

УДК 621.891

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ З АЗОТОВАНИМ МОЛІБДЕНОВИМ ПОКРИТТЯМ

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

Розглянуто результати експериментальних досліджень впливу процесу іонного азотування плазмового молібденового покриття на зносостійкість поршневих кілець двигунів при механічному і абразивному зношуванні. Випробуваннями доведено, що іонне азотування збільшує зносостійкість покриття до рівня гальванічного хрому при одночасному зміцненні торцевих поверхонь чавунного кільця.

The results of experimental researches of influencing of process of the ionic nitriding of plasma molybdenum coverage are considered on wearproofness of piston rings of engines at a mechanical and abrasive wear. It is proved tests, that the ionic nitriding is increased by wearproofness of coverage to the level of galvanic chrome at the simultaneous consolidating of butt end surfaces of cast-iron ring.

Ключові слова: поршневі кільця, зносостійкі покриття, плазмове напилювання, іонне азотування, механічне і абразивне зношування.

Вступ. Поршневі двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) сьогодні є основою мобільної енергетики всіх галузей господарства, тому питання підвищення працездатності, надійності і довговічності їхнього головного вузла – циліндро-поршневої групи (ЦПГ) у машинознавстві постійно зостається актуальним. Сучасне невпинне форсування за потужністю призводить до появи у термонапружених форсованих двигунах випадків термічної і силової руйнації серійних гальванічних хромових покриттів на робочій поверхні кільця, а їхнє викришування підвищує рівень зношування усіх поверхонь поршневих кілець, що знижує довговічність і надійність сполучень кільце-циліндр і кільце-поршень у ЦПГ ДВЗ [1–3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій з цієї проблеми показує, що підвищення довговічності сполучення кільце-циліндр може бути вирішене застосуванням на робочій поверхні кільця замість хрому плазмово напилених покриттів, чия термостійкість значно перевищує таку у хромових покриттях, а особливості молібдену і його оксиду навіть дозволяють витримувати короткочасні періоди сухого тертя без тужавлення і руйнування [4–6]. Плазмово напилені покриття потребують корегування форми поршневого кільця, але і це завдання успішно вирішене [7–8]. Що стосується підвищення довговічності сполучення кільце-поршень, економічно доцільно зміцнювати торцеву поверхню кільця електрофізичними методами – оксидуванням, азотуванням, електроіскровим легуванням, лазерним опроміненням тощо, які описані в роботах [9–11].

Невирішеною частиною проблеми зостається, по-перше, вагома вартість застосування цих методів [12] і, по-друге, недостатня твердість і зносостійкість плазмово напиленого молібденового покриття, нижча за гальванічний хром [6]. Це не дає можливості широкого застосування технологій електрофізичного поверхневого зміцнення поршневих кілець у масовому виробництві.

Мета роботи – розробити оптимальний технологічний режим підвищення твердості плазмового молібденового покриття до рівня гальванічного хромового азотуванням у розряді, що тліє і дослідити зносостійкість таких кілець для отримання найбільш дешевої фінішної технології зміцнення готового кільця одночасно по робочій і торцевих поверхнях.

Матеріал, з якого зроблені досліджувані верхні компресійні поршневі кільця і зразки для випробувань – сірий спеціальний чавун, у склад якого входять: вуглець (3,7...3,85 %, у тому числі зв'язаний 0,6...0,9 %); кремній (2,3...2,6 %); марганець (0,5...0,8 %); фосфор (0,4...0,6 %); сірка (0,11 %); хром, нікель, мідь, титан і молібден – по 0,1 %. Для плазмового напилювання застосовувався порошок молібдену марки ПМ (ТУ 48-19-313-79).

Напилювання покриттів із порошку молібдена на зразки і поршневі кільця проводилося на плазмовій установці УМП5-68 при напрузі 90 В, струмі 300 А, дистанції 120 мм, температурі підігріву деталі 150 °С і витраті азоту 5 м³ на годину. Обертання оправки з кільцями і переміщення плазмотрону чинилося на токарно-гвинторізному верстаті 1К62. Підготовка поверхні зразків і поршневих кілець, зібраних у оправки під напилювання, проводилася дробоструменевою обробкою сталеву крихтою розміром 0,3...1,0 мм у струмені сухого стиснутого повітря на спеціальній установці. Мікроструктура плазмових покриттів визначалася на поперечних шліфах на мікроскопі МІМ-7А, травлення проводилося у спиртових розчинах азотної і пікринової кислоти. Мікротвердість визначали приладом ПМТ-3.

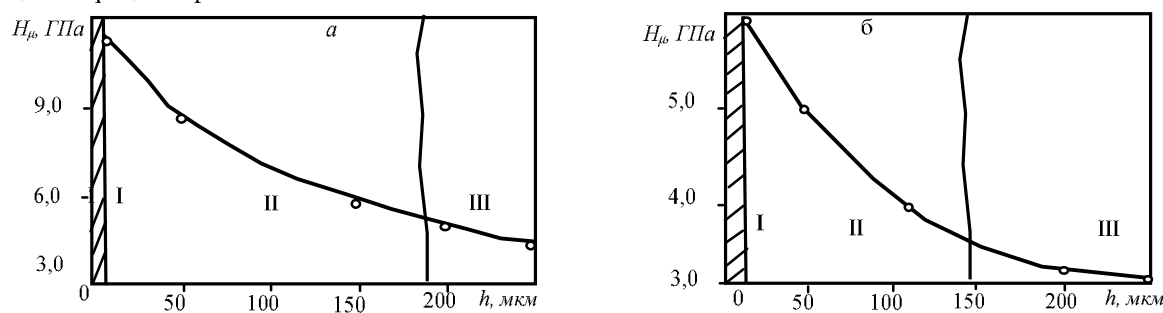
Азотування у розряді, що тліє було проведено на експериментальній вакуумній установці з камерою об'ємом 216 літрів у середовищі азоту за схемою «катод – поршневі кільця, анод – внутрішня поверхня вакуумної камери». Кільця розміщувалися на спеціальних оправках на певній дистанції одне від одного, щоб активна зона у розряді, що тліє охоплювала всі поверхні кожного поршневого кільця. Параметри процесу обиралися за умовою недопущення структурних змін чавуну і службових характеристик поршневого кільця.

Молекулярно-механічний знос покриттів визначали на машині тертя типу СМЦ-2 за схемою «ролик-колодка» при шляху тертя у кожному випробуванні 51 км, що дозволило чітко фіксувати ваговий і лінійний знос зразків-роликів і колодок-контртіл. Покриття наносили на циліндричну поверхню роликів, колодки виготовлялися із сірого чавуну гільзи циліндру або із силуміну поршня. Покриття випробовували при швидкостях ковзання від 1,3 до 4,16 м/с в межах діапазону машини тертя і навантаженні від 0,5 до 4,0 МПа. Режим змащування – граничний.

Абразивний знос деталей циліндро-поршневої групи визначали у стендових випробуваннях двигунів 4Ч11/12,5, які проводилися впродовж 50 годин з 1,5-годинною обкаткою. Методика передбачала прискорення процесу зношування усіх деталей ЦПГ у 100 разів за рахунок введення у кожний циліндр 0,3 г/годину кварцового пилу, що відповідало роботі двигуна у нормальних умовах упродовж 5000 мотогодин. За час випробувань кільце проходило шлях тертя 1656 км при середньому тиску тертя 0,75 МПа і середній швидкості ковзання 9,2 м/с. При кожному випробуванні дослідні кільця встановлювали у двигуни через циліндр із серійними комплектами кілець. У двигуні були серійні гільзи циліндрів із сірого чавуну і серійні силумінові поршні. Вимірювалися лінійні зноси усіх сполучень ЦПГ.

Дослідження мікротвердості за глибиною азотованої зони на молібденовому покритті робочої поверхні кільця і на чавуні торцевої поверхні приведено на рисунку 1. Металографічні дослідження показали, що першою від поверхні спостерігається зона нітридів (переважно $\text{MoN-Mo}_2\text{N}$ для покриття і Fe_4N для чавуну), яка має нерівномірну товщину із-за катодного розпилення, місцями досягаючи 8 мкм. Виміри мікротвердості цієї зони показали значення 11,8 ГПа для молібдену і 6,2 ГПа для чавуну. За шаром нітридів слідує зона внутрішнього азотування із твердим розчином азоту у молібдені і залізі відповідно, мікротвердість якої монотонно знижується із глибиною. Після глибини 150...200 мкм мікротвердість зривається з такою для основного матеріалу.

Контроль основних параметрів поршневих кілець показав, що іонне азотування при вказаних вище параметрах робить незначний вплив на службові характеристики поршневого кільця, залишаючи пружність, просвіт, викривлення і розміри поршневих кілець у межах норми, що дає можливість застосування цієї операції як фінішної.



I – надтонкий шар нітридів; II – дифузійний шар; III – не зміцнений шар основного матеріалу

Рис. 1 – Розподіл мікротвердості за глибиною зміцненої зони за 3 години азотування: а – молібденове плазмове покриття; б – чавун

Результати досліджень залежності молекулярно-механічного зносу азотованого і неазотованого чавуну від швидкості ковзання при терті по чавуну гільзи циліндра і силуміну поршня на попередньо прироблених зразках, надані у табл. 1. Вони показують вагоме підвищення зносостійкості чавуну після іонного азотування у всьому діапазоні швидкостей, причому зношування його збільшується з підвищенням швидкості ковзання по силуміну і зменшується з підвищенням швидкості ковзання по чавуну.

Таке ж вагоме підвищення зносостійкості в умовах молекулярно-механічного зношування дає іонне азотування молібденового покриття, причому дифузія азоту у цьому випадку прискорюється за рахунок нерівноважності структури плазмово напиленого покриття і його відносно великої поруватості.

Такі властивості азотованого чавуну при терті по чавуну і силуміну дають можливість застосування процесу для азотування як верхніх, так і нижніх компресійних чавунних поршневих кілець у двигунах внутрішнього згоряння автомобілів, тракторів і сільгоспмашин, у яких широко застосовуються силумі-

нові поршні і чавунні гільзи циліндрів. При цьому середня швидкість ковзання чавунного кільця по чавунній гільзі має порядок 6,7...9,2 м/с, а чавунного кільця по силуміновому поршню – на порядок менше, тобто від іонного азотування можна очікувати значного покращення службових характеристик усіх чавунних поршневих кілець.

Таблиця 1 – Молекулярно-механічне зношування чавуну і покриття поршневих кілець після іонного азотування: знос за масою, мг / інтенсивність зношування, $I_n \cdot 10^{10}$; машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, граничне змащування (мікротвердість поверхневого шару вказана для глибини 50 мкм)

Матеріал і вид зміцнення ролика	H_r ролика, 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	6,8 / 0,82	4,5 / 0,54	5,8 / 0,69	3,4 / 0,41	5,0 / 0,60	2,8 / 0,34
Незміцнений СЧ	3,0	АЛ-2	2,0 / 0,22	1,4 / 0,15	3,1 / 0,33	1,6 / 0,18	1,4 / 1,54	1,6 / 1,76
СЧ + іонне азотування	5,5	СЧ	6,0 / 0,72	0,6 / 0,07	3,6 / 0,43	1,0 / 0,12	2,6 / 0,31	1,8 / 0,22
СЧ + іонне азотування	5,5	АЛ-2	1,0 / 0,12	0,5 / 0,05	1,1 / 0,12	0,8 / 0,09	1,1 / 1,21	1,2 / 1,31
СЧ + хром гальванічний	9,5	СЧ	5,3 / 0,64	4,3 / 0,52	3,7 / 0,44	2,1 / 0,25	7,6 / 0,91	6,0 / 0,72
СЧ + молібден плазмовий	4,5	СЧ	6,8 / 0,82	2,8 / 0,34	5,3 / 0,64	2,6 / 0,31	9,3 / 1,12	5,8 / 0,70
СЧ + молібден плазмовий + іонне азотування	7,5	СЧ	1,2 / 0,14	1,6 / 0,19	1,3 / 0,15	1,3 / 0,15	3,2 / 0,38	3,8 / 0,45

Як показують наші дослідження, іонне азотування молібденового покриву збільшує його зносостійкість у порівнянні з гальванічним хромовим і дозволяє одночасно зміцнювати усі поверхні кілець.

Випробування азотованих поршневих кілець у двигунах. Результати абразивного зношування азотованих молібденових покриттів, отримані у стендових випробуваннях двигунів із серійними і дослідними верхніми компресійними поршневими кільцями, приведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати стендових випробувань поршневих кілець із азотованим молібденовим покриттям

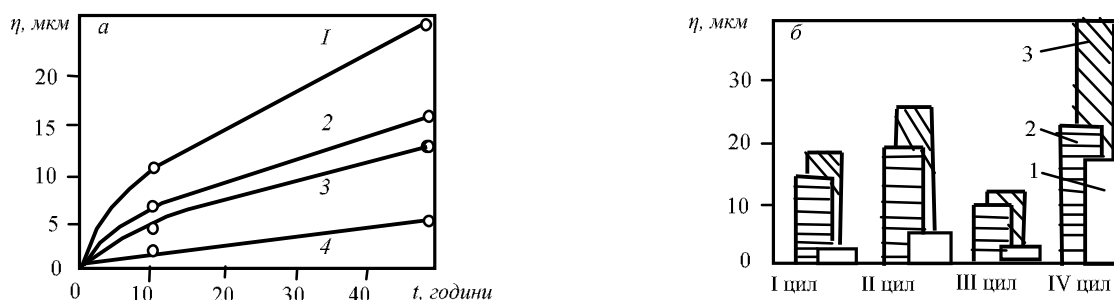
Покриття верхнього поршневого кільця	Радіальний знос кільця, мм	Радіальний знос гільзи циліндру, мм
Серійні кільця, покриття – хром гальванічний	0,12	0,08
Дослідні кільця, покриття – молібден плазмовий	0,16	0,13
Дослідні кільця, покриття – молібден плазмовий + іонне азотування	0,12	0,09

Результати випробувань показують, що сумарний знос сполучення «дослідне кільце з плазмовим молібденовим покриттям – гільза циліндру», який характеризує довговічність циліндро-поршневої групи дизельного двигуна, більший серійного комплекту, що можна пояснити меншою твердістю покриття і його більшою поруватістю, що призводить до шаржування м'якого покриття частками кварцового пилу і більшого зносу чавунної гільзи циліндра.

Збільшення твердості покриття при іонному азотуванні не дає можливості проявлення ефекту шаржування, що зменшує зношування молібденового покриття після азотування на 25...30 % і доводить його до рівня зношування серійних кілець із хромовим покриттям, що дає можливість застосовувати плазмово напilenі кільця у форсованих двигунах, не зменшуючи їхнього моторесурсу.

Результати дослідження абразивного зношування торців поршневих кілець після іонного азотування, отримані у стендових випробуваннях того ж двигуна, представлені на рисунку 2. Результати випробувань показують, що частка зносу сполучення, яка впадає на поршневе кільце, залежно від часу змінюється в межах 60...80 %, а 20...40 % припадає на поршневу канавку. Величина зносу за висотою азотованих кілець після випробувань складала 60 % від зносу серійних кілець, а знос сполучених із азотованими кільцями канавок силумінового поршня за висотою складав 46 % від зносу канавок із серійними кільцями.

Сумарний знос сполучення з азотованими кільцями склав 47 % від зносу серійного сполучення, що є значимим результатом для стендових випробувань і показує наявність ефекту підвищення зносостійкості поверхні поршневих кілець за допомогою процесу іонного азотування в низькотемпературній зоні, що не змінює структури чавуну.



а) залежність зносу від часу випробувань – 1 і 2 – відповідне зношування серійних і азотованих поршневих кілець, 3 і 4 – відповідне зношування канавок поршня у парі із серійними і азотованими поршневими кільцями; б) діаграма зношування за висотою сполучень "кільце – канавка" по циліндрах двигуна: 1 – канавка; 2 – кільце; 3 – сумарний знос сполучення, I і III циліндри – азотовані кільця, II і IV циліндри – серійні кільця

Рис. 2 – Абразивне зношування серійних і дослідних азотованих чавунних поршневих кілець і канавок силумінового поршня за висотою при випробуваннях дизельного двигуна 4С11/12,5

Висновки. Встановлено, що іонне азотування молібденового покриття збільшує його зносостійкість до рівня гальванічного хрому і дозволяє одночасно зміцнювати торцеві поверхні кільця. Це дозволяє запропонувати комплексне рішення проблеми забезпечення надійності і довговічності компресійних поршневих кілець термонапружених двигунів шляхом нанесення замість гальванічного хрому молібденових плазмових покриттів і наступною фінішною зміцнювальною обробкою всіх поверхонь кільця іонним азотуванням.

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.. 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.
3. Соколов О. Д., Маннапова О. В. Оцінка напруженого стану і руйнування гальванічних хромових покриттів поршневих кілець. // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – 2011. – Вип. 40. – Т. 2. – С. 379–381.
4. Соколов О. Д., Олік А. П., Маннапова О. В. Дослідження молекулярного і абразивного зношування плазмових покриттів // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. – 2006. – Вип. 34. – С. 103–109.
5. Маннапова О.В., Соколов О.Д., Кострицький А.І. Трибологічна оптимізація складу металевих плазмових покриттів // Проблеми техніки. – 2007. – № 1. – С. 21–29. Друкована. 0,5 д.а. № 214.
6. Маннапова О. В., Соколов О. Д. Вплив структури і твердості на зношування покриттів. // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 182–189.
7. Соколов О.Д., Маннапова О.В., Молдаванов В.П., Твердохліб В.І. Поршневі кільця для форсованих дизельних ДВЗ з додатковою корекцією епюри тисків // ДВЗ. – 2008. – № 1. – С. 124–132.
8. Патент України на корисну модель № 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.
9. Соколов О. Д., Маннапова О. В., Кострицький А. І., Олік А. П. Підвищення корозійної тривкості сірого чавуну іонним азотуванням // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Т. 42, № 6. – С. 116–118.
10. Соколов О.Д., Маннапова О.В., Твердохліб В.І. Дослідження зносостійкості поршневих кілець термонапружених двигунів після фінішного іонного азотування // Проблеми трибології. – 2008. – № 3 (49). – С. 57–60.

11. Маннапова О. В., Соколов О. Д., Олік А. П., Твердохліб В. І. Вплив покриття електрофізичними методами на зносостійкість торців поршневих кілець // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 120–122.
12. Соколов О. Д., Маннапова О. В., Голованов Ю. М., Казаріна Н. В., Філіппочев О. М.. Техніко-економічне оцінювання триботехнічних технологій // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 50. – С. 194–201.

УДК 621.891:628.304.6.

ДОСЯГНЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОЦЕСУ ХРОМУВАННЯ

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

Розглянуто результати теоретичних і експериментальних досліджень впливу процесу хромування на якість електроліту та зносостійкого покриття. Приведено результати досліджень з розробки промислових технологій регенерації електроліту хромування та промивних вод і утилізації шламів для досягнення екологічної безпеки процесу хромування.

The results of theoretical and experimental researches of influence of process of chrome-plating are considered on quality of electrolyte and wearproof coverage. Results over of researches are brought on development of industrial technologies of regeneration of electrolyte of chrome-plating and scourages and utilization of insoluble sediments for the achievement of ecological safety of process of chrome-plating.

Ключові слова: зносостійке хромування, регенерація електроліту, утилізація шламів.

Вступ. Одним із сучасних шляхів вирішення проблеми підвищення довговічності машин є застосування зміцнювальних покриттів. Найбільш поширеними у машинобудуванні є гальванічні зносостійкі хромові покриття, дослідженню властивостей і застосуванню відповідних технологій яких присвячено багато праць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з розробки хромових покриттів, зроблен в нашій оглядовій роботі [1], показує, що при великій кількості робіт, присвячених властивостям покриттів, дуже мало уваги приділено питанням екологічної безпеки процесу хромування. Більшість наукових досліджень і комерційних пропозицій з екологічних питань присвячена очищенню стічних вод гальванічних виробництв і виділенню з них металів та інших цінних складових, але хрому присвячено лише поодинокі роботи [2–4].

Невирішеною частиною проблеми є практична відсутність подібних робіт для електроліту хромування як середовища, що визначається високими концентраціями хрому на відміну від багатократно розведених стічних вод.

Метою роботи є пропонування на основі наших багаторічних досліджень комплексного способу забезпечення екологічної безпеки процесу хромування (від регенерації електроліту до утилізації шламів) без подачі відходів на загальнозаводську станцію нейтралізації стічних вод, що потребує невиправдано великих витрат води.

Вплив електроліту хромування на якість зносостійкого покриття. Оскільки для забезпечення заданої зносостійкості хромового покриття і тим самим довговічності хромованої деталі необхідно закласти строго певний рівень надійності, повинна бути виконана одна з основних вимог масового виробництва – відтворюваність властивостей. Для цього мають бути проведені виявлення і оцінка дефектів покриттів, що впливають на довговічність деталі. При цьому дефекти можуть бути двох видів: явні, визначувані технічним контролем на заводі-виготовнику, і непрямі, які виявляються тільки в експлуатації.

Явні дефекти покриття, пов'язані з порушенням міцності зчеплення (лушення, непокриття) і неправильним веденням процесу (крупні дендрити, масовий пітинг) відбраковуються зовнішнім оглядом і, як правило, не потрапляють до готової продукції.

Приховані дефекти в більшості випадків не виявляються відділом технічного контролю і, потрапляючи до готової продукції, викликають руйнування покриття вже в експлуатації. Покриття з цими дефектами володіють високим рівнем напруженого стану через порушення в технологічному процесі. Дослідження таких покриттів, отриманих із сульфатного, сульфатно-фторидного і спеціальних електролітів [5, 6], вживаних для зносостійкого хромування поршневих кілець на спеціалізованих заводах протягом багатьох років, виявляє в них високі показники крихкості і утворення тріщин, що при накладенні експлуата-