

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Дослідження триботехнічних властивостей сучасних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала в умовах змішаного мащення»

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

Шифр **КвРМТВА. 23107.02.01.00**

Виконав студент 4 курсу група МТВАс-23-2



Олег ГУЛЯК

Підпис

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



Павло КАПЛУН

Підпис

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



Олег БАБАК

Підпис

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026



Олександр ДИХА


Підпис

Дата

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 Диха О.В.
2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гуляку Олегу Руслановичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Дослідження триботехнічних властивостей сучасних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала в умовах змішаного мащення.*

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 умов та факторів впливу.*

2) *Постановка задачі.*

3) *Методи експериментальних досліджень та матеріали.*

4) *Результати досліджень та їх обговорення.*

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 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз умов та факторів впливу</i>	28.05.2026	<i>вик</i>
2	<i>Постановка задачі</i>	4.06.2026	<i>вик</i>
3	<i>Методи експериментальних досліджень та матеріали</i>	8.06.2026	<i>вик</i>
4	<i>Результати досліджень та їх обговорення</i>	12.06.2026	<i>вик</i>
5	<i>Висновки</i>	14.06.2026	<i>вик</i>
6	<i>Захист роботи</i>	16.06.2026	

Студент

Олег ГУЛЯК

Керівник роботи

Павло КАПЛУН

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАс-23-2: Гуляк О.Р.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Дослідження триботехнічних властивостей сучасних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала в умовах змішаного мащення» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 12 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 12 сторінках. Роботу викладено на 62 сторінках, з них 58 сторінок основного тексту, на яких розміщено 23 рисунків і 7 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню триботехнічної характеристики матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння та обґрунтовано їх вплив на процеси тертя і зношування в умовах змішаного мащення.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи роботи підшипників ковзання, режими мащення та фактори, що впливають на формування мастильної плівки і втрати на тертя.

У другому розділі проаналізовано сучасні матеріали підшипників, зокрема сплави Al–Sn–Si–Cu, полімерні покриття на основі ПАІ, тверді мастильні компоненти (MoS_2 , графіт) та матеріали на основі вісмуту. Показано ефективність багатошарових структур.

У третьому розділі описано методику експериментальних досліджень, обґрунтовано вибір установки та параметрів випробувань, змодельовано реальні умови роботи підшипників, включаючи переки і змінні режими.




У четвертому розділі наведено результати досліджень. Встановлено, що покриття ПАІ + MoS_2 та ПАІ + графіт + SiC забезпечують найкращі показники тертя і зносостійкості. Підтверджено значний вплив текстури поверхні вала на роботу підшипника.

Отримані результати підтверджують, що застосування сучасних покриттів і оптимізація мікрогеометрії дозволяють знизити втрати на тертя та підвищити довговічність вузла.

Ключові слова: ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ, КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, ЗМІШАНЕ МАЩЕННЯ, ЗНОШУВАННЯ, ПОЛІМЕРНІ ПОКРИТТЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ УМОВ ТА ФАКТОРІВ ВПЛИВУ	8
1.1. Теоретичні основи роботи підшипників ковзання	8
1.2. Система підшипників двигуна	11
1.3. Трибологічний аналіз корінних підшипників двигуна	13
1.4. Вимоги до матеріалів підшипників ковзання	16
1.5. Матеріали підшипників ковзання	19
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	24
2.1. Мета та завдання дослідження	25
2.2. Об'єкт дослідження	25
3. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МАТЕРІАЛИ	27
3.1. Матеріали	33
3.2. Мастильний матеріал	38
3.3. Параметри випробувань	40
3.4. Підготовка до проведення експерименту	45
4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	48
4.1. Дослідження в умовах перекоосу	49
4.2. Триботехнічні характеристики тертя	53
4.3. Висновки та перспективи роботи	57
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ	62

КвРМТВА. 23107.02.01.00									
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Дослідження триботехнічних властивостей сучасних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала в умовах змішаного машення	Літера	Аркуш	Аркушів	
Виконав		Гуляк						4	62
Перевір.		Каплун							
Н.контр. Затвер.		Бабак Диха					ХНУ, МТВАс-23-2		

ВСТУП

Зростання екологічних вимог і глобальні ініціативи щодо обмеження викидів парникових газів суттєво впливають на розвиток автомобільної галузі. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння є зменшення механічних втрат, які безпосередньо пов'язані з процесами тертя у вузлах тертя. Відомо, що транспортний сектор формує значну частку глобальних викидів CO₂, а також споживає істотну частину енергетичних ресурсів, що обумовлює необхідність впровадження енергоефективних технічних рішень [1].

Сучасні нормативні обмеження, зокрема стандарти викидів типу Euro, SAFE та інші міжнародні регуляції, стимулюють розробку нових конструкцій двигунів і вдосконалення їх елементів. При цьому важливу роль відіграє зниження втрат енергії на тертя, які можуть досягати значної частки загальних енергетичних витрат двигуна. Дослідження показують, що лише невелика частина енергії палива перетворюється у корисну механічну роботу, тоді як значна частка втрачається через тертя, теплові процеси та інші фактори [1]. У цьому контексті оптимізація триботехнічних характеристик вузлів тертя є одним із найбільш ефективних шляхів підвищення загального ККД двигуна.

Особливе місце серед вузлів тертя займають корінні підшипники колінчастого вала, які забезпечують опору та обертання вала під дією змінних навантажень. Вони працюють в умовах складних режимів мащення, включаючи гідродинамічний, змішаний та граничний режими, що визначаються швидкістю обертання, навантаженням, температурою та властивостями мастильного матеріалу. Незважаючи на те, що підшипники розраховані на роботу в умовах повного гідродинамічного мащення, у реальних умовах експлуатації, особливо під час пуску та зупинки двигуна, вони функціонують у змішаному режимі, де можливий контакт мікронерівностей поверхонь і, відповідно, інтенсивніше зношування [2].

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значна частка механічних втрат у двигуні припадає на підшипники ковзання колінчастого вала показано на рисунку 1.

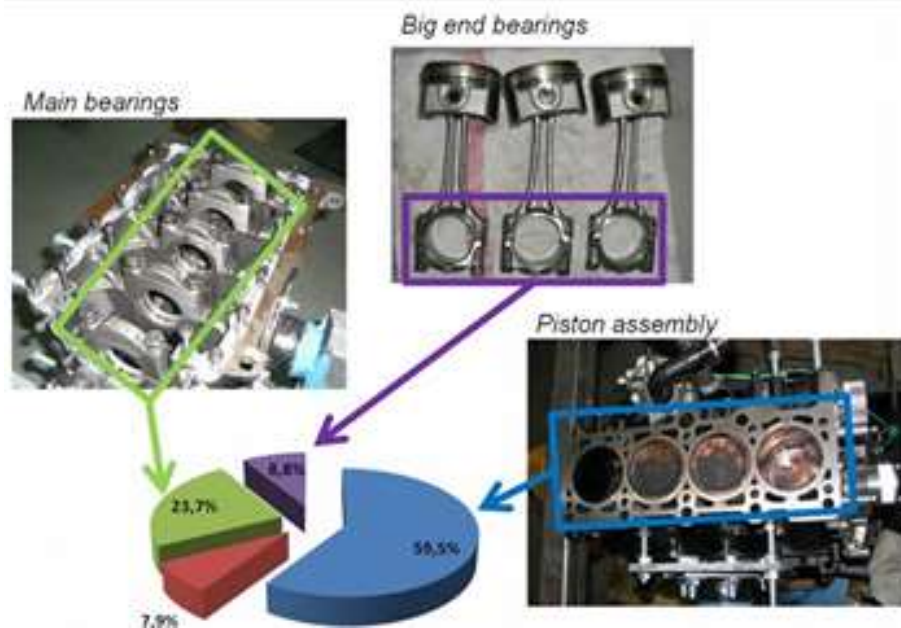


Рис. 1 – Загальний вигляд колінчастого вала

Важливим напрямом сучасних досліджень є вдосконалення матеріалів та покриттів вкладишів підшипників. Традиційні матеріали, що містили свинець, поступово замінюються безсвинцевими аналогами через екологічні обмеження. Як альтернатива застосовуються алюмінієві сплави з оловом і кремнієм, полімерні покриття, композиції на основі MoS₂, графіту, а також багат шарові структури, які поєднують високу міцність і здатність до приработки [3]. Такі матеріали дозволяють знизити коефіцієнт тертя, підвищити зносостійкість і забезпечити стабільність роботи в умовах змінного навантаження.

Крім матеріалів, значний вплив на триботехнічні характеристики має стан поверхні шийок колінчастого вала. Мікрогеометрія, шорсткість і текстура поверхні визначають формування мастильної плівки та умови контакту в зоні тертя. Використання спеціальних текстурованих поверхонь, таких як plateau-структури або мікроканавки, сприяє утриманню мастила, зменшенню контактної взаємодії та покращенню умов роботи підшипників у змішаному режимі мащення [2].

Підвищення триботехнічної ефективності системи «шийка колінчастого вала – підшипник ковзання» є комплексною задачею, що включає оптимізацію матеріалів, покриттів, параметрів поверхні та умов мащення. Навіть незначне зниження коефіцієнта тертя може призвести до відчутного зменшення витрат палива та підвищення ресурсу двигуна, що має важливе економічне та екологічне значення. У зв'язку з цим дослідження сучасних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників в умовах змішаного мащення є актуальним і перспективним напрямом триботехнічного матеріалознавства.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1. АНАЛІЗ УМОВ ТА ФАКТОРІВ ВПЛИВУ

1.1. Теоретичні основи роботи підшипників ковзання

Підшипник ковзання у найпростішому вигляді являє собою жорсткий металевий циліндр, який охоплює та підтримує обертову шийку вала. У двигунах внутрішнього згоряння корінні підшипники, як правило, є гідродинамічними та розраховані на роботу в умовах повного розділення поверхонь мастильною плівкою. Зазор між шийкою вала та вкладишем є малим і зазвичай становить близько $1/1000$ діаметра, однак саме він забезпечує формування мастильного шару. Основною перевагою таких підшипників є наявність спряжених (конформних) поверхонь, які розподіляють навантаження на значну площу контакту, що дозволяє суттєво знизити контактні напруження порівняно з підшипниками кочення [2].

У стані спокою шийка вала контактує з нижньою поверхнею вкладиша. Під час початку обертання між поверхнями формується тонкий шар мастила, який під дією гідродинамічних ефектів піднімає вал. Із зростанням швидкості обертання утворюється клиноподібний зазор, у якому мастило затягується в зону контакту, а його в'язкість забезпечує сприйняття навантаження. У зоні збіжності зазору відбувається зростання тиску мастила, тоді як у зоні розбігу – його падіння, що може призводити до кавітаційних явищ. Таким чином, навантаження сприймається лише ділянкою збіжного клина, де формується гідродинамічний тиск [2].

Рівноважне положення шийки вала визначається балансом між прикладеним навантаженням, гідродинамічним тиском у мастильній плівці та силами тертя. У процесі роботи двигуна це положення змінюється залежно від режиму – від повного контакту при пуску до стабільного гідродинамічного режиму при номінальних обертах. Саме перехідні режими (пуск, зупинка, змінні навантаження) є найбільш критичними з точки зору зношування і визначають актуальність досліджень у умовах змішаного мащення [4].

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Розподіл тиску в мастильній плівці описується рівнянням Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\eta U \cdot \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1.2)$$

де: h – товщина мастильної плівки, м;

η – динамічна в'язкість, Па·с;

P – тиск у мастильній плівці, Па;

U – лінійна швидкість поверхні, м/с;

x – колова координата;

z – осьова координата.

Важливим фактором, що визначає працездатність підшипника, є ексцентриситет – зміщення центрів вала і підшипника. Зі збільшенням ексцентриситету зростає ризик локального контакту та підвищується навантаження на окремі ділянки вкладиша, що може спричинити прискорене втомне руйнування. Водночас надто малий ексцентриситет призводить до нестійкості системи та виникнення вібрацій. Отже, оптимальне значення ексцентриситету визначається балансом між стабільністю та мінімізацією контактної взаємодії [4].

Температурний режим також відіграє критичну роль. Підвищення температури в зоні контакту призводить до зниження в'язкості мастила, що, у свою чергу, зменшує товщину мастильної плівки та може спричинити її руйнування. Крім того, різниця коефіцієнтів теплового розширення матеріалів вала, вкладиша та корпусу може змінювати зазор, що додатково впливає на умови мащення. У граничних випадках це призводить до переходу в режим граничного тертя та ризику задиру [3].

Ефективна робота підшипників ковзання визначається комплексною взаємодією геометричних, матеріалознавчих і експлуатаційних факторів. Особливу увагу при цьому слід приділяти умовам змішаного мащення, в яких властивості матеріалів і покриттів вкладишів відіграють вирішальну роль у забезпеченні надійності та довговічності вузла.

									Арк.
									10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u>				

1.2. Система підшипників двигуна

У двигунах внутрішнього згорання корінні підшипники виконують ключову функцію забезпечення опори колінчастого вала, створюючи умови для його вільного обертання та мінімізуючи безпосередній контакт поверхонь тертя. Вони належать до підшипників ковзання журнального типу та, як правило, працюють у режимі гідродинамічного мащення, за якого поверхні вала і вкладиша повністю розділені мастильною плівкою. Такий режим дозволяє істотно зменшити коефіцієнт тертя, підвищити довговічність вузла та знизити енергетичні втрати.

Конструктивно підшипники виконуються у вигляді роз'ємних втулок, що складаються з двох напіввкладишів – верхнього та нижнього. Верхній вкладиш має отвір і канавку для підведення мастила, що забезпечує рівномірний розподіл мастильного матеріалу по контактній поверхні. Нижній вкладиш є основним навантаженим елементом, який сприймає сили від колінчастого вала, тому, як правило, не має канавок для збереження максимальної несучої здатності. Підшипники жорстко встановлюються в блоці циліндрів двигуна, утворюючи разом із валом систему, що працює в умовах змінних динамічних навантажень.

Колінчастий вал перетворює зворотно-поступальний рух поршнів у обертальний через шатунний механізм. У процесі роботи на підшипники діють значні інерційні та газові сили, що мають циклічний характер і викликають складні напружено-деформовані стани. Це обумовлює високі вимоги до матеріалів вкладишів, їх структури та покриттів, особливо з урахуванням роботи в умовах змінного режиму мащення.

Мастильна система двигуна забезпечує подачу оливи під тиском до підшипників. Олива виконує одночасно декілька функцій: зменшує тертя, відводить тепло від зони контакту та видаляє продукти зношування. Вона подається з картера через систему каналів, фільтрується та циркулює в замкненому контурі. Стабільність параметрів мастила, зокрема в'язкості та

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

температури, є визначальною для формування гідродинамічного клина та запобігання переходу до граничного тертя.

У реальних умовах експлуатації підшипники не завжди працюють у ідеальному гідродинамічному режимі. Під час пуску, зупинки або різких змін навантаження виникають режими змішаного мащення, при яких частина навантаження передається через контакт мікронерівностей поверхонь. Це призводить до підвищеного зношування та обґрунтовує необхідність застосування сучасних матеріалів і покриттів із покращеними антифрикційними властивостями.

Схема двигуна внутрішнього згоряння із позначенням основних вузлів та розташуванням корінних підшипників наведено на рисунку 3.

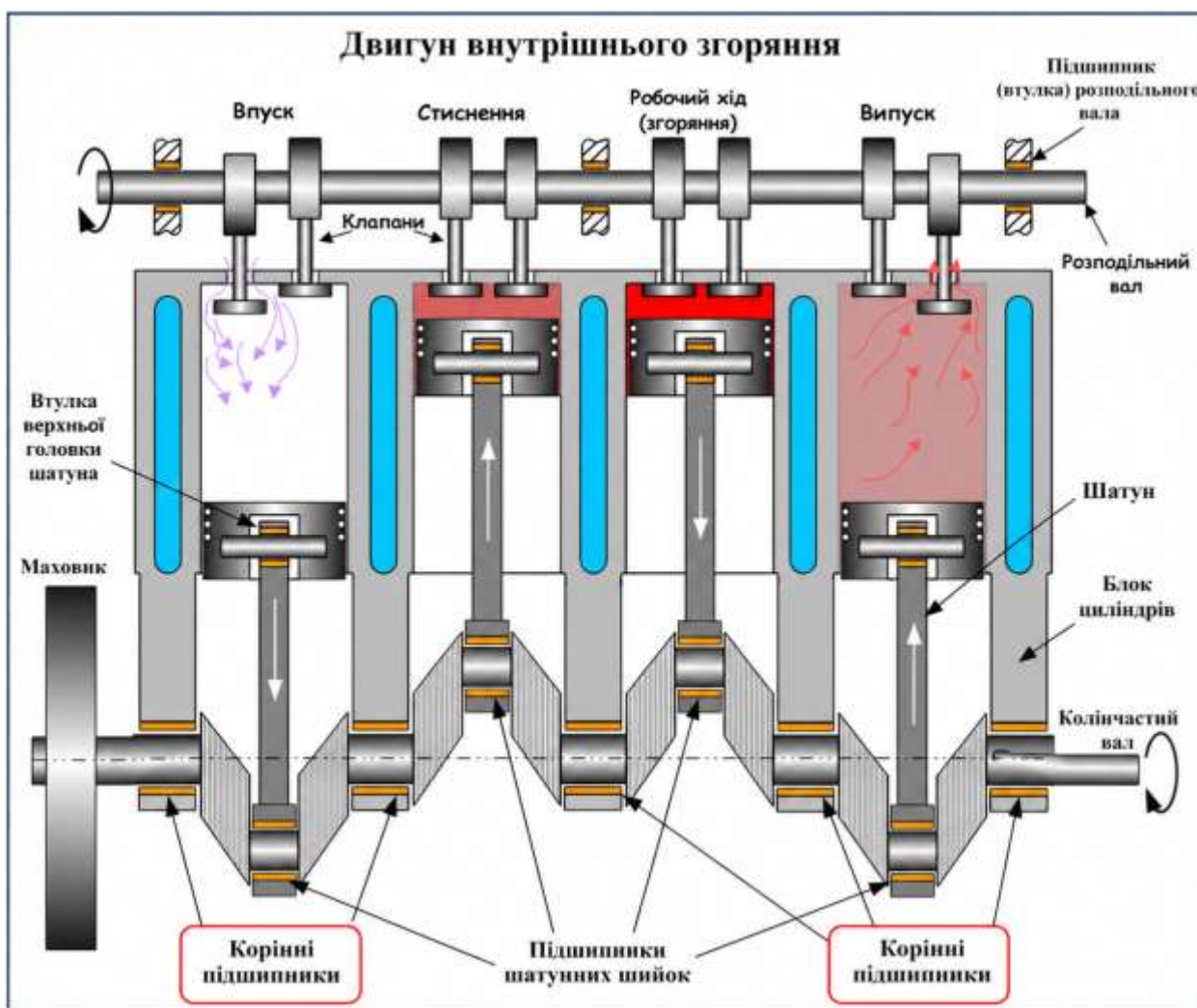


Рис. 3 – Схема двигуна внутрішнього згоряння із позначенням основних вузлів та розташуванням корінних підшипників

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА. 23107.02.01.00

Арк.

12

Система корінних підшипників колінчастого вала є складною трибологічною системою, ефективність якої визначається конструктивними параметрами, режимами навантаження та властивостями матеріалів. Оптимізація цих факторів є важливим напрямом підвищення надійності та енергоефективності двигунів внутрішнього згоряння.

1.3. Трибологічний аналіз корінних підшипників двигуна

Незважаючи на те, що корінні підшипники колінчастого вала проєктуються для роботи в умовах повного гідродинамічного мащення, за яких поверхні вала і вкладиша повністю розділені мастильною плівкою, у реальних умовах експлуатації ці вимоги не завжди виконуються. Під час пуску та зупинки двигуна, а також при змінних навантаженнях і несприятливих режимах роботи, підшипники можуть функціонувати в умовах граничного або змішаного мащення, що супроводжується підвищеним тертям і інтенсивнішим зношуванням [2], [4].

Для аналізу триботехнічної поведінки підшипників широко використовується крива Штрібека, яка відображає залежність коефіцієнта тертя від параметра, що враховує швидкість, в'язкість мастила та навантаження. Вона дозволяє виділити три характерні режими мащення: граничний, змішаний та гідродинамічний. Крива Штрібека є важливим інструментом для визначення оптимальних умов роботи підшипникового вузла та вибору матеріалів і покриттів [6]. Характер залежності коефіцієнта тертя від параметрів режиму мащення наведено на рисунку 4.

Коефіцієнт тертя у підшипниках ковзання залежить від комплексу факторів, зокрема геометрії контакту, властивостей матеріалів, типу мастильного матеріалу, навантаження, швидкості обертання, температури та шорсткості поверхонь. Оптимізація цих параметрів є складною інженерною задачею, оскільки зміна одного з них може суттєво впливати на інші. Проєкт підшипники необхідно враховувати їх взаємний вплив і умови експлуатації.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Гідродинамічний режим є найбільш сприятливим, оскільки забезпечує повне розділення поверхонь тертя мастильною плівкою. У цьому випадку відсутній прямиий контакт поверхонь, а отже, і зношування практично не відбувається. Коефіцієнт тертя визначається переважно внутрішнім тертям у мастильному матеріалі. Такий режим досягається при високих швидкостях обертання, достатній в'язкості мастила та відносно невеликих навантаженнях.

Для узагальнення впливу швидкості, в'язкості та навантаження використовується параметр Герсі:

$$H = \frac{(N \cdot \eta)}{P}, \quad (1.3)$$

де: N – швидкість обертання;

η – динамічна в'язкість мастила;

P – питоме навантаження.

Важливим фактором, що впливає на формування мастильної плівки, є шорсткість поверхонь. Мінімальна товщина мастильної плівки у корінних підшипниках двигуна становить приблизно 1 мкм. Для оцінки умов контакту використовується параметр λ :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (1.4)$$

де: h – товщина мастильної плівки;

σ_1, σ_2 – середньоквадратичні значення шорсткості поверхонь вала та підшипника.

Чим більше значення λ , тим вища ймовірність повного розділення поверхонь і тим сприятливіші умови мащення.

Суттєвий вплив на триботехнічні характеристики має мікрогеометрія поверхні. У сучасних двигунах поверхні підшипників часто виконуються з наявністю мікроканалок або текстур, що сприяють утриманню мастила та покращенню умов його розподілу. Дослідження показують, що такі мікроструктури дозволяють підвищити втомну міцність, зменшити витік мастила, покращити приробіток поверхонь і знизити робочу температуру

						<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15

вузла за рахунок кращого теплообміну [6]. Крім того, текстуровані поверхні сприяють стабілізації режиму змішаного мащення та зменшенню коефіцієнта тертя в перехідних режимах роботи [7].

Триботехнічна ефективність корінних підшипників визначається не лише режимом мащення, але й комплексом факторів, включаючи матеріали, покриття та мікрогеометрію поверхонь. Це обґрунтовує необхідність дослідження сучасних матеріалів і покриттів вкладишів у умовах змішаного мащення як найбільш критичного режиму роботи.

1.4. Вимоги до матеріалів підшипників ковзання

Вибір матеріалів для підшипників ковзання є складною інженерною задачею, оскільки довговічність їх роботи визначається поєднанням суперечливих властивостей. З одного боку, матеріал повинен мати високу міцність для забезпечення несучої здатності, стійкості до зношування та кавітаційної ерозії. З іншого – необхідна певна «м'якість», що забезпечує здатність до приработки, конформність і здатність вміщувати сторонні частинки. Саме поєднання цих властивостей є визначальним при проектуванні сучасних підшипників ковзання [2].

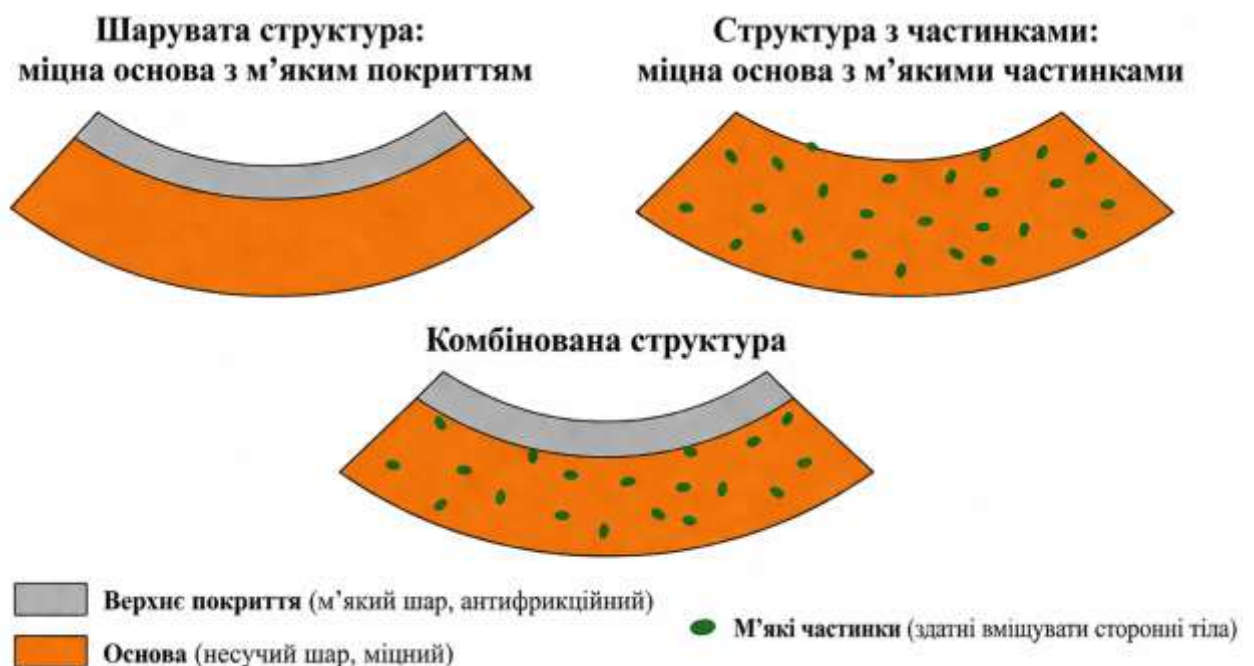


Рис. 5 – Композитна структура підшипників ковзання

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

взаємній дифузії елементів між шарами, що може призводити до утворення крихких інтерметалічних сполук та погіршення адгезії. Наприклад, дифузія олова в мідь може викликати формування крихких фаз Cu–Sn, що негативно впливає на експлуатаційні властивості покриття.

Зовнішній шар (overlay) являє собою тонке функціональне покриття товщиною кілька мікрметрів, яке наноситься методами електроосадження або фізичного осадження з парової фази. Його основною функцією є покращення триботехнічних характеристик, зокрема зниження коефіцієнта тертя, підвищення стійкості до задиру та забезпечення ефективної приработки на початкових стадіях експлуатації. Водночас товщина покриття обмежується, оскільки її збільшення може призвести до зниження втомної міцності системи [8].

До матеріалів підшипників ковзання висувається комплекс вимог, які визначають їх експлуатаційну надійність.

Втомна міцність є критично важливою характеристикою, оскільки підшипники працюють під дією циклічних навантажень, що виникають унаслідок процесів згоряння та інерційних сил. Висока втомна міцність забезпечує здатність матеріалу витримувати тривалу роботу без руйнування.

Зносостійкість визначає здатність матеріалу зберігати геометричні параметри в умовах тертя, навіть при наявності абразивних частинок у мастилi. Основними механізмами зношування є абразивне, адгезійне, втомне та корозійне [2].

Стійкість до задиру (схоплювання) характеризує здатність матеріалу запобігати зварюванню поверхонь при безпосередньому контакті. Це особливо важливо в умовах граничного та змішаного мащення, коли мастильна плівка є недостатньою.

Конформність визначає здатність матеріалу компенсувати геометричні похибки та перекося в системі «вал–підшипник». Недостатня конформність призводить до локальних перевантажень і прискореного зношування.

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

КвРМТВА. 23107.02.01.00

Вміщуваність (embeddability) полягає у здатності матеріалу поглинати тверді частинки забруднень, що циркулюють у мастильному матеріалі. Це запобігає пошкодженню поверхонь тертя та зменшує ризик аварійних режимів.

Корозійна стійкість забезпечує захист від хімічного впливу продуктів окиснення мастила та агресивних середовищ, які можуть утворюватися в процесі експлуатації.

Кавітаційна стійкість є важливою для зон зі змінним тиском, де можливе утворення кавітаційних порожнин. Їх колапс супроводжується локальними ударними навантаженнями, що можуть руйнувати поверхню матеріалу.

Сучасні матеріали підшипників ковзання є результатом складного інженерного компромісу між міцністю, пластичністю та триботехнічними властивостями. Використання багатошарових структур і функціональних покриттів дозволяє забезпечити необхідний рівень експлуатаційних характеристик у складних умовах змішаного мащення, що є характерними для роботи корінних підшипників колінчастого вала [9].

1.5. Матеріали підшипників ковзання

У сучасному триботехнічному матеріалознавстві значна увага приділяється вибору матеріалів і покриттів підшипників ковзання, оскільки саме вони визначають ефективність роботи вузла в умовах змішаного мащення. Вкладиші біметалевих і багатошарових підшипників зазвичай виготовляються на основі алюмінієво-олов'яних (Al–Sn) сплавів із додаванням кремнію та міді. Як функціональні покриття використовуються полімерні матеріали, поліамідоїмід (ПАІ), графіт, дисульфід молібдену (MoS_2), срібло та сплави на основі вісмуту.

Свинцевмісні матеріали (Pb)

Свинець тривалий час широко застосовувався у підшипникових матеріалах завдяки своїй м'якій структурі та здатності рівномірно

					<i><u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

розподілятися у твердій матриці. Це забезпечувало високу конформність, здатність до приработки та ефективно вміщування твердих частинок. Свинцеві покриття демонстрували низький коефіцієнт тертя та високу стійкість до задиру навіть при порушенні режиму мащення. Додатково, завдяки низькій температурі плавлення, свинець здатний локально пластично деформуватися, зменшуючи пікові контактні напруження. Водночас свинець має добру корозійну стійкість до продуктів окиснення мастила, що підвищувало надійність роботи підшипника в умовах тривалої експлуатації.

Крім того, свинець характеризується високою демпфувальною здатністю, що дозволяє зменшувати вібраційні навантаження в зоні контакту та підвищувати стабільність роботи вузла. Його наявність у складі покриття сприяє формуванню стабільного антифрикційного шару навіть при нестабільних умовах мащення. Однак, незважаючи на ці переваги, використання свинцю обмежується сучасними екологічними вимогами, що стимулює пошук альтернативних матеріалів із подібними експлуатаційними характеристиками.

Безсвинцеві матеріали

Через токсичність свинцю виникла необхідність у створенні альтернативних матеріалів із подібними триботехнічними властивостями. Одним із ключових напрямів стало використання вісмуту, а також полімерних композицій. Безсвинцеві матеріали повинні одночасно забезпечувати низький коефіцієнт тертя, високу зносостійкість та стабільність при змінних температурах. Особливістю таких матеріалів є їх здатність працювати в умовах нестабільної мастильної плівки. Полімерні системи, зокрема PAI, характеризуються високою адгезією до основи та стабільністю структури при термоциклічних навантаженнях, що робить їх перспективними для сучасних двигунів [10].

					<i><u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Додатково, безсвинцеві матеріали повинні відповідати підвищеним екологічним вимогам та мати стабільні властивості протягом усього терміну експлуатації. Важливою перевагою таких матеріалів є можливість цілеспрямованого модифікування їх складу шляхом введення твердих мастильних компонентів або зміцнюючих фаз, що дозволяє оптимізувати їх триботехнічні характеристики. Крім того, сучасні безсвинцеві покриття демонструють кращу термічну стабільність і меншу схильність до деградації при високих температурах, що підвищує надійність підшипників у складних умовах роботи.

Алюмінієво-олов'яні сплави (Al-Sn-Si-Cu)

Алюмінієві сплави з додаванням олова, кремнію та міді широко застосовуються як основний матеріал вкладишів. Олово формує м'яку антифрикційну фазу, що знижує коефіцієнт тертя та покращує приработку поверхонь. Кремній, навпаки, є твердим компонентом, який підвищує зносостійкість і опір втомному руйнуванню. Мідь сприяє підвищенню міцності та теплопровідності матеріалу, що важливо для відведення тепла із зони контакту. Завдяки такій багатокомпонентній структурі сплави Al-Sn-Si-Cu забезпечують стабільні триботехнічні характеристики навіть при високих питомих навантаженнях і коливаннях температури, що характерно для роботи колінчастого вала.

Додатково, мікроструктура таких сплавів формується у вигляді дисперсного розподілу м'якої та твердої фаз, що дозволяє ефективно поєднувати антифрикційні властивості з механічною міцністю. Наявність твердих частинок кремнію перешкоджає розвитку зношування за абразивним механізмом, тоді як олово сприяє утворенню захисного шару в зоні тертя. Крім того, такі сплави мають добру сумісність із сучасними мастильними матеріалами та характеризуються високою стабільністю властивостей при тривалій циклічній роботі.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріали на основі вісмуту (Ві)

Вісмут є ефективною альтернативою свинцю завдяки своїй нетоксичності та здатності покращувати антифрикційні властивості. У підшипникових матеріалах він формує м'яку фазу, яка виступає на поверхні під час тертя та зменшує контактні напруження. Вісмутові покриття демонструють добру стійкість до зношування навіть у несприятливих умовах, зокрема при недостатньому мащенні. Додатково, використання проміжного шару срібла покращує адгезію та забезпечує стабільність структури під навантаженням.

Крім того, вісмут характеризується низькою температурою плавлення та доброю змочуваністю, що сприяє формуванню стабільного контактного шару в зоні тертя. Його здатність до локальної пластичної деформації дозволяє зменшувати пікові напруження та запобігати утворенню мікротріщин у покритті. Важливою перевагою є також висока корозійна стійкість у середовищі мастильних матеріалів. У поєднанні з іншими елементами, зокрема сріблом або міддю, вісмут забезпечує стабільні триботехнічні характеристики в широкому діапазоні температур і навантажень.

Полімерні матеріали (ПАІ, MoS₂, графіт)

Полімерні покриття на основі поліамідоїмідів (ПАІ) активно застосовуються як верхній антифрикційний шар. Введення твердих мастильних компонентів, таких як MoS₂ та графіт, дозволяє значно знизити коефіцієнт тертя за рахунок формування зсувних шарів на поверхні контакту. MoS₂ забезпечує ефективне змащування навіть при високих навантаженнях і низьких швидкостях, тоді як графіт проявляє високу ефективність при підвищених температурах. Полімерна матриця забезпечує гнучкість, демпфування та здатність адаптуватися до мікронерівностей поверхні, що особливо важливо в умовах змішаного мащення [11].

Додатково, поліамідоїмідні покриття характеризуються високою термостійкістю, хімічною інертністю та здатністю зберігати свої властивості

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

КвРМТВА. 23107.02.01.00

при тривалому термічному навантаженні. Завдяки можливості введення дисперсних наповнювачів можна цілеспрямовано регулювати їх механічні та триботехнічні характеристики. Такі покриття формують стабільний граничний шар, який знижує інтенсивність зношування при пускових режимах. Крім того, вони мають добру адгезію до металевої основи та високу стійкість до утворення тріщин і відшаровування.

Наукові проблеми та перспективи досліджень

Незважаючи на значний прогрес у розробці нових матеріалів, існує потреба у подальших дослідженнях їх поведінки в реальних умовах експлуатації. Більшість сучасних досліджень проводяться в лабораторних умовах, що не повністю відображає роботу підшипників у двигуні. Необхідно враховувати вплив змінних навантажень, температур, швидкостей та режимів мащення. Особливу увагу слід приділяти змішаному режиму мащення, де взаємодія матеріалів і мастильного середовища є найбільш складною. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію складу матеріалів і покриттів з урахуванням реальних умов роботи двигунів.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						23
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Як було зазначено у попередньому розділі, триботехнічні характеристики корінних підшипників колінчастого вала, зокрема тертя та зношування, мають вирішальний вплив на ефективність роботи двигуна внутрішнього згорання. Значна частка механічних втрат у двигуні пов'язана саме з вузлами тертя, серед яких підшипники ковзання займають одне з провідних місць і можуть формувати до чверті загальних втрат на тертя. Зменшення цих втрат безпосередньо сприяє підвищенню паливної економічності двигуна та зниженню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Одним із ефективних напрямів підвищення триботехнічної ефективності є використання сучасних матеріалів і функціональних покриттів вкладишів, а також оптимізація мікрогеометрії поверхні шийок колінчастого вала. Взаємодія цих факторів суттєво впливає на формування мастильної плівки, умови контакту та характер зношування в умовах змішаного мащення. Тому дослідження впливу різних типів покриттів і текстур поверхні є актуальною науково-практичною задачею.

У зв'язку з розвитком нових антифрикційних покриттів виникає необхідність їх експериментальної оцінки. Проведення стендових випробувань дозволяє оперативно здійснювати відбір перспективних матеріалів, порівнювати їхні властивості та виконувати їх ранжування за триботехнічними показниками. Перевагою таких досліджень є можливість варіювання окремих параметрів (навантаження, швидкість, температура, режим мащення) та ізольованого вивчення їх впливу на роботу підшипникового вузла. При цьому вартість і тривалість випробувань значно менші порівняно з повномасштабними моторними дослідженнями.

Незважаючи на наявність окремих досліджень, присвячених покриттям підшипників, питання комплексної оцінки їх роботи в умовах повного комплексу підшипникового вузла, а також при наявності перекосів

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(несумісності осей) залишається недостатньо вивченим. Саме такі умови є характерними для реальної експлуатації двигунів, де виникають крайові контакти, нерівномірний розподіл навантаження та локальні перевантаження.

2.1. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є експериментальна оцінка та порівняльний аналіз триботехнічних характеристик сучасних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала в умовах змішаного мащення.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

- дослідити триботехнічні характеристики підшипників ковзання за показниками тертя:
- без перекосу;
- за наявності перекосу з моделюванням крайового контакту;
- оцінити зносостійкість матеріалів і покриттів вкладишів за умов циклічної роботи, зокрема при імітації режимів «пуск–зупинка»;
- визначити вплив мікрогеометрії та текстури поверхні шийок колінчастого вала на коефіцієнт тертя;
- виконати порівняльний аналіз та ранжування досліджуваних матеріалів і покриттів за їх триботехнічною ефективністю.

2.2. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процеси тертя, зношування та формування мастильної плівки в системі «шийка колінчастого вала – вкладиш корінного підшипника» в умовах змішаного мащення.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є триботехнічні властивості сучасних матеріалів і функціональних покриттів вкладишів корінних підшипників, а також вплив мікрогеометрії і текстури поверхні шийок колінчастого вала на показники тертя та зношування.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети у роботі використано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження.

До теоретичних методів належать:

- аналіз науково-технічної літератури з триботехнічного матеріалознавства та теорії підшипників ковзання;
- узагальнення існуючих моделей мащення (граничного, змішаного та гідродинамічного);
- використання безрозмірних критеріїв (параметр Герсі, параметр λ) для оцінки режимів мащення;
- порівняльний аналіз властивостей матеріалів і покриттів.

Експериментальні методи включають:

- стендові випробування підшипникових матеріалів на трибологічній установці типу «диск–вкладиш» або аналогічній, що моделює роботу вузла тертя;
- вимірювання коефіцієнта тертя залежно від режиму роботи (швидкість, навантаження, температура);
- оцінку зносостійкості за результатами випробувань у режимі «пуск–зупинка»;
- моделювання перекосу (несумісності осей) для відтворення крайового контакту;
- дослідження впливу текстури поверхні (шорсткість, мікрогеометрія) на триботехнічні характеристики.

Методи обробки результатів:

- статистична обробка експериментальних даних;
- побудова графічних залежностей (зокрема кривих Штрібека);
- порівняльне ранжування досліджуваних матеріалів за показниками тертя та зношування.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МАТЕРІАЛИ

Для оцінки триботехнічних характеристик матеріалів корінних підшипників та визначення впливу мікрогеометрії поверхні шийок колінчастого вала необхідно проводити комплексні випробування на тертя та зношування. Такі дослідження дозволяють виконати порівняльний аналіз і ранжування досліджуваних матеріалів і покриттів за їх експлуатаційними показниками. Для цього необхідно обґрунтовано вибрати випробувальне обладнання, встановити режими навантаження, швидкості та температури, а також визначити геометричні параметри підшипникового вузла, які моделюють реальні умови роботи.

У якості випробувальної установки використано трибологічну машину типу «диск–диск» WAZAU UTM-2000, адаптовану для дослідження підшипників ковзання. Конструкція установки була модернізована з метою моделювання умов роботи системи «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника». З одного боку установки змонтовано електропривод із шпинделем для закріплення зразка, що імітує шийку вала, з іншого – вузол кріплення вкладиша підшипника [12].

Привод установки виконаний на основі безщіткового асинхронного сервомотора з вісьмома полюсами, що забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні від 0 до 3000 об/хв. Це дозволяє відтворювати різні режими роботи, включаючи пускові, перехідні та усталені, характерні для реальних умов експлуатації двигунів внутрішнього згоряння.

Модифікована схема установки забезпечує можливість варіювання навантаження, швидкості обертання та умов мащення, що дозволяє досліджувати вплив окремих факторів на процеси тертя і зношування. Завдяки цьому створюються умови для отримання відтворюваних експериментальних даних та їх подальшого аналізу з метою вибору оптимальних матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

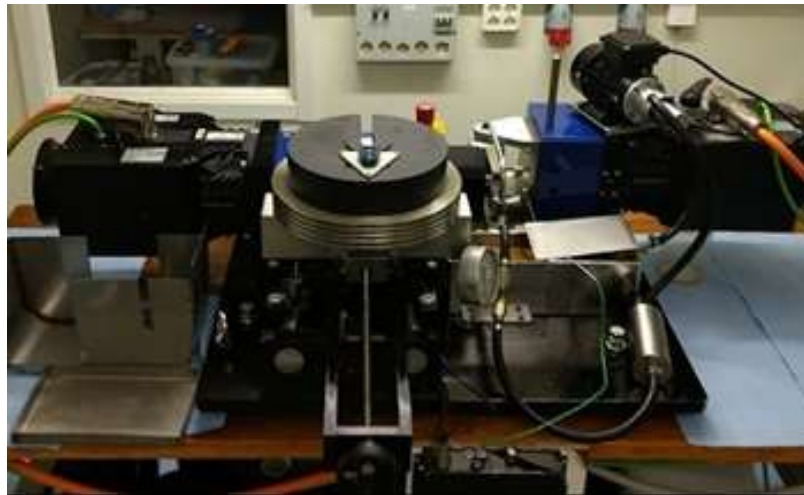


Рис. 7 – Схема трибологічної установки для дослідження системи «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника»

З метою узагальнення умов експерименту та переходу від конструкції випробувальної установки до фізичної моделі процесу тертя доцільно розглянути розрахункову схему контакту в системі «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника» (рисунком 8).



Рис. 8 – Розрахункова схема контакту в системі «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника» з урахуванням навантаження, обертання та формування мастильної плівки

На відміну від конструктивної схеми установки, дана модель відображає основні фізичні параметри процесу: прикладене навантаження, напрямок обертання, формування мастильної плівки та розподіл тиску в зоні контакту. Під дією навантаження центр шийки вала зміщується відносно центра підшипника, утворюючи ексцентриситет, що призводить до формування гідродинамічного клина мастила.

У зоні збіжного зазору відбувається зростання тиску мастильної плівки, що забезпечує несучу здатність підшипника, тоді як у зоні мінімальної товщини плівки можливий перехід до змішаного режиму мащення. Саме ця зона є критичною з точки зору зношування і визначає триботехнічні характеристики досліджуваних матеріалів і покриттів.

Експериментальна установка відтворює реальні умови роботи підшипника, а розрахункова схема дозволяє пояснити фізичну сутність процесів тертя, що відбуваються у вузлі.

Вимірювання температури. Температура мастильного матеріалу вимірюється за допомогою термопари (рисунок 9, а), встановленої безпосередньо перед входом оливи у вузол тримача підшипника. Термопара підключена до комп'ютерної системи керування, яка забезпечує підтримання заданої температури оливної ванни за принципом зворотного зв'язку. Для нагрівання мастильного матеріалу використовуються електричні нагрівальні елементи опору, розміщені під оливною ванною, що дозволяє точно регулювати температурний режим у процесі експерименту.

Для контролю температури підшипника застосовується додаткова термопара, встановлена у нижній частині тримача підшипника. Вона безпосередньо контактує із зворотною стороною нижнього вкладиша, що дозволяє оцінювати тепловий стан вузла в зоні навантаження (рисунок 9, б). Усі термопари виконані типу К, що забезпечує достатню точність вимірювання в широкому діапазоні температур, характерному для умов роботи підшипників ковзання.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Застосування двох незалежних точок вимірювання температури дозволяє одночасно контролювати як температуру мастильного середовища, так і тепловий стан підшипникового вузла. Це є важливим для аналізу умов формування мастильної плівки та оцінки впливу температури на триботехнічні характеристики досліджуваних матеріалів.

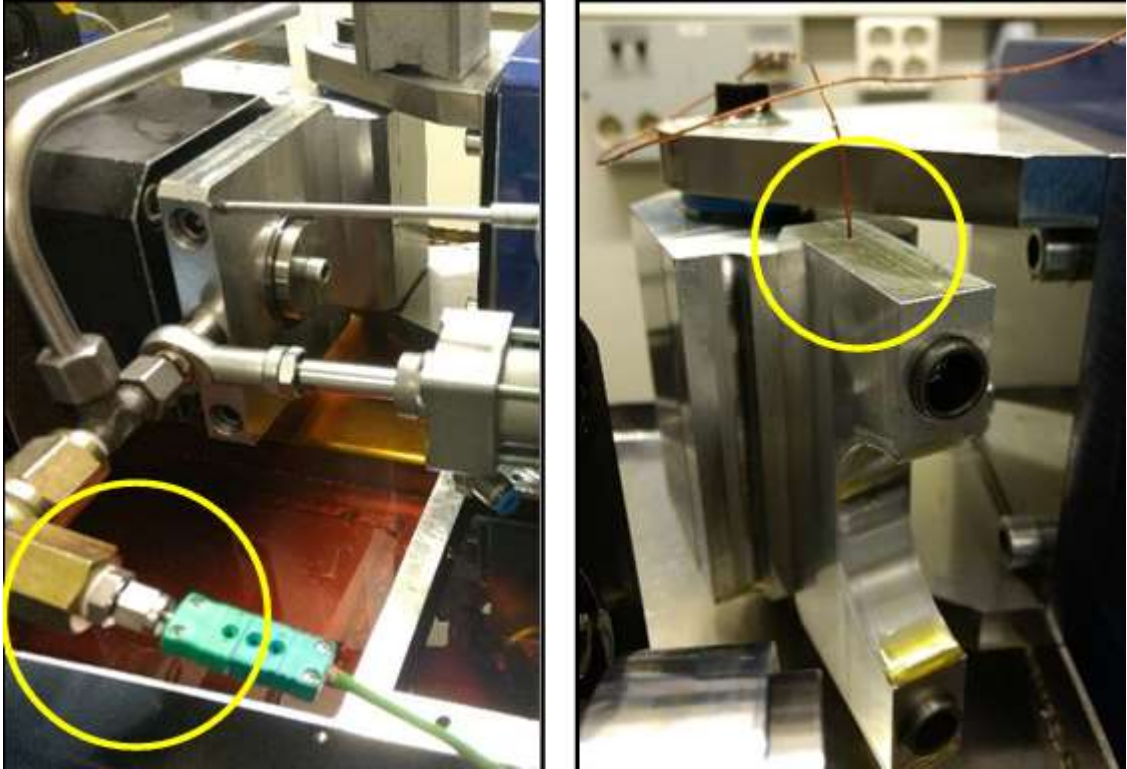


Рис. 9 – Схема контролю температури мастила та зворотного боку вкладиша підшипника

Для забезпечення стабільного температурного режиму під час проведення експериментів до системи подачі мастила додатково інтегровано розпилювальний модуль. Частина оливи, що відводиться байпасною лінією, подається у вигляді струменя безпосередньо на корпус тримача підшипника. Це дозволяє ефективно відводити тепло із зони контакту та підтримувати сталі температурні умови, що є критично важливим для відтворюваності результатів. Після проходження через зону контакту мастильний матеріал збирається в оливній ванні та повторно подається в систему, утворюючи замкнений контур циркуляції.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА. 23107.02.01.00

Арк.

30

Для циркуляції мастильного матеріалу використовується трифазний електродвигун потужністю 0,25 кВт, який приводить у дію оливний насос. Система оснащена двоступеневим фільтром очищення, що забезпечує видалення механічних домішок і продуктів зношування з мастила. Подача оливи здійснюється під надлишковим тиском близько 0,5 бар, що дозволяє стабільно формувати мастильну плівку та моделювати реальні умови роботи підшипників двигуна.

Для визначення моменту опору обертанню використовується тензометричний датчик крутного моменту, встановлений між приводом і шпинделем, на якому закріплена модель шийки колінчастого вала. Діапазон вимірювання датчика становить 0–20 Н·м, що є достатнім для дослідження триботехнічних характеристик підшипникового вузла в заданих умовах. Отримані значення крутного моменту використовуються для розрахунку коефіцієнта тертя з урахуванням прикладеного навантаження та геометричних параметрів (радіуса шийки вала).

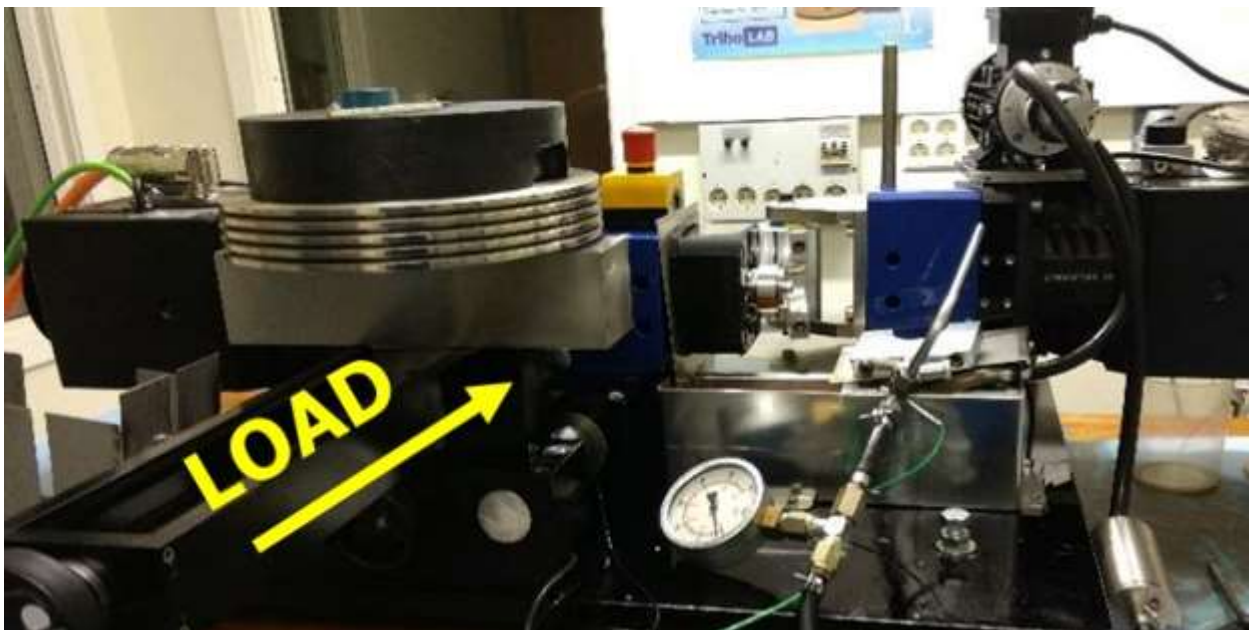


Рис. 10 – Схема навантаження

Навантаження на зразок створюється за допомогою системи статичного навантаження типу «мертвий вантаж» (рисунок 10), що забезпечує стабільне і відтворюване прикладення сили. Для контролю фактичного значення

					<i><u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

навантаження використовується тензодатчик (load cell), підключений до системи керування установкою. Це дозволяє здійснювати безперервний моніторинг параметрів під час проведення експерименту.

Усі вимірювані параметри, включаючи крутний момент, навантаження, швидкість обертання та температуру, реєструються автоматизованою системою збору даних із частотою опитування 1 Гц. Такий режим реєстрації забезпечує достатню точність та деталізацію експериментальних даних для подальшого аналізу, побудови характеристичних залежностей і оцінки триботехнічних властивостей досліджуваних матеріалів і покриттів.

Установка для моделювання примусового перекосу

На рисунку 11 наведено схему установки для створення примусового перекосу, яка використовується для моделювання умов крайового контакту в підшипниковому вузлі. Загальна конструкція установки є аналогічною до базової схеми випробувань без перекосу, однак додатково інтегровано пневматичний циліндр, за допомогою якого створюється контрольоване зміщення вузла тримача підшипника.

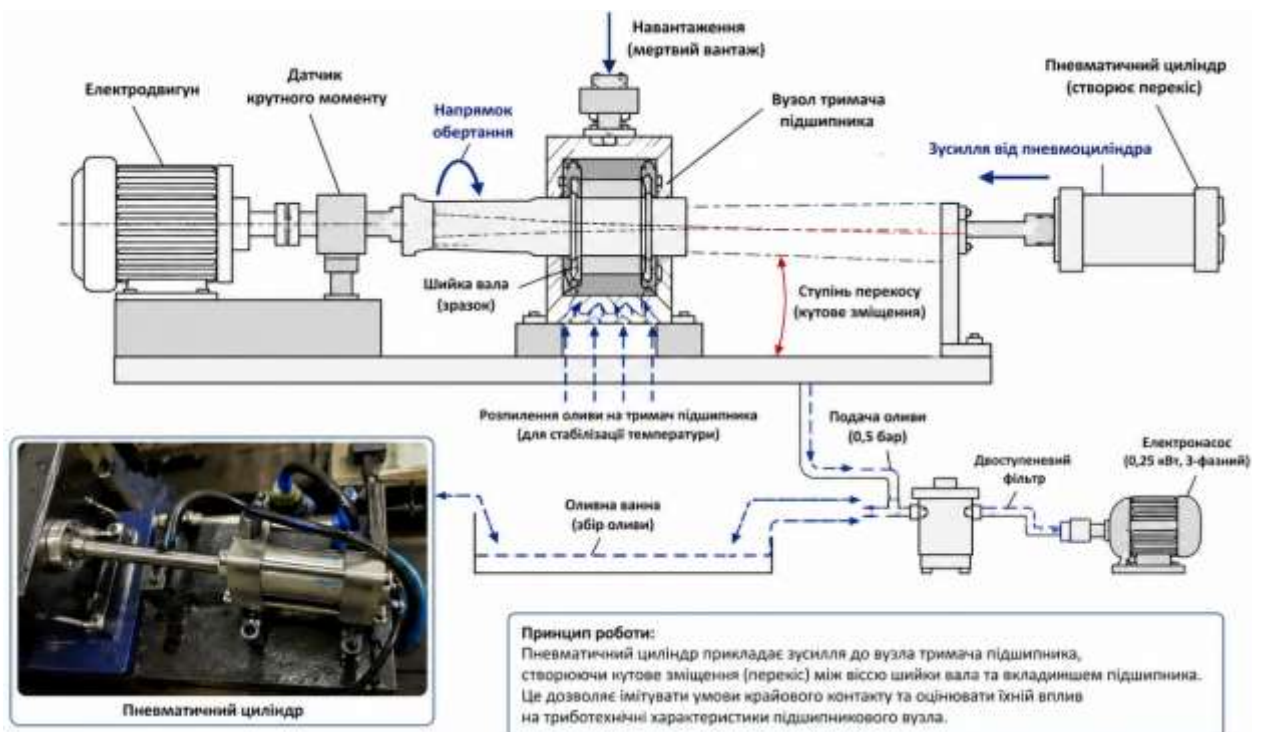


Рис. 11 – Експериментальна схема моделювання крайового контакту в підшипниковому вузлі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Пневматичний циліндр прикладає додаткове навантаження до тримача підшипника, що призводить до порушення співвісності між віссю обертання шийки вала та вкладишем підшипника. У результаті формується перекоєс, який імітує реальні експлуатаційні умови, зокрема крайовий контакт, нерівномірний розподіл навантаження та локальні перевантаження на поверхні тертя. Це дозволяє оцінити триботехнічні характеристики матеріалів у більш жорстких і наближених до реальності умовах.

Ступінь перекоєсу визначається величиною прикладеного зусилля та геометричними параметрами вузла і підбирається відповідно до заданих умов експерименту (детально розглядається у наступному розділі). Такий підхід забезпечує можливість варіювання рівня перекоєсу та дослідження його впливу на коефіцієнт тертя, зношування та стабільність мастильної плівки.

На вставному зображенні (інсеті) представлено фактичний вигляд пневматичного циліндра, який використовується для реалізації перекоєсу. Використання пневматичної системи дозволяє точно регулювати навантаження, забезпечує плавність його прикладання та високу повторюваність експериментальних умов.

3.1. Матеріали

У даному дослідженні для оцінки триботехнічних характеристик було використано декілька типів корінних підшипників із різними антифрикційними покриттями. Основна мета – порівняти їх поведінку в умовах змішаного мащення та визначити вплив матеріалу верхнього шару на коефіцієнт тертя і зношування.

Досліджувані підшипники мали багат шарову структуру, що включала: сталеву основу, проміжний шар (на основі Al–Sn або Cu-сплавів), дифузійний бар'єр, функціональне покриття (overlay).

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як антифрикційні покриття використовувалися: полімерні композиції (ПАІ + тверді мастила), матеріали на основі вісмуту, алюмінієво-олов'яні покриття, інші сучасні безсвинцеві системи.

Контактна пара формувалася як: «вкладиш підшипника – шийка вала». При цьому поверхня вала мала різні варіанти текстури: гладка (базова), текстурована (мікроканавки / мікрорельєф). Таке поєднання дозволило дослідити вплив матеріалу, вплив текстури, їх комбінований ефект.

Випробування проводилися в умовах, максимально наближених до роботи реального двигуна внутрішнього згорання. Основними параметрами експерименту були: швидкість обертання; навантаження; температура мастила; режим мащення; наявність/відсутність перекосу.

Дослідження виконувалися у двох режимах. **Без перекосу** Вісь вала співпадає з віссю підшипника → рівномірний розподіл навантаження.

З перекосом → моделюється крайовий контакт → виникає локальне перевантаження → реальні умови експлуатації.

Додатковий режим «пуск–зупинка» використовується для імітації реальної роботи двигуна, аналізу зношування, оцінки роботи в граничному та змішаному мащенні. Саме він є **критичним для матеріалів підшипників**.

Контроль параметрів. Під час експерименту реєструвались крутний момент → для визначення коефіцієнта тертя, температура мастила, температура підшипника, прикладене навантаження.

Обробка результатів включала побудову залежностей $\mu = f(H)$ (крива Штрібека), аналіз зношування, порівняння матеріалів.

Матеріал та підготовка поверхні шийки вала.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися зразки валів, виготовлені з конструкційної легованої сталі промислового призначення 20ХН3А, яка широко застосовується для виготовлення елементів трансмісій та колінчастих валів. Матеріал піддавався термічній обробці, що включала загартування та цементацію поверхневого шару, у результаті чого

									Арк.
									34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u>				

досягалася твердість близько 55 HRC. Геометричні параметри зразків становили: номінальний діаметр – 53 мм, довжина – 20,5 мм. Така комбінація матеріалу та обробки забезпечує високу зносостійкість і стійкість до контактної втоми, що є характерним для реальних умов роботи підшипників колінчастого вала.

Особлива увага приділялася обробці робочої поверхні шийки вала. Зовнішня циліндрична поверхня формувалася методом високоточного шліфування з метою відтворення мікрогеометрії, максимально наближеної до поверхонь автомобільних колінчастих валів. Такий стан поверхні у роботі прийнято як базовий (існуючий) стан обробки. Надалі, для дослідження впливу мікрогеометрії на триботехнічні характеристики, поверхня модифікувалася до двох альтернативних типів текстури:

- дзеркальна (mirror finish);
- платоподібна (plateau finish).

Метою такої модифікації є аналіз впливу різних типів шорсткості на формування мастильної плівки, коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування в умовах змішаного мащення.

Порівняльний аналіз текстур поверхні здійснювався на основі їх профілограм та параметрів шорсткості. Основні кількісні характеристики мікрогеометрії наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Параметри шорсткості поверхні шийки вала

Параметр	Базова обробка	Дзеркальна обробка	Платоподібна обробка
Ra, нм	60	6	32
Rz, нм	350	45	401
Rk, нм	152	20	54
Rpk, нм	39	9	15
Rvk, нм	96	9	132

Аналіз наведених параметрів показує, що дзеркальна поверхня характеризується мінімальними значеннями середньої шорсткості (Ra), що сприяє зниженню тертя, однак може погіршувати утримання мастила. У свою

Базові підшипники виготовлялися на основі алюмінієвих сплавів із вмістом олова, кремнію та міді. Такі матеріали забезпечують поєднання достатньої міцності, зносостійкості та антифрикційних властивостей. Верхній вкладиш у цьому випадку є гладким (без покриття), тоді як нижній може мати як аналогічну структуру, так і додаткові функціональні шари.

У роботі досліджувалися також багатошарові підшипники з різними типами покриттів, зокрема:

- полімерні покриття;
- покриття з додаванням дисульфиду молібдену (MoS_2);
- композиційні системи на основі поліамідоїмідів (ПАІ) з твердими мастильними компонентами;
- покриття з графітом і карбідом кремнію (SiC);
- комбіновані металеві покриття на основі срібла та вісмуту.

Особливу увагу приділено покриттям типу $\text{Ag} + \text{Bi}$, де вісмут використовується як поверхневий антифрикційний шар, а срібло – як проміжний шар, що забезпечує покращення процесу приработки та підвищення адгезії між шарами. Така структура дозволяє ефективно зменшувати коефіцієнт тертя на початкових етапах роботи та підвищує стійкість до задиру.



Рис. 12 – Еталонний верхній підшипник, еталонний нижній підшипник, нижні підшипники 2–6 (зліва направо)

Застосування різних комбінацій матеріалів і покриттів дозволяє цілеспрямовано варіювати триботехнічні властивості підшипників, зокрема коефіцієнт тертя, зносостійкість та стійкість до роботи в умовах граничного і змішаного мащення. Це створює передумови для оптимізації конструкції підшипникового вузла залежно від режимів роботи двигуна.

3.2. Мастильний матеріал

У всіх експериментах як мастильний матеріал використовувалася комерційна моторна олива класу SAE 0W-20 з багатов'язкісними характеристиками. Залежності густини від температури, а також кінематичної в'язкості від температури були отримані з літературного джерела [2] та використані для подальшого аналізу триботехнічних процесів.

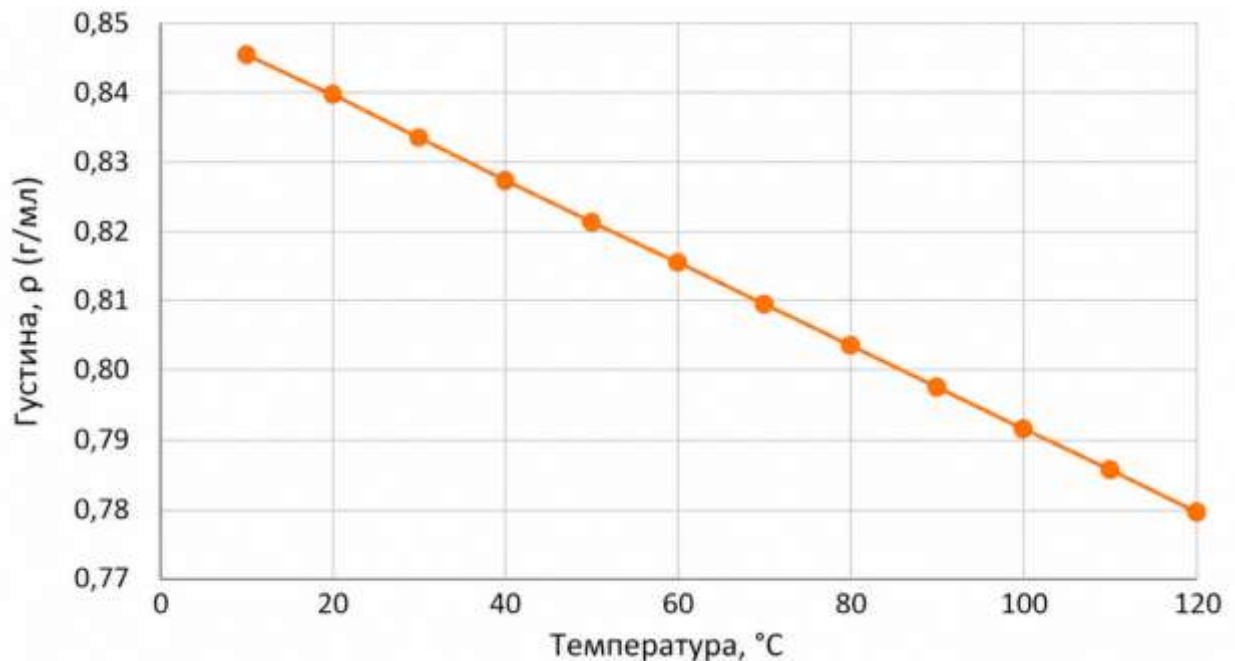


Рис. 13 – Залежність густини від температури для моторної оливи SAE 0W-20

Густина та кінематична в'язкість моторної оливи є ключовими фізичними параметрами, що визначають умови формування мастильної плівки та характер триботехнічної взаємодії в підшипниках ковзання. З підвищенням температури густина оливи зменшується майже лінійно, що пов'язано з тепловим розширенням рідини та зниженням міжмолекулярних сил взаємодії.

3.3. Параметри випробувань

Загальні параметри випробувань у таблиці 3 наведено основні параметри, що використовувалися під час проведення експериментів. Навантаження у всіх дослідженнях підтримувалося на рівні 2000 Н, що відповідає умовам роботи корінних підшипників у двигунах внутрішнього згоряння.

Діаметральний зазор між шийкою вала та вкладишем підшипника при кімнатній температурі становив приблизно 36 мкм. Це значення було обґрунтовано на основі попередніх досліджень, у яких визначали оптимальний зазор для мінімізації втрат на тертя в аналогічній експериментальній системі. Під час роботи, внаслідок нагрівання вузла, температура тримача підшипника досягала близько 70 °С, що призводило до збільшення зазору до приблизно 48 мкм. Збільшення зазору пояснюється різницею в коефіцієнтах теплового розширення матеріалів, зокрема більш інтенсивним розширенням корпусу підшипника.

Таблиця 3.3. Загальні параметри випробувань

Параметр	Значення
Навантаження	2000 Н
Діаметральний зазор	~36 мкм (при кімнатній температурі) ~48 мкм (при 70 °С)
Клас в'язкості мастила	SAE 0W-20
Температура мастила	80 °С
Попередній прогрів	30 хв при 3000 об/хв

Температура мастильного матеріалу підтримувалася на рівні 80 °С, що відповідає типовим робочим умовам моторної оливи в двигуні. Перед початком кожного експерименту проводилася попередня термічна стабілізація системи (прогрів), яка тривала 30 хвилин при швидкості обертання 3000 об/хв. Це дозволяло досягти сталого теплового режиму та мінімізувати вплив температурних коливань на результати дослідження.

дискретних рівнів. На кожному значенні швидкості система витримувалася протягом 12 секунд, що дозволяло стабілізувати умови тертя та отримати достовірні значення крутного моменту і коефіцієнта тертя.

Таблиця 3.5. Параметри вимірювання триботехнічних характеристик

Параметр	Значення
Діапазон швидкостей	3000 – 10 об/хв (14 кроків)
Значення швидкостей	3000, 2714, 2300, 1700, 1200, 800, 500, 300, 200, 125, 75, 45, 20, 10 об/хв
Час витримки	12 с на кожному режимі

Зниження швидкості призводить до поступового зменшення товщини мастильної плівки, внаслідок чого відбувається перехід між режимами мащення. При високих швидкостях домінує гідродинамічний режим, де контакт поверхонь відсутній. У середньому діапазоні швидкостей реалізується змішане мащення, при якому частина навантаження сприймається мастильною плівкою, а частина – мікроконтактами поверхонь. При мінімальних швидкостях виникає граничне мащення, що характеризується максимальним коефіцієнтом тертя.

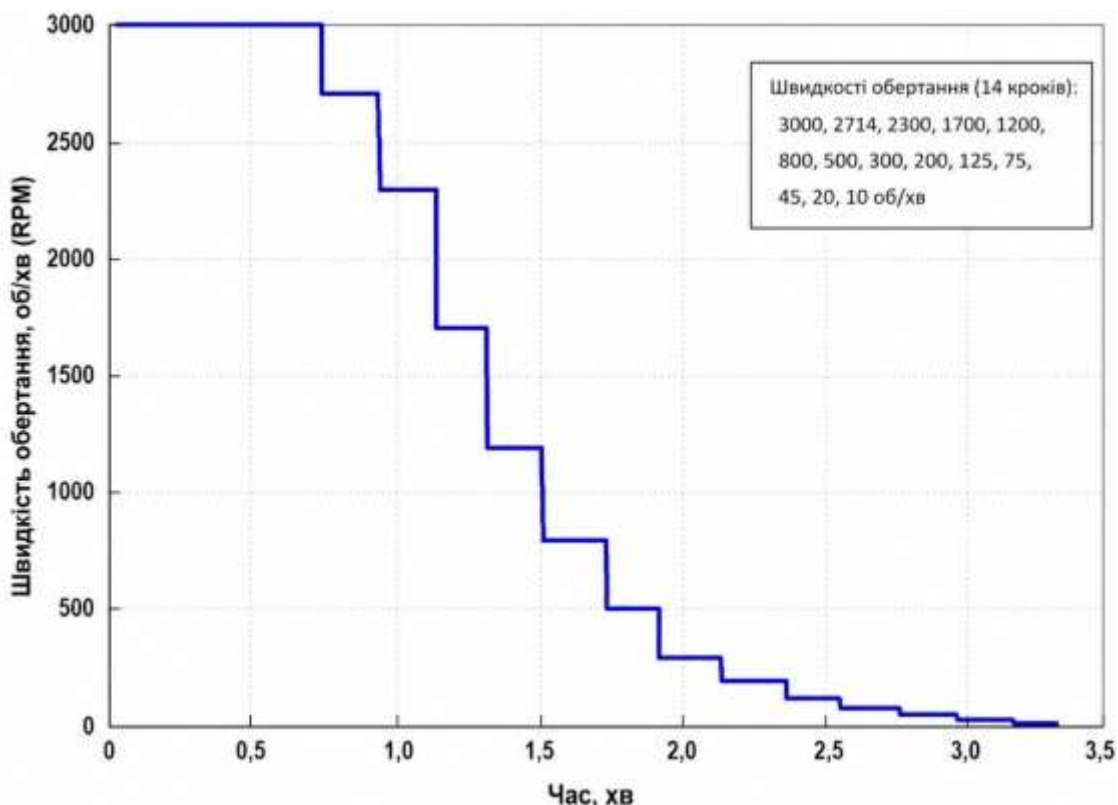


Рис. 15 – Швидкість під час одного циклу сканування кривої Штрібека

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Отримані залежності коефіцієнта тертя від швидкості або параметра Герсі дозволяють побудувати криву Штрібека, яка є основним інструментом оцінки триботехнічних властивостей підшипникових матеріалів і покриттів.

Метод сканування кривої Штрібека є одним із найбільш інформативних способів оцінки триботехнічних характеристик, оскільки дозволяє в одному експерименті охопити весь спектр режимів мащення. Це дає можливість не лише визначити мінімальне значення коефіцієнта тертя, але й оцінити поведінку матеріалу в критичних умовах – при пуску, зупинці та низьких швидкостях. Для підшипників колінчастого вала саме ці режими є визначальними з точки зору зношування та довговічності.

Вимірювання зносостійкості підшипникових покриттів. Для оцінювання зносостійкості антифрикційних покриттів вкладишів підшипників застосовувалася методика імітації режиму “пуск–зупинка”, яка дозволяє відтворити найбільш критичні умови роботи вузла тертя. Саме в ці моменти відбувається руйнування мастильної плівки та реалізуються граничний і змішаний режими мащення, що призводить до інтенсивного зношування.

Таблиця 3.6. Параметри випробування на зношування

Параметр	Значення
Діапазон швидкостей	0 – 300 об/хв
Закон зміни швидкості	50 об/хв/с (лінійна рампа)
Витримка на крайніх режимах	2 с (при 0 та 300 об/хв)
Кількість циклів	600
Загальна тривалість	~240 хв

Діапазон швидкостей у випробуванні встановлювався від 0 до 300 об/хв, що забезпечує проходження всіх основних режимів мащення. У кожному циклі швидкість змінювалася від 0 до 300 об/хв і назад до 0 об/хв, імітуючи процеси запуску та зупинки двигуна. Зміна швидкості здійснювалася з лінійною швидкістю 50 об/хв/с із витримкою 2 секунди на крайніх значеннях швидкості.

циклів забезпечує накопичення пошкоджень і дозволяє оцінити стійкість покриттів до втомного та адгезійного зношування.

Такий підхід дає можливість не лише визначити кінцеві триботехнічні характеристики матеріалів, але й проаналізувати динаміку їх зміни в процесі роботи, що є особливо важливим для оцінки довговічності підшипникових покриттів.

3.4. Підготовка до проведення експерименту

Процедура підготовки кожного експерименту включає наступні етапи:

Вибрати зразок шийки вала та відповідний комплект вкладишів підшипника таким чином, щоб забезпечити діаметральний зазор приблизно 36 мкм.

Очистити поверхні шийки вала та вкладишів за допомогою гептану для видалення забруднень, після чого помістити їх в ультразвукову ванну на 10 хвилин для більш ефективного очищення.

Встановити шийку вала на обертовий шпиндель, забезпечивши значення ексцентриситету не більше 10 мкм (момент затягування затискного гвинта – 38 Н·м).

Виконати вимірювання профілю поверхні вкладиша по довжині за допомогою 3D-оптичного профілометра Zygo NewView 7300, а також зафіксувати його масу.

Встановити напіввкладиші підшипника у тримач та закріпити їх двома гвинтами M10 із моментом затягування 52 Н·м, що забезпечує необхідний натяг (bearing crush).

Визначити режим проведення експерименту – з перекосом або без перекоосу – та відповідно налаштувати випробувальну установку.

Нагріти мастильний матеріал до досягнення температури на вході в підшипник 80 °С.

					<i><u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Встановити додаткову термопару для вимірювання температури зворотного боку підшипника.

Задати параметри випробування, запустити установку, прикласти навантаження та здійснювати реєстрацію експериментальних даних.

Провести обробку отриманих даних тертя шляхом усереднення коефіцієнта тертя на кожному кроці швидкості для побудови кривих Штрібека.

Після завершення експерименту повторно виміряти профіль поверхні вкладиша по довжині за допомогою профілометра Zygo NewView 7300 та визначити його масу для оцінки зношування.

Зазначена процедура забезпечує високу відтворюваність результатів, оскільки включає контроль геометричних параметрів, чистоти поверхонь, температурного режиму та умов навантаження. Особливо важливими є операції попереднього очищення, точного монтажу та профілометричного контролю, які дозволяють мінімізувати похибки та забезпечити достовірність експериментальних даних.

Вимірювання профілю підшипника. Для визначення геометричних характеристик та змін поверхні вкладишів підшипників до і після випробувань на зношування використовується 3D-оптичний профілометр Zygo NewView 7300. Перед проведенням вимірювань зразки піддаються очищенню в ультразвуковій ванні протягом 10 хвилин для видалення залишків мастила та продуктів зношування.

За допомогою профілометра здійснюється фіксація параметрів мікрогеометрії поверхні та побудова профілю вздовж довжини вкладиша. Для отримання повного зображення профілю використовується функція стичінгу (stitching), яка дозволяє об'єднати кілька локальних вимірювань у єдину безперервну карту поверхні. Вимірювання виконуються в середній частині вкладиша, що відповідає зоні максимального навантаження, як показано на рисунку 17.

					<i><u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

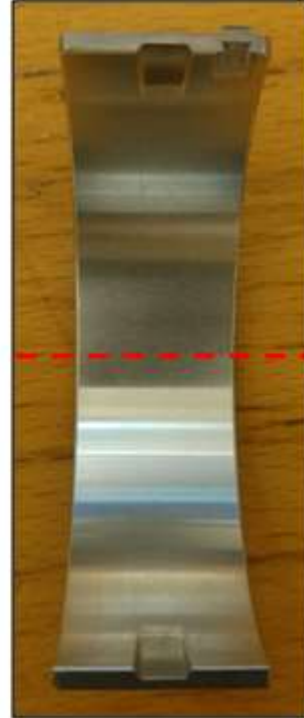


Рис. 17 – (а) 3D-оптичний профілометр Zygo NewView
(б) місце вимірювання профілю підшипника

Такий підхід забезпечує високу точність визначення змін мікрогеометрії та дозволяє оцінити характер і інтенсивність зношування підшипникових поверхонь.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У даному розділі наведено результати експериментальних триботехнічних досліджень різних матеріалів підшипників ковзання, а також аналіз впливу мікрогеометрії поверхні шийок вала з різними типами текстури. Дослідження виконані з використанням модернізованої трибологічної установки типу «диск–диск», що дозволяє моделювати умови роботи корінних підшипників колінчастого вала. Отримані результати систематизовано, проаналізовано та порівняно за окремими напрямками з метою визначення найбільш ефективних матеріалів і покриттів в умовах змішаного мащення.

Структура подання результатів і їх обговорення побудована за наступною логікою.

Дослідження при перекосі (імітація крайового контакту) визначення ступеня перекоосу:

- аналіз коефіцієнта тертя;
- оцінка зносостійкості;
- узагальнення результатів вимірювання тертя в умовах перекоосу;
- порівняльне ранжування підшипників із різними типами покриттів.

Порівняння характеристик тертя (за наявності та відсутності перекоосу).

Оцінюється вплив порушення співвісності на триботехнічну поведінку підшипників, зокрема зміна коефіцієнта тертя та стабільності мастильної плівки.

Вплив текстури поверхні шийки вала на тертя:

- базова (існуюча) поверхня;
- дзеркальна поверхня;
- платоподібна (plateau) поверхня.

Аналізується роль мікрогеометрії у формуванні мастильного шару та її вплив на триботехнічні характеристики.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Загальне порівняння та ранжування підшипників. Проводиться комплексна оцінка досліджуваних матеріалів і покриттів з урахуванням:

- коефіцієнта тертя;
- зносостійкості;
- стабільності роботи в різних режимах мащення;
- впливу текстури поверхні вала.

Аналіз температурного стану підшипника. Окремо розглядається температура зворотного боку підшипника як показник теплового навантаження та ефективності роботи мастильного шару.

Такий структурований підхід дозволяє не лише провести детальний аналіз експериментальних даних, але й встановити взаємозв'язок між матеріалом покриття, умовами навантаження та геометрією контактуючих поверхонь. Це є основою для обґрунтованого вибору матеріалів підшипників з підвищеними триботехнічними характеристиками та їх оптимізації для реальних умов експлуатації двигунів внутрішнього згорання.

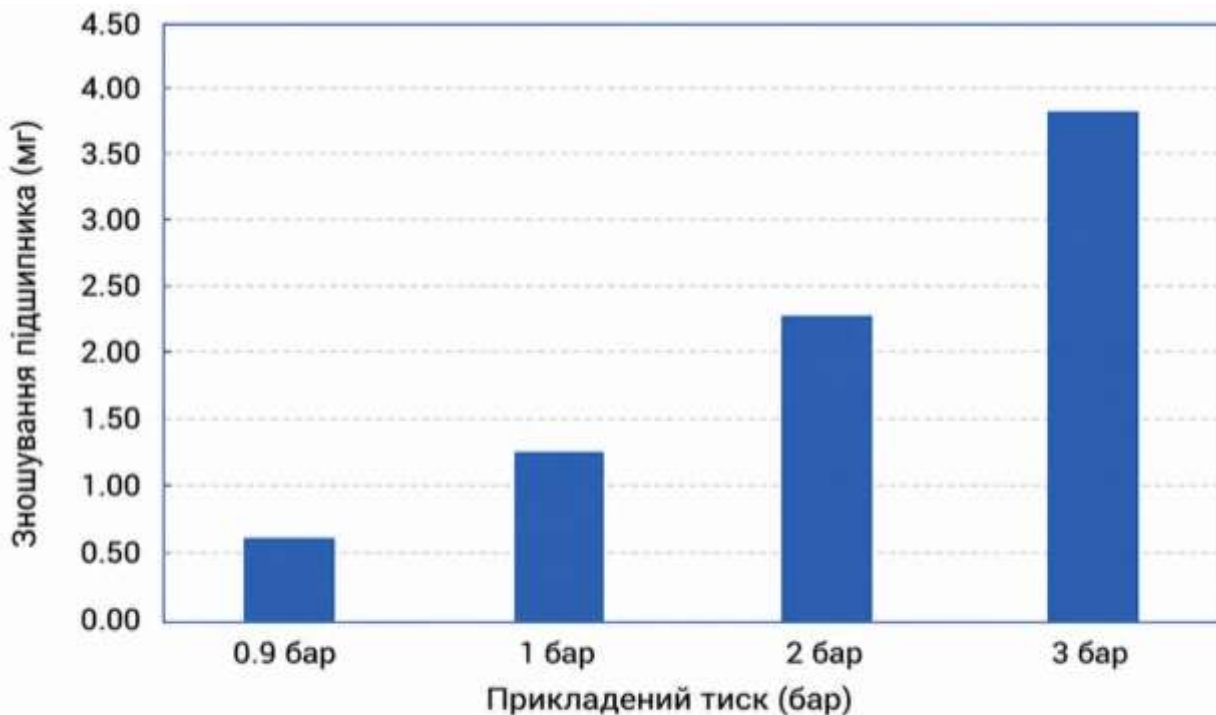
4.1. Дослідження в умовах перекосу

Визначення ступеня перекосу (адаптований переклад) Для встановлення залежності між величиною перекосу підшипникового вузла та тиском, що подається на пневматичний циліндр, використано спрощену розрахункову схему (вільного тіла), наведену на рисунку 4.1. Такий підхід дозволяє аналітично оцінити силу, яка викликає перекіс, та її вплив на розподіл навантаження в зоні контакту.

При використанні помірних значень тиску у пневматичному циліндрі виникає перекіс, який призводить до локалізованого контакту лише по одному краю нижнього вкладиша підшипника. Саме така картина відповідає реальним умовам експлуатації та дозволяє моделювати крайовий контакт. У випадку надмірного підвищення тиску перекіс стає надто великим, що призводить до зношування як нижнього, так і верхнього вкладишів. Такий режим є

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

перекоосу (рисунок 19). У цьому випадку зношування спостерігалось лише по краю нижнього вкладиша, тоді як верхній залишався практично незмінним, що відповідає умовам крайового контакту.



(b) Зображення зношування підшипників

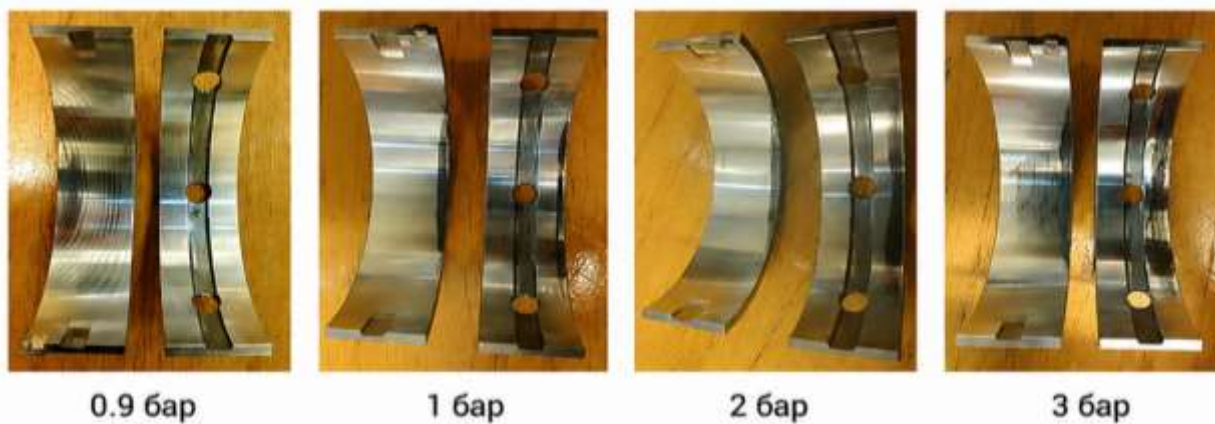


Рис. 19 – (а) Графік зношування підшипників при різних значеннях прикладеного тиску (b) Зображення зношування підшипників

Додатково було досліджено вплив різних значень тиску на характер зношування. На рисунку 20, а наведено залежність еквівалентного крайового навантаження від тиску в пневматичній системі, а на рисунку 20, б – детальне зображення профілів вкладишів у зоні крайового контакту після випробувань.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 4.1. Залежність зношування підшипників та крайового навантаження від прикладеного тиску

Прикладений тиск, бар	Зношування, мг	Крайове навантаження, Н
0.9	0.59	72.4
1.0	1.29	80.4
2.0	2.33	160
3.0	3.84	241

Випробування на зношування проводилися в режимі імітації «пуск–зупинка» і склалися з 240 циклів, що відповідає приблизно 90 хвилинам роботи. Такий режим дозволяє оцінити вплив перекосу на інтенсивність локального зношування та стійкість матеріалів підшипників у найбільш навантажених зонах контакту.

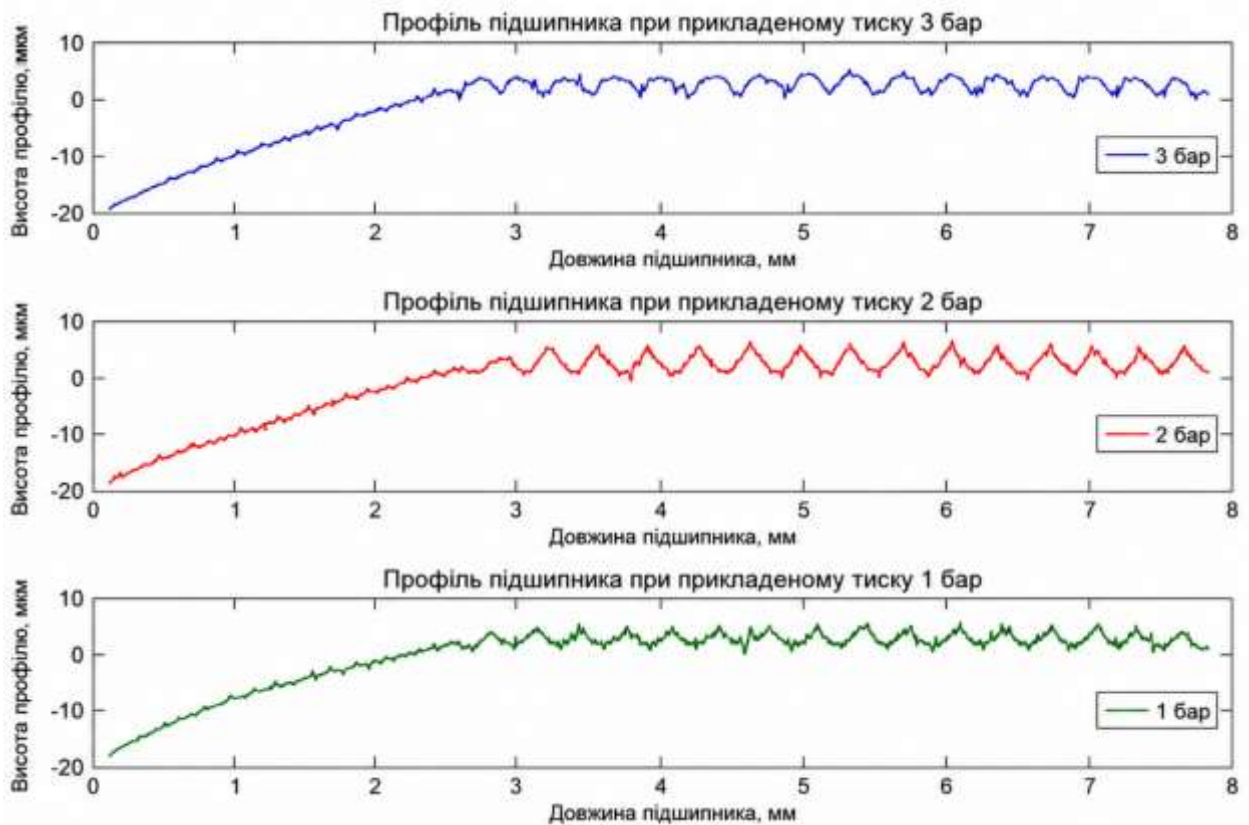


Рис. 20 – Профілі підшипників після випробувань на зношування при різних значеннях прикладеного тиску

Оптимальний вибір ступеня перекосу є критично важливим для достовірності експерименту, оскільки дозволяє відтворити реальні умови роботи підшипників без внесення додаткових паразитних навантажень.

Отриманий результат (0,9 бар) фактично є калібруванням установки і може бути використаний як базове значення для подальших досліджень.

4.2. Триботехнічні характеристики тертя

У зоні гідродинамічного мащення значення коефіцієнта тертя для всіх досліджуваних підшипників є близькими та становлять приблизно 0,01, що свідчить про відсутність безпосереднього контакту поверхонь і визначається властивостями мастильного матеріалу.

Водночас суттєві відмінності у триботехнічній поведінці підшипників проявляються в умовах граничного та змішаного мащення, де значний вплив має склад антифрикційного покриття (overlay). Аналогічна тенденція спостерігається і після проведення випробувань на зношування, однак при цьому фіксується незначне зменшення коефіцієнта тертя. Це пояснюється процесом приработки, у результаті якого відбувається часткове вирівнювання мікронерівностей та стабілізація контактних умов.

Найкращі триботехнічні показники продемонстрував підшипник, який має полімерне покриття з додаванням дисульфиду молібдену (MoS_2).

Аналіз показує, що підшипники, які мають полімерні покриття, характеризуються відносно низькими значеннями коефіцієнта тертя у граничному режимі мащення порівняно з іншими типами. Це пояснюється високою здатністю полімерних покриттів до утворення та утримання адсорбованої мастильної плівки, що покращує умови тертя та зменшує адгезійну взаємодію поверхонь.

Разом із тим, підшипник, який містить лише полімерне покриття без додавання твердих мастильних компонентів, не демонструє суттєвого покращення тертя порівняно з іншими варіантами. Це свідчить про обмежену ефективність полімерного шару без додаткових функціональних наповнювачів.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Найнижчі значення коефіцієнта тертя як у граничному, так і в змішаному режимах мащення спостерігаються для підшипника, який містить дисперговані частинки MoS_2 у полімерній матриці. Відомо, що частинки MoS_2 виступають на поверхні покриття та виконують роль твердого мастила, зменшуючи сили тертя. Крім того, шорстка зерниста структура покриття сприяє утриманню мастильного матеріалу, виконуючи функцію мікрорезервуарів для оливи, що додатково покращує умови мащення.

При обробці експериментальних даних враховувалися температурні залежності густини та в'язкості мастильного матеріалу, за умови, що температура оливи змінюється аналогічно температурі зворотного боку підшипника.

Отримані результати підтверджують, що комбіновані покриття (полімер + тверде мастило) є найбільш ефективними для роботи в умовах змішаного мащення. Це має практичне значення для підвищення ресурсу підшипників колінчастого вала, особливо в режимах пуску та зупинки двигуна.

Зносостійкість підшипників. На рисунку 21 наведено результати випробувань на зношування для різних типів підшипників після виконання 600 циклів «пуск–зупинка» в умовах перекосу, що імітують крайовий контакт. Як було зазначено у підрозділі вище, коефіцієнт тертя визначався на початку випробування, після кожних 120 циклів, а також після завершення тесту.

Оцінка зношування підшипників здійснювалася за втратою маси, а не за глибиною зносу. Такий підхід обумовлений тим, що величина зношування є дуже малою, а також складністю точного визначення глибини через різну мікрогеометрію поверхні та наявність окружних мікроканавок у деяких зразках.

Аналіз результатів показав, що найменші значення зношування спостерігаються для підшипників типу ПАІ + MoS_2 та ПАІ + графіт + SiC. Це свідчить про високу ефективність комбінованих полімерних покриттів із додаванням твердих мастильних та зміцнювальних компонентів.

					<i><u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

На рисунку 22 наведено зображення підшипників після проведення випробувань на зношування в умовах перекосу. Представлені зразки демонструють характер локалізованого зношування, яке формується переважно в крайовій зоні контакту, що підтверджує реалізацію умов крайового навантаження. Візуальний аналіз поверхонь дозволяє оцінити інтенсивність зношування, рівномірність розподілу контактних навантажень, а також ефективність різних типів покриттів у протидії руйнуванню.



Рис. 22 – Зображення нижніх підшипників після випробування на зношування в умовах перекосу

На рисунку 23 показано форму та геометричні параметри зони зношування. Встановлено, що зона контакту має витягнуту локалізовану форму, характерну для умов перекосу, що призводить до концентрації напружень на обмеженій ділянці поверхні. Орієнтовна площа зношування визначалася експериментально з використанням оптичного мікроскопа та штангенциркуля, після чого отримані геометричні розміри переводилися у площу контактної ділянки.

Такий підхід дозволяє не лише якісно, але й кількісно оцінити вплив умов навантаження та складу покриття на характер зношування. Площа контакту є важливим параметром, оскільки безпосередньо пов'язана з розподілом контактних напружень і може використовуватися для порівняння ефективності різних матеріалів підшипників у складних умовах експлуатації.

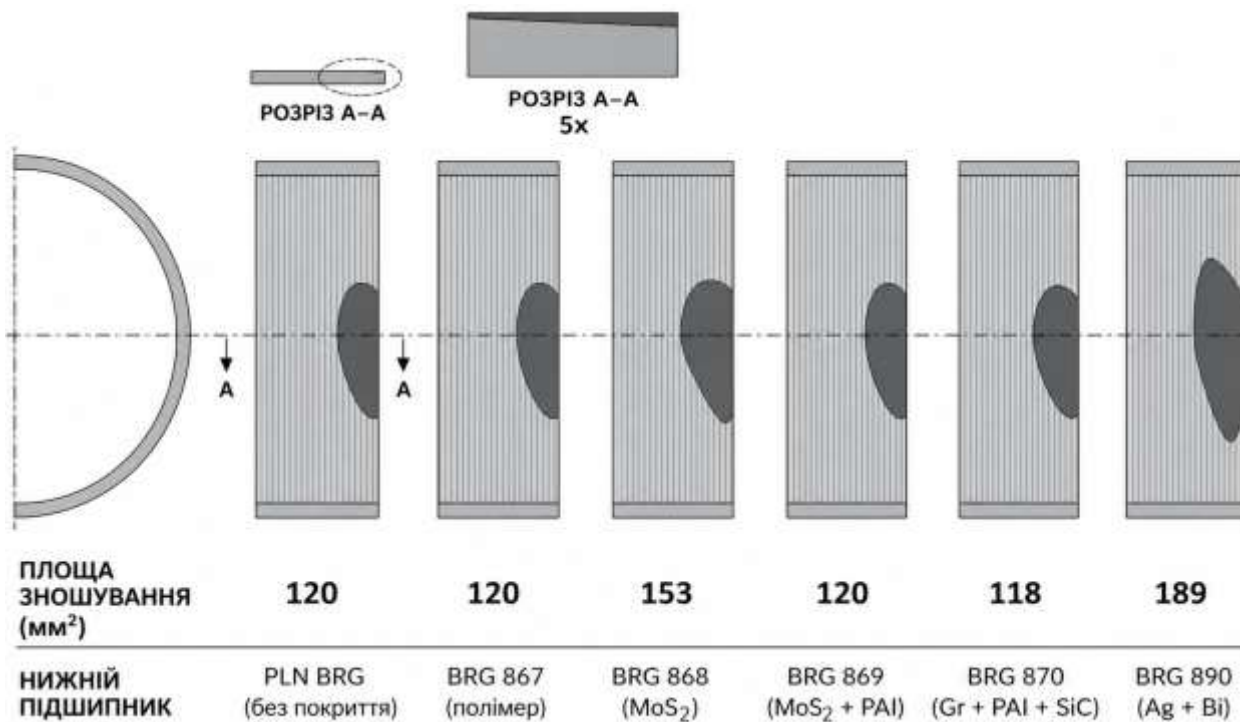


Рис. 23 – Зношена поверхня нижнього підшипника та розрахована площа після випробування на зношування в умовах перекосу

Отримані результати підтверджують, що найбільш ефективними є комбіновані покриття, які поєднують:

- полімерну матрицю (для зниження тертя та адаптації),
- тверді мастильні компоненти (MoS₂, графіт),
- зміцнювальні частинки (SiC).

Такий підхід забезпечує одночасне підвищення зносостійкості та зниження коефіцієнта тертя, що є критично важливим для підшипників колінчастого вала, особливо в умовах змішаного мащення та циклічних навантажень.

4.3. Висновки та перспективи роботи

Модифікована експериментальна установка типу «диск–диск», використана для проведення триботехнічних досліджень, продемонструвала високу відтворюваність результатів і стабільність вимірювань як у стандартних умовах, так і при моделюванні перекосу (крайового контакту).

Підшипники типу ПАІ + MoS₂ та ПАІ + графіт + SiC продемонстрували найменший рівень зношування після проведення 600 циклів випробувань у режимі «пуск–зупинка». Підшипник ПАІ + MoS₂ показав найкращі триботехнічні характеристики тертя як у випадку співвісної роботи, так і при наявності перекосу. Поєднання його із валом, що має платоподібну (plateau) текстуру поверхні, забезпечило додаткове зниження коефіцієнта тертя приблизно на 3 % у граничному та змішаному режимах мащення.

Температура зворотного боку підшипника зростала приблизно на 4–5 °С при 3000 об/хв порівняно з температурою при 10 об/хв для всіх досліджуваних варіантів.

У цілому встановлено, що за заданих умов випробувань (навантаження 2000 Н, мастило SAE 0W-20, діаметральний зазор близько 36 мкм, робота як при співвісності, так і при крайовому контакті, а також при циклічних режимах «пуск–зупинка») підшипник з покриттям ПАІ + MoS₂ забезпечує найкращі експлуатаційні показники за критеріями тертя та зносостійкості.

Для поглиблення та підтвердження отриманих результатів доцільно виконати такі дослідження з довготривалих випробувань підшипників з різними типами покриттів і текстур поверхні валів для аналізу еволюції коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування в процесі експлуатації. Також дослідження контактної взаємодії поверхонь підшипника та вала при різних ступенях перекосу, що дозволить більш точно змодельовати крайові навантаження. Проведення випробувань у реальних умовах роботи двигуна (fired engine tests) із застосуванням експлуатаційних навантажень, температур та режимів роботи для підтвердження лабораторних результатів.

Отримані результати мають практичну цінність для вибору матеріалів підшипників колінчастого вала, оскільки підтверджують ефективність комбінованих полімерних покриттів із твердими мастильними компонентами у складних умовах змішаного мащення.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВКИ

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра досліджено триботехнічні характеристики матеріалів і покриттів вкладишів корінних підшипників колінчастого вала двигуна внутрішнього згорання та обґрунтовано їх вплив на процеси тертя і зношування в умовах змішаного мащення.

Кваліфікаційна робота складається із чотирьох розділів.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи роботи підшипників ковзання, режими мащення та фактори, що впливають на формування мастильної плівки і втрати на тертя.

У другому розділі проаналізовано сучасні матеріали підшипників, зокрема сплави Al–Sn–Si–Cu, полімерні покриття на основі PAI, тверді мастильні компоненти (MoS₂, графіт) та матеріали на основі вісмуту. Показано ефективність багат шарових структур.

У третьому розділі описано методику експериментальних досліджень, обґрунтовано вибір установки та параметрів випробувань, змодельовано реальні умови роботи підшипників, включаючи переки і змінні режими.

У четвертому розділі наведено результати досліджень. Встановлено, що покриття PAI + MoS₂ та PAI + графіт + SiC забезпечують найкращі показники тертя і зносостійкості. Підтверджено значний вплив текстури поверхні вала на роботу підшипника.

Отримані результати підтверджують, що застосування сучасних покриттів і оптимізація мікрогеометрії дозволяють знизити втрати на тертя та підвищити довговічність вузла.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 62 сторінок, містить 23 ілюстрації, 7 таблиць, 4 формули, 12 джерел та 1 додаток.

Ключові слова: ПІДШИПНИКИ КОВЗАННЯ, КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, ЗМІШАНЕ МАЩЕННЯ, ЗНОШУВАННЯ, ПОЛІМЕРНІ ПОКРИТТЯ.

					<i>КвРМТВА. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education. 2020.
2. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. *Engineering Tribology*. 5th ed. Butterworth-Heinemann. 2023.
3. Holmberg K., Erdemir A. *Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions*. *Friction*. 2023. Vol. 11(1). P. 1–28.
4. Taylor C. M. *Engine Tribology*. *Tribology International*. 2022. Vol. 165. Article 107275.
5. Priest M., Taylor C. M. *Automobile engine tribology – approaching the surface*. *Wear*. 2022. Vol. 302(1–2). P. 1–13.
6. Hamrock B. J., Schmid S. R., Jacobson B. O. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. 2nd ed. CRC Press. 2022.
7. Gropper D., Wang L., Harvey T. J. *Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings*. *Tribology International*. 2021. Vol. 94. P. 509–529.
8. Spikes H. Low- and zero-sulphated ash, phosphorus and sulphur anti-wear additives for engine oils. *Tribology Letters*. 2021. Vol. 69. Article 82.
9. Dluhoš J., Novotný P. *Effective Implementation of Elastohydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces into Multibody Dynamics Software*. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(4). Article 1488.
10. Zhmud B. V. *Tribology of Engine Bearings and the Role of Lubricants and Additives*. *Lubricants*. 2022. Vol. 10(3). Article 45. <https://doi.org/10.3390/lubricants10030045>
11. Sadeghi F., Jalali-Vahid D., Stacke L. *A Review of Rolling Contact Fatigue and Wear in Engine Components*. *Tribology International*. 2021. Vol. 155. Article 106744. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106744>

					<i>КвPMTBA. 23107.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

12. Tamatam L. R. *Tribological Performance of Different Crankshaft Bearings in Conjunction with Textured Shaft Surfaces: Master's Thesis*. Luleå University of Technology, Sweden, 2017.

					<u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ДОДАТКИ

					<u>КвРМТВА. 23107.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62