

УДК 621.891

О. В. МАННАПОВА, О. Д. СОКОЛОВ

*Одеська національна академія харчових технологій***ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ
ЗА РІВНЕМ ЗНОШУВАННЯ**

Досліджено структуру, твердість і зносостійкість плазмових покриттів з металів четвертого ряду четвертого періоду періодичної системи: заліза, нікелю та хрому, напиляних із сумішей відповідних порошків на заміну зносостійких гальванічних хромових покриттів для поршневих кілець форсованих дизелів. За визначенням інтенсивності молекулярно-механічного і абразивного зношування запропоновано оптимальний склад плазмового покриття, яке не поступається гальванічному хрому і вільне від його недоліків.

Ключові слова: зносостійкість, плазмові покриття, мікротвердість, молекулярне зношування, абразивне зношування

Вступ. Світова практика досягнення довговічності і надійності сучасної техніки забезпечується композиційними матеріалами типу «основа-покриття», що дозволяє сполучити зміцнювальні властивості покриттів із необхідними в експлуатації механічними властивостями основи. Головним чинником довговічності у такому разі виступає зносостійкість покриття, тому проблема вибору матеріалу покриття, спроможного працювати в умовах спільної дії знакозміних механічних навантажень, високих температур і агресивних середовищ, видається найбільш актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій по зносостійким покриттям у вузлах тертя показує, що найбільш представницькими є роботи по збільшенню довговічності деталей циліндро-поршневої групи. Гальванічні хромові покриття застосовуються для підвищення зносостійкості верхніх компресійних поршневих кілець двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) вже порядку сорока років, що дає широку статистичну картину зносу [1; 2]. Але в останній час у зв'язку з форсуванням двигунів виявилися й недоліки гальванічного хрому: зниження твердості і зносостійкості при температурах вище 200 °С, випадки припалювання і тужавлення внаслідок низької поруватості і мастилоємності [3]. Все це спонукає дослідників застосовувати газотермічні плазмові покриття з поруватою структурою [4].

Невирішеною частиною проблеми залишається питання вибору матеріалу газотермічного покриття з високим рівнем зносостійкості, врівноваженим малим зносом контртіла тертя, і достатньо високим рівнем адгезійної і когезійної міцності, який у газотермічних покриттів менший по зрівнянню із гальванічними завдяки великій різниці коефіцієнтів термічного розширення газотермічного покриття і основи, а також їхній шаруватій структурі і великій поруватості.

У роботі [5], де зносостійкість розглядається з єдиних структурно-енергетичних позицій теорії Б. І. Костецького, опублікованої в закінченому виді в роботі [6], виводиться, що швидкість зношування крихких матеріалів, до яких можна віднести плазмові покриття, обернено пропорційна когезійній міцності у ступеню від 1 до 6 в залежності від масштабного рівня навантаження. Але, оскільки виміри когезійної міцності покриттів є складною задачею для дослідників, більшість з них віддає перевагу керуватися твердістю покриття.

У нашій роботі [7] показано, що зносостійкість покриттів при однаковому виді зносу залежить не тільки від твердості та міцності матеріалу, але і від струк-

тури покриття. Тільки для покриттів одного типу структури спостерігається кореляція між величиною зносу і твердістю покриттів, при чому ця залежність не є пропорційною, а градієнт зносостійкості по твердості різний для різних типів структури покриттів.

Мета роботи: Оптимізація складу плазмового покриття по твердості і зносостійкості, що дозволило би наблизитися до зносостійкості гальванічного хрому без його недоліків.

У наших дослідженнях зносостійкість газотермічних покриттів визначали при двох видах зношування – молекулярно-механічному і абразивному, при граничному режимі змащування моторним мастилом.

Рівень молекулярно-механічного зношування матеріалу покриття при граничному терті залежить від його хімічного складу, структури, поруватості, міцності зчеплення з основою (адгезійна міцність), яка для газотермічних покриттів обумовлена в значній мірі коефіцієнтом його термічного розширення (КТР). КТР хрому значно менший, ніж у сталі, що обумовлює низький рівень його адгезії. Виміри КТР покриттів пов'язані з великими експериментальними труднощами, даних по ним практично немає, тому дослідники і розробники напильють покриття з комбінованих матеріалів, до складу яких вводять матеріали з великим КТР.

Молекулярно-механічний знос покриттів визначали на машині тертя СМЦ-2 за схемою «ролик-колодка» при шляху тертя у кожному випробуванні 51 км, що дозволило чітко фіксувати результат зношування методом зважування зразків – роликів і колодок – контргіл при числі зразків до 5-ти на одне випробування для досягнення похибки менше 10 %. Покриття наносили на циліндричну поверхню роликів, колодки виготовлялись із сірого чавуну. Покриття випробовували при швидкостях ковзання 1,3; 2,13 і 4,16 м/с в межах діапазону машини тертя і навантаженні 1,75 МПа, що не припускало задирання і тужавлення. Режим змащування – граничний.

На зносостійкість газотермічного покриття великий вплив чинить зчеплення зерен покриття між собою (когезійна міцність), які при малій пластичності покриття викришуються від значних тангенціальних зусиль при терті. Тому треба очікувати, що залежність зносостійкості покриття від рівня його пластичності (як міри закріплення твердих часток у м'якій матриці) проявиться більше при абразивному зносі, чим при молекулярно-механічному, бо зерна абразиву будуть рихтити зерна покриття, що призведе до збільшення зносу.

Абразивний знос визначали у стендових випробуваннях тракторного двигуна 4Ч11/12,5 (Д-240). Випробування проводилися за галузевою методикою впродовж 50 годин з 1,5-годинною обкаткою. Методика також передбачала прискорення процесу зношування усіх деталей циліндро-поршневої групи двигуна приблизно у 100 разів за рахунок введення у кожний циліндр 0,3 г/час кварцової пилюки., що відповідало роботі двигуна у нормальних умовах впродовж 5000 мотогодин.

Покриття були нанесені на робочу поверхню верхніх компресійних кілець, контргілами тертя були гільзи циліндрів із сірого чавуну. Вимірювалися лінійні зноси покриття на кільцях і гільз циліндрів у зоні верхніх компресійних кілець. Час кожного випробування складав 50 годин, за які покриття проходило шлях тертя 1656 км при середньому тиску тертя 0,75 МПа і середній швидкості ковзання 9,2 м/с.

У роботі досліджувана зносостійкість покриттів на основі металів четвертого ряду четвертого періоду системи Д. І. Менделєєва: заліза, нікелю та хрому, отриманих плазмовим напильованням відповідних порошків марок ПЖ (ГОСТ 9849–74), ПН (ГОСТ 9222–79), ПХ (ТУ 14–1–1474–75) та їх сумішів, які утворюють у

покритті однаковий тип структури і рівень поруватості. Властивості цих матеріалів плазмових покриттів, знайдені у довідкових даних [8] і інших джерелах, приведені у таблиці.

Таблиця

Властивості матеріалів плазмових покриттів

1	Матеріал покриття	Fe	Ni	Cr
2	Марка порошку для напилювання	ПЖ ГОСТ 9849–74	ПН ГОСТ 9222–79	ПХ ТУ14–1– 1474–75
3	Густина (г/см^3) матеріалу порошку	7,86	8,96 / 7,8*	7,16
4	Температура плавлення порошку, $^{\circ}\text{C}$	1538	1455	1903
5	Параметр важкості плавлення, $10^{10} \text{кДж}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$	2,08	1,55	2,13
6	Коефіцієнт акумуляції тепла, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{0,5}$	108	190	138
7	Коефіцієнт термічного розширення, $10^6, \text{К}^{-1}$	11,0	13,0 / 8,9*	6,2
8	Відносне подовження (пластичність), %	7,0	42,0	1,5
9	Загальна поруватість покриття з порошків, %	10,5*	12,5*	10,0*
10	Адгезія покриття на сталі і чавуні, МПа	78,5*	5,9–6,8*	15–27*
11	Мікротвердість покриття, ГПа	2,3–2,5*	1,2–1,8*	4,9–7,4*

* – значення для матеріалу покриття із вказаного порошку.

Для досліджень було вибрано чотири види плазмових покриттів із загальною поруватістю порядку 10 % для охоплення всього діапазону твердості:

1. Fe + 25 % Ni з мікротвердістю, $H_{\mu} = 3,6$ ГПа;
2. Fe + 25 % Ni + 25 % Cr, $H_{\mu} = 4,7$ ГПа;
3. Fe + 25 % Ni + 50 % Cr, $H_{\mu} = 7,0$ ГПа;
4. Cr, $H_{\mu} = 7,5$ ГПа.

Для порівняння зношування досліджуваних газотермічних покриттів з широко застосованим на практиці зносостійким гальванічним хромом у роботі використані дані з роботи [2] по зносу гальванічних хромових покриттів з мікротвердістю 9,5 ГПа і загальною поруватістю близько 1 %.

Напилення покриттів здійснювали на установці плазмового напилювання УМП-5-68 у азотній плазмі при напрузі 90 В, струмі 300 А, дистанції 130 мм, температури підігріву основи 150°C і витраті плазмоутворюючого газу – азоту – 5 м^3 у годину. Напилення проводили на сталеві і чавунні циліндричні зразки для машини тертя і поршневі кільця. Поверхню зразків піддавали перед напилюванням дробоструменевої обробці (час – 1,5 хвилини; тиск – 0,35 МПа; дистанція – 110 мм; кут нахилу струменя до поверхні – 45°) для отримання максимальної адгезії покриття. Порошки пропікали безпосередньо перед напилюванням у термошафі при 150°C . Мікротвердість покриттів вимірювалася приладом ПМТ-3, структура контролювалася на металографічному мікроскопі МІМ-7А.

Для можливості порівняння рівнів абразивного і механічного зношування знос покриття обчислювався безрозмірним параметром інтенсивності зношування I_h , який є відношенням абсолютного лінійного зносу до шляху тертя, з урахуванням коефіцієнту перекриття (часу знаходження покриття у процесі тертя), який для покритого ролика з чавунною колодкою дорівнював 0,13, а для покритої робочої поверхні кільця з чавунною гільзою – 1. Отримані результати інтенсив-

ності молекулярно-механічного зношування плазмових покриттів різної мікротвердості із сумішей порошків, а також контртіл тертя при випробуваннях на машині тертя при вказаних вище швидкостях ковзання приведені на рис. 1.

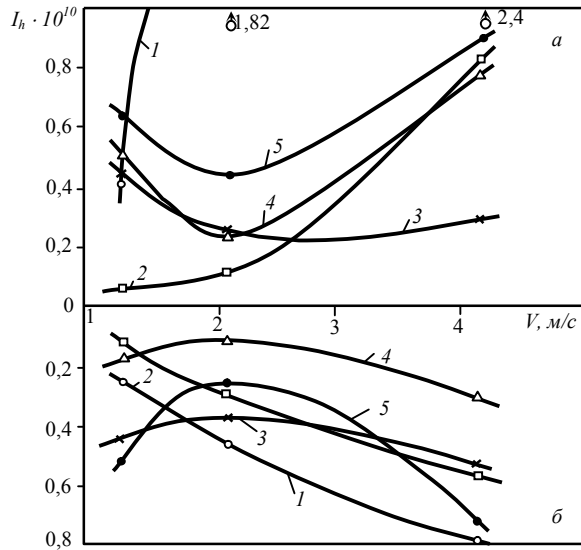


Рис. 1. Залежність інтенсивності молекулярно-механічного зношування плазмових покриттів складу Fe-Cr-Ni від швидкості ковзання: 1 – Fe + 25 % Ni; 2 – Fe + 25 % Ni + 25 % Cr; 3 – Fe + 25 % Ni + 50 % Cr; 4 – Cr; 5 – Cr гальванічний для порівняння із роботи [2]. Машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа: а – знос покриття; б – знос контртіла – сірого чавуну гільзи циліндра

Як і було очікувано, найбільший знос показують найм'якші покриття твердістю 3,6 ГПа (при твердості контртіла тертя із сірого чавуну 3 ГПа), які не мають у своєму складі хрому, причому їхній знос збільшується із збільшенням швидкості ковзання, тобто з ростом температури. Але на малих швидкостях ковзання (до 1,3 м/с) вони показують менший знос, ніж у гальванічного хрому, як для покриття, так і для контртіла тертя. Найменший знос (але для швидкостей ковзання до 2,13 м/с) показують покриття, що містять у своєму складі 25 % Cr і мають середню твердість – 4,7 ГПа. З підвищенням швидкості ковзання (і температури) їхній знос збільшується, але як знос покриття, так і знос контртіла тертя менші ніж у гальванічного хрому.

Покриття з твердістю 7 ГПа, що містять 50 % Cr, вже мають менший знос при високих швидкостях ковзання, тобто мають достатню термостійкість і у всьому діапазоні швидкостей мають більшу зносостійкість, ніж гальванічний хром. Проте, покриття з твердістю 7,5 ГПа, напиляні з чистого порошку хрому без додатку високопластичного нікелю, вже показують більший знос у всьому діапазоні швидкостей (хоча менше зношують контртіло тертя), але й вони показують більшу зносостійкість, ніж у гальванічного хрому і для покриття і для контртіла в усьому діапазоні. Тобто, можна вважати, що для умов молекулярно-механічного зношування поруватий плазмово напиляний хром з високою мастилоємністю при граничному терті має високу зносостійкість, яка перевершує гальванічний хром.

Дослідження абразивного зношування плазмових покриттів різної мікротвердості із сумішей порошків при прискорених стендових випробуваннях на двигуні із введенням кварцової пилюки повинні уточнити результати досліджень по

молекулярно-механічному зношуванню і надати можливість зробити висновки по зносостійкості покриттів, наближені до практичних умов експлуатації. Отримані результати інтенсивності абразивного зношування приведені на рис. 2.

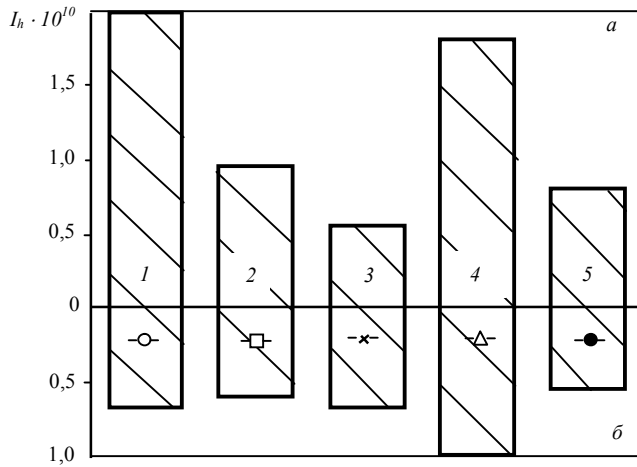


Рис. 2. Інтенсивність абразивного зношування вузла тертя кільце-гільза з плазмовими покриттями складу Fe-Cr-Ni: 1 – Fe + 25 % Ni; 2 – Fe + 25 % Ni + 25 % Cr; 3 – Fe + 25 % Ni + 50 % Cr; 4 – Cr; 5 – Cr гальванічний для порівняння

Як можна бачити, пластичні плазмові покриття (з додатком 25 % нікелю) класично показують збільшення зносостійкості із ростом твердості при практично однаковому рівні зносу гільзи. Максимальну зносостійкість показують пластичні покриття з 50 % хрому. Але зменшення пластичності покриттів за рахунок невведення нікелю (пластичність якого у 28 разів більше пластичності хрому) призводить до зменшення когезійної міцності покриття, його розхитування зернами абразиву і викришування, що веде до різкого збільшення зносу як покриття, так і гільзи циліндру. Тому, незважаючи на більшу твердість хромового плазмового покриття, воно показує більший рівень абразивного зносу, ніж менш тверде, але більш пластичне покриття.

Стендові випробування двигуна 4Ч11/12,5 із введенням у циліндри кварцової пилюки, середній тиск 0,75 МПа, середня швидкість ковзання 9,2 м/с: *a* – знос покриття на поршневому кільці; *б* – знос чавунної гільзи циліндра.

Порівняння з гальванічним хромовим покриттям показує, що більш висока (обумовлена більшою поруватістю) мастилоємність пластичного плазмового покриття призводить до меншого рівня його зносу, а більший на 24 % знос гільзи пояснюється, по-видимому, шаржуванням поруватого покриття частками абразиву. Це дає напрямок подальших технологічних розробок по зменшенню розміру пір при зберіганні загальної поруватості.

На основі даних проведених випробувань з'явилась можливість виявити вплив твердості покриттів на рівень їх зношування для оптимізації складу покриття. Результати побудованої залежності інтенсивності зношування плазмових покриттів від їхньої твердості при молекулярно-механічному і абразивному зношуванні приведені на рис. 3.

На кривих можна бачити явно виражений мінімум зношування покриттів складу Fe-Cr-Ni у діапазоні мікротвердості 6 – 7,0 ГПа.

Висновки:

1. Хром можна вважати відповідальним за твердість і термостійкість покриття, але для оптимальної зносостійкості його масова доля не повинна перевищувати 40–50 %. Задля спорідненості із чавуном і сталлю деталі для забезпечення адгезійної міцності поряд із зберіганням твердості (див. табл.) у складі покриття повинно бути залізо;

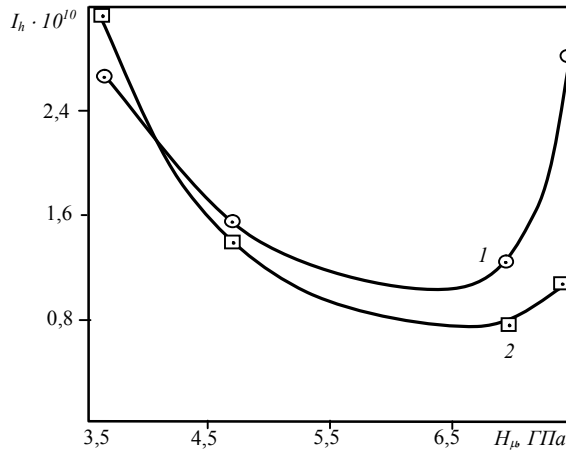


Рис. 3. Вплив твердості плазмових покриттів складу Fe-Cr-Ni на рівень їх зношування: 1 – абразивний знос; 2 – молекулярно-механічний знос

2. Для підвищення когезійної міцності покриття потрібна присутність нікелю, який споріднений із залізом і хромом і, хоча і має невелику твердість, має найбільший КТР з вибраної групи металів;

3. Таким чином, виявлено оптимальний склад покриття 25–35 % Fe + 25 % Ni + 40–50 % Cr, який забезпечує поряд із твердістю достатню когезійну міцність комбінованого покриття і дозволяє одержати рівень зносостійкості, вищий за рівень гальванічного хрому як при молекулярно-механічному, так і при абразивному зношуванні.

Список літератури

1. Соколов О.Д. Оцінка зносостійкості та надійності хромових покриттів для розробки технології їх нанесення на деталі вузла тертя/ О.Д. Соколов // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2003. – №2. – С. 130–135.
2. Соколов А. Д. Прочностные и эксплуатационные свойства плазменных и гальванических хромовых покрытий поршневых колец дизелей / А. Д. Соколов, Н. Н. Новиков // В сб.: Плазмотехнология-93. – Запорожье: Запорожский машиностроительный институт. – 1993. – С. 133–137.
3. 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.
4. Горбань В. Ф. Разработка и опробование особоизносостойких газотермических покрытий из малолегированных сплавов хрома в дизелестроении / В. Ф. Горбань, В. М. Капитанский, П. Т. Новиков, Г. А. Протасов и др. // В сб. научн. тр. ИПМ АН УССР: Конструкционные сплавы хрома. Технология. – Киев. – Наукова думка. – 1988. – С. 102–106.
5. Погодаев Л. И. Повышение надежности трибосопряжений / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин, П. П. Дудко // С-Пб.: Академия транспорта РФ. – 2001. – 304 с.

6. Kostetsky B. The Structural-Energetic Concept in the Theory of Friction and Wear (Sinergism and Selforganization) // "Wear". – 1992. – v. 159. – № 1. – P. 1–15.

7. Маннапова О. В. Вплив структури і твердості на зношування покриттів. / О. В. Маннапова, О. Д. Соколов // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – 2011. – Вип. 56. – С. 182–189.

8. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардаговская // Справочник. – К.: Наукова думка. – 1987. – 544 с.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2013

O. V. MANNAPOVA, A. D. SOKOLOV

DETERMINATION OF COMPOSITION OF PLASMA COVERAGE ON THE LEVEL OF WEAR

A structure, hardness and wearproofness of plasma coverages, is probed from the metals of fourth row of fourth period of the periodic system: iron, nickel and chrome, inflicted plasma dispersion from mixtures proper powders on replacement of wearproof galvanic chromic coverages for the piston rings of the forced diesels. On determination of intensity of molecular-mechanical and abrasive wear optimum composition of plasma coverage which does not yield to the galvanic chrome and freely of his failings is offered.

Keywords: wearproofness, plasma coverages, microhardness, molecular wear, abrasive wear.

Маннапова Оксана Володимирівна – к.т.н., асистент кафедри фізика та матеріалознавства Одеської національної академії харчових технологій

Соколов Олександр Дмитрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізика та матеріалознавства Одеської національної академії харчових технологій.