

вітряних потоків до 6 м/с дозволяє скоротити висоту робочої камери для аеродинамічно легких часток до розмірів, менших її довжини на інтервалі до 1 м. Для аеродинамічно важких часток це відношення спостерігається на всьому інтервалі розмірів робочої камери. Узагальнення цих відношень свідчить про найбільшу доцільність вибору швидкості повітряних потоків до 6 м/с і довжини та висоти робочої камери відповідно 1,5x0,7 м, що максимально сприятиме мінімізації її габаритних розмірів та маси всього сепаратора.

Виконані за приведеною методикою розрахунки дали можливість таким чином обґрунтувати наступні характеристики повітряно-гравітаційного сепаратора:

- довжина робочої камери $X \rightarrow D=1,5\text{ м}$;
- висота робочої камери $Y \rightarrow H=0,7\text{ м}$;
- швидкість повітряних потоків $v_n=6\text{ м/с}$.

Крім того, отримані результати розрахунків дають підстави для обґрунтування обсягів повітря V , необхідних для пневмосепарування зерна та аеродинамічно легких домішок органічного походження у робочій зоні осадочної камери. Так, з урахуванням частини поперечного перерізу осадочної камери, зайнятої частками суміші зернопродуктів, маємо

$$V=0,5HL(v_{min}\dots v_{max})=0,5\cdot 0,7\cdot 1,2\cdot (5\dots 7)=2,1\dots 3,0\text{ м}^3/\text{с}, \quad (12)$$

що складає витрати повітря вентилятором від 125 до 180 м³/хв.

Обґрунтування можливості застосування наведеної методики для визначення конструктивних, геометричних та кінематичних параметрів повітряно-гравітаційного сепаратора для комбінованої очистки свіжезібраного вологого зерна інших культур або в інших виробничих умовах вимагає використання відповідних обмежень та експериментальної перевірки одержаних результатів.

Висновки

Запропонована методика призначена для проектно-конструкторських установ, машинобудівних заводів та діючих підприємств, які займаються розробкою, виготовленням та експлуатацією технологічно-устаткування для післязбиральної обробки бороху.

Література

1. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. Изд. 5-е, перераб. и доп. Под ред. д.т.н., проф. А.Я.Соколова. -М.: Колос, 1984. -с.445.
2. Машины для послеуборочной обработки зерна. Учебники и учебные пособия для подготовки кадров массовых профессий /Б.С. Окнин, И.В. Горбачев, А.А. Терехин, В.М. Соловьев –М.: Агропромиздат. -1987. –с.238.

УДК 621.891

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

Маннапова О. В., асп., Соколов О.Д., д-р техн. наук, професор
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

Роботу 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.

Work is devoted the question of increase of wearproofness of interface a cylinder-ring-piston of the forced engines by the electrophysical methods of consolidating of surfaces of friction – by establishment of conformities to the law of influencing structurally of phase composition, tense state and heat-resistance of the consolidated layers on their tribological descriptions.

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

Вступ. Проблемам підвищення надійності вузлів тертя машин завжди приділяється належна увага. Серед них важливе місце посідають поршневі двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), які останнім часом є основою

мобільної енергетики всіх галузей господарства, тому актуальним є питання підвищення працездатності, надійності і довговічності ДВЗ, а особливо їх головного, найбільш напруженого органу – циліндро-поршневої групи (ЦПГ). На сьогодні довговічність ЦПГ ДВЗ на робочій поверхні поршневих кілець, забезпечується гальванічним хромовим покриттям, але нажалі до кінця не вирішена задача щодо забезпечення експлуатаційної надійності покриттів, запобігання їхньої руйнації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо впливу експлуатаційних і конструкційних чинників на довговічність зміцненого кільця і надійність покриття, проведений у оглядових роботах [1, 2] показує, що для ЦПГ не вирішеною частиною проблеми є невпинне форсування двигунів по потужності, яке почалося в останні двадцять років, і застосування важких сірчаних палив. Це на сьогоднішньому етапі призводить до руйнації серійних хромових покриттів і підвищення рівня зношування трибосполучення “циліндр – робоча і торцеві поверхні кільця – канавка поршня”, що й перешкоджає збільшенню довговічності ЦПГ. Нажалі, вітчизняне двигунобудування за цими показниками відстає від розвинутих країн. Тому дослідження по розробці технологій зміцнення поршневих кілець, спроможних забезпечити підвищений ресурс форсованих ДВЗ в умовах підвищених термічних і силових навантажень, є актуальними і мають теоретичний і практичний інтерес.

Мета роботи. Метою роботи є 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. Робота виконана відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ОНАХТ.

Матеріали і методика досліджень. Досліджували гальванічні хромові і плазмове напиляні металеви (Fe-Ni-Cr, Mo) і металооксидні (Mo-Al₂O₃) покриття, нанесені на установці УМП5-68 в азотній плазмі. Зміцнення покриттів і матеріалу кілець іонним азотуванням 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 циліндру і силуміном поршня при швидкостях ковзання 0,47...4,16 м/с, шляху тертя – 51 км і навантаженнях 0,5...4,0 МПа. Контролювали масовий та лінійний знос зразка і контртіла, коефіцієнт тертя і температуру контртіла під поверхнею тертя.

Мікроструктуру досліджували на мікроскопі МІМ-7А, мікротвердість – на приладі ПМТ-3, поверхню тертя – на оптичному і електронному мікроскопах, рентгеноструктурний аналіз проводили на приладах УРС-0,02 і ДРОН-3, мікрорентгеноспектральний – на приладі GXR-5 фірми “Джеол”, фазовий склад зміцнених поверхонь тертя визначали на електронографі ЕГ-100М. Корозійні дослідження проводили на потенціостаті П-5827М і приладі Р5035. Дослідження впливу процесів на кільце проводили на епюримі для визначення модуля пружності по периметру поршневих кілець.

Вплив термосилових навантажень на процеси тертя і зношування гальванічних хромових покриттів. Проведеними дослідженнями [3] було підтверджено, що знос кільця і циліндра здійснюється на такті спалаху-розширення поблизу верхньої “мертвої” точки, коли товщина мастильної плівки стає меншою мікросорткості поверхонь, тертя стає напівсухим. Шлях зносу при форсуванні збільшується з підвищенням температури і тиску. Показано, що швидкість зношування хрому у термонапруженій (4Ч11/12,5Т) модифікації двигуна збільшується вдвічі (з 25 до 50 мкм/тис. могодин) порівняно із нетермонапруженою (4Ч11/12,5). Виявлено, що поверхня зносу хрому на кільцях термонапруженого двигуна покрита мікротріщинами і деколи має сліди припалювання з макротріщинами, поперечними напрямку руху кільця (рис. 1).

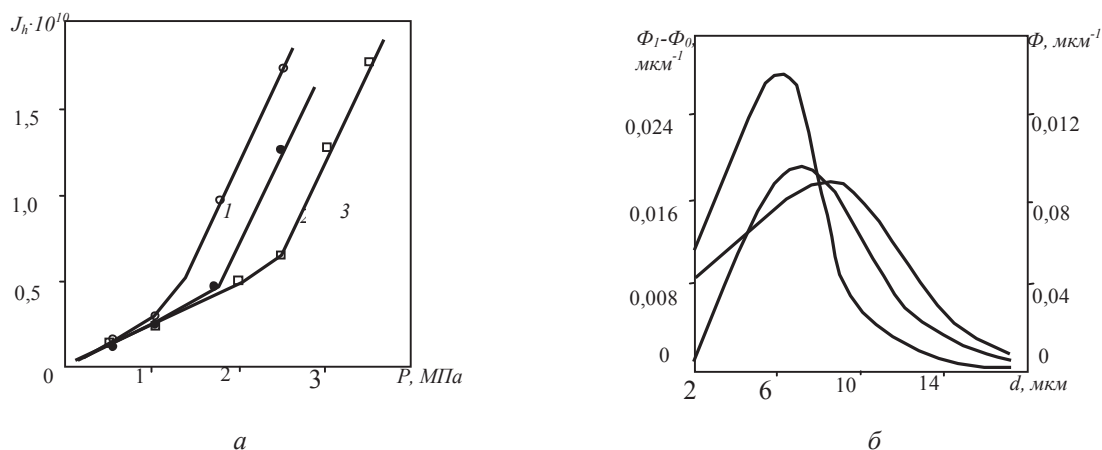


а – мікророзтріскування хрому, $\times 7000$; б – зона припалювання хрому, $\times 50$

Рис. 1 – Вигляд поверхні тертя хромового покриття після роботи у двигуні 4Ч11/12,5Т

При визначенні зносостійкості хромових покриттів на машині тертя було зафіксовано точки зламу на кривих залежності інтенсивності зношування від питомого навантаження (рис. 2, а), після яких знос різко зростає. При збільшенні швидкості ковзання, що супроводжувалося підвищенням температури зразка, точки зламу зсувалися в область менших тисків. При навантаженнях до точок зламу поверхня тертя хро-

му відповідала нормальному механічному зношуванню, після точок зламу спостерігалось утворення мікротріщин (рис. 1, а).



а – 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; б – результати фрактографічного аналізу зношування хромових покриттів: 1 – функція розподілу за розмірами частинок зносу хрому, виділених з мастила після випробувань; 2 – функція розподілу за розмірами лунок викришування на поверхні тертя хромового покриття кілець термонапруженого двигуна у місці щоки кільця і у місці замка (3)

Рис. 2 – Зношування хромових покриттів

Для виявлення розмірів часток зносу хромового покриття був проведений фрактографічний аналіз часток хрому, виділених з мастила після випробувань на машині тертя. Результати, отримані за умовами зношування за швидкістю 4,16 м/с і тиском 1,75 МПа, наведені на рис. 2б (крива 1). Встановлено спектр часток зносу хрому від 2 до 15 мкм з кількісним максимумом у районі 6...8 мкм. Оскільки виявити такі частки 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 дозволив побудувати функцію їх розподілу. На рис. 3 представлено вигляд функції для зони щоки кільця, де відносний тиск кільця на циліндр мінімальний ($P_{\psi}/P_0 = 0,5$) – крива 2, і зони замка кільця, де тиск максимальний ($P_{\psi}/P_0 = 1,5$) – крива 3. Результати підтверджують, що найбільш вірогідні розміри часток зносу знаходяться у визначеному інтервалі і підвищення тиску призводить до утворення часток більших розмірів.

Методами електронграфічного та мікрорентгеноспектрального аналізу було досліджено структуру хромового покриття на поршневих кільцях після роботи у нефорсованому і форсованому двигунах. Встановлено, що у нефорсованих двигунах поверхня хрому активується і на ній утворюється тонкий прошарок (до 1000 ангстрем) аморфного хрому. Під ним розташовано прошарок хрому із дезорієнтованою структурою, нижче знаходиться полікристалічний хром. Сліди руйнування і схоплювання відсутні. Після роботи у форсованому двигуні поверхня хрому має мікротріщини, а електронграфічним аналізом встановлено утворення у прошарку хрому із дезорієнтованою структурою нових фаз вторинних структур тертя – карбіду хрому Cr_7C_3 і оксиду хрому Cr_2O_3 . Більш інтенсивні деформаційні і термічні процеси при терті верхніх кілець біля камери згорання із середовищем вуглецю та кисню активізують дифузію їх атомів через аморфний прошарок у прошарок дезорієнтованого хрому і утворення в ньому вторинних структур.

Відмінність параметрів решіток карбідів і оксидів для хрому призводить до виникнення внутрішніх напруг на межі поділу фаз та появи мікротріщин. Їх поширення перпендикулярне поверхні тертя і призводить до розірвання метастабільного аморфного прошарку, утворення ізольованих фрагментів на поверхні тертя (рис. 1, а). Одночасне поширення мікротріщин паралельне поверхні тертя призводить до викришування таких фрагментів поверхні від полікристалічного хрому і їхнього видалення при терті, що й обумовлює вдвічі більшу швидкість зношування хрому у форсованих двигунах.

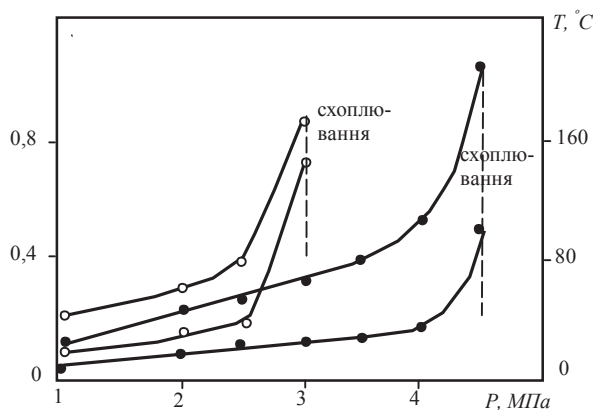
Моделювання припалювання хромового покриття на машині тертя показало, що мікротвердість хрому зменшується з 10,5 ГПа на глибині 80 мкм до 6,5 ГПа на поверхні тертя (на кільці у двигуні – з 10,5 ГПа на глибині 140 мкм до 4,5 ГПа на поверхні), що дозволило наступним чином пояснити роль недостатньої термостійкості хрому у високій інтенсивності зношування покриття. В момент спалаху мастильна

плівка миттєво випаровується, покриття опиняється в умовах тертя без мащення при високій температурі, 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 [3] дозволили визначити причини зниження зносостійкості деталей ЦПГ при форсуванні двигунів: силові і дифузійні навантаження викликають високий рівень напруги у хромових покриттях, які перевершують межу міцності хрому і обумовлюють зміну механізму тертя на фрагментарне викришування; низька спроможність 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.

Розробка технологій плазмового напилювання покриттів на робочу поверхню і електрофізичного зміцнення торцевих поверхонь поршневих кілець. Для розробки технології плазмового напилювання покриттів на робочу поверхню кілець були проведені дослідження впливу процесу нанесення покриття і розроблено методику врахування цього впливу на службові характеристики і епюру радіальних тисків поршневих кілець [4]. Проведені дослідження дозволили розробити технологію плазмового напилювання і конструкцію поршневого кільця на патентному рівні [5]. Дослідження за розробкою технологій електрофізичного зміцнення поршневих кілець іонним азотуванням і лазерним опромінюванням проведені сумісно із Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАНУ і Науково-виробничим підприємством "Проммаштранс" [6–9].

Дослідження триботехнічних властивостей покриттів та зміцненої поверхні поршневих кілець для форсованих двигунів. У наших дослідженнях [9 - 12] на основі структурно-енергетичної теорії зношування об'ємний знос покриття кільця визначений як $V = k / P_{cx}^n$, де P_{cx} – зусилля схоплювання покриття, і представлено, що знос зумовлений трьома процесами: зануренням у покриття твердих абразивних часток, дряпанням покриття наростами гільзи циліндру та схоплюванням покриття з поверхнею гільзи циліндру з глибинним вириванням часток покриття. У дослідженнях визначали показник ступеня n , який за рівноважним протіканням усіх трьох процесів дорівнює 5,5. На рис. 3 наведено результати порівняльних досліджень за визначенням зусилля схоплювання, коефіцієнта тертя та температури схоплювання покриттів поршневих кілець, проведених на машині тертя СМЦ-2 при швидкості ковзання 1,3 м/с.

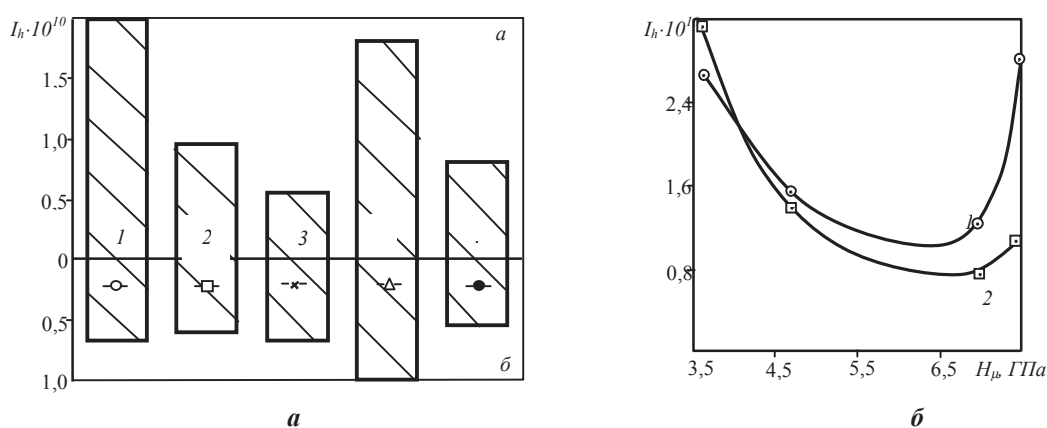


а – гальванічне хромове покриття; б – плазмове молібденове покриття; 1 – температура;
2 – коефіцієнт тертя

Рис. 3 – Схоплювання покриттів поршневих кілець з сірим чавуном гільзи циліндра при припиненні подачі мастила у зону тертя

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

Оскільки такі частки на машині тертя утворюються тільки з продуктів зношування покриття, були проведені дослідження впливу на зношування твердості і структурного складу покриттів, а також дослідження щодо моделювання абразивного зношування при введенні незакріплених твердих часток у зону тертя, що проводилися у стендових випробуваннях двигунів. Встановлено, 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 вища і знижується із збільшенням твердості. За зносостійкістю плазмових покриттів оптимізовано їхній склад. Встановлено (рис. 4), що максимальна зносостійкість спостерігається у діапазоні мікротвердості 6,0...7,0 ГПа.



а – інтенсивність абразивного зношування вузла тертя гільза-кільце 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. Знос кільця (*а*) і знос гільзи (*б*); *б* – вплив твердості покриттів на рівень їх зношування: 1 – абразивний знос; 2 – механічний знос

Рис. 4 – Зношування плазмових покриттів складу Fe-Cr-Ni. Для молибденового покриття поршневих кілець у якості зміцнювальної дисперсної фази найбільш підходить оксид алюмінію. В дослідженнях проведена чисельна оцінка напруженого стану покриття Mo-Al₂O₃. За термічними напругами на границі розділу матеріалу матриці і включень було оптимізовано дисперсність включень і відстань між ними. Результати перевірено дослідженнями механічного та абразивного зношування покриттів

Дослідження фінішного іонного азотування поршневого кільця з молибденовим 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 молибдену і 6,2 ГПа для чавуну. За нею відповідно розташована зона твердого розчину азоту у молибдені і залізі яка обумовлює підвищення твердості і зносостійкості до глибини 200 мкм (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Результати стендових випробувань поршневих кілець з азотованим молибденовим покриттям на двигуні (абразивне зношування)

Покриття верхнього поршневого кільця	Знос кільця, мм	Знос гільзи циліндру, мм
Серійні кільця, покриття – хром гальванічний	0,12	0,08
Дослідні кільця, покриття – молибден	0,16	0,13
Дослідні кільця, покриття – молибден азотований	0,12	0,09

Результати досліджень у машині тертя й у двигуні показують, що фінішне іонне азотування кільця з молибденовим покриттям (за рахунок підвищення твердості робочої і торцевих поверхонь) збільшує зносостійкість трибосполучення "циліндр-кільце-поршень" на 25...30 %.

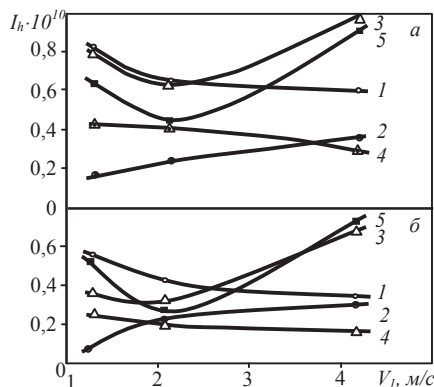
Таблиця 2 – Інтенсивність механічного зношування (Ін.1010) чавуну і покриття поршневих кілець після іонного азотування, машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, мікротвердість вказана для глибини 50 мкм. Контр. тіло – чавун гільзи і силумін поршня

Матеріал і вид зміцнення ролика	H _v , ГПа	Матеріал колодки	Швидкість ковзання					
			1,3 м/с		2,13 м/с		4,16 м/с	
			Рол	Кол	Рол	Кол	Рол	Кол
Незміцнений СЧ	3,0	СЧ	0,82	0,54	0,69	0,41	0,60	0,34
Незміцнений СЧ	3,0	АЛ-2	0,22	0,15	0,33	0,18	1,54	1,76
СЧ + іонне азотування	5,5	СЧ	0,72	0,07	0,43	0,12	0,31	0,22
СЧ + іонне азотування	5,5	АЛ-2	0,12	0,05	0,12	0,09	1,21	1,31
СЧ + хром гальванічний	9,5	СЧ	0,64	0,52	0,44	0,25	0,91	0,72
СЧ + молібден плазмовий	4,5	СЧ	0,82	0,34	0,64	0,31	1,12	0,70
СЧ + молібден азотований	7,5	СЧ	0,14	0,19	0,15	0,15	0,38	0,45

Триботехнічні дослідження фінішного лазерного опромінювання дослідних поршневих кілець у порівнянні із серійними були проведені машиною тертя (рис. 5) і у стендових випробуваннях двигуна при абразивному зношуванні. Зменшення зношування на 20...40 % в робочій і торцевій поверхні кілець дозволяє рекомендувати фінішне лазерне опромінення верхніх поршневих кілець з молібденовим покриттям до застосування без зниження моторесурсу у термонапружених форсованих двигунах.

Таким чином, дослідженнями встановлено і випробуваннями підтверджено запропоноване комплексне рішення 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.

У дослідженні також виконано порівняльний аналіз витрат на технології триботехнічного зміцнення поверхні деталей, в якому використані реальні виробничі витрати за цінами 2007 р., які супроводжують процес випуску поршневих кілець на спеціалізованому підприємстві [13]. Найбільш економічним виявляється процес електрофізичного зміцнення поршневих кілець шляхом нанесення молібденового покриття плазмовим струменем і фінішного іонного азотування.



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: а – знос зразка; б – знос контртіла – сірого чавуну гільзи циліндра

Рис. 5 – Залежність інтенсивності механічного зношування чавуну і покриттів від швидкості ковзання

Висновки

1. Проведено аналіз впливу форсування двигунів на зносостійкість ЦПГ. Форсування ДВЗ приводить до зростання температури верхнього кільця (зі 150...200 до 250...300 °С), його мастильного голодування і зростання швидкості його зносу (з 15...20 до 40...50 мкм/тис. мотогодин), підвищення зносу кільця по торцях, канавках поршня і гільзах циліндру, 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 розробкою 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 напруг і мікророзтріскування хромового покриття. Виявлено припалювання покриття під дією термічних навантажень, обумовлених підвищенням температури у камері згорання, що супроводжується макророзтріскуванням хрому і зниженням його твердості на певну глибину. Доведено, що альтернативно хромовим покриттям у форсованих двигунах можуть стати пористі мастилоємні плазмові покриття, вільні від 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 частками, що призводить до кореляції із $P_{\text{сх}}^{-1/2}$, і проведено експериментальне визначення тиску схоплювання для серійних гальванічних хромових і дослідних плазмових покриттів.

4. За результатами проведених досліджень розроблено технології триботехнічного зміцнення верхніх компресійних поршневих кілець для форсованих двигунів з урахуванням впливу розроблених плазмових покриттів на кільце (патент України № 37750). Розроблені технології дозволяють впровадження їх у виробництво поршневих кілець без погіршення закріплених документацією службових властивостей і структури матеріалу кілець.

Література

1. Соколов О.Д. Оцінка зносостійкості та надійності хромових покриттів для розробки технології їх нанесення на деталі вузла тертя // Проблеми трибології. - 2003. - №2. - С. 130 – 135.
2. Соколов О. Д., Маннапова О. В., Костржицький А. І. Властивості і застосування хромових покриттів, отриманих різними методами // Проблеми техніки. – 2005. – № 3. – С. 110–128.
3. Соколов О. Д., Маннапова О. В. Особливості зношування хромових покриттів поршневих кілець у термонапружених двигунах // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб.– К.: НАУ, 2008. – Вип. 49, Т. 1. – С. 248–257.
4. 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.
5. 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.
6. Соколов О. Д., Маннапова О. В. Підвищення зносостійкості сірого чавуну іонним азотуванням // Проблеми техніки. – 2006. – № 2. – С. 46–53.
7. 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.
8. Підвищення довговічності сполучення “кільце-поршень” електрофізичними видами обробки / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. П. Олік, В. І. Твердохліб // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. – 2007. – Вип. 40. – С. 144–154.
9. Зносотривкість лазерно опромінених поверхонь поршневих кілець / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов, А. П. Олік, А. І. Костржицький, В. І. Твердохліб // ФХММ. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 120–122.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.