

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ТА НЕМЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ УДК 621.891

*О. В. Маннапова, канд. техн. наук,
О. Д. Соколов, д-р техн. наук., проф.*

ЗНОШУВАННЯ ПОВЕРХНІ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВИДІВ ОБРОБКИ

Одеська національна академія харчових технологій, asokolovodes@rambler.ru

Досліджено можливості електрофізичних методів зміцнення поверхні сірого чавуну з метою запровадження у виробництво для підвищення зносостійкості і надійності вузла тертя «поршневе кільце – поршень» двигунів внутрішнього згоряння сільгоспмашин.

Вступ. Надійність і довговічність циліндро-поршневої групи двигуна внутрішнього згоряння значною мірою залежать від величини зазору у сполученні «поршневе кільце–канавка поршня», граничний стан якого призводить до поломки кільця та аварії двигуна. Досвід експлуатації двигунів сільгоспмашин дозволив виявити специфічні особливості роботи цього сполучення: збільшення зазора у сполученні є суперпозицією молекулярно-механічного, абразивного і корозійного зношування; найбільший знос спостерігається по нижніх торцях кільця і канавки; при чавунних поршнях знос кільця і канавки приблизно однаковий, а при алюмінієвих поршнях знос сполучення приблизно в три рази більший, ніж при чавунних, причому 70 % зносу припадає на більш тверду торцеву поверхню чавунного кільця, котра на відміну від робочої поверхні кілець не зміцнена [1–3].

Світова тенденція форсування двигунів зробила цю проблему особливо актуальною і викликала пошук рішення в області підвищення зносостійкості торцевої поверхні кільця [4; 5]. Оскільки нанесення застосовуваних у двигунобудуванні зносостійких покриттів на торцеву поверхню кілець у декілька разів підвищує трудомісткість їхнього виготовлення і витрати на екологічну безпеку, доцільно проробити питання застосування електрофізичних методів зміцнення поверхні.

Мета роботи – зробити порівняльний аналіз впливу електрофізичних методів зміцнення: іонного азотування, лазерного опромінювання, електроіскрового легування і катодно-іонного бомбардування торцевої поверхні чавунних поршневих кілець на їх зносостійкість при молекулярно-механічному і абразивному зношуванні.

Методика досліджень. Для досліджень були застосовані зразки із сірого чавуну поршневих кілець і дослідні кільця. Металографію проводили на мікроскопі МІМ-7А, виміри мікротвердості – на приладі ПМТ-3, рентгеноструктурний аналіз – на приладах УРС-0,02 і ДРОН-3. На робочій циліндричній поверхні верхніх компресійних поршневих кілець були нанесені серійні гальванічні хромові покриття з мікротвердістю 9,5 ГПа і загальною поруватістю близько 1 %, або дослідні газотермічні молібденові покриття. Напилення покриттів з молібденового порошку здійснювали на установці плазмового напилювання УМП-5-68 у азотній плазмі при напрузі 90 В, струмі 300 А, і витраті азоту – 5 м³ у годину. Чавунні зразки і поршневі кільця після напилення молібдену шліфували до товщини покриття 0,3 мм. Покриття мали мікротвердість 4,5 ГПа і пористість 10–11 %. Нижні компресійні поршневі кільця у серійній комплектації покриттів не мають.

Молекулярно-механічний знос покриттів визначали на машині тертя СМЦ-2 за схемою «ролик-колодка», шлях тертя у кожному випробуванні 51 км, що дозволило чітко фіксувати результат зношування методом зважування зразків – роликів і колодок – конртіл при числі зразків до 5-ти на одне випробування для досягнення похибки менше 10 %. Зміцнювали циліндричну поверхню роликів із сірого спеціального чавуну поршневих кілець, колодки виготовлялись із сірого чавуну гільзи циліндра (СЧ) та із силуміну поршня АЛ-2. Покриття випробували 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 при граничному режимі змащування. Знос обчислювався безрозмірним параметром інтенсивності зношування $I_{\text{н}}$, який є відношенням абсолютного лінійного зносу до шляху тертя.

Абразивний знос усіх деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) визначали у стендових випробуваннях двигунів 4Ч11/12,5, які проводилися за галузевою методикою 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/час кварцової пилюки, що відповідало роботі двигуна сільгоспмашини у нормальних умовах впродовж 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, в яких верхні кільця мають покриття із гальванічного хрому, нижні компресійні – чавунні без покриття. У двигуні були серійні гільзи циліндрів із сірого чавуну і серійні силумінові поршні. Вимірювалися лінійні зноси усіх сполучень ЦПГ.

Результати досліджень. Іонне азотування поршневих кілець.

У дослідженнях [6; 7] описані технологічні аспекти процесу іонного азотування чавуну, а також зафіксоване підвищення твердості поверхні.

У наших дослідженнях іонне азотування чавунних зразків і поршневих кілець було проведено в середовищі азоту за схемою «катод – зразки, анод – внутрішня поверхня вакуумної камери» у дві стадії: 1) стадія катодного розпилення: напруга – 800 В; густина катодного струму – 1 мА/см²; тиск – 12–14 Па (порядку 10⁻¹ мм рт. ст.); час – 6 хв; 2) стадія насичення азотом: напруга – 800 В; густина катодного струму – 6 мА/см²; тиск – 0,9–1 кПа (порядку 10 мм рт. ст.); час – 1,5 години при температурі 550 °С для недопущення змін у структурі чавуну.

Результати досліджень залежності молекулярно-механічного зносу азотованого і неазотованого чавунів від швидкості ковзання при терті по чавуну гільзи циліндра і силуміну поршня на попередньо прироблених зразках надані у табл. 1. Вони показують суттєве 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.

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 згорання автомобілів, тракторів і сільгоспмашин, в яких широко застосовуються силумінові 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 покращання службових характеристик усіх чавунних поршневих кілець.

Таблиця 1

Молекулярно-механічне зношування сірого чавуну поршневих кілець після іонного азотування: знос по масі, мг / інтенсивність зношування, $I_h \cdot 10^{10}$; машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, граничне змащування (мікротвердість поверхневого шару матеріалу вказана)

№ з / п	Матеріал і вид зміцнення ролика	H_r ролика, ГПа	Матеріал колодки	Швидкість ковзання			
				1,3 м/с		4,16 м/с	
				Ролик	Колодка	Ролик	Колодка
1	Незміцнений СЧ	3,0	СЧ	6,8 / 0,82	4,5 / 0,54	5,0 / 0,60	2,8 / 0,34
2	Незміцнений СЧ	3,0	АЛ-2	2,0 / 0,22	1,4 / 0,15	14 / 1,54	16 / 1,76
3	СЧ + іонне азотування	5,5	СЧ	6,0 / 0,72	0,6 / 0,07	2,6 / 0,31	1,8 / 0,22
4	СЧ + іонне азотування	5,5	АЛ-2	1,0 / 0,12	0,5 / 0,05	11 / 1,21	12 / 1,31
5	СЧ + хром гальванічний	9,5	СЧ	5,3 / 0,64	4,3 / 0,52	7,6 / 0,91	6,0 / 0,72
6	СЧ + молибден плазмовий	4,5	СЧ	6,8 / 0,82	2,8 / 0,34	9,3 / 1,12	5,8 / 0,70
7	СЧ + молибден плазмовий + іонне азотування	7,0	СЧ	1,2 / 0,14	1,6 / 0,19	3,2 / 0,38	3,8/0,4 / 5

У деяких термонапружених дизельних двигунах, в яких трапляються випадки пригорання гальванічного хромового покриття на робочій циліндричній поверхні верхніх компресійних кілець, застосовують напиляні молибденові покриття, але втрачають при цьому у зносостійкості, тобто у довговічності двигуна [6]. Як показують наші дослідження (табл. 1), іонне азотування молибденового покриття збільшує його зносостійкість у порівнянні з гальванічним хромовим і дозволяє одночасно зміцнювати усі поверхні кілець.

Результати дослідження абразивного зношування поршневих кілець після іонного азотування представлені на рис. 1.

Результати випробувань показують, що доля зносу сполучення, яка припадає на поршневе кільце, в залежності від часу змінюється в межах 60–80 %, а 20–40 % припадає на поршкову канавку. Величина зносу по висоті азотованих кілець після випробувань складала 60 % від зносу серійних кілець, а знос сполучених з азотованими кільцями канавок силумінового поршня по висоті складав 46 % від зносу канавок із серійними кільцями. Сумарний знос сполучення з азотованими кільцями складав 47 % від зносу серійного сполучення, що є значимим результатом для промислових випробувань і показує наявність ефекту підвищення зносостійкості поверхні поршневих кілець за допомогою процесу іонного азотування в низькотемпературній області, що не змінює структури чавуну.

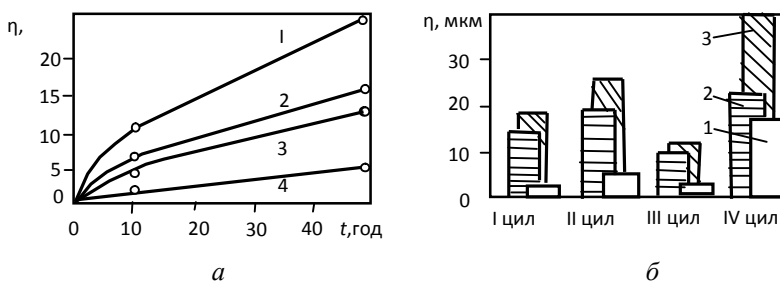


Рис. 1. Абразивне зношування серійних і дослідних азотованих чавунних поршневих кілець і канавок силумінового поршня по висоті при випробуваннях дизельного двигуна 4Ч11/12,5: *a* – залежність зносу від часу випробувань – 1 і 2 – відповідне зношування серійних і азотованих поршневих кілець, 3 і 4 – відповідне зношування канавок поршня у парі із серійними і азотованими поршневими кільцями; *б* – діаграма зношування по висоті сполучень «кільце – канавка» по циліндрам двигуна:

1 – канавка; 2 – кільце; 3 – сумарний знос сполучення

Лазерне гартування поршневих кілець. Лазерне опромінювання для одержання дрібнозернистої структури і підвищення твердості чавуну і покриттів вже було опробовано в роботах [8–11].

В наших дослідженнях лазерне опромінювання поверхонь чавунних поршневих кілець і молібденового покриття проводили на безперервному CO₂-лазері при стабільній потужності у 1 кВт на діаметр плями 3 мм і лінійній швидкості руху поверхні під опромінюванням 12 см/с, що гарантувало незмінність пружності кільця за рахунок проведення лазерного гартування без оплавлення (табл. 2).

Таблиця 2

Молекулярно-механічне зношування сірого чавуну поршневих кілець після лазерного гартування: знос по масі, мг / інтенсивність зношування, $I_n \cdot 10^{10}$. Машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, граничне змащування (мікротвердість поверхневого шару матеріалу вказана)

№ з / п	Матеріал і вид поверхневого зміцнення ролика	H_r ролика, ГПа	Матеріал колодки	Швидкість ковзання			
				1,3 м/с		4,16 м/с	
				Ролик	Колодка	Ролик	Колодка
1	Незміцнений СЧ	3,0	СЧ	6,8 / 0,82	4,5 / 0,54	5,0 / 0,60	2,8 / 0,34
2	СЧ + гартування лазером	7,0	СЧ	1,4 / 0,17	1,0 / 0,11	3,0 / 0,36	2,7 / 0,32
3	Незміцнений СЧ	3,0	АЛ-2	2,0 / 0,22	1,4 / 0,15	14 / 1,54	16 / 1,76
4	СЧ + гартування лазером	7,0	АЛ-2	0,9 / 0,11	1,6 / 0,19	2,5 / 0,29	3,8 / 0,44
5	СЧ + молібден плазмовий	4,5	СЧ	6,8 / 0,82	2,8 / 0,34	9,3 / 1,12	5,8 / 0,70
6	СЧ + молібден плазмовий + гартування лазером	7,0	СЧ	3,6 / 0,43	2,0 / 0,24	2,1 / 0,25	1,3 / 0,16
7	СЧ + хром гальванічний	9,5	СЧ	5,3 / 0,64	4,3 / 0,52	7,6 / 0,91	6,0 / 0,72

Вивчення шліфів опроміненого чавуну показує наявність двох зон від поверхні у глибину: зони гартування до 0,3 мм з мікротвердістю 7–8 ГПа і зони термічної дії від 0,3 до 0,7 мм з відповідним монотонним падінням мікротвердості від 7 до 3 ГПа, після чого спостерігається вихідний матеріал із незмінною структурою і мікротвердістю близько 3 ГПа. В зоні гартування іде розчинення графіту, збільшується вміст кремнію γ -Fe і Fe_3C . На відміну від структури вибіленого чавуну при звичайному гартуванні, ця зона являє собою дрібнодисперсну суміш, подібну до евтектики, яку можна визначити як «квазіевтектика-ледебурит».

Вивчення зразків опромінених лазером молібденових покриттів показало незмінність їх типової для напилювання шаруватої структури, відсутність видимих слідів плавлення молібдену, але збільшення вмісту кисню у покритті приблизно до 5 % при вмісті кисню біля 2 % у неопроміненому покритті, тобто лазерне опромінювання на повітрі плазмового молібденового покриття призводить до його додаткового окислювання. Оксиди Mo_2O_3 і MoO_3 , що

утворюються, збільшують твердість покриття з 4,5 ГПа до 7,0 ГПа. Окрім того, відкрита пористість покриття зменшується з 10–11 % до 6–6,5 %, причому кількість шарів розміром 0,1–2,0 мкм зменшується вдвічі, а шар розміром 2,0–10 мкм, яких у неопромінену покритті було близько 0,5 %, після опромінення не виявлено.

Результати досліджень молекулярно-механічного зношування, приведені у табл. 2, показують значне збільшення зносостійкості як чавуну, так і молібденового покриття, який після опромінення показує більшу зносостійкість, ніж гальванічний хромове покриття. Результати досліджень абразивного зношування опромінених лазером чавунних поршневих кілець при терті як по силуміновій канавці поршня, так і по чавунній гільзі циліндру представлені на рис. 2.

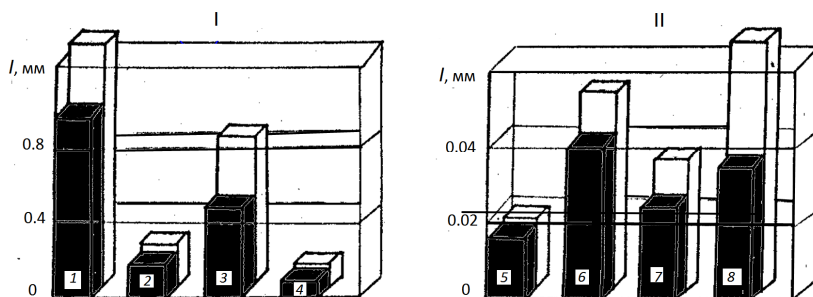


Рис. 2. Абразивне зношування серійних і дослідних зміцнених лазерним гартуванням чавунних поршневих кілець і канавок силумінового поршня при випробуваннях дизельного двигуна 4Ч11/12,5 (діаграми I і II): 1 – збільшення зазора в стику нижнього кільця, 2 – знос нижнього кільця по радіальній товщині, 3 – збільшення зазора в стику верхнього кільця, 4 – знос верхнього кільця по радіальній товщині, 5 – знос нижнього кільця по висоті, 6 – знос гільзи у нижньому робочому поясі, 7 – знос верхнього кільця по висоті, 8 – знос гільзи у верхньому робочому поясі; ■ – комплект із нижнім компресійним кільцем, зміцненим лазерним гартуванням; □ – серійний комплект

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що лазерне опромінювання нижнього компресійного чавунного кільця не тільки зменшує його знос по радіальній товщині і висоті і знос сполученої з ним ділянки циліндру на 20–25 %, але і зменшує, за рахунок перерозподілу сил тертя, знос верхнього компресійного кільця по висоті і знос циліндру у верхньому робочому поясі на 25–50 %, а лазерне опромінювання молібденового покриття верхнього комп-

ресійного кільця не тільки зменшує його знос по вказаних параметрах на 20–40 %, але й доводить його до рівня зносу твердого гальванічного хрому.

Електроіскрове легування поршневих кілець. Електроіскрова обробка поверхні дає можливість отримувати заглиблені у поверхню покриття з високою адгезією до основи, майже не окисленими і, на відміну від інших способів, дозволяє формувати покриття на певних ділянках поверхні і дискретно з заданим кроком [12–15]. Це надає покриттю більшу міцність при ударних навантаженнях, що особливо цінне для торцевої поверхні поршневих кілець, оскільки такі навантаження мають місце при перекладанні поршня і в момент спалаху суміші.

В наших дослідженнях обробку поверхні проводили приладом електроіскрового легування «Дискет», застосовуючи молібденові і графітові електроди. Покриття наносили в автоматичному режимі у вигляді періодичних ділянок (рис. 3).

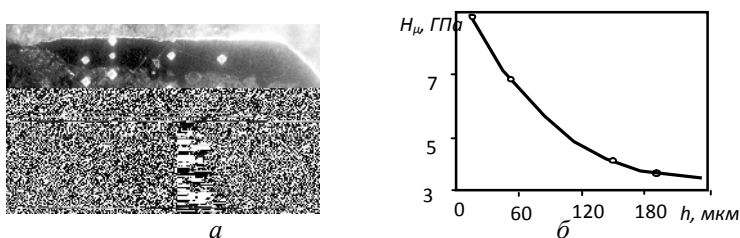


Рис. 3. Мікрошліф поверхні чавуну після електроіскрової обробки графітом (*a*) і залежність мікротвердості від глибини зміцненої зони при електроіскровому легуванні графітом (*б*)

Після шліфування оброблених зразків отримували ділянки поверхні з глибиною зміцнених зон до 0,2 мм і градієнтом мікротвердості від 8 ГПа до значень необробленого чавуну (рис. 3). При цьому виявляється ефективним електроіскрове легування графітом замість дорогих молібденових і твердосплавних матеріалів. Як показали дослідження структури зміцнених зон і випробування на зношування (табл. 3), отримання гартувальних структур при легуванні графітом дає практично той же ефект, що й лазерне гартування. Проведені дослідження показують перспективність застосу-

вання електроіскрової обробки графітом для зміцнення поверхні поршневих кілець.

Таблиця 3

Молекулярно-механічне зношування сірого чавуну поршневих кілець після електроіскрового легування: знос по масі, мг / інтенсивність зношування, $I_n \cdot 10^{10}$; машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, граничне змащування (мікротвердість поверхневого шару матеріалу вказана)

№ з / п	Матеріал і вид поверхневого зміцнення ролика	H_c ролика, ГПа	Матеріал колодки	Швидкість ковзання			
				1,3 м/с		4,16 м/с	
				Ролик	Колодка	Ролик	Колодка
1	Незміцнений СЧ	3,0	СЧ	6,8 / 0,82	4,5 / 0,54	5,0 / 0,60	2,8 / 0,34
3	СЧ + молібден плазмовий	4,5	СЧ	6,8 / 0,82	2,8 / 0,34	9,3 / 1,12	5,8 / 0,70
2	СЧ + ЕІЛ молібденом	6,0	СЧ	3,0 / 0,36	1,9 / 0,23	2,3 / 0,28	1,8 / 0,22
3	СЧ + ЕІЛ графітом	7,0	СЧ	3,8 / 0,46	0,6 / 0,07	2,3 / 0,28	1,8 / 0,22
4	СЧ + гартування лазером	7,0	СЧ	1,4 / 0,17	1,0 / 0,11	3,0 / 0,36	2,7 / 0,32

Катодно-іонне бомбардування поршневих кілець.

Катодно-іонне бомбардування титанового електроду у залишковій атмосфері азоту на установках типу «Булат» з утворенням на зразках тонкошарового покриття з нітриду титана завдяки високій мікротвердості останнього в порівнянні з іншими покриттями, високій міцності зчеплення, малій товщині і високощільній структурі є ефективним для зміцнення не тільки інструмента, але і машинобудівних деталей, у т.ч., поршневих кілець [16–18].

У наших дослідженнях покриття з нітриду титана наносили на установці «Булат» при струмі дуги 100 А, прискорюючій напрузі на зразку 120 В, тиску азоту 0,5 Ра і температурі 500 °С. Покриття на чавунних роликах для машини тертя і чавунних поршневих кільцях мали золотавий колір, однофазний склад TiN, мікротвердість 20–22 ГПа і товщину 5–7 мкм. Такі властивості покриття роблять його легким для застосовним і кращим для

зміцнення торцевої поверхні кільця: мала товщина вписується в допуск висоти кільця, тобто, дає можливість зміцнювати готові кільця; температура процесу не доходить до зони структурних змін чавуна, а надвисока твердість дозволяє успішно справитися з абразивною пилюкою в двигуні, що шаржуються у м'яку силумінову канавку поршня і призводить до значного зносу кільця по торцях.

Ефективність цих покриттів була перевірена дослідженнями на машині тертя і випробуваннями на двигуні (табл. 4 і рис. 4). Дослідження на машині тертя, що визначають молекулярно-механічний знос, показують значне підвищення зносостійкості, особливо в області низьких швидкостей ковзання, властивих цьому вузлу тертя, але у порівнянні з лазерним гартуванням чавуну (табл. 4) можна бачити, що при такій високій мікротвердості починає збільшуватися знос контртіла – сірого чавуну.

Таблиця 4

Молекулярно-механічне зношування сірого чавуну поршневих кілець після катодно-іонного бомбардування з утворенням нітриду титану: знос по масі, мг / інтенсивність зношування, $I_d \cdot 10^{10}$; машина тертя СМЦ-2, тиск 1,75 МПа, граничне змащування (мікротвердість поверхневого шару матеріалу вказана)

№ з/п	Матеріал і вид поверхневого зміцнення ролика	H_c ролика, ГПа	Швидкість ковзання			
			1,3 м/с		4,16 м/с	
			Ролик	Колодка	Ролик	Колодка
1	Незміцнений СЧ	3,0	6,8 / 0,82	4,5 / 0,54	5,0 / 0,60	2,8 / 0,34
2	СЧ + КІБ – нітрид титану	20,0	0,4 / 0,05	1,8 / 0,22	2,5 / 0,30	2,6 / 0,31
3	СЧ + гартування лазером	7,0	1,4 / 0,17	1,0 / 0,11	3,0 / 0,36	2,7 / 0,32

Інша картина виявляється при випробуваннях на абразивне зношування, де контртілом тертя є силумінова канавка поршня, яка у двигуні шаржована твердими частинками пилу і твердими продуктами зносу хромового покриття з робочої поверхні кільця. В таких умовах зміцнення цим покриттям торців поршневих кілець показало в стендових випробуваннях двигуна зниження зносу сполучення «кільце – канавка поршня» вдвічі в порівнянні із серійними кільцями (рис. 4).

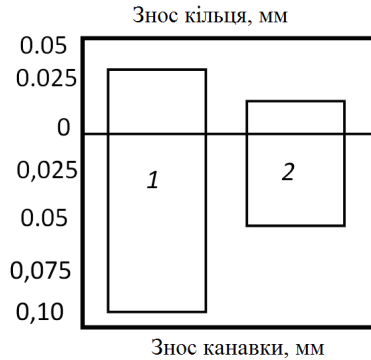


Рис. 4. Абразивне зношування верхніх компресійних кілець і канавок силумінового поршня при випробуваннях дизельного двигуна 4Ч11/12,5: 1 – знос сполучення серійних кілець; 2 – дослідні кільця, зміцнені катодно-іонним бомбардуванням з осаджуванням нітрида титану

Висновки. Електрофізичні методи обробки чавунних поршневих кілець дозволяють підвищити зносостійкість і надійність циліндро-поршневої групи термонапружених дизельних двигунів на 20 - 50 %, а їхнє застосування у виробництві дозволяє значно знизити екологічне навантаження і підвищити наукомісткість сучасного виробництва поршневих кілець.

Список літератури

1. *Furuhami S.* Measurement of piston frictional force in actual operating diesel engine / S. Furuhami, M. Takiguchi // SAE Technical Papers. – 1979. – No 790855. – P. 19–20.
2. *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.
3. *Александров А. Ю.* Износ и эксплуатационные характеристики высоконагруженных деталей с различными видами защиты рабочего слоя материала / А. Ю. Александров, Р. В. Спиринов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 2. – С. 2–5.
4. *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.

5. *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.

6. *Петров С. В.* Газотермические покрытия для упрочнения тяжело нагруженных деталей мощных дизелей / С. В. Петров, В. Н. Коржик, В. Ф. Горбань, В. Д. Демидов, А. В. Новоселов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 6. – С. 20–30.

7. *Соколов О. Д.* Підвищення зносостійкості сірого чавуну іонним азотуванням / О. Д. Соколов., О. В. Маннапова // Проблеми техніки. Науково-виробничий журнал. – 2006. – № 2. – С. 46–53.

8. *Соколов А. Д.* Лазерное упрочнение поршневых колец / А. Д. Соколов, С. В. Зеленова, А. Н. Сафонов // Двигателестроение. – 1986. – № 3. – С. 48–49.

9. *Чернета О. Г.* Исследование физико-механических свойств поверхности поршневых колец, обработанных лазером / О. Г. Чернета, А. Н. Коробочка, Н. Н. Козина, А. М. Пустовойт // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. тр. ДонГТУ. – 2001. – Вып. 18. – С. 71–75.

10. *Kovalchenko M. S.* Increase in durability of high-speed steel cutting tools by spark hardening with subsequent laser treatment / M. S. Kovalchenko, A. V. Paustovsky, V. P. Botvinko, Yu. V. Gubin // Functional Materials. – 2001. – 8, n. 1. – P. 135–139.

11. *Похмурська Г. В.* Зносостривкість лазерно модифікованих електродугових покриттів з порошкового дроту ФМІ-2 / Г. В. Похмурська, В. М. Довгунік, М. М. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – № 4. – С. 61–64.

12. *Данильченко Ю. В.* Закономірності формування електроіскрових покриттів на сталевій підкладці / Ю. В. Данильченко., О. М. Семирга // Металознавство та обробка металів. – 2003. – № 2. – С. 25–30.

13. *Арсенюк В. В.* Дослідження фазового складу молібденових покриттів на залізі та сталі під час електроіскрової обробки / В. В. Арсенюк, Д. С. Герцрікен, В. Ф. Мазанко, В. В. Михайлов, П. В. Перетятку // Доп. НАН України. – 2000. – № 11. – С. 139–141.

14. *Paustovsky A. V.* Wear-resistant coating formation by spark treatment / A. V. Paustovsky, S. M. Kirilenko, Yu. V. Gubin, M. P. Berezhnitskaya // Functional Materials. – 2001. – 8, No. 1. – P. 140–144.

15. *Zaitseva N. V.* Improvement of electric spark coatings by vibration loading method / N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, A. G. Molyar, O. A. Shmatko // Met-allofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2001. – 23, Special Issue. – P. 262–267.

16. *Васильев М. А.* Покрытия из нитрида титана, осажденные методом вакуумного дугового разряда / М. А. Васильев, В. Е. Панарин,

А. А. Ткачук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – 22, № 11. – С. 58–71.

17. *Гладких Л. И.* Остаточные напряжения и структура покрытий из нитридов титана и хрома, полученных методом ионно-плазменного осаждения / Л. И. Гладких, С. В. Малыхин, А. Т. Пугачев и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2003. – 25, № 6. – С. 763–776.

18. *Чебан Т. В.* Закономерности формирования структуры и свойств ионно-плазменных покрытий на основе карбидов и нитридов / Т. В. Чебан, А.И. Костржицкий, А. Д. Соколов // Проблемы техники. Научно-виробничий журнал. – 2007. – № 2. – С. 28–38.

Маннапова О. В., Соколов А. Д. **Износ поверхности поршневых колец после электрофизических видов обработки**// Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С.129–140.

Исследованы возможности электрофизических методов упрочнения поверхности серого чугуна с целью внедрения в производство для повышения износостойкости и надежности узла трения «поршневое кольцо – поршень» двигателей внутреннего сгорания сельхозмашин.

Рис. 4, табл. 4, список лит.: 18 наим.

Mannapova O. V., Sokolov A. D. **Wear of piston rings interface after electrophysics treatment**

Comparative possibilities of electrophysics methods of work-hardening of surface of grey cast-iron are in-process investigational with a purpose introduction in production for the increase of wearproofness and reliability of knot of friction «piston ring – piston» of combustion engines of agricultural machines.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2012