

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Маннапова Оксана Володимирівна

УДК 621.891

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРИБОСПОЛУЧЕННЯ
«ЦИЛІНДР-КІЛЬЦЕ-ПОРШЕНЬ» ФОРСОВАНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИМИ
МЕТОДАМИ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2009

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі фізики і матеріалознавства Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Соколов Олександр Дмитрович,

Одеська національна академія харчових технологій, професор кафедри фізики і матеріалознавства

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, лауреат держаної премії України в галузі науки і техніки

Ляшенко Борис Артемович,

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ, завідувач лабораторії зміцнення поверхні елементів конструкцій

кандидат фізико-математичних наук, с.н.с.

Міщук Олег Олександрович,

Укр НДІ НПП "МАСМА", м. Київ, провідний науковий співробітник

Захист відбудеться «18» червня 2009 року о «15» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.062.06 при Національному авіаційному університеті за адресою: *03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 1, ауд. 1-002.*

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету (*03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 8*).

Автореферат розісланий «15» травня 2009 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук

О.Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема підвищення надійності вузлів тертя машин завжди приділяється належна увага. Це пояснюється не тільки необхідністю вирішення перспективних питань, пов'язаних з розвитком нової техніки, але й актуальністю завдань, що нагромадилися тепер, з модернізації, ремонту і продовженню працездатного стану застарілих або таких, що відмовили з різних причин і особливо через знос, виробів машинобудування. Серед цих виробів важливе місце посідають поршневі двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), які на сьогодні є основою мобільної енергетики всіх галузей господарства, тому питанню підвищення працездатності, надійності і довговічності ДВЗ, а особливо їх головного, найбільш напруженого органу – циліндро-поршневої групи (ЦПГ), приділяється велика увага. Довговічність ЦПГ забезпечується гальванічним хромовим покриттям на робочій поверхні поршневих кілець, але дотепер не вирішено завдання із забезпечення надійності покриттів і не проаналізовано дані про вплив експлуатаційних чинників на довговічність покриття.

Невпинне форсування двигунів щодо потужності, яке почалося в останні двадцять років, і застосування важких сірчаних палив призводять до руйнації серійних хромових покриттів і підвищення рівня зношування трибосполучення «циліндр – робоча і торцеві поверхні кільця – канавка поршня», що перешкоджає збільшенню довговічності ЦПГ. На жаль, вітчизняне двигунобудування за цими показниками відстає від розвинених країн. Тому дослідження з розробки технологій зміцнення поршневих кілець, здатних забезпечити ресурс форсованих ДВЗ, є актуальними і становлять теоретичний і практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано відповідно до плану держбюджетної науково-дослідної роботи ОНАХТ, державний реєстраційний № 01070011649, шифр 01/07–ФіМ “Дослідження впливу матеріалів поверхонь тертя, технології їх зміцнювальної обробки і трибологічних характеристик на надійність і довговічність деталей і вузлів машин”.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення зносостійкості трибосполучення циліндр-кільце-поршень форсованих двигунів електрофізичними методами зміцнення поверхонь тертя шляхом установації закономірностей впливу структурно-фазового складу, напруженого стану та термостійкості зміцнених шарів на їх триботехнічні характеристики.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **завдання**:

- установити причини випадків катастрофічного зношування поршневих кілець у термонапружених форсованих двигунах;
- дослідити напружений стан і термостійкість серійних гальванічних хромових покриттів і ступінь їх впливу на процеси тертя та зношування;
- установити взаємозв'язок структури, фізико-механічних властивостей і напруженого стану із зносостійкістю плазмових покриттів;

– розробити технології напилення плазмових покриттів і фінішного зміцнення поверхні поршневих кілець іонним бомбардуванням і лазерним опроміненням та встановити закономірності їх впливу на структурно-фазовий склад поверхонь тертя;

– узагальнити результати досліджень та розробити практичні рекомендації щодо формування зносостійких поверхневих шарів поршневих кілець ЦПГ форсованих двигунів електрофізичними методами.

Об’єкт дослідження: процеси формування зносостійких плазмових покриттів та фінішної іонної і лазерної обробки.

Предмет дослідження: вплив структури, напруженого стану та фізико-механічних властивостей зміцнених шарів на формування триботехнічних характеристик трибосполучення циліндр-кільце-поршень форсованих двигунів.

Методи дослідження: металографічний; електронно-мікроскопічний; рентгеноструктурний; мікрорентгеноспектральний; електроннографічний; фотоколориметричний і потенціодинамічний; дослідження модуля пружності по периметру кільця; дослідження на машині тертя і на випробувальному стенді з двигуном.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

– встановлено причини випадків катастрофічного зношування поршневих кілець в умовах підвищених температур і тисків форсованих двигунів – високий рівень напружень у хромових покриттях, який зумовлює зміну механізму тертя на фрагментарне викришування, низька здатність акумулювати мастило та низька термостійкість. Альтернативою можуть стати газотермічні покриття, які вільні від цих недоліків, але потребують оптимізації триботехнічних властивостей при терті кільця по гільзі циліндра і канавці поршня;

– уперше вивчено вплив покриттів на епюру радіальних тисків кільця і розроблено спосіб урахування цього впливу додатковою корекцією епюри при розрахунку заготовки поршневого кільця з плазмовим покриттям (пат. № 37750);

– уперше проведено оптимізацію складу металевих плазмових покриттів за твердістю та когезійною міцністю. Це дозволило вибрати покриття складу Fe + 25 % Ni + 40...50 % Cr, що дає змогу отримати рівень зносостійкості, вищий за рівень гальванічного хрому як при механічному, так і при абразивному зношуванні за умов неперевершеності рівня зносу гільзи циліндра;

– встановлено оптимальні щодо зносостійкості будову та склад плазмовонапиленних металооксидних покриттів. Вивчено та аналітично обґрунтовано з позиції напруженого стану покриття параметри застосування підшару і дисперсного армування металевих покриттів частинками оксиду алюмінію. Це покриття складу Mo + 10...30 % Al₂O₃, які за своїми триботехнічними властивостями перевищують гальванічний хром в умовах термосилового навантаження;

– уперше обґрунтовано комплексне підвищення триботехнічних властивостей поверхонь вузла тертя «циліндр-кільце-поршень». Показано, що фінішна обробка готового поршневого кільця з плазмовим покриттям на робочій поверхні іонним азотуванням або лазерним опроміненням дозволяє довести довговічність і надійність ЦПГ форсованих двигунів до заданого рівня.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено технологію поверхневого зміцнення верхніх компресійних поршневих кілець форсованих двигунів на основі напилення плазмового покриття (пат. № 37750) на робочу поверхню кільця та іонного азотування повністю готового кільця для надання зносостійкості та корозійної стійкості як торцевим поверхням кільця, так і плазмовому покриттю на робочій поверхні. Цю технологію впроваджено у виробництво поршневих кілець на підприємстві НВП “Проммаштранс” (м. Одеса).

Розроблено технології підвищення зносостійкості та корозійної стійкості поверхонь серійних поршневих кілець ДВЗ лазерним опроміненням і електрофізичним оксидуванням, які прийняті для подальшого впровадження. Результати роботи використовуються у навчальному процесі під час викладання курсу “Триботехніка” в Одеській національній академії харчових технологій.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати отримано здобувачем особисто чи за його особистої участі. Здобувач брав безпосередню участь у підготовці та проведенні експериментів, аналізі та обговоренні отриманих результатів, написанні статей і звітів. У працях, виконаних із співавторами, особистий внесок здобувача полягає у виконанні теоретичних та експериментальних досліджень, обробленні результатів та формуванні висновків. Підготовка зразків для досліджень, виготовлення дослідних кілець та проведення стендових випробувань на двигунах проведено сумісно із Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАНУ і Науково-виробничим підприємством “Проммаштранс”.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах та науково-технічних конференціях: 66-й, 67-й і 68-й наукових конференціях ОНАХТ (Одеса, 2006, 2007, 2008 рр.); 26-й, 27-й і 28-й щорічних науково-практичних міжнародних конференціях “Композиційні матеріали у промисловості – СЛАВПОЛІКОМ” (Ялта, 2006, 2007, 2008 рр.); II Міжнародній науково-практичній конференції “Харчові технології-2006” (Одеса, 2006 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції “Хлібопродукти-2006” (Одеса, 2006 р.); 7-й і 8-й щорічних міжнародних промислових конференціях “Ефективність реалізації наукового, ресурсного, промислового потенціалу в сучасних умовах” (Славське, Карпати, 2007, 2008 рр.); II Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні наукові досягнення – 2007” (Дніпропетровськ, 2007 р.); International Conference on the Physics and Technology of Thin Films ICPTTF-XI (Івано-Франківськ, 2007 р.); П’ятнадцятій ювілейній міжнародній конференції “Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики” (Ялта, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми машинознавства” (Київ, 2008 р.); робота в цілому доповідалась на науковому семінарі зі спеціальності в НАУ.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 26 праць, з яких 17 статей у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України, 7 публікацій за матеріалами доповідей на науково-технічних конференціях, 1 патент України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 278 найменувань і 2 додатків. Роботу викладено на 173 сторінках, 140 сторінок основного тексту, вона містить 62 рисунки та 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок роботи з науковими планами і темами, сформульовано мету дослідження, визначено завдання та способи їх розв'язання, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі на підставі аналізу літературних джерел виділено: сучасні тенденції досліджень механізмів тертя і зношування в умовах високих контактних навантажень; статистичні дані про зношування сполучень «поршень-кільце-циліндр»; результати досліджень з виявлення основних чинників зношування; аналіз впливу форсування ДВЗ на зношування деталей ЦПГ, а також аналіз сучасного стану технологій поверхневого зміцнення.

Основні вагомні фактори зносу ЦПГ у ДВЗ сухопутного призначення: абразивне (50...60 %); механічне (до 15 %); механохімічне під час запуску (10...20 %) та у процесі роботи (до 5 %) зношування. Форсування ДВЗ проводять підвищенням середнього ефективного тиску і частоти обертання колінчастого вала. Це приводить до підвищення температури верхнього кільця (зі 150...200 до 250...300 °С), та його мастильного голодування і зростання швидкості його зносу (з 15...20 до 40...50 мкм/тис. мотогодин), підвищення зносу кільця по торцях, канавки поршня і гільзи циліндра, а також до випадків руйнування хромових покриттів.

Показано, що для підвищення триботехнічних характеристик сполучення «циліндр-кільце-поршень» перспективним є створення комплексної технології поверхневого зміцнення поршневих кілець – нанесенням зносостійких, термостійких і мастилоємних плазмових покриттів і фінішним поверхневим зміцненням всіх поверхонь тертя готового кільця іонним азотуванням або лазерним опроміненням. Визначено мету та завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалів, описано експериментальні установки, зразки та методики досліджень, розроблено методику врахування впливу процесів поверхневого зміцнення на експлуатаційні характеристики і епюру радіальних тисків поршневих кілець.

Досліджували гальванічні хромові і плазмовонапилені металеві (Fe-Ni-Cr, Mo) і металооксидні (Mo-Al₂O₃) покриття, нанесені установкою УМП5-68 в азотній плазмі. Міцність зчеплення визначали штифтовим методом. Зміцнення покриттів і матеріалу кілець (чавуну і сталі) іонним азотуванням і ок-

сидуванням проводили на вакуумній установці у плазмі тліючого розряду, лазерним опроміненням – на безперервному CO₂-лазері “Спектрофізик”.

Дослідження зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя ковзання проводили на машині тертя СМЦ-2 у парі з чавуном гільзи циліндра і силуміном поршня за швидкостей ковзання 0,47...4,16 м/с, шляху тертя – 51 км і навантажень 0,5...4,0 МПа. Контролювали масове та лінійне зношення зразка і контртіла, коефіцієнт тертя і температуру контртіла під поверхнею тертя.

Мікроструктуру досліджували за допомогою мікроскопа МІМ-7А, мікротвердість – приладу ПМТ-3, поверхню тертя – оптичного і електронного мікроскопів, рентгеноструктурний аналіз – приладів УРС-0,02 і ДРОН-3, мікрорентгеноспектральний – приладу GXR-5 фірми “Джеол”. Зміну товщини поверхневих плівок після іонної обробки фіксували гоніометром за оптичним поляризаційним методом, фазовий склад зміцнених поверхонь тертя визначали електроннографом ЕГ-100М. Корозійні дослідження проводили за допомогою потенціостата П-5827М і приладу Р5035. Дослідження впливу процесів на кільце проводили на епюромірі для визначення модуля пружності по периметру поршне-вих кілець.

У третьому розділі досліджено вплив термосилових навантажень на процеси тертя і зношування гальванічних хромових покриттів. Підтверджено, що кільце і циліндр зношуються на такті спалаху-розширення поблизу верхньої «мертвої» точки, коли товщина мастильної плівки стає меншою від мікрошорсткості поверхонь і тертя стає напівсухим. Шлях зносу збільшується з підвищенням температури і тиску при форсуванні. Показано, що швидкість зношування хрому у термонапруженій (4Ч11/12,5Т) модифікації двигуна збільшується вдвічі (з 25 до 50 мкм/тис. мотогодин) порівняно з нетермонапруженою (4Ч11/12,5). Виявлено, що поверхня зносу хрому на кільцях термонапруженого двигуна покрита мікротріщинами і деколи має сліди припалювання з макротріщинами, поперечними до напрямку руху кільця (рис. 1).

Рис. 1. Вигляд поверхні тертя хромового покриття після роботи у двигуні 4Ч11/12,5Т: *а* – мікророзтріскування хрому, Ч7000; *б* – зона припалювання хрому, Ч50

Під час визначення зносостійкості хромових покриттів на машині тертя було зафіксовано точки зламу на кривих залежності інтенсивності зношування від питомого навантаження (рис. 2), після яких знос різко зростає. Зі збільшенням швидкості ковзання, що супроводжувалося підвищенням температури зразка, точки зламу зсувалися в бік менших тисків. При навантаженнях до точок зламу поверхня тертя хрому відповідала нормальному механічному зношуванню, після точок зламу спостерігалось утворення мікротріщин (рис. 1, *а*).

Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування хромового покриття від питомого навантаження тертя. Швидкість ковзання: 1 – 4,16 м/с; 2 – 2,13 м/с; 3 – 0,47 м/с. Машина тертя СМЦ-2; контртіло – колодка з матеріалу гільзи циліндра; граничне змащування

Рис. 3. Результати фрактографічного аналізу зношування хромових покриттів: 1 – функція розподілу за розмірами частинок зносу хрому, виділених з мастила після випробування; 2 – функція розподілу за розмірами лунок викришування на поверхні тертя хромового покриття кілець термонапруженого двигуна в околі щоки кільця і замка (3)

Для виявлення розмірів частинок зносу хромового покриття був проведений фрактографічний аналіз частинок хрому, виділених з мастила після випробувань на машині тертя. Результати, отримані для умов зношування за швидкості 4,16 м/с і тиску 1,75 МПа, показано на рис. 3 (крива 1). Установлено спектр частинок зносу хрому від 2 до 15 мкм з кількісним максимумом у діапазоні 6...8 мкм. Оскільки виявити такі частинки зносу хрому у двигуні важко, було вивчено під мікроскопом поверхню хромових покриттів на кільцях після роботи у термонапружених двигунах. Вимірювання розмірів лунок викришування і фрактографічний аналіз дозволили побудувати функцію їх розподілу. На рис. 3 показано вигляд функції для зони щоки кільця, де відносний тиск кільця на циліндр мінімальний ($P_{ш}/P_0 = 0,5$) – крива 2, і зони замка кільця, де тиск максимальний ($P_{ш}/P_0 = 1,5$) – крива 3. Результати підтверджують, що найбільш вірогідні розміри часток зносу мають визначений інтервал і підвищення тиску призводить до утворення частинок більших розмірів.

Методами електронографічного та мікрорентгеноспектрального аналізу було досліджено структуру хромового покриття на поршневих кільцях після роботи у нефорсованому і форсованому двигунах. Установлено, що у нефорсованих двигунах поверхня хрому активується і на ній утворюється тонкий прошарок (до 1000 Е) аморфного хрому. Під ним розміщено прошарок хрому з дезорієнтованою структурою, а нижче – полікристалічний хром. Слідів руйнування і захоплення не виявлено. Після роботи у форсованому двигуні поверхня хрому має мікротріщини, а електронографічним аналізом установлено утворення у прошарку хрому з дезорієнтованою структурою нових фаз вторинних структур тертя – карбиду хрому Cr_7C_3 і оксиду хрому Cr_2O_3 . Більш інтенсивні деформаційні і термічні процеси під час тертя верхніх кілець біля камери згоряння із середовищем вуглецю та кисню активізують дифузію їх атомів через аморфний прошарок у прошарок дезорієнтованого хрому і утворення в ньому вторинних структур.

Відмінність параметрів ґраток карбідів і оксидів від таких для хрому спричиняє виникнення внутрішніх напружень на межі поділу фаз та появу мікротріщин. Їх поширення перпендикулярно до поверхні тертя призводить до розірвання метастабільного аморфного прошарку і утворення ізольованих фрагментів на поверхні тертя (рис. 1, а). Одночасне поширення мікротріщин паралельно поверхні тер-

тя спричиняє викришування таких фрагментів поверхні від полікристалічного хрому і їх видалення у процесі тертя, що й зумовлює вдвічі більшу швидкість зношування хрому у форсованих двигунах.

Моделювання припалювання хромового покриття на машині тертя показало, що мікротвердість хрому зменшується з 10,5 ГПа на глибині 80 мкм до 6,5 ГПа на поверхні тертя (на кільці у двигуні – з 10,5 на глибині 140 мкм до 4,5 на поверхні), що дозволило таким чином пояснити роль недостатньої термостійкості хрому у високій інтенсивності зношування покриття. В момент спалаху мастильна плівка миттєво випаровується, покриття опиняється в умовах тертя без змащення за високої температури, внаслідок чого хром розтріскується і знижується його твердість. Вихід кільця з цієї зони відновлює режим змащування, проте низька твердість хрому зумовлює високу інтенсивність його зношування.

Проведені дослідження дозволили визначити причини зниження зносостійкості деталей ЦПГ при форсуванні двигунів: силові і дифузійні навантаження спричиняють високий рівень напружень у хромових покриттях, які перевершують межу міцності хрому і зумовлюють зміну механізму тертя на фрагментарне викришування; низька здатність хрому акумулювати мастило і високі термічні навантаження перевершують термостійкість хромового покриття і знижують його твердість. Альтернативою хромовим покриттям у форсованих двигунах можуть стати пористі мастилоємні плазмові покриття, вільні від цих недоліків.

У четвертому розділі наведено результати досліджень за розробкою технологій плазмового напилення покриттів на робочу поверхню і електрофізичного зміцнення торцевих поверхонь поршневих кілець форсованих двигунів, а також порівнянню їх властивості із серійними кільцями.

Дослідженню підлягали металеві покриття Mo і Fe–Ni–Cr, мікроструктуру яких показано на рис. 4, і металооксидні покриття складу Mo–Al₂O₃. Числовим методом були розв’язані задачі за визначенням поля напружень у плазмовому молібденовому покритті із застосуванням підшару і дисперсним зміцненням твердими зносостійкими частинками. За результатами розрахунків нанесення підшару заліза товщиною 50 мкм забезпечує надійність зчеплення молібденового покриття з чавуном поршневого кільця, а використання частинок оксиду алюмінію розміром 10...25 мкм у молібденовому покритті із вмістом 20...30 % надає такому покриттю більшої зносостійкості.

Рис. 4. Мікроструктура плазмових покриттів із порошоків молібдену (а)
і залізо-хром-нікель (б) на чавуні поршневих кілець

Для зміцнення торцевих поверхонь кільця і надання їм захисних властивостей в умовах механохімічного зношування у вузлі тертя “кільце – канавка поршня” було досліджено процес іонного азотування чавунних кілець у тліючому розряді в азоті. Оптимальні за властивостями кільця параметри процесу: напруга – 800 В; густина струму – 6 мА/см²; тиск – 0,9...1 КПа; час – 1,5...3 год.). Структура зміцненого шару: від поверхні розміщується шар нітридів заліза Fe₄N товщиною 2...8 мкм, під ним –

зона твердого розчину азоту в залізі товщиною 200 мкм за 1,5 год. азотування з мікротвердістю від 6,2 ГПа на поверхні до рівня чавуну – 3 ГПа на глибині 200 мкм. Корозійно-електрохімічні дослідження свідчать, що іонне азотування чавуну зменшує швидкість його корозії у 7 разів.

Такі ж дослідження були проведені і для підвищення захисних властивостей сталевих поршневих кілець оксидуванням у тліючому розряді в залишковій атмосфері повітря. За оптимальних параметрів тліючого розряду на поверхні формується безкольорова захисна плівка оксиду $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ товщиною 11...12 нм, яка захищає сталеву поверхню краще ніж оксид, отриманий термічним методом, і дозволяє вирішити проблему міжопераційного зберігання поршневих кілець.

Дослідження лазерного опромінення поверхонь чавунних поршневих кілець та молібденового покриття проводили на безперервному CO_2 -лазері. За потужності опромінення 1 кВт на діаметр плями 3 мм та швидкості руху поверхні під опроміненням 12 см/с отримували зону зміцнення без ознак оплавлення глибиною до 0,3 мм з мікротвердістю 7...8 ГПа і нижче від неї – зону термічного впливу від 0,3 до 0,7 мм з відповідним монотонним падінням мікротвердості від 7 до 3 ГПа. В зоні опромінювання сталося розчинення графіту, збільшився вміст кремнію, $\gamma\text{-Fe}$, Fe_3C і сформувалася структура “квазіевтектики-ледебуриту”. Опромінення лазером молібденових покриттів показало при незмінності їх структури збільшення вмісту кисню з 2 до 5 % за рахунок утворення оксидів Mo_2O_3 і MoO_3 , які підвищують твердість покриття з 4,5 до 7,0 ГПа, і зменшення відкритої пористості покриття з 10...11 % до 6...6,5 %, причому кількість шпар розміром 0,1...2,0 мкм зменшилася вдвічі, а шпар розміром 2,0...10 мкм, яких було близько 0,5 %, після опромінення не виявлено.

Таким чином, у роботі розроблено технології триботехнічного зміцнення поверхні поршневих кілець для форсованих двигунів: технологію плазмового напилення зносостійких покриттів на робочу поверхню кільця і фінішні технології зміцнення всіх поверхонь кільця іонним бомбардуванням і лазерним опромінюванням. Розроблені технології дозволяють впровадження їх у виробництво без погіршення закріплених документацією експлуатаційних властивостей кілець.

У п'ятому розділі досліджено триботехнічні властивості покриттів та зміцненої поверхні поршневих кілець для форсованих двигунів і проведено техніко-економічну оцінку способів триботехнічного зміцнення поршневих кілець в умовах діючого серійного виробництва.

На основі структурно-енергетичної теорії зношування об'ємний знос покриття кільця визначено як $V = k / P_{cx}^n$, де P_{cx} – зусилля схоплювання покриття, і показано, що знос зумовлений трьома процесами: зануренням у покриття твердих абразивних частинок, дряпанням покриття наростами гільзи циліндра та схоплюванням покриття з поверхнею гільзи циліндра з глибинним вириванням частинок покриття. У дослідженнях визначали показник степеня n , який за рівноважним перебігом усіх трьох процесів дорівнює 5,5. Результати порівняльних досліджень з визначення зусилля схоплювання, коефіцієнта тертя та температури схоплювання покриттів поршневих кілець, проведених на машині тертя СМЦ-2 при швидкості ковзання 1,3 м/с, показано на рис 5.

Рис. 5. Схоплювання покриттів поршневих кілець із сірим чавуном гільзи циліндра при припиненні подачі мастила у зону тертя:

a – гальванічне хромове покриття;

б – плазмове молібденове покриття; *1* – температура; *2* – коефіцієнт тертя

Результати досліджень показали, що плазмові покриття, напілені з металевих порошоків, мають близькі значення поруватості (11...14 % проти 1 % для хрому), мастилоємності (0,11...0,14 г/см³ проти майже нульової для хрому), кута змочування поверхні моторним мастилом (28,5°...29,5° проти 49,8° для хрому) і тиску схоплювання (4,1...4,5 проти 3 МПа для хрому). Максимальне зусилля схоплювання плазмових покриттів, властиве молібденовому покриттю, у 1,5 раз перевищує P_{cx} гальванічного хрому, але підвищення зносостійкості порівняно з гальванічним хромовим покриттям відповідає $P_{cx}^{0,5...1,0}$. Це свідчить про перевагу процесу зношування незакріпленими твердими частинками.

Оскільки такі частинки на машині тертя утворюються тільки з продуктів зношування покриття, були проведені дослідження впливу на зношування твердості і структурного складу покриттів, а також дослідження з моделювання абразивного зношування з уведенням незакріплених твердих частинок у зону тертя, що проводилися у стендових випробуваннях двигунів. Установлено, що кореляція між зносом і твердістю виявляється тільки для покриттів одного типу структури, градієнт зносостійкості за твердістю для плазмових покриттів із структурою, сформованою на макрорівні, на відміну від гальванічних покриттів, сформованих на мікрорівні, на порядок вищий і знижується із збільшенням твердості. За зносостійкістю плазмових покриттів оптимізовано їхній склад. Установлено (рис. 6, 7), що за однакової структури покриттів складу Fe–Cr–Ni максимальна зносостійкість спостерігається у діапазоні мікротвердості 6,0...7,0 ГПа.

Рис. 6. Інтенсивність абразивного зношування вузла тертя гільза–кілець з плазмовими покриттями складу

Fe–Cr–Ni: *1* – Fe + 25 % Ni;

2 – Fe + 25 % Ni + 25 % Cr;

3 – Fe + 25 % Ni + 50 % Cr; *4* – Cr; *5* – Cr гальванічний.

Стенові випробування двигуна 4Ч11/12,5 із введенням у циліндри кварцового пилу: *a* – кілець з покриттям;

б – чавунна гільза циліндра

Рис. 7. Вплив твердості плазмових покриттів складу Fe–Cr–Ni на рівень їх зношування:

1 – абразивний знос (стенд);

2 – механічний знос (машина тертя)

У складі покриття хром відповідає за твердість і термостійкість, залізо - за міцність зчеплення з чавуном кільця, а нікель, який споріднений із залізом і хромом і, хоча і має невелику твердість, має найбільший коефіцієнт термічного розширення (КТР) з вибраної групи металів – за зв'язок частинок покриття, тобто за когезійну міцність. Оптимальним можна вважати склад покриття 25...35 % Fe + 25 % Ni + 40...50 % Cr, який дозволяє одержати рівень зносостійкості, вищий за рівень гальванічного хрому під час механічного та абразивного зношування.

Для молібденового покриття поршневих кілець як зміцнювальна дисперсна фаза найбільше підходить оксид алюмінію. Ураховуючи, що зміцнення $Du_{11}^{(1)}$ матриці (1) двофазного матеріалу за законом Халла–Петча залежить від деформації першої фази-матриці $e_{11}^{(1)}$ і середньостатистичної відстані між утвореннями зміцнювальної фази (2) л як $Du_{11}^{(1)} = y_{11} - y_{11}^{(1)} = k (e_{11} / l)^{1/2}$, у дослідженнях проведено числову оцінку напруженого стану покриття Mo–Al₂O₃. За термічними напруженнями на межі розділу матеріалу матриці і включень було оптимізовано дисперсність включень і відстань між ними. Результати перевірено дослідженнями механічного та абразивного зношування покриттів (рис. 8, 9).

Рис. 8. Залежність механічного зносу двофазного плазмового покриття від об'ємного вмісту компонентів: 1 – знос покриття; 2 – знос контргіла тертя із чавуну; машина тертя СМЦ-2; тиск 1,75 МПа; швидкість ковзання 4,16 м/с; граничний режим змащування

Рис. 9. Абразивний знос вузла тертя гільза-кільце з покриттями складу: 1 – Cr гальванічний; 2 – Mo плазмовий; 3 – Mo + 30 % Al₂O₃; 4 – Mo + 50 % Al₂O₃. Стендові випробування двигуна: а – знос покриття на кільці; б – знос чавунної гільзи циліндра

Дослідження фінішного іонного азотування поршневого кільця з молібденовим покриттям показали, що першою від поверхні спостерігається зона нітридів (переважно MoN–Mo₂N для покриття і Fe₄N для чавуну), яка досягає 8 мкм з мікротвердістю 11,8 ГПа для молібдену і 6,2 ГПа для чавуну. За нею розташована зона твердого розчину азоту у молібдені і залізі відповідно, яка зумовлює підвищення твердості і зносостійкості до глибини 200 мкм (табл. 1, 2).

Таблиця 1. Інтенсивність механічного зношування ($I_n \cdot 10^{10}$) чавуну і покриття поршневих кілець після іонного азотування, машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, мікротвердість вказана для глибини 50 мкм. Контргіло – чавун гільзи і силумін поршня.

Таблиця 2. Результати стендових випробувань поршневих кілець з азотованим молібденовим покриттям на двигуні (абразивне зношування).

Результати триботехнічних досліджень на машині тертя і у двигуні показують, що фінішне іонне азотування кільця з молібденовим покриттям за рахунок підвищення твердості робочої і торцевих поверхонь збільшує зносостійкість трибосполучення «циліндр–кільце–поршень» на 25...30 %.

Триботехнічні дослідження фінішного лазерного опромінення дослідних поршневих кілець порівняно з серійними (рис. 10) були проведені на машині тертя і за допомогою стендових випробувань двигуна за умов абразивного зношування. Зменшення зношування на 20...40 % по робочій і торцевим поверхням кільця дозволяє рекомендувати фінішне лазерне опромінення верхніх поршневих кілець з молібденовим покриттям до застосування без зниження моторесурсу у термонапружених форсованих двигунах.

У процесі дослідження також виконано порівняльний аналіз витрат на технології триботехнічного зміцнення поверхні деталей, для якого використані реальні виробничі витрати за цінами 2007 р., які супроводжують процес випуску поршневих кілець на спеціалізованому підприємстві.

Рис. 10. Залежність інтенсивності механічного зношування чавуну і покриттів від швидкості ковзання:

1 – сірий чавун; 2 – сірий чавун, опромінений лазером; 3 – покриття Мо плазмовий; 4 – покриття Мо плазмовий, опромінений лазером; 5 – покриття Cr гальванічний. Машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа: *a* – знос зразка; *b* – знос контргіла – сірого чавуну гільзи циліндра

Таким чином, дослідженнями встановлено і випробуваннями підтверджено запропоноване комплексне розв'язання проблеми забезпечення довговічності ЦПГ форсованих двигунів нанесенням на робочу поверхню кільця замість гальванічного хрому плазмових покриттів та наступною фінішною зміцнювальною обробкою всіх поверхонь кільця іонним азотуванням або лазерним опромінюванням.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано вплив форсування двигунів на зносостійкість ЦПГ. Форсування ДВЗ приводить до зростання температури верхнього кільця (зі 150...200 до 250...300 °С), його мастильного голодування і збільшення швидкості його зносу (з 15...20 до 40...50 мкм/тис. мотогодин), підвищення зносу кільця по торцях, канавки поршня і гільзи циліндра, а також до випадків руйнування

хромових покриттів. Дослідженнями встановлено, що причинами випадків виходу з ладу трибосполучення циліндр-кільце-поршень є різке підвищення швидкості зношування і припалювання серійних хромових покриттів при підвищенні температури і тиску. Доведено необхідність підвищення зносостійкості цього трибосполучення форсованих двигунів розробленням комплексного способу формування модифікованих шарів шляхом нанесення зносостійких плазмових мастилоємних покриттів на робочу поверхню і фінішним зміцненням усіх поверхонь кільця іонним азотуванням або лазерним опроміненням.

2. Досліджено структуру, напружений стан, зносостійкість і термостійкість гальванічних хромових покриттів і ступінь їх впливу на процеси тертя та зношування. У форсованих двигунах виявлено утворення між поверхневим шаром аморфного хрому і глибинним шаром полікристалічного хрому нових фаз вторинних структур тертя – карбіду хрому Cr_7C_3 і оксиду хрому Cr_2O_3 , які є причиною виникнення внутрішніх напружень і мікророзтріскування хромового покриття. Виявлено припалювання покриття під дією термічних навантажень, обумовлених підвищенням температури у камері згоряння, що супроводжується макророзтріскуванням хрому і зниженням його твердості на певну глибину. Проведені дослідження дозволили визначити такі причини зниження зносостійкості деталей ЦПГ при форсуванні двигунів: силові і дифузійні навантаження викликають у хромових покриттях високий рівень напружень, які перевершують межу міцності хрому і зумовлюють зміну механізму тертя на фрагментарне викришування; низька здатність хрому акумулювати мастило і високі термічні навантаження перевищують термостійкість хромового покриття і знижують його твердість. Альтернативою хромовим покриттям у форсованих двигунах можуть стати пористі мастилоємні плазмові покриття, позбавлені цих недоліків.

3. На підставі експериментальних досліджень і стендових випробувань двигунів встановлено взаємозв'язок структури, фізико-механічних властивостей і напруженого стану із зносостійкістю плазмових покриттів. Для досліджень застосовано структурно-енергетичну модель зношування за критерієм схоплювання покриття. Показано перевагу процесу зношування кілець незакріпленими твердими частинками, що призводить до кореляції із $P_{cx}^{-1/2}$, і проведено експериментальне визначення тиску схоплювання для серійних гальванічних хромових та дослідних плазмових покриттів. Дослідженнями підтверджено положення структурно-енергетичної моделі – зносостійкість покриттів за однакового виду зносу залежить не тільки від твердості матеріалу, але й від структури покриття. Установлено, що тільки для покриттів одного типу структури спостерігається кореляція між величиною зносу і твердістю. Зносостійкість покриттів збільшується із збільшенням їхньої твердості H^n , але показник ступеню при цьому різний для різних діапазонів твердості.

4. За результатами проведених досліджень розроблено плазмові покриття складу Fe–Ni–Cr, які забезпечують рівень зносостійкості, вищий за рівень гальванічного хрому при неперевершеності рівня зносу гільзи циліндра. Експериментальними дослідженнями підтверджено правильність

структурно-енергетичного підходу до оптимізації складу молібденового дисперсно-армованого покриття як за термічними внутрішніми напруженнями, так і за законом Халла–Петча, а випробуваннями у двигуні при абразивному зношуванні доведено працездатність розроблених плазмових покриттів складу $\text{Mo-Al}_2\text{O}_3$.

5. Розроблено технології триботехнічного зміцнення поверхні компресійних поршневих кілець, здатних працювати у термонапружених форсованих двигунах: технологію плазмового напилення зносостійких покриттів на робочу поверхню кільця і фінішні технології зміцнення та захисту торцевих поверхонь кільця іонним бомбардуванням і лазерним гартуванням. Теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено вплив плазмових покриттів і способів зміцнення поверхні поршневих кілець на їх експлуатаційні характеристики і розроблено спосіб корекції епюри радіальних тисків при виготовленні кілець для урахування цього впливу (пат. № 37750). Розроблені технології дозволяють впровадити їх у виробництво поршневих кілець без погіршення закріплених документацією експлуатаційних властивостей кілець.

6. Установлено, що розроблена технологія іонного азотування молібденового покриття збільшує його зносостійкість до рівня гальванічного хрому і дозволяє одночасно зміцнювати чавунні торцеві поверхні кільця. Результати досліджень на машині тертя і у двигуні показують, що фінішне іонне азотування кільця з молібденовим покриттям за рахунок підвищення твердості робочої і торцевих поверхонь збільшує зносостійкість трибосполучення «циліндр-кільце-поршень» на 25...30 %. Випробуваннями двигунів установлено, що застосування лазерного опромінювання чавунних кілець за розробленою технологією зменшує зношування цього трибосполучення на 22...37 %, а лазерне опромінювання молібденового покриття верхнього компресійного кільця зменшує його зношування на 30 % і доводить його до рівня зношування гальванічного хрому.

7. Узагальнено результати досліджень та розроблено практичні рекомендації щодо формування зносостійких поверхневих шарів поршневих кілець ЦПГ форсованих двигунів електрофізичними методами. Екологічна і техніко-економічна оцінка описаних у дисертації технологій триботехнічного зміцнення поршневих кілець проведена в умовах діючого серійного виробництва поршневих кілець. Оптимальною за собівартістю для поршневих кілець термонапружених форсованих двигунів можна вважати технологію плазмового напилення молібденового покриття на робочу поверхню кільця і фінішного іонного азотування всього кільця, яку впроваджено у виробництво поршневих кілець на підприємстві НВП «Проммаштранс». Розроблені технології зміцнення кілець лазерним опромінюванням і технології підвищення корозійної стійкості сталевих кілець електрофізичним окисдуванням прийняті для подальшого впровадження. За результатами досліджень отримано патент України і випущено методичні вказівки для курсу «Триботехніка» в Одеській національній академії харчових технологій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Соколов О. Д. Властивості і застосування хромових покриттів, отриманих різними методами / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, А. І. Костржицький // Проблеми техніки. – 2005. – № 3. – С. 110–128.
2. Соколов О. Д. Вплив твердості покриттів на їх зносостійкість / О. Д. Соколов, І. І. Шофул, О. В. Маннапова // Проблеми техніки. – 2005. – № 3. – С. 104–109.
3. Соколов О. Д. Підвищення зносостійкості сірого чавуну іонним азотуванням / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова // Проблеми техніки. – 2006. – № 2. – С. 46–53.
4. Маннапова О. В. Підвищення трибологічних характеристик нехромованої поверхні поршневих кілець дизельних двигунів / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, В. І. Твердохліб // Проблеми техніки. – 2006. – № 4. – С. 39–47.
5. Підвищення корозійної тривкості сірого чавуну іонним азотуванням / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, А. І. Костржицький, А. П. Олік // ФХММ. – 2006. – № 6. – С. 116–118.
6. Соколов О. Д. Зміцнення чавунних деталей обладнання для виробництва хлібопродуктів азотуванням у тліючому розряді / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2006. – Вип. 29, Т. 2. – С. 211–214.
7. Соколов О. Д. Дослідження молекулярного і абразивного зношування плазмових покриттів / О. Д. Соколов, А. П. Олік, О. В. Маннапова // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. – 2006. – Вип. 34. – С. 103–109.
8. Підвищення довговічності сполучення “кільце–поршень” електрофізичними видами обробки / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. П. Олік [та ін.] // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. – 2007. – Вип. 40. – С. 144–154.
9. Маннапова О. В. Трибологічна оптимізація складу металевих плазмових покриттів / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький // Проблеми техніки. – 2007. – № 1. – С. 21–29.
10. Маннапова О. В. Фізико-хімічні властивості оксидних плівок на сталі, отриманих іонним бомбардуванням / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький // ФХТТ. – 2007. – Т. 8, № 4. – С. 809–813.
11. Зносотривкість лазерно опромінених поверхонь поршневих кілець / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. П. Олік [та ін.] // ФХММ. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 120–122.
12. Соколов О. Д. Особливості зношування хромових покриттів поршневих кілець у термонапружених двигунах / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 49, Т. 1. – С. 248–257.
13. Поршневі кільця для форсованих дизельних ДВЗ з додатковою корекцією епюри тисків / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, В. П. Молдаванов, В. І. Твердохліб // ДВЗ. – 2008. – № 1. – С. 124–132.

14. Соколов О. Д. Дослідження зносостійкості поршневих кілець термонапружених двигунів після фінішного іонного азотування / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, В. І. Твердохліб // Проблеми трибології. – 2008. – № 3. – С. 57–60.

15. Техніко-економічна оцінка триботехнічних технологій / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, Ю. М. Голованов [та ін.] // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 50. – С. 194–201.

16. Техніко-економічні показники сучасних екологічних технологій поверхневого зміцнення / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, Ю. М. Голованов [та ін.] // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2008. – Вип. 33. – С. 114–118.

17. Вплив покриття електрофізичними методами на зносотривкість торців поршневих кілець / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. П. Олік [та ін.] // ФХММ. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 120–122.

18. Патент України № 37750, МПК F02F 5/00. Поршневе кільце / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, В. П. Молдаванов, В. І. Твердохліб (Україна). – № u200807726; Заявл. 06.06.2008; Опубл. 10.12.2008. Бюл. № 23. – 4 с.

19. Соколов О. Д. Зносостійкість плазмових покриттів складу Fe-Cr-Ni / О. Д. Соколов, О. В. Маннапова, А. І. Костржицький // Композиционные материалы в промышленности: Материалы 26-й ежегодной научно-практической конференции с международным участием (29 мая – 2 июня 2006, г. Ялта). – К.: УИЦ «НТТ», 2006, С. 204 – 206.

20. Розробка технології оксидування поверхні поршневих кілець дизельних двигунів / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький, В. І. Твердохліб // В сб.: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы Седьмой ежегодной международной промышленной конференции (12 – 16 февраля 2007 г., п. Славское, Карпаты.) – К.: УИЦ “НТТ”, 2007. – С. 141–144.

21. Маннапова О. В. Захист поверхні поршневих кілець електрофізичним і хімічним оксидуванням / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький // Материалы II Междунар. научн.-практ. конф. “Современные научные достижения – 2007”. Том 7. – Технические науки – г. Днепропетровск: Наука и образование, 2007. – С. 6–10.

22. Маннапова О. В. Фізико-хімічні властивості оксидних плівок на сталі, отриманих іонним бомбардуванням / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький // Materials of XI International Conference “Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems” ІСРТТFN-XI (7 – 12. 05.2007, Івано-Франківськ, Україна). – Івано-Франківськ: ВДВ ЦІТ Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника, 2007. – Том 2. – С. 114–115.

23. Підвищення зносостійкості чавуну і покриву поршневих кілець лазерним опромінюванням / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький, В. І. Твердохліб // Композиционные материалы в

промышленности: Материалы 27-й международной конференции. 28 мая – 1 июня 2007, г. Ялта – Киев: УИЦ «НТТ», 2007. – С. 353–356.

24. Зміцнення торців поршневих кілець електроіскровим легуванням і катодноіонним бомбардуванням / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, В. І. Твердохліб, А. І. Костржицький // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы Пятнадцатой Юбилейной международной конференции. 1 – 5 октября 2007, г. Ялта. – Киев: УИЦ «НТТ», 2007. – С. 314–316.

25. Підвищення корозійної тривкості вуглецевої сталі іонним бомбардуванням / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. І. Костржицький, В. І. Твердохліб // В сб.: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях. Материалы Восьмой ежегодной международной Промышленной конференции (11 – 15 февраля 2008 г., п. Славское, Карпаты.). – К.: УИЦ «НТТ», 2008. – С. 353–357.

26. Маннапова О. В. Порівняльний еколого-економічний аналіз трибо-технічних технологій / О. В. Маннапова // Збірник наукових праць молодих учених, аспірантів та студентів. – Одеса: ОНАХТ, 2008. – С. 151–153.

Особистий внесок здобувача в публікаціях: у працях [1; 15; 16] – обробка та аналіз літературних і статистичних даних; у працях [2; 3; 4; 7; 9; 11; 12; 14; 17; 21; 22] – проведення випробувань на тертя та зношування та металографічних досліджень; у працях [6; 8; 19] – нанесення плазмових покриттів, іонна обробка і лазерне опромінювання, проведення випробувань, обробка результатів, виконання металографічних досліджень та формулювання висновків; у працях [5; 10; 18; 20; 23; 24] – проведення електрохімічних досліджень і корозійних випробувань; у працях [2; 12; 13; 17] – проведення розрахунків напруженого стану покриттів та їх впливу на епюру радіальних тисків поршневого кільця та обробка результатів.

АНОТАЦІЯ

Маннапова О.В. Підвищення зносостійкості трибосполучення «циліндр-кільце-поршень» форсованих двигунів електрофізичними методами зміцнення поверхні. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Національний авіаційний університет, Київ, 2009.

Дисертацію присвячено питанню підвищення зносостійкості трибосполучення «циліндр-кільце-поршень» форсованих двигунів електрофізичними методами зміцнення поверхонь тертя – шляхом встановлення закономірностей впливу структурно-фазового складу, напруженого стану та термостійкості зміцнених шарів на їх триботехнічні характеристики.

Проаналізовано причини випадків катастрофічного зношування поршневих кілець форсованих двигунів та встановлено межі застосування серійних хромових покриттів. Вивчено вплив процесу на-

несення гальванічних та газотермічних покриттів на епюру радіальних тисків кільця. Проведено оптимізацію складу плазмового покриття за твердістю та когезійною міцністю. Аналітично обґрунтовано з позицій напруженого стану параметри застосування підшару і дисперсного армування металевих покриттів частинками оксиду алюмінію. Розроблено покриття складу 25...35 % Fe + 25 % Ni + 40...50 % Cr та Mo + 10...30% Al₂O₃, які за своїми триботехнічними властивостями перевершують гальванічний хром в умовах термосилового навантаження. Показано, що фінішна обробка готового поршневого кільця з плазмовим покриттям на робочій поверхні іонним азотуванням або лазерним опроміненням дозволяє підвищити зносостійкість як робочої, так і торцевих поверхонь. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження та проведено виробничі випробування.

Ключові слова: зносостійкість, плазмові покриття, іонне азотування, лазерне опромінювання, двигуни внутрішнього згорання.

АННОТАЦІЯ

Маннапова О.В. Повышение износостойкости трибосопряжения «цилиндр-кольцо-поршень» форсированных двигателей электрофизическими методами упрочнения поверхности. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах. – Национальный авиационный университет, Киев, 2009.

Диссертация посвящена разработке износостойких и термостойких покрытий и электрофизических способов упрочнения поверхности поршневых колец, способных работать в цилиндропоршневой группе термонапряженных форсированных двигателей внутреннего сгорания.

В работе проведен анализ влияния форсирования двигателей на износостойкость ЦПГ. Исследован характер повреждений поршневых колец в форсированных термонапряженных дизелях и установлены причины их повышенного износа в сопряжениях с цилиндром и поршнем – резкое повышение скорости износа и прижог серийных хромовых покрытий в условиях повышения температуры и давления, низкая способность покрытия аккумулировать смазку и низкая термостойкость гальванического хрома. Электронографическим анализом определено образование под поверхностью хрома новых фаз вторичных структур трения – карбидов и оксидов хрома, что является причиной возникновения внутренних напряжений, превышающих предел прочности и усталости хрома. Это приводит к растрескиванию покрытия и выкрашиванию частиц хрома, т.е. к изменению механизма износа. Решить эту проблему предложено разработкой комплексного способа повышения триботехнических характеристик поршневых колец – нанесением износостойких плазменных маслостойких покрытий и финишным упрочнением всех поверхностей трения ионным азотированием или лазерным облучением.

Исследованиями установлена связь структуры и напряженного состояния с износостойкостью плазменных покрытий. Для исследований применена структурно-энергетическая модель изнашивания по критерию схватывания покрытия. Показано преимущество процесса изнашивания колец незакрепленными твердыми частицами, что приводит к корреляции $P_{сх}^{-0,5}$, и проведено экспериментальное определение давления схватывания для серийных и опытных плазменных покрытий. Оптимизирован состав Fe–Ni–Cr плазменных покрытий по твердости и когезионной прочности, что позволило получить уровень износостойкости выше гальванического хрома как при механическом, так и при абразивном изнашивании при непревышении уровня износа гильзы цилиндра.

Экспериментальными исследованиями на машине трения подтверждена правильность структурно-энергетического подхода к оптимизации состава дисперсно-армированного покрытия как по термическим внутренним напряжениям, так и по закону Халла–Петча, а испытаниями в двигателе доказана работоспособность плазменных покрытий состава Mo + 20...30 % Al₂O₃.

Разработаны технологии напыления плазменных покрытий и финишного упрочнения поверхности поршневых колец ионной бомбардировкой и лазерным облучением и изучен структурно-фазовый состав поверхностей трения. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено влияние плазменных покрытий и способов упрочнения поверхности поршневых колец на их служебные характеристики и разработан способ коррекции эпюры радиальных давлений при изготовлении колец для учета этого влияния. Разработанные технологии позволили внедрение их в производство без ухудшения закрепленных документацией служебных свойств колец. Установлено, что разработанная технология ионного азотирования молибденового покрытия увеличивает его износостойкость до уровня гальванического хрома и позволяет синхронно упрочнить чугунные торцовые поверхности кольца.

Ключевые слова: износостойкость, плазменные покрытия, ионное азотирование, лазерное облучение, двигатели внутреннего сгорания.

ABSTRACT

Mannapova O. V. Increase of wearproofness of tribo-connection «cylinder - piston-ring – piston» of the forced engines by the electro-physics methods of work-hardening of surface. – Manuscript.

Thesis for a scientific degree of the Candidate of Sciences, Speciality 05.02.04 – Friction and Wear in Machines. – National Aviation University, Kiev, 2009.

Thesis is aim at elaboration of complex method of work-hardening of surface of piston-rings for the increase of longevity of tribo-connection “cylinder-piston-ring-piston” of the forced engines by plasma coverages with the finish work-hardening of surfaces of friction. Researches of galvanic chromic coverages in the forced engines set the causes of their insufficient wearproofness and reliability is change of mechanism of friction on the fragmentary painting, low ability to accumulate oil and low heat-

resistance. Technology and composition of wearproof plasma coverages is developed on-the-spot working and technology of the finish work-hardening of all surfaces of ring by ionic nitration or laser tempering. The conducted researches of wearproofness went into detail for coverages of piston-rings the structurally–power model of wear, that allowed to optimize composition of metallic plasma coverages of Fe-Ni-Cr on hardness and cohesive durability and law of Hall-Patch for the dispersible-reinforced plasma coverages Mo-Al₂O₃. Researches develop technologies of ionic nitration and laser tempering of molybdenum coverage, which multiply its wearproofness to the level of galvanic chrome and allow simultaneously to hardening the cast-iron butt-end surfaces of ring. It allows to offer complex solution of problem of providing of reliability and longevity of compression piston-rings of the forced engines for introduction.

Keywords: wearproofness, plasma coverages, ionic nitration, laser irradiation, combustion engines.