі контакт поверхонь відсутній, а зношування мінімальне.

Сучасні дослідження також показують, що при низьких швидкостях мастильна плівка не формується повністю, що призводить до переходу у змішаний режим і підвищеного зношування [4].

1.4. Основні механізми зношування

Зношування підшипників ковзання є складним процесом, що визначається взаємодією механічних, фізичних і хімічних факторів. Основні механізми:

- адгезійне (зварювання мікронерівностей);
- абразивне (дія твердих частинок);
- втомне (циклічні навантаження).

Дослідження показують, що зношування підшипників у реальних умовах є комплексним процесом, який залежить від режиму мащення, навантаження та структури матеріалу [5].

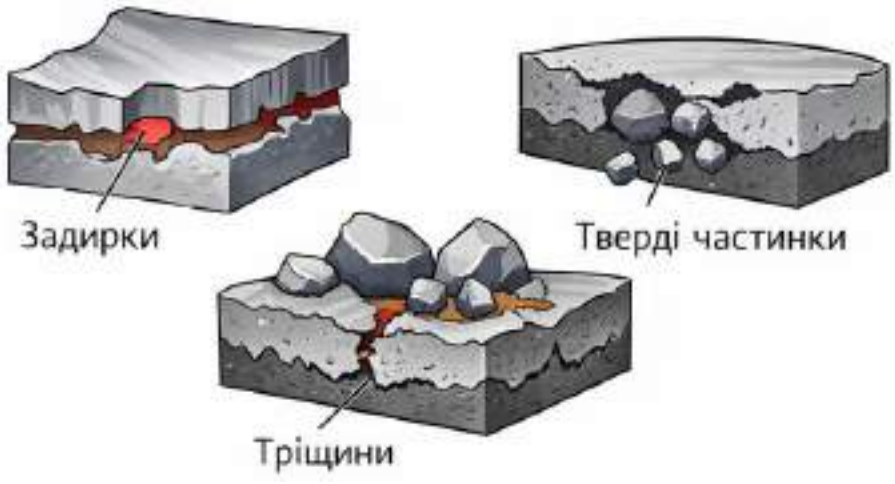

Рис. 4 – Причини зношування

Адгезійне зношування виникає внаслідок локального зварювання мікронерівностей контактуючих поверхонь з подальшим їх руйнуванням. Цей

процес характерний для граничного режиму мащення і супроводжується підвищеним тертям і температурою.

Абразивне зношування пов’язане з дією твердих частинок, які потрапляють у зону контакту. Такі частинки можуть бути продуктами зношування або сторонніми домішками. Вони спричиняють мікрорізання поверхні, що призводить до поступового видалення матеріалу.

Втомне зношування виникає внаслідок циклічного навантаження і проявляється у вигляді утворення тріщин та відшарування матеріалу. Цей механізм є характерним для підшипників, що працюють при високих навантаженнях протягом тривалого часу.

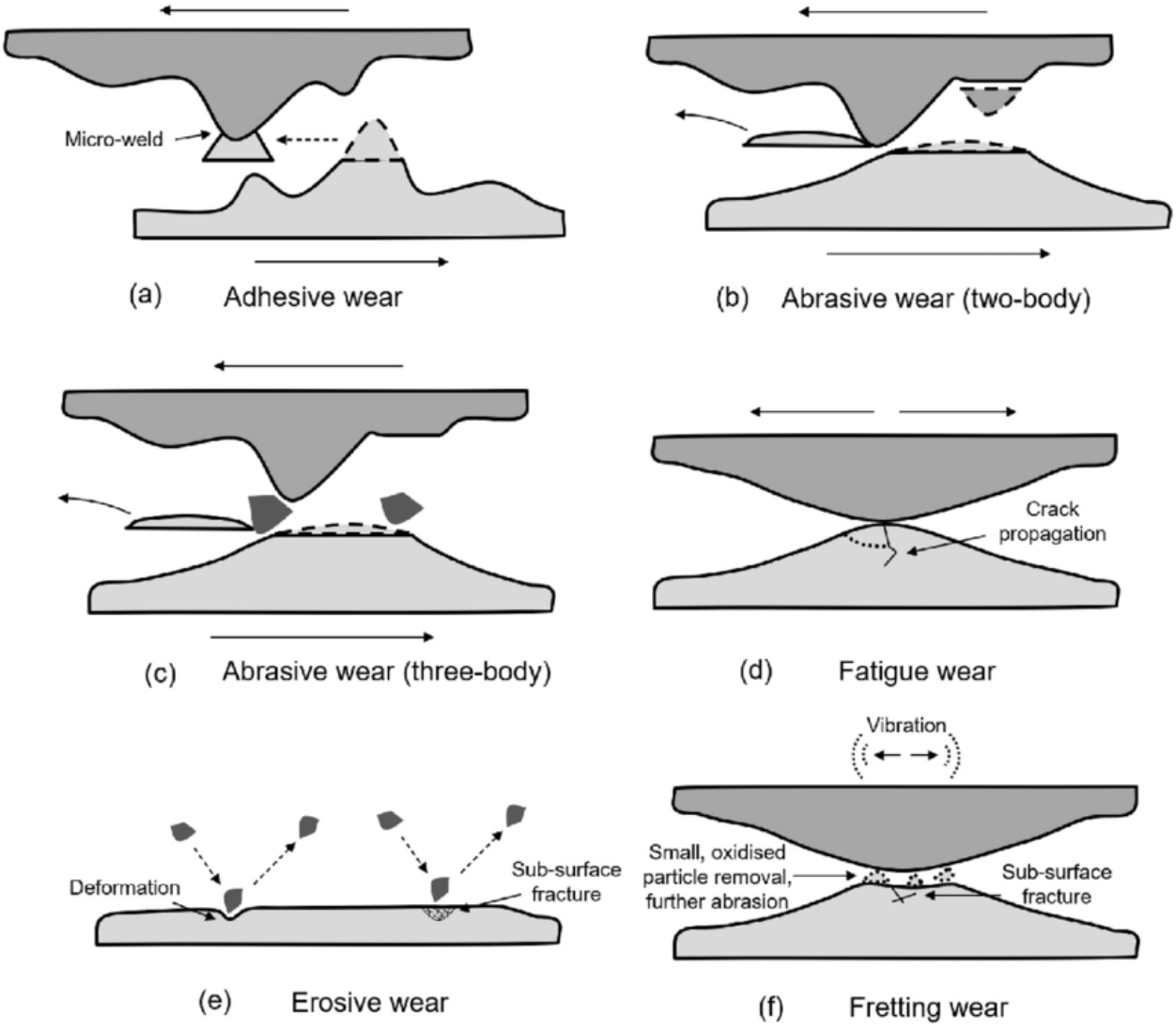

Рис. 5 – Основні механізми зношування

Інтенсивність зношування значною мірою залежить від структури матеріалу поверхневого шару. Наявність м’яких фаз сприяє зниженню тертя, тоді як тверді включення підвищують опір зношуванню. Оптимальне поєднання цих складових дозволяє забезпечити високі експлуатаційні характеристики підшипника.

1.5. Вплив структури та складу матеріалів на триботехнічні властивості

Структура та хімічний склад матеріалу поверхневого шару визначають його механічні та триботехнічні властивості. Дрібнозерниста структура забезпечує підвищену твердість і міцність, що позитивно впливає на зносостійкість. Водночас надмірне підвищення твердості може призводити до зниження здатності матеріалу до адаптації та збільшення ризику задирів [6].

Важливу роль відіграє фазовий склад матеріалу. Наявність м’яких фаз, таких як олово або свинець, сприяє зниженню коефіцієнта тертя і покращує приробіток поверхонь. Тверді фази, у свою чергу, підвищують опір зношуванню та забезпечують стабільність геометричних параметрів.

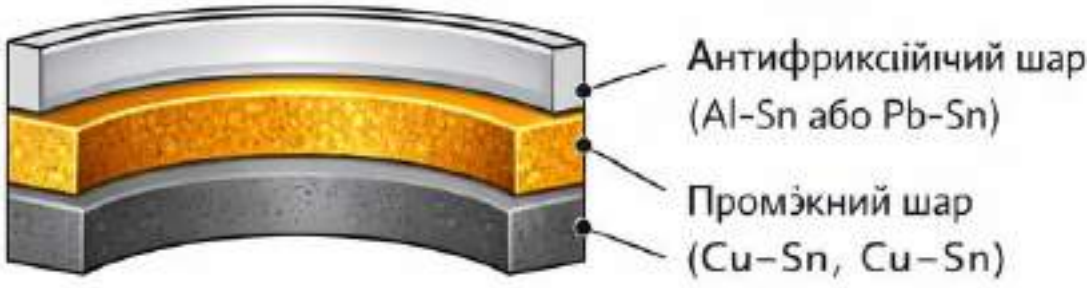

Рис. 6 – Багатошарова структура підшипника ковзання

Важливу роль відіграють також тверді мастила такі як графіт або дисульфід молібдену та текстуровані поверхні, які здатні формувати локальні гідродинамічні ефекти і покращувати несучу здатність підшипника [7]. Вони забезпечують зниження тертя навіть у відсутності повноцінного мастильного шару. Як показують дослідження, матеріали, що містять тверді мастила, зда-

тні демонструвати менший знос при збереженні прийнятного рівня коефіцієнта тертя.

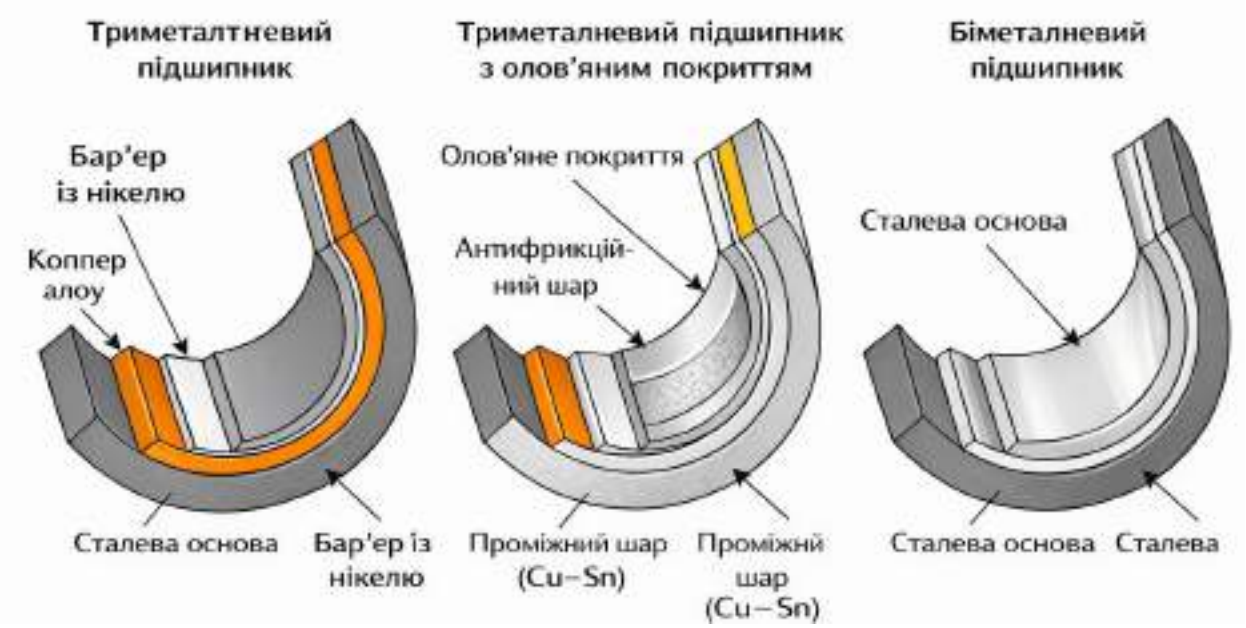

Рис. 7 – Багатошарова структура підшипників ковзання

Таким чином, оптимізація структури та складу поверхневих шарів є ключовим фактором підвищення зносостійкості підшипників ковзання. Це досягається шляхом раціонального вибору матеріалів і застосування сучасних технологій їх обробки та модифікації.

2. СУЧАСНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПОКРИТТЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

2.1. Загальна характеристика матеріалів підшипників ковзання

Вимоги до матеріалів підшипників ковзання. Матеріали підшипників ковзання повинні забезпечувати надійну роботу вузлів у складних умовах тертя, змінних навантажень і температур. Основні вимоги до таких матеріалів формуються з урахуванням режимів мащення та механізмів зношування, розглянутих у попередньому розділі.

До ключових властивостей належать:

- висока зносостійкість, що визначає ресурс підшипника;
- низький коефіцієнт тертя, особливо в умовах граничного мащення;
- здатність до вбудовування частинок (embeddability), що дозволяє уникати абразивного зношування;
- здатність до приробітку, яка забезпечує адаптацію поверхонь;
- теплопровідність, необхідна для відведення тепла із зони контакту;
- стійкість до втомного руйнування.

Важливою особливістю є необхідність поєднання протилежних властивостей: матеріал повинен бути достатньо твердим для опору зношуванню і водночас містити м’які компоненти, що знижують тертя та забезпечують адаптацію контактуючих поверхонь.

2.2. Традиційні матеріали підшипників ковзання

Історично широке застосування отримали матеріали на основі свинцю, міді та алюмінію. Вони формують багатошарові системи, де кожен шар виконує певну функцію.

2.2.1. Свинцевмісні матеріали

Свинець використовувався завдяки:

- високій пластичності;
- добрій прироблюваності;
- здатності поглинати тверді частинки.

Однак сучасні екологічні обмеження значно звужують сферу їх застосування, що стимулює перехід до безсвинцевих матеріалів.

2.2.2. Мідні сплави.

Мідні сплави (Cu–Sn, Cu–Pb) характеризуються:

- високою міцністю;
- доброю теплопровідністю;
- стійкістю до втомного руйнування.

Вони широко застосовуються як проміжні шари у тришарових підшипниках. Недоліком є підвищена жорсткість, що може знижувати прироблюваність.

2.2.3. Алюмінієві сплави.

Алюмінієві матеріали є сучасною альтернативою і мають такі переваги:

- низька густина;
- хороша корозійна стійкість;
- відсутність токсичних компонентів.

Найбільш поширені системи:

- Al–Sn;
- Al–Si;
- Al–Sn–Si.

Алюмінієві підшипники часто використовуються у біметалевих конструкціях і забезпечують достатній баланс між міцністю і триботехнічними властивостями.

2.3. Сучасні композиційні матеріали

Сучасні тенденції розвитку спрямовані на створення композиційних матеріалів із заданими властивостями. Сучасні дослідження показують, що

застосування текстурованих і композиційних поверхонь дозволяє суттєво знизити коефіцієнт тертя та підвищити несучу здатність підшипників [8].

2.3.1. Матеріали з твердими мастилами.

До складу таких матеріалів вводяться:

- графіт;
- дисульфід молібдену (MoS_2);
- полімерні компоненти (PTFE).

Їх основна функція – забезпечення низького коефіцієнта тертя в умовах недостатнього мащення.

Дослідження показують, що матеріали з твердими мастилами демонструють:

- стабільний коефіцієнт тертя;
- зменшення інтенсивності зношування;
- підвищену стійкість у режимах start-stop.

2.3.2. Порошкові матеріали

Порошкова металургія дозволяє:

- формувати пористу структуру;
- створювати резервуари для мастила;
- точно контролювати склад і мікроструктуру.

Такі матеріали особливо ефективні при змінних режимах навантаження.

2.4. Покриття та методи модифікації поверхні

Підвищення зносостійкості підшипників досягається шляхом формування функціональних поверхневих шарів. Експериментальні та чисельні дослідження підтверджують, що текстурування і модифікація поверхонь знижують зсувні напруження в мастильному шарі та ефективно зменшують тертя [9].

2.4.1. Лазерне наплавлення

Лазерне наплавлення є одним із найбільш перспективних методів.

Основні переваги:

- низька дилюція (ступінь перемішування/розбавлення матеріалу основи з матеріалом нанесеного покриття під час наплавлення або зварювання ~5%);
- мінімальна зона термічного впливу;
- можливість точного контролю складу.

Метод дозволяє формувати шари товщиною 0,05–2 мм із високою зносостійкістю.

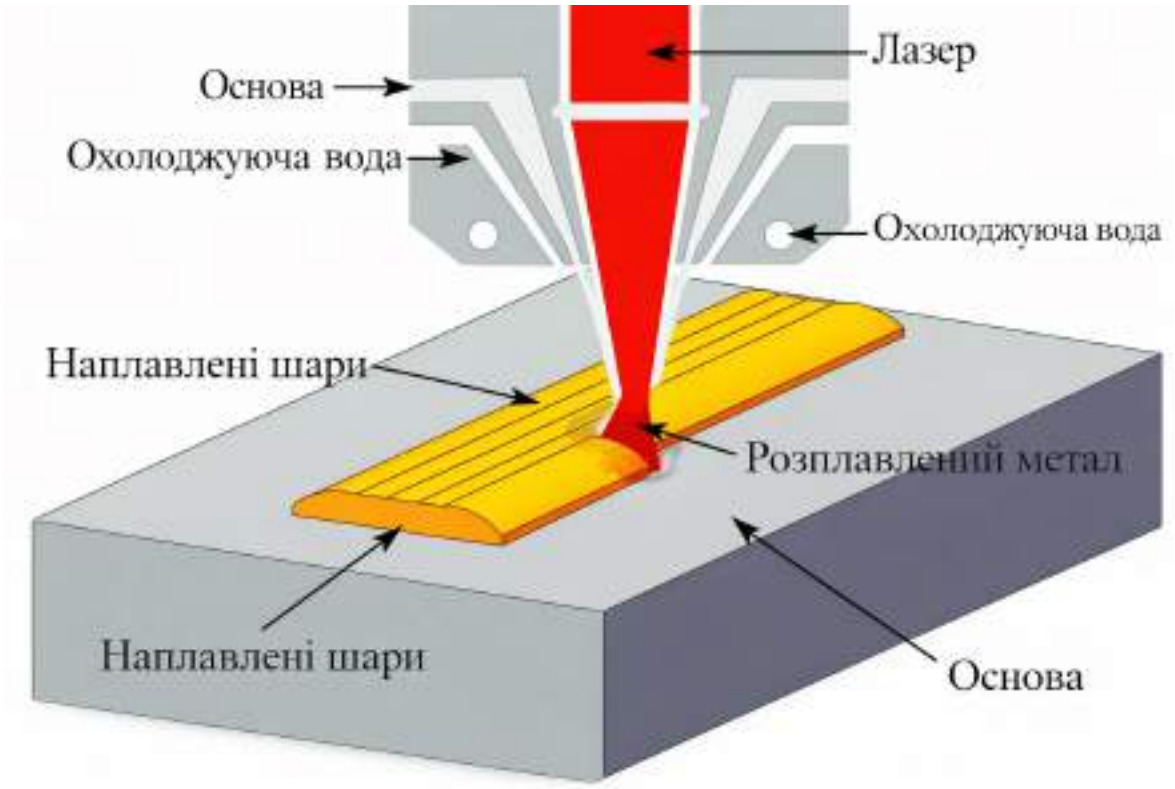

Рис. 8 – Схема процесу лазерного наплавлення

2.4.2. Фізичне та хімічне осадження (PVD, CVD)

Ці методи забезпечують:

- формування тонких покриттів (1–10 мкм);
- високу твердість;
- хорошу адгезію.

Типові покриття:

- TiN;
- CrN;
- DLC (алмазоподібний вуглець).

DLC-покриття особливо ефективні завдяки:

- дуже низькому коефіцієнту тертя;
- високій зносостійкості;
- хімічній інертності.

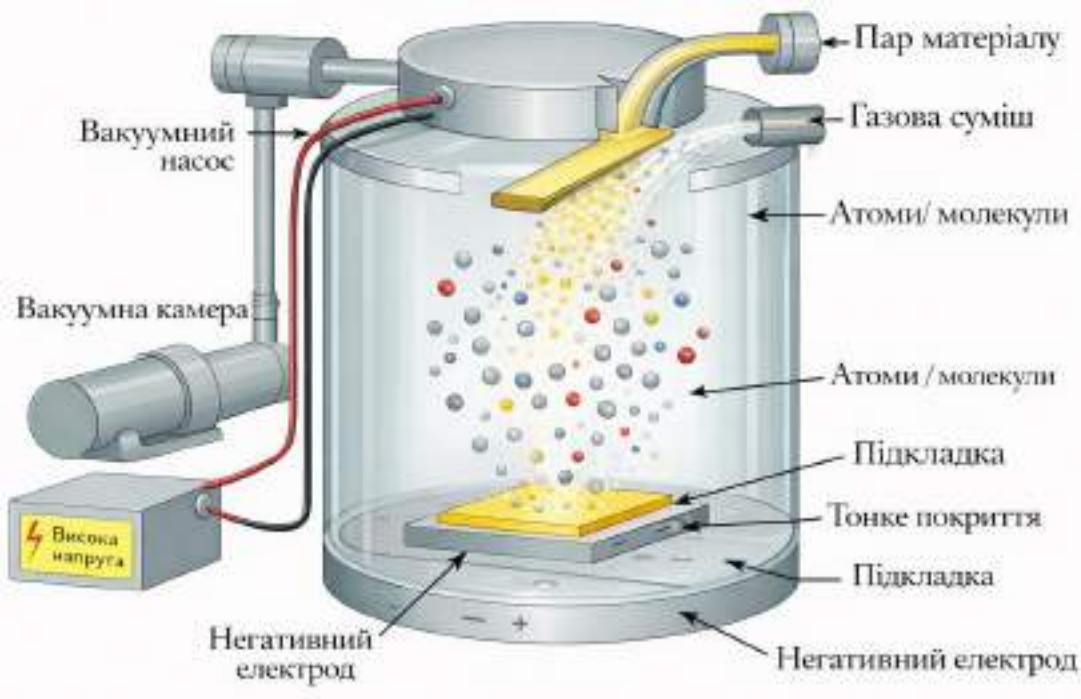

Рис. 9 – Схема процесу фізичного та хімічного осадження (PVD, CVD)

2.4.3. Хіміко-термічні методи зміцнення поверхні

Окрім фізичних методів, значне поширення отримали хіміко-термічні способи обробки, які дозволяють змінювати хімічний склад і структуру поверхневого шару шляхом насичення його активними елементами. Такі методи широко застосовуються для підвищення зносостійкості, твердості та втомної міцності деталей, що працюють у вузлах тертя, зокрема підшипниках ковзання та спряжених з ними елементах.

Азотування дозволяє:

- підвищити твердість поверхні;
- сформувати зміцнений шар;
- покращити втомну міцність.

Для підшипників і валів це критично важливо, оскільки підвищує стійкість до контактних навантажень.

Ціанування

Ціанування – це процес одночасного насичення поверхневого шару сталі вуглецем і азотом у середовищі ціанистих солей або газів. У результаті формується зміцнений шар із високою твердістю та зносостійкістю.

Основні переваги:

- підвищення твердості поверхні (до 600–800 HV);
- покращення опору зношуванню;
- зростання контактної витривалості.

Недоліком є токсичність середовищ, що обмежує застосування методу в сучасному виробництві.

Карбонітрування

Карбонітрування є різновидом хіміко-термічної обробки, при якому поверхня насичується вуглецем і азотом у газовому середовищі.

Характерні особливості:

- нижча температура порівняно з цементацією;
- формування тонкого зміцненого шару;
- покращення зносостійкості та корозійної стійкості.

Метод ефективний для деталей, що працюють при помірних навантаженнях.

Цементація

Цементація полягає у насиченні поверхневого шару сталі вуглецем з подальшим гартуванням.

- формування твердого поверхневого шару (до 60 HRC);
- збереження в’язкої серцевини;

- підвищення втомної міцності.

Цей метод доцільний для деталей, що працюють при високих контактних навантаженнях.

Нітроцементація

Нітроцементація поєднує процеси насичення вуглецем і азотом при знижених температурах.

Переваги:

- менші деформації;
- рівномірний розподіл твердості;
- покращена зносостійкість.

Борування

Борування – це процес насичення поверхні бором, у результаті чого утворюються тверді боридні фази.

Особливості:

- дуже висока твердість (до 1800–2000 HV);
- висока зносостійкість;
- підвищена корозійна стійкість.

Недоліком є крихкість шару.

Хромування (дифузійне)

Дифузійне хромування забезпечує:

- підвищення корозійної стійкості;
- покращення жаростійкості;
- зниження коефіцієнта тертя.

Таким чином, хіміко-термічні методи дозволяють формувати поверхневі шари із заданими властивостями, що значно підвищує зносостійкість деталей у вузлах тертя. Вибір конкретного методу визначається умовами експлуатації, вимогами до твердості, глибини зміцненого шару та економічними факторами. Порівняльний аналіз хіміко-термічних методів зміцнення поверхні наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1. Порівняльна характеристика хіміко-термічних методів зміцнення поверхні

Метод	Активні елементи	Температура процесу, °C	Товщина шару, мм	Твердість шару	Основні переваги	Недоліки	Типові області застосування
Ціанування	C + N	800–870	0,1–0,5	600–800 HV	висока зносостійкість, швидкість процесу	токсичність середовища	дрібні деталі, втулки
Карбонітрування	C + N	700–880	0,1–0,6	600–750 HV	низькі деформації, хороша приробітка	менша глибина шару	середньо навантажені вузли
Цементація	C	900–950	0,5–2,0	до 60 HRC	глибокий шар, висока втомна міцність	деформації після гарту	зубчасті передачі, вали
Нітроцементація	C + N	750–850	0,2–0,8	600–800 HV	рівномірність структури, зносостійкість	складність контролю процесу	деталі ДВЗ
Азотування	N	500–580	0,1–0,6	900–1200 HV	висока твердість, мінімальні деформації	тривалий процес	вали, поверхні тертя
Борування	B	800–1000	0,05–0,3	1800–2000 HV	дуже висока твердість, зносостійкість	крихкість шару	важко навантажені вузли
Дифузійне хромування	Cr	900–1100	0,02–0,2	800–1000 HV	корозійна та жаростійкість	висока температура процесу	високотемпературні деталі

Як видно з таблиці 2.1, найбільшою твердістю характеризується борування, тоді як азотування забезпечує оптимальне поєднання високої твердості та мінімальних деформацій. Методи насичення вуглецем і азотом забезпечують компроміс між зносостійкістю та технологічністю.

Експериментальні та чисельні дослідження підтверджують, що текстурування і модифікація поверхонь знижують зсувні напруження в мастильному шарі та ефективно зменшують тертя [9].

2.5. Вплив структури покриттів на зносостійкість

Мікроструктура покриттів визначає їх триботехнічні властивості.

Основні фактори:

- розмір зерна;
- фазовий склад;
- розподіл компонентів;
- пористість.

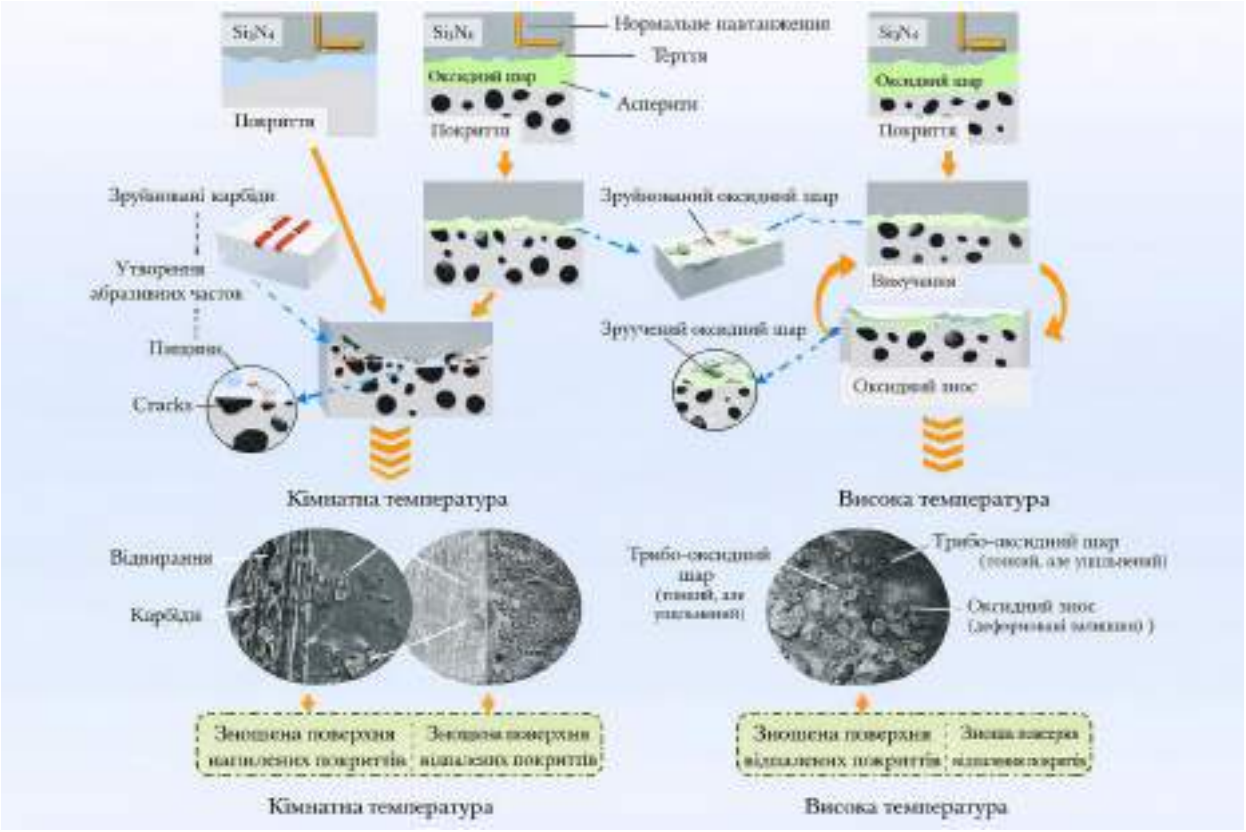

Рис. 10 – Мікроструктура зносостійкого покриття

Дрібнозерниста структура забезпечує:

- підвищену твердість;
- рівномірний розподіл навантаження.

Наявність м’яких фаз:

- зменшує тертя;
- запобігає задиркам.

Огляд сучасних моделей підшипників ковзання свідчить, що мікроструктура і термогідродинамічні процеси визначають експлуатаційні харак-

теристики та довговічність вузлів [10]. Узагальнення впливу структури та складу матеріалів підшипників ковзання на їх триботехнічні властивості наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Вплив структури та складу матеріалів підшипників ковзання на їх триботехнічні властивості

Матеріал / покриття	**Структурні особливості**	**Ключові властивості**	**Триботехнічний ефект**	**Умови ефективної роботи**
Al–Sn сплави	М'які включення Sn у Al-матриці	Низька твердість, висока пластичність	↓ тертя, добра приробotка	Змішане мащення
Al–Si сплави	Тверді частинки Si в матриці	Висока твердість, зносостійкість	↓ знос, ↑ ресурс	Високі навантаження
Cu–Sn (бронза)	Дрібнозерниста структура	Висока міцність, теплопровідність	↑ несуча здатність	Гідродинамічний режим
Cu–Pb сплави	М'які Pb-включення	Висока прирабатываність	↓ задири, стабільна робота	Граничне мащення
Ni-основні покриття	Тверда матриця + легуючі елементи	Висока твердість, зносостійкість	↑ довговічність	Високі навантаження
Матеріали з MoS_2	Дисперсні тверді мастила	Самозмащення	↓ коефіцієнт тертя	Start-stop режими
Графітовмісні матеріали	Пластинчаста структура	Легке зсувне ковзання	↓ тертя без мастила	Граничне мащення
DLC-покриття	Аморфна вуглецева структура	Дуже висока твердість	↓↓ тертя, ↑ ресурс	Високі швидкості
Лазерно наплавлені шари	Дрібнозерниста структура, низька пористість	Висока адгезія	↓ знос, ↑ міцність	Змінні навантаження
Пористі порошкові матеріали	Капілярна структура	Утримання мастила	↑ стабільність мащення	Низькі швидкості

Як видно з таблиці 2.2, оптимальне поєднання твердих і м'яких фаз дозволяє забезпечити одночасно високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя.

Порівняльний аналіз сучасних покриттів, що застосовуються для підвищення зносостійкості підшипників ковзання, наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Порівняльна характеристика сучасних покриттів

Тип покриття	Технологія нанесення	Товщина шару, мкм	Твердість	Коефіцієнт тертя	Основні переваги	Недоліки	Типові області застосування
DLC (алмазоподібне вуглецеве)	PVD / CVD	1–5	дуже висока	дуже низький (0,05–0,15)	мін. тертя, висока зносостійкість, хімічна інертність	висока вартість, чутливість до дефектів основи	ДВЗ, високошвидкісні вузли
TiN (нітрид титану)	PVD	2–5	висока	середній (0,4–0,6)	висока твердість, хороша адгезія	відносно високий коефіцієнт тертя	інструменти, вузли з високим навантаженням
CrN (нітрид хрому)	PVD	2–6	висока	середній (0,3–0,5)	корозійна стійкість, зносостійкість	нижча твердість порівняно з DLC	автомобільні вузли
MoS_2-покриття	напилення	1–3	низька	дуже низький (0,03–0,1)	самозмащення, ефективність без мастила	низька зносостійкість у вологій середі	вакуум, start-stop режими
Графітові покриття	напилення / композиційні	5–20	низька	низький	стабільне ковзання, простота нанесення	обмежена довговічність	граничне мащення
Лазерно наплавлені покриття	лазерне наплавлення	50–500	висока	середній	висока міцність, товсті шари, хороша адгезія	потреба в обробці після нанесення	відновлення деталей, важкі умови
Полімерні (PTFE) покриття	напилення / спікання	10–30	низька	дуже низький (0,04–0,1)	дуже низьке тертя, антиприлипання	низька теплостійкість	легкі навантаження
Наноструктуровані покриття	PVD / комбіновані методи	1–10	дуже висока	низький	висока зносостійкість, стабільність структури	складність технології	сучасні ДВЗ
Композитні покриття (Ni + тверді мастила)	наплавлення / напилення	20–200	середня	низький	баланс твердості і самозмащення	складність підбору складу	підшипники ковзання
Оксидні покриття (Al_2O_3)	плазмове напилення	20–100	дуже висока	високий	висока твердість, термостійкість	крихкість	високотемпературні вузли

2.6. Перспективні напрями розвитку матеріалів

Сучасні дослідження спрямовані на:

- створення безсвинцевих матеріалів;
- застосування наноструктурованих покриттів;
- використання гібридних композицій;
- інтеграцію твердих мастил у матрицю матеріалу.

Особливо необхідні матеріали, здатні ефективно працювати в умовах:

- нестабільного мащення;
- частих запусків двигуна;
- високих контактних навантажень.

Висновок до розділу 2.

Сучасні матеріали та покриття підшипників ковзання розвиваються у напрямі підвищення зносостійкості, екологічності та адаптивності до складних умов роботи. Ключову роль відіграє оптимізація мікроструктури та складу поверхневих шарів, що дозволяє значно підвищити ресурс вузлів тертя.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

3.1. Загальна характеристика методів дослідження

Дослідження структури та триботехнічних властивостей підшипників ковзання базується на комплексному застосуванні експериментальних методів, що дозволяють оцінити мікроструктуру матеріалів, їх механічні характеристики та поведінку в умовах тертя.

До основних методів належать:

- мікроструктурний аналіз (оптична та електронна мікроскопія);
- вимірювання твердості та мікротвердості;
- трибологічні випробування;
- аналіз продуктів зношування.

Застосування комплексу методів дозволяє встановити взаємозв’язок між структурою матеріалу та його експлуатаційними характеристиками.

3.2. Методи дослідження мікроструктури

3.2.1. Оптична мікроскопія

Оптична мікроскопія використовується для аналізу макро- та мікроструктури матеріалів при збільшеннях до 1000×.

Метод дозволяє:

- визначити зернистість структури;
- виявити фазові складові;
- оцінити дефекти (пори, тріщини).

Перевагою є простота і швидкість дослідження, однак роздільна здатність обмежена.

3.2.2. Сканувальна електронна мікроскопія (SEM)

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) є одним із основних методів дослідження поверхонь.

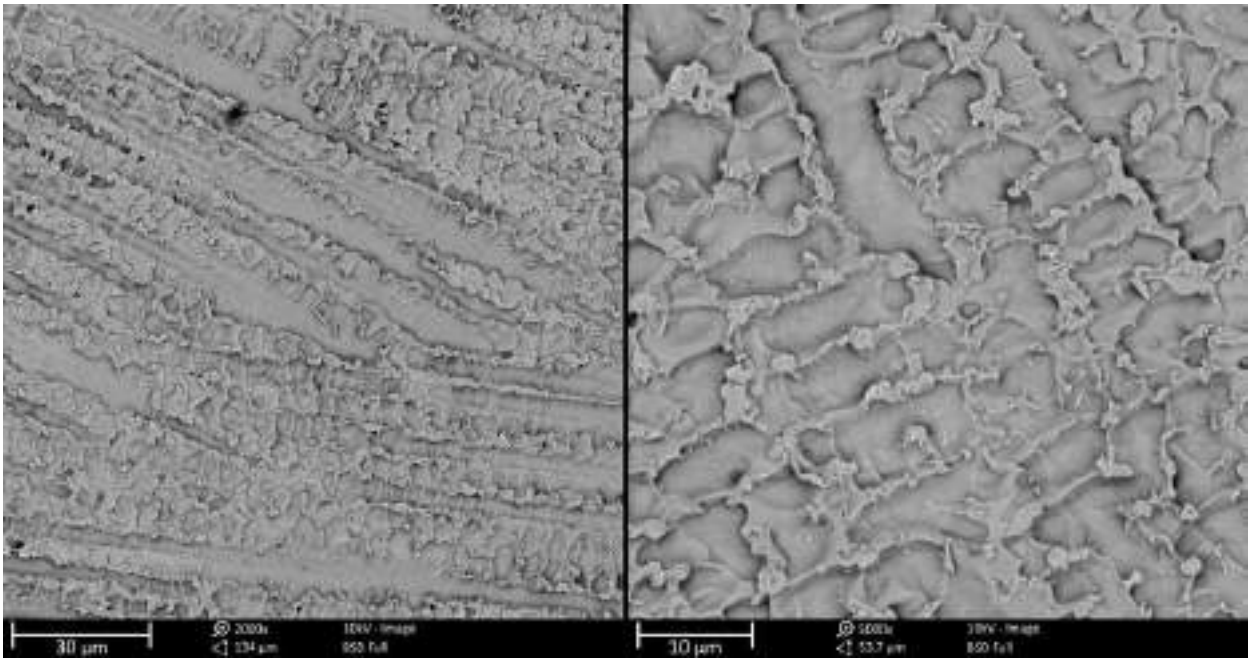

Рис. 11 – Мікроструктура поверхні матеріалу (SEM)

Сканувальна електронна мікроскопія дозволяє отримувати високороздільні зображення поверхні та аналізувати морфологію зношування і фазовий склад матеріалів [12, 13].

Методом дослідження базується на взаємодії сфокусованого пучка електронів із досліджуваним зразком. Метод дозволяє отримувати високодеталізовані зображення мікроструктури поверхні з роздільною здатністю до нанометрового рівня.

Фізична сутність методу. У SEM електронна гармата генерує пучок електронів, який прискорюється під дією високої напруги (зазвичай 1–30 кВ) і фокусується за допомогою електромагнітних лінз. Сформований електронний зонд послідовно сканує поверхню зразка за заданою траєкторією. При взаємодії електронного пучка з матеріалом виникають різні сигнали, які несуть інформацію про властивості зразка. У процесі взаємодії електронів із поверхнею генеруються:

- вторинні електрони (SE) – формуються з поверхневих шарів (до 10 нм) і забезпечують високу деталізацію рельєфу поверхні;
- зворотно відбиті електрони (BSE) – залежать від атомного номера елементів і дозволяють визначати фазовий склад;

- характеристичне рентгенівське випромінювання (EDS) – використовується для хімічного аналізу.

За допомоги SEM можливо:

- отримувати зображення з високою роздільною здатністю;
- аналізувати морфологію поверхні після зношування;
- виявляти мікротріщини, задири, продукти зношування.

Крім того, у поєднанні з енергодисперсійним аналізом (EDS) можна визначати хімічний склад поверхневих шарів. Переваги SEM це; висока роздільна здатність; велика глибина різкості; можливість локального хімічного аналізу; дослідження реальної поверхні без складної підготовки.

Обмеження методу – необхідність вакууму; обмеження для неметалевих матеріалів (потреба у провідному покритті); можливість пошкодження чутливих зразків.

Рис. 12 – Схема роботи SEM

Застосування SEM у дослідженні підшипників ковзання дозволяє ідентифікувати механізми зношування (адгезійне, абразивне, втомне), аналізувати структуру поверхневих покриттів, оцінювати ефективність зміцнення поверхневих шарів, досліджувати продукти зношування.

Таким чином, SEM є ключовим методом для встановлення взаємозв'язку між мікроструктурою матеріалу та його триботехнічними властивостями.

3.3. Визначення механічних властивостей

Вимірювання мікротвердості визначається методом Віккерса при малих навантаженнях. Метод дозволяє оцінити твердість поверхневих шарів, визначити градієнт твердості по глибині, порівняти ефективність різних покриттів.

Для підшипників ковзання це особливо важливо, оскільки твердість безпосередньо впливає на зносостійкість.

Нанотвердість використовується для дослідження тонких покриттів (PVD, CVD). Переваги – висока точність, можливість дослідження шарів товщиною кілька мікрометрів, визначення модуля пружності.

Визначення мікротвердості та нанотвердості є важливим інструментом оцінки механічних властивостей тонких поверхневих шарів і покриттів [14].

3.4. Трибологічні методи дослідження

Трибометричні випробування виконують за допомогою трибометра. Цей прилад дає змогу оцінити: значення коефіцієнта тертя; інтенсивності зношування; вплив навантаження і швидкості.

Найбільш поширена схема – "палець–диск" (pin-on-disk).

Коли використовують таку схему, відбувається моделювання реальних умов тертя, оцінюють поведінку матеріалів при різних режимах мащення, порівнюють різні покриття [15].

Рис. 13 – Схема роботи трибометра «Палець-диск»

Дослідження зношування включає: вимірювання масових втрат, визначення глибини зношування, аналіз профілю поверхні.

Для цього використовують таке обладнання, як профілометри, координатно-вимірювальні машини, 3D-сканування тощо. Аналіз продуктів зношування дозволяє ідентифікувати механізми руйнування та оцінити ефективність захисних покриттів [16]. Для цього виконують SEM-аналіз частинок, хімічний аналіз, спектроскопія. За формою і складом частинок можна визначити тип зношування (адгезійне, абразивне, втомне), умови роботи вузла, ефективність покриття.

Комплексне застосування методів дозволяє встановити зв’язок між структурою і властивостями, оцінити ефективність покриттів, визначити механізми зношування.

Таблиця 3.1. Взаємозв’язок методів дослідження, контрольованих параметрів та отриманої інформації

Метод дослідження	**Основні параметри**	**Що визначає (інформативність)**
Оптична мікроскопія	збільшення (×50–×1000), освітлення	зернистість, макроструктура, дефекти (пори, тріщини)
SEM (сканувальна електронна мікроскопія)	прискорююча напруга (1–30 кВ), збільшення, режим детекції (SE, BSE)	морфологія поверхні, механізми зношування, фазовий склад
EDS-аналіз	енергетичний спектр, локальна зона аналізу	хімічний склад поверхневих шарів і покриттів
Мікротвердість (Vickers)	навантаження (0,01–1 Н), час витримки	твердість поверхневого шару, градієнт властивостей
Нанотвердість	глибина проникнення індентора, навантаження	твердість тонких покриттів, модуль пружності
Трибометр (pin-on-disk)	навантаження, швидкість, час, середовище	коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування
Профілометрія	Ra, Rz, профіль поверхні	шорсткість, ступінь зношування
Вимірювання масових втрат	маса до/після випробування	кількісна оцінка зношування
3D-сканування поверхні	топографія, глибина зносу	об’єм зношування, геометричні зміни
Аналіз продуктів зношування	форма частинок, склад	механізм зношування (адгезійний, абразивний, втомний)

Висновок до розділу 3.

Таким чином, поєднання мікроструктурного аналізу та трибологічних випробувань є основою для дослідження підшипників ковзання і розробки нових матеріалів із підвищеною зносостійкістю.

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

4.1. Вплив структури матеріалів на триботехнічні властивості.

На основі проведеного аналізу встановлено, що структура матеріалів підшипників ковзання визначає їх експлуатаційні характеристики, зокрема зносостійкість і коефіцієнт тертя. У даному розділі наведено результати, отримані із застосуванням методів дослідження, описаних у попередньому розділі. Отримані експериментальні дані систематизовано, проаналізовано та зіставлено з теоретичними положеннями, викладеними в розділі теоретичних основ. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта тертя, що наведені у [17] дають змогу зробити висновок, що дрібнозерниста структура забезпечує рівномірний розподіл навантаження, а це знижує локальні концентрації напружень і підвищує опір втомному руйнуванню. Узагальнені дані вимірювань, а також їх варіація (розкид результатів), наведено на рисунку 14.

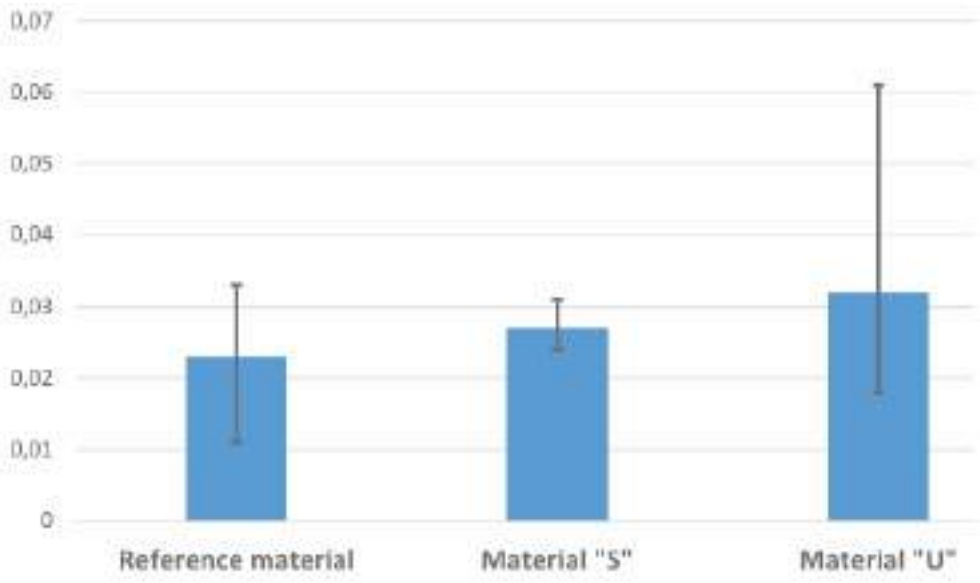

Рис. 14 – Середні значення коефіцієнта тертя для кожного матеріалу

4.1.1 Еталонний матеріал (Reference material)

У цьому підрозділі наведено результати визначення коефіцієнта тертя для базового (еталонного) матеріалу, отримані за допомогою реверсивного трибометра. Отримані значення узагальнено у відповідній таблиці.

Результати показують, що коефіцієнт тертя для еталонного матеріалу знаходиться в допустимому діапазоні та відповідає очікуваним значенням для підшипників ковзання, що працюють у змішаному режимі мащення. Відносно невеликий розкид значень свідчить про стабільність результатів і надійність проведених вимірювань.

Разом з тим, слід зазначити, що даний матеріал характеризується відносно низькою твердістю, що може негативно впливати на його зносостійкість при підвищених навантаженнях.

У дослідженні, що було покладене в основу даної роботи, матеріали позначені умовними індексами «S» та «U», без розкриття їх точного хімічного складу. Такий підхід є типовим для робіт, виконаних у співпраці з промисловими підприємствами, де використовується комерційно чутлива інформація. З метою адаптації отриманих результатів до умов вітчизняного виробництва було проведено інженерний аналіз триботехнічних характеристик зазначених матеріалів.

На основі аналізу встановлено, що матеріал «S» характеризується:

- наявністю твердого мастила у структурі;
- стабільними значеннями коефіцієнта тертя;
- здатністю ефективно працювати при підвищених навантаженнях.

Враховуючи ці властивості, як його аналог доцільно прийняти **бронзу БрО10Ф1 з додаванням твердих мастил (графіт або MoS_2)**, яка широко застосовується в підшипниках ковзання та характеризується високими антифрикційними властивостями.

Матеріал «U», у свою чергу, відрізняється:

- високою твердістю;
- відсутністю мастильних компонентів;
- підвищеним коефіцієнтом тертя;
- схильністю до абразивного зношування.

З огляду на це, як його аналог обрано леговану конструкційну **сталь 40Х**, яка після термічної обробки забезпечує високу твердість і міцність, однак не має власних антифрикційних властивостей.

4.1.2. Зразки матеріалу БрО10Ф1 з додаванням твердого мастила MoS_2

Результати визначення коефіцієнта тертя для матеріалу «БрО10Ф1», отримані за допомогою трибометра, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Значення коефіцієнта тертя для матеріалу БрО10Ф1

Зразок	**Навантаження, Н**	**Тривалість, хв**	**Коефіцієнт тертя**
61	110	60	0,024
62	250	60	0,028
63	350	60	0,031
64	50	600	0,025
65	90	60	0,026
Середнє значення	–	–	**0,027**

Отримані результати показують, що бронза БрО10Ф1 з твердим мастилом (графіт або MoS_2) забезпечує значення коефіцієнта тертя, близькі до еталонного матеріалу, але при цьому характеризується більш стабільною поведінкою в умовах навантаження.

Наявність твердого мастила у структурі матеріалу сприяє зниженню тертя та підвищенню надійності роботи вузла. Невеликий розкид експериментальних значень свідчить про однорідність структури матеріалу та його стабільні триботехнічні характеристики.

4.1.3. Зразки матеріалу Сталь 40Х

Результати вимірювання коефіцієнта тертя для Сталі 40Х наведено в таблиці 4.2.

Аналіз результатів показує, що Сталь 40Х характеризується більшим розкидом значень коефіцієнта тертя порівняно з іншими матеріалами. Серед-

нє значення також є вищим, що свідчить про гірші антифрикційні властивості.

Значне відхилення результату для зразка №72 вказує на можливі похибки експерименту або нестабільність умов випробування. Водночас інші значення є близькими між собою, що дозволяє вважати загальну тенденцію достовірною.

Підвищений коефіцієнт тертя пояснюється відсутністю твердого мастила у складі матеріалу та його високою твердістю. Це призводить до інтенсивнішої взаємодії контактуючих поверхонь і підвищення тертя.

Порівняння довготривалих випробувань показує, що еталонний матеріал має найменший коефіцієнт тертя, тоді як Сталь 40Х – найбільший, хоча різниця між ними є незначною.

Таблиця 4.2. Значення коефіцієнта тертя для Сталі 40Х

Зразок	**Навантаження, Н**	**Тривалість, хв**	**Коефіцієнт тертя**
71	110	60	0,018
72	150	60	0,061
73	50	600	0,029
74	90	60	0,026
75	150	60	0,028
Середнє значення	–	–	**0,032**

Наявність м’яких фаз (Sn, Pb, полімерні включення) сприяє покращенню приробітку та зниженню коефіцієнта тертя, особливо в умовах граничного мащення. Водночас тверді фази (Si, карбіди, нітриди) підвищують зносостійкість і стабільність геометричних параметрів поверхні.

Таким чином, оптимальне поєднання м’яких і твердих фаз є ключовим фактором підвищення ефективності підшипників ковзання.

Порівняльний аналіз матеріалів, прийнятих як аналоги досліджуваних, наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Порівняльна характеристика матеріалів БрО10Ф1 (з графітом / MoS_2) та сталі 40Х

Параметр	**БрО10Ф1 + графіт / MoS_2**	**Сталь 40Х**
Тип матеріалу	антифрикційний композиційний	конструкційний легований
Структура	м’яка матриця + тверді мастильні включення	однорідна металева структура (після гарту і відпуску)
Твердість	70–120 НВ	200–350 НВ (до 50 HRC після ТО)
Коефіцієнт тертя	низький (0,02–0,05)	вищий (0,05–0,15 і більше)
Зносостійкість	висока при граничному мащенні	висока при хорошому мащенні
Прироблюваність	висока	низька
Стійкість до задирів	висока	низька
Несуча здатність	середня	висока
Теплопровідність	висока	середня
Наявність самозмащення	є (графіт, MoS_2)	відсутнє
Чутливість до забруднень	низька (вбудовування частинок)	висока (абразивний знос)
Основний механізм зношування	м’яке адаптивне зношування	абразивне, адгезійне
Типові застосування	підшипники ковзання, втулки	вали, осі, навантажені деталі
Поведінка при start-stop	стабільна	нестабільна
Вартість експлуатації	нижча (менший знос)	вища (знос спряженої деталі)

Як видно з таблиці 4.3, бронза БрО10Ф1 з твердими мастилами забезпечує кращі антифрикційні властивості, тоді як сталь 40Х характеризується вищою міцністю, але гіршими умовами тертя.

4.2. Аналіз процесів зношування досліджуваних матеріалів

У даному підрозділі наведено результати дослідження зношування матеріалів, отримані в результаті трибологічних випробувань. Оцінка зношування здійснювалась за показниками втрати маси та об’єму матеріалу.

Слід зазначити, що для частини зразків визначення об’ємного зношування було ускладнене через особливості геометрії зношеної поверхні, що характерно для випробувань на реверсивному трибометрі.

Отримані результати дозволяють встановити суттєву різницю у механізмах зношування залежно від структури матеріалу.

На рисунку 15 наведено зразок еталонного матеріалу після проведення випробувань на зношування на реверсивному трибометрі. У таблиці 4.4 представлено результати, отримані в ході цих випробувань.

Рис. 15 – Еталонні матеріали після випробувань із бороздами на поверхні

Аналіз результатів показує, що процес зношування спостерігається у всіх досліджених зразках еталонного матеріалу. Встановлено чітку залежність між величиною навантаження та інтенсивністю зношування: при пере-

вищенні навантаження понад 70 Н відбувається суттєве зростання втрат матеріалу.

Результати довготривалих випробувань свідчать, що при відносно низьких навантаженнях інтенсивність зношування залишається мінімальною, що підтверджує доцільність роботи матеріалу в умовах помірних навантажень.

Незважаючи на те, що при підвищених навантаженнях загальні втрати матеріалу не є критичними, на поверхні спостерігаються виражені сліди плуження (мікрорізання). Це свідчить про розвиток абразивного механізму зношування та створює ризик витіснення антифрикційного шару, внаслідок чого контакт може швидко досягати основного алюмінієвого матеріалу підшипника.

На рисунках 16 та 17 наведено стан підшипникової поверхні вкладиша до і після проведення випробувань у режимі «пуск–зупинка». Зона зношування чітко візуалізується на робочій поверхні.

У таблиці 4.4 представлені узагальнені результати випробувань на зношування.

Таблиця 4.4. Втрати маси зразків еталонного матеріалу через знос

№ зразка	Навантаження, Н	Тривалість, хв	Втрата маси, г
81	100	60	0,0023
82	45	60	0,0006
83	70	60	0,0005
84	110	60	0,0077
85	50	600	0,0009

Аналіз отриманих результатів свідчить про наявність зношування у всіх досліджених зразках еталонного матеріалу. Це підтверджується як значеннями втрати маси, так і об’ємом зношування.

Об’єм зношування змінюється в широкому діапазоні – від 0,008 до 18,2 мм^3, що, ймовірно, зумовлено відмінностями в умовах проведення експери-

ментів, зокрема навантаженням, тривалістю випробувань та особливостями контакту поверхонь.

Таблиця 4.5. Максимальна глибина зношування, об’єм та втрата маси зразків еталонного матеріалу

№ зразка	Максимальна глибина зношування, мм	Об’єм зношування, мм³	Втрата маси, г
50	0,032	18,2	–
51	0,015	5,4	–
52	–	0,008	3,2
53	–	0,014	5,1
54	–	0,012	5,9
55	–	0,012	3,5
56	–	0,015	4,1
57	0,002	0,018	16,1
58	0,0055	0,024	21,5
59	0,0073	0,013	13,2
Середнє значення	**0,0046**	**0,016**	**9,6**

Водночас значення втрати маси демонструють більш узгоджену залежність, що дозволяє вважати цей показник більш репрезентативним для оцінки інтенсивності зношування.

Отримані результати підтверджують, що навіть для матеріалів із задовільними антифрикційними властивостями процес зношування є неминучим і суттєво залежить від умов експлуатації.

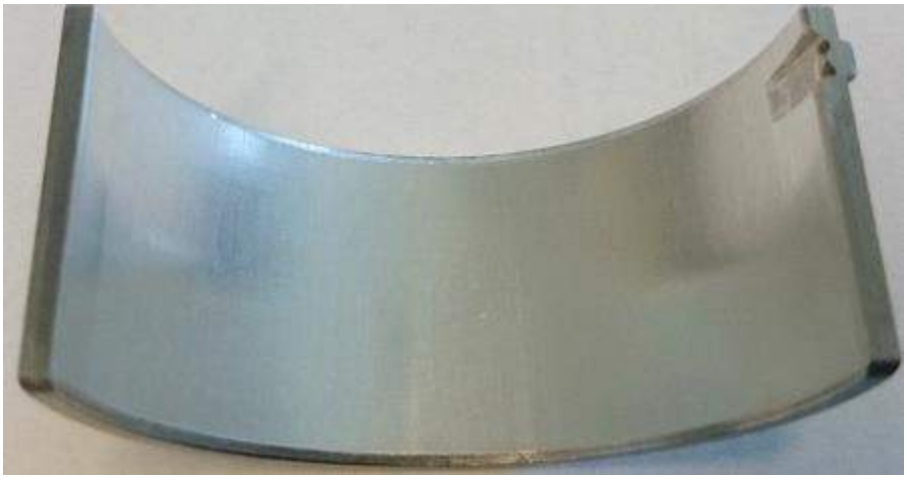

Рис. 16 – Вкладиш підшипника до випробувань на зношування

Рис. 17 – Вкладиш підшипника після випробувань на зношування

4.2.2. Зношування бронзи БрО10Ф1 з твердими мастилами

На рисунку 18 наведено вкладиш підшипника, на поверхню якого нанесено покриття методом лазерного наплавлення з використанням бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками (графіт або MoS_2). На рисунку 19 представлено фрагмент цього ж вкладиша після розрізання та шліфування, що дозволяє оцінити структуру наплавленого шару.

Рис. 18 – Вкладиш підшипника після лазерного наплавлення

Рис. 19 – Відшліфований вкладиш. На поверхні чітко спостерігаються пори

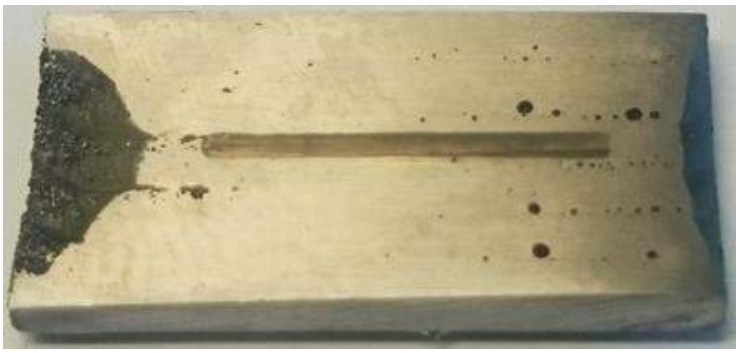

Рис. 20 – Зразок із матеріалу БрО10Ф1 з твердими мастильними компонентами після випробування. На поверхні спостерігається рівномірний гладкий слід зношування

На рисунку 20 показано зразок із зазначеним матеріалом після проведення випробувань на реверсивному трибометрі. У таблиці 4.6 наведено результати трибологічних випробувань, отримані для даного матеріалу.

Таблиця 4.6. Втрата маси та умови випробувань зразків із бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками

№ зразка	Навантаження, Н	Тривалість, хв	Втрата маси, г
61	110	60	–
62	250	60	0,0003
63	350	60	0,0017
64	50	600	0,0016
65	200	60	0,0002

Встановлено, що інтенсивність зношування залишається на дуже низькому рівні до моменту підвищення навантаження понад 200 Н. Бронза

БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками демонструє високі експлуатаційні характеристики при невеликих навантаженнях, що підтверджується результатами довготривалих випробувань.

Навіть при підвищених навантаженнях рівень зношування залишається відносно низьким, що свідчить про ефективність самозмащувальних властивостей матеріалу та його здатність працювати в умовах змінних режимів тертя.

Аналіз результатів показує, що бронза БрО10Ф1 з включеннями графіту або MoS_2 характеризується зниженими темпами зношування порівняно з металевими матеріалами без мастильних фаз.

Основні особливості зношування:

- формування захисного трибологічного шару;
- рівномірний розподіл контактних напружень;
- відсутність глибоких задирів і пошкоджень поверхні.

Наявність твердих мастильних компонентів сприяє:

- зменшенню сил тертя;
- зниженню температури в зоні контакту;
- стабілізації умов мащення.

У процесі роботи відбувається поступове вивільнення мастильних фаз із структури матеріалу, що забезпечує ефект самозмащення.

Таким чином, зношування має адаптивний характер і не призводить до інтенсивного руйнування поверхні.

4.2.3. Зношування сталі 40Х

Для сталі 40Х характерний інший механізм зношування, що обумовлений високою твердістю та відсутністю мастильних компонентів.

На рисунку 21 наведено вкладиш підшипника з покриттям, сформованим методом лазерного наплавлення із використанням сталі 40Х. На рисунку

22 представлено фрагмент цього ж вкладиша після розрізання та шліфування, що дозволяє оцінити структуру наплавленого шару.

На рисунку 23 показано зразок із сталі 40Х після проведення випробувань на реверсивному трибометрі. У таблиці 4.7 наведено результати випробувань, отримані для даного матеріалу

Рис. 21 – Вкладиш підшипника після лазерного наплавлення. Сталь 40Х

Рис. 22 – Відшліфована Сталь 40Х. На поверхні чітко спостерігаються пори

Рис. 23 – Сталь 40Х після випробувань з шорстким слідом зношування

Таблиця 4.7. Втрата маси та умови випробувань зразків зі сталі 40Х

№ зразка	Навантаження, Н	Тривалість, хв	Втрата маси, г
71	110	60	–
72	150	60	0,0044
73	50	600	0,024
74	90	60	0,0005
75	150	60	0,0001

Аналіз результатів показує, що для сталі 40Х інтенсивність зношування залишається відносно низькою при навантаженнях до 90 Н. Однак при подальшому збільшенні навантаження спостерігається різке зростання втрат матеріалу. Зокрема, при навантаженні 150 Н зношування суттєво інтенсифікується, що свідчить про перехід до більш агресивного режиму тертя та розвитку абразивного механізму зношування. Результати довготривалих випробувань показують, що за стабільних умов навантаження матеріал демонструє відносно задовільну поведінку. Проте відсутність мастильних компонентів у структурі сталі обмежує її ефективність у режимах підвищеного навантаження. Таким чином, сталь 40Х може забезпечувати достатню зносостійкість лише в обмежених умовах експлуатації та потребує використання у парі з антифрикційними матеріалами.

Основні спостереження:

- виникнення абразивного зношування;
- утворення мікрорізання поверхні;
- наявність задирів і локальних пошкоджень.

У процесі тертя:

- відбувається руйнування мікронерівностей;
- утворюються тверді частинки зносу;
- частинки потрапляють у зону контакту та підсилюють зношування.

Це призводить до розвитку так званого вторинного абразивного зношування, яке значно прискорює деградацію поверхні.

4.2.4 Порівняльний аналіз механізмів зношування

Порівняння досліджуваних матеріалів показує принципову різницю в їх поведінці.

- БрО10Ф1 + мастило → контрольоване, стабільне зношування
- Сталь 40Х → інтенсивне, нестабільне зношування

Ключові відмінності зведені до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8. Порівняльний аналіз механізмів зношування зразків з БрО10Ф1 та Сталі 40Х

Параметр	**БрО10Ф1 + мастило**	**Сталь 40Х**
Тип зношування	адаптивне	абразивне
Стабільність	висока	низька
Темп зношування	низький	вищий
Поведінка частинок	поглинання	руйнування і повторне включення

Порівняльний аналіз традиційних і сучасних матеріалів показав, що алюмінієві сплави (Al–Sn, Al–Si) забезпечують кращий баланс між масою, корозійною стійкістю та триботехнічними властивостями порівняно з мідними сплавами.

Мідні матеріали (Cu–Sn, Cu–Pb) демонструють високу несучу здатність, однак поступаються за екологічністю та адаптивністю до сучасних умов експлуатації.

Застосування композиційних матеріалів із твердими мастилами (MoS_2, графіт) дозволяє:

- знизити коефіцієнт тертя на 15–30%;
- підвищити стабільність роботи в режимах start-stop;
- зменшити інтенсивність зношування.

Отже, сучасні матеріали орієнтовані на поєднання функцій: несучої здатності, самозмащення та адаптивності.

4.3. Аналіз поверхні

Аналіз проводився до та після виконання трибологічних випробувань, що дозволило оцінити зміни мікроструктури та характер пошкоджень у процесі зношування.

На рисунках 24 і 25 наведено зображення нового, невипробуваного вкладиша підшипника з еталонним матеріалом.

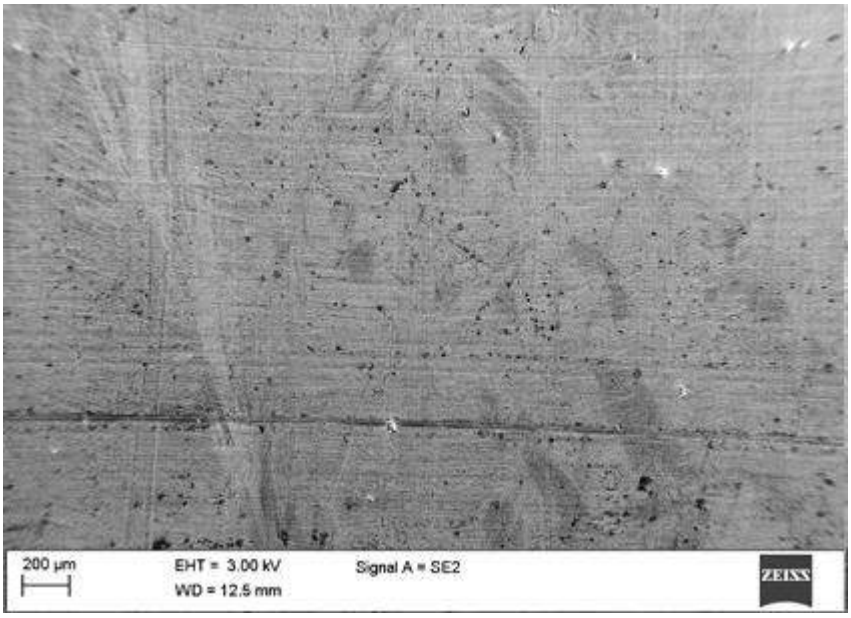

Рис. 24 – Структура еталонного зразка перед випробуванням (×100)

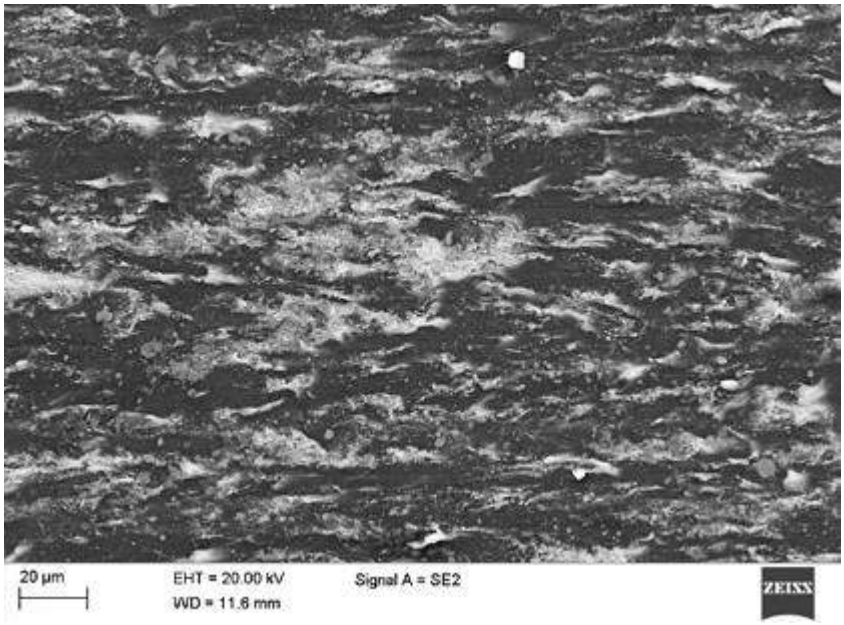

Рис. 25 – Структура еталонного зразка перед випробуванням (×1200)

Перше зображення отримано при збільшенні ×100, друге – при збільшенні ×1200. Прискорююча напруга електронного пучка становила 3 кВ для першого зображення та 20 кВ – для другого.

Отримані зображення дозволяють оцінити початкову морфологію поверхні, яка використовується як базова для подальшого аналізу змін після зношування.

При збільшенні ×100 спостерігається відносно однорідна структура поверхні без значних макродефектів. Поверхня має рівномірний характер із незначними слідами обробки, що є типовим для підшипникових матеріалів після механічного виготовлення.

При збільшенні ×1200 чітко візуалізується мікроструктура матеріалу. Спостерігаються зерна матеріалу з відносно рівномірним розподілом; міжзеренні межі, що формують структурний каркас матеріалу; локальні мікронерівності поверхні, пов’язані з технологією обробки.

У структурі можуть також бути присутні: дрібні пори або включення, характерні для литих або порошкових матеріалів; окремі ділянки з різною контрастністю, що можуть відповідати різним фазам.

Загалом поверхня характеризується достатньою структурною однорідністю, що є важливим фактором для забезпечення стабільних триботехнічних властивостей.

Аналіз поверхні зразків із бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними компонентами після трибологічних випробувань показує суттєві зміни мікроструктури порівняно з початковим станом.

Таким чином, зношування має стабільний і контрольований характер, що підтверджує ефективність застосування даного матеріалу в підшипниках ковзання.

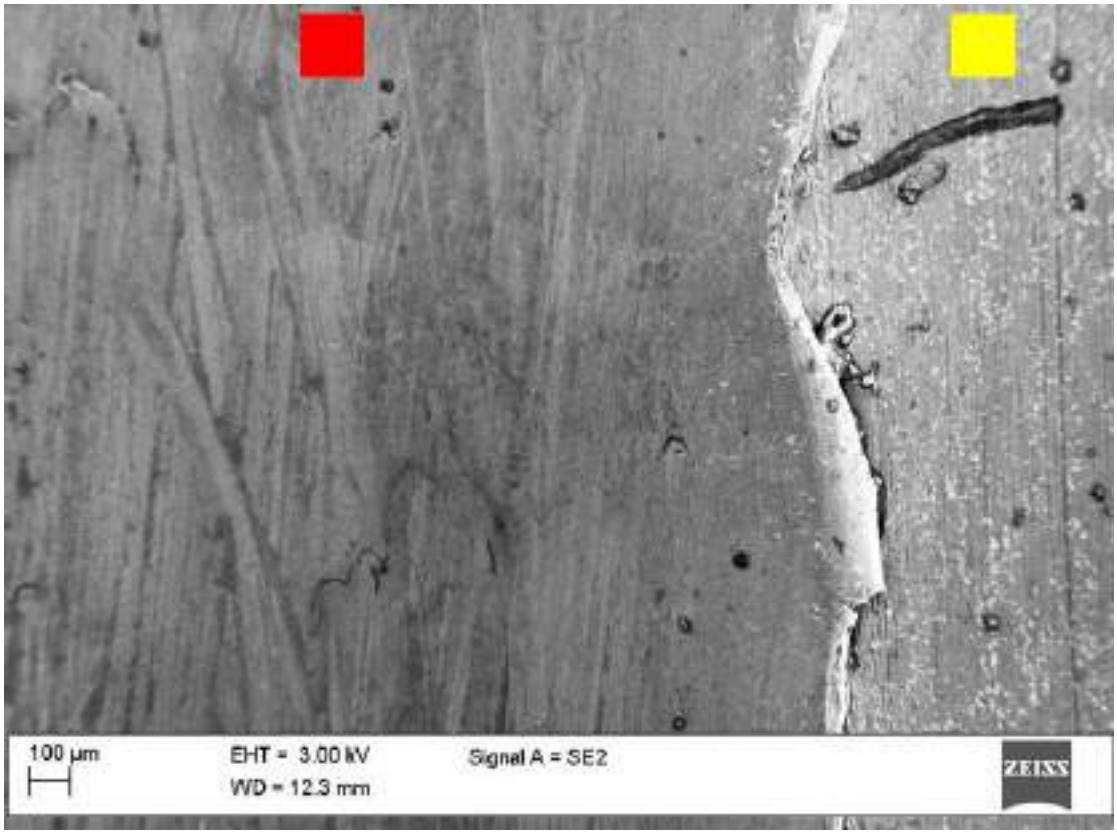

Рис. 26 – SEM-зображення поверхні зразка з бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками після випробування

Рисунок 26 – SEM-зображення поверхні зразка з бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками після випробування: спостерігається різниця між зношеною та незношеною ділянками; хвилеподібні структури відповідають слідам мастильного матеріалу, а темні включення – вбудованим частинкам зносу.

На поверхні формується характерна зона контакту у вигляді гладкої доріжки зношування, що свідчить про стабільний перебіг процесу тертя. Відсутність глибоких борозен і задирів підтверджує переважання м’яких механізмів зношування.

Основні спостереження: формування рівномірного згладженого сліду тертя; наявність тонкого трибологічного шару (плівки); відсутність інтенсивного руйнування поверхні; часткове заповнення мікронерівностей продуктами зношування.

Такий характер поверхні обумовлений наявністю твердих мастильних фаз (графіт, MoS_2), які: зменшують сили тертя; знижують локальні напруження; забезпечують самозмащення.

На рисунку 27 наведено SEM-зображення невипробуваного зразка з бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками. Збільшення становить ×1200, напруга прискорення електронного пучка – 20 кВ.

Як видно з рисунка 27, на поверхні формується стабільний трибологічний шар, що містить мастильні компоненти та частинки зносу, які вбудовуються в матеріал і знижують інтенсивність зношування.

На SEM-зображенні спостерігаються темні включення, які відповідають твердим мастильним фазам (графіт або MoS_2), рівномірно розподіленим у матриці матеріалу. Їх наявність забезпечує зниження коефіцієнта тертя та покращення триботехнічних властивостей.

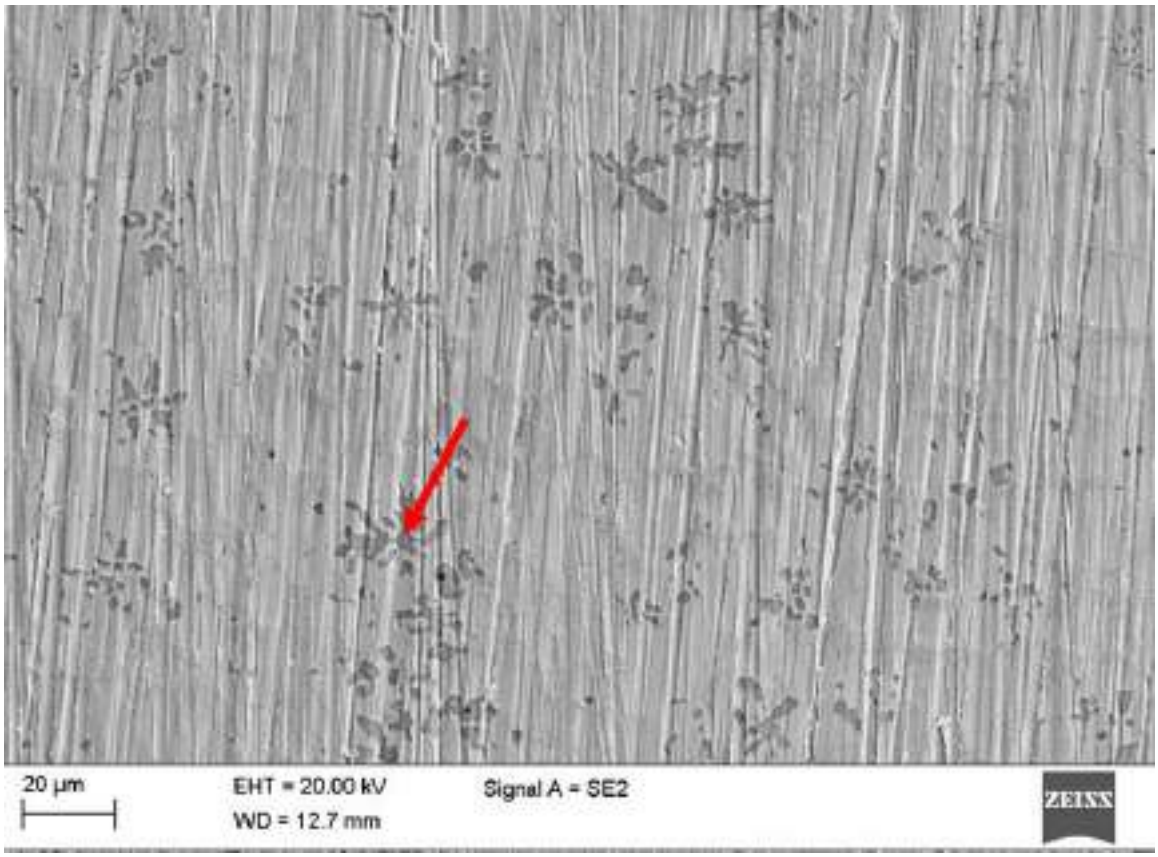

Рисунок 27 – SEM-зображення поверхні бронзи БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками при збільшенні ×1200

Приклад вигляду зразка після проведення випробувань наведено на рисунках 28 та 29. Перше зображення отримано при збільшенні ×100, друге – при збільшенні ×1200. Прискорююча напруга електронного пучка в обох випадках становить 20 кВ.

Поверхня після зношування є рівномірно згладженою, без виражених подряпин і з незначною кількістю вм’ятин. Спостерігається, що тверде мастило рівномірно розподілилося по поверхні, унаслідок чого сліди попередньої механічної обробки (шліфування) практично повністю зникли.

Зображення сліду від кульки. Зверніть увагу на відносно плавний перехід між зоною зношування (позначено червоним квадратом) та незношеною ділянкою (позначено жовтим квадратом). Плавний перехід між зонами свідчить про стабільний характер зношування та відсутність різкого руйнування поверхні.

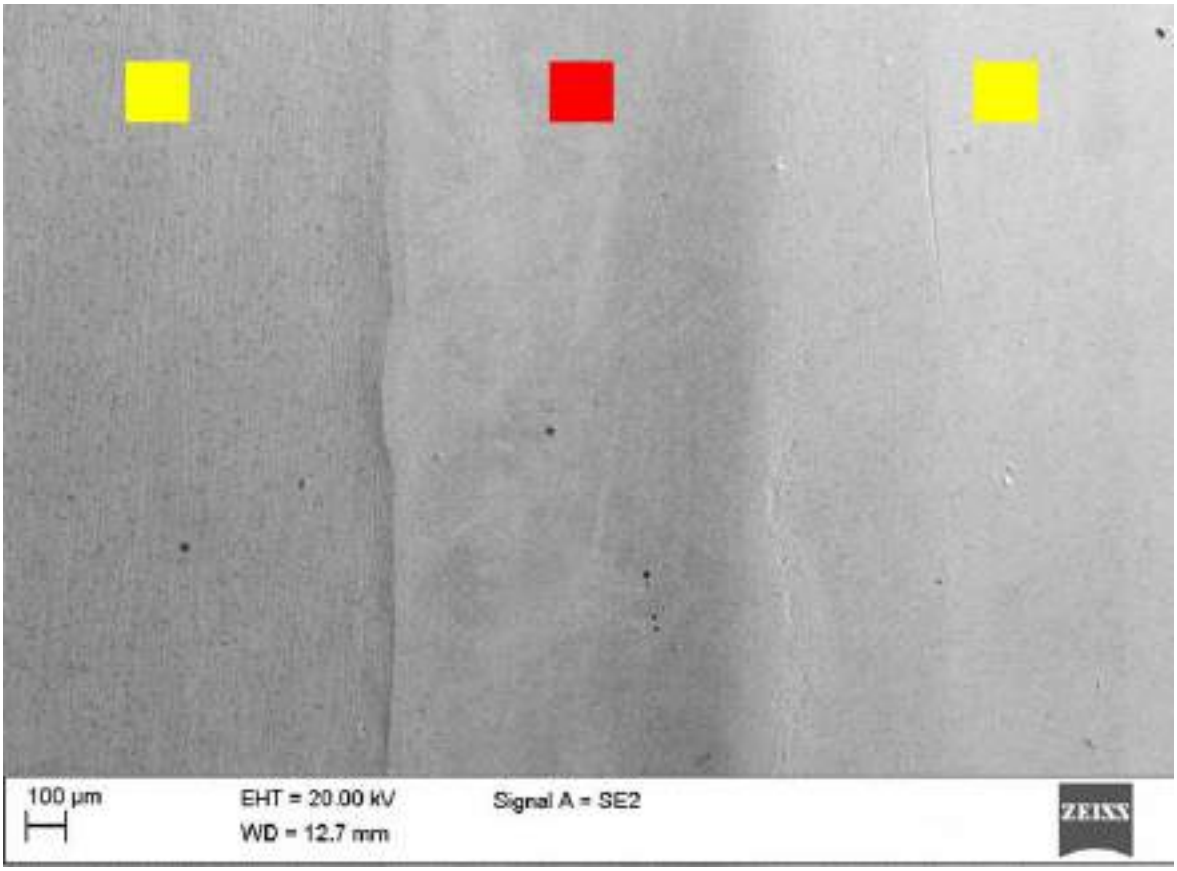

Рисунок 28 – Поверхня бронзи БрО10Ф1 після випробування ×100

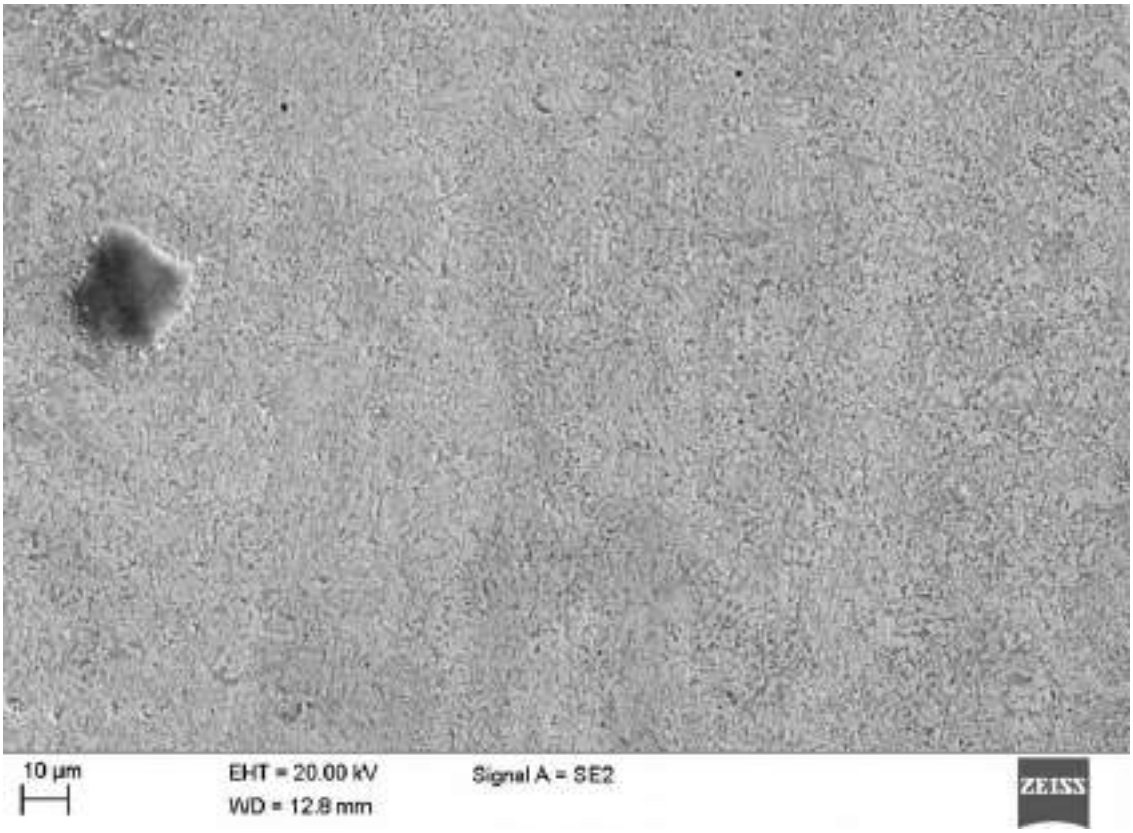

Рисунок 29 – Поверхня бронзи БрО10Ф1 після випробування ×1200

Зразки матеріалу сталі 40Х

На рисунку 30 наведено SEM-зображення невипробуваного зразка зі сталі 40Х. Збільшення становить ×1200, прискорююча напруга електронного пучка – 20 кВ.

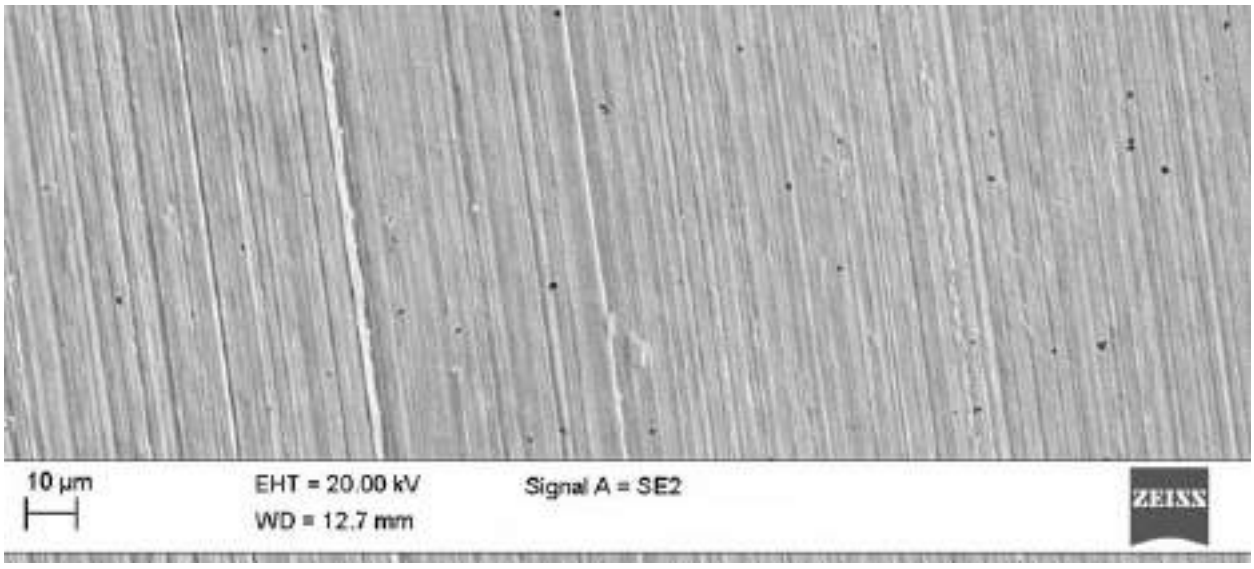

Рис. 30 – SEM-зображення поверхні зразка Сталь 40Х

Подряпини зумовлені процесом шліфування, а також спостерігається значний рівень пористості (темні точки).

Приклад вигляду зразків після проведення випробувань наведено на рисунках 31 та 32. Перше зображення отримано при збільшенні ×100, друге – при збільшенні ×1200. Прискорююча напруга електронного пучка в обох випадках становить 20 кВ.

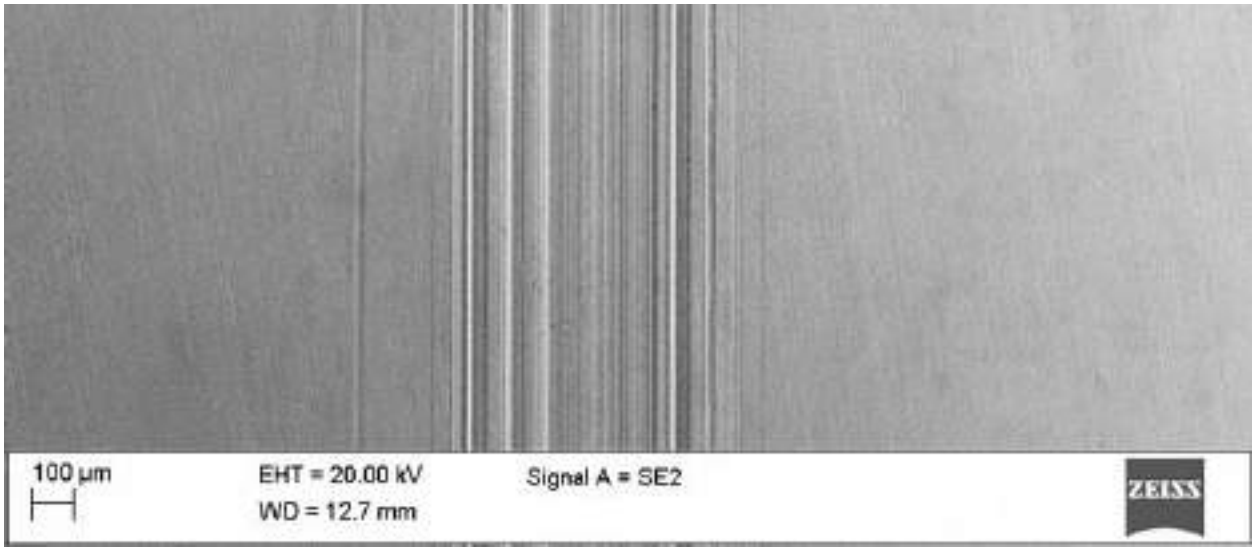

Рис. 31 – Поверхня зразка Сталь 40Х після випробування ×100

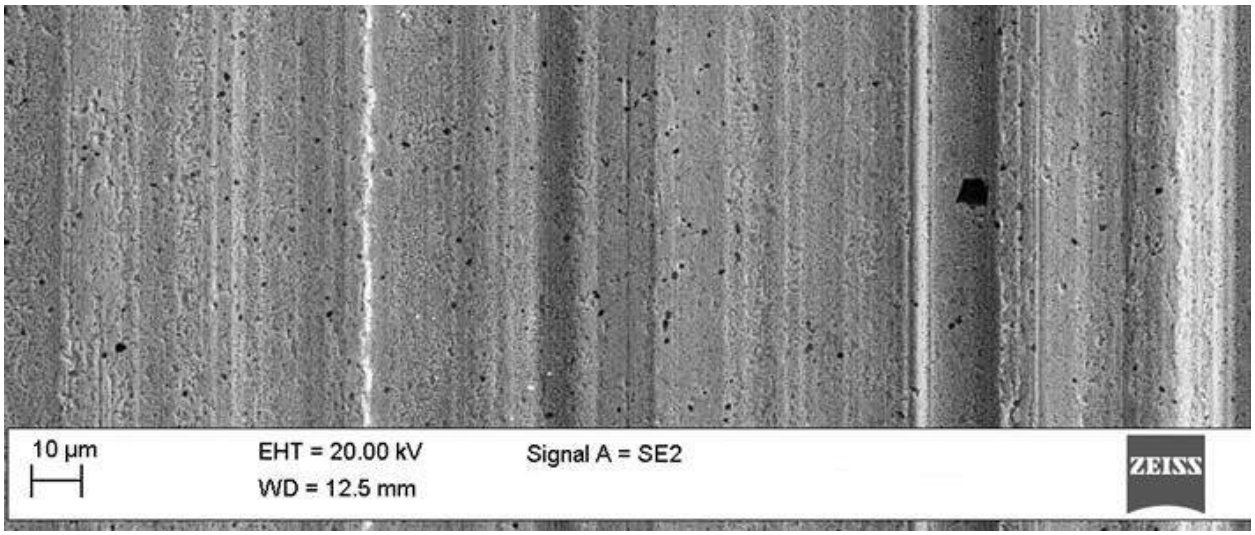

Рис. 32 – Поверхня зразка Сталь 40Х після випробування ×1200

Поверхня після зношування має виражений шорсткий характер, а доріжка зношування сформована поздовжніми подряпинами, що свідчить про розвиток абразивного механізму зношування.

На рисунку 32 спостерігається значна пористість поверхні, що може негативно впливати на міцність поверхневого шару та сприяти прискоренню процесів руйнування.

Для сталі 40Х характерний інший механізм зношування, що обумовлений високою твердістю та відсутністю мастильних компонентів. Це зумовлює: виникнення абразивного зношування; утворення мікрорізання поверхні; наявність задирів і локальних пошкоджень.

У процесі тертя відбувається руйнування мікронерівностей, утворюються тверді частинки зносу, частинки потрапляють у зону контакту та підсилюють зношування. Це призводить до розвитку так званого вторинного абразивного зношування, яке значно прискорює деградацію поверхні.

4.4. Твердість матеріалів

У таблиці 4.9 наведено результати вимірювання твердості досліджуваних матеріалів. Визначення твердості проводилось методом Віккерса.

Таблиця 4.9. Результати вимірювання твердості матеріалів

Матеріал	**Твердість, HV**
Еталонний матеріал (на основі Al)	41
БрО10Ф1 + графіт / MoS_2	262
Сталь 40Х	353

Аналіз отриманих результатів свідчить про суттєву різницю в твердості між еталонним матеріалом та досліджуваними матеріалами.

Еталонний матеріал, що базується на алюмінієвій основі, характеризується низькою твердістю, що є типовим для м’яких металів. Натомість бронза БрО10Ф1 з твердими мастильними добавками та сталь 40Х мають значно вищі значення твердості.

Підвищена твердість сталі 40Х обумовлена її легованим складом та можливістю термічного зміцнення. Бронза БрО10Ф1, хоча і має нижчу твер-

дість порівняно зі сталлю, забезпечує оптимальне поєднання механічної міцності та антифрикційних властивостей.

Отримані результати узгоджуються з теоретичними положеннями та пояснюють відмінності у поведінці матеріалів під час трибологічних випробувань.

Незважаючи на нижчу твердість, бронза БрО10Ф1 демонструє кращі антифрикційні властивості завдяки наявності твердих мастильних фаз, що підтверджує визначальну роль структури матеріалу у формуванні триботехнічних характеристик.

Вища твердість не означає кращу роботу в терті –
важливіша структура.

4.5. Режим мащення

Відповідно до підпункту 1.3, за допомогою програмного середовища MATLAB було розраховано мінімальну товщину мастильного шару, а також безрозмірний параметр плівки. Отримані результати представлені у вигляді залежностей від швидкості обертання шийки вала, що наведено на рисунках 33 та 34. Розрахунки виконано для еталонного підшипника, що дозволяє використовувати отримані значення як базові для подальшого порівняння з досліджуваними матеріалами.

Як видно з наведених графіків, значення параметра мастильної плівки свідчать про формування гідродинамічного режиму мащення при швидкості обертання понад 4 об/с. За цих умов мінімальна товщина мастильного шару становить приблизно 2 мкм.

Зазначені значення отримані для температури мастильного матеріалу 60 °C. Підвищення температури до 100 °C призводить до зниження в’язкості мастила, що, у свою чергу, погіршує його несучу здатність.

У зв’язку з цим для досягнення гідродинамічного режиму мащення при підвищених температурах необхідні більші швидкості обертання.

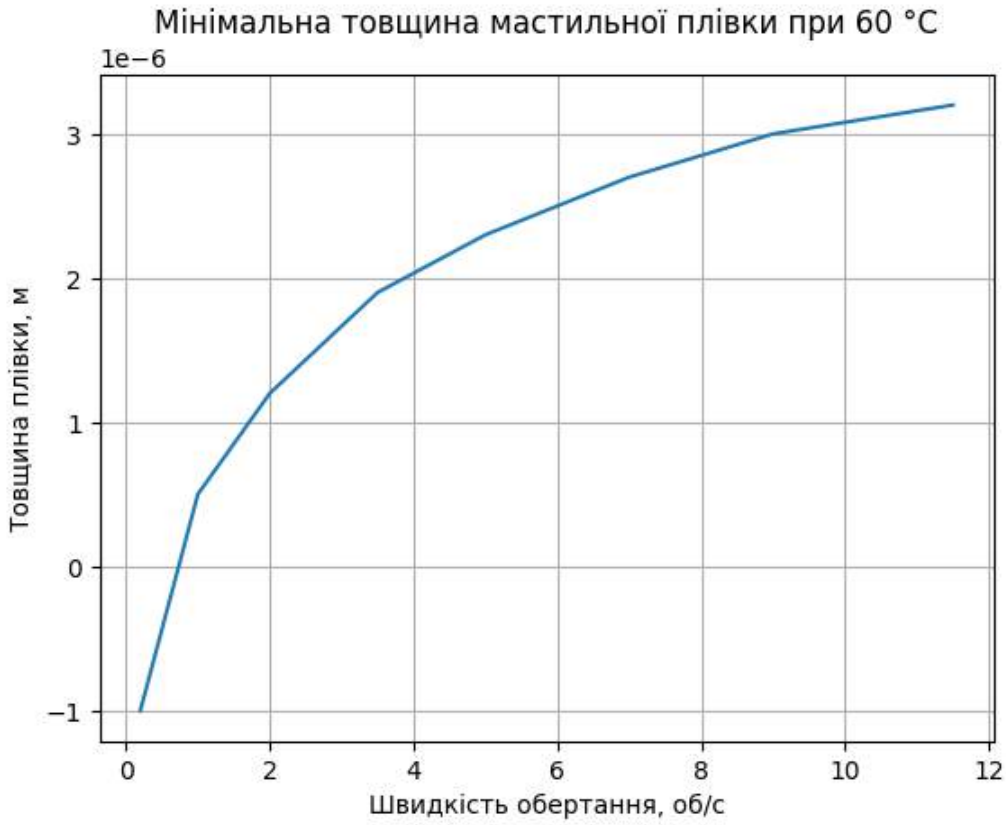

Рис. 33 – Залежність мінімальної товщини мастильної плівки від швидкості обертання

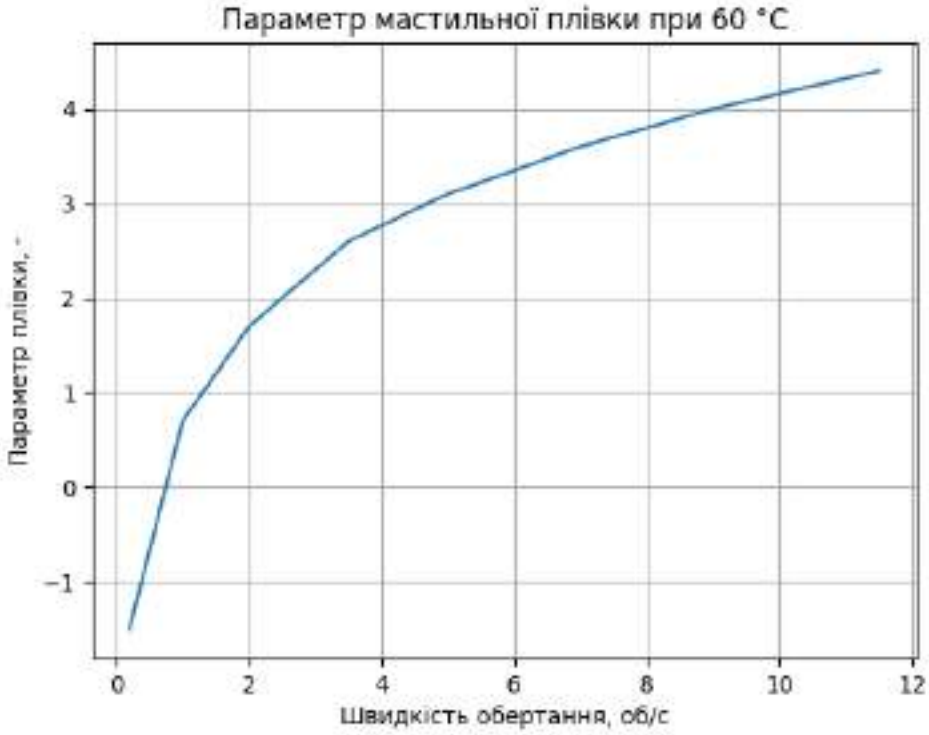

Рис. 34 – Залежність параметра мастильної плівки від швидкості обертання; значення A > 3 досягається при швидкості понад 4 об/с.

4.6 Узагальнення результатів дослідження

На основі проведеного аналізу встановлено такі закономірності:

1. Структура матеріалу визначає його триботехнічні властивості.
2. Поєднання м’яких і твердих фаз забезпечує оптимальні характеристики.
3. Сучасні покриття значно підвищують зносостійкість поверхонь.
4. Найбільш ефективними є багатошарові та композиційні системи.
5. Комплексне застосування методів дослідження дозволяє повно оцінити поведінку матеріалів.

Практичні рекомендації.

За результатами дослідження можна рекомендувати:

1. Застосування алюмінієвих сплавів типу Al–Sn–Si для підшипників ДВЗ;
2. Використання DLC-покриттів для зниження тертя;
3. Впровадження лазерного наплавлення для відновлення деталей;
4. Застосування матеріалів із твердими мастилами для режимів start-stop.

Висновок до розділу 4.

Отримані результати підтверджують, що підвищення зносостійкості підшипників ковзання досягається шляхом оптимізації структури матеріалу та застосування сучасних покриттів. Комплексний підхід до вибору матеріалів і технологій дозволяє значно підвищити ефективність роботи вузлів тертя.

ВИСНОВОК

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра було досліджено вплив структури та складу поверхневих шарів на триботехнічні характеристики підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається із чотирьох розділів.

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

У другому розділі проаналізовано склад, структуру та технології отримання поверхневих шарів, зокрема методи лазерного наплавлення, PVD/CVD-покриттів та дифузійного зміцнення. Обґрунтовано вибір матеріалів.

Третій розділ містить опис трибологічних випробувань та аналізу поверхні за допомогою сканувальної електронної мікроскопії. Наведено методики визначення коефіцієнта тертя, зношування та параметрів поверхні, а також розрахунку товщини мастильної плівки і режимів мащення.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Встановлено, що бронза БрО10Ф1 з твердими мастильними фазами забезпечує стабільний коефіцієнт тертя, низький рівень зношування та формування захисного трибологічного шару. Для сталі 40Х характерні підвищений коефіцієнт тертя, розвиток абразивного зношування та утворення борозен. Встановлено, що формування гідродинамічного режиму мащення відбувається при швидкостях понад 4 об/с.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 62 сторінок, і містить у собі 34 ілюстрації, 17 джерел, 13 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ, ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, МАСТИЛЬНА ПЛІВКА, ЛАЗЕРНЕ НАПЛАВЛЕННЯ, SEM-АНАЛІЗ, ГІДРОДИНАМІЧНЕ МАЩЕННЯ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 1–28.

2. Gwidon Stachowiak, Andrew W. Batchelor. Engineering Tribology. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2023. 884 p.

3. Wei C., Liao G., Wang W. 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.

4. Xie Z., et al. Experimental and numerical study on the mixed lubrication performances of bearings. Tribology International. 2023.

5. Bastidas S., Allmaier H. Friction and wear in journal bearings: accurate testing and simulation. In: IntechOpen. 2023.

6. Koetz F., et al. Visualising the lubrication condition in hydrodynamic journal bearings. Frontiers in Mechanical Engineering. 2024.

7. Wang Y., Jacobs G., Zhang S. Lubrication mechanism analysis of textures in journal bearings using CFD simulations. Industrial Lubrication and Tribology. 2025.

8. Mishra S., Aggarwal S. A review of performance of textured journal bearing. Tribology Online. 2023.

9. Profito F. J., et al. Numerical and experimental investigation of textured journal bearings. Tribology International. 2024.

10. Dini D., et al. A comprehensive review of journal bearing models. Journal of Tribology. 2025.

11. Jiao K., Yang H., Zhang H. A state-of-the-art review on water-lubricated bearings. Tribology International. 2023.

12. Goldstein J., Newbury D., Joy D., et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 4th ed. New York: Springer, 2018. 550 p.

13. Reimer L., Kohl H. Transmission Electron Microscopy: Physics of Image Formation. 6th ed. Cham: Springer, 2023. 700 p.

14. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. Journal of Materials Research. 2023. Vol. 38.

15. Blau P. J. Friction Science and Technology: From Concepts to Applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. 900 p.

16. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. Engineering Tribology. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2023. 884 p.

17. Salomon J. New materials in sliding bearings. Master of Science Thesis. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2015. 80 p.

Д О Д А Т К И