

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Мальцев Тарас Віталійович



УДК 621.891

**ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРШНЕВИХ
КІЛЕЦЬ БАГАТОШАРОВИМ ЗМІЦНЕННЯМ НАНОСТРУКТУРНИМ
ПОКРИТТЯМ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: лауреат Державної премії України,
доктор технічних наук, професор
Скобло Тамара Семенівна,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
професор кафедри технологічних систем ремонтного
виробництва імені О.І. Сідашенка

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Аулін Віктор Васильович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
професор кафедри експлуатації та ремонту машин

кандидат технічних наук
Цимбал Богдан Михайлович,
Національний університет
цивільного захисту України,
доцент кафедри охорони праці
та техногенно-екологічної безпеки

Захист відбудеться «20» вересня 2021 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.832.03 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: пр. Московський, 45, ауд. 204, м. Харків, 61050.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий «18» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.О. Градиський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення високих трибологічних характеристик деталей спеціальної техніки шляхом удосконалення методів виробництва є важливим напрямом підвищення її якості та надійності у використанні. Однією з найбільш відповідальних деталей її двигунів є поршневі кільця, виготовлені з сірого чавуну. Зміцнення таких тонкостінних виробів традиційними методами не забезпечує їх стабільної якості з урахуванням складних умов експлуатації.

Для підвищення триботехнічних властивостей кілець використовують технології їх хромування з наступною обробкою плазмовим променем, але це потребує використання двох різних умов проведення операцій та обладнання для такого зміцнення. Крім того, хромування потребує екологічного захисту працівників, а також захисту поверхонь деталі, які не піддають зміцненню.

Нова технологія зміцнення передбачає використання багатошарового наноструктурного покриття TiN/CrN. При цьому частка хрому, додатково наноситься плазмовим потоком для більшого зчеплення покриття з основним металом. Насиченість камери азотом у технологічному процесі забезпечує формування багатошарового покриття TiN/CrN.

Значний внесок в розробку та використання нанопокриттів внесли Клименко Л.П., Береснев В.М., Бондар О.В., Погребняк О.Д., Sang Yong Lee, Vejarano G.G., Zeng X.T., Harish C.V., Dobrzański L.A. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григор'єв С.М., але ці розробки стосувались інших технологічних умов їх одержання та використання. Окрім того, значний внесок у дослідження трибологічних характеристик функціональних покриттів та зміцнюючих обробок внесли Аулін В.В., Войтов В.А., Дворук В.І. Однак, в їх дослідженнях не розглядаються вплив умов використання тонкостінних деталей, їх матеріал та стабільність показників при терті та зношуванні в умовах нестабільних змін параметрів у експлуатації.

Дослідження спрямовані на забезпечення стабільних триботехнічних властивостей протягом всього життєвого циклу деталей вузлів спеціальної техніки є актуальними та важливими.

Зв'язок роботи з науковими темами та програмами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематики ХНТУСГ імені Петра Василенка та програм: "Розробка і впровадження нових технологій зміцнення тонкостінних деталей" (ДР № 0114U006552) та «Розробка і використання нових технологічних прийомів зміцнення наноструктурними покриттями в машинобудуванні» (ДР № 0120U102792).

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

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 маслороз'ємних поршневих кілець.

3. Запропонувати та випробувати новий технологічний процес зміцнення багаточаровою наноконструкцією робочої поверхні маслороз'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 способ 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'єкт досліджень – процеси тертя та зношування зміцненої робочої поверхні поршневих кілець.

Предмет досліджень – закономірності зміни трибологічних властивостей поршневих кілець з багаточаровим зміцненням наноструктурним покриттям.

Методи досліджень. Запропоновано комплексний підхід у дослідженнях та послідовність їх проведення. У дослідженнях використовували сучасні методи аналізу структури та триботехнічних властивостей покриттів в процесі тертя та зношування при різних параметрах експлуатації. Для аналізу властивостей та зношування робочого шару використовували методи оцінки мікротвердості, ступень деформації робочої поверхні, а також структурні зміни, що формуються на поверхні тертя, використанням електронної мікроскопії і локального рентгеноспектрального аналізу. Оцінювали також стан різних зон тертя: деформацію робочої поверхні поршневих кілець та прилеглої до неї частини. Для виявлення структурних змін використовували оптико-математичний метод їх опису, який базувався на аналізі зображень поверхні тертя. Зміни структурного та напруженого стану було описано методом неруйнівного контролю вимірюваннями коерцитивної сили.

Методи досліджень висвітлюють технологію нанесення зміцнюючих багаточарових покриттів TiN/CrN, стендові та виробничі випробування.

Наукова новизна отриманих результатів. Положення, які характеризують наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному.

Вперше:

- отримано залежності трибологічних характеристик різних співвідношень Ti/Cr багат шарового покриття TiN/CrN та експериментально обґрунтовано оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке забезпечує високі триботехнічні показники поршневих кілець виготовлених з сірого чавуну;

- теоретично, з використанням оптико-математичного методу на основі опису дифузійних потоків (лапласіанів) та щільності фрагментів зображення (дивергенцій) поверхонь тертя виявлено відмінність у їх якості, яка суттєво змінює трибологічні показники при різних параметрах тертя та зношування відносно таких деталей без зміцнення і дозволяє корегувати властивості поверхні тертя поршневих кілець шляхом зміни частки зміцнюючих фаз.

Отримали подальший розвиток:

- комплексні дослідження виявлених змін, що відбуваються на поверхні тертя, які полягають в тому, що незалежно від типу поверхні тертя має місце значна циклічна пластична деформація, що створює зони стиснення та розтягнення і вони відрізняються зміною хімічного складу, щільністю, розвитком пошкоджень, схоплень, можливими руйнуваннями особливо на деталях без зміцнення;

- комплексні дослідження впливу параметрів тертя та зношування поршневих кілець спеціальної техніки на структурні зміни.

Удосконалено:

- теоретично-розрахунковий підхід оптико-математичного аналізу, який адаптовано для опису структурних змін зон тертя з урахуванням умов експлуатації поршневого кільця.

Практична значимість отриманих результатів. Практична значимість дисертаційної роботи полягала у тому, що на підставі одержаних результатів розроблена нова комплексна технологія підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець для двигунів спеціальної техніки. Вона базувалась на комплексному підході до досліджень, розробках нових технологічних процесів виробництва, керування співвідношенням зміцнюючих фаз багат шарового наноструктурного покриття та неруйнівним контролем якості.

Найбільш важливі розробки захищені патентами України (№ 110145, № 117673, № 120464, 130854).

Економічний ефект від впровадження зміцнених поршневих кілець при виробництві спеціальної техніки тільки на один двигун складає 14220 грн. (використовується 60 поршневих кілець).

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та викладені у 20 публікаціях. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: визначення напрямів розробок, аналіз умов роботи поршневих кілець [1, 2, 8, 10, 13, 14],

оцінка напружено-деформованого стану неруйнівним методом за коерцитивною силою [2, 11, 12, 17], дослідження триботехнічних властивостей та змін якості поверхонь тертя [3, 6, 7, 9, 15 – 20], зміни у структуроутворенні поверхні тертя поршневих кілець оптико-математичним методом [4, 5].

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-практичних конференціях: II Forum for young Researches "Young Researches in The Global World: Vistas and Challenges", O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Харків, 20 жовтня, 2016 р.); VI науково-методична конференція «Современные проблемы и технологии обеспечения качества конструкционных материалов», Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, 22-23 вересня, 2016 р.); 22-га міжнародна науково-практична конференція «Физические и компьютерные технологии», Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, (Харків, 7-9 грудня 2016 р.); IX International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies (WRTYS), E.O. Paton Electric Welding Institute of The National Academy of Sciences of Ukraine, (Київ, 23–26 травня, 2017 р.); II Міжнародна науково-практична конференція «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрям автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях», Сумський державний університет, (Суми, 22-26 травня, 2017 р.); IV Міжнародна науково-технічна конференція студентів, молодих вчених та спеціалістів «Энергосбережение и эффективность в технических системах», Тамбовський державний технічний університет, (м. Тамбов, 10-12 липня 2017 р.); XIV Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі», Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (Харків, 5-6 квітня 2018 р.); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна (Харків, 10-13 вересня, 2018 р.); XVII Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі», Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (Харків, 25-26 березня 2021).

Публікації. Основні результати роботи опубліковані в 9 наукових працях, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях України (з них 4 включені до бази Scopus); 2 статті одноосібно; 1 публікація у закордонному виданні; 7 у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 4 патенти на корисну модель.

Структура і обсяг робіт. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 237 сторінок, у тому числі 3 додатки. Обсяг основного тексту дисертації становить 185 сторінки, 74 рисунки, 33 таблиці. Список використаних джерел нараховує 167 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, яку описують мета і завдання досліджень, а також отримані автором результати, визначені практична їх значимість і новизна. Показано зв'язок роботи з науковими темами і особистим внеском здобувача наукового ступеня. Наведено дані про публікації та апробацію результатів роботи.

У першому розділі розглянуто виявлені в літературі умови роботи та механізми зношування поршневих кілець, методи зміцнення деталей, що працюють в спряженнях. Виконано аналіз використаних технологій зміцнення поршневих кілець. Встановлено, що найбільш часто для підвищення їх зносостійкості використовують методи модифікування металу, однак вони в недостатній мірі задовольняють вимогам експлуатації. В останні роки нанотехнології отримали поштовх у використанні для зміцнення, та можуть бути ефективними і для деталей в машинобудуванні, що працюють у спряженні.

В даний час основними методами зміцнення поршневих кілець з високоміцного чавуну є електролітичне хромування, термообробка лазерним променем, напилення молібденом, що забезпечують максимальний ефект підвищення зносостійкості до 2,5 разів. Використання таких методів зміцнення для маслороз'ємних поршневих кілець є складним при виготовленні їх з сірого чавуну з малим перерізом. З огляду на вплив цих факторів, розглянули можливість їх зміцнення наноструктурним покриттям.

Проаналізовано використання багатошарових іонно-плазмових покриттів на основі титану в поєднанні з N, C, БрАЖ9-4, Cu, Al, які наносили на сталеві вироби, попередньо зміцнені азотуванням. Таке зміцнення деталей забезпечило підвищення експлуатаційних характеристик в 1,5 рази і збільшувало критичне навантаження зі зменшенням схильності до задируутворення. Одночасно проаналізували основні параметри такого технологічного процесу зміцнення і характер структуроутворення. Встановлено зв'язок між параметрами обробки і властивостями покриттів. Описано характер доріжок тертя і профілограм покриттів.

Розглянуто основні параметри технологічних процесів нанесення покриттів і найбільш ефективні композиції для роботи в умовах інтенсивного зносу. Так, наприклад, TiN має перевагу в порівнянні з MoN, внаслідок більшої спорідненості з азотом, у якого вільна енергія утворення зміцнюючої фази в 4,8 раз вище.

Особливу увагу приділено аналізу виявлених покриттів TiN/CrN, які були нанесені на сталь з поверхневим азотуванням для поліпшення адгезії з металом деталі. Аналіз показав, що така композиція при критичних навантаженнях характеризується мінімальною схильністю до видалення матеріалу з поверхні тертя, а також відрізняється запобіганням втрати адгезії покриття, відсутністю схильності до схоплювання зі спряженою деталлю. Таке покриття відрізняється високою щільністю та дрібнозернистістю. У зв'язку з цим використання багатошарового покриття може бути ефективним і для поршневих кілець з сірого чавуну.

У другому розділі розглянуто методологію досліджень параметрів поверхневого зміцнення поршневих кілець нанесенням багатошарового наноструктурного покриття (рис. 1). В розділі також наведена характеристика використаного обладнання для реалізації технологічного процесу нанесення покриття і дослідження триботехнічних властивостей.

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 (рис. 2). 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 - решта. 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 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 – 140 нм, а CrN – 170 нм. Загальна товщина багатошарового покриття для всіх варіантів співвідношення досягала 1,7 мкм.

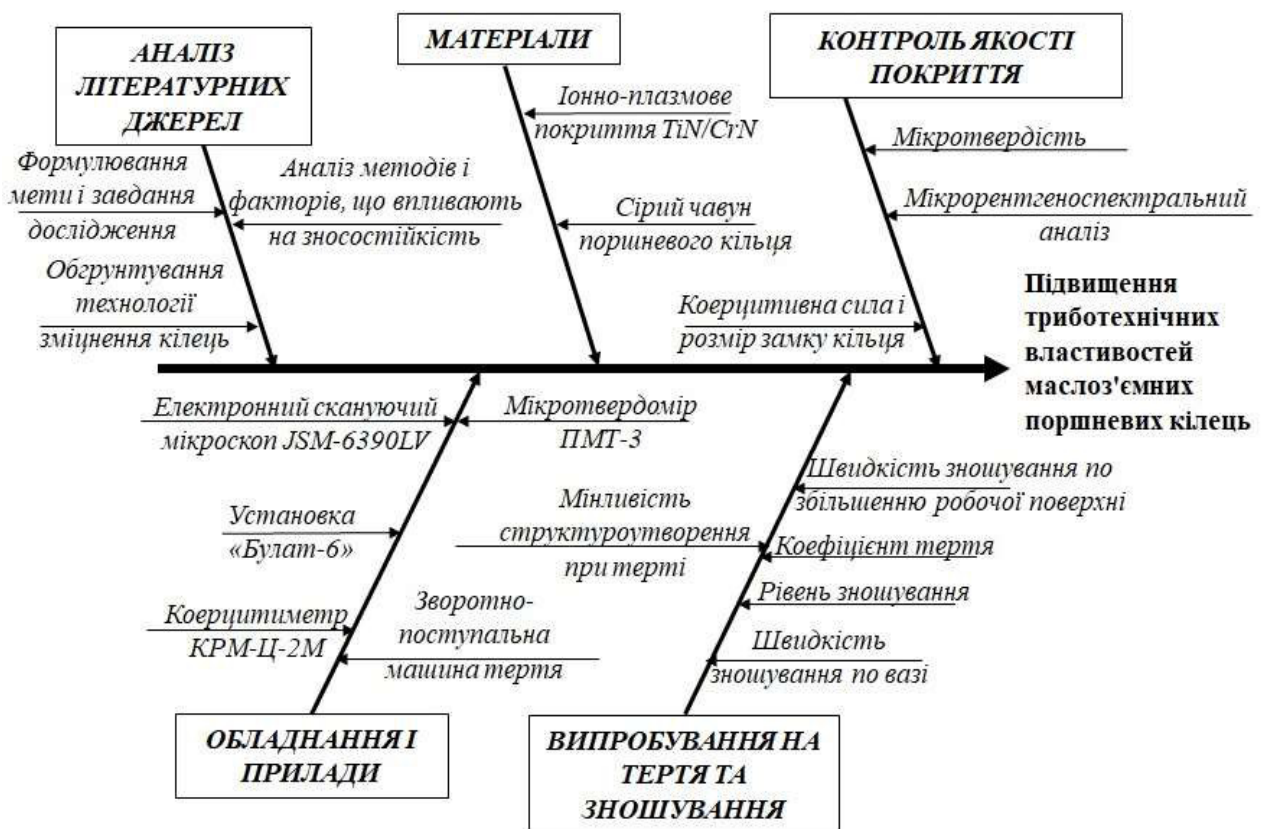


Рис. 1. Етапи досліджень в дисертаційній роботі та послідовність їх реалізації

Дослідження якості та властивостей проводили порівняльним аналізом вихідного і зміцненого станів. Оцінювали рівень мікротвердості і зміну структури металу. Рівень залишкових напружень після зміцнення виявляли шляхом порівняння з вихідним станом неруйнівним контролем за коерцитивною силою приладом КРМЦ-2М. На основі отриманих результатів розроблено технологію зняття залишкових напружень в умовах експлуатації.

Використані методи досліджень передбачали оцінку і обґрунтування запропонованого технологічного процесу зміцнення і оптимального співвідношення матеріалів багатошарового іонно-плазмового наноструктурного покриття за умови забезпечення високої зносостійкості. Оцінку показників зносостійкості проводили на основі стендових і виробничих випробувань. При цьому, трибологічні випробування були проведені при двох швидкостях ковзання: 1,0 і 1,3 м/с на машині тертя при зворотно-поступальному русі. Вони дають можливість оцінити рівень зношування і процесів структуроутворення поверхонь тертя при переході від пластичної деформації (при 1,0 м/с) до пружної (при 1,3 м/с), з урахуванням умов їх експлуатації. В окремі періоди випробувань оцінювали ступінь зміни мікротвердості поверхні тертя. При цьому проводили електронномікроскопічні дослідження і мікрорентгеноспектральний аналіз поверхні тертя та прилеглої до неї зони. Для виявлення змін, що відбуваються, використовували оптико-математичний опис робочої і прилеглої поверхонь.



Рис. 2. Загальний вигляд маслоз'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки

Оптико-математичним методом оцінювали зміну якості поверхні тертя в різних його зонах, що дозволило встановити мінливість стану трибосистеми. Удосконалена методика оптико-математичного аналізу полягала в оцінках масиву зображень поверхні тертя і прилеглої до неї похилої зони, що відносяться до певних інтервалів абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій, фізична сутність яких полягає в описі дифузійних потоків і щільності фрагментів зображення. При цьому аналізували найбільш зносостійкий варіант зміцнюючого покриття з оптимальним співвідношення Ti/Cr.

Третій розділ присвячений особливостям зношування серійних кілець та зміцнених при різних співвідношеннях Ti/Cr.

В розділі було оцінено вплив нової технології зміцнення поршневого кільця багатошаровим нанопокриттям на характер зносу в порівнянні з традиційно використовуваним при різних швидкостях ковзання 1,0 і 1,3 м/с. Перед і після нанесення багатошарового покриття TiN/CrN з різним співвідношенням Ti/Cr (0,17, 0,27 та 0,40) на поршневі кільця, визначали і фіксували показники коерцитивної сили, яка характеризує рівень напруженого стану. Вимірювання виявили, що при нанесенні зміцнюючого покриття змінюється не тільки рівень напружень, в середньому, до 3,1%, але і величина замку кільця – на 17,24 %, що не відповідає вимогам нормативно-технічної документації. Це справедливо для всіх співвідношень Ti/Cr. Для релаксації напружень та стабілізації стану поршневих кілець після зміцнення, використовували метод природнього старіння тривалістю 1,5 місяці, при якому будуть досягнуті параметри коерцитивної сили і розмір замку, що відповідають вихідному стану.

При швидкості ковзання 1,0 м/с, встановлено, що знос зміцнених поршневих кілець зі співвідношенням Ti/Cr=0,17 зменшується у 12,2 разів (рис. 3, а), а висота зон тертя нижча в 4 рази відносно серійного варіанту. Співвідношення Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40 забезпечують зниження зношування у 3,4 рази та на 47 % відносно серійного варіанту. При цьому, коефіцієнт тертя, при співвідношенні Ti/Cr=0,17, знижується у три рази.

При підвищенні швидкості ковзання до 1,3 м/с знос поршневих кілець обох варіантів супроводжується деяким схоплюванням з металом гільзи, що підтверджується незначним зростанням їх ваги на останніх етапах випробувань, як і при швидкості ковзання 1,0 м/с. Зміцнені поршневі кільця багатошаровим покриттям TiN/CrN зі співвідношенням Ti/Cr=0,17, так само відрізняються підвищенням зносостійкості – до 15,7 разів відносно серійних. При співвідношеннях Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40 сумарний знос таких варіантів зміцнення, відносно серійних кілець, знижується у 6 та 3 рази відповідно. При цьому коефіцієнт тертя, при співвідношенні Ti/Cr=0,17, знижується у три рази, а висота робочих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася у 4 рази в порівнянні зі зміцненими, що є результатом їх інтенсивної пластичної деформації.

Після випробувань зміцнених кілець при швидкості ковзання 1,3 м/с відношення Ti/Cr змінилося до 0,36 у порівнянні з вихідним співвідношенням (Ti/Cr=0,17), при пройденому шляху тертя 468 км. В таких умовах частка Ti в зоні тертя знизилася з 14,5% до 0,8%, а Cr – з 83,77% до 2,2%. В зоні тертя виявляються також окремі включення графіту в металі поршневого кільця. При випробуванні зі швидкістю ковзання 1,0 м/с зміцненого варіанту кільця частка відношення Ti/Cr змінилася в порівнянні з вихідним співвідношенням (Ti/Cr=0,17) до 0,28, при пройденому шляху тертя 360 км. Частка Ti в зоні тертя знизилася з 14,5% до 10,76 %, а Cr – з 83,77% до 39,08 %.

У процесі тертя мікротвердість на робочій поверхні серійних поршневих кілець зростає внаслідок зносу покриття оловом (рис. 4). Залежно від параметрів тертя вона, в середньому, при швидкості ковзання 1,0 м/с – підвищується в 10 разів, а при 1,3 м/с – в 13. При цьому, мікротвердість зміцнених кілець, в середньому, після 2-го етапу випробувань вище в 3-3,5 разів, після 3-го – на 16-40 % відносно серійних в залежності від швидкості ковзання.

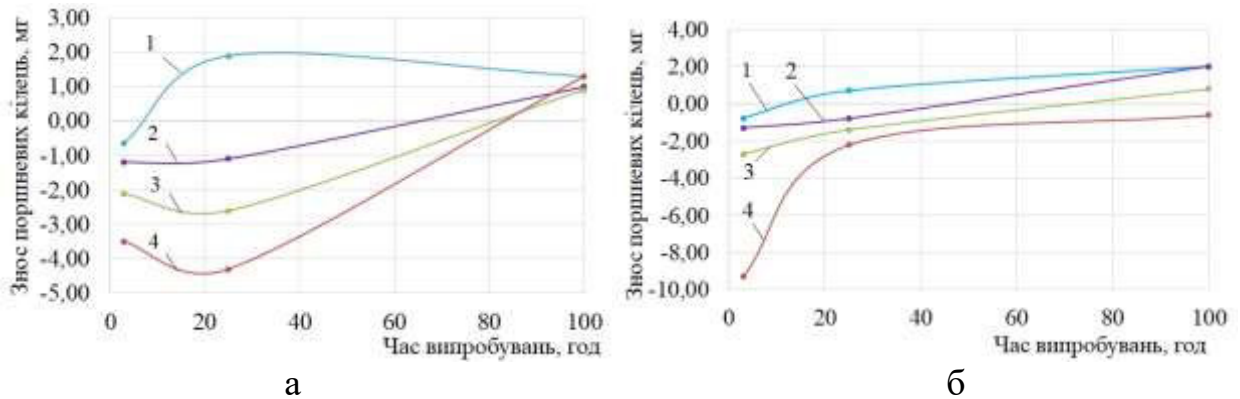


Рис. 3. Рівень зносу поршневих кілець з іонно-плазмовим покриттям з різним співвідношенням Ti/Cr (1 – Ti/Cr=0,17; 2 – Ti/Cr=0,27; 3 – Ti/Cr=0,40) та серійних (4) при швидкості ковзання 1,0 (а) та 1,3 м/с (б)

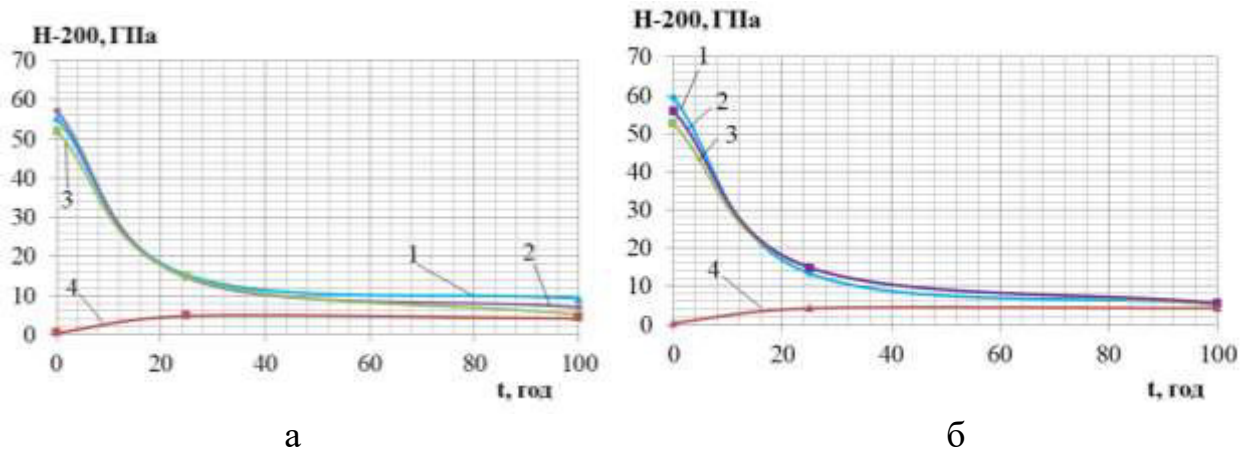


Рис. 4. Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям при різних співвідношеннях Ti/Cr (1 – Ti/Cr=0,17; 2 – Ti/Cr=0,27; 3 – Ti/Cr=0,40) та серійних (4) при швидкості ковзання 1,0 (а) та 1,3 м/с (б)

Випробування на знос поршневих кілець в спряженні з гільзою виявили, що використання для зміцнення багат шарове покриття TiN/CrN забезпечує не тільки підвищення зносостійкості, але і невелике зношування спряженої деталі. Так, підвищений знос характерний для гільз, що працюють у спряженні 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 в трибоспряженні з серійними кільцями. На другому етапі випробувань ваговий знос гільзи, яка працювала в трибоспряженні із зміцненими

поршневими кільцями (при $Ti/Cr=0,17$) знижується у 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 %.

У четвертому розділі виконано аналіз результатів випробувань поршневих кілець різної технології виготовлення, а також оцінено зміни на поверхні тертя, які визначаються швидкістю ковзання.

Аналізували вплив швидкості їх ковзання від 0,7 до 1,6 м/с на зношування, структуроутворення і розвиток дифузійних процесів.

Порівняльна оцінка вихідних і зміцнених поршневих кілець багат шаровим нанопокриттям TiN/CrN показала, що незалежно від швидкості ковзання виявляється багаторазове підвищення зносостійкості останніх. Особливий інтерес викликають швидкості ковзання в інтервалі 1,0 – 1,3 м/с, які супроводжуються дифузією компонентів і зношуванням в зоні тертя.

Порівняльними випробуваннями вихідних і зміцнених поршневих кілець виявлено, що в період до 72 год., незалежно від швидкості ковзання, відзначається локальне схоплювання в зонах поверхні тертя, що пов'язано зі зносом окремих ділянок зміцненого шару на поверхні тертя і характеризується збільшенням ваги кільця. Одночасно виявлено, збільшення висоти робочої поверхні серійних кілець, яка зростає на 20 %, а зміцнених – лише на 5%. Це є результатом збільшення опору пластичної деформації при зміцненні поверхні наноструктурним багат шаровим покриттям, що підвищує їх довговічність.

Локальним спектральним аналізом показано, що після випробувань на знос частка компонентів при швидкості ковзання 1,3 м/с в зміцненому багат шаровому покритті (при $Ti/Cr=0,17$) вміст Ti знижується з 14,5 до 0,8%, а Cr – з 83,77 до 2,20%. При швидкості ковзання 1,0 м/с частка Ti знижується з 14,5 до 10,76 %, а Cr – з 83,77 до 39,08 %. Одночасно на поверхні тертя виявлена і окисна плівка (вторинні захисні структури, які містять 0,13 – 0,91% O_2), що є результатом поганого очищення камери при нанесенні покриття. Така плівка використовується для зміцнення і формування з'єднань покриття.

Дослідженнями показано, що зносостійкість поршневих кілець з багат шаровим наноструктурним зміцненням в більшій ступені залежить від частки TiN , яка відрізняється підвищеною твердістю. Тому, для підвищення їх зносостійкості зі зміцненням багат шаровою композицією при певних умовах експлуатації слід регулювати частку TiN . Проблему можна вирішити двома шляхами: за рахунок зміни товщини більш твердого шару або збільшення кількості його шарів за умови забезпечення оптимального співвідношення $Ti/Cr=0,17$, яке, за результатами оцінки зносу, забезпечує високу зносостійкість порівняно з іншими варіантами співвідношень.

Випробуваннями зміцнених поршневих кілець при різних швидкостях ковзання (0,7 - 1,6 м/с) встановлено, що їх знос відбувається як за втратою

ваги, так і за збільшенням висоти робочої поверхні. Швидкість зношування зміцненого кільця максимальна при швидкості ковзання 1,3 м/с, яка знижується в 12 разів при пройденому шляху тертя близько 468 км, а висота робочої поверхні зберігається більш стабільною порівняно з серійним поршневым кільцем.

Оцінка ефективності використання нової технології зміцнення базується на випробуваннях поршневих кілець в умовах ДП «Завод імені В.О. Малишева». Встановлено, що поршневі кільця зі зміцненим наноструктурним багат шаровим покриттям забезпечує підвищення їх зносостійкості у 12 - 15 разів і одночасно знижує деформацію робочої поверхні в 4 рази при оптимальному співвідношенні фаз покриття $Ti/Cr=0,17$.

П'ятий розділ присвячений теоретичним дослідженням поверхні тертя поршневих кілець та змін її якості після зношування.

Теоретична оцінка структуроутворення 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. При цьому, було виконано оцінку покриття при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$, як найбільш зносостійкого. На його основі розроблена спеціальна комп'ютерна програма для оцінки показників відносної нейтральності абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій, що описують дифузійні потоки і зміни щільності фрагментів зображення зони, яка досліджується.

Характерні фотографії для заданих інтервалів оцінювання точок нейтральності абсолютної величини лапласіанів поверхні тертя і вихідних поверхонь (прилеглих до зони тертя) серійних і зміцнених поршневих кілець наведені на рис. 5 і 6.

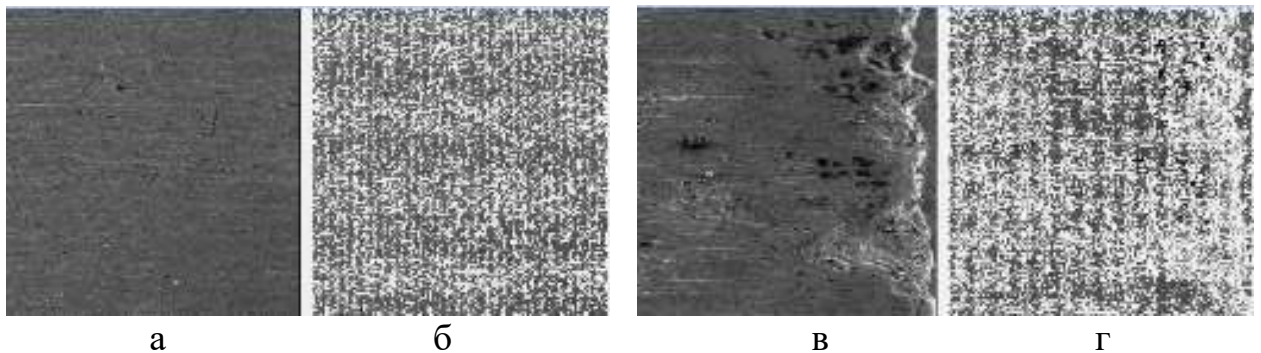


Рис. 5. Оцифровані зображення точок нейтральності абсолютної величини лапласіанів зон тертя, де: а – зона тертя серійного кільця, б – оцифроване зображення зони тертя серійного кільця, в – зона тертя зміцненого кільця, г – оцифроване зображення зони тертя зміцненого кільця

Порівняльні результати випробувань серійних і зміцнених поршневих кілець показали, що в зоні робочої поверхні і тій, яка прилягає до неї, формуються поперечні смуги (відносно напрямку руху спряженої деталі трибосистеми), які відповідають різним інтервалам зон стиснення і

розтягнення (скидання енергії). Зміцнені кільця в зоні тертя відрізняються щільністю поперечних смуг, розмір яких не перевищує 20 мкм, а поздовжні – не виявлені. При цьому температура поверхні тертя досягає 70 °С. Структуризація поверхні відзначається і в прилеглій зоні, що можна пояснити ефектом Сен-Венана (дією локальних деформацій на границі з поверхнею тертя). Період і ширина поперечних смуг поверхні тертя серійного кільця складає ~10 мкм. Одночасно виявлено поздовжні смуги, шириною і періодом розташування ~70 мкм на поверхні тертя серійного кільця. Такі смуги у зоні тертя серійного кільця є результатом підвищеної інтенсивності зношування і спрямованої структуризації робочої поверхні. Більш висока ширина і період чергування поперечних смуг на поверхні тертя зміцненого кільця свідчить про високий рівень опору зношуванню, порівняно з серійними поршневыми кільцями. Це підтверджують результати випробувань на тертя та зношування. Аналогічні смуги було виявлено розрахунком і точок нейтральності абсолютної величини дивергенції.

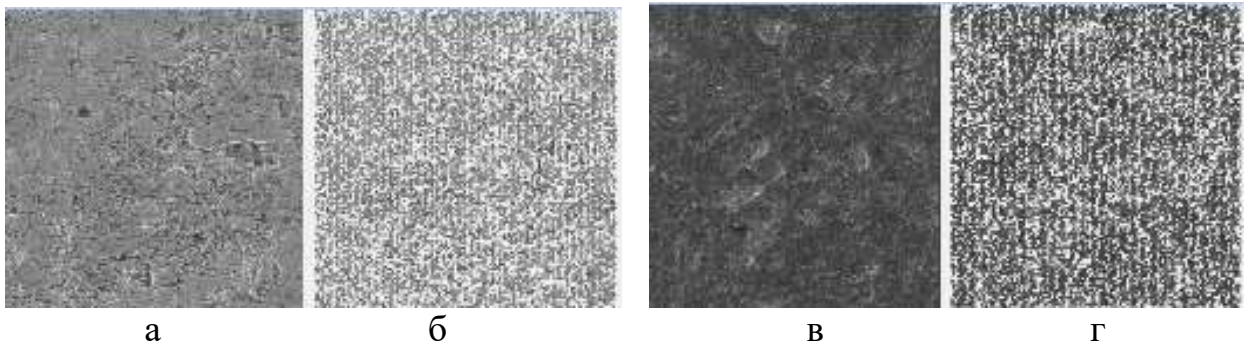


Рис. 6. Оцифровані зображення точок нейтральності абсолютної величини лапласіанів вихідних поверхонь, де: а – вихідна поверхня серійного кільця, б – оцифроване зображення вихідної поверхні серійного кільця, в – вихідна поверхня зміцненого кільця, г – оцифроване зображення вихідної поверхні зміцненого кільця

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 (рис. 7). 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 покриття Ti і Cr і це дає підставу припускати про можливість формування в зонах стиснення різних типів нітридів Cr_2N , CrN та TiN_{1-n} , TiN .

В зонах, прилеглих до поверхні тертя, також відзначається процес структуризації з досить близьким вмістом зміцнюючих фаз.

Для дослідження структури поверхні тертя та її мінливості розроблений спеціальний алгоритм програми для дослідження змін структури поверхні тертя та її мінливості. На кожній фотографії визначали значення періодів його пікселя по стовпцях і рядках (анізотропію). Згідно оцінки пробних періодів, цикл мінливості оцінювали в діапазоні від 2 до 200

пікселів. Визначали середні значення часток негативних, нульових і позитивних лапласіанів, згідно аналізованого періоду. Потім розраховували абсолютну величину відхилення від середнього значення. За результатами отриманого масиву показників їх сортували відносно зменшення значень. Це дозволило виявити найбільш істотні зміни.

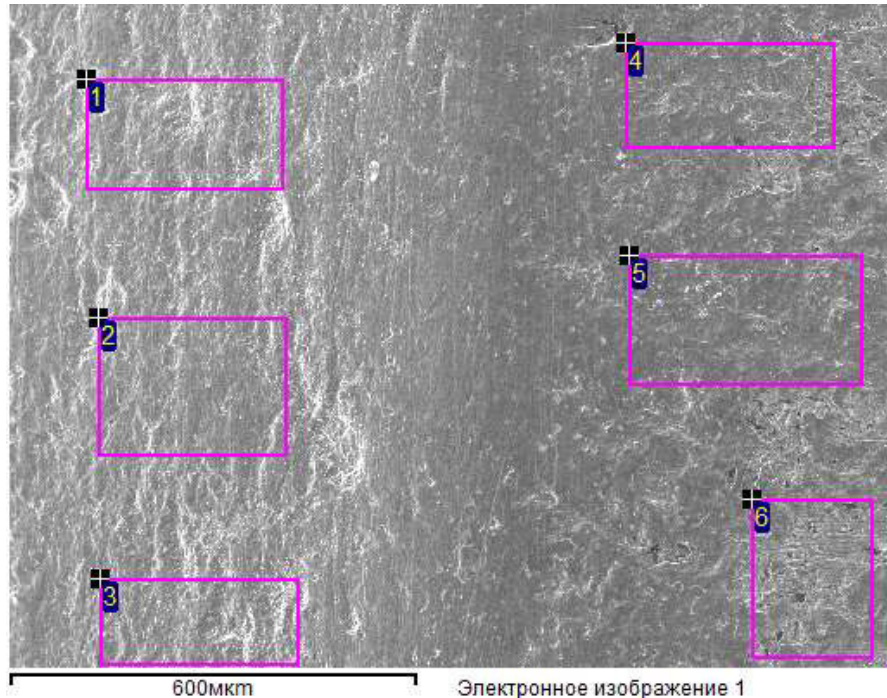


Рис. 7. Електронномікроскопічні зображення структури, що формується при терті і зони мікрорентгеноспектрального аналізу похилої поверхні (спектри 1, 2, 3) і прилеглої локальної зони тертя (спектри 4, 5, 6) зміцненого кільця

Розрахунками виявили відмінності в структуроутворенні у вихідного і зміцненого варіантах кілець, які порівнюються після випробувань на тертя. 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. Це може бути пов'язано з частковим зносом покриття при терті. Процеси розглянуті в розділі характеризують зміну зносостійкості внаслідок структуроутворення поршневих кілець при їх зміцненні наноструктурними покриттями.

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.

Виконані розробки були відзначені першим та другим місцями на Всеармійському конкурсі «Кращий винахід року 2019» та удостоєні почесною грамотою Академії наук України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі представлені нові експериментальні та теоретичні дослідження, які вирішують науково-практичне завдання з підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець двигунів спеціальної техніки. Новизна розробок полягає в управлінні та отриманні залежностей від різних співвідношень Ti/Cr багат шарового покриття TiN/CrN та експериментально обґрунтовано оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке забезпечує високі триботехнічні показники поршневих кілець виготовлених з сірого чавуну.

При виконанні роботи отримані наступні основні результати.

1. Аналізом літературних джерел встановлено умови роботи та механізми зношування поршневих кілець, виявлені різні методи підвищення експлуатаційної стійкості деталей. На основі одержаної інформації особливу увагу було приділено можливості використання для зміцнення поверхні тертя поршневого кільця багат шарове наноструктурне покриття TiN/CrN.

2. Для зміцнення робочої поверхні кільця було нанесено 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, що співвідношення фаз покриття Ti/Cr=0,17 забезпечує найвищу зносостійкість.

3. Вимірюваннями коерцитивної сили і розміру замку поршневого кільця встановлено, що при нанесенні зміцнюючого покриття змінюється як рівень напружень – до 3,1%, так і величина замку кільця – на 17,24 %. Використання природнього старіння забезпечує рівень коерцитивної сили і розмір замку кільця, які відповідають вихідному стану.

4. Встановлено що двигуни спеціальної техніки експлуатуються при низьких швидкостях ковзання поршневих кілець. У дослідженнях оцінювали вплив цього фактору в інтервалі від 0,7 до 1,6 м/с при стендових випробуваннях. Встановлено, що найбільші зміни відбуваються в інтервалі від 1,0 до 1,3 м/с. При цьому зносостійкість зміцнених кілець багат шаровим покриттям підвищується в 12 – 15 разів при використанні оптимального співвідношення Ti/Cr=0,17. Такі результати отримано при пройденому шляху тертя 360 та 468 км відповідно.

5. Показано, що рівень мікротвердості серійних кілець зростає внаслідок зносу покриття оловом, в середньому, в 10-13 разів і досягає рівня вихідного металу. Встановлено, що рівень мікротвердості зміцнених кілець впродовж випробувань залишається вищим порівняно із серійним варіантом – від 3,5 разів до 16 % в залежності від швидкості ковзання.

6. Локальним спектральним аналізом показано, що після випробувань на знос частка компонентів, при швидкості ковзання 1,3 м/с, в зміцненому багатошаровому покритті (при $Ti/Cr=0,17$) вміст Ti знижується з 14,5 до 0,8%, а Cr – з 83,77 до 2,20%. При швидкості ковзання 1,0 м/с частка Ti знижується з 14,5 до 10,76 %, а Cr – з 83,77 до 39,08 %.

7. Теоретично з використанням оптико-математичного методу виявлено різні параметри, які змінюють напруження та структуроутворення при терті та зношуванні. Це ступінь неоднорідності фазового складу, дифузію компонентів (щільності дислокацій). Встановлено, що на поверхнях тертя поршневих кілець, незалежно від їх зміцнення формуються дискретні смуги з різним періодом і шириною. На основі розрахунку нейтральності абсолютних величин лапласіанів (характеризує дифузію) та дивіргенції (описує щільність фрагменту зображення) виявлено відмінність у їх формуванні. У серійному варіанті формуються поперечні і продольні смуги відносно напрямку ковзання. У зміцнених кільцях проявляються лише поперечні смуги, які формуються більш широкими (~20 мкм проти ~10 мкм у серійному варіанті). Оптико-математичним описом таких структур показано, що смуги відповідають зонам стиснення, а між ними створюються зони розтягнення (скидання енергії).

8. Експлуатаційними випробуваннями на ДП "Завод імені В.О. Малишева" підтверджено результати стендових випробувань. Економічний ефект від впровадження такої технології зміцнення для одного двигуна складе 14220 грн.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сатановский Е.А., Олейник А.К., Мальцев Т.В. Особенности изнашивания маслосъемных поршневых колец с покрытием олова при стендовых испытаниях на трение и износ. *Физико-химическая механика материалов*. 2017. № 4. С. 71-77. (Scopus)
2. Мальцев Т.В. Комплексная оценка остаточных напряжений в поршневых кольцах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 10. С. 80-87.
3. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on The Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 2018. № 6 (118). P. 304-307. (Scopus)
4. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Maltsev T.V., Romanchenko V.N. Assessment of the Properties of Hardened by Nanocoating Oil Scraper Piston Rings by an Optic-Mathematical Method. *Problems of Tribology*. 2019. 92 (2). P. 20-24
5. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Гаркуша И.Е. Таран В.С., Муратов Р.М., Мальцев Т.В. Оптико-математический анализ моделирования структуризации упрочнённых поверхностей поршневых колец при

експлуатації. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2019. Том 41, Вып. 3. С. 349-362. (Scopus)

6. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Muratov R.M., Satanovskiy E.A., Oleynik O.K., Maltsev T.V., Romanchenko V.M., Martynenko O.D. Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Multilayer Nanohardening. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2019. т. 17, № 4. Р. 661–678. (Scopus)

У закордонних виданнях

7. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Мальцев Т.В., Таран А.В., Муратов Р.М. Ионно-плазменное упрочнение поршневых колец. *Сварочное производство*. 2019. № 9. С.46-53.

У інших виданнях

8. Мальцев Т.В. Методы повышения эксплуатационных свойств чугуновых поршневых колец и перспективы применения упрочняющих ионно-плазменных нанопокровитий и тонких пленок. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Харків, 2017. Вип. 183. С. 88-103.

9. Скобло Т.С., Мальцев Т.В., Таран А.В., Таран В.С., Муратов Р.М., Сатановський Є.А., Романченко В.М. Нова технологія зміцнення поршневих кілець багат шаровим наноструктурним покриттям. *Промисловість в фокусі*. 2020. № 8(91). С. 56-57.

Матеріали і тези конференцій

10. Maltsev T., Yemelyanova Ye.S. Complex improving performance of thin parts by using multilayer thin films and nanostructured coatings. *Young Researches in The Global World : Vistas and Challenges: Book of abstracts of II Forum for young Researches*. Kharkiv, 2016. P. 203-204

11. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сатановський Е.А., Мальцев Т.В. Метод оценки напряженно-деформированного состояния поршневых колец упрочненных ионно-плазменным покрытием. *Фізичні та комп'ютерні технології : Матеріали 22-ї міжнародної науково-практичної конференції*. Харків, 2016. С. 241-244

12. Maltsev T. Quality control method of piston rings that hardened by film coatings. *Welding and Related Technologies : Abstracts of IX International Conference of Young Scientists*. Kyiv, 2017. P. 236.

13. Skoblo T.S., Romanuk S.P., Maltsev T.V. Application of nanotechnology in mechanical engineering. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрям автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях : Матеріали II Міжнародна науково-практична конференція*. Суми, 2017. P. 62.

14. Скобло Т.С., Романюк С.П., Мальцев Т.В. Использование оптико-математического метода для оценки структурной неоднородности деталей. *Енергосбереження и ефективність в технічних системах : Матеріали*

IV Международной научно–технической конференция студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов (РФ), 2017. С. 429-430.

15. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E. Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on the Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *School on Plasma Physics and Controlled Fusion : Book of Abstracts of International Conference*. Kharkiv, 2018. P. 180.

16. Мальцев Т.В. Багатошарове іонно-плазмове нанозміцнення поршневих кілець. Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі : Матеріали XVII-го міжнародного форуму молоді. Харків, 2021. С. 136.

Патенти

17. Спосіб контролю якості поршневих кілець, зміцнених плівковими покриттями: пат 110145 Україна: МПК (2016.01), G01N27/00, G01N3/317. № у 2016 03524; заявл. 04.04.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. 18. 4 с.

18. Спосіб прогнозування довговічності ефективної товщини багатошарового зміцнюючого покриття поршневих кілець: пат. 117673 Україна: МПК (2017.01), F16J 9/00. № у 2016 11183; заявл. 07.11.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. 13. 4 с.

19. Спосіб підвищення експлуатаційної стійкості поршневих кілець, зміцнених багатошаровими нанопокриттями: пат. 120464 Україна: МПК (2017.01), C23C 4/10 (2016.01), G01N 3/56 (2006.01), B82Y 30/00. № у 2017 00018; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 4 с.

20. Спосіб прогнозування дифузії компонента основи поршневих кілець в іонно-плазмовому покритті при різних параметрах тертя: пат. 130854 Україна: МПК (2018.01), G01N 3/56 (2006.01), G01N 13/00, F16J 9/00. № у 2018 07425; заявл. 02.07.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Мальцев Т.В. Підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець багатошаровим зміцненням наноструктурним покриттям. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена вивченню впливу технології зміцнення маслороз'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки багатошаровими іонно-плазмовими наноструктурними покриттями TiN/CrN, а також вибору та аналізу оптимального співвідношення Ti/Cr. Виявлено зниження їх зношування при різних швидкостях ковзання. Виконано оцінку зміни їх мікротвердості до і після випробувань. Запропонований та використаний спосіб оцінки і контролю ступеня неоднорідності напружено-деформованого стану поршневих кілець до і після зміцнення іонно-

плазмовим покриттям. Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено характер зміни структури та їх складу при різних параметрах випробувань на поверхні тертя. Виконана оцінка залишкової товщини іонно-плазмового покриття після експлуатації кілець. Методом оптико-математичного аналізу виявлені особливості структуризації поверхні тертя.

Ключові слова: поршневі кільця, багатошарове іонно-плазмове нанопокриття, випробування на тертя та зношування, оптико-математичний аналіз, напружений стан, дифузійні процеси, структуризація поверхонь, мікротвердість, мікрорентгеноспектральний аналіз

АННОТАЦІЯ

Мальцев Т.В. Повышение триботехнических свойств поршневых колец многослойным упрочнением наноструктурным покрытием. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена изучению влияния технологии упрочнения маслосъемных поршневых колец двигателей специальной техники многослойным ионно-плазменным наноструктурными покрытиями TiN/CrN, а также выбору и анализу оптимального соотношения Ti/Cr с точки зрения обеспечения высокой износостойкости. Покрытие наносили при следующих соотношениях Ti/Cr: Ti/Cr = 0,17, Ti/Cr = 0,27 и Ti/Cr = 0,40. Выявлено снижение скорости их износа при различных скоростях скольжения, которые способствуют максимальным изменениям. Испытаниями установлено, что поршневые кольца с упрочняющим наноструктурным многослойным покрытием при оптимальном соотношении Ti/Cr=0,17 обеспечивает повышение их износостойкости в 12 - 15 раз и одновременно снижает деформацию рабочей поверхности в 4 раза. Выполнена оценка изменения их микротвердости до и после испытаний. Предложен и использован способ оценки и контроля степени неоднородности напряженно-деформированного состояния поршневых колец до и после упрочнения ионно-плазменным покрытием. Разработано технологию снятия напряжений перед использованием поршневых колец в эксплуатации после упрочнения. Метод заключался в использовании естественного старения деталей после упрочнения, при котором будут достигнуты необходимые параметры коэрцитивной силы и размеры замка, которые соответствуют исходному состоянию. Локальным микрорентгеноспектральным анализом выявлен характер изменения структуры и состава при различных параметрах испытаний на поверхности трения. Так, при скорости скольжения 1,3 м/с соотношение Ti/Cr, по сравнению с исходным (Ti/Cr=0,17), повысилось до 0,36 при пройденном пути трения 468 км. При этом, доля Ti на дорожке трения снизилась с 14,5% до 0,8%, а Cr – с 83,77% до 2,2%. После эксплуатации при скорости скольжения 1,0 м/с соотношение Ti/Cr составило

– 0,28. При этом доля Ti снизилась до 10,76%, а Cr – до 39,08%. Использован метод оценки остаточной толщины ионно-плазменного покрытия после эксплуатации колец на основе результатов оценки изменения химического состава на поверхности трения. Для детального анализа процессов, происходящих на поверхности трения использовали усовершенствованную методику оптико-математического описания структурообразования с одновременным определением химического состава в различных зонах трения. Это позволило установить изменчивость состояния трибосистемы.

Ключевые слова: поршневые кольца, многослойное ионно-плазменное нанопокрывтие, испытания на трение и износ, оптико-математический анализ, напряженное состояние, диффузионные процессы, структуризация поверхностей, микротвердость, микрорентгеноспектральный анализ

ABSTRACT

Maltsev T.V. Improving the tribotechnical properties of piston rings by multilayer hardening with a nanostructured coating. – Manuscript.

The dissertation for the degree of a candidate of technical science by specialty 05.02.04 – friction and wear in machines. – Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to studying the influence of the hardening technology of oil scraper piston rings of special engines with multilayer ion-plasma nanostructured TiN/CrN coatings, also to choice and analysis of Ti/Cr optimal ratio. A decrease in the rate of their wear at various sliding speeds, which contribute to maximum changes, was revealed. An assessment of the change in their microhardness before and after the tests was performed. A method for assessing and controlling the degree of heterogeneity of the stress-strain state of piston rings before and after hardening by an ion-plasma coating is proposed and used. A local X-ray microspectral analysis revealed the nature of changes in structure and composition at various test parameters on the friction surface. Estimating the residual thickness of an ion-plasma coating after operating rings is performed. By the method of optical-mathematical analysis, the features of structuring the friction surface are described.

Keywords: piston rings, multilayer ion-plasma nanocoating, friction and wear tests, optical-mathematical analysis, stress state, diffusion processes, surface structuring, microhardness, micro X-ray spectral analysis