

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2023 р.
Зав. кафедри к.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
А.В. Войтік
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи
магістр
(освітній рівень)

тема роботи: **«Підвищення ресурсу ДВЗ шляхом багат шарового зміцнення поршневих кілець наноструктурним покриттям»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208
«Агроінженерія»
ПАВЛИК Олександр Леонідович
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Дідур В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____
Спеціальність _____ 208 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
А.В. Войтік
“ ____ ” _____ 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студенту _____ **Павлику Олександрю Леонідовичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Підвищення ресурсу ДВЗ шляхом багатошарового зміцнення поршневих кілець наноструктурним покриттям»

керівник роботи _____ **д.т.н., професор Дідур В.В.** _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“14” листопада 2023 р. № 01-06/261

2. Строк подання студентом роботи _____ 25.11.2023 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: метод зміцнення маслороз'ємних поршневих кілець двигунів; літературні джерела; умови роботи і механізмів зношування поршневих кілець двигунів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- проаналізувати виявлену інформацію за умовами роботи та механізмами зношування поршневих кілець, методами їх зміцнення і досягним властивостям;
- розробити методологічний підхід для проведення досліджень з використанням експериментальних, теоретичних підходів для оцінки особливостей структурних змін при терті та зношуванні маслороз'ємних поршневих кілець;
- запропонувати та випробувати новий технологічний процес зміцнення багатошаровою наноконпозицією робочої поверхні маслороз'ємних поршневих кілець при використанні різних співвідношень зміцнюючих фаз;
- на основі виконаного аналізу оцінити вплив запропонованого способу зміцнення на рівень напружено-деформованого стану поршневих кілець і розробити метод контролю і бракувальні норми за рівнем залишкових напружень, що формуються в матеріалі поршневих кілець при зміцненні, та спосіб їх зниження;
- провести стендові порівняльні випробування на терті та зношування зміцнених поршневих кілець з сірого чавуну і оцінити характер і швидкість їх зношування в порівнянні з серійними в умовах виробництва;

- запропонувати теоретичний підхід використання оптико-математичного аналізу для визначення характеру формування залишкових напружень і структуроутворення поверхонь тертя поршневих кілець.

- оцінити технологічну та економічну ефективність нової технології зміцнення поршневих кілець для двигуна техніки спеціального призначення

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження; триботехнічні властивості іонно-плазмових і багатокомпонентних покриттів; показники економічної ефективності;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Дідур В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2023 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2023 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2023 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2023 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2023 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2023 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2023 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2023 р.	

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Павлик О.Л.

(прізвище та ініціали)

Дідур В.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Павлик О.Л. «Підвищення ресурсу ДВЗ шляхом багат шарового зміцнення поршневих кілець наноструктурним покриттям» (Дипломна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 76 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 31 рисунок, 19 таблиць, 28 джерел літератури).

Робота присвячена дослідженню закономірностей зміни трибологічних властивостей поршневих кілець з багат шаровим зміцненням наноструктурним покриттям.

Запропоновано багат шарове іонно-плазмове покриття TiN/CrN поршневих кілець на устаткуванні типу «Булат-6».

Для реалізації поставленої мети в першому розділі проведено аналіз широко використовуваних методів зміцнення поршневих кілець, особливості структуроутворення покриттів та зміни триботехнічних властивостей.

В другому розділі проведено математичне планування експерименту. Виявлено фактори впливу властивостей покриттів на мікротвердість та швидкість зношування.

В третьому розділі проаналізовано вплив максимальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець.

Розроблено питання з охорони праці під час здійснення електроконтактного напилення поверхні деталі що зношена.

Виконано економічне обґрунтування запропонованого удосконалення.

Ключові слова: РЕСУРС, ЗМІЦНЕННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕКСПЕРИМЕНТ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПОРШНЕВІ КІЛЬЦЯ, НАНОСТРУКТУРОВАНЕ ПОКРИТТЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ, МЕХАНІЗМІВ ЗНОШУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ.....	8
1.1 Аналіз умов роботи і механізмів зношування поршневих кілець двигунів.....	8
1.2 Аналіз широко використовуваних методів зміцнення поршневих кілець, особливості структуроутворення покриттів та зміни триботехнічних властивостей.....	10
1.3 Триботехнічні властивості іонно-плазмових і багатокомпонентних покриттів.....	16
1.4 Завдання роботи.....	22
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАСЛОЗ'ЄМНИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ.....	23
2.1 Методологічний підхід та етапи досліджень зносостійкості маслоз'ємних поршневих кілець.....	23
2.2.Метод зміцнення маслоз'ємних поршневих кілець двигунів.....	25
2.3 Методика визначення трибологічних характеристик та якості робочих поверхонь поршневих кілець.....	28
2.4 Математичне планування експерименту. Виявлення факторів впливу властивостей покриттів на мікротвердість та швидкість зношування.....	34
2.5 Висновки до розділу.....	36
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ, ЗМІЦНЕНИХ БАГАТОШАРОВОЮ НАНОЗМІЦНЮЮЧОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ TiN/CrN.....	39
3.1 Результати вимірювання лінійних розмірів замків поршневих кілець та коерцитивної сили їх робочих зон після нанесення покриттів.....	39
3.2 Вплив мінімальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець.....	42
3.3 Вплив максимальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець.....	49
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	56
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ БАГАТОШАРОВИМ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ ПОКРИТТЯМ TiN/CRN МАСЛОЗ'ЄМНИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ.....	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення зносостійкості виробів, що працюють в умовах інтенсивного тертя та зношування є актуальним, зокрема для деталей циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згоряння, в тому числі і для двигунів техніки спеціального призначення. За даними досліджень відмов деталей циліндропоршневої групи таких двигунів виявлено, що після 400 000 км пробігу найбільшу кількість відмов (100%) припадає на маслоз'ємні поршневі кільця. При цьому причиною їх відмов є інтенсивне зношування робочої поверхні. Така тенденція обумовлена тонкостінною конструкцією виробу, виготовленого з крихкого матеріала – сірого чавуну і складними режимами експлуатації (низькі швидкості ковзання – до 1,3 м/с). Зношування поршневих кілець є складним фізико-механічними процесом, і вимагає розробок спеціальних рішень для підвищення їх зносостійкості. Для цієї мети перспективним є нанесення на робочу поверхню спеціального зміцнюючого наноструктурного покриття. Аналізом численних досліджень встановлено, що нанесення наноструктурних покриттів з високим рівнем властивостей забезпечує технологія іонно-плазмового їх осадження. Така технологія забезпечує багаторазове підвищення рівня фізико-механічних і триботехнічних властивостей в порівнянні з гальванічним хромуванням, лазерним і плазмовим методами зміцнення поверхні. Окремо слід відзначити екологічність і низький рівень енерговитрат такого технологічного процесу відносно вищезазначених. Запропонована технологія зміцнення повинна передбачати не тільки підвищення стійкості до зношування, а й запобігати підвищенню напружено- деформованого стану матеріала, забезпечувати потрібні властивості. Їх розробка потребує оцінки змін властивостей та контролю якості нових технологічних процесів при виробництві, які ефективно можливо використовувати. Це спеціальні методи неруйнівного контролю і, особливо, прогресивний оптико-математичний метод. Останній зарекомендував себе як найбільш ефективний для локальної оцінки зміни структуроутворення досліджуваної поверхні з урахуванням впливу обраної технології зміцнення, а також умов експлуатації.

Метою роботи є підвищення якості та триботехнічних властивостей робочої поверхні чавунних маслоз'ємних поршневих кілець двигунів техніки спеціального призначення з сірого чавуну нанесенням іонно-плазмового багат шарового зміцнюючого покриття.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати виявлену інформацію за умовами роботи та механізмами зношування поршневих кілець, методами їх зміцнення і досягаємим властивостям.

2. Розробити методологічний підхід для проведення досліджень з використанням експериментальних, теоретичних підходів для оцінки особливостей структурних змін при терті та зношуванні маслоз'ємних поршневих кілець.

3. Запропонувати та випробувати новий технологічний процес зміцнення багат шаровою наноконпозицією робочої поверхні маслоз'ємних поршневих кілець при використанні різних співвідношень зміцнюючих фаз.

4. На основі виконаного аналізу оцінити вплив запропонованого способу зміцнення на рівень напружено-деформованого стану поршневих кілець і розробити метод контролю і бракувальні норми за рівнем залишкових напружень, що формуються в матеріалі поршневих кілець при зміцненні, та спосіб їх зниження.

5. Провести стендові порівняльні випробування на тертя та зношування зміцнених поршневих кілець з сірого чавуну і оцінити характер і швидкість їх зношування в порівнянні з серійними в умовах виробництва.

6. Запропонувати теоретичний підхід використання оптико-математичного аналізу для визначення характеру формування залишкових напружень і структуроутворення поверхонь тертя поршневих кілець.

7. Оцінити технологічну та економічну ефективність нової технології зміцнення поршневих кілець для двигуна техніки спеціального призначення.

Об'єктом досліджень є процеси тертя та зношування зміцненої робочої поверхні поршневих кілець.

Предметом досліджень є закономірності зміни трибологічних властивостей поршневих кілець з багат шаровим зміцненням наноструктурним покриттям.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ, МЕХАНІЗМІВ ЗНОШУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ

Перш ніж приступити до розробки технологічного процесу зміцнення маслороз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки проаналізували умови роботи і механізми зношування поршневих кілець, використовуваних матеріалів, технологічних процесів зміцнення аналогічних деталей, які можуть забезпечити стабільність їх якості та високу зносостійкість при експлуатації.

1.1 Аналіз умов роботи і механізмів зношування поршневих кілець двигунів

Маслороз'ємні поршневі кільця призначені для видалення надлишка моторної оливи з поверхні циліндра. Окрім видалення зайвої оливи, вони залишають найтонший її шар, для мінімізації сили тертя між поршнем і циліндром. Такі вироби працюють при терті ковзанні у зворотно-поступальному русі в різних режимах навантаження. Як відомо, на триботехнічні властивості поршневих кілець впливають широкий спектр чинників, зокрема: питомий тиск у зоні тертя, температура у трибосистемі, когезійна міцність поверхневого шару, співвідношення адгезії між покриттям і основним металом кільця та покриттям і поверхнею спряженої деталі, напружений стан виробу, параметри шорсткості, конструкція і матеріал виготовлення кільця, матеріал покриття [1].

За даними проведених досліджень відмов деталей циліндропоршневої групи двигунів техніки спеціального призначення виявлено, що після 400 000 км пробігу найбільша кількість відмов (100%) характерна для маслороз'ємних поршневих кілець (рис. 1.1). При цьому причиною їх відмов є інтенсивне зношування робочої поверхні.

Така тенденція обумовлена тонкостінною конструкцією виробу, виготовленого з крихкого матеріала – сірого чавуну і складними режимами експлуатації (низька швидкість ковзання поршневої групи – до 1,3 м/с).



Рисунок 1.1 – Відсоток відмов деталей циліндропоршневої групи двигунів техніки спеціального призначення

Зношування маслоз'ємних поршневих кілець при експлуатації призводить до суттєвого підвищення димності вихлопів, збільшенні нагаровідкладення в випускному тракті двигуна і перевитраті моторної оливи. Це створює необхідність проводити позаплановий ремонт двигуна для заміни зношених кілець, що потребує додаткових витрат.

Відомо, що на поршнєві кільця двигунів внутрішнього згоряння діють різні механізми зношування, зокрема: ерозійне зношування газовим потоком, втомне зношування в умовах циклічних навантажень, абразівне зношування твердими частинками і продуктами зносу, а також окислювальне зношування. Враховуючи, що поршнєві кільця працюють в умовах тертя ковзання, до вищенаведеного переліку механізмів зношування слід додати також знос в умовах захоплювання першого і другого роду.

Окрім того, автором досліджень [3] встановлено, що при відносно низьких швидкостях ковзання (до 1 м/с) в середовищі оливи МС-20 та в умовах сухого тертя при різних навантаженнях домінує окисний механізм зношування. Він

супроводжується розвитком пластичної деформації у тонких шарах поверхонь тертя, утворенням вторинних захисних структур та помірним зносом. При збільшенні швидкості ковзання понад 1 м/с виникає і розвивається процес схоплювання другого роду, який викликає процес інтенсивного зношування поверхонь тертя. Слід зазначити, що для досліджень в умовах мащення оливою МС-20 та в умовах сухого тертя були використані сталеві зразки з різним рівнем твердості.

Враховуючи вищевикладене, для забезпечення високих триботехнічних властивостей поршневих кілець виникає необхідність розглянути відомі методи та матеріали зміцнення робочої поверхні таких виробів з урахуванням умов їх експлуатації. Окрім того, для забезпечення високих експлуатаційних характеристик роботи двигуна протягом тривалого часу експлуатації, поршневі кільця повинні забезпечувати низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість [1].

1.2 Аналіз широко використовуваних методів зміцнення поршневих кілець, особливості структуроутворення покриттів та зміни триботехнічних властивостей

В роботі [1] застосовували іонно-плазмове і лазерне зміцнення робочих поверхонь для обробки поршневих кілець з високоміцного чавуну ВЧ50-1,5 для дизеля 6ЧН 25 34. В якості зміцнюючого матеріалу, який наносили напиленням на установці «Булат-3Т», був обраний молібден.

Порівняльні випробування на зносостійкість проводили на зразках поршневих кілець:

- з хромовим покриттям;
- зміцнених лазерним променем;
- напилених молібденом.

Результати проведених випробувань показали, що:

- найбільший знос характерний для хромованих поршневих кілець;
- найменший знос відповідає поршневим кільцям з молібденовим покриттям;

- знос пари тертя з молібденовим покриттям зразка поршневого кільця в 2,2-2,5 рази менше, ніж у пар, де поршневі кільця піддавали хромуванню;
- знос пари тертя при лазерному зміцненні в 1,6-1,8 рази менше, ніж – хромованого при плазмовому нанесенні.

Слід врахувати, що структура вихідного матеріалу аналізованих поршневих кілець відрізняється більш високим рівнем зносостійкості, ніж звичайний сірий чавун, що в сукупності з технологією зміцнення покриттям молібденом забезпечує підвищення терміну їх служби, навіть у порівнянні з традиційним гальванічним хромуванням і лазерним зміцненням. Це свідчить про те, що істотний внесок в ступінь зміцнення вносить вихідний матеріал деталі, що також підтверджує і аналіз досліджень [2-6].

В роботі [7] визначено характер тертя і оцінена зміна мікротвердості композитних іонно-плазмових покриттів відносно до роботи поршневих кілець тепловозних дизельних двигунів, а також техніко-економічні показники, двигунів що випускаються.

Результати випробувань по визначенню коефіцієнтів тертя $f_{тр}$ наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати випробувань покриттів на трибологічні характеристики

Покриття	Значення коефіцієнтів тертя при навантаженні Р, кН						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
TiN	0,025	0,033	0,040	0,051	0,085	0,097	0,086
TiAlN	0,020	0,023	0,028	0,034	0,040	0,057	0,086
MoN + Mo	0,020	0,23	0,032	0,038	0,049	0,060	0,065
MoCuN	0,020	0,025	0,030	0,036	0,044	0,050	0,080
Хромоване кільце	0,120	0,105	0,093	0,92	0,096	задиру- утворення	-

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що використання для

поршневих кілець таких композитних покриттів забезпечує більш високі показники задиристійкості і характеристики тертя сполучення «гільза - поршневе кільце» в порівнянні з електролітичним хромом.

Середні значення коефіцієнтів тертя ($f_{тр}$) в діапазоні загальних навантажень 0,2 - 1,0 кН (таблиця 1.2), характерних для умов роботи компресійних поршневих кілець показують, що покриття на основі TiAlN, MoN + Mo та MoCuN мають близькі показники коефіцієнтів тертя в діапазоні 0,029 - 0,032, що більше ніж в три рази ніж при хромуванні. Покриття TiN знижує коефіцієнт тертя $\sim$ в два рази в порівнянні з хромуванням.

Таблиця 1.2 – Середні значення коефіцієнтів тертя $f_{тр}$ в діапазоні загальних навантажень 0,2-1,0 кН та мікротвердість досліджених покриттів

Матеріал покриття	$f_{тр}$	Мікротвердість, Н-50	
		вихідна	доріжок тертя
TiN	0,054	2515	3334
TiAlN	0,029	1503	1720
MoN + Mo	0,032	1507	2335
MoCuN	0,031	2022	2212
Хромоване кільце	0,101	1057	755

Як показано і в роботі [1], гальванічне хромування не забезпечує істотного підвищення рівня властивостей деталей, що труться, а також поступається прогресивним іонно-плазмовим технологіям, про що свідчить зниження мікротвердості та істотна деградація зміцненого шару, яка спостерігається в процесі тертя.

Для проведення досліджень використовували кільця виробництва ВАТ «КЗПК», ВАТ «ЯМЗ» і ВАТ «РУМО». При лазерній обробці, їх виготовляли з високоміцного чавуну, а поверхню зміцнювали гартуванням. Після обробки на робочій поверхні формується білий чавун, який в порівнянні з сірим має значно меншу твердість і зносостійкість.

Експериментально авторами було виявлено, що для лазерного гартування компресійних кілець і отримання необхідних фізико-механічних властивостей переважно застосовували високоміцні чавуни з кулястим графітом, що має такий хімічний склад %: 3,0 ... 3,2 C, 0,8 ... 0,95 Mn, 0,2 ... 0,3 Cr, > 0,8 Ni, 1,75...2,2 Si, < 0,5P, < 0,09 S.

В ході досліджень з лазерного загартування встановлено, що мікротвердість при такій обробці чавунів деталей циліндропоршневої групи зростає більш ніж в 4 рази в порівнянні з початковою. Показано, що зміна мікротвердості по глибині зони лазерного впливу безпосередньо залежить від потужності випромінювання і швидкості переміщення променя, відносно оброблюваної поверхні.

Зносостійкість поршневих кілець зі зміцненням лазерною обробкою досліджували в порівнянні з хромованими кільцями судових дизелів 6 ЧРН 36/45 на випробувальному стенді при зворотно-поступальному русі. Навантаження на контактуючі поверхні зразків становило 1 кН, час припрацювання - 3 год., сумарний час випробувань відповідав 25, 50, 100 год.

За результатами досліджень встановлено, що лазерна обробка поршневих кілець не тільки підвищує зносостійкість, в тому числі і в порівнянні з хромованим кільцем, а й знижує знос серійних втулок циліндра. Використання такої технології для сірого чавуну не забезпечує стабільного зміцнення через більш низьку збіжну температуру, відповідну чавуну, з відмінною часткою графіту через спадкові властивості вихідного матеріалу.

Одним із суттєвих недоліків лазерного зміцнення – це значні втрати електроенергії внаслідок відбивання лазерного променя від поверхні (низький ККД). Також слід врахувати, що лазерна обробка є складним технологічним процесом для зміцнення тонкостінних робочих поверхонь виробів зважаючи на високий рівень локального нагріву, в тому числі деталей, виготовлених із сірого чавуну, таких як маслоз'ємні поршневі кільця двигуна спеціальної техніки.

Аналогічний недолік має і метод газотермічного нанесення молібденового покриття на робочу поверхню поршневого кільця з високоміцного чавуну. Крім того,

в даному дослідженні не наведено розміри і форма поперечного перерізу кільця, а також не представлені результати випробувань на тертя і зношування.

При проведенні досліджень процесу електроіскрового зміцнення металевих поверхонь із застосуванням електродів зі сплавів Ni-Cr-Al, Fe-Cr-Al і Fe-Ni-Si-Cr₃C₂, призначених для відновлення зношених деталей з конструкційних сталей, в якості зносостійких покриттів для ремонту газових компресорів високого тиску використовували жаростійкі евтектичні сплави Ni-Cr-Al. На зношеній поверхні поршневих кілець з сірого чавуну СЧ 32-18, які відпрацювали 9000 год., були нанесені електроіскрові покриття товщиною 50-60 мкм, і після додаткової механічної обробки були введені в експлуатацію. Випробування показали, що ресурс роботи відновлених поршневих кілець з електроіскровими покриттями становить 13000 год., що майже в 1,5 рази перевищує ресурс роботи – нових. Слід зазначити, що в роботі відсутня інформація про типорозміри кілець і умови їх експлуатації. Очевидно, що застосування електроіскрового зміцнення для маслоз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки недоцільно, через те що вказані кільця відрізняються параметрами експлуатації, а також орієнтації такої технології зміцнення на відновлювальний ремонт. До того ж, в роботі не міститься інформації про характер сформованої перехідної зони і рівня якості в зоні зчеплення покриття з підкладкою. Для поліпшення якості у період припрацювання і підвищення зносостійкості поршневих кілець запропонована технологія тришарового зміцнення поверхні, яка включає карбонітрацію, іонну імплантацію нітриду титану з подальшим сульфідкуванням в електролітній плазмі. Комбіноване зміцнення автори цієї роботи проводили для маслоз'ємних поршневих кілець зі сталі 20Х13. Карбонітрацію здійснювали розкладанням карбаміду в розчині солей при температурах 540...580°C в період однієї години. Глибина карбонітридного шару становила 12...15 мкм при забезпеченні твердості 1158...1513HV. Отримані на поверхні нітрідні фази навіть при відсутності змащення не виявляють схильності до схоплювання. Для усунення викривлення маслоз'ємного поршневого кільця внаслідок температурного впливу при карбонітрації, а також дифузійного насичення

поверхні вуглецем і азотом здійснюють алмазне притирання в гільзі зі зняттям карбонітридного шару товщиною 3...4 мкм. Подальше нанесення покриття здійснювали іонно-плазмовим зміцненням з формуванням нітридів титану TiN_4 товщиною 5...7 мкм на поверхню карбонітридного шару. Іони титану високої енергії розігрівають поверхню до $600^{\circ}C$ і проникають на глибину 1...2 мкм. Після цього для поліпшення припрацювання поршневих кілець і підвищення адгезії покриття з основою виконували сульфідкування в електролітній плазмі. Час обробки становив 20...40 с. В результаті формувався пористий шар Fe_2S товщиною 8...10 мкм і твердістю 915...1158 HV. Запропоноване комбіноване зміцнення для обробки маслоз'ємних поршневих кілець зі сталі 20X13 не застосовується для кілець з сірого чавуну, в тому числі, через високотемпературні процеси карбонітрації і іонної імплантації, з огляду на можливе накопичення високих залишкових напружень і деформації тонкостінного виробу, а також розвитку процесів графітизації.

Роботи Кравченко И.Н. присвячені розробці прогресивних технологій нанесення газотермічних захисних покриттів на поршневі кільця дизельних двигунів, а також дана оцінка можливості їх застосування замість гальванічного хромування. В результаті зміцнення газотермічним напиленням хромового покриття ПХ1М і ВХ2К було досягнуто підвищення зносостійкості кілець при сухому і граничному терті в парі з чавунною підкладкою. Однак, проведені натурні випробування в умовах експлуатації показали зниження зносостійкості газотермічного нанесення хромового покриття щодо гальванічного та, на думку авторів є наслідком ефекту Ребіндера і шаржування. Дані способи зміцнення непридатні для маслоз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки через наявність тонкостінної робочої поверхні. Крім того, наведені в роботі типи двигунів (Д-245, СМД-63) відрізняються від двигунів спеціальної техніки за умовами і параметрами експлуатації. З розглянутих вище робіт можливо зробити висновок, що традиційні та виявлені нові технології хромування, а також лазерна обробка поверхонь, що працюють в умовах тертя не забезпечать високого рівня споживчих властивостей, у порівнянні з іонно-плазмовими методами осадження плівок і

нанопокриттів. Тому, розробка таких технологій є пріоритетним напрямом для зміцнення поршневих кілець двигунів спеціальної техніки.

1.3 Триботехнічні властивості іонно-плазмових і багатокомпонентних покриттів

В роботі Береснева В.М. наведені результати досліджень триботехнічних характеристик багатокомпонентних (Ti-Cu-N, Ti-Al-N) і багат шарових (TiN + α -Ti, TiN + TiC, TiN + БрАЖ9-4) покриттів порівняльно з одношаровим TiN. Дослідження показали, що для покриттів, що включають м'які компоненти Cu і Al виявлений ефект виборчого перенесення на контртіло, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості і збільшення критичного навантаження задироутворення. Таке явище зафіксовано також для багат шарових покриттів.

Багатокомпонентні покриття Ti-Cu-N з вмістом Cu до 2 ÷ 6% мас., і Ti-Al-N з вмістом Al до 10 ÷ 15% мас. забезпечили зниження зносу в 2,5 рази і підвищення критичного навантаження задироутворення на 20 ÷ 30% в порівнянні з TiN.

Багат шарові покриття TiN + α -Ti, TiN + БрАЖ9-4, майже в 1,5 - 1,9 рази зменшують знос і збільшують критичне навантаження задироутворення на 10 ÷ 30% в порівнянні з TiN.

Оскільки покриття наносили, з урахуванням відповідних параметрів осадження, на зразки азотованої сталі 38Х2МЮА, такі результати не можуть бути повністю перенесені і використані на підкладці з сірого чавуну. Крім того, в роботі не представлено цільове використання таких зміцнюючих покриттів і, відповідно параметрів експлуатації для конкретних деталей.

Робота [8] присвячена вивченню процесів формування нітридних покриттів шляхом розпилення систем на основі двох елементів Al + Ti і Ti + Cr методом вакуумно- дугового осадження, а також дослідженню їх фізико-механічних властивостей.

Матеріали, в якості випаровуємих, для зміцнення використовувалися суцільноліті катоди на основі Al + Ti і Ti + Cr, отримані методом вакуумно-дугового

переплаву. Хімічний склад матеріалу катодів, який випаровувався, наступний: для Al+Ti – 50 ат. % Al, 50 ат. % Ti і для Ti+Cr – 63 ат. % Ti, 37 ат. % Cr. Як робочий газ використовувався молекулярний азот. Покриття (Ti, Al)N та (Ti, Cr)N наносили на поверхню зразків зі сталі (зразки 15×15×2,5 мм) на устаткуванні Булат 6. Параметри осадження наведені в таблиці 1.3. Товщина всіх покриттів в експериментах становила 2,0 – 3,0 мкм.

Таблиця 1.3 – Фізико-технологічні параметри осадження покриттів
(Ti, Al)N, (Ti, Cr)N

Покриття	Ід, А	U _{пр} , В	P, Торр	Примітки
(Ti, Al)N	90	150	3×10 ⁻³	Без імпульсів
(Ti, Cr)N	90	150	3×10 ⁻³	Без імпульсів
(Ti, Cr)N	90	150	3×10 ⁻³	з імпульсами f = 7,0 кГц, U _{пр} = 800 В, v = 10 мкс

Дослідження топографії поверхні покриттів, отриманих методом вакуумно-дуговим осадження за допомогою скануючого растрового мікроскопа показали наявність крапельної складової для всіх систем (Ti, Al)N та (Ti, Cr)N (рис. 1.2).

Елементний склад отриманих покриттів наведено в таблиці 1.4.

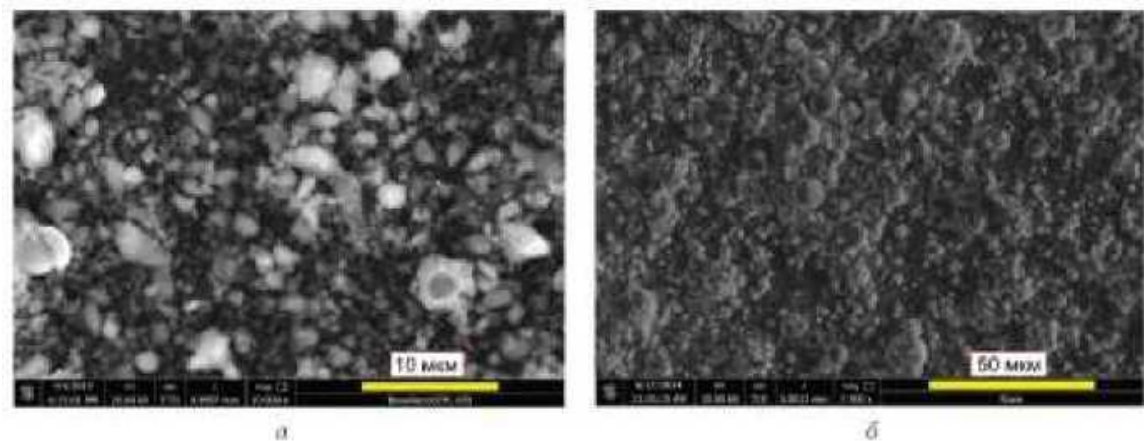


Рисунок 1.2 – Топографія поверхні покриттів, отриманих при парціальному тиску азоту $P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр, $U_{CM} = -150$ В: а – система

(Ti, Al)N; б – система (Ti, Cr)N

Таблиця 1.4 – Хімічний склад покриттів систем (Ti, Al)N и (Ti, Cr)N

Склад покриття	N, ат. %	Al, ат. %	Ti, ат. %	Cr, ат. %	O, ат. %	Ra , мкм
(Ti, Al)N	35,38	30,22	33,9	-	0,5	1,87
(Ti, Cr)N	39,43	-	43,79	16,78	-	1,19

Рентгенодифрактометричні методи досліджень (рис. 1.3) виявили, що матеріал покриття двофазний та (Ti, Cr)N має кубічну ґратку і титан – гексагональну (рис. 1.2). Середній розмір кристалітів титану складає 15 нм, а нітриду (Ti, Cr)N – близько 7,5 нм.

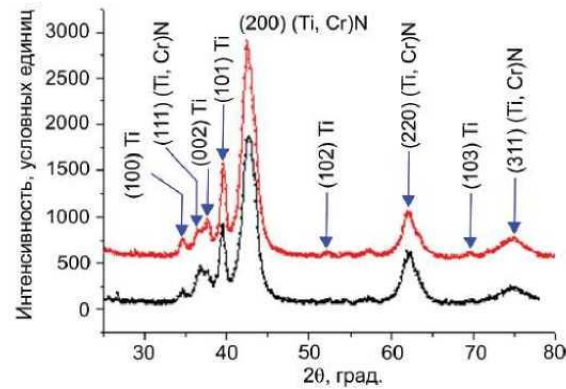
При імпульсному впливі відбувається тільки зміна текстури з переважним зростанням в площині – (200), що характерно для більшої енергетичної стимуляції процесу зростання з мінімізацією поверхневої енергії. Для покриттів (Ti, Al)N (див. Рис. 1.3, б) зйомку проводили у випромінюванні Fe-K α , на відміну від – (Ti, Cr) N де використовували випромінювання Cu-K α . Отримані покриття мають кубічну модифікацію нітриду алюмінію зі структурним типом NaCl, текстурою (111) і середнім розміром кристалітів 15 нм.

Результати досліджень твердості і модуля пружності покриттів (Ti, Al) N показали, що середнє значення нанотвердості складало $H = 30,6$ ГПа, модуля пружності $E = 370,2$ ГПа.

Середні значення (по десяти вимірах) нанотвердості покриттів (Ti, Cr) N складають: для зразків, вихідних $HV_{0,1} = 27,6$ ГПа, а при обробці імпульсами $HV_{0,1} = 34,5$ ГПа. Значення коефіцієнта тертя μ і зносостійкості v покриттів (Ti, Al)N і (Ti, Cr)N, отримані при випробуваннях, наведені на рис. 1.4 і в таблиці 1.5. Фотографії доріжок і профілограм тертя, контртіло, а також хімічний склад доріжок наведені на рис. 1.4 і в таблиці 1.5, 1.6 відповідно.

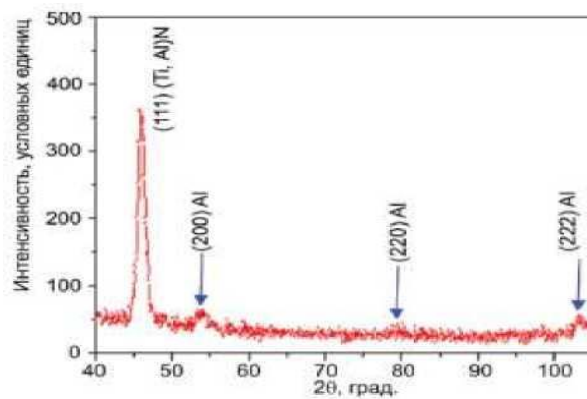
Результати досліджень фрикційних характеристик при сухому терті покриттів з контртілом з Al₂O₃ свідчить про те, що у всіх випадках при випробуванні

покриттів (Ti, Cr)N відбувається адгезійне зношування, обумовлене переносом матеріалу з однієї поверхні на іншу. У разі покриття (Ti, Al)N діє механізм абразивного зношування (див. Рис. 1.5 а), це пов'язано з процесом формування покриттів – наявністю великих крапель в середині і на їх поверхні.

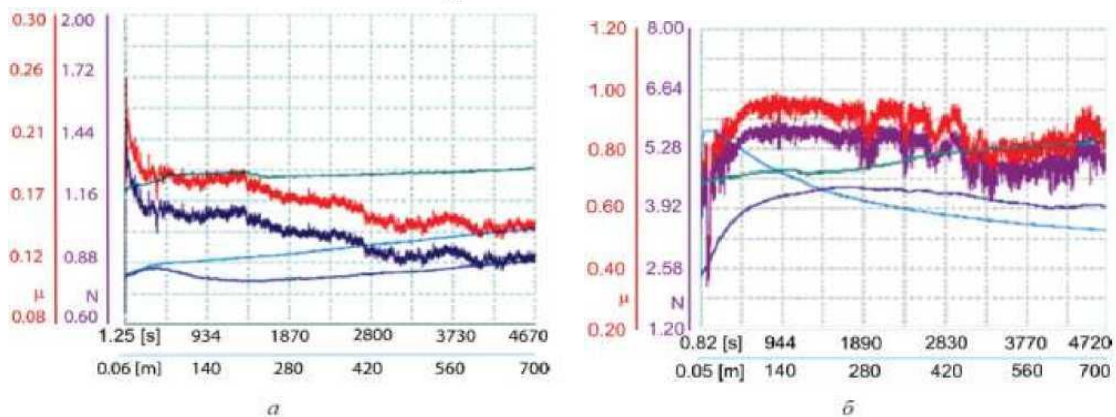


а

Рисунок 1.3 - Ділянка рентгенограм покриттів на основі (Ti, Cr)N (а) та (Ti, Al)N (б)



б



а

б

Рисунок 1.4 – Результати триботехнічних випробувань зразків з покриттями на Ст.45: а – (Ti, Cr)N; б – (Ti, Al)N

Таблиця 1.5 – Триботехнічні характеристики покриттів (Ti, Al)N і (Ti, Cr)N

Покриття	Коефіцієнт тертя, μ		Інтенсивність зносу, $\nu \times 10^{-6}$, $\text{мм}^3 \times \text{Н}^{-1} \times \text{м}^{-1}$		Ra, мкм
	Початковий	При випробуваннях	Контртіло (Al ₂ O ₃)	Покриття	
(Ti, Al)N	0,49	0,867	3,33	28,5	0,44
(Ti, Cr)N	0,11	0,167	1,10	6,82	0,31

Слід врахувати, що в роботі не обумовлена роль використаної підкладки, що ускладнює прогнозування ступеню підвищення фізико-механічних властивостей відносно сірого чавуну для поршневих кілець.

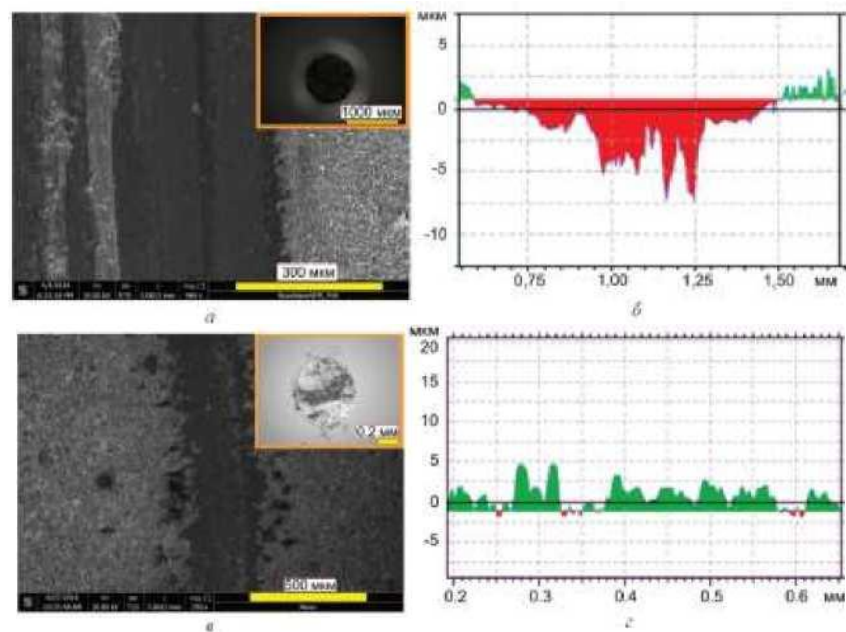


Рисунок 1.5 – Зображення доріжок тертя і профілограм їх покриттів і контртіла
а, б – (Ti, Al)N: в, г – (Ti, Cr)N

Таблиця 1.6 – Елементний склад доріжок тертя покриттів

Склад покриття	N, ат. %	O, ат. %	Al, ат. %	Ti, ат. %	Cr, ат. %	Fe, ат. %
(Ti, Cr)N	26,46	32,95	0,94	28,35	11,13	-
(Ti, Al)N	17,24	56,77	12,24	9,29	-	4,47

В роботі [8] проведено дослідження зносостійкості пакувальних ножів з високолегованої сталі марки X205Cr12 (сталь типу X12), яку використовували для тонких ножів в машинах типу MC1DT-T (MC Automations, Італія) у кондитерському

виробництві для подрібнення горіхів. Наноструктурні покриття ZrN, отримані фізичним осадженням з газової фази (PVD) з застосуванням ВЧ-розряду. Максимальна нанотвердість покриття ZrN досягала 32,05 ГПа, що в 3,4 рази більше, ніж твердість вихідної матриці інструменту, і на 57,65% вище, відносно карбідної фази основного металу. Застосування покриттів дозволило стабілізувати робочий поверхневий шар при деформації і запобігти подрібненню і руйнуванню карбідної фази. Завдяки покриттю ZrN було досягнуто підвищення зносостійкості в виробничих умовах в 3 рази.

При пошуку покриттів варто враховувати вплив і принципово інший матеріал основи ножів, які мають і відмінне конструктивне виконання, а також працюють в умовах, що відрізняються від маслоз'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки. Крім того, в роботі немає інформації про методику і навантаження при випробуваннях на тертя і зношування таких деталей.

Окрім того, було проаналізовано і інші роботи, присвячені дослідженням одношарових та багатокомпонентних іонно-плазмових покриттів на основі титану [10, 12-15], та інших елементів, таких як: хром, молібден, алюміній, цирконій [10, 14, 16-22]. Ці роботи не обумовлюють забезпечення зносостійкості при використанні сірого чавуну в якості основи для осадження покриття.

З вище представленого аналізу робіт цього розділу можливо припустити, що одношарові структури при нанесенні на підкладку з сірого чавуну, не матимуть високої адгезійної міцності, враховуючи грубозернисту структуру такого матеріалу, наявність великої частки графіту. Для підвищення цього показника необхідно застосування попередньої обробки поверхні, як наприклад, показано в роботі [23] при технології тришарового зміцнення поверхні. Для спрощення технологічного процесу і підвищення рівня властивостей поверхні поршневих кілець буде доцільно використовувати багатошарову структуру іонно-плазмового методу осадження покриттів.

1.4 Завдання роботи:

1. Проаналізувати виявлену інформацію за умовами роботи та механізмами зношування поршневих кілець, методами їх зміцнення і досягаємим властивостям.
2. Розробити методологічний підхід для проведення досліджень з використанням експериментальних, теоретичних підходів для оцінки особливостей структурних змін при терті та зношуванні маслоз'ємних поршневих кілець.
3. Запропонувати та випробувати новий технологічний процес зміцнення багат шаровою наноконпозицією робочої поверхні маслоз'ємних поршневих кілець при використанні різних співвідношень зміцнюючих фаз.
4. На основі виконаного аналізу оцінити вплив запропонованого способу зміцнення на рівень напружено-деформованого стану поршневих кілець і розробити метод контролю і бракувальні норми за рівнем залишкових напружень, що формуються в матеріалі поршневих кілець при зміцненні, та спосіб їх зниження.
5. Провести стендові порівняльні випробування на терті та зношування зміцнених поршневих кілець з сірого чавуну і оцінити характер і швидкість їх зношування в порівнянні з серійними в умовах виробництва.
6. Запропонувати теоретичний підхід використання оптико-математичного аналізу для визначення характеру формування залишкових напружень і структуроутворення поверхонь тертя поршневих кілець.
7. Оцінити технологічну та економічну ефективність нової технології зміцнення поршневих кілець для двигуна техніки спеціального призначення.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАСЛОЗ'ЄМНИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ

У розділі узагальнені методи проведення досліджень. Розглянуто теоретичні та експериментальні підходи до проведення досліджень, а також наведені нові методики, використані в роботі.

2.1. Методологічний підхід та етапи досліджень зносостійкості маслоз'ємних поршневих кілець

Статистичним аналізом зносостійкості поршневих кілець поточного виробництва було встановлено, що найчастіше їх виготовляють з сірого і високоміцного чавунів та виявлено методи їх зміцнення. Це хромування, в тому числі з лазерною або плазмовою обробками [1]. Було показано, що таке поєднання двох технологічних процесів хоча і є ефективним для підвищення зносостійкості, проте складним, оскільки потрібне використання двох різних технологій, у тому числі одна вимагає спеціального екологічного захисту.

З огляду на це, запропонували новий технологічний процес зміцнення поршневих кілець нанесенням багатошарових наноструктурних покриттів. Виходячи з наявного досвіду фахівців [23-28], запропонували в якості багатошарової композиції використовувати хромовий і титановий електроди, які відрізняються різними збіжними температурами при експлуатації виробів. З урахуванням цього, необхідно було визначити оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке б забезпечило високий рівень трибологічних характеристик.

Особливо важливим було встановити можливість використання такого покриття для зміцнення виробу з сірого чавуну зі значною часткою графіту.

На першому етапі виконано аналіз особливостей структуроутворення при нанесенні зміцнюючих наноструктурних покриттів одно- і багатошарових різних

композицій та вплив на споживчі властивості зміцнених виробів. Потім, порівняльно вивчили вплив технологічних параметрів нового способу зміцнення виробів при різних співвідношеннях фаз з вихідним станом. Для аналізу використовували сучасні методи і розробляли нові підходи для отримання інформації про якість та структурні зміни, зносостійкості робочої поверхні поршневих кілець.

Послідовність і напрямок по реалізації завдань і мети досліджень представлені діаграмою Ісікава на рис. 2.1.

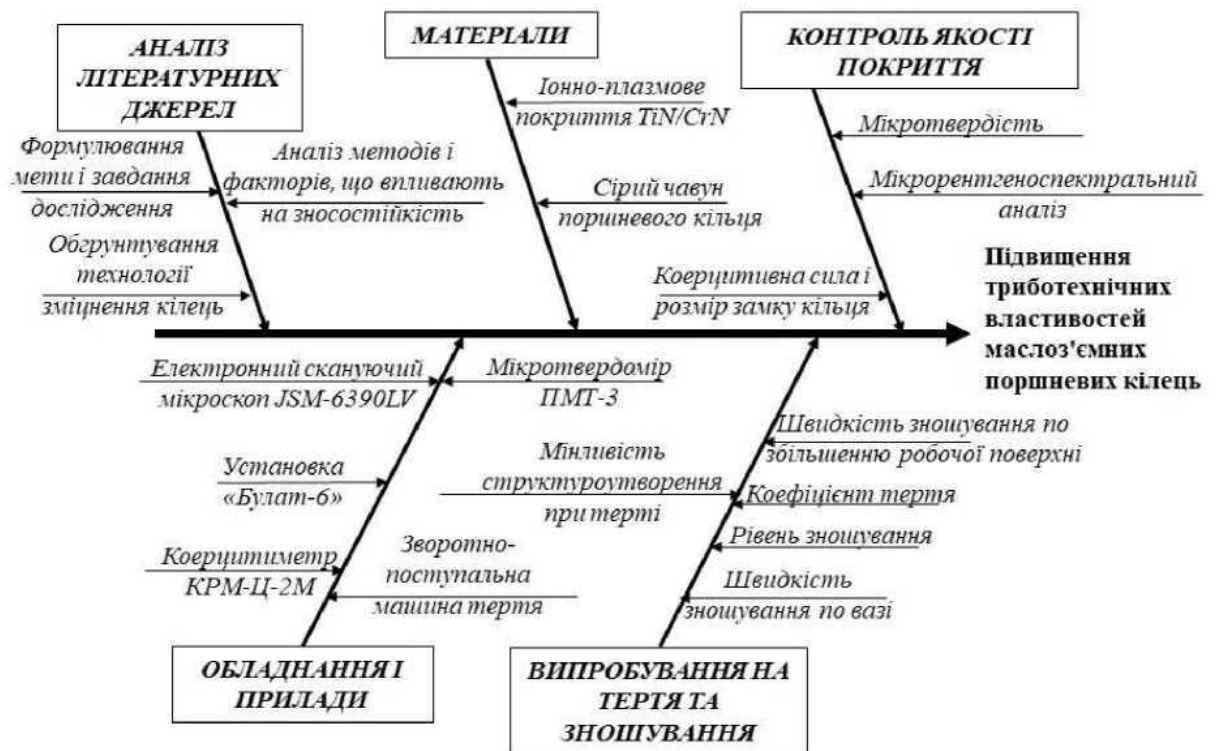


Рис. 2.1 Етапи досліджень в дисертаційній роботі і послідовність їх реалізації

На основі аналізу літературних джерел, новітніх досягнень в галузі тертя та зношування та методів нанесення зносостійких покриттів, в тому числі і наноструктурних, запропонований метод і матеріал їх нанесення – іонно-плазмове

багатошарове осадження TiN/CrN. Традиційні методи гальванічного хромування, плазмового і лазерного зміцнення є недостатньо ефективними через наявність в матеріалі кільця високої частки пластинчастого графіту, що може вплинути на формування крихкої складової в поверхневому шарі кільця –

цементиту. Це може ставити під сумнів стабільність роботи такого виробу. З огляду на цей фактор, була розглянута можливість зміцнення наноструктурних покриттів з використанням прогресивних іонно-плазмових методів. Доцільним є використання багат шарових покриттів з різномірних матеріалів та нанесенням попередньо підшару з Cr для забезпечення більш високої якості зчеплення з основою і необхідних експлуатаційних характеристик, зокрема триботехнічних, які можуть знайти широке застосування в машинобудівній галузі. У літературі відсутня інформація про ефективність такого покриття стосовно до виробів з сірого чавуну, що працюють в умовах тертя та зношування.

2.2.Метод зміцнення маслос'ємних поршневих кілець двигунів

Виконані комплексні дослідження були спрямовані на підвищення зносостійкості маслос'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки. Загальний вигляд кілець наведено на рис. 2.2., а на рис. 2.3 – ескіз поперечного перерізу. На ескізі відображена робоча поверхня (поясок), який має висоту 0,2 мм з верхнім граничним відхиленням +0,3 мм. Дана поверхня призначена для знімання масла зі стінок циліндра в картер двигуна і запобігання його попадання в камеру згоряння. Діаметр такого кільця, наведеного на рис. 2.2, і складає 207 мм, а величина замку у вільному стані знаходиться в межах 26 - 32 мм. На рис. 2.2, б представлені маслос'ємні поршневі кільця двигуна спеціальної техніки. Діаметр таких кілець становить 120 мм, з аналогічним розміром робочої кромки 0,2 мм. Лінійний розмір замку знаходиться в діапазоні 19 – 24 мм.

Хімічний склад металу маслос'ємних поршневих кілець, згідно Д100.04.ДТ61, представлений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад маслос'ємних поршневих кілець

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	Cr, %	Ni, %	S, %	Ti, %	Fe, %
2,6 3,1	1,4 1.9	1,0 1,5	0,3 0,5	0,3	0,6	0,1	0,04 0,12	решта



а

б

Рисунок 2.2 - Загальний вигляд маслоз'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки

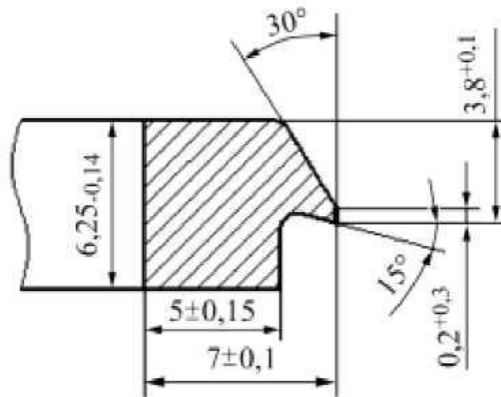


Рисунок 2.3 - Ескіз маслоз'ємного поршневого кільця (див. рис. 2.2, а) двигуна спеціальної техніки

Експлуатація таких двигунів супроводжується істотним розвитком димності вихлопу, нагаровідкладення у випускному тракті, і перевитрати моторної оливи, внаслідок інтенсивного зносу їх маслоз'ємних поршневих кілець.

Поршневі кільця двигунів техніки спеціального призначення за серійною технологією в даний час виготовляють з сірого чавуну з завершальною операцією гальванічного нанесення покриття оловом. Таку операцію застосовують для прискореного припрацювання виробу на початковому етапі експлуатації.

Для зміцнення робочої поверхні (пояска) кільця наносили багатошарове іонно-плазмове покриття TiN/CrN на устаткуванні типу «Булат-6» (рис. 2.4). Покриття

наносили при різних співвідношеннях Ti/Cr , а саме: $Ti/Cr=0,17$, $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$. Метою цього було встановлення оптимального співвідношення фаз покриття з точки зору забезпечення найвищої зносостійкості.

Осадження покриття здійснювали при ідентичних параметрах, а саме: струмі дуги $I_d = 100$ А і напрузі зсуву підкладки $U_{см} = -200$ В. По черзі наносили 6-ть шарів CrN і 5-ть – TiN для кожного зі співвідношень, попередньо розпиливши підшар чистого Cr товщиною ~ 50 нм. При цьому, для співвідношення $Ti/Cr=0,17$ товщина шару TiN становила – 50 нм, а CrN – 240 нм. Для співвідношення $Ti/Cr=0,27$, товщина шару TiN становила – 90 нм, а CrN – 200 нм. Для співвідношення $Ti/Cr=0,40$, товщина шару TiN становила – 140 нм, а CrN – 170 нм. Загальна товщина багатошарового покриття при вищевказаних співвідношеннях досягала 1,7 мкм. Для зміцнення були використані кільця без покриття оловом.



Рисунок 2.4 - Загальний вигляд устаткування «Булат-6»

Як було виявлено з інформації літературних джерел, багатошарова композиція здатна забезпечити високу зносостійкість і, в тому числі, стійкість до циклічного навантаження при зворотно-поступальному русі, яке характерно при роботі такого виробу в двигуні.

Перед осадженням багатошарової композиції виконали вимірювання величини замку кільця, а також оцінили структурний стан такої деталі по коерцитивній силі в трьох зонах (рис. 2.5). Для цього використовували коерцитиметр моделі КРМ-Ц-2М,

який забезпечує контроль виробів по цьому параметру в діапазоні від 1,0 до 60,0 А/см (рис. 2.6).

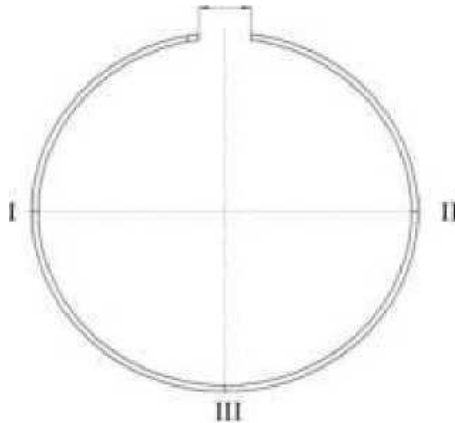


Рисунок 2.5 - Зони вимірювань коерцитивної сили і лінійного розміру замку поршневого кільця



Рисунок 2.6 - Коерцитиметр моделі КРМ-Ц-2М

Після нанесення покриття композицією TiN/CrN (при трьох співвідношеннях Ti/Cr) стан кільця визначали, згідно мінливості його напруженого стану по коерцитивній силі. Аналогічні вимірювання проводили і на серійних кільцях.

2.3.Методика визначення трибологічних характеристик та якості робочих поверхонь поршневих кілець

Для визначення зносостійкості проведені стендові випробування на машині тертя (рис.2.7, 2.8) зі зворотно-поступальним рухом при різних швидкостях ковзання – від 0,7 до 1,6 м/с. Такі швидкості були обрані, виходячи з оцінки рівня зношування

та умов експлуатації двигуна. Найбільш детально досліджували механізми зношування поверхонь тертя при переході від пружної деформації при швидкості ковзання 1,3 м/с до пластичної – при 1,0 м/с. При цих випробуваннях проводили порівняльний аналіз зношування серійних поршневих кілець і зміцнених різним співвідношенням Ti/Cr.

Така машина тертя мала по 4 камери в яких встановлювали по одному зразку гільзи циліндра і по два зразки поршневого кільця, комплектуючи їх таким чином в одну трибосистему (див. Рис. 2.8 та 2.9). При цьому, дві трибосистеми, які з'єднані послідовно (див. Рис. 2.8), випробовувались при одній швидкості ковзання. Інші дві – при іншій швидкості. Запуск машини здійснювався електродвигуном (Рис. 2.8, поз. 8). Через ремінний привід, обертальний рух передавався на колінчастий вал (Рис. 2.8, поз. 6), який трансформував його у зворотно-поступальний, і через шарнір (Рис. 2.8, поз. 5) він передавався безпосередньо на рухомий зразок трибосистеми – гільза циліндра.

Випробування проводили у середовищі моторної оливи M14-B2 з крапельною її подачею (2 краплі у хвилину) у зону тертя (див. Рис. 2.8 та 2.9 поз. 2). Питомий тиск при терті було задано 0,8 МПа, при тому що середній питомий тиск такого кільця від власних сил пружності складає 0,06 МПа. Розрахунок середнього питомого тиску проводився відповідно до [29]. Такий тиск було обрано

з метою скорочення часу випробувань за рахунок інтенсифікації процесів зношування.

Загальний час випробувань склав 100 год. З них:

- перший етап - припрацювання – 3 год.;
- другий етап основних випробувань – 25 год.;
- третій етап основних випробувань – 72 год.

Загальна довжина пройденого шляху тертя зі швидкістю ковзання 1 м/с склала 360 км, а при швидкості 1,3 м/с – 468 км.

Оцінку рівня зносу оцінювали за втратою ваги як поршневих кілець, так і гільз циліндрів на аналітичних вагах WA-200 (Рис. 2.10). Окрім цього, був виконаний

аналіз швидкості зношування поршневих кілець за результатами зносу відносно до загального часу випробувань.

Похибку вимірювання зносу оцінювали статистичним методом шляхом зважування по 10 пар зміцнених варіантів (при $Ti/Cr=0,17$, $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$) та серійних поршневих кілець після випробувань при швидкостях ковзання 1,0 та 1,3 м/с. Після чого було оцінено сумарне значення отриманого зносу для кожної з 10 пар зразків кожного варіанту. На основі цього оцінено середній знос при відповідній швидкості ковзання та варіанту кільця. На основі такого аналізу найбільше відхилення зносу поршневих кілець від середнього рівня (для кожного варіанту), за результатами основних випробувань (див. Розділ 3), не перевищувало 5 %.

Для розрахунку коефіцієнта тертя кожного варіанту поршневого кільця було проведено випробування на машині тертя СМТ-1 за схемою «диск-колодка» (рис. 2.11) у середовищі моторної оливи М14-В2 з крапельною її подачею у зону тертя. В якості зразків для диску було використано матеріал виготовлення гільзи циліндру за Д100.01.001 ДТ, а колодка – зразок серійного кільця та з відповідним співвідношенням зміцнюючих елементів покриття. При цьому, питоме навантаження на зразок, швидкості ковзання та пройдений шлях тертя відповідали

основним випробуванням. Під час випробувань фіксували момент тертя. Після чого було підраховано коефіцієнт тертя для кожного варіанту за формулою (2.1):

$$f = \frac{M_{mp}}{P \cdot r_p}, \quad (2.1)$$

де M_{mp} - момент тертя, Н·м;

P - сила нормального тиску, що притискає кільце до гільзи, Н;

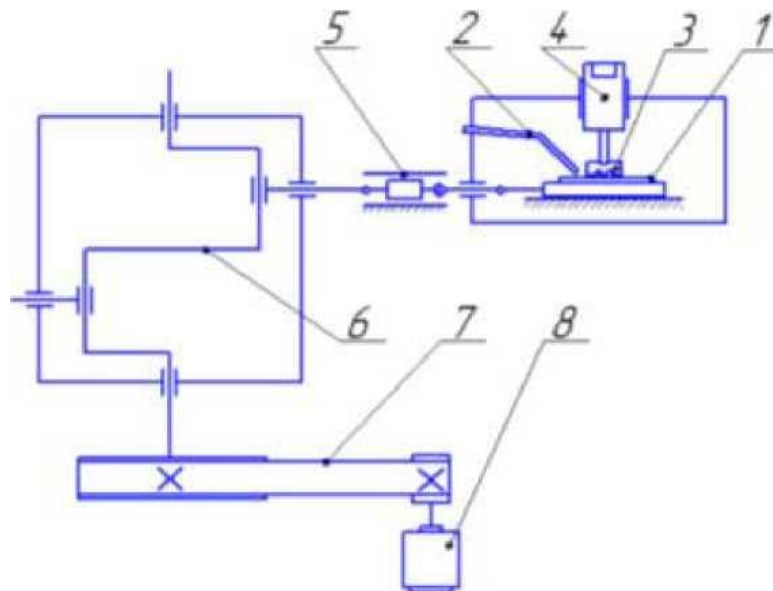
r_p - радіус диска, м;

До і після випробувань також оцінювали рівень мікротвердості на приладі моделі ПМТ-3 (рис. 2.12). Після випробувань була виконана локальна оцінка мінливості структури і хімічного складу робочих поверхонь серійних кілець, і зміцненим оптимальним співвідношенням елементів іонно-плазмового покриття з використанням електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу зі

скануючим електронним мікроскопом JSM-6390LV (рис. 2.13). Вимірювання вмісту хімічних елементів проводились у спеціальній робочій камері. Прискорююча напруга сканування поверхні склала 15 kV, а локальність аналізу – 2 мкм.



Рисунок 2.7 - Машина тертя зі зворотно-поступальним рухом



Риунок. 2.8 - Кінематична схема машини тертя зі зворотно-поступальним рухом: 1 - зразок гільзи; 2 – патрубок крапельної подачі оливи; 3 – зразки маслоз’ємних поршневих кілець; 4 – вантаж; 5 – шарнір; 6 – колінчастий вал; 7 – привід; 8 – електродивгун

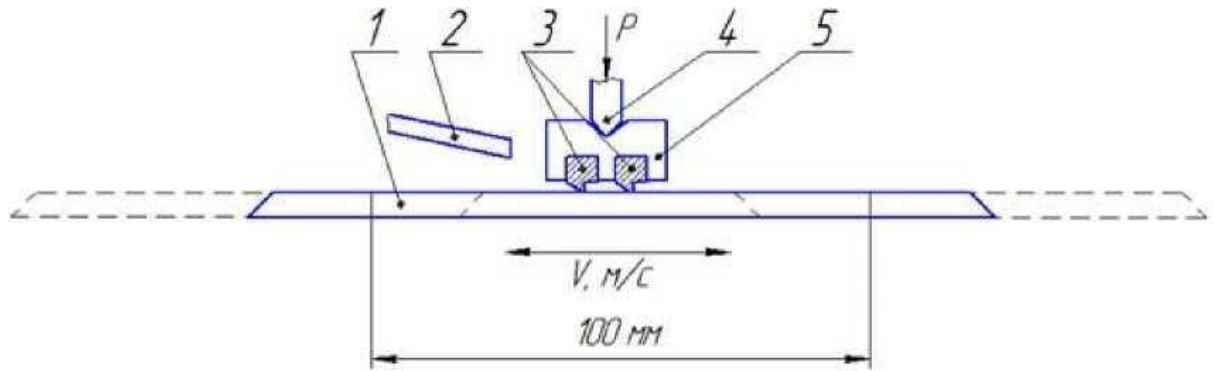
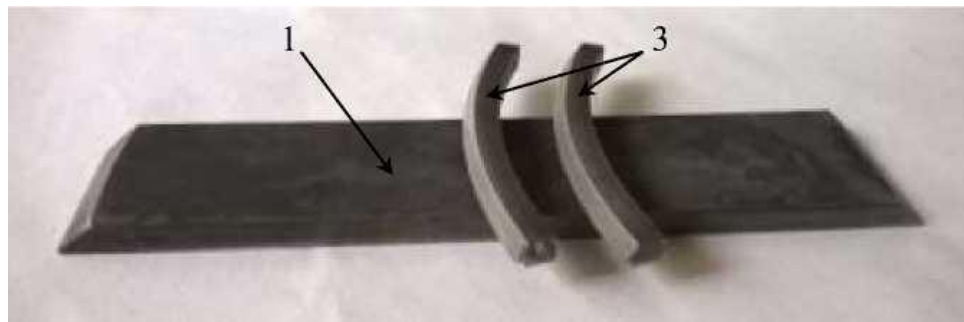


Рисунок 2.9 - Схема випробувань поршневих кілець: 1 – зразок гільзи; 2 – патрубок крапельної подачі оливи; 3 – зразки маслз'ємних поршневих кілець; 4 – навантаження; 5 – кільце утримувач



Рисунок 2.10 - Загальний вид вагів WA-200

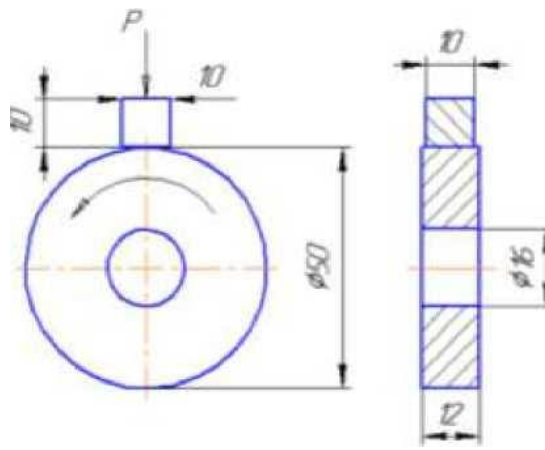


Рисунок 2.11 - Схема випробувань для визначення коефіцієнту тертя



Рисунок 2.12 - Мікротвердомір ПМТ-3



Рисунок 2.13 - Скануючий електронний мікроскоп JSM-6390LV

2.4 Математичне планування експерименту. Виявлення факторів впливу властивостей покриттів на мікротвердість та швидкість зношування

З метою виявлення факторів, що можуть впливати на показники зносостійкості поршневих кілець було використано метод планування експерименту з побудовою лінійних рівнянь регресії з чотирма значеннями змінних факторів (план експерименту – 2^2). Для оцінки рівня впливу факторів (**x1** та **x2**) на розглядаємий параметр (відгук – **y**) було побудовано рівняння регресії, які наведені у табл. 2.1 та 2.2 і враховували:

- вплив концентрації в покритті Ti (**x1**) та Cr (**x2**) на рівень його мікротвердості (**y1**);
- вплив концентрації в покритті Ti (**x1**) та Cr (**x2**) на швидкість його зношування (**y2**).

Такі змінні фактори обрані, тому що концентрацію компонентів можливо надійно регулювати часом їх нанесення у багатошаровому покритті з оцінкою їх співвідношення, а відгуки властивостей – оцінювали показниками, які дозволяють пояснити характер та рівень змін при експлуатації поршневих кілець.

Для оцінки впливу концентрації основних елементів зміцнюючого покриття на його мікротвердість, було обрано діапазон їх значень, який відповідав умовам забезпечення високого рівня зносостійкості. Після кодування цих факторів та розрахунків, були отримані рівняння (2.2 – 2.3).

Таблиця 2.2 - Рівні значень змінних факторів Ti (**x1**) та Cr (**x2**)

Рівень значення	Змінні фактори	
	x1 (концентрація Ti, %)	x2 (концентрація Cr, %)
Верхній рівень	60	90
Нульовий рівень	30,25	46
Нижній рівень	0,5	2

Таблиця 2.3 - Закодовані фактори **x1** і **x2** для оцінки їх впливу на

мікротвердість y_1 та швидкість зношування y_2

№ з/п	x_1	x_2	y_1 (мікротвердість, ГПа)	y_2 (швидкість зношування мг/год)
1	60 (+1)	90 (+1)	65	1,0
2	0,5 (-1)	2 (-1)	45	0,1
3	60 (+1)	2 (-1)	60	0,7
4	0,5 (-1)	90 (+1)	50	0,3

$$y_1 = 55 + 15x_1 + 5x_2 + 0x_1 \cdot x_2 \quad (2.2)$$

З отриманого рівняння (2.1) встановлено, що найбільший вплив на забезпечення високого рівня мікротвердості покриття має фактор x_1 , тобто концентрація титану впливає у три рази більше, що відповідає його фізико-механічним властивостям.

Для оцінки впливу концентрації основних елементів зміцнюючого покриття на його швидкість зношування, було обрано той самий діапазон факторів і їх значень, який відповідав умовам забезпечення високого рівня зносостійкості (див.табл. 2.1). Після кодування цих факторів (Табл. 2.2) та розрахунків, було отримано рівняння (2.2).

$$y_2 = 0,525 + 0,65x_1 + 0,25x_2 + 0,05x_1 \cdot x_2 \quad (2.3)$$

З отриманого рівняння (2.2) видно, що найбільший вплив на забезпечення високої швидкості зношування покриття має фактор x_1 , тобто також концентрація титану. З огляду на високий рівень впливу цього фактору на мікротвердість, такий результат свідчить і про вплив на схильність такої фази покриття до розвитку деградації та руйнування під час тертя та зношування.

Розрахунки показали, що для забезпечення високої зносостійкості покриття необхідно корегувати в ньому концентрацію Ti із забезпеченням оптимального співвідношення Ti/Cr.

2.5 Висновки до розділу

1. На основі аналізу літературних джерел узагальнено існуючі методи та підходи до зміцнення поршневих кілець, в тому числі і сучасні технології, що базуються на наноструктурних покриттях. Встановлено можливість використання багат шарових покриттів, які можуть дозволити істотно підвищити стійкість тонкостінних виробів. Для цього розглянули літературні джерела по використуванню технологій зміцнення поршневих кілець, а також фактори, що впливають на їх зносостійкість.

2. Для досліджень було використано метод планування експерименту з побудовою лінійних рівнянь регресії з чотирма рівнями значень змінних факторів (план експерименту – 2^2). Побудовано два рівняння регресії. За результатами їх аналізу встановлено, що на мікротвердість та швидкість зношування багат шарового іонно-плазмового покриття найбільший вплив, наряду з іншими факторами, має концентрація Ti. Тому, визначали оптимальне співвідношення зміцнюючих елементів покриття для забезпечення високої зносостійкості.

3. Зміцнююче покриття TiN/CrN наносили на устаткуванні «Булат-6» зі співвідношеннями Ti/Cr=0,17, Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40. Зміцнювали поршневі кільця, виготовлені з сірого чавуну. Відповідно технічним вимогам до матеріалу їх виготовляли по Д100.04.ДТ61 для двигунів техніки спеціального призначення. Такі поршневі кільця мали наступний хімічний склад, %: C = 2,6-3,1; Si = 1,4-1,9; Mn = 1,0-1,5; P = 0,3-0,5; Cr≤0,3; Ni≤0,6; S≤0,1; Ti = 0,04-0,12; Fe - інше. При серійній технології виготовлення таких кілець, передбачено нанесення на їх робочу зону покриття оловом для прискореного припрацювання. Іонно-плазмове зміцнення виключало використання покриття оловом. Процес осадження покриття здійснювали при струмі дуги $I_d = 100$ А і напрузі зсуву підкладки $U_{см} = -200$ В. По черзі наносили 6-ть шарів CrN і 5-ть – TiN, попередньо розпиливши підшар на метал поршневого кільця чистого Cr товщиною ~50 нм. При цьому товщина 1-го шару TiN становила 50 нм, а CrN – 240 нм при співвідношенні Ti/Cr=0,17. Для співвідношення Ti/Cr=0,27, товщина шару TiN становила – 90 нм, а CrN – 200 нм. Для

співвідношення $Ti/Cr=0,40$, товщина шару TiN становила – 140 нм, а CrN – 170 нм. Загальна товщина багат шарового покриття для всіх варіантів співвідношення досягала 1,7 мкм.

4. Дослідження якості та властивостей проводили порівняльно з використанням комплексних досліджень вихідного і зміцненого стану поршневих кілець. При цьому оцінювали рівень Нц і мінливість структури металу при експлуатації. Рівень залишкових напружень після зміцнення оцінювали шляхом порівняння з вихідним станом з використанням неруйнівного контролю якості, згідно показників коерцитивної сили. На основі отриманих результатів розробили технологію їх зняття перед використанням поршневих кілець в експлуатації після зміцнення.

5. Використані підходи до досліджень полягали в оцінках та обґрунтуваннях запропонованого технологічного процесу з композицією багат шарового іонно-плазмового наноструктурного TiN/CrN зміцнення. Оцінку показників зносостійкості проводили на основі стендових випробувань на тертя та зношування. Детально випробування проводили при двох швидкостях ковзання: 1,0 і 1,3 м/с. Вони обрані для оцінки рівня зношування і процесів структуроутворення, які формуються на поверхнях тертя при переході від пружної деформації (при 1,3 м/с) до пластичної (при 1,0 м/с) з урахуванням умов експлуатації. В окремі періоди випробувань оцінювали коефіцієнт тертя, швидкості зношування та ступінь зміни мікротвердості поверхні тертя. Для визначення особливостей структурних змін проводили електронікроскопічні дослідження і мікрорентгеноспектральний аналіз поверхні тертя, а також прилеглої до неї зони. Для опису зміни структуроутворення використовували оптико-математичний її опис (робочої і прилеглої поверхні).

6. Для виявлення залишкових напружень в періоди до- і після зміцнення кілець використовували магнітний неруйнівний метод по коерцитивній силі (коерцитиметр КРМ- Ц-2М). Ступінь зміцнення оцінювали по мікротвердості приладом ПМТ-3. Випробування на тертя і знос проводили на машині тертя при зворотно-поступальному русі. Для визначення ступеня зміни хімічного складу поверхонь

тертя в локальних мікронах використовували скануючий електронний мікроскоп JSM-6390LV.

7. Для детального аналізу процесів, що відбуваються на поверхні тертя використовували вдосконалену методику оптико-математичного опису змін на поверхні тертя з одночасним визначенням хімічного складу в різних зонах тертя, що дозволить встановити кінетику розвитку мінливості стану системи. Така методика полягала в оцінках масиву зображень похилої зони і поверхні тертя, що відносяться до певних інтервалів абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій. Їх фізична суть полягає в описі дифузійних потоків і такого показника як щільність фрагмента зображення, що характеризують різні зони тертя.

РОЗДІЛ 3
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ, ЗМІЦНЕНИХ
БАГАТОШАРОВОЮ НАНОЗМІЦНЮЮЧОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ TiN/CrN

3.1 Результати вимірювання лінійних розмірів замків поршневих кілець та коерцитивної сили їх робочих зон після нанесення покриттів

Перед нанесенням багатошарового покриття TiN/CrN оцінювали рівень напружень партії маслороз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки. Покриття наносили товщиною 1,7 мкм. Для цього одночасно провели статистичні вимірювання коерцитивної сили поршневих кілець, що виготовляються за серійною технологією.

Вимірювання величини замку і рівня залишкових напружень проводили протягом 1,5 місяців з періодичністю оцінки 7-9 днів. Зони вимірювань різних партій чавунних поршневих кілець (сірий чавун) представлені на рис.3.1 (зони: I, II і III). Ступінь неоднорідності напружено-деформованого стану кільця, по коерцитивній силі, оцінювали порівняльно до- і після осадження зміцнюючого покриття.

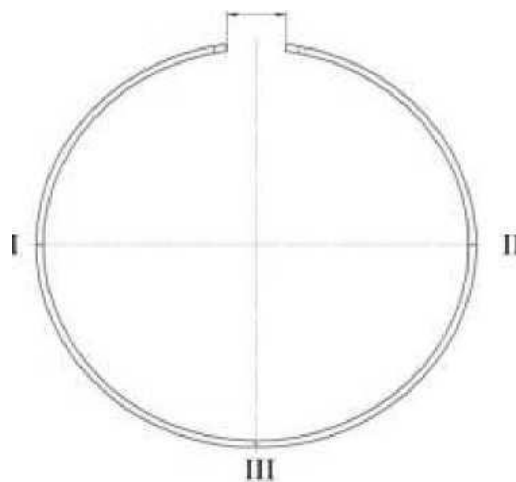


Рисунок 3.1 - Зони вимірювань коерцитивної сили і лінійного розміру замку поршневого кільця

Аналізом встановлено, що після нанесення покриття в залежності від періоду оцінювання розміру замку і рівня показань коерцитивної сили вони в цих зонах змінювалися. Зміни пов'язані з формуванням залишкових напружень при зміцнюючих обробках. У таблиці 3.1 наведені величини замків до нанесення зміцнюючого покриття, а також перший і останній період вимірювання після нанесення покриття за весь період спостережень. У таблиці 3.2 відображені показання коерцитивної сили першого і останнього вимірювань в трьох зонах після нанесення покриття.

Таблиця 3.1 - Лінійні розміри замків до і після нанесення покриття

Номер поршневого кільця	До нанесення покриття, мм	Після нанесення покриття, мм (1-е вимірювання)	Після нанесення покриття, мм (останнє вимірювання)
1	31	30	30
2	27	27	27
3	24	29	28

Таблиця 3.2 - Показники коерцитивної сили в трьох зонах вимірювань після нанесення покриття

Номер поршневого кільця	Після нанесення покриття, А/см (1-е вимірювання)				Після нанесення покриття, А/см (останнє вимірювання)			
	I	II	III	середнє значення	I	II	III	середнє значення
1	11,9	11,8	12,2	11,97	11,5	11,4	11,8	11,57
2	16,9	16,9	19,3	17,7	16,4	16,3	19,0	17,23
3	14,8	14,0	14,2	14,3	14,0	13,9	13,5	13,8

До нанесення покриттів коерцитивна сила була близька до рівня цього показника після нанесення покриття (останнє вимірювання), але відрізнялася рівнем

показань різних поршневих кілець, що пов'язано з використанням

відповідного набору шихтових матеріалів при їх виготовленні (спадкових властивостей металу).

Результати вимірювань (таблиця 3.1) показали, що після нанесення покриття величина замку в кільці № 1 зменшилася на 3,2%, а в № 3 збільшилася на 17,24%. Останнє вимірювання зазору замку, по закінченню проведення експерименту, в кільці № 3 показало, що воно зменшилось на 3,45%, що за розміром відповідає вимогам креслення. У кільці № 2 розмір замку залишився незмінним за весь період спостережень і відповідав вихідному стану.

Результати вимірювань (таблиця 3.2) виявили, що в результаті природного старіння (вилежування) рівень залишкових напружень знизився, в середньому, на 3,34%, 2,65% і 3,5% для кілець № 1, № 2 та № 3 відповідно, що свідчить про ефективність такої технології для релаксації напружень в поршневих кільцях після їх зміцнення.

Додатково оцінили рівень коерцитивної сили маслорозчинних поршневих кілець, що виготовляються за серійною технологією, яка передбачає нанесення покриття оловом, необхідне для прискореного припрацювання виробу (таблиця 3.3). Рівень напружень таких кілець можна порівняти з кільцями, додатково зміцненими іонно-плазмовим покриттям (таблиця 3.3). Однак, якщо порівняти середнє значення напружень по всім кільцям як серійних, так і з іонно-плазмовим покриттям, то можна побачити, що коерцитивна сила зміцнених кілець, після природного старіння, на 10,8% нижче в порівнянні з серійними. Це також підтверджує, що істотного впливу на рівень напружень запропонована технологія нанесення зміцнюючого покриття не має. Такий вплив нанесення покриття на рівень напружень в кільці пояснюється низькою чутливістю матеріалу до накопичень напружень через наявність графітових включень [30]. Це також дозволяє забезпечувати підвищення зносостійкості таких виробів без втрати довговічності при розвитку напружено-деформованого стану при експлуатації.

Таблиця 3.3 - Коерцитивна сила серійних поршневих кілець в трьох зонах вимірювань

Умовні номери серійних поршневих кілець	Без зміцнюючого покриття, А/см			
	I	II	III	Середнє значення
1	18,9	17,2	18,7	18,27
2	14,8	14,5	15,2	14,83

3.2 Вплив мінімальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець

Відомо, що швидкість роботи двигуна в процесі експлуатації змінюється в певних межах. Тому становить інтерес визначити їх межі та виявити особливості структуроутворення в експлуатації при мінливості цього параметра.

В даному розділі аналізували границю впливу мінімальної швидкості ковзання, що дорівнює 1 м/с, при якій пройдений шлях тертя склав 360 км. Та вплив на зміну мікротвердості, знос і структуроутворення, що формуються при терті. Аналізом виявлено, що за всі періоди випробувань сумарний ваговий знос гільз циліндрів, що працювала в парі зі зміцненими кільцями (при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$) на 42% вище в порівнянні з гільзою, яка працювала у sprzęженні з серійними кільцями (Рис. 3.2). При цьому, у варіанті зі зміцненням цим покриттям зі співвідношенням твердої складової до м'якої $Ti/Cr=0,27$ – сумарний знос гільзи вище на 56 % відносно серійної. Після зміцнення кільця покриттям зі співвідношенням $Ti/Cr=0,40$ – сумарний знос гільзи вище на 66 % відносно серійної.

З отриманих даних також видно, що підвищений знос характерний для гільз, що працюють в парі зі зміцненими кільцями – в період припрацювання. В цьому випадку знос вище в 3 рази при $Ti/Cr=0,17$ та 0,27, і в 3,9 рази – при $Ti/Cr=0,40$, в порівнянні з гільзою циліндрів, що випробовувалась з серійними кільцями. Це пояснюється наявністю покриття оловом на серійних виробках, призначеного для прискореного припрацювання трибопари. Однак, вже на другому етапі випробувань

ваговий знос гільзи, яка працювала в парі з зміцненим кільцями (при $Ti/Cr=0,17$) знижується в порівнянні з серійними на 43%, а на третьому – на 29%. Співвідношення елементів покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ характеризуються більшим рівнем зносу гільз на 2-му і 3-му етапах в порівнянні з трибосистемою «гільза-серійне кільце» – в діапазоні від 21 % та 55 %.

З огляду на високу мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям (Рис. 3.4), були зафіксовані процеси локального захоплювання з матеріалом поверхні гільзи, що і викликало підвищену швидкість зношування на початковому етапі (період припрацювання) у всіх зразках.

Незначний приріст ваги кілець всіх варіантів на останньому етапі випробувань (Рис. 3.3), також пов'язаний з локальним захоплюванням окремих зон поверхні тертя. Результати оцінки свідчать про більш високу інтенсивність зношування серійних кілець.

За результатами випробувань, зношування кілець з іонно-плазмовим покриттям при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ менше відносно серійних в 12,2 рази. Співвідношення $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечують зниження зношування в 3,4 рази та на 47 % відносно серійного варіанту.

Збільшення висоти робочих поверхонь серійних і зміцнених кілець після випробувань представлені в таблиці 3.4. Висота робочих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася, в середньому, на 0,06 мм (30 % від вихідного розміру робочої поверхні), а зміцнених лише на 0,015 мм (5–10 % від вихідного розміру робочої поверхні). Спостережуване є результатом розвитку процесу пластичної деформації робочих поверхонь кілець, та особливо це спостерігається при відсутності зміцнення.

Швидкість зношування по збільшенню висоти робочих поверхонь показує, що для зміцнених кілець вона нижче, в середньому, в 4 рази.

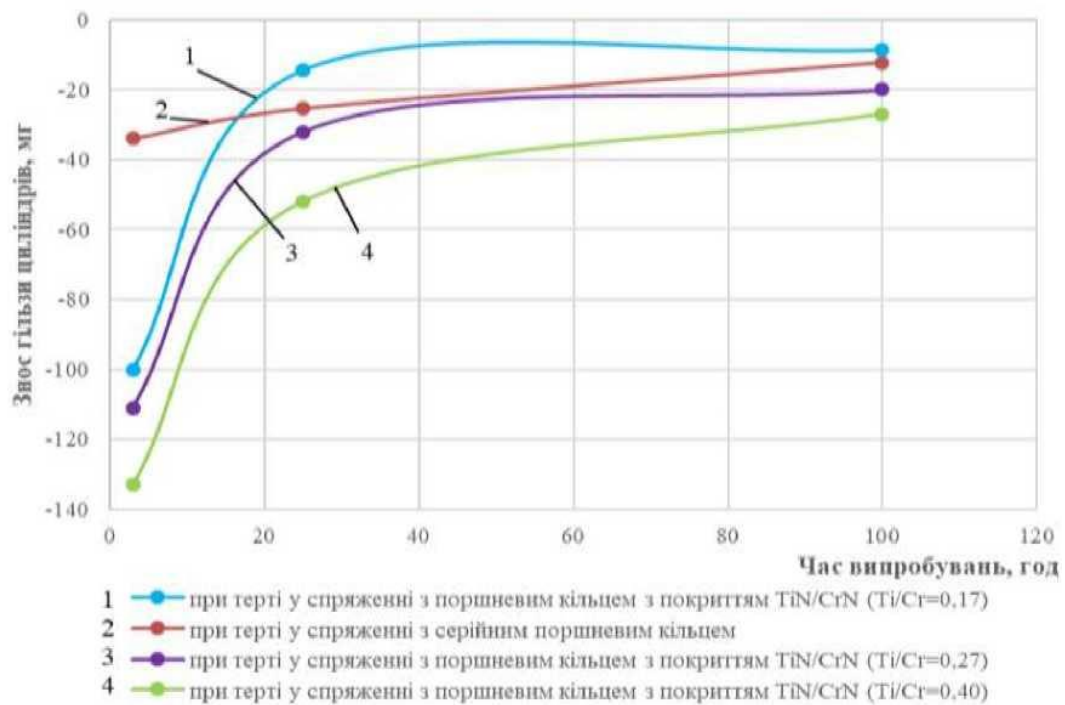


Рисунок 3.2 - Знос гільзи циліндрів

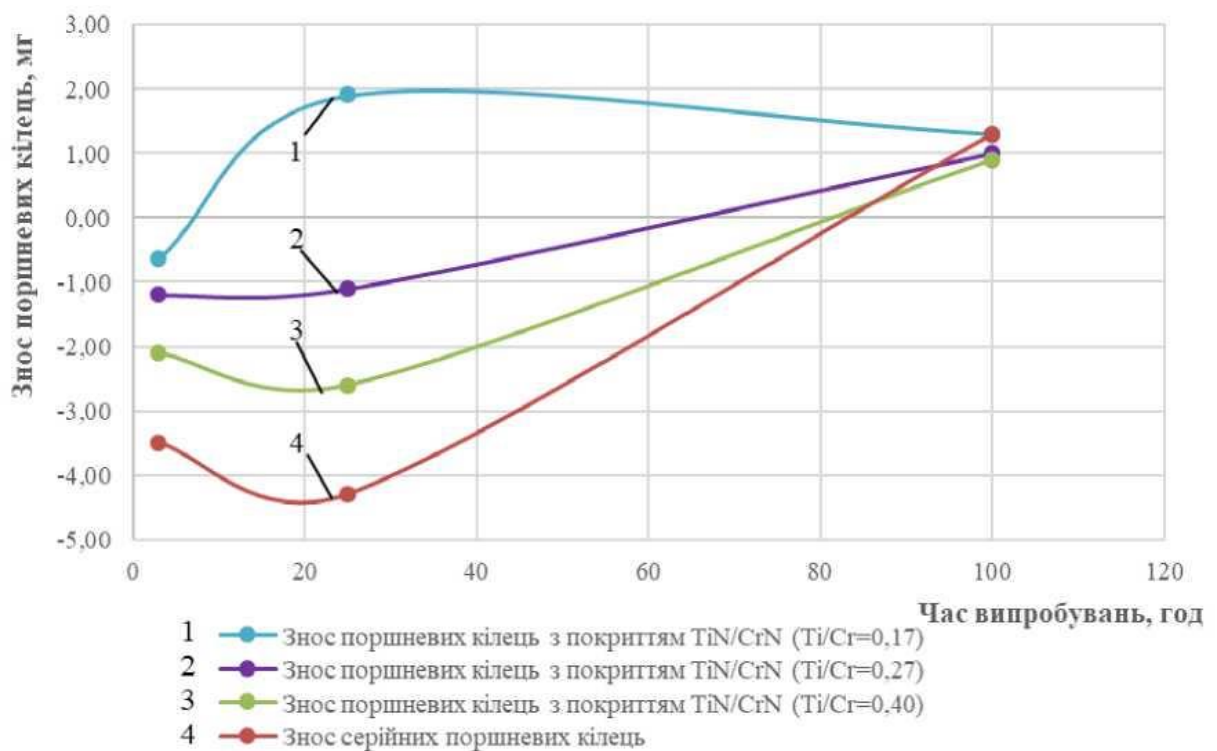


Рисунок 3.3 - Ступінь зносу маслоз'ємних поршневих кілець

Таблиця 3.4 – Ступінь збільшення висоти робочої поверхні кілець

Варіант поршневих кілець		Збільшення висоти робочої поверхні, %
З покриттям TiN/CrN	Ti/Cr=0,17	5
	Ti/Cr=0,27	5
	Ti/Cr=0,40	10
Серійні		30

Середній коефіцієнт тертя, за весь час випробувань при цій швидкості ковзання, найвищий у серійного варіанту виготовлення кільця – 0,67 (Рис. 3.4). При цьому, іонно-плазмове зміцнення зі співвідношеннями Ti/Cr=0,17 та Ti/Cr=0,27 забезпечило його зниження до 0,21 (у 3 рази).

Покриття оловом, забезпечує стабільність показників тільки в період припрацювання, а вже після 2-го етапу випробувань, фіксується різниця в ступені зміцнення (Рис. 3.5). Вихідна середня мікротвердість кілець з покриттям TiN/CrN вище в 170 разів в порівнянні з серійно застосовуваними. Мікротвердість серійних кілець вже після 2-го етапу підвищується, в середньому, в 13,4 рази. Цей показник з іонно-плазмовим покриттям після 2-го і 3-го етапів знижується, в середньому, в 3,6 і 10,5 разів відносно вихідного стану.

Результати локального спектрального мікроаналізу робочих поверхонь тертя серійних кілець і зміцнених покриттям TiN/CrN зі співвідношенням Ti/Cr=0,17 (як найбільш зносостійкого) представлені в таблиці 3.5 і 4.6 відповідно. Вихідний (до випробувань) хімічний склад поверхні серійного кільця і після випробувань представлений в таблиці 3.5, спектр 1 і 2 відповідно. На Рис. 3.5 наведені зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця, і аналогічно на рис. 3.6 (спектр 1 і 2) – зміцненого.

Слід зазначити, що олова в серійних кільцях, внаслідок повного його зносу на робочих поверхнях не виявлено.

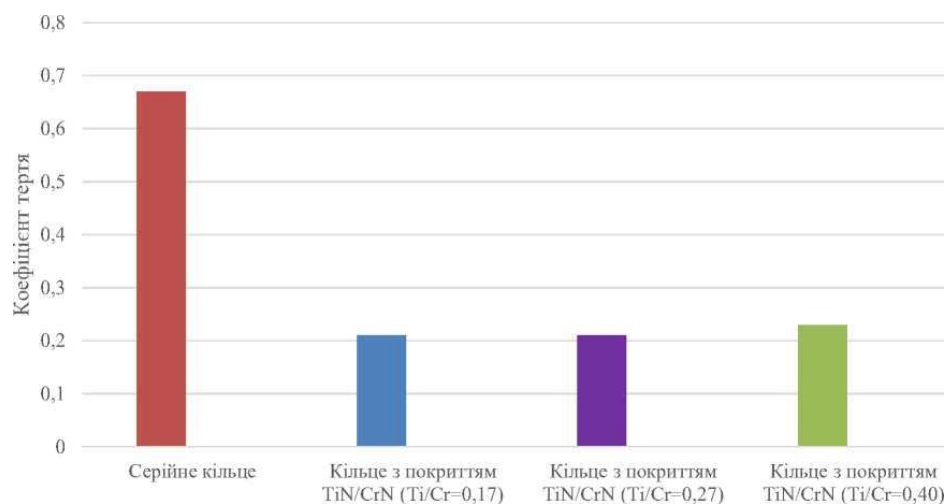


Рисунок 3.4 – Коефіцієнт тертя поршневих кілець

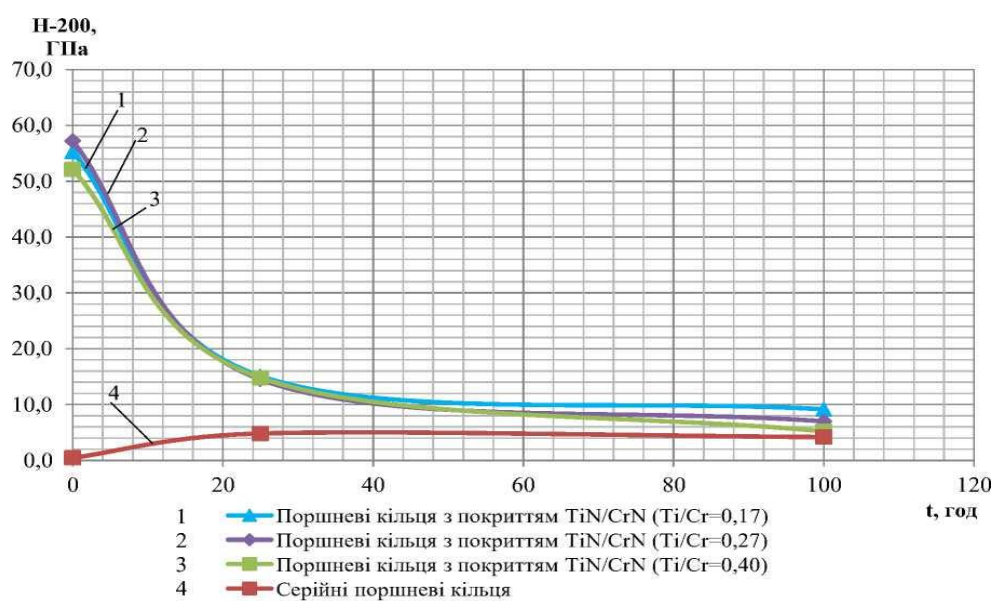


Рисунок 3.5 - Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям (1, 2, 3) серійних кілець (4)

Таблиця 3.5 - Хімічний склад вихідної (спектр 1) поверхні і зони тертя (спектр 2) серійного поршневого кільця (рис. 3.5), %

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Sn
спектр 1	1,09	-	0,29	0,29	-	-	-	-	1,14	97,21
спектр 2	2,23	-	0,23	1,65	0,52	-	0,42	1,66	93,28	-

Одночасно виявлено вплив пластичної деформації, яка порушує цілісність покриття олова, що не бере участь в терті, сприяючи його структуризації в зоні похилої площини (див. рис. 3.6). Це пов'язано з ефектом, відповідному принципу Сен-Венана, супроводжуваного зміною напружено-деформованого стану прилеглої області матеріалу (зона прилягання похилої поверхні до зони тертя кільця), внаслідок прикладання зовнішнього навантаження на ділянку (робоча зона кільця), дещо віддалену від зони виникнення деформації. Зміна макрорельєфа зони примикання похилої площини відповідає висоті робочої поверхні (~ 0,45-0,5 мм).

При цьому має місце часткове перенесення фосфору (див. таблицю 3.5, $P = 0,52\%$) на поверхню кільця від його контртіла. Це пов'язано з приростом ваги даного кільця після випробувань (див. рис. 3.3).

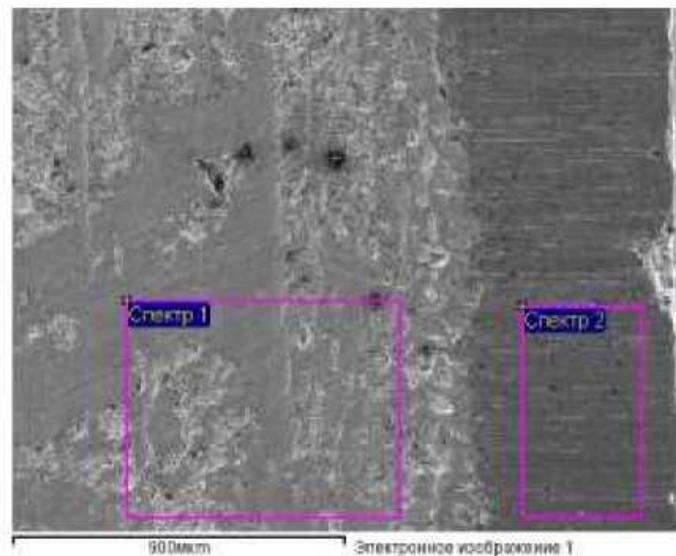


Рисунок 3.6 - Зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця

Таблиця 3.6 - Хімічний склад поверхні тертя кільця з покриттям TiN/CrN ($Ti/Cr = 0,17$) (рис. 3.7), %

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
спектр 1	0,8	0,13	-	0,16	-	-	14,5	83,77		0,63
спектр 2	4,41	0,91	0,60	1,25	-	0,77	10,76	39,08	-	42,22

Характерні поздовжні смуги на поверхні робочих зон обох варіантів кілець, формуються внаслідок тертя у напрямку їх переміщення при випробуванні. Спостерігається і формування графітної сітки в робочих зонах серійних кілець, які представлені і у вигляді окремих, хаотично розташованих і орієнтованих пластинчастих включень чорного кольору (див. рис. 3.6), що відповідає початковому металу.

Результати аналізу вихідної поверхні випробуваних маслоз'ємних поршневих кілець з багатошаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN демонструють, що початкове відношення частки компонентів покриття Ti/Cr склало 0,17. Також на поверхні робочої кромки після випробувань були виявлені Al (0,55%) і Ca (0,2%). Можливим поясненням появи цих елементів є часткове їх перенесення при терті в умовах змащення маслом M14-B2, що в свою чергу забезпечує внесок в приріст ваги зразків кілець на 2-му і 3-му етапах випробувань.

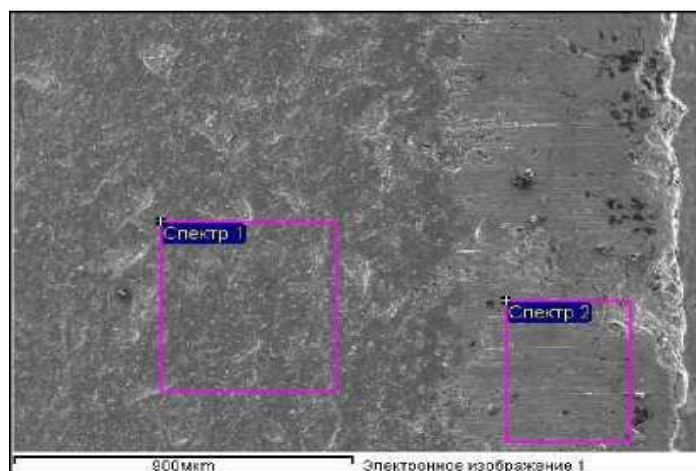


Рисунок 3.7 - Зона локального хімічного аналізу початкової поверхні кільця з покриттям TiN/CrN (спектр 1) і після випробувань (спектр 2)

Використан метод оцінки ефективної (залишкової) товщини покриття, який полягає в оцінюванні ступеня його зносу, що визначається після проведення стендових випробувань на тертя та зношування. Для цього, рекомендовано виконувати локальне визначення хімічного складу і мікроструктури поверхні тертя виробів по стендовим випробувань. Після чого, порівнюючи сумарне відсоткове співвідношення компонентів, з яких складається багатошарове покриття, до- і після

випробувань, а також враховуючи частку компонентів підкладки, проводили розрахунок частки залишкової товщини покриття. Розрахунками встановлено, що в кільці, випробуваних при швидкості ковзання 1 м/с - частка покриття по співвідношенню Ti і Cr становить 49,84%, а вихідної - 48,77%. В даному випадку, оптимальна залишкова його товщина складає 49,84% від початкової 1,7 мкм, тобто ~ 0,85 мкм.

3.3 Вплив максимальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець

В даному розділі роботи детально аналізується вплив швидкості ковзання поршневого кільця 1,3 м/с, при пройденому шлях тертя 468 км, на особливості процесу зносу та структурних змін.

За період випробувань сумарний ваговий знос гільз циліндрів, в парі зі зміцненими кільцями на 6% нижче в порівнянні з серійними (рис. 3.8). У період припрацювання знос гільзи, яка працювала в трибосистемі зі зміцненими кільцями ($Ti/Cr=0,17$), нижче в 3 рази відносно серійних. На другому етапі випробувань більш висока зношуваність (в 3 рази) спостерігається у гільзі, яка працювала в трибосистемі зі зміцненими кільцями ($Ti/Cr=0,17$), відносно серійних. На третьому етапі випробувань ваговий знос гільзи, яка працювала зі зміцненими кільцями нижче в порівнянні з серійними на 13%. На етапі припрацювання зміцнений варіант кільця (при $Ti/Cr=0,27$) забезпечує зменшення зношування гільзи на 37 %, а варіант зміцнення зі співвідношенням компонентів $Ti/Cr=0,40$ – на 25 % відносно серійної. На другому етапі співвідношення $Ti/Cr=0,27$ демонструє підвищення зношуваності гільзи в 3 рази, а $Ti/Cr=0,40$ – в 3,9 рази. На третьому етапі іонно-плазмове покриття зі співвідношеннями $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечило підвищену зношуваність гільзи у 2,5 рази відносно серійного варіанту.

Незначний приріст ваги зміцнених кілець на 2-му і 3-му етапах (рис. 3.9), також пов'язаний з локальним захопленням окремих зон поверхні тертя. Такі

результати характерні для більш високої швидкості зношування серійних кілець.

З огляду на високу мікротвердість кілець, зміцнених іонно-плазмовим покриттям (рис. 3.11), були зафіксовані процеси локального схоплювання матеріалу поверхні гільзи, що також викликало підвищений знос на початковому етапі випробувань.

Результати випробувань кілець з іонно-плазмовим покриттям при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ навіть при більшій швидкості показують, що, в середньому, їх сумарний знос знижується в 15,7 разів. При співвідношеннях $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ сумарний знос таких варіантів зміцнення кілець знижується в 6 та 3 рази відповідно.

Збільшення висоти робочих поверхонь серійних і зміцнених кілець після випробувань представлені в таблиці 3.7. Висота цих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася, в середньому, на 0,04 мм (20%), а висота крайок зміцнених кілець – на 0,01 мм (5 %). Спостережуване є результатом розвитку процесу пластичної деформації робочих зон кілець, особливо в разі відсутності зміцнення і меншої швидкості ковзання.

Швидкість зношування по збільшенню висоти робочих поверхонь для зміцнених кілець істотно нижче, в середньому, в 4 рази для кожного варіанту зміцнення.

Середній коефіцієнт тертя, за весь час випробувань при цій швидкості ковзання, найвищий у серійного варіанту виготовлення кільця – 0,42 (рис. 3.10).

При цьому, іонно-плазмове зміцнення тільки зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ забезпечило його зниження до 0,13 (у 3 рази).

Покриття оловом, забезпечує стабільність показників зносостійкості тільки в період припрацювання, а вже після 2-го етапу випробувань, фіксується різниця в ступені зміцнення (див. рис. 3.11). Вихідна середня мікротвердість кілець з покриттям TiN/CrN вище в 116 разів у порівнянні з серійними до випробувань. Мікротвердість зміцнених кілець після 2-го етапу випробувань, в середньому, вище в 3 рази, після 3-го – на 40 % відносно серійних. Мікротвердість кілець з іонно-

плазмовим покриттям після 2-го етапу випробувань знижується в 3,7 рази, а після 3-го- в 7,6 відносно їх вихідного рівня. Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу робочих поверхонь тертя кілець серійних і зміцнених покриттям TiN/CrN при співвідношенні Ti/Cr=0,17 (як найбільш зносостійких), представлені в таблиці 3.8 і 3.9 відповідно. Вихідний (до випробувань) хімічний склад поверхні серійного кільця і після випробувань представлений в таблиці 3.8 (спектр 1 і 2 відповідно). На рис. 3.10 наведені зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця, і аналогічно на рис. 3.11 (спектр 1 і 2) зміцненого кільця.

Слід зазначити, що олова в зоні тертя зразків серійних кілець, внаслідок інтенсивного зносу, на жодній з робочих поверхонь не виявлено.

Таблиця 3.7 – Збільшення висоти робочих поверхонь кілець

Варіант поршневих кілець		Збільшення висоти робочої поверхні, %
З покриттям TiN/CrN	Ti/Cr=0,17	5
	Ti/Cr=0,27	5
	Ti/Cr=0,40	5
Серійні		20

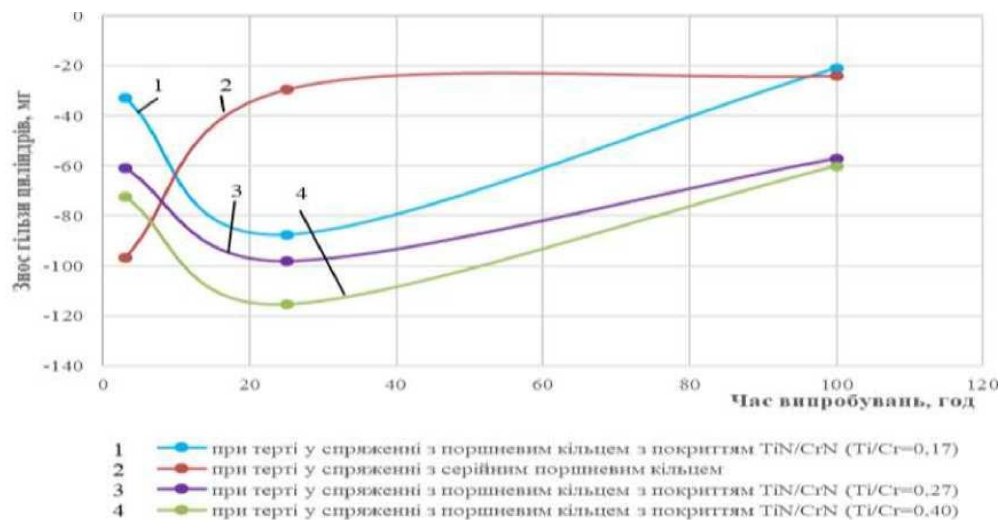


Рисунок 3.8 – Знос гільзи циліндрів

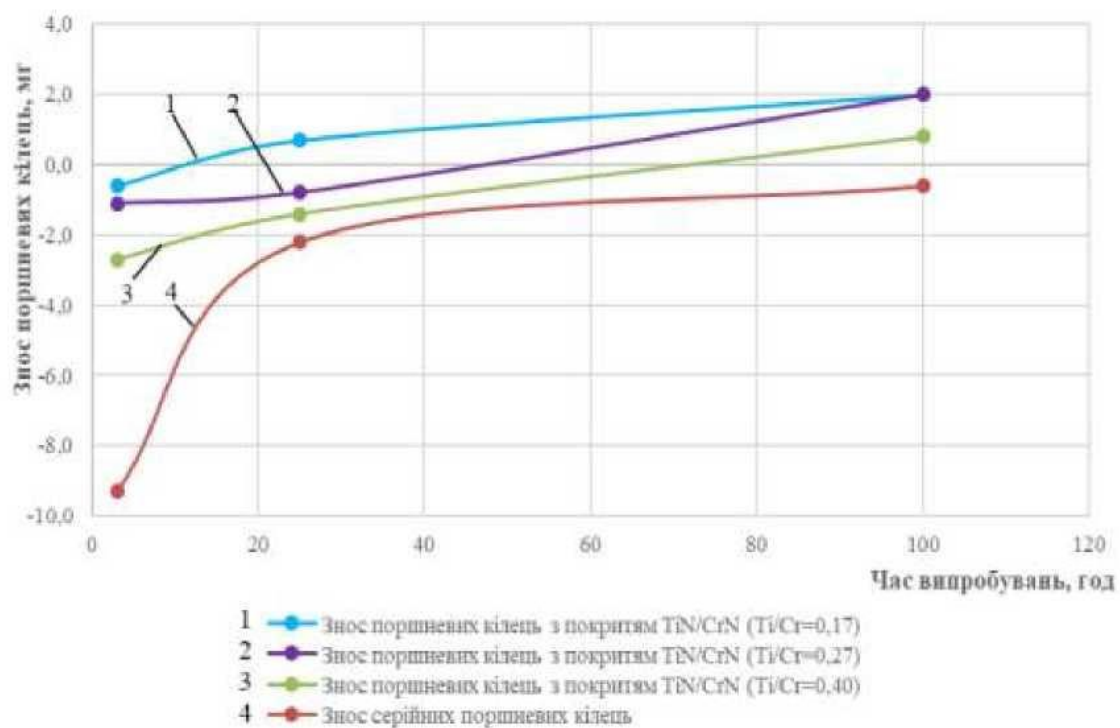


Рисунок 3.9 - Ступінь зносу маслоз'ємних поршневих кілець

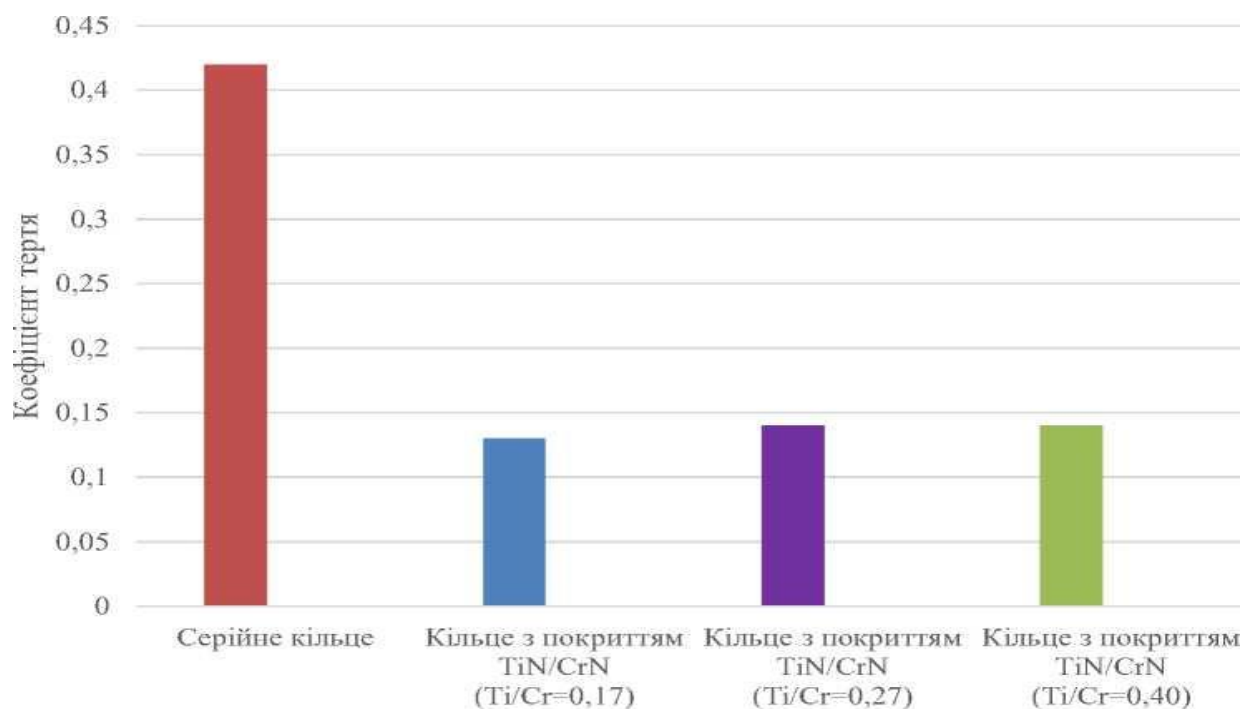


Рисунок 3.10 – Коефіцієнт тертя поршневих кілець

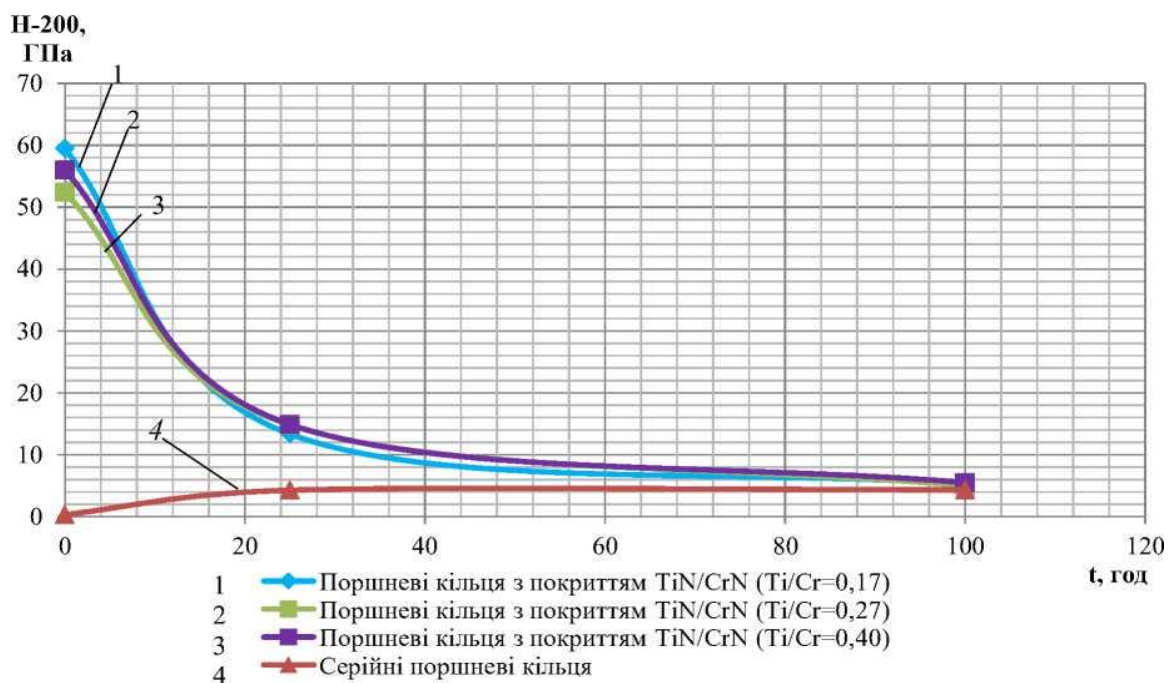


Рисунок 3.11 – Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим зміцненням (1, 2, 3) і серійних (4)

Таблиця 3.8 - Хімічний склад вихідної (спектр 1) поверхні і зони тертя (спектр 2) серійного поршневого кільця (рис. 3.10)

Зона	C	O	Al	Si	Mn	Fe	Sn
спектр 1	1,09	-	0,29	0,29	-	1,14	97,21
спектр 2	2,69	-	0,23	1,86	1,25	94,20	-

Таблиця 3.9 - Хімічний склад поверхні тертя кільця з покриттям TiN/CrN при співвідношенні Ti/Cr=0,17 (рис. 3.13)

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
спектр 1	0,8	0,13	-	0,16	-	-	14,5	83,77		0,63
спектр 2	3,59	-	0,55	1,77	0,59	0,20	0,80	2,20	1,28	89,03

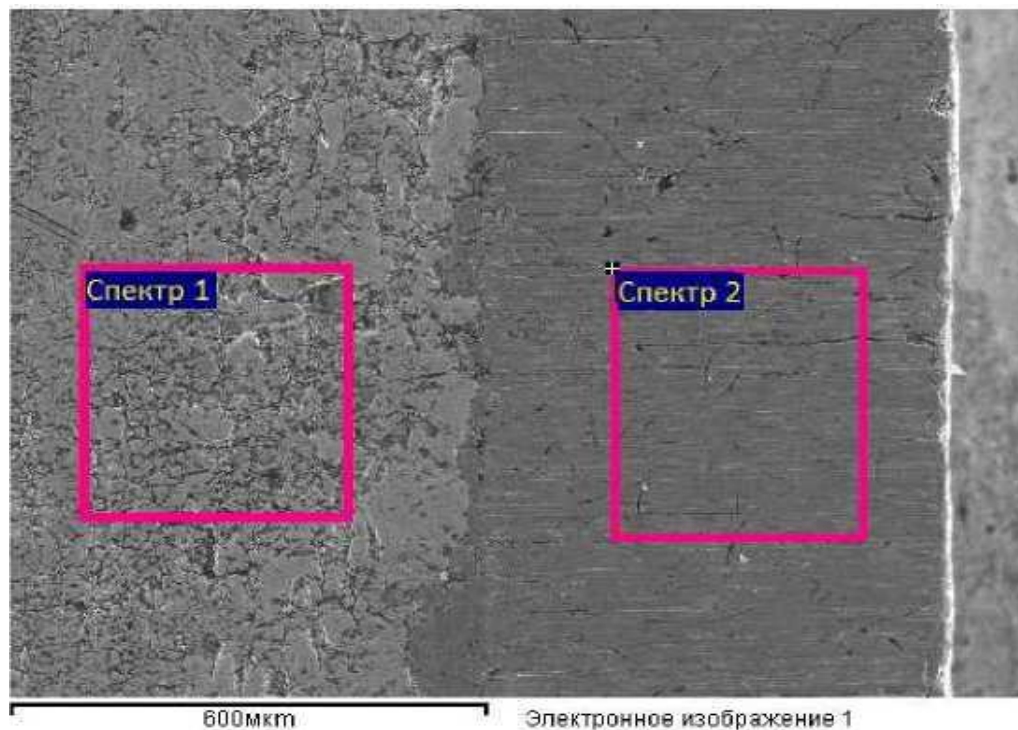


Рисунок 3.12 - Зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця

Одночасно виявлено вплив пластичної деформації, що порушує цілісність покриття оловом похилої поверхні, яка прилягає до поверхні тертя (див. рис. 3.12). Зміна макрорельєфа в зоні прилягання похилої площини до робочої відповідає величині близькою до висоти зони тертя ($\sim 0,45-0,5$ мм).

Незалежно від способу зміцнення для поверхні тертя поршневого кільця характерно формування поздовжніх смуг на робочих поясах обох варіантів кілець.

Вони найбільш чітко формуються в результаті тертя у напрямку їх переміщення при випробуванні. Спостерігається також і формування графітної сітки на робочих поверхнях серійних кілець, які одночасно представлені і в вигляді окремих, хаотично розташованих і орієнтованих пластинчастих включень чорного кольору (див. рис. 3.12). Їх поява пов'язана зі зносом і відповідає початковому металу.

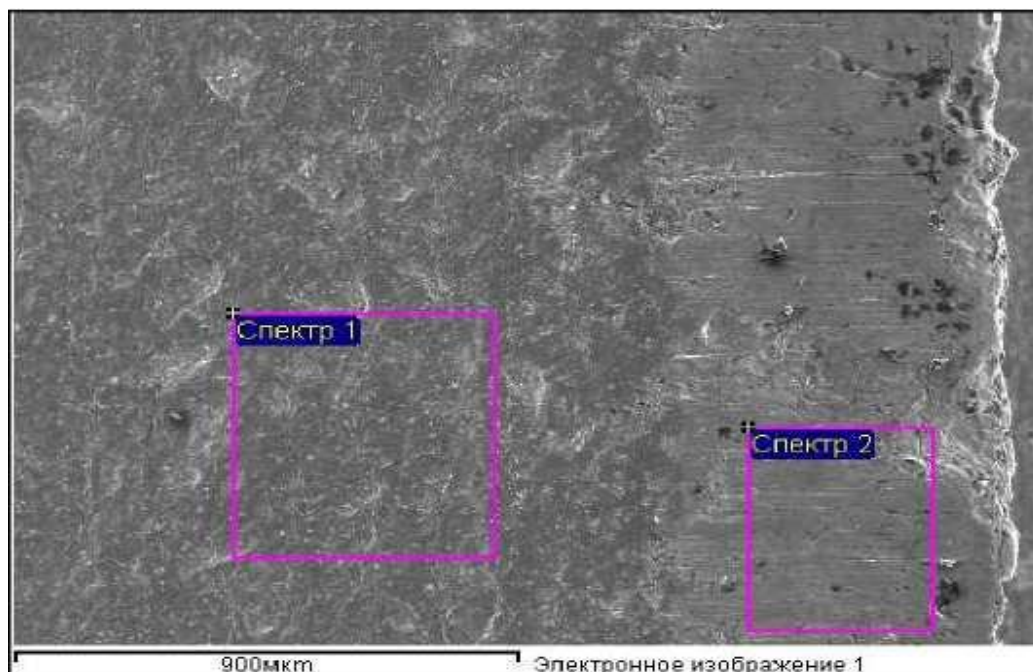


Рисунок 3.13 - Зона локального хімічного аналізу поверхні поршневого кільця з покриттям TiN/CrN після випробувань

Результати аналізу вихідної поверхні маслоз'ємних поршневих кілець з багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN демонструють, що початкове відношення частки компонентів покриття Ti/Cr складало 0,17. Потім частка компонентів у покритті (по співвідношенню Ti і Cr) після випробувань сумарно складало 3%, а основи (C, O, Si, Mn, Fe) - збільшилася до 95,67%, що свідчить про істотне зношування покриття при такій швидкості ковзання та шляху тертя. Відношення Ti/Cr складало 0,36, при цьому частка Cr після випробувань зменшилася в 38 разів, а частка Ti в – 18. За раніше запропонованою методикою розрахунку, залишкова товщина покриття TiN/CrN після випробувань становить 50 нм. Також на робочій поверхні після випробувань були виявлені Al (0,55%), P (0,59%) і Ca (0,2%). Можливо, поява фосфору

пов'язано з частковим його перенесенням з поверхні контртіла (фосфатована гільза циліндрів) при випробуваннях, а – Al і Ca за рахунок змащення (масло M14-B2).

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час нанесення гальванічних покриттів використовуються різні небезпечні речовини, мають місце виділення металічного пилу при попередній механічній обробці деталей, значний рівень шуму від різних приладів та устаткування цеху, великі напруги в електричному колі.

Також при попередній обробці деталей використовуються кислоти та луги в операціях травлення, знежирення та активації, їх пари можуть викликати подразнення слизових, а при потраплянні на шкіру відбувається реакція з тканинами людського тіла.

Для підготовчих та основних операцій використовуються електрична, теплова та механічна енергії.

При проектуванні гальванічного цеху цинкування з пірофосфатного електроліту було враховано вимоги охорони праці. Проаналізовано шкідливі та небезпечні фактори та розроблено заходи, що створюють здорові умови праці та пожежну безпеку підприємства [28].

Повітря робочої зони

Робота на проектованій дільниці пов'язана з ручним навантаженням та розвантаженням гальванічної ванни. Передбачено контроль усіх показників приладів для якісного покриття.

Згідно ДСН 3.3.6.042 – 99, такі роботи можуть бути віднесені до категорії фізичних робіт середньої тяжкості Пб [28].

Таблиця 4.1 – санітарні норми параметрів мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С						Відносна вологість, відсотків		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима				Оптимальна	Допустима на робочих місцях	Оптимальна не більше ніж	Допустима на робочих місцях	
			Верхня межа		Нижня межа						
			На робочих місцях								
			Постійних	Непостійних	Постійних	Непостійних					
Холодний	Середньої тяжкості П-б	17-19	21	23	15	13	40-60	75	0,2	Не більш ніж 0,4	
Теплий		20-22	27	29	15	15	40-60	70 (при 25°С)	0,3	0,2-0,5	

Нижче наведено у таблиці коротку санітарну характеристику проектного цеху нанесення цинкового покриття [28].

У проектованому цеху використовується теплоізоляція устаткування та інших джерел тепла [28].

Для працівників передбаченні різні індивідуальні засоби захисту: спецодяг типу «П», респіратори типу «пелюсток», навушники, захисні окуляри, гумові рукавиці та спец взуття. Мінімум двічі на місяць передбачено проводити перевірку повітря пиломіром на вміст шкідливих речовин [28].

Таблиця 4.2 – Коротка санітарна характеристика цеху, що проектується

Ванна травлення	1	Назва виробничої ділянки, лабораторії, установки
НСІ	2	Шкідливі речовини, що виділяються. Причини їх виділення
Подразнює верхні дихальні шляхи, викликає хімічні опіки	3	Група шкідливої речовини. Характеристика шкідливого впливу
1	4	ГДК шкідливої речовини у повітрі робочої зони, м/мг
2	5	Клас небезпечності шкідливої речовини
Резиновий спецодяг, фартухи, рукавиці, чоботи, захисні окуляри, респіратор	6	Засоби індивідуального захисту
Промити місце ураження проточною водою	7	Засоби долікарської допомоги
Експрес-метод. Метод неперервної автоматичної реєстрації	8	Методи контролю вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони
IV	9	Клас виробництва згідно СН–245–71
36	10	Санітарна група технологічного процесу згідно СНиП 2.09.04–87

Для забезпечення чистого повітря у промисловій зоні та видалення з нього шкідливих речовин використовується:

1. Механічна загальнообмінна припливна вентиляція, що використовується для подачі чистого повітря до приміщення цеху. За потребою повітря піддається додатковій спеціальній обробці, наприклад очищенню або нагріванню.

2. Витяжна вентиляція, що служить для видалення з цеху відпрацьованого повітря забрудненого хімічними речовинами, часточками пилу від механічної обробки або нагрітого.

Між суміжними приміщеннями продуктивність вентиляції збалансовано.

На виробництві передбачено аварійну вентиляцію, вона вмикається у випадку

аварійної ситуації, таких як витік газів. Цей механізм приводиться у дію датчиками сенсорів, які налаштовують на величину ГДК відповідної контрольованої величини, також є можливість привести цей механізм у дію за допомогою ручного керування. Кратність повітрообміну складає год^{-1} для аварійної вентиляції [28].

Ванни, у яких відбувається процеси з виділенням шкідливих речовин, таких як травлення, під час роботи обладнано бортовими відсмоктувачами повітря [28].

Також при вході в цех передбачено теплові повітряні завіси для попередження можливого переохолодження робітників цеху [28].

Для зниження викидів шкідливих речовин у повітря робочої зони передбачено впровадити наступні заходи:

1. Місцева вентиляція, яку вмикають під час приготування та коригування електролітів та інших робочих розчинів для запобігання викидів шкідливих речовин у повітря робочої зони.
2. Струминне введення кислоти у холодну воду під час приготування розчинів травлення та активації.
3. Фіксація часу для стікання електроліту та іншого розчину з деталей для запобігання винесення його з ванни.
4. Влаштування козирків з поліпропілену між ваннами для запобігання потрапляння розчинів на підлогу.
5. Непроточна ванна уловлювання для промивання деталей після процесу електроосадження для зменшення концентрації компонентів електроліту у стічних водах [28].

Розрахунок системи місцевої механічної вентиляції

В якості місцевої вентиляції використані двосторонні бортові відсмоктувачі [28].

Місцева вентиляція встановлюється на ванні травлення з поверхні якої внаслідок проходження реакцій виділяються шкідливі та небезпечні речовини [28].

Об'єм повітря, що видаляються через бортові відсмоктувачі знаходимо за

формулою:

$$L_{omc} = 3600 \cdot a \cdot b \cdot K_z \cdot K_t \cdot \sqrt{(t_p - t_n)} \cdot n \cdot b^3, \text{ м}^3 / \text{ГОД} \quad (4.1)$$

де a – довжина ванни (1,84 м);

b – ширина ванни (0,52 м);

t_p – температура розчину;

t_n – температура навколишнього середовища;

K_t – коефіцієнт запасу для двостороннього бортового відсмоктувача;

b – безрозмірна величина (1/15);

K_z – коефіцієнт запасу (1,5);

n – кількість прямих кутів між границями потоку повітря (3) [28].

$$K_t = \left(1 + \frac{b}{8 \cdot a}\right)^2 \quad (4.2)$$

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти та результати розрахунків

Процес	t_p	t_n	K_t	Кількість ванн	L_{omc}
Травлення	20	20	1,07	1	708,8
Сумарно	-	-	-	-	708,8

Розрахуємо втрати тиску у трубопроводах, кг/м^2 :

$$P = \sum (R \cdot l + Z), \quad (4.3)$$

де R – опір одного погонного трубопроводу.

$$P = \sum (0,005 \cdot 25 + 36,74) = 37,99$$

Для трубопроводу діаметром 560 мм, та швидкості руху повітря 1,5 м/с значення $R = 0,005 \text{ кг/м}^2$. $Z = 36,74 \text{ кг/м}^2$. Довжина трубопроводу складає 25 м [28].

Виходячи з витрати повітря та втрат тиску було обрано вентилятор Ц4-70N₂A4095 2а. Потужність на валу 0,5 кВт, частота обертів 1400 об/хв.

Двигун А02-11-6 комплектується разом з вентилятором [28].

Виробниче освітлення

На виробництві використовується система штучного освітлення, вона поділяються на: робочу, ремонтну, охоронну, аварійну та евакуаційну.

Система природного освітлення – комбінована. Загальна система – суміщена.

Таблиця 4.3 – Норми освітленості, згідно ДБН В.2.5-28:2018 [28]

Розряд і підрозряд зорової роботи	Освітленість, лк		КПО, відсотків	
	Штучне		Природне	Суміщене
	Комбіноване	Загальне	Верхнє і бічне	Верхнє і бічне
IV6	500	200	4 і 1,5	2,4 і 0,9

Для освітлення використані люмінесцентні лампи ЛБ-40 та ЛБ-60. Для аварійного та евакуаційного освітлення використані світильники прямого типу «Альфа». Контроль освітлення проводять один раз на рік люксометром Ю-117. Аварійне освітлення має складає не менше 5% від нормального, під час евакуації використовується освітлювальні прилади на підлозі по маршруту евакуації [28].

Виробничий шум і вібрація

Працюючі у цеху механізми є джерелами шуму та вібрації. Рівень шуму залежно від кількості одночасно увімкненого обладнання сягає 76...92 дБА при нормі 80 дБА, згідно ДСН 3.3.6.037-99 [28].

Для зниження шуму проектом передбачено: засоби звукоізоляції та звукопоглинання, глушників на повітропроводах, а також зменшення шуму в джерелі його утворення при налаштування балансування приладів. Працівникам видаються засоби захисту – навушники або беруші [28].

Також для зменшення шуму передбачено правильне архітектурне планування

цеху. Обладнання встановлено таким чином, щоб від стін мінімально відбивався шум: з робочого боку обладнання до стіни відстань 1,5 м, з не робочої – 1,2...1,5 м, площа приміщення на працівника не менше 4,5м², висота не менше 5 м [28].

Вимірювання шуму здійснюється за допомогою приладу ИШВ-0037.

Електробезпека

Електричний цех є одним з найнебезпечніших місць за ступенем можливості ураження електричним струмом, тому що речовини, що використовуються на виробництві, стають причиною руйнації електроізолюючого шару струмоведучих частин обладнання, що з великою вірогідністю може призвести до ураження людей [28].

Цех живиться від електричної від трифазної чотирьохпровідної електричної мережі змінного струму напруги 380/220 В із глухозаземленою нейтраллю [28].

Згідно ГОСТ 12. 1. 038 – 92, допустимі рівні напруги та струму, що проходять крізь людину становлять 2 В і 0,3 мА; при аварії – 36 В і 6 мА [28].

Найчастіше відбувається однофазний дотик людини до мережі змінного струму. В цьому випадку, сила струму, що проходить через людину, розраховується як:

$$I_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \cdot 10^3 / (R_{\text{л}} + R_0), \text{ мА}; \quad (4.4)$$

де $U_{\text{ф}} = 220$ – фазна напруга, В;

$R_{\text{л}} = 3000$ – загальний опір тіла людини, Ом;

$R_0 = 4$ – опір робочого заземлення нейтралі, Ом.

$$I_{\text{л}} = 220 / (3000 + 4) = 73 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 73 \text{ мА}$$

$$U_{\text{д}} = I_{\text{л}} \cdot R_{\text{л}}, \text{ В} \quad (4.5)$$

$$U_{\text{д}} = 73 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 = 219 \text{ В}$$

При порівнянні розрахункових значень з нормативними, можна побачити, що при порушенні вимог ПУЕ, в цеху можливі електричні травми з важкими наслідками [28].

При проектуванні цеху передбачено наступні заходи і засоби для підвищення рівня електробезпеки: занулення електрообладнання, вирівнювання потенціалів, захисне відключення установок, малу напругу живлення ручних електроінструментів, електричний поділ мереж, ізоляцію струмоведучих частин, огорожувальні пристрої, блокування, сигналізація, знаки безпеки, тощо [28].

Безпека технологічних процесів і обслуговування обладнання

На кожному етапі гальванічного покриття деталей можливі відхилення від нормального протікання процесів та наслідки дії небезпечних факторів, зокрема: потрапляння гарячого розчину на дерев'яний міст; одержання термічних опіків працівниками, тощо. Можливе одержання травм від апаратів, в наслідок необережного поводження з відкритими частинами, що обертаються. Однією з причин аварійного стану може бути відмова автоматики. Існує небезпека отримання хімічних опіків в наслідок розливу кислот чи лугів [28].

Також проект передбачає застосування сигналізуючого обладнання та аварійних вимикачів [28].

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ БАГАТОШАРОВИМ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ ПОКРИТТЯМ TiN/CRN

МАСЛОЗ'ЄМНИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ

Традиційно для поршневих кілець використовують сірий або високоміцний чавун. Через їх форми і малий перетин, застосовують різні покриття для їх зміцнення - найчастіше використовують хромування. Однак, це не забезпечує досягнення необхідних вимог по зносостійкості. Зниження довговічності поршневих кілець відбувається в результаті їх інтенсивного зношування і деформації робочої поверхні.

Як було показано випробуваннями (див. розділ 3), розробка нової технології нанесення багат шарового нанопокриття TiN/CrN іонно-плазмовим методом підвищує зносостійкість поршневих кілець в 12-15 разів, а пластичну деформацію робочої поверхні в 4 рази.

Оцінка економічного ефекту пропонуємої нової технології зміцнення кілець, виконана з урахуванням їх застосування для комплектації двигуна спеціальної техніки і виконана для ДП «Завод імені В.О. Малишева».

Собівартість такого поршневого кільця з сірого чавуну складає 179 грн. Додаткове зміцнення іонно-плазмовим покриттям не перевищує 300 грн. Досить низька вартість такої обробки пояснюється тим, що одночасно наносили багат шарове покриття на два поршневих кільця. Тому, загальна вартість зміцненого кільця досягає 479 грн. Незважаючи на те, що зношування поршневого кільця знижується до 15 разів, для оцінки економічного ефекту використано показник зменшення схильності до пластичної деформації зміцненої робочої зони, що дозволило підвищити його надійність в 4 рази. З огляду на зміну вартості кільця нового типу, економічний ефект від впровадження такої технології для одного двигуна складе:

$$E = (C_k \cdot P - C_y) \cdot K, \quad (5.1)$$

$$E = (179 \cdot 4 - 479) \cdot 60 = 14220 \text{ грн.}$$

де E – економічний ефект, грн.;

C_k – собівартість маслос'ємного поршневого кільця, зміцненого багат шаровим

нанопокриттям, грн.;

П – показник підвищення витрат за рахунок зменшення схильності до пластичної деформації зміцненого кільця (разів);

Су – вартість поршневого кільця з урахуванням іонно-плазмового зміцнення, грн.;

К – кількість поршневих кілець необхідних для комплектації одного двигуна, шт.

Показник П з залежності 4.1 визначається витратами у виробника. Основними факторами додаткових витрат є:

1– виготовлення пристроїв для обробки поршневих кілець методом іонно-плазмового осадження для зміцнення багатошаровим покриттям;

2– витратні матеріали;

3– електроенергія і обслуговування техпроцесу;

4– настройка, обслуговування устаткування, зарплата персоналу фахівців і податки.

Розшифровка витрат на зміцнення, які сумарно склали 300 грн. На одне поршневі кільця, в середньому, відповідає:

– фактор 1 – 15,0 % (45 грн.);

– фактор 2 – 31,0 % (93 грн.);

– фактор 3 – 25,0 % (75 грн.);

– фактор 4 – 29,0 % (87 грн.).

При цьому, в процесі зміцнення нанесенням багатошарових покриттів одночасно здійснювали обробку двох кілець і тривалість процесу не перевищувала 1 год. 30 хв.

Виготовлене пристосування для одночасної обробки двох поршневих кілець може бути використано протягом тривалого часу.

В процесі експлуатації поршневі кільця працюють в різних режимах швидкостей ковзання, які суттєво змінюють характер процесу тертя і зношування,

що супроводжується дифузією компонентів, пластичною деформацією робочих поверхонь і їх структуризацією.

В результаті проведених порівняльних комплексних досліджень вивчено внесок цих факторів в показники зносостійкості і запропонована нова економічно і екологічно обґрунтована технологія зміцнення поршневих кілець для двигунів спеціальної техніки.

В результаті проведених досліджень обґрунтована технологічна ефективність використання багат шарових покриттів поршневих кілець з сірого чавуну, зміцнених багат шаровим нанопокриттям TiN/CrN.

Висновки до розділу

1. Теоретична оцінка якості поверхні тертя при нанесенні багат шарового наноструктурного покриття TiN/CrN на поршневі кільця з сірого чавуну виконана на основі поєднання електронномікроскопічних досліджень та нових підходів до оцінок показників зносостійкості з використанням оптико-математичного методу. На його основі розроблена спеціальна комп'ютерна програма для оцінки показників відносної нейтральності абсолютних величин лапласіанів і дивергенції, що описують процеси дифузії і змін щільності фрагментів відповідно. Попередніми дослідженнями було визначено, що в даному випадку оцінювати процеси, які відбуваються при терті і зношуванні найбільш ефективно проводити розрахунками по п'ятиточковій різницевої схемі осередку пікселів.

2. Порівняльні випробування серійних і зміцнених поршневих кілець показали, що в зоні робочої поверхні тій, яка примикає до неї – похилої в обох випадках формуються поперечні смуги (відносно напрямку руху спряженої деталі), які відповідають різним інтервалам зон стиснення і розтягнення (скидання енергії). Зміцнені кільця відрізняються щільністю поперечних смуг і їх розмір не перевищує 20 мкм, а поздовжні – не виявлені. При цьому температура поверхні тертя досягає 70 °С. Структуризація поверхні відзначається і в прилеглий зоні, що можна пояснити

ефектом Сен-Венана (дією локальних деформацій на границі з поверхнею тертя).

3. Методом мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено, що зона стиснення формується за рахунок переміщення твердих зміцнюючих фаз TiN і CrN, які досить рівномірно в них розподіляються 14,27-15,67% і 51,58-60,45% відповідно. Одночасно в зонах розтягнення частка цих фаз знижується в 2 і 3 рази відповідно. Разом з тим показано, що частка азоту не завжди змінюється відповідно до основних зміцнюючих компонентів Ti і Cr і це дає підставу припускати про можливість формування в зонах стиснення різних типів нітридів Cr₂N, CrN і TiN_{1-x}, TiN. У зонах, прилеглих до поверхні тертя, також відзначається процес структуризації з досить близьким вмістом зміцнюючих фаз.

4. Розроблені спеціальні алгоритми програми для дослідження змін структури. На кожній фотографії визначали значення періодів кожного його пікселя по стовпцях і рядках (анізотропію). Згідно оцінки пробних періодів, цикл мінливості оцінювали в діапазоні від 2 до 200 пікселів. Визначали середні значення часткою негативних, нульових і позитивних лапласіанів, згідно аналізованого періоду. Потім розраховували абсолютну величину відхилення від середнього значення. За результатами отриманого масиву сортували ці показники щодо зменшення їх значень. Це дозволило виявити найбільш істотні зміни.

5. На підставі розрахунків оцінили відмінності в структуроутворенні кілець варіантів, які зіставлялися (серійні і зміцнені) після експлуатації. Показано, що максимальний функціонал вихідної поверхні, оцінений за стовпцями серійного поршневого кільця на 13,7% нижче його зони тертя, а зміцненого - на 32,0% вище. У той же час, найбільший функціонал вихідної поверхні серійного кільця вище його зони тертя лише на 4,0%, а зміцненого – на 8,2% нижче. Спостережуване може бути пов'язано з частковим зносом покриття при терті.

6. Теоретичними розрахунками за показниками середньої нейтральності лапласіанів, підрахованих по основній формулі, а також під кутом 90° до основного, 3-му і 4-му лапласіанів виявили особливості структуроутворення різних поверхонь маслоз'ємних поршневих кілець. Так, в серійних кільцях, випробуваних при обох

швидкостях ковзання (1,0 і 1,3 м/с), ці показники вищі в поверхнях тертя, щодо їх вихідних зон. Збільшення різниці за всіма, перерахованими вище показниками на поверхні тертя, крім дивергенції, вище в серійному кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1,3 м/с відносно 1,0 м/с, в середньому, на ~41%. Це вказує на те, що при збільшенні швидкості ковзання на 23%, зростає як знос поверхні гільзи циліндрів (в 1,6 р.), так і серійних поршневих кілець (на 16%). Різниця між серійним і зміцненим варіантом, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, становить за показниками: лапласіанів основного на 97%; під кутом 90° – 92%; 3-го – 89%; 4-го – 83%; дивергенції – 97%. Така значна різниця по характеристикам середньої нейтральності, в значній мірі, відображає низьку деградацію зміцненої поверхні тертя.

7. Оцінена середня однорідність у всіх варіантах досліджуваних поршневих кілець. Вона досить висока і близька до 1,0. Локальна однорідність вихідної поверхні в обох серійних варіантах нижче, ніж випробуваних на знос. Цілком ймовірно, що це пов'язано з повним видаленням покриття олова (наносять для припрацювання) і структуризацією поверхні тертя. Кільце зі зміцненням (при швидкості ковзання 1,3 м/с) схильне до меншого механічного впливу і цей показник на 25% нижче, ніж у серійному при тій же швидкості ковзання.

8. Досліджено характеристики середніх функцій (кольору, середньоквадратичного відхилення, узагальненого градієнта, 3-го і 4-го лапласіанів, а також дивергенції), які показали їх зниження після випробувань. Це характерно для обох варіантів серійних кілець. Всі показники, крім узагальненого градієнта, вище в кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1 м/с в діапазоні 9,5 - 21%. Узагальнений градієнт в обох варіантах випробувань показує ідентичний рівень.

9. Використання іонно-плазмового зміцнення кілець виявило, що середні функції цих показників після експлуатації при швидкості ковзання 1,3 м/с навпаки, підвищуються щодо їх вихідного стану на 6% - 17%. Різниця між вихідним станом поверхні і після тертя серійного кільця (швидкість ковзання 1,3 м/с) нижче, ніж в зміцненому варіанті за показниками перерахованих вище середніх функцій від 3,2 до

8,7 разів. Дані результати ще раз підтверджують, що серійні кільця схильні до істотно більшої пластичної деформації. Одночасно, багатошарове іонно-плазмове зміцнення забезпечує мінімальні зміни на поверхні тертя після експлуатації.

10. Мікроструктури серійних і зміцнених кілець виявили, що максимальний їх колір, який характеризує найбільш деградовану структуру, дорівнює 16. Різниця вихідної поверхні і тертя по дивергенції, абсолютному і 3-му лапласіанів, вище в серійних кільцях (при 1,3 м/с): дивергенція на 4%; абсолютний лапласіан в 39 разів; 3-й – в 4,5 рази. Однак, 4-й лапласіан показує зворотню тенденцію і спостерігається його зниження в обох серійних виробках. При цьому він менше в кільці, відносно випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с – на 11%. На відміну від серійних кілець, в зміцнених після експлуатації

забезпечується підвищення всіх показників. Можна припустити, що 4-й лапласіан в цьому розрахунку вказує на відмінний характер структуризації поверхонь тертя серійних кілець (поява поздовжнього переміщення металу формуванням додаткових смуг).

11. Дослідженнями оцінені функції потужності дисипації поверхонь серійних кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, виявлені відносно високі значення в порівнянні з меншою – 1 м/с. Іонно-плазмове зміцнення забезпечує зниження рівня потужності для однієї частини показань, а для іншої – підвищення, що пов'язано зі зміною анізотропії структури в локальних зонах. Рівні потужності різних варіантів виготовлення поршневих кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, мають відмінний характер, що також може вказувати на різну ступінь опору зношуванню.

12. При теоретичному описі структуроутворення в умовах тертя з формуванням смуг стиснення і розтягування (скидання енергії) виявлені області розшарувань і порушення цілісності. Причиною цього є формування зон з повною відсутністю або мінімізацією зміцнюючої фази. Ефекту створення такої неоднорідності сприяє і формуємі напруження, сформовані в процесі тертя робочої поверхні кільця.

13. Для опису структуроутворення і дифузійних процесів, виходячи з мінливості щільності дислокацій, аналізували зв'язки цих процесів з різними інтервалами потужності дисипації (<12 , <16 , <20). Встановлено, що частка дислокацій знижується в серійних поршневих кільцях, після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с у всіх описаних діапазонах від 3,42 до 5,7 разів. Протилежна тенденція зафіксована для зміцнених кілець. При всіх аналізованих потужностях дисипації на поверхні тертя спостерігається підвищення цього показника в межах від 8,4 до 24%. Це дає підставу вважати, що багатошарове іонно-плазмове зміцнення забезпечує більш високу стабільність поверхні при терті в умовах зворотно-поступального навантаження.

14. Для оцінки відносної ідентичності структуроутворення виконаний розрахунок гістограм потужностей дисипації. Порівняння здійснювали за критерієм Колмогорова. Встановлено, що вихідні поверхні серійних кілець мають відносну ідентичність, яка становить 0,53. При цьому, їх зони тертя мають схожість – 0,546.

Виходячи з цього аналізу, структура вихідних поверхонь і зони тертя кілець одного варіанта різні і відповідає 0. Порівняння фотографій поверхонь серійного кільця зі зміцненим, виявило найменшу схожість, яке не перевищує 0,014. Аналіз вихідної поверхні і зони тертя зміцненого кільця показує максимальну схожість – 0,905. Така закономірність вказує на низький рівень деградації структури поверхні тертя зміцненого кільця після експлуатації.

15. Для оцінки співвідношення змін між фазами на досліджуваних поверхнях виконаний розрахунок частки пікселів (точок) поєднань кольорів. Так, в поєднаннях, по 4-м точкам різних кольорів в зоні тертя серійного кільця (при 1,3 м/с) відзначається їх зниження в 6,8 разів, а в 4-х точках одного кольору – збільшення в 2,5 рази щодо вихідного стану. Слід зазначити, що перед випробуваннями робочі поверхні серійних кілець покривалися оловом, яке після періоду припрацювання повністю було відсутнє. Для зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с характерна інша закономірність. Всі показники частки точок кольорів знаходяться в межах від 1,3% до 23,2%. Одночасно, для обох серійних

кілець, випробуваних при швидкостях 1 м/с і 1,3 м/с, зафіксовано суттєву зміну у співвідношенні частки фаз, що вказує на більш високу стійкість до зношування зміцнених. Оцінку розподілу кольорів, що відображає фазовий склад на поверхні тертя проводили на основі розрахунку гістограм Бозе з урахуванням знаків лапласіанів. Виявлено, що розподіл поєднань кольорів дещо змінилося. Так, їх частка по 4 точкам одного кольору, для серійних кілець при обох швидкостях ковзання після випробувань знижується. При цьому, для кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с, вона знижується на 35,2%, а для швидкості 1 м/с – на 30%. При іонно-плазмовому зміцненні кілець забезпечується підвищення цього показника на 17,8% відносно серійних (випробуваних при обох швидкостях ковзання). Для підтвердження достовірності отриманого результату одночасно аналізували ступінь дисипації енергії з використанням особливих М-трійок на основі аналізу дифузії компонентів (лапласіанів) і щільності фрагментів (дивергенції). Отримані результати підтверджують рівень і тенденції мінливості отриманих на основі розрахунків гістограм Бозе.

16. Розрахунок економічної ефективності проведено на основі зниження деформації робочої поверхні. Основними витратами для зміцнення є: виготовлення пристосувань для обробки поршневих кілець методом іонно-плазмового осадження покриття; витратні матеріали; електроенергія і обслуговування техпроцесу; налаштування, обладнання, зарплата фахівців і податки. З перерахованого вище, сумарні витрати на додаткове зміцнення становить 300 грн. З урахуванням використання 60 кілець тільки в одному двигуні спеціальної техніки досягається ефективність 14220 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі представлені нові експериментальні та теоретичні дослідження, які спрямовані на підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець двигунів спеціальної техніки.

2. Аналізом літературних джерел розглянуто умови роботи поршневих кілець та механізми їх зношування, виявлені різні методи підвищення зносостійкості деталей. На основі одержаної інформації особливу увагу приділили можливості використання багат шарових покриттів при наноструктурному зміцненні, тому що потрібна була необхідність підвищувати робочу поверхню тонкостінних виробів із сірого чавуну. Виходячи з того, що для підвищення зносостійкості таких деталей ефективним є використання хромування з наступною обробкою плазмою, прийняли рішення по вивченню можливості використання для зміцнення багат шарове покриття TiN/CrN.

3. Для зміцнення робочої поверхні (пояска) кільця наносили багат шарове іонно-плазмове покриття TiN/CrN на устаткуванні типу «Булат-6». Покриття наносили при різних співвідношеннях Ti/Cr, а саме: Ti/Cr=0,17, Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40. Встановлено оптимальне співвідношення фаз покриття з точки зору забезпечення найвищої зносостійкості.

4. Виконано оцінку триботехнічних властивостей зміцнених кілець та порівняльно досліджували з тими, що використовуються у діючому виробництві. При швидкості ковзання 1,0 м/с, встановлено, що зношування зміцнених поршневих кілець зі співвідношенням Ti/Cr=0,17 зменшується до 12,2 рази, а при швидкості 1,3 м/с – до 15,7 разів порівняно з серійними поршковими кільцями. При співвідношеннях Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40 сумарний знос таких варіантів зміцнення, відносно серійних кілець при швидкості 1,3 м/с, знижується в меншій ступені – в 6 та 3 рази відповідно, а при швидкості 1,0 м/с – в 3,4 рази та на 47 % відповідно. При цьому, коефіцієнт тертя при співвідношенні Ti/Cr=0,17 і таких швидкостях ковзання знижується у тричі відносно серійного поршневого кільця.

5. При швидкості ковзання 1,3 м/с, сумарна швидкість зношування найнижча у співвідношення $Ti/Cr=0,17$ – в 12,3 рази по відношенню до серійних кілець, і на 43 % та в 3,7 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно- плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно. При швидкості ковзання 1,0 м/с, сумарна швидкість зношування також найнижча у співвідношення $Ti/Cr=0,17$ – в 6,4 разів по відношенню до серійних кілець, і у 2 рази та у 3,8 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно. При цьому збільшення висоти робочих поверхонь вихідних кілець зростає на 20%, а зміцнених лише на 5%. Спостережуване є результатом зниження пластичної деформації при зміцненні поверхні наноструктурним багат шаровим покриттям, що підвищує їх довговічність. Таким чином, обґрунтовано оптимальне співвідношення ($Ti/Cr=0,17$), яке забезпечує високі триботехнічні показники поршневих кілець виготовлених з сірого чавуну.

6. Експлуатаційні випробування на ПрАТ "ХТЗ" підтвердили результати стендових випробувань. Економічний ефект від впровадження такої технології зміцнення для одного двигуна складе 14220 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аулін В.В. Абразивна зносостійкість лазерно-модифікованих композиційних покриттів. *Збірник наукових праць КДТУ "Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузі машинобудуванні"*. 2003. Вип. 12. С. 219-223.
2. Аулін В.В. Створення композиційних дисперсно-зміцнених покриттів на деталях СГТ з використанням лазерного випромінювання. *Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин*. 2003. Вип. 33. С. 310-316.
3. Дворук В.І. Вплив низькотемпературної термомеханічної обробки (НТМО) на абразивну зносостійкість легованої сталі. *Проблеми трибології*. 2013. № 4. С. 46-52.
4. Дворук В.І., Белих С.С. Вплив високотемпературної термічної обробки на абразивну зносостійкість легованої сталі. *Problems of friction and wear*. 2013. №1 (60). С. 97-103.
5. Vojtov V.A., Tsymbal B.M. Study of Tribological Characteristics of Compatible Materials in Tribosystems of Extruders for Manufacturing Solid Fuel from Biomass. *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39, № 6. P. 500–504.
6. Мощенок В.И., Нестеренко Е.А., Сагалович А.В. та ін. Визначення триботехнічних характеристик композитних іонно-плазмових покриттів для поршневих кілець дизельних двигунів. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2009. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-tribotekhnicheskikh-harakteristik-kompozitnyh-ionno-plazmennyyh-pokrytiy-dlya-porshnevyyh-kolets-dizelnyh-dvigatelya>
7. Гранкін С.С., Несемченко У.С., Новіков В.Ю. та ін. Механічні властивості наноструктурованих покриттів (Ti, Al)N и (Ti, Cr)N, отримані методом вакуумно-дугового осадження. *ФІП ФІП PSE*. 2014. т.12, № 2. С. 308-315.
8. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., et. al. Study Of Degradation Mechanism Of Metal-Cutting Tools And Their Hardening By ZrN PVD Coatings. *Problems Of Atomic Science And Technology. Series: Plasma Physics*. 2018. №6 (118). P. 300-303.

9. Karamiş M. B., Sertb H. The role of PVD TiN Coating in Wear Behaviour of Aluminium Extrusion Die. *Wear*. 1998. Vol. 217, Is. 1. P. 46-55.
10. Chun-ju W., Chuan-jie W., Bin G., De-bin S. Effects of Tribological Behavior of DLC Film on Micro-deep Drawing Processes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24, Is. 9. P. 2877-2882.
11. Debajyoti B., Chattopadhyay A.K. Study on the Role of PVD TiN Coating in Improving the Performance of Electroplated Monolayer Superabrasive Wheel. *Surface and Coatings Technology*. 2010. 205(2). P. 658–667.
12. Patsalas P., Charitidis C.A., Logothetidis S. The Effect of Substrate Temperature and Biasing on the Mechanical Properties and Structure of Sputtered Titanium Nitride Thin Films. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 125(1). P. 335-340.
13. Gangopadhyay S., Acharya R., Chattopadhyay A.K. Composition and Structure Property Relationship of Low Friction, Wear Resistant TiN–MoS_x Composite Coating Deposited by Pulsed Closed-field Unbalanced Magnetron Sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2009. 203(12). P. 1565-1572
14. Ghosh A., Chattopadhyay A.K. Performance Enhancement of Single-layer Miniature cBN Wheels Using CFUBMS-deposited TiN Coating. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. 47(12). P. 1799-1806.
15. Simmonds M.C., Savan A., Pflüger E., Swygenhoven H.V. Mechanical and Tribological Performance of MoS₂ Co-sputtered Composites. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 126(1). P. 15-24.
16. Fuh-Sheng S., Cheng L.H, Sung Y.C., Huang J.H. Microstructure and Coating Properties of Ion-plated TiN on Type 304 Stainless Steel. *Thin Solid Films*. 1998. 334(12). P. 125-132.
17. Montesano L., Petrogalli C., Marcello A.P. Gelfi Corrosion and wear behavior of CAE deposited CrN-PVD coatings. *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 577-578. P. 641-644.
18. Mo J.L., Zhu M.H. Tribological Characterization of Chromium Nitride Coating Deposited by Filtered Cathodic Vacuum Arc. *Applied Surface Science*. 2009. 255(17). P. 7627-7634.

19. Zhang G., Yan P.X., Wang P., Chen Y.M. The Structure And Tribological Behaviors Of CrN And CrTiN Coatings. *Applied Surface Science*. 2007. 253(18). P. 73537359.
20. Feng W., Yan D., He J., Li X. Reactive Plasma Sprayed TiN Coating and Its Tribological Properties. *Wear*. 2005. 258(5-6). P. 806-811.
21. Odén M., Ericsson C., Håkansson G., Ljungcrantz H. Microstructure and Mechanical Behavior of Arc-evaporated Cr-N Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 1999. 114(1). P. 39-51.
22. Thamotharan J., Sarala R. Characterization of CrN/TiN PVD Coatings on 316L Stainless Steel. *International Journal of ChemTech Research*. 2014. Vol. 6, № 6. P. 32843286.
23. Sang Yong L., Sang Yul L. Comparative evaluation of TiN/CrN, AlN/CrN, TiAlN/CrN multilayer films for the use of semi-solid processing of Cu alloys. *Solid State Phenomena*. 2006. Vols. 116-117. P. 124-127.
24. Bejarano G.G., Gomez B.M., Osorio A. J. et. al. Tribological Properties and Corrosion Resistance Enhancement of H13 Hot Work Steel by Means of CrN/TiN Multilayers. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2010. Vol. 4. № 6. P. 51-59.
25. Ortega-Saenz J.A., Hernandez-Rodriguez M.A.L., Ventura-Sobrevilla V. et. al. Tribological and corrosion testing of surface engineered surgical grade CoCrMo alloy. *Wear*. 2011. Vol. 271. Is. 9-10. P. 2125-2131.
26. Zeng X.T., Zhang S., Sun C.Q. et. al. Nanometric layered CrN/TiN thin films: mechanical strength and thermal stability. *Thin Solid Films*. 2003. № 424. P. 99–102.
27. Harish C.B. Anjana J., Rajam K.S. Structure, Hardness and Thermal Stability of Nanolayered TiN/CrN Multilayer Coatings. *Vacuum*. 2004. Vol. 72. P. 241–248.
28. Ярошевська В.М. Охорона праці в галузі: Навчальний посібник/ В.М. Ярошевська, В.Й. Чабан; М-во науки і освіти України, – Київ: ВД «Професіонал, 2004. – 286 с.