

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Вплив матеріалів та захисних покриттів на зносостійкість елементів випускної системи двигунів за високих температур»

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

Шифр **КвРМТВА. 23102.02.01.00**

Виконав студент 4 курсу група *МТВАс-23-2*


Підпис


Олександр БОНДАР

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


15.04. Диха О.В.
2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бондару Олександрю Дмитровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Вплив матеріалів та захисних покриттів на зносостійкість елементів випускної системи двигунів за високих температур.**

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 роботи елементів випускної системи двигунів.

2) Дослідження матеріалів та методів трибологічних випробувань

3) Аналіз впливу температури, покриттів на коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування.

4) Порівняльний аналіз пар тертя та узагальнення результатів.

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	Аналіз умов роботи елементів випускної системи двигунів	28.05.2026	вик
2	Дослідження матеріалів та методів трибологічних випробувань	4.06.2026	вик
3	Аналіз впливу температури, покриттів на коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування	8.06.2026	вик
4	Порівняльний аналіз пар тертя та узагальнення результатів	12.06.2026	вик
5	Висновки	14.06.2026	вик
6	Захист роботи	16.06.2026	

Студент



Олександр БОНДАР

Керівник роботи



Павло КАПЛУН

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАс-23-2: Бондар О.Д.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему **«Вплив матеріалів та захисних покриттів на зносостійкість елементів випускної системи двигунів за високих температур»** складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 27 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 13 сторінках. Роботу викладено на 61 сторінці, з них 56 сторінок основного тексту, на яких розміщено 24 рисунків і 9 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню впливу матеріалів та захисних покриттів на триботехнічні характеристики елементів випускної системи двигунів внутрішнього згоряння в умовах високих температур.

Проведено аналіз умов роботи елементів випускної системи, їх конструкцію, основи трибології високих температур, механізми зношування, сучасні матеріали та захисні покриття.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалів (SiMo51, Inconel 718, AlTiN, Tribaloy 400), описано підготовку зразків і методику трибологічних випробувань за схемою «палець–диск» із використанням трибометра SRV.

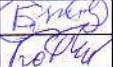
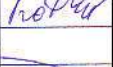


У третьому розділі встановлено, що зі зростанням температури коефіцієнт тертя та зношування зменшуються внаслідок утворення оксидних плівок і трибошарів. Показано, що при кімнатній температурі домінує адгезійне зношування, а при підвищених температурах – трибоокиснення.

У четвертому розділі встановлено, що у вузлі «колектор – ущільнення» реалізуються процеси адгезійного зношування (galling), трибоокиснення та переносу матеріалу. Показано, що покриття AlTiN стабілізує трибологічні характеристики, тоді як Tribaloy не забезпечує зниження коефіцієнта тертя при високих температурах.

Ключові слова: ВИПУСКНА СИСТЕМА ДВИГУНА, ТРИБОЛОГІЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, АДГЕЗІЙНЕ ЗНОШУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ	7
1.1 Умови роботи елементів випускної системи двигунів	7
1.2 Конструкція випускних колекторів та ущільнювальних вузлів	9
1.3 Основи трибології високих температур	13
1.4 Основні механізми зношування	15
1.5 Сучасні матеріали для випускних систем двигунів	18
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	26
2.1 Обґрунтування вибору матеріалів для дослідження	26
2.2 Підготовка зразків для дослідження	27
2.3 Методика трибологічних випробувань	28
2.4 Обладнання для проведення досліджень	31
2.5 Методика визначення трибологічних характеристик	33
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ	40
3.1 Вплив температури на коефіцієнт тертя	40
3.2 Вплив покриттів на інтенсивність зношування	42
3.3 Аналіз механізмів зношування	43
3.4 Порівняльний аналіз пар тертя та узагальнення результатів	44
4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ	45
4.1 Аналіз зразка з'єднання колектора	45
4.2 Аналіз ущільнювального кільця типу lip seal	48
4.3 Аналіз результатів трибологічних випробувань	49
4.4 Аналіз зношування	52
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58
ДОДАТКИ	61

КвРМТВА. 23102.02.01.00										
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Вплив матеріалів та захисних покриттів на зносостійкість елементів випускної системи двигунів за високих температур			Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Бондар								
Перевір.		Каплун			ХНУ, МТВАс-23-2					
Н.контр.		Бабак								
Затвер.		Диха								

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобільного транспорту, енергетичних установок та промислового обладнання в Україні супроводжується підвищенням вимог до надійності, довговічності та екологічності двигунів внутрішнього згорання. Особливо актуальним є забезпечення працездатності елементів випускної системи, які експлуатуються в умовах високих температур, змінних механічних навантажень та агресивного газового середовища. Температура відпрацьованих газів у таких вузлах може досягати 800–900 °С, що призводить до інтенсивного зношування, окиснення та деградації матеріалів. Разом із тим, сучасні дослідження підтверджують, що у реальних умовах експлуатації температурний діапазон у випускних колекторах може перевищувати 800–1200 °С, що суттєво ускладнює забезпечення їх надійності та довговічності [1].

В умовах української експлуатації, зокрема для вантажного транспорту, аграрної техніки, дизель-генераторних установок та спеціалізованої техніки, проблема зносостійкості елементів випускної системи набуває особливої актуальності. Значна частина техніки працює в режимах підвищеного навантаження, часто із порушенням регламентів технічного обслуговування, що призводить до передчасного виходу з ладу з'єднань випускних колекторів, ущільнювальних елементів та поверхонь контакту. Наслідками цього є витіки газів, зниження ефективності роботи двигуна, підвищення витрат палива та збільшення екологічного навантаження. Відомо, що конструкція та стан випускної системи безпосередньо впливають на ефективність двигуна, витрати палива та рівень викидів, що підкреслює важливість оптимізації матеріалів і конструкційних рішень [2].

Одним із найбільш навантажених вузлів є з'єднання випускного та турбінного колекторів, у якому використовується ущільнювальний елемент типу lip seal. У процесі роботи цей вузол зазнає одночасного впливу температурних деформацій, вібрацій та відносного переміщення контактних

									Арк.
									5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u>				

поверхонь, що зумовлює розвиток складних трибологічних процесів. Як показано в дослідженні, зношування таких контактів супроводжується адгезійними явищами (galling), трибоокисненням та абразивним впливом продуктів зносу, що істотно обмежує ресурс вузла. На сьогодні значна кількість досліджень присвячена механічним, тепловим та конструкційним аспектам роботи випускних систем, проте питання їх трибологічної поведінки, особливо за високих температур, залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, встановлено, що застосування сучасних покриттів (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 та ін.) дозволяє підвищити зносостійкість, зменшити термічні напруження та покращити тепловідвід елементів випускного колектора, однак їх ефективність залежить від умов експлуатації та поєднання матеріалів [1]. Водночас вплив таких покриттів на трибологічні процеси в контактних вузлах залишається недостатньо дослідженим.

Актуальність даної роботи також обумовлена сучасними тенденціями переходу до альтернативних видів палива, таких як біодизель, біогаз та синтетичні паливні суміші, що поступово впроваджуються в Україні. Зміна складу продуктів згоряння, температурних режимів та теплових навантажень призводить до зміни умов роботи матеріалів випускної системи, що потребує додаткового вивчення їх трибологічних характеристик та зносостійкості.

Таким чином, підвищення зносостійкості матеріалів та захисних покриттів елементів випускної системи двигунів за високих температур є важливим науково-технічним завданням, що має як теоретичне, так і практичне значення для транспортної, енергетичної та ремонтної галузей України.

Метою роботи є дослідження впливу матеріалів та захисних покриттів на зносостійкість елементів випускної системи двигунів за високих температур з метою підвищення їх ресурсу та надійності в умовах експлуатації.

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Умови роботи елементів випускної системи двигунів

Елементи випускної системи двигунів внутрішнього згорання працюють у складних умовах, що характеризуються одночасною дією високих температур, механічних навантажень, вібрацій та агресивного середовища відпрацьованих газів. Основним призначенням випускної системи є відведення продуктів згорання, зниження рівня шуму та забезпечення екологічних показників двигуна. Водночас саме ці функції обумовлюють підвищені вимоги до матеріалів і конструкцій її елементів.

Температурний режим є визначальним фактором експлуатації випускних вузлів. У сучасних двигунах температура газів у випускному колекторі може досягати 800–900 °С, а в окремих режимах навіть перевищувати ці значення, що призводить до інтенсивного термічного навантаження на матеріал (рис. 1) [3]. Високі температури викликають зміну мікроструктури матеріалів, зниження їх механічної міцності, розвиток повзучості та окиснення поверхонь. У результаті відбувається деградація властивостей матеріалу та зменшення ресурсу вузлів.

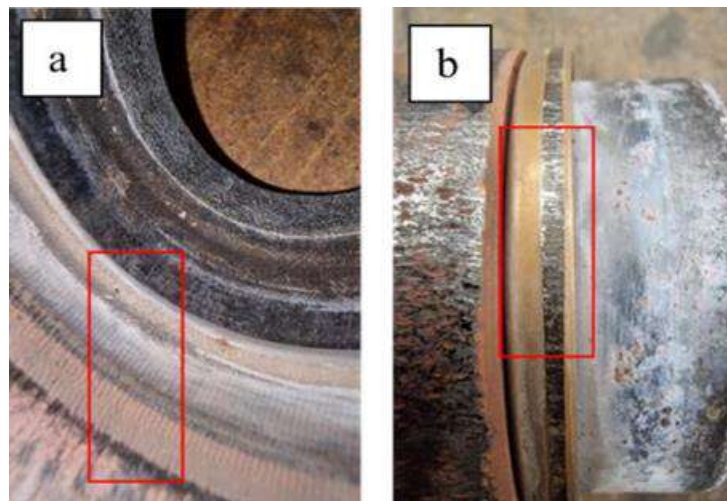


Рис. 1 – Зразки колекторів:

- а) внутрішня зношена поверхня турбінного колектора;
- б) зношене ущільнювальне кільце типу lip seal на випускному колекторі

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Крім температурного впливу, елементи випускної системи піддаються дії змінних механічних навантажень. Вони виникають унаслідок циклічної роботи двигуна, зміни режимів навантаження, а також вібрацій, що передаються від двигуна та дорожнього покриття. Сукупна дія термічних і механічних навантажень призводить до виникнення термомеханічних напружень, які можуть досягати значних величин і є основною причиною руйнування випускних колекторів [4, 5].

Особливістю роботи випускної системи є також агресивний вплив газового середовища. Відпрацьовані гази містять оксиди азоту, вуглецю, сірки та інші хімічно активні компоненти, які сприяють розвитку високотемпературної корозії. При цьому процеси корозії поєднуються з механічним зношуванням, що призводить до виникнення так званого трибокорозійного зносу. Відомо, що в умовах високих температур на поверхнях матеріалів формуються оксидні плівки, які можуть як підвищувати зносостійкість, так і, навпаки, сприяти крихкому руйнуванню поверхневих шарів залежно від умов тертя [6].

Важливою особливістю є наявність контактних з'єднань у випускній системі, зокрема між випускним та турбінним колекторами. У цих вузлах реалізується відносно переміщення контактуючих поверхонь внаслідок теплового розширення та вібрацій. Це призводить до розвитку трибологічних процесів, таких як тертя, зношування та утворення продуктів зносу. Згідно з експериментальними дослідженнями, у таких контактах домінують адгезійний знос, трибоокиснення та абразивна дія частинок зносу.

Особливо інтенсивно зношування проявляється в ущільнювальних елементах, які забезпечують герметичність з'єднання. Внаслідок дії високих температур і циклічних навантажень відбувається їх пластична деформація, руйнування поверхневих шарів і поступова втрата герметичності. Це призводить до витоку газів, зниження ефективності роботи двигуна та збільшення витрат палива. Подібні явища також характерні для інших

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

елементів газорозподільного механізму, де при температурах 500–700 °С спостерігаються процеси інтенсивного зношування, утворення тріщин і втрата міцності матеріалу [7].

Умови експлуатації в Україні додатково ускладнюють роботу випускної системи. Значна частина техніки працює в умовах підвищених навантажень, нерівномірних температурних режимів та обмеженого технічного обслуговування. Це сприяє прискореному зношуванню та підвищує вимоги до зносостійкості матеріалів. Крім того, використання альтернативних видів палива, таких як біодизель або газові суміші, змінює температурні та хімічні умови роботи випускної системи, що також впливає на процеси тертя і зношування.

Таким чином, умови роботи елементів випускної системи двигунів характеризуються комплексною дією високих температур, механічних навантажень, корозійного середовища та трибологічних процесів. Це обумовлює необхідність застосування жароміцних матеріалів і захисних покриттів, а також проведення комплексних досліджень для підвищення їх зносостійкості та довговічності.

1.2. Конструкція випускних колекторів та ущільнювальних вузлів

Випускна система двигуна внутрішнього згоряння є складною інженерною системою, яка забезпечує відведення відпрацьованих газів від циліндрів двигуна, зниження шуму та сприяє підвищенню екологічних показників. Одним із ключових елементів цієї системи є випускний колектор, який об'єднує потоки газів від окремих циліндрів та направляє їх до турбонагнітача або системи нейтралізації (рис. 2).

Конструктивно випускні колектори можуть бути виконані у вигляді литих або зварних вузлів. У сучасних двигунах, зокрема вантажних автомобілів, широко застосовуються литі колектори з високоміцних чавунів типу SiMo, які забезпечують достатню жаростійкість, термічну стабільність та

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

високотемпературних вузлів широко застосовується нікелевий жароміцний сплав Inconel 718 (UNS N07718), який у вітчизняній системі стандартів відповідає марці ХН45МВТЮБР. Даний сплав характеризується високою міцністю, стійкістю до повзучості та окиснення при підвищених температурах, що забезпечує високу міцність і корозійну стійкість при температурах понад 600 °С та його ефективне використання у вузлах випускних систем двигунів.

З метою підвищення зносостійкості та зменшення тертя на поверхню ущільнювальних елементів наносять захисні покриття. Одним із поширених є покриття AlTiN, яке формується методом фізичного осадження з парової фази (PVD). Воно характеризується високою твердістю, термостійкістю та здатністю утворювати захисні оксидні плівки при підвищених температурах, що сприяє підвищенню довговічності елементів [9].

Незважаючи на використання сучасних матеріалів і покриттів, конструкція ущільнювальних вузлів має ряд недоліків. У процесі експлуатації спостерігається зношування контактних поверхонь, що супроводжується адгезійними явищами, утворенням продуктів зносу та руйнуванням покриттів через порушення герметичності з'єднання, що призводить до витоку газів і зниження ефективності роботи двигуна.

Сучасні дослідження показують, що вдосконалення конструкції з'єднань та оптимізація матеріалів і покриттів дозволяють суттєво підвищити ресурс випускних вузлів. Зокрема, використання багат шарових покриттів, градієнтних структур та композиційних матеріалів забезпечує зменшення напружень у зоні контакту та підвищення їх стійкості до зношування [10].

Конструкція випускних колекторів та ущільнювальних вузлів є складною багатофакторною системою, ефективність якої визначається взаємодією матеріалів, геометрії з'єднання та умов експлуатації. Необхідний комплексний підхід до їх дослідження та оптимізації з урахуванням трибологічних процесів, що протікають у зоні контакту.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.3. Основи трибології високих температур

Основи трибології високих температур Трибологія є наукою про взаємодію поверхонь при їх відносному переміщенні, що включає явища тертя, зношування та змащування. У випадку елементів випускної системи двигунів внутрішнього згоряння ці процеси відбуваються в умовах підвищених температур, що суттєво ускладнює їх перебіг та впливає на довговічність вузлів. Згідно з сучасними уявленнями, високотемпературною трибологією вважають область, де робочі температури перевищують 300–350 °С, а в окремих випадках можуть досягати понад 1000 °С [6].

Однією з основних особливостей трибології при високих температурах є відсутність або обмежене використання традиційних мастильних матеріалів. Більшість рідких мастил втрачають свої властивості або повністю деградують при температурах понад 300 °С, що призводить до переходу вузлів у режим сухого або граничного тертя. У таких умовах значну роль відіграють фізико-хімічні процеси, що відбуваються безпосередньо на контактних поверхнях, зокрема утворення оксидних плівок та трибологічних шарів [4].

Коефіцієнт тертя при високих температурах визначається не лише механічними властивостями матеріалів, але й станом їх поверхні, наявністю оксидів та продуктів зносу. Як показано в дослідженнях, при підвищенні температури може спостерігатися як зниження, так і зростання коефіцієнта тертя залежно від умов контакту. Зокрема, формування оксидних плівок на поверхнях може діяти як твердий мастильний шар, зменшуючи тертя, однак при їх руйнуванні можливе різке збільшення зношування.

Важливою характеристикою високотемпературної трибології є зміна механізмів зношування. У звичайних умовах домінують адгезійний та абразивний знос, проте при підвищених температурах значного поширення набувають трибоокиснення та корозійний знос. Це пов'язано з інтенсивною взаємодією матеріалів із навколишнім середовищем, що призводить до утворення оксидних шарів різного складу і структури. Наприклад, для сталей

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

та чавунів при температурах до 570 °С формуються оксиди типу Fe₂O₃ та Fe₃O₄, які можуть підвищувати зносостійкість, тоді як при більш високих температурах утворюється FeO, що має крихку структуру і сприяє інтенсивному абразивному зношуванню.

Особливе значення має формування так званих трибошарів (tribolayers), які виникають у зоні контакту внаслідок механічного перемішування матеріалів і продуктів окиснення. Такі шари можуть виконувати захисну функцію, зменшуючи інтенсивність зносу, або навпаки, сприяти руйнуванню поверхні при їх нестабільності. У науковій літературі вони часто описуються як «глазурні шари» (glaze layers), які формуються внаслідок спікання продуктів зносу при високих температурах [6].

Важливим фактором є також температурна залежність механічних властивостей матеріалів. При нагріванні більшість металів втрачають міцність і твердість, що призводить до збільшення площі реального контакту та підвищення ймовірності адгезійного зношування. Особливо це характерно для матеріалів, температура експлуатації яких наближається до 0,4 температури плавлення, що супроводжується процесами рекристалізації та структурних перетворень.

У вузлах випускної системи двигунів ці процеси ускладнюються додатковими факторами, такими як циклічні теплові навантаження, вібрації та наявність агресивного середовища. У з'єднаннях типу «випускний колектор – турбінний колектор» реалізується комбінований режим тертя, що поєднує ковзання з мікроколиваннями, характерними для фретинг-зношування. Це призводить до інтенсивного утворення продуктів зносу та їх накопичення в зоні контакту, що додатково впливає на трибологічні характеристики вузла.

Сучасні дослідження показують, що ефективне підвищення зносостійкості в умовах високих температур можливе за рахунок застосування жароміцних матеріалів і спеціальних захисних покриттів. Зокрема, покриття на основі нітридів титану та алюмінію (AlTiN) здатні утворювати стабільні

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

тілами або середовищем при відносному переміщенні. У трибологічних системах зношування є комплексним явищем, що залежить від механічних, фізичних і хімічних факторів [11].

У вузлах випускної системи двигунів, які працюють при підвищених температурах, реалізуються різні механізми зношування, що часто діють одночасно. До основних з них належать адгезійний, абразивний, корозійний (трибоокиснювальний) та фретинг-знос. Їх співвідношення визначається умовами контакту, температурою, матеріалами, режимами навантаження [12].

Одним із найбільш поширених є адгезійний знос, який виникає внаслідок утворення і руйнування мікроз'єднань між контактними поверхнями. При значних контактних тисках і температурах відбувається пластична деформація мікронерівностей, що призводить до утворення адгезійних зв'язків. При подальшому русі ці зв'язки руйнуються, що супроводжується відривом частинок матеріалу. У вузлах випускної системи, зокрема в ущільнювальних з'єднаннях типу lip seal, адгезійний знос часто проявляється у вигляді явища задиру (galling), що призводить до інтенсивного пошкодження поверхонь [11].

Другим важливим механізмом є абразивний знос, який пов'язаний із дією твердих частинок або виступів однієї поверхні на іншу. Він реалізується за умов, коли тверді частинки або продукти зносу потрапляють у зону контакту та викликають мікрорізання або пластичне деформування поверхні. Розрізняють двотільний і тритільний абразивний знос. У випускних системах абразивний знос часто виникає внаслідок накопичення продуктів зносу та оксидів у зоні контакту, що посилює руйнування поверхневих шарів [12, 13].

В умовах високих температур значного поширення набуває корозійний (трибоокиснювальний) знос, який є результатом одночасної дії механічного зношування та хімічної взаємодії матеріалу з навколишнім середовищем. При контакті поверхонь у присутності кисню відбувається утворення оксидних плівок, які можуть виконувати захисну функцію. Однак у процесі тертя ці

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Сучасні дослідження показують, що інтенсивність зношування значною мірою залежить від температури, властивостей матеріалів та стану поверхні. Підвищення температури може як зменшувати коефіцієнт тертя за рахунок утворення оксидних плівок, так і збільшувати знос унаслідок зниження міцності матеріалу. Використання захисних покриттів дозволяє зменшити інтенсивність зношування, однак їх ефективність залежить від умов експлуатації та механізмів зносу [13, 14].

Таким чином, основні механізми зношування в елементах випускної системи двигунів формуються під дією складного комплексу факторів, серед яких визначальними є температура, контактні навантаження, властивості матеріалів та середовище експлуатації. Розуміння цих механізмів є необхідною передумовою для розробки ефективних методів підвищення зносостійкості та довговічності вузлів.

1.5. Сучасні матеріали для випускних систем двигунів

Ефективність і довговічність елементів випускної системи двигунів внутрішнього згоряння визначається властивостями матеріалів, які повинні забезпечувати стабільну роботу в умовах високих температур, механічних навантажень та агресивного середовища відпрацьованих газів. До основних вимог до таких матеріалів належать жароміцність, жаростійкість, стійкість до окиснення, зносостійкість та здатність зберігати механічні характеристики при тривалому термічному впливі [11].

У сучасному двигунобудуванні найбільш поширеними матеріалами для виготовлення випускних колекторів є високоміцні чавуни з кулястим графітом типу SiMo (Silicon–Molybdenum). Дані матеріали містять підвищений вміст кремнію (до 5%) та молібдену, що забезпечує формування стабільних оксидних плівок і підвищує жаростійкість при температурах до 800–900 °С. Крім того, кулястий графіт сприяє зменшенню концентрації напружень та підвищенню термостійкості матеріалу. У європейських стандартах таким

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

термічних і механічних навантажень, де необхідна підвищена довговічність та опір термічній втомі [17].

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення зносостійкості є застосування захисних покриттів, які наносяться на поверхні контактуючих деталей. Серед них широко використовуються покриття на основі нітридів титану та алюмінію (AlTiN), які характеризуються високою твердістю, термостійкістю та здатністю утворювати стабільні оксидні шари при підвищених температурах. Такі оксидні плівки виконують функцію захисного бар'єру, зменшуючи інтенсивність тертя та зношування. Крім того, застосовуються покриття на основі кобальтових сплавів типу Tribaloy, які містять тверді інтерметалідні фази та забезпечують високу стійкість до адгезійного і абразивного зносу [18].

Разом із тим, вибір матеріалів для випускних систем є складним інженерним завданням, що потребує врахування не лише їх фізико-механічних характеристик, але й економічних факторів. Чавуни типу SiMo мають оптимальне поєднання вартості та експлуатаційних властивостей, тому широко застосовуються у серійному виробництві. Нікелеві сплави, хоча і забезпечують значно вищу довговічність, мають високу вартість, що обмежує їх використання найбільш навантаженими вузлами.

В умовах експлуатації в Україні, де техніка часто працює при змінних режимах навантаження та обмеженому технічному обслуговуванні, особливо важливим є застосування матеріалів із підвищеною зносостійкістю та термостійкістю. Це обумовлює необхідність використання комплексного підходу до вибору матеріалів і покриттів з урахуванням реальних умов експлуатації [15, 18].

Таким чином, сучасні матеріали для випускних систем двигунів включають високоміцні чавуни типу SiMo, жароміцні нікелеві сплави, леговані сталі та захисні покриття. Їх ефективне застосування визначається умовами експлуатації, температурними режимами та трибологічними

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

процесами, що протікають у зоні контакту, що є ключовим для забезпечення довговічності та надійності вузлів.

1.6. Захисні покриття та їх вплив на трибологічні характеристики

У сучасному двигунобудуванні одним із найбільш ефективних способів підвищення зносостійкості та довговічності елементів випускної системи є застосування захисних покриттів. Їх використання дозволяє змінити властивості поверхневого шару матеріалу без суттєвого впливу на об'ємні характеристики деталі, що є особливо важливим для вузлів, які працюють в умовах високих температур і термомеханічних навантажень [21].

Основною функцією захисних покриттів є зменшення інтенсивності тертя та зношування, а також підвищення стійкості до корозійного впливу відпрацьованих газів. У високотемпературних умовах покриття повинні забезпечувати стабільність структури, високу твердість, адгезійну міцність і здатність до утворення захисних оксидних шарів, які перешкоджають подальшому руйнуванню матеріалу [20, 21].

Серед сучасних покриттів, що застосовуються у вузлах випускної системи, найбільшого поширення набули покриття на основі нітридів титану та алюмінію (AlTiN). Вони формуються переважно методом фізичного осадження з парової фази (PVD) і характеризуються високою твердістю, термостійкістю та стійкістю до окиснення. При підвищених температурах такі покриття утворюють щільний оксидний шар Al_2O_3 , який виконує функцію термобар'єру і знижує швидкість дифузійних процесів, що позитивно впливає на зносостійкість [20].

Іншим важливим класом є покриття на основі кобальтових сплавів типу Tribaloy, які містять інтерметалідні фази (Laves-фази), що забезпечують високу твердість і стійкість до адгезійного зносу. Такі матеріали ефективно працюють у режимах сухого тертя при високих температурах і широко

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

застосовуються для зміцнення контактних поверхонь у вузлах з підвищеним навантаженням [21].

Окрім цього, використовуються оксидні та керамічні покриття (Al_2O_3 , ZrO_2), які характеризуються високою жаростійкістю та низькою теплопровідністю. Вони виконують функцію теплового бар'єру, зменшуючи тепловий потік у матеріал основи та підвищуючи його довговічність. Проте такі покриття мають обмежену стійкість до механічних навантажень і можуть руйнуватися при циклічних термічних впливах [22].

Ефективність захисних покриттів значною мірою визначається їх взаємодією з матеріалом основи. Важливими параметрами є коефіцієнт теплового розширення, адгезія покриття та його товщина. Невідповідність цих параметрів може призводити до виникнення термічних напружень і відшарування покриття, що обмежує термін їх експлуатації [22].

У трибологічному аспекті захисні покриття суттєво впливають на механізми зношування. Зокрема, покриття типу AlTiN зменшують адгезійний знос за рахунок зниження схильності до утворення мікроз'єднань, тоді як тверді інтерметалідні фази у покриттях типу Tribaloy підвищують опір абразивному зношуванню. Крім того, формування стабільних оксидних шарів сприяє зниженню коефіцієнта тертя і стабілізації процесів зношування при високих температурах [20, 21].

Слід зазначити, що ефективність покриттів залежить від умов експлуатації. При надмірно високих температурах можливе їх окиснення, структурна деградація або відшарування, що призводить до втрати захисних властивостей. Крім того, у вузлах із мікропереміщеннями (фретинг-знос) покриття можуть руйнуватися внаслідок циклічних навантажень [20, 22].

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика захисних покриттів для елементів випускної системи

Тип покриття	Склад / основа	Твердість	Робоча температура, °C	Основні переваги	Недоліки	Тип зношування, що зменшується
AlTiN (PVD)	Ti-Al-N	25–35 ГПа	до 800–900	Висока твердість, утворення Al ₂ O ₃ , термостійкість	Можливе окиснення при >900 °C	Адгезійний, частково абразивний
TiN (PVD)	Ti-N	20–25 ГПа	до 600–700	Низький коефіцієнт тертя, хороша адгезія	Нижча термостійкість	Адгезійний
Tribaloy	Co-Mo-Si (Laves-фази)	40–60 HRC	до 800	Висока зносостійкість, стійкість до задиру	Висока вартість, складність нанесення	Адгезійний, абразивний
Al ₂ O ₃	Оксид алюмінію	15–25 ГПа	до 1000	Жаростійкість, хімічна інертність	Крихкість	Корозійний, трибоокиснювальний
ZrO ₂	Оксид цирконію	~12–15 ГПа	до 1100	Тепловий бар'єр, низька теплопровідність	Низька зносостійкість при терті	Термічне руйнування
Cr ₃ C ₂ -NiCr	Карбід хрому	~20–25 ГПа	до 900	Стійкість до окиснення і зносу	Висока жорсткість → тріщини	Абразивний

Загалом застосування покриттів дозволяє не лише підвищити ресурс деталей, але й знизити енергетичні втрати на тертя. Оптимізація трибологічних систем суттєво впливає на енергоефективність машин і механізмів [19]. Ефективне застосування захисних покриттів є ключовим напрямом підвищення зносостійкості елементів випускної системи. Вірний вибір матеріалу покриття, технології його нанесення та умов експлуатації, в сукупності, забезпечує підвищення надійності та довговічності вузлів.

1.7. Аналіз наукових досліджень проблематика досліджень

Розвиток сучасного двигунобудування супроводжується інтенсивними дослідженнями у галузі матеріалознавства та трибології, спрямованими на підвищення довговічності та надійності елементів випускної системи. Значна кількість наукових робіт присвячена вивченню впливу температурних

режимів, механічних навантажень та властивостей матеріалів на процеси тертя і зношування. Аналіз літературних джерел свідчить про наявність ряду невирішених проблем, що потребують подальших досліджень [11].

Одним із основних напрямів досліджень є вивчення властивостей високоміцних чавунів типу SiMo, які широко застосовуються для виготовлення випускних колекторів. Встановлено, що підвищений вміст кремнію і молібдену сприяє формуванню стабільних оксидних шарів і підвищує жаростійкість матеріалу. Однак при температурах понад 850–900 °С спостерігається деградація структури, зниження механічної міцності та інтенсивне окиснення, що обмежує область застосування цих матеріалів [15].

Напрямок дослідження жароміцних нікелевих сплавів є пріоритетним, адже вони забезпечують високу міцність і стійкість до повзучості при підвищених температурах, що робить їх перспективними для застосування у вузлах із підвищеним навантаженням. Обмеження це висока вартість та складність обробки, що знижує можливість їх широкого застосування [16].

Суттєва увага приділяється також дослідженню захисних покриттів, які дозволяють підвищити зносостійкість поверхневих шарів деталей. Встановлено, що покриття типу AlTiN здатні формувати стабільні оксидні плівки, які зменшують коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування при високих температурах. Проте ефективність таких покриттів значною мірою залежить від умов експлуатації, а при перевищенні критичних температур можливе їх руйнування або відшарування [20].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням зносостійких сплавів типу Tribaloy, які характеризуються високою твердістю і стійкістю до адгезійного зносу. Такі матеріали ефективно працюють у режимах сухого тертя, однак їх використання обмежується складністю нанесення і високою вартістю, що зумовлює необхідність пошуку альтернативних рішень [18].

На зараз більшість досліджень зосереджена на вивченні температури, складу матеріалу, тип покриття. Недостатньо уваги приділяють аналізу

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

трибологічних процесів у реальних умовах експлуатації, де одночасно діють термічні, механічні та хімічні фактори. Саме у вузлах випускної системи двигунів спостерігається поєднання адгезійного, абразивного та корозійного зношування, що ускладнює прогнозування їх ресурсу [13].

Крім того, недостатньо дослідженим залишається вплив мікропереміщень контактних поверхонь (фретинг-зношування) на довговічність ущільнювальних вузлів. У реальних умовах експлуатації саме цей механізм часто є визначальним, однак більшість експериментальних досліджень проводиться в умовах стабільного ковзання, що не повністю відображає реальні режими роботи [14].

Важливою невирішеною проблемою є також оптимізація системи «матеріал – покриття – умови експлуатації». Відомо, що навіть високоефективні покриття можуть втратити свої властивості при невідповідності коефіцієнтів теплового розширення або при недостатній адгезії до основи. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до вибору матеріалів і технологій їх зміцнення [21].

Особливої актуальності набуває питання підвищення довговічності вузлів випускної системи в умовах експлуатації в Україні, де техніка часто працює при змінних навантаженнях, нерівномірних температурних режимах та обмеженому технічному обслуговуванні. Це зумовлює необхідність адаптації існуючих наукових рішень до реальних умов експлуатації та розробки нових підходів до підвищення зносостійкості [19].

Таким чином, аналіз наукових досліджень показує, що, незважаючи на значні досягнення у галузі високотемпературної трибології, існує ряд невирішених проблем, пов'язаних із комплексною оцінкою процесів зношування, впливом фретинг-зношування та оптимізацією системи «матеріал – покриття». Це визначає актуальність подальших досліджень, спрямованих на підвищення довговічності елементів випускної системи двигунів.

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Обґрунтування вибору матеріалів для дослідження

Вибір матеріалів для дослідження обумовлений необхідністю аналізу трибологічної поведінки елементів випускної системи двигунів, що працюють в умовах високих температур, змінних навантажень та агресивного середовища. З урахуванням аналізу літературних джерел (розділ 1) для дослідження обрано матеріали, які найбільш широко застосовуються у сучасному двигунобудуванні.

В якості основного конструкційного матеріалу випускного та турбінного колекторів використано високоміцний чавун типу SiMo, який застосовується для виготовлення випускних колекторів. Даний матеріал характеризується високою жаростійкістю, здатністю до утворення захисних оксидних плівок та достатньою термічною стабільністю при температурах до 800–900 °С.

Таблиця 2.1. Хімічний склад матеріалу SiMo51

Елемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Mg	S	Fe
Вміст, %	3,0–3,5	4,2–4,8	0,4	0,1	0,1	0,8–1,2	0,1	0,02–0,08	0,015	решта

Зразки у вигляді дисків також були покриті матеріалом Tribaloy 400, склад якого наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Хімічний склад покриття Tribaloy 400

Елемент	Cr	Mo	C	Si	Fe	Ni	Co
Вміст, %	8,5	28,5	<0,1	2,6	<1,5	<1,5	решта

Сплав Tribaloy 400 є кобальтовим зносостійким матеріалом, що містить молібден, хром і кремній та характеризується високою стійкістю до адгезійного і абразивного зношування. У вітчизняній практиці прями аналоги цього сплаву відсутні, однак за функціональним призначенням найбільш близькими є кобальтові сплави типу стеліт (наприклад, Стеліт 6), які застосовуються для наплавлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя і високих температур.

					<i>KвPMTBA. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Ущільнювальне кільце з'єднання колектора виконане у вигляді ущільнення типу lip seal і виготовляється зі сплаву Inconel 718, зміцненого твердим розчином, хімічний склад якого наведено в таблиці 2.3.

Для моделювання роботи вузлів із підвищеним термічним і механічним навантаженням обрано жароміцний нікелевий сплав Inconel 718 (ХН45МВТЮБР), який широко застосовується у турбінних системах та ущільнювальних елементах. Даний сплав забезпечує високу міцність і стійкість до повзучості при підвищених температурах.

Таблиця 2.3. Хімічний склад ущільнювального кільця Inconel 718

Елемент	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Si	Mn	Cu	Ta	C	P
Вміст, %	53,23	19,05	5,23	3,02	0,94	0,49	0,16	0,14	0,06	0,04	<0,01	0,026	0,008

З метою підвищення зносостійкості контактних поверхонь у дослідженні передбачено застосування захисних покриттів типу AlTiN, яке містить понад 50% алюмінію та наноситься методом фізичного осадження з парової фази (PVD). Вибір цього покриття обумовлений його високою твердістю, термостійкістю та здатністю утворювати захисні оксидні плівки при підвищених температурах.

Таким чином, обрана система матеріалів SiMo – Inconel 718 – AlTiN дозволяє комплексно дослідити трибологічні процеси в умовах, максимально наближених до реальних умов роботи випускних систем двигунів.

2.2. Підготовка зразків для дослідження

Для проведення експериментальних досліджень виготовляються зразки у вигляді дисків або циліндричних елементів, що забезпечують можливість відтворення умов контактної взаємодії. Геометричні параметри зразків обираються з урахуванням вимог до трибологічних випробувань та можливостей експериментального обладнання.

					<u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

у трибологічних дослідженнях та здатністю адекватно моделювати умови контактної взаємодії, характерні для реальних вузлів тертя.

Основною перевагою схеми «палець–диск» є можливість відтворення стабільного ковзного контакту з контрольованими параметрами навантаження, швидкості та температури. Така схема дозволяє моделювати умови роботи контактних поверхонь у вузлах випускної системи, зокрема в з'єднаннях типу «колектор – ущільнення», де реалізується поєднання ковзання та локальних контактних навантажень. Крім того, вона забезпечує високу відтворюваність результатів і зручність експериментального контролю параметрів тертя та зношування.

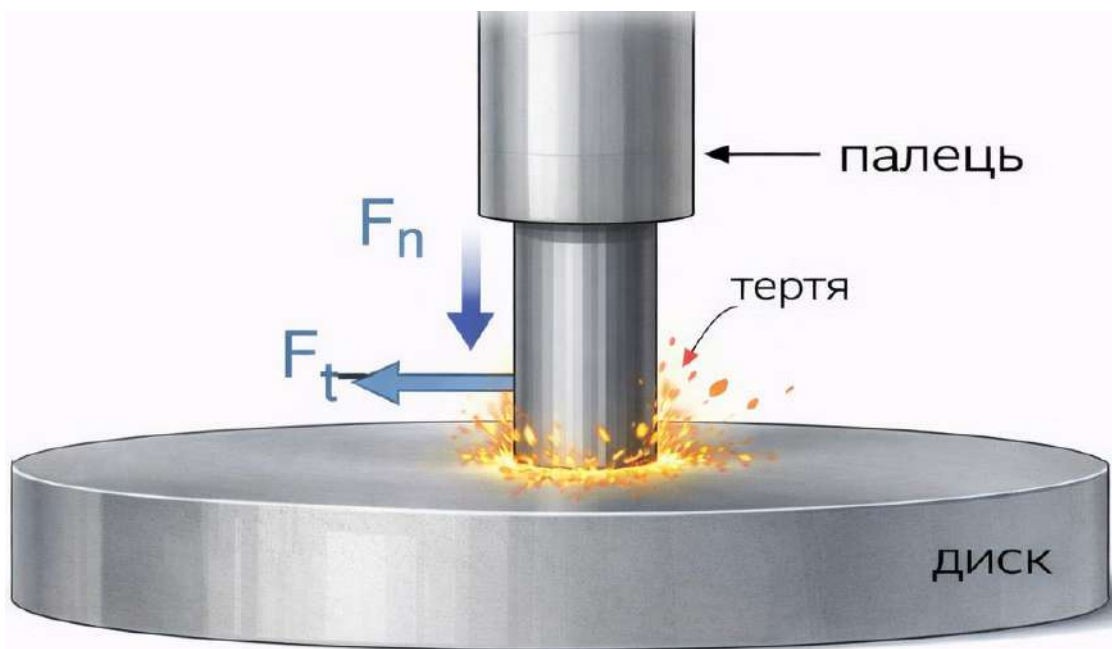


Рис. 7 – Схема контакту типу «палець–диск»

Сутність методу полягає у притисканні циліндричного зразка (пальця) до поверхні диска з певним нормальним навантаженням. При обертанні диска виникає сила тертя, яка реєструється відповідними датчиками. Схема контактної взаємодії наведена на рис. 7.

На рисунку показано, що на контактну пару діє нормальна сила F_n , яка забезпечує притискання зразків, а також сила тертя F_t , що виникає внаслідок відносного переміщення поверхонь. У зоні контакту реалізуються процеси

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково, окрім трибологічних випробувань, були проведені допоміжні експерименти з метою визначення вхідних температур, навантаження, довжини ходу та інших параметрів випробувань.

Вхідні температури, що відповідають температурам у зоні контакту, визначалися за допомогою термопари, привареної до поверхні диска методом точкового зварювання.

Контактне навантаження встановлювалося на основі попередніх експериментальних досліджень, у ході яких прикладалися різні значення навантаження. Було встановлено, що стабільне проведення випробувань забезпечується при навантаженні 30 Н.

Контактний тиск визначався з використанням наближення Герца. Основні параметри випробувань наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Параметри експериментальних випробувань

Вхідна температура, °С	Температура контакту, °С	Навантаження, Н	Контактний тиск, МПа	Хід, мм	Частота, Гц	Час, хв
770	700	30	92	1	50	10
552	500	30	92	1	50	10
325	300	30	92	1	50	10
25	25	30	92	1	50	10

2.4. Обладнання для проведення досліджень

Для виконання досліджень використовується наступне обладнання:

- трибометр – для визначення коефіцієнта тертя та зношування;
- печі або нагрівальні системи ;
- металографічний мікроскоп;
- скануючий електронний мікроскоп (SEM);
- EDS-аналізатор, визначення хімічного складу поверхневих шарів.

Для проведення трибологічних випробувань використовувався трибометр Optimol SRV-3, оснащений високотемпературним модулем.

Вигляд експериментальної установки наведений на рис. 9.

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

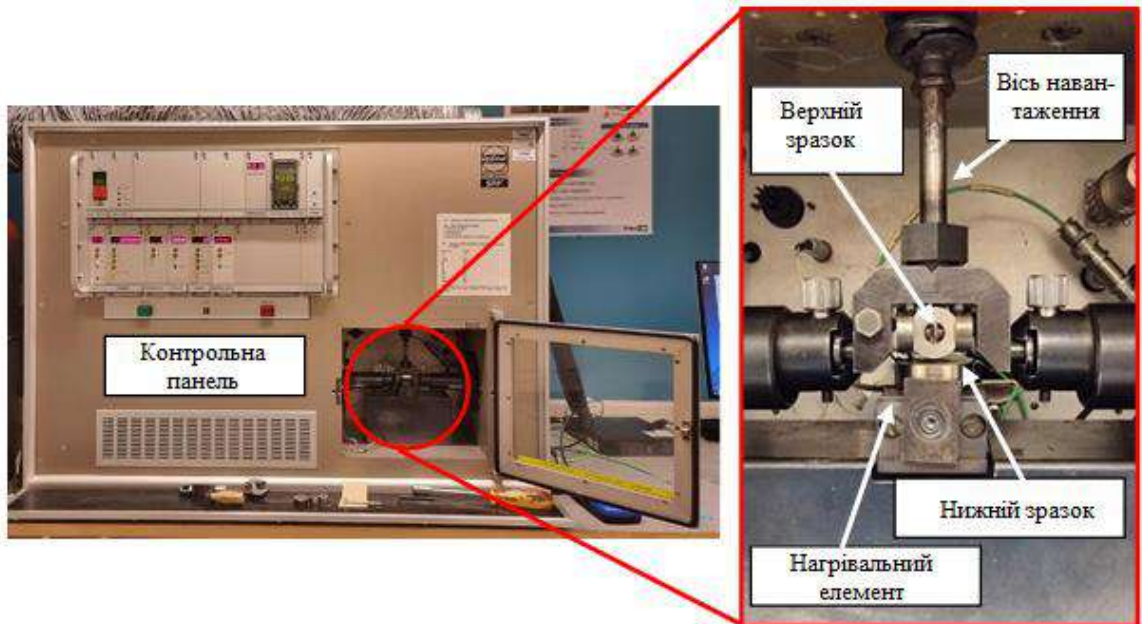


Рис. 9 – Установка високотемпературного трибометра SRV

Умови контакту відповідали схемі перпендикулярної взаємодії, при якій циліндричний зразок (верхній зразок) здійснював коливальний рух відносно нерухомого диска (нижнього зразка), що дозволяє відтворити умови ковзання, характерні для реальної експлуатації.

Нагрівання диска здійснювалося знизу за допомогою нагрівального столу, після чого через навантажувальний механізм прикладалося зусилля, і зразки приводилися в контакт.

У ході випробувань оцінювалися характеристики зношування зразків, а також вплив температури та захисних покриттів на трибологічну поведінку матеріалів. Трибологічні випробування проводилися для чотирьох різних пар матеріалів (табл. 2.6).

Таблиця 2.6. Пари матеріалів верхніх і нижніх зразків

№ пари	Верхній зразок	Нижній зразок
Пара 1	Inconel 718	Чавун SiMo51
Пара 2	Inconel 718 з покриттям AlTiN	Чавун SiMo51
Пара 3	Inconel 718	Чавун SiMo51 з покриттям Tribaloy

Кожна пара досліджувалася при чотирьох температурних режимах з метою встановлення закономірностей зношування та їх еволюції зі зростанням

температури. Для забезпечення достовірності результатів кожне випробування виконувалося двічі. Матриця експерименту наведена в табл. 2.7.

Таблиця 2.7. Кількість повторень випробувань для кожної пари матеріалів залежно від температури контакту

Пара матеріалів Кімнатна температура 300 °С 500 °С 700 °С

Пара 1	2	2	2	2
Пара 2	2	2	2	2
Пара 3	2	2	2	2
Пара 4	2	2	2	2

2.5. Методика визначення трибологічних характеристик

Сучасна трибологія переважно поділяється на вивчення трьох основних напрямів: тертя, зношування та мащення. Тертя і зношування є відгуком трибосистеми та взаємопов'язані між собою. Для розуміння основних положень необхідно чітко визначити ці поняття.

Тертя – це опір руху між двома або більше тілами. Воно є властивістю системи, а не окремого матеріалу. Ще у XVI столітті Леонардо да Вінчі сформулював два основних закони тертя:

- ❖ Сила тертя не залежить від видимої площі контакту поверхонь ковзання.
- ❖ Сила тертя прямо пропорційна нормальному навантаженню.

$$F = \mu \cdot P \tag{2.1}$$

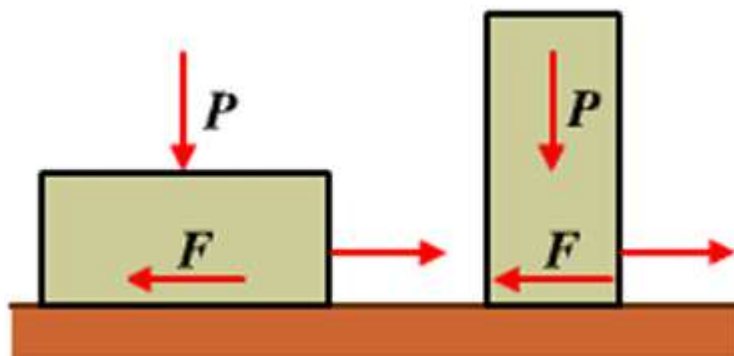


Рис. 10 – Сила тертя не залежить від видимої площі контакту поверхонь

Подальший розвиток і кількісний аналіз процесів тертя дозволив сформулювати більш узагальнені закономірності, які широко застосовуються в сучасній трибології.

Закон Амонтона–Кулона. є одним із перших узагальнень природи сили тертя, який і сьогодні широко використовується. Згідно з ним коефіцієнт тертя поділяється на два типи:

- ❖ Статичний коефіцієнт тертя – характеризує силу тертя при нерухомому стані контактуючих тіл.
- ❖ Динамічний (кінетичний) коефіцієнт тертя – характеризує силу тертя при відносному русі тіл.

Закон Амонтона–Кулона встановлює, що статичний і динамічний коефіцієнти тертя не залежать від величини нормального навантаження F . Значення коефіцієнта тертя визначається властивостями контактуючих матеріалів.

Якщо на тіло діє нормальна сила F , то для його переміщення необхідно прикласти силу f . Мінімальна сила, необхідна для зрушення тіла з місця, визначається як добуток статичного коефіцієнта тертя на нормальне навантаження.

$$f = \mu_s N, \quad (2.2)$$

де: f – сила тертя;

N – нормальне навантаження, Н;

μ_s – коефіцієнт тертя.

Основними параметрами, що визначаються під час дослідження, є:

◆ Коефіцієнт тертя

Визначається як відношення сили тертя до нормального навантаження:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}, \quad (2.3)$$

де: μ – коефіцієнт тертя;

F_t – сила тертя, Н;

					<u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

F_n – нормальна сила.

У процесі випробувань реєструється динамічний коефіцієнт тертя, який відповідає умовам відносного руху контактних поверхонь.

◆ Інтенсивність зношування

Оцінюється за зміною маси або об'єму зразка:

$$I = \frac{\Delta m}{N \cdot S}, \quad (2.4)$$

де: Δm – втрата маси;

N – навантаження, Н;

S – шлях тертя, м.

◆ Схема сил у контакті

Для схеми «палець–диск» характерні такі сили:

- ❖ нормальна сила F_n – діє перпендикулярно до поверхні контакту;
- ❖ сила тертя F_t – напрямлена проти руху.

Схема представлена на рисунку 7.

Під час випробувань диск здійснює обертальний рух, а палець притискається з постійною силою до нього, при цьому реєструється сила тертя. Це дозволяє визначити коефіцієнт тертя, характер зношування, вплив температури та покриттів.

2.6. План експерименту

План експериментальних досліджень сформовано з урахуванням необхідності комплексної оцінки впливу температури, матеріалів і захисних покриттів на трибологічні характеристики контактних пар, характерних для елементів випускної системи двигунів.

Експеримент передбачає дослідження чотирьох пар матеріалів, сформованих із використанням базових матеріалів (SiMo51 та Inconel 718), а також їх модифікацій із захисними покриттями Tribaloy 400 і AlTiN. Вибір

					<u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

саме цих матеріалів обумовлений їх широким застосуванням у реальних вузлах тертя та здатністю працювати в умовах високих температур і навантажень.

Склад досліджуваних пар тертя наведено в табл. 2.5. У рамках експерименту реалізовано наступні варіанти контактної взаємодії:

- контакт базових матеріалів без покриттів;
- контакт із застосуванням покриття на одному з елементів;
- комбіновані варіанти з різними покриттями.

З метою дослідження впливу температурного фактора випробування проводяться при чотирьох температурних режимах:

- кімнатна температура (~ 20 °С);
- 300 °С;
- 500 °С;
- 700 °С.

Вибір температурного діапазону обумовлений необхідністю моделювання умов роботи випускних систем двигунів, де температура контактних поверхонь може змінюватися у широких межах залежно від режиму роботи двигуна.

Кожна пара матеріалів досліджується при всіх заданих температурних режимах. Для забезпечення достовірності результатів кожне випробування виконується двічі. Загальна матриця експерименту наведена в табл. 2.6.

Загальна кількість експериментів визначається як:

$$N = n_{\text{пар}} \cdot n_{\text{темп}} \cdot n_{\text{повт}}, \quad (2.5)$$

де: $n_{\text{пар}}$ – кількість пар матеріалів;

$n_{\text{темп}}$ – кількість температурних режимів;

$n_{\text{повт}}$ – кількість повторень.

Загалом передбачено виконання 32 експериментів, що забезпечує достатню статистичну достовірність отриманих результатів.

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

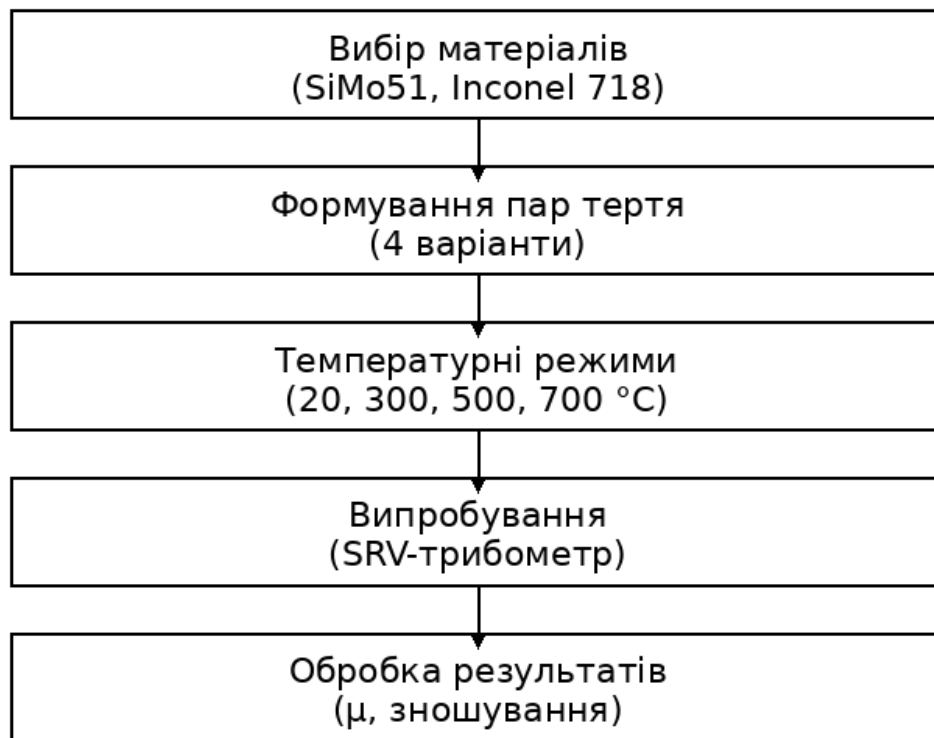


Рис. 11 – Загальна структура проведення експериментальних досліджень

Під час кожного випробування визначаються:

- ❖ коефіцієнт тертя;
- ❖ інтенсивність зношування;
- ❖ характер руйнування поверхонь.

Додатково після проведення випробувань здійснюється аналіз поверхонь зразків із використанням металографічних та електронно-мікроскопічних методів для встановлення механізмів зношування.

Особлива увага приділяється оцінці впливу захисних покриттів на трибологічну поведінку матеріалів. Порівняння результатів для покритих і непокритих зразків дозволяє встановити ефективність застосування покриттів у високотемпературних умовах.

Запропонований план експерименту забезпечує можливість комплексного аналізу впливу основних експлуатаційних факторів на трибологічні характеристики матеріалів, що використовуються в елементах випускної системи двигунів.

У процесі роботи електронна гармата та анод формують і спрямовують пучок електронів на поверхню зразка. При взаємодії з поверхнею генеруються вторинні та відбиті електрони, а також рентгенівське випромінювання. Вторинні та відбиті електрони реєструються детекторами і використовуються для формування зображення.

Для отримання високодеталізованих зображень поверхні та аналізу механізмів зношування використовувався режим вторинних електронів (SEI).

Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS).

Рентгенівське випромінювання, що генерується під час роботи SEM, використовується для визначення хімічного складу поверхні. Цей метод відомий як енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS).

Метод EDS застосовувався для аналізу переносу матеріалу між зразками під час трибологічних випробувань, що дозволило більш детально дослідити механізми зношування.

Обробка результатів трибологічних випробувань. У процесі трибологічних випробувань реєструвалися залежності коефіцієнта тертя від часу. Отримані криві використовувалися для подальшого аналізу трибологічної поведінки матеріалів.

Також визначалися середні значення коефіцієнта тертя для всіх досліджуваних пар матеріалів, що дозволило провести їх порівняльний аналіз.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Вплив температури на коефіцієнт тертя

Високотемпературна трибологія охоплює дослідження процесів тертя і зношування в умовах температур, що перевищують 300–350 °С і можуть досягати понад 1000 °С. У таких умовах більшість традиційних мастильних матеріалів втрачають свої властивості або деградують, тому контактні пари працюють переважно в режимі сухого або твердотілого тертя. Це особливо характерно для елементів випускної системи двигунів внутрішнього згоряння, де вплив високотемпературних газів призводить до прискореного зношування поверхонь, зокрема випускних клапанів і колекторів.

У результаті проведених трибологічних випробувань встановлено, що коефіцієнт тертя істотно залежить від температури контактної зони. Для всіх досліджуваних пар матеріалів спостерігається загальна тенденція до зниження коефіцієнта тертя зі зростанням температури до певного рівня, після чого можливе його підвищення (рис. 13) [23].

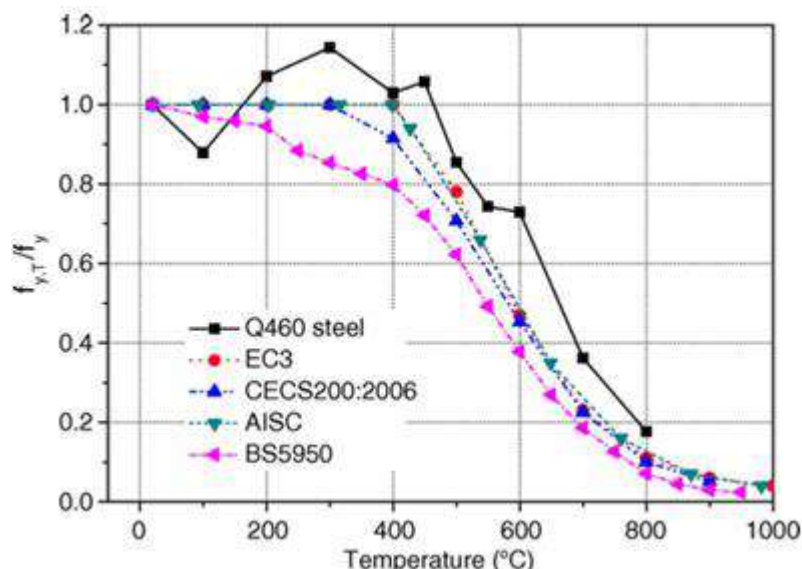


Рис. 13 – Вплив підвищення температури на міцність різних сталей

Зниження коефіцієнта тертя в діапазоні температур 20–500 °С пояснюється інтенсифікацією процесів окиснення поверхонь і формуванням оксидних плівок, які виконують роль твердого мастильного шару. Відомо, що

в умовах нагрівання більшість металів є термодинамічно нестійкими і утворюють оксидні шари, властивості яких змінюються залежно від температури. Наприклад, для заліза і сталей при температурах нижче 570 °С формуються оксиди типу Fe_2O_3 і Fe_3O_4 , які характеризуються достатньою міцністю та зносостійкістю. При підвищенні температури утворюється оксид FeO , який має крихку структуру і сприяє зростанню абразивного зношування [24].

При подальшому підвищенні температури до 700 °С і вище спостерігається зростання коефіцієнта тертя, що пов'язано з деградацією поверхневих шарів матеріалів. При температурах, що перевищують приблизно 0,4 температури плавлення матеріалу, відбувається зміна мікроструктури, зниження твердості та міцності, що призводить до збільшення площі реального контакту і посилення адгезійних процесів (рис. 14).

Важливу роль у формуванні трибологічних характеристик при високих температурах відіграє утворення так званих трибошарів (tribolayers). Вони формуються внаслідок механічного перемішування матеріалів контактних поверхонь та продуктів окиснення. Верхній шар являє собою механічно змішаний шар із дрібнозернистою структурою, тоді як нижче розташована зона пластичної деформації основного матеріалу.

При підвищенні температури інтенсивність окиснення зростає, що сприяє формуванню гладких і блискучих поверхневих шарів, відомих як «глазуровані шари» (glaze layers). Такі шари можуть підвищувати зносостійкість за рахунок ефекту самовідновлення, який реалізується через утворення і спікання продуктів зносу в зонах мікротріщин.

Застосування захисних покриттів суттєво впливає на характер залежності коефіцієнта тертя від температури. Зокрема, покриття типу $AlTiN$ сприяє утворенню стабільного оксидного шару Al_2O_3 , який зменшує коефіцієнт тертя і підвищує стабільність трибологічної поведінки матеріалів при підвищених температурах.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

та ерозійних процесів. Особливу роль відіграє адгезійний перенос матеріалу (задир), який призводить до утворення твердих перенесених шарів і подальшого абразивного зношування.

Застосування захисних покриттів дозволяє суттєво зменшити інтенсивність зношування за рахунок зниження коефіцієнта тертя та підвищення стійкості поверхневих шарів до руйнування.

Для непокритих зразків (пара 1) інтенсивність зношування зростає зі збільшенням температури, що обумовлено зниженням міцності матеріалу та активізацією процесів окиснення.

Застосування покриття Tribaloy 400 на дисках дозволило знизити інтенсивність зношування приблизно на 20–30%, що пояснюється високою твердістю та наявністю інтерметалідних фаз.

Покриття AlTiN на циліндричних зразках забезпечило ще більш значне зниження зношування – до 40–50%, що пов'язано з формуванням захисного оксидного шару.

Найкращі результати отримано для пари з комбінованим застосуванням покриттів, що свідчить про синергетичний ефект їх використання.

3.3. Аналіз механізмів зношування

Аналіз зношених поверхонь показав, що характер механізмів зношування залежить від температури та наявності покриттів.

При кімнатній температурі домінує адгезійний знос, що проявляється у вигляді мікрозадирів і пластичної деформації поверхні.

У діапазоні температур 300–500 °C основним механізмом стає трибоокиснювальний знос, який супроводжується утворенням оксидних плівок.

При температурі 700 °C спостерігається поєднання абразивного та корозійного зношування, що пов'язано з руйнуванням оксидних шарів і утворенням твердих частинок зносу.

					<i><u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Додатково встановлено, що при високих температурах важливу роль відіграють процеси адгезійного переносу матеріалу (galling), які призводять до утворення локальних зон зчеплення та формування твердих перенесених шарів. Ці шари можуть як підвищувати зносостійкість (за рахунок захисного ефекту), так і сприяти абразивному руйнуванню поверхонь.

У випадку металевих ущільнень значний вплив мають також процеси втомного руйнування та деформації покриттів, що призводить до їх поступового зносу і втрати функціональних властивостей.

Застосування покриттів змінює механізми зношування:

- ❖ AlTiN зменшує адгезійний знос
- ❖ Tribaloy підвищує стійкість до абразивного руйнування

3.4. Порівняльний аналіз пар тертя та узагальнення результатів

Порівняння результатів для різних пар матеріалів дозволило встановити їх ефективність у різних умовах експлуатації наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Порівняння результатів для різних пар матеріалів.

Пара	Характеристика
Пара 1	Найбільше зношування, нестабільна робота
Пара 2	Покращення за рахунок AlTiN
Пара 3	Покращення за рахунок Tribaloy
Пара 4	Найкращі результати

На основі проведених досліджень встановлено, що:

- температура суттєво впливає на трибологічні характеристики матеріалів;
- покриття є ефективним засобом підвищення зносостійкості;
- найбільш ефективною є комбінована система покриттів;
- механізми зношування змінюються залежно від температури.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування сучасних матеріалів і покриттів для підвищення довговічності елементів випускної системи двигунів.

4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

4.1. Аналіз зразка з'єднання колектора

Аналіз випускного колектора вантажного автомобіля, наданого компанією Scania, був необхідний для проведення порівняння з експериментальними результатами.

Турбінний колектор був розрізаний з метою дослідження доріжки зношування на внутрішній поверхні, що утворилася внаслідок контакту з ущільнювальним кільцем типу lip seal.

У процесі аналізу було виділено три характерні зони інтересу. На рис. 15 наведено переріз зразка та показано можливу зону зношування.

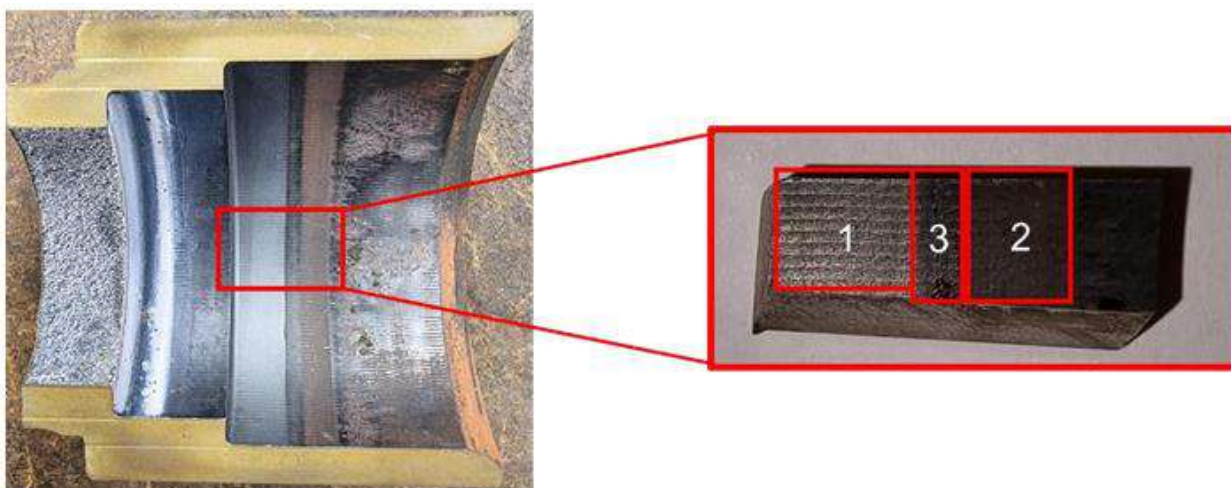


Рис. 15 – Переріз турбінного колектора з виділеними зонами дослідження

За результатами візуального аналізу видно, що зона 1 характеризується відносно невисоким рівнем зношування порівняно з іншими ділянками.

Мікроструктурні дослідження показали наявність деформацій, орієнтованих уздовж напрямку ковзання, що свідчить про контактну взаємодію з ущільнювальним кільцем типу lip seal.

Результати енергодисперсійного аналізу (EDS) вказують на наявність переносу матеріалу між контактуючими поверхнями. Зокрема, у спектрах було зафіксовано присутність алюмінію (рис. 16), що свідчить про перенесення матеріалу з покриття ущільнювального кільця.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Водночас відсутність слідів нікелю дозволяє зробити висновок про те, що покриття ущільнювального елемента не зазнало повної деградації і частково зберігає свої захисні властивості.

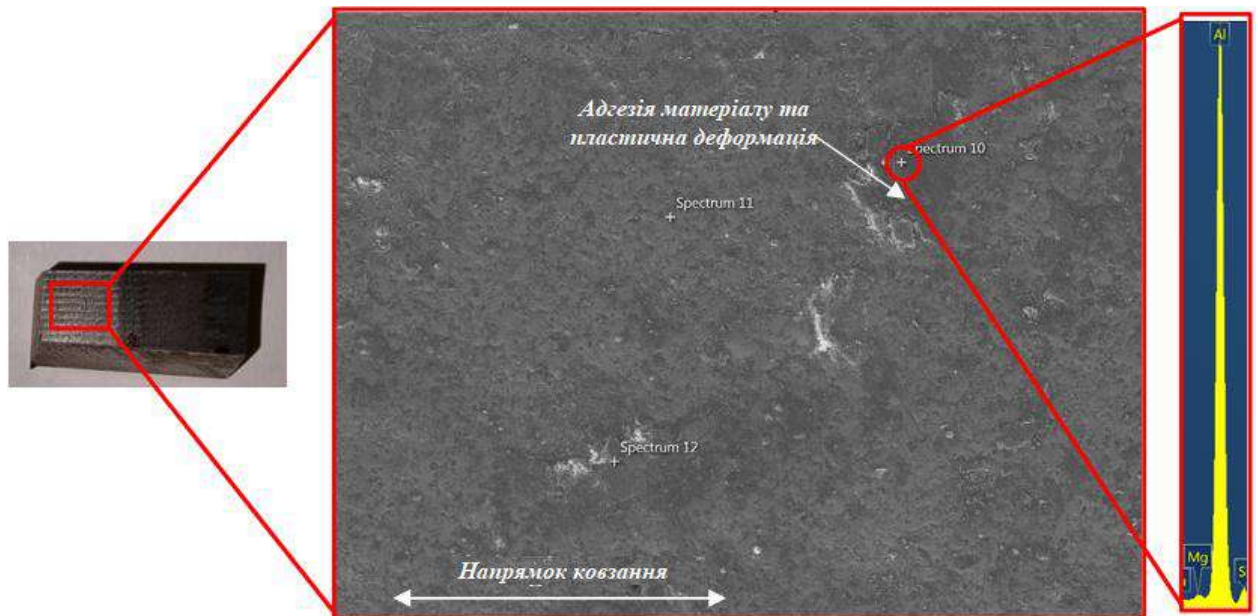


Рис. 16 – Аналіз зони 1 турбінного колектора

Деформована поверхня свідчить про наявність переносу алюмінію з покриття ущільнювального кільця типу lip seal. Водночас відсутність слідів Inconel вказує на те, що покриття не зазнало повної деградації.

Аналогічні результати отримано і для зони 2.

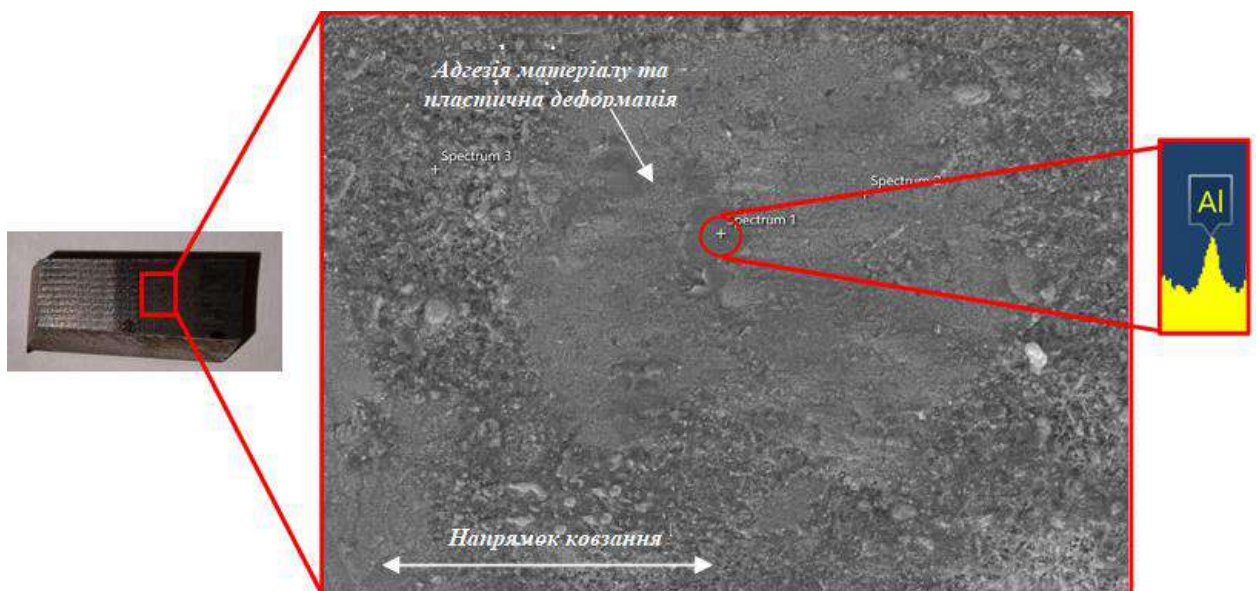


Рис. 17 – Аналіз зони 2 турбінного колектора

Як показано на рис. 17, контакт із ущільнювальним кільцем призводить до переносу матеріалу покриття на внутрішню поверхню турбінного колектора, що підтверджується наявністю алюмінію та титану.

Відсутність нікелю свідчить про те, що покриття не було повністю зруйноване і зберігає свої функціональні властивості.

Деформована поверхня свідчить про наявність переносу алюмінію з покриття ущільнювального кільця типу lip seal. Водночас відсутність слідів Inconel вказує на те, що покриття не зазнало повної деградації.

Аналіз зони 3 показав інший характер трибологічної взаємодії. Встановлено перенесення матеріалу основи (Inconel) разом із покриттям ущільнювального елемента на поверхню турбінного колектора.



Рис. 18 – Аналіз зони 3 турбінного колектора

Було також встановлено, що при високих температурах поверхня зазнає інтенсивного окиснення. Крім того, внаслідок ковзання покриття повністю деградує, а поверхня колектора зазнає значної пластичної деформації та згладжується у напрямку ковзання. Зношена поверхня містить сліди переносу алюмінію з покриття ущільнювального кільця типу lip seal, а також переносу матеріалу основи (Inconel). Це свідчить про повну деградацію покриття в зоні контакту.

Таким чином, зона 3 відповідає реальній доріжці зношування, яка перебувала в безпосередньому контакті із зношеним ущільнювальним кільцем. На рис. 19 наведено SEM-зображення цієї ділянки.

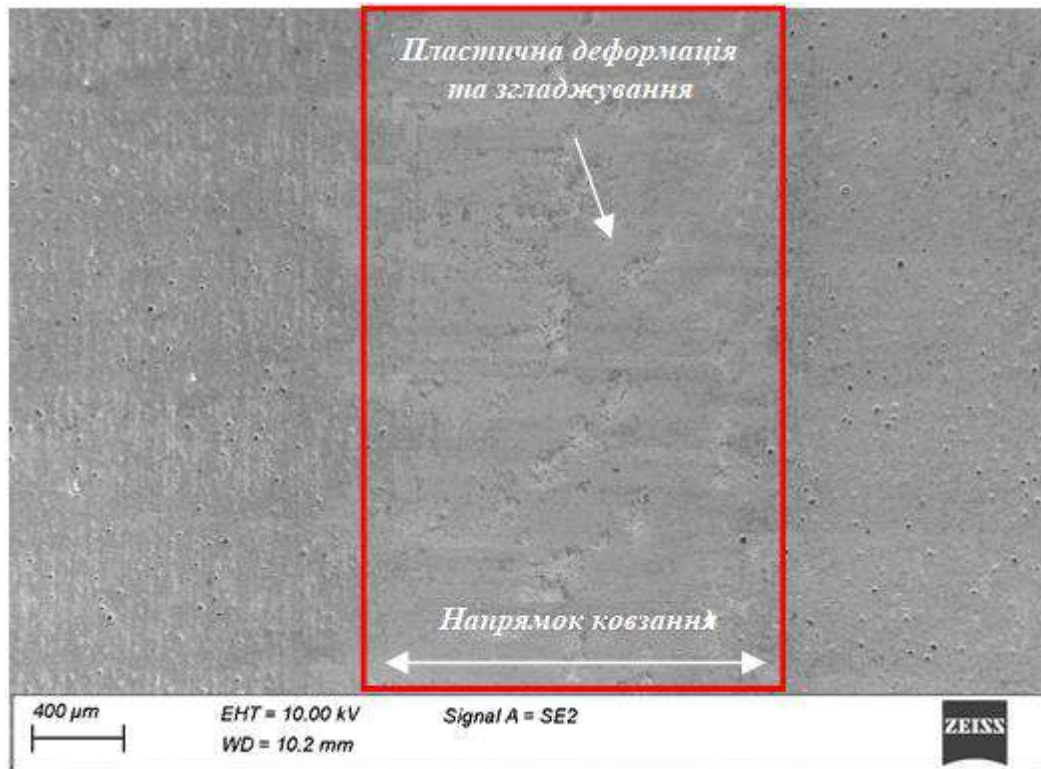


Рис. 19 – SEM-зображення зони 3.

Виділено доріжку зношування та напрямок ковзання

Мікроструктурний аналіз показує наявність інтенсивної пластичної деформації та згладжування поверхні у напрямку ковзання, що підтверджує характер контактної взаємодії. Крім того, чітко спостерігається видалення матеріалу з поверхні, що вказує на розвиток процесів зношування.

Встановлено, що домінуючим механізмом зношування в даній зоні є адгезійне руйнування (galling) у поєднанні з процесами трибоокиснювальної корозії, що характерно для умов високотемпературного тертя.

4.2. Аналіз ущільнювального кільця типу lip seal

Ущільнювальне кільце типу lip seal було досліджене з використанням методів SEM та EDS.

					<i>KвPMTBA. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SEM-аналіз зношеної поверхні кільця показав наявність значної пластичної деформації та згладжування поверхні у напрямку ковзання, що свідчить про інтенсивну контактну взаємодію.

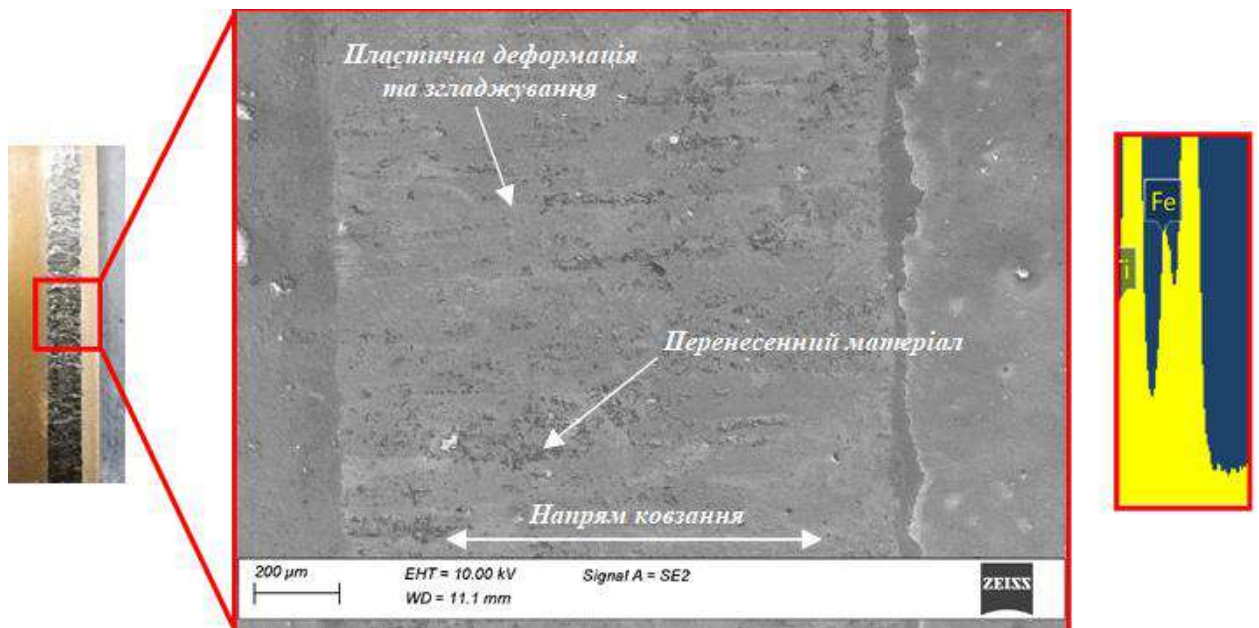


Рис. 20 – Аналіз ущільнювального кільця типу lip seal. Виявлення Fe підтверджує перенесення матеріалу чавуну з поверхні турбінного колектора

Встановлено, що захисне покриття зазнало повної деградації, а також спостерігається зношування матеріалу основи (сплав Inconel).

Результати EDS-аналізу підтверджують наявність переносу матеріалу чавуну з відповідної поверхні колектора, що вказує на взаємний обмін матеріалом між контактуючими поверхнями.

Домінуючим механізмом зношування в даному випадку є адгезійне руйнування (galling), що супроводжується інтенсивною пластичною деформацією та переносом матеріалу.

4.3. Аналіз результатів трибологічних випробувань

У даному підрозділі наведено аналіз результатів дослідження процесів тертя та зношування, отриманих під час трибологічних випробувань, проведених на трибометрі SRV-3 для всіх досліджуваних пар матеріалів у заданих умовах експерименту.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Слід зазначити, що у моделі контакту диск відповідає матеріалу випускного колектора, тоді як циліндр моделює ущільнювальне кільце типу lip seal.

Пари матеріалів, для яких проводилися трибологічні випробування, наведені в табл. 2.6.

Середні значення коефіцієнта тертя визначалися після 100 с роботи установки, що забезпечувало досягнення стаціонарного режиму тертя та стабілізацію значень коефіцієнта тертя.

Для підвищення достовірності результатів обчислювалося середньоквадратичне відхилення на основі двох повторних випробувань. Отримані значення були побудовані у вигляді залежності від температури випробувань, що наведено на рис. 21.

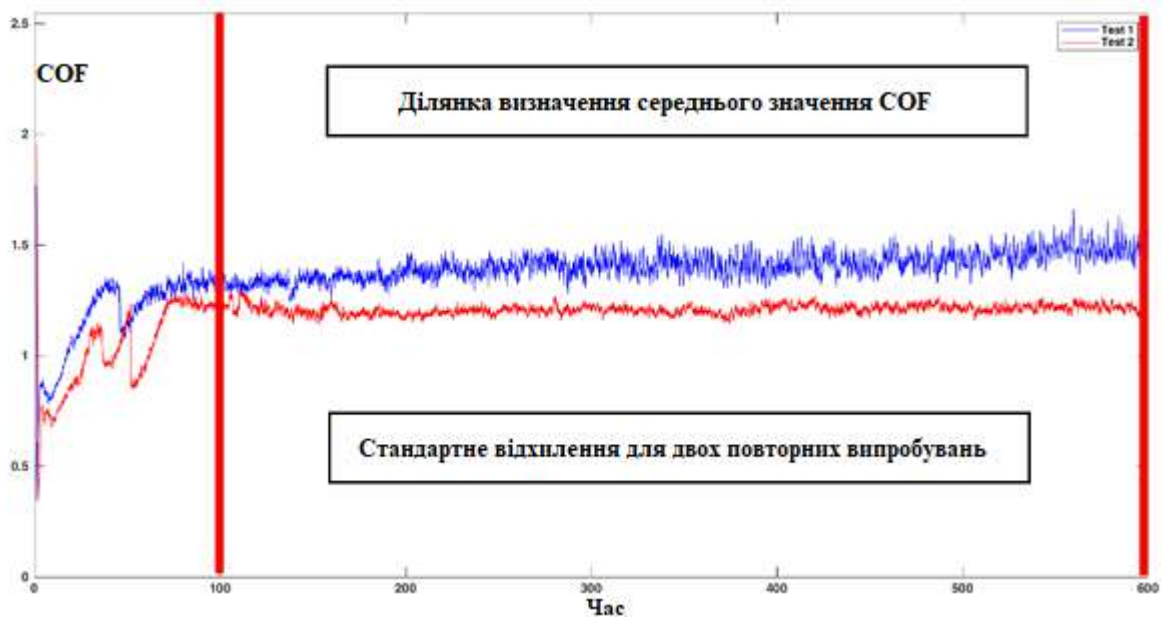


Рис. 21 – Залежність коефіцієнта тертя (COF) від часу з виділенням області визначення середнього значення та стандартного відхилення

На рис. 22 наведено середні значення коефіцієнта тертя (COF) та стандартне відхилення для всіх досліджуваних пар матеріалів і температурних режимів.

Для пари без покриттів встановлено, що максимальні значення коефіцієнта тертя спостерігаються при кімнатній температурі, тоді як із

призводити до збільшення коефіцієнта тертя. Значний вплив також мають механізми зношування, що реалізуються у трибосистемі.

Для пари, у якій диск покритий Tribaloy 400, а циліндр не має покриття, встановлено зниження коефіцієнта тертя при кімнатній температурі порівняно з непокритим диском. Однак зі зростанням температури значення COF збільшується і досягає максимуму при 700 °C. Це може бути пов'язано з утворенням оксидів кобальту на поверхні диска, а також із підвищеною твердістю покриття, що сприяє зростанню сил тертя при високих температурах. На результати також впливають відповідні механізми зношування.

Для пари, в якій диск покритий Tribaloy 400, а циліндр – покриттям AlTiN, спостерігається аналогічна залежність коефіцієнта тертя від температури, як і для пари з покритим диском і непокритим циліндром.

Також встановлено, що за наявності хоча б одного покриття в зоні контакту середні значення коефіцієнта тертя знаходяться в межах 1,1–1,3. Це свідчить про те, що застосування покриття Tribaloy для поверхні колектора не забезпечує зниження коефіцієнта тертя при високих температурах і не є ефективним з точки зору зменшення фрикційних втрат.

4.4. Аналіз зношування

У даному підпункті наведено результати аналізу зношування чотирьох пар матеріалів, отримані на основі об'ємних вимірювань, 3D-оптичної профілометрії, а також досліджень із використанням методів SEM та EDS.

У ході експериментальних досліджень встановлено, що на початкових стадіях випробувань відбувається інтенсивна пластична деформація поверхонь ковзання, внаслідок чого формується первинна доріжка зношування. На цьому етапі спостерігаються коливання сили тертя, що пов'язано з нестабільністю контактної взаємодії.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після кількох циклів навантаження між контактуючими поверхнями починають формуватися частинки перенесеного матеріалу. З часом ці частинки агрегуються та утворюють більш крупні агломерати, які залишаються в зоні контакту і впливають на характер тертя. У результаті цього поверхня поступово стає більш шорсткою.

На подальших стадіях процесу зношування спостерігається циклічний характер розвитку процесів: формування, ріст і руйнування частинок переносу матеріалу. Частинки, що утворюються внаслідок взаємного переносу матеріалу між поверхнями, поступово видаляються із зони контакту у вигляді продуктів зношування.

Встановлено, що утворення продуктів зношування відбувається внаслідок взаємного переносу та накопичення матеріалу контактуючих поверхонь. Дані процеси чітко ідентифікуються на SEM-зображеннях зразків, де спостерігаються характерні ознаки адгезійного переносу, пластичної деформації та формування вторинних структур.

Отримані результати свідчать про складний багатостадійний характер зношування, що включає взаємодію механізмів адгезійного, абразивного та трибоокиснювального зношування. Детальний аналіз механізмів зношування буде наведено у наступному підпункті.

Пара 1 – диск SiMo51 та циліндр Inconel 718

Об'єм зношування зразків визначався за допомогою 3D-оптичного профілометра. Результати вимірювань пари без покриттів наведено на рис. 23.

Встановлено, що в процесі випробувань відбувається втрата матеріалу диска та одночасне накопичення матеріалу на поверхні циліндра. Максимальні значення зношування диска спостерігаються при кімнатній температурі, після чого зі зростанням температури об'єм втрат матеріалу зменшується за експоненціальним законом. Аналогічно, накопичення матеріалу на поверхні циліндра є найбільшим при кімнатній температурі і знижується зі зростанням температури.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

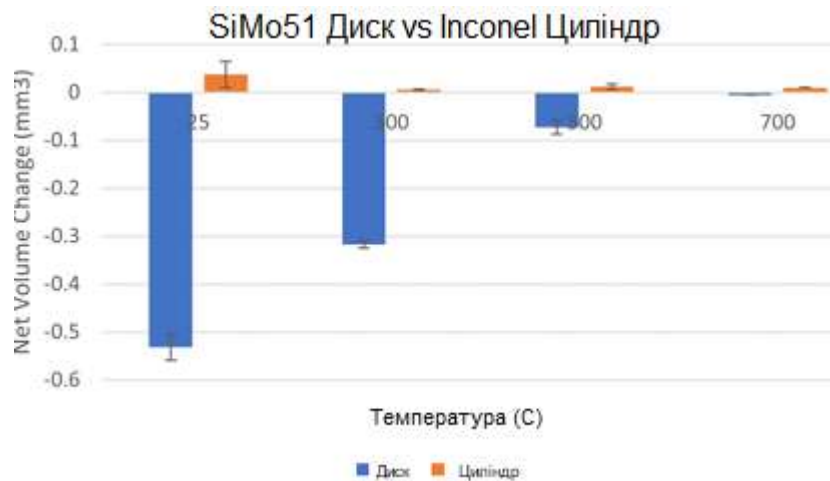


Рис. 23 – Сумарні об’єми зношування зразків. Негативні значення свідчать про втрату матеріалу, позитивні – про його перенесення та накопичення

Згідно з даними літератури, підвищені значення коефіцієнта тертя призводять до збільшення сил опору ковзанню, що, у свою чергу, сприяє інтенсифікації процесів зношування [11]. Отримані результати узгоджуються з фрикційною поведінкою (рис. 21), де залежність коефіцієнта тертя від температури має аналогічний характер, що підтверджує взаємозв’язок між тертям і зношуванням.

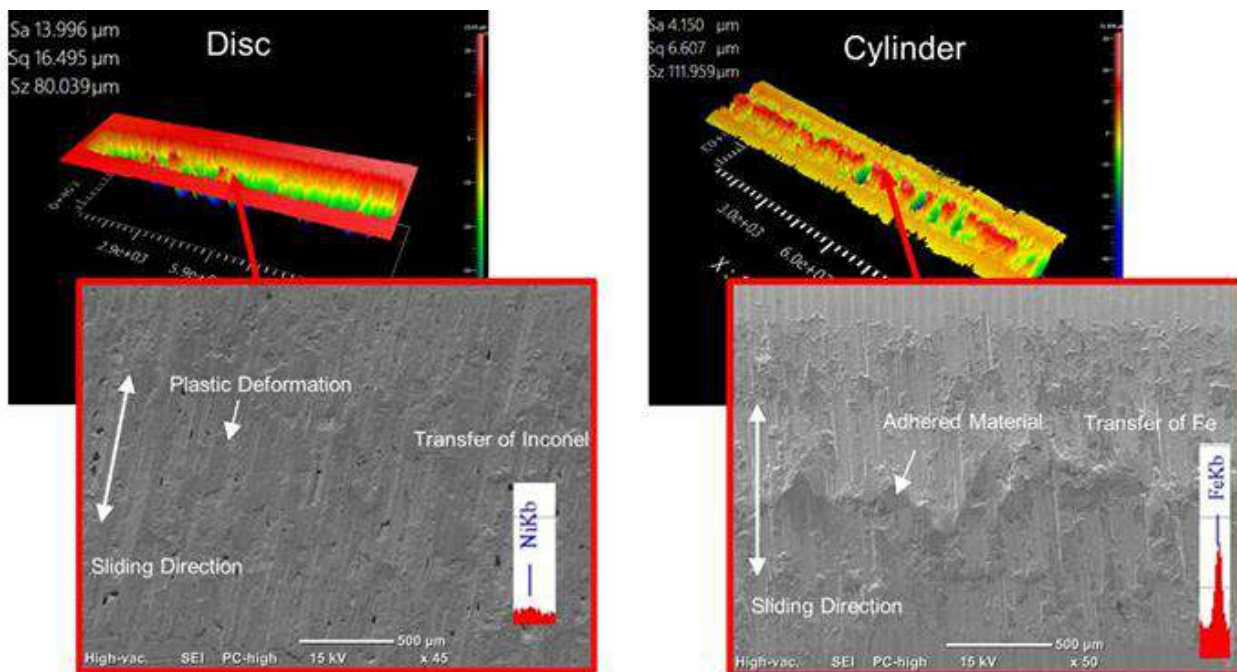


Рис. 24 – Результати 3D-оптичної профілометрії, SEM-досліджень та EDS-аналізу для диска SiMo51 і циліндра Inconel при кімнатній температурі

На рис. 24 наведено результати 3D-профілометрії та SEM-зображення зношених поверхонь диска і циліндра при температурі 25 °С. Встановлено, що при кімнатній температурі зношування поверхонь має інтенсивний характер.

Адгезійне зношування характеризується пластичною взаємодією контактуючих поверхонь, при якій мікронерівності (асперити) зчіплюються і руйнуються в процесі зсуву. Подібні явища спостерігалися і в даному випадку: поверхні зразків зазнавали значної пластичної деформації у напрямку ковзання. За результатами 3D-профілометрії встановлено наявність переносу матеріалу на поверхню циліндра. Дані EDS-аналізу підтвердили взаємний перенос матеріалу між контактуючими поверхнями, про що свідчить виявлення елементів Ni та Fe. Домінуючим механізмом зношування для даної пари матеріалів є адгезійне зношування (galling), що узгоджується з відомими властивостями нікелевих і залізовмісних сплавів, які характеризуються підвищеною схильністю до адгезійної взаємодії.

Результати досліджень поверхонь зразків при температурі 300 °С.

Незважаючи на зменшення об'єму зношування диска, механізм зношування залишається аналогічним попередньому випадку. Адгезійне зношування характеризується пластичною взаємодією контактуючих поверхонь, при якій відбувається зачеплення та зріз мікронерівностей (асперитів) [17]. SEM-дослідження показали наявність пластичної деформації на поверхнях обох зразків у напрямку ковзання, а також адгезії та переносу матеріалу між поверхнями, що підтверджується результатами EDS-аналізу, де зафіксовано наявність Ni та Fe.

Із підвищенням температури відбувається окиснення поверхонь та формування трибошарів, які виконують роль твердого мастильного середовища, це знижує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування. Трибоокиснення відіграє важливу роль у зменшенні зношування. Домінуючим механізмом зношування є адгезійне зношування (galling) у поєднанні з процесами трибоокиснення.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати дослідження поверхонь зразків при температурі 500 °С.

Зі зростанням температури спостерігається суттєве зменшення інтенсивності зношування. При цьому фіксуються явища пластичної деформації, згладжування поверхні та активного трибоокиснення. Зниження зношування пояснюється утворенням оксидних шарів, які перешкоджають адгезійному зчепленню матеріалів. У літературі зазначається, що трибошари, сформовані внаслідок трибоокиснення, можуть виконувати функцію захисного та мастильного шару, зменшуючи коефіцієнт тертя та зношування. На поверхні диска спостерігаються локальні прояви адгезійного руйнування (galling). Також зафіксовано перенесення матеріалу на поверхню циліндра, що є характерною ознакою адгезійного зношування. EDS-аналіз показав відсутність переносу нікелю на поверхню диска, тоді як на поверхні циліндра було виявлено Fe. Домінуючим механізмом зношування є адгезійне (galling) у поєднанні з трибоокисненням.

Результати дослідження поверхонь при температурі 700 °С.

Подібно до попереднього випадку, спостерігається значна пластична деформація та згладжування поверхонь у напрямку ковзання, а також інтенсивні процеси окиснення. Зниження зношування при високих температурах пов'язане з формуванням оксидних шарів, які обмежують адгезійну взаємодію між матеріалами. Трибошари, сформовані внаслідок трибоокиснення, можуть суттєво зменшувати перенесення матеріалу та стабілізувати процес тертя. Водночас на обох поверхнях спостерігаються локальні зони адгезійного руйнування (galling). За результатами EDS-аналізу встановлено перенесення матеріалу на поверхню циліндра, де виявлено Fe, тоді як перенесення матеріалу Inconel на поверхню диска не зафіксовано.

Таким чином, навіть при високих температурах домінуючим механізмом зношування залишається адгезійне зношування (galling) у поєднанні з трибоокисненням.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра було досліджено вплив матеріалів та захисних покриттів на триботехнічні характеристики елементів випускної системи двигунів внутрішнього згоряння в умовах високих температур.

Кваліфікаційна робота складається із чотирьох розділів.

У першому розділі проаналізовано умови роботи елементів випускної системи, їх конструкцію, основи трибології високих температур, механізми зношування, сучасні матеріали та захисні покриття.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалів (SiMo51, Inconel 718, AlTiN, Tribaloy 400), описано підготовку зразків і методику трибологічних випробувань за схемою «палець–диск» із використанням трибометра SRV.

У третьому розділі встановлено, що зі зростанням температури коефіцієнт тертя та зношування зменшуються внаслідок утворення оксидних плівок і трибошарів. Показано, що при кімнатній температурі домінує адгезійне зношування, а при підвищених температурах – трибоокиснення.

У четвертому розділі встановлено, що у вузлі «колектор – ущільнення» реалізуються процеси адгезійного зношування (galling), трибоокиснення та переносу матеріалу. Показано, що покриття AlTiN стабілізує трибологічні характеристики, тоді як Tribaloy не забезпечує зниження коефіцієнта тертя при високих температурах.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 61 сторінки, і містить у собі 24 ілюстрації, 27 джерел, 9 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: ВИПУСКНА СИСТЕМА ДВИГУНА, ТРИБОЛОГІЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, АДГЕЗІЙНЕ ЗНОШУВАННЯ.

					<i>КвРМТВА. 23102.02.01.00</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Nikolaev V. K. *Optimization of exhaust catalytic manifold of internal combustion engine under high temperature conditions*. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2025.
2. Kumar K. S., Kalos P. S., Akhtar M. N. et al. *Experimental and theoretical analysis of exhaust manifold with ceramic coatings*. Case Studies in Thermal Engineering. 2023. P. 103465.
3. Haiqiang L., Hong Q., Bo Z. *Failure and thermal-mechanical coupling analysis of exhaust manifold of a gasoline engine*. Structures. 2024. Vol. 70. P. 107572.
4. Johns-Rahnejat P. M., Rahmani R., Rahnejat H. *Current and Future Trends in Tribological Research*. Lubricants. 2023. Vol. 11. No. 9. P. 391.
5. Gritsenko A., Shepelev V., Kaliyev B. *Tribology in Industry: Study of temperature influence on turbocharger components*. Tribology in Industry. 2023. Vol. 45. No. 3. P. 431–443.
6. Wang L. *A Critical Review of High-Temperature Tribology and Cutting Performance*. Lubricants. 2023. Vol. 11. P. 122.
7. *Analysis of tribological aspects during operation and repair of internal combustion engine valve mechanism parts*. Problems of Tribology. 2024.
8. Li Y., Zhang X., Wang T. *High-temperature behavior of cast iron exhaust manifolds in automotive engines*. Materials Today Communications. 2023. Vol. 35. P. 105482.
9. Rizzo A., Leo P. *Surface engineering of high-temperature components: Coatings and applications*. Coatings. 2023. Vol. 13. No. 5. P. 890.
10. Zhang H., Chen L., Liu Y. *Advanced coatings for high-temperature applications: A review*. Surface and Coatings Technology. 2024. Vol. 478. P. 129567.
11. Stachowiak G., Batchelor A. W. *Engineering Tribology*. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2023. 884 p.

					<u>КвPMTBA. 23102.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

12. Hutchings I. M., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2023.
13. Devaraju A., Kumar H., Babu S. *Wear mechanisms in engineering applications: A review*. Materials Today: Proceedings. 2023.
14. Gritsenko A., Shepelev V., Kaliyev B. *Tribological behavior of engine components under variable loading*. Tribology in Industry. 2023.
15. Hütter G., Zybelle L., Kuna M. *Influence of molybdenum content on high-temperature properties of SiMo ductile cast iron*. International Journal of Metalcasting. 2023.
16. Reed R. C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2022.
17. Davis J. R. *Heat-Resistant Materials*. ASM International. 2023.
18. Zhang H., Chen L., Liu Y. *Advanced coatings for high-temperature tribological applications*. Surface and Coatings Technology. 2024.
19. Holmberg K., Erdemir A. *Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions*. Friction. 2023. Vol. 11. No. 1. P. 1–28.
20. Zhang H., Chen L., Liu Y. *Advanced coatings for high-temperature tribological applications*. Surface and Coatings Technology. 2024.
21. Davis J. R. *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. ASM International. 2023.
22. Pawlowski L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. 2nd ed. Wiley, 2022.
23. Choi J., Seok C.-S., Park S. and Kim G. *Effect of high-temperature degradation on microstructure evolution and mechanical properties of austenitic heat-resistant steel*. Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. No. 2. pp. P. 2011-2020.
24. Shah R., Chen R., Woydt M., Baumann C., Jurs J., Iaccarino P. *High Temperature Tribology under Linear Oscillation Motion*. Tribology International. 2023.

					<u>КвPMTBA. 23102.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

25. Lewis R., Joyce R.S. *Combating automotive engine valve recession*. Tribol. Lubr. Technol. 59. P. 48–51. 2003.
26. Rigney D. *Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials*. Wear. 2000. Vol. 245. P. 1–9.
27. Stott F. H., Lin D. S., Wood G. C. “*Glazes*” *produced on nickel-base alloys during high temperature wear*. Nature. 1973. Vol. 242. P. 75–77.

					<u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

ДОДАТКИ

					<u>КвРМТВА. 23102.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61