

105. Соколов О. Д. Процес та обладнання для регенерації електроліту хромування та промивних вод // Інноваційні розробки ОНАХТ - Одеса: ОНАХТ, 2005, С. 35–37.
106. Соловух Е. К., Ляшенко Б. А., Соколов А. Д. Модернизация машиностроения Украины по технологиям поверхностного упрочнения // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – № 2. – С. 112–118.
107. О. Д. Соколов, О. В. Маннапова. 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.
108. 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.
109. 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.

УДК 621.436: 621.793/.795

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ КОРЕГУВАННЯМ ЇХ ФОРМИ

Соколов О. Д., д-р техн. наук, проф., Маннапова О. В., канд. техн. наук, ас.
Одеська національна академія харчових технологій

Розроблено метод урахування впливу нанесення плазмового покриття при розрахунку форми заготовки кільця, розраховано таблицю необхідних для розрахунку даних для виготовлення таких кілець в умовах підприємства – виготовлювача. Випробуваннями двигунів показано, що використання розробленої додаткової корекції епюри поршневих кілець із плазмовими покриттями дозволяє зменшити сумарний знос сполучення «кільце – циліндр» у форсованих дизельних двигунах за рахунок рівномірного прилягання кільця до циліндра і довести знос до рівня зношування твердих гальванічних хромових покриттів.

The method of account of influencing of deposition of plasma-spraying coatings is developed at the calculation of shape of purveyance of piston-ring, the table of data necessary for a computation is calculated for making of such rings in the conditions of factory-manufacturer. It is demonstrated by the tests of engines, that the use of the developed additional correction of epure of piston-rings with plasma coatings allows to decrease the total wear of interface “ring is shell” in the forced diesels engines due to the even adjoining of ring to the shell and to take a wear to the level of wear of hard galvanic chromic coatings.

Ключові слова: плазмові покриття, поршневі кільця, епора радіальних тисків, працездатність, довговічність, зносостійкість.

Вступ. Питання підвищення працездатності, надійності і довговічності ДВЗ, а особливо їхнього головного, найбільш напруженого органу – циліндро-поршневої групи, у машинознавстві постійно зостається актуальним.

У розв'язанні цих задач досягнуто певних успіхів. Довговічність ЦПГ ДВЗ суттєво підвищена застосуванням гальванічного зносостійкого хромування робочої поверхні компресійних поршневих кілець, яке постійно вдосконалюється як за конструктивними, так за технологічними і матеріалознавчими параметрами на основі наукових досліджень. Проведена робота з дослідження режимів нанесення і зносостійкості для застосування на поршневих кільцях газотермічних покриттів різноманітного складу й інших методів зміцнення поверхні [1–4].

Невпинне форсування дизельних двигунів за потужністю на сьогоdnішньому етапі призводять до термічної і силової руйнації серійних хромових покриттів на робочій поверхні і підвищенню рівня зношування торцевої поверхні кільця, що перешкоджає збільшенню довговічності і надійності ЦПГ ДВЗ. Протидією тому можуть бути термічно стійкі плазмово напиляні пористі мастилоємні покриття на робочій поверхні кільця і фінішна зміцнювальна обробка всіх поверхонь кільця. У деяких термонапружених дизельних двигунах, застосовують напиляні молібденові покриття, але, у порівнянні з гальванічними хромовими, втрачають при цьому у зносостійкості, що викликає необхідність їхнього зміцнення. Як показують наші дослідження, іонне азотування молібденового покриття збільшує його зносостійкість до рівня гальванічного хрому і дозволяє одночасно зміцнювати торцеві поверхні кільця [5].

Але збільшення зносостійкості покриття призводить до підвищення довговічності поршневого кільця у ЦПГ ДВЗ тільки при його рівномірному приляганні до гільзи циліндра, що досягається наданням

кільцо потрібної епюри радіальних тисків у процесі виробництва [6, 7]. На відміну від низькотемпературного процесу гальванічного хромування, вплив якого не враховується у виробництві при завданні епюри, нанесення покриттів високотемпературним плазмовим струменем впливає на форму кільця [8], що викликає необхідність урахування цього впливу і проведення досліджень для його чисельного визначення.

Мета роботи – дослідити вплив процесу нанесення плазмових покриттів із наступним іонним азотуванням на епюру радіальних тисків верхнього компресійного кільця і його зносостійкість у форсованому дизельному двигуні і визначити міру та спосіб додаткового корегування епюри кільця у процесі його виробництва.

Отримання дослідних кілець і методика проведення досліджень. Для досліджень були застосовані серійні і дослідні верхні компресійні поршневі кільця двигуна 4Ч11/12,5, усі інші кільця були серійної комплектації. На робочій циліндричній поверхні верхніх компресійних кілець були серійні гальванічні хромові покриття товщиною 0,12–0,15 мм з мікротвердістю 9,5 ГПа і загальною поруватістю близько 1%, або дослідні плазмові покриття, розташовані у канавці. Напилення покриттів із молібденового порошку, а також порошоків заліза, нікелю та хрому здійснювали на установці плазмового напилювання УМП–5-68 у азотній плазмі при напрузі 90 В, струмі 300 А, і витраті азоту – 5 м³ на годину. Поршневі кільця збирали на оправки обтиснутими до круглої форми, проточували на них канавки для покриття, а після напилювання покриття шліфували на оправках до номінального розміру, при цьому товщина покриття складала 0,25–0,3 мм. Молібденові покриття мали мікротвердість 4,5 ГПа і пористість 10–11 %.

Зміцнювальна обробка готового дослідного кільця – іонне азотування, яке було проведено на кільцях у вільному стані в середовищі азоту за схемою “катод – кільця, 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 хвилин. 2) стадія насичення азотом: напруга – 800 В; густина катодного струму – 6 мА/см²; тиск – 0,9–1 кПа (порядку 10 мм рт. ст.); час – 3 години при температурі 500 °С для недопущення змін у структурі чавуну кілець. Мікротвердість молібденових покриттів після азотування – 7 ГПа.

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/час кварцової пилюки, 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 впливу процесу нанесення покриття на епюру радіальних тисків кільця проводилися на спеціальному пристрої – епюромірі [7] для визначення умовного модуля пружності по периметру поршневих кілець.

Обґрунтування розрахунків. Найбільш суттєвою частиною розрахунку поршневого кільця є розрахунок його форми у вільному стані, за яким розраховують ливарну модель і копір копіювального верстата для механічної обробки для виготовлення заготовки кільця. Ця задача зводиться до визначення форми осьової лінії плоскої криволінійної пружини, яка у робочому стані набуває форми розрізаного кільця із заданим законом розподілу радіального тиску. Кривизна осьової лінії визначається методами опору матеріалів із рівняння $\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho_\psi} = M_\psi / EJ$, а згинальний момент $M_\psi = q_0 br^2 \int_\psi^\pi \sin(\varphi - \psi) d\varphi$, звідки

радіус кривизни у будь-якому перетині кільця у вільному стані визначається як:

$$\rho_\psi = \frac{r}{1 - \frac{br^3}{EJ} \int_\psi^\pi q_\varphi \sin(\varphi - \psi) d\varphi}, \quad (1)$$

де: r – радіус середньої лінії кільця у робочому стані, $r = \text{const}$; b – висота кільця; E – умовний модуль пружності матеріалу кільця; J – момент інерції перетину кільця відносно нейтральної осі, для прямокутного кільця радіальною товщиною t $J = bt^3/12$; φ – кут визначення точки прикладення сили; ψ – кут визначення точки, де виникає момент від прикладеної сили; q_φ – навантаження по периметру кільця на одиницю висоти кільця; q_0 – інтенсивність рівномірно розподілених по периметру напруг від зосередженої на кінцях замка ($\psi = \pi$) сили Q , яка характеризує пружність кільця, при $\psi = 0$ (на спинці кільця) максимальний згинальний момент $M_{\text{max}} = 2q_0 br^2 = 2Qr$.

Рівняння (1) має аналітичне рішення тільки у випадку рівномірної епори радіальних тисків, коли $q_\psi = q_0 = \text{const}$, і у випадку, коли умовний модуль пружності матеріалу кільця однаковий по периметру, $E = \text{const}$. На практиці із-за різниці умов охолодження відливки поршневого кільця спостерігається неоднорідність властивостей чавуну по довжині кола із зміною модуля пружності до 20 %, що призводить до появи радіальних отворів при встановленні у гільзу кілець, розрахованих за рівнянням (1). Тому розрахунок кільця потрібно вести з урахуванням розподілення по периметру радіальних тисків, модуля пружності і залишкових формозмін, яких набуває заготівка у процесі виробництва.

При цьому функція розподілу модуля пружності по периметру для розрахунку має вигляд:

$$E_\psi = E \left[1 + \frac{A\psi}{2\pi} (1 - \cos \psi + \sin \psi) \right], \quad (2)$$

де A – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зміни E_ψ по периметру від спинки (E) до замка кільця. Для сірого спеціального чавуну він складає $+ (0,08 - 0,12)$, для високоміцного чавуну $A = 0$ і $E_\psi = E$.

Залишкові формозміни обумовлені схильністю чавуну до пластичних деформацій навіть при малих навантаженнях. За три – чотири навантаження, які характерні для технологічного процесу обробки заготовок поршневих кілець, сумарне значення залишкової деформації складає для сірого спеціального чавуну 15–18 %, для високоміцного – 4–7 %. Розподіл залишкової деформації по периметру кільця залежить від навантаження і структури матеріалу і визначається із емпіричної залежності:

$$C = B^{2n+1} \sqrt{\pi - \psi}, \quad (3)$$

де C – коефіцієнт залишкової деформації; B – коефіцієнт пластичності матеріалу, який складає 0,12–0,16 для сірого чавуну і 0,06–0,08 для високоміцного чавуну; n – показник ступеня, який характеризує зміну кривої, для сірого чавуну $n = 2$, для високоміцного чавуну $n = 1$.

Для того, щоб поршневе кільце, маючи круглу форму при встановленні у циліндр, мало рівномірний тиск на циліндр упродовж всього процесу зношування, особливо на кінцях замка, його потрібно розрахувати і виготовити із первісно підвищеним тиском на кінцях замка. Поршневому кільцю чотиритактного швидкохідного дизельного двигуна надають у процесі виготовлення групоподібну епору радіальних тисків (симетричну відносно вісі X , що проходить по діаметру кільця від спинки до замка) з тиском біля замка по відношенню до середнього тиску у межах $m = 1,4-1,5$. Для урахування цього фактора вводять залежність згинального моменту M_ψ від m :

$$M_\psi = q_0 b r^2 \left[1 + (1 - \xi) \cos \psi - \frac{m-1}{1,8613} \sum_{n=2}^{n=12} \frac{1}{n^2 - 1} \frac{q_n}{q_0} \cos n\psi \right], \quad (4)$$

де $\xi = -\frac{m-1}{1,8613} \sum_{n=2}^{n=12} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2 - 1} \frac{q_n}{q_0}$. Введення коефіцієнта m у формулу (4) дозволяє отримати значення

моменту для потрібної корекції групоподібної епори радіальних тисків.

Для використання розрахунку форми кілець у їхньому виробництві [11] зручно використати диференціальну залежність радіуса кривизни заготівки кільця у вільному стані від кута α між дотичною до точки на осьовій лінії кільця і віссю X :

$$\frac{1}{\rho_3} = -\frac{d\alpha}{rd\psi} \quad (5)$$

(по визначенні α при $\psi = 0$ $\alpha = \pi/2$).

Оскільки залишкова деформація по периметру кільця у (3) задається як відносне збільшення розрахункових радіусів кривизни по периметру готового кільця: $C = \frac{\rho_3 - \rho_\psi}{\rho_3 - r}$, то з урахуванням (1) і (5) можна визначити значення α :

$$\alpha = -\int \frac{1 - \frac{M_\psi r}{EJ}}{1 + \frac{C}{1-C} \frac{M_\psi r}{EJ}} d\psi + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Рівняння (6) є універсальним для розрахунку форми заготівки, так і форми готового поршневого кільця. Разом з основними даними геометрії, матеріалу і пружності кільця, які вводяться у розрахунок

безрозмірним параметром $K = \frac{q_0 br^3}{EJ}$, особливості розподілу по периметру модуля пружності, залишкових деформацій і корекції епюри радіальних тисків вводяться у розрахунок (6) залежностями E_ψ із (2), C із (3) і M_ψ із (4). Метод визначення форми поршневого кільця стає розрахунково-експериментальним із уведенням корегувальних функцій і отриманням результату чисельним способом на комп'ютері із-за складнощів перерахунку декартових координат у полярні. Результат отримують у вигляді таблиць, за якими встановлення форми заготовки поршневого кільця у вільному стані значно спрощується для виробництва, оскільки для кожного значення параметра K у характерних точках кривої від спинки до замка кільця в таблицях приводяться коефіцієнти λ до постійної величини r , за якими вираховують основний радіус заготовки, прирощення його по периметру і розмір замка у вільному стані.

Дослідження впливу процесу нанесення покриття на характеристики кільця. При виготовленні дослідних партій поршневих кілець з плазмовими покриттями технічним контролем готової продукції було зафіксовано зменшення пружності кілець і навіть випадки появи радіального зазору біля замка кілець при встановленні їх у калібр. Це свідчить про суттєві зміни форми заготовок поршневих кілець у процесі напилювання плазмових покриттів у порівнянні із гальванічним осаджуванням хромових покриттів на серійні кільця. Якщо при осаджуванні серійних хромових покриттів сумарна величина залишкової деформації форми поршневих кілець із сірого чавуну складає у виробництві 15–18%, а із високоміцного чавуну 7,5–8 %, то, як показують наші вимірювання, процес напилювання плазмових покриттів із порошкових матеріалів збільшує залишкову деформацію кілець до 26–29 % для сірого чавуну і до 16 % – для високоміцного.

Виділення процесу напилювання плазмового покриття із процесу механічної обробки поршневих кілець, проведене при дослідженнях, показано у таблиці 1, де приведено вплив кожної операції технологічного процесу на коефіцієнт залишкової деформації замка кільця.

Таблиця 1 – Коефіцієнт залишкової деформації замка кільця за технологічними операціями

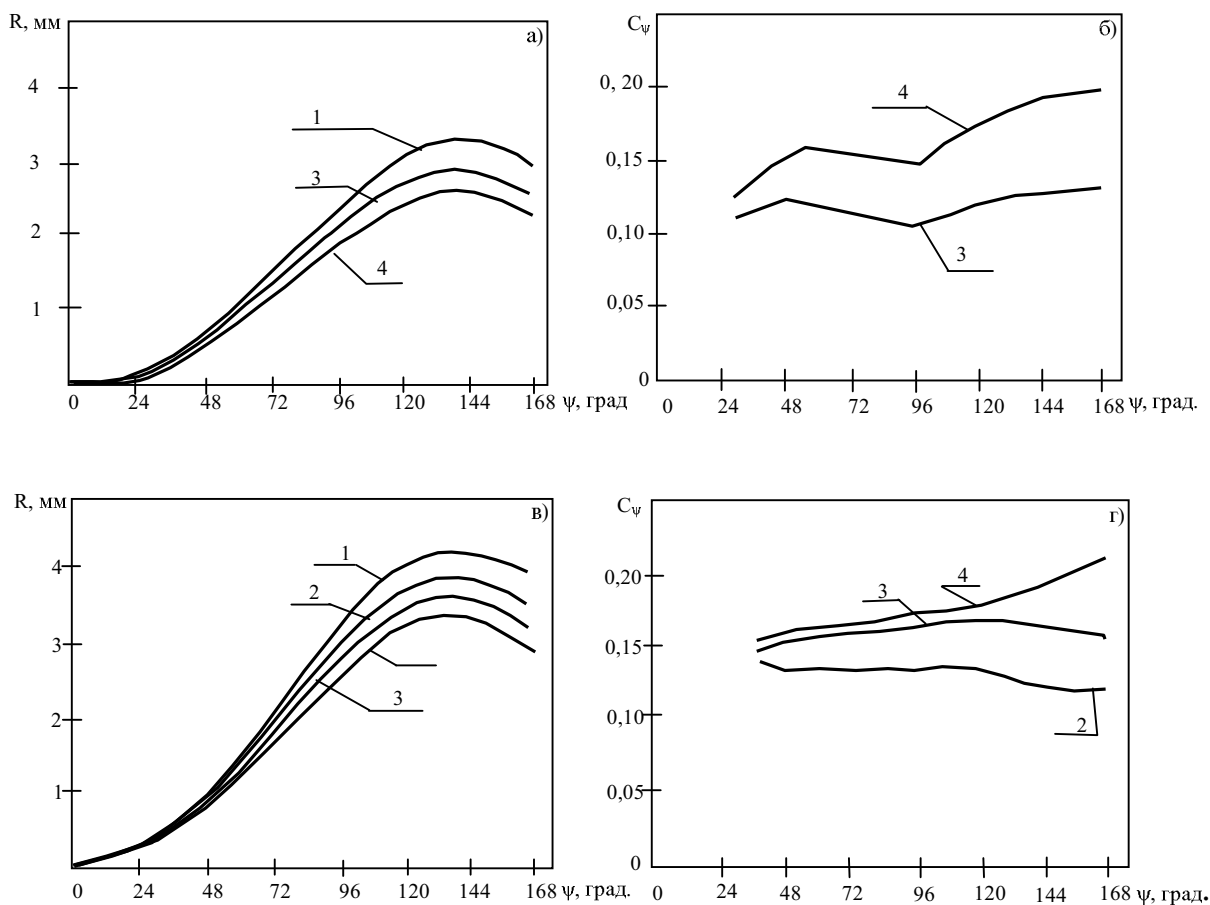
Операції технологічного процесу	Коефіцієнт залишкової деформації замка, С	
	Сірий чавун	Високоміцний чавун
Чорнове обточування і розточування на копіювальному верстаті, вирізка і калібрування замка	0,08 – 0,10	0,02 – 0,04
Зборка кілець на оправки у робочому стані і обточування канавок під покриття, витримка на оправках впродовж 4 год.	0,03 – 0,04	до 0,02
Те ж саме, витримка 48 год.	0,03 – 0,04	до 0,02
Напилювання плазмового покриття на оправки з кільцями, шліфування оправок з кільцями для зняття припуску до номінального діаметра	0,15	0,10
Те ж саме без напилювання плазмового покриття	0,03 – 0,04	до 0,02

Результати проведених на епюромірі досліджень зміни форми заготовок поршневих кілець при нанесенні покриттів, приведені на рис. 1, показують, що при технологічній обробці заготовок без операції нанесення покриттів спостерігаються найменші залишкові деформації форми, які мають тенденцію до зменшення абсолютної величини у напрямі від спинки ($\psi = 0$) до замка ($\psi = 176$ град.) заготовки. При виготовленні кілець з гальванічним хромовим покриттям величина залишкової деформації становиться більше, але зостається рівномірною від спинки до замка. Найбільші залишкові деформації спостерігаються при нанесенні плазмового покриття, причому їхня величина збільшується від спинки до замка.

Виміряні епюри радіальних тисків (рис. 2) явно показують, що плазмове напилювання покриття призводить до зниження корекції епюри m на 16 % для кілець із сірого чавуну і на 40 % для кілець із високоміцного чавуну. Залишкові зміни форми кільця, які викликають зменшення корекції епюри радіальних тисків, пов'язані зі зміною механічних властивостей матеріалу заготовки кільця, що насамперед відбивається на зміні умовного модуля пружності E , величина якого згідно з рівнянням (2) відіграє найважливішу роль у розрахунку форми заготовки кільця.

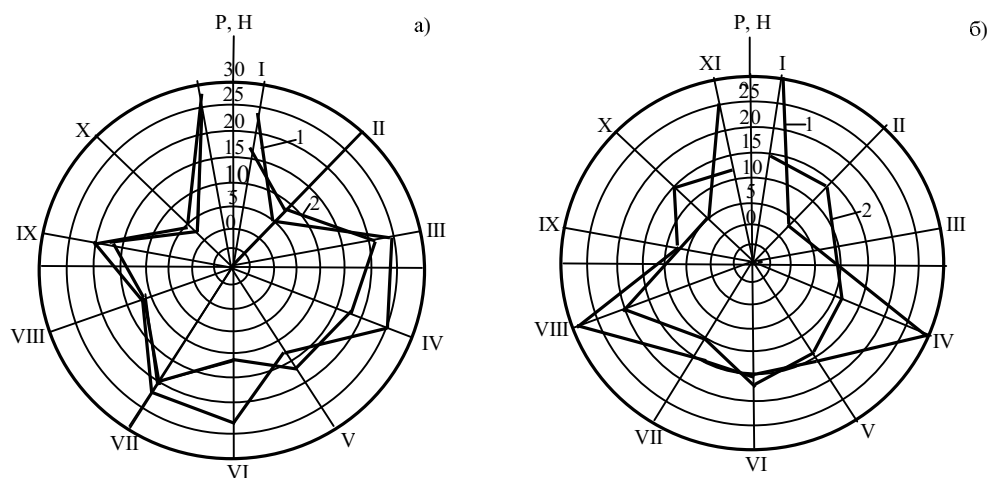
У нашому випадку після плазмового напилювання покриття величина умовного модуля пружності E кілець із сірого чавуну знизилася в середньому з 95,6 ГПа до 88,2 ГПа, тобто на 7,7 %, а для високоміцного чавуну на 4,1 %. Для обох матеріалів зменшення умовного модуля пружності по периметру E_ψ від спинки до замка спостерігалось на рівні 8 – 10 %, що дає нам експериментальне визначення коефіцієнта A (коефіцієнт інтенсивності зміни E_ψ по периметру) у рівнянні (2): $A = - 0,10$. Це означає, що для вироб-

нищтва заготовок кілець під нанесення плазмового покриття підлягають корекції коефіцієнти λ_1 до заданого радіуса середньої лінії кільця у робочому стані r для визначення прирощення основного радіуса заготовки по периметру ΔR_1 і λ_2 до r для визначення основного радіуса заготовки $R_{осн}$.



1 – заготовка кільця; 2 – кільце без нанесення покриття; 3 – Cr гальванічний; 4 – Mo плазмовий.

Рис. 1 – Зміни форми (а, в) і коефіцієнти залишкової деформації (б, г) поршневих кілець із сірого (а, б) і високоміцного (в, г) чавуну у напрямі від спинки до замка



1 – без покриття; 2 – із плазмовим покриттям; I–XI – радіус-вектори точок виміру тиску.

Рис. 2 – Ешюра радіальних тисків поршневих кілець із сірого (а) і високоміцного (б) чавуну

Урахування впливу покриття на форму заготівки кільця. Для розрахунку форми заготовок кілець із плазмовими покриттями у вільному стані розрахована таблиця 2, яка вміщує ряди коефіцієнтів λ_1 і λ_2 для розрахунку полярних координат осьової лінії кілець із різними характеристиками параметра

$$K = \frac{q_0 br^3}{EJ} \text{ від } 0,020 \text{ до } 0,034, \text{ які охоплюють основну номенклатуру поршневих кілець автотракторних}$$

дизельних двигунів ($m = 1,5$; $A = -0,10$). Коефіцієнти λ_1 розраховані з інтервалом 10–16 градусів, а на ділянках екстремумів кривої – частіше.

Таблиця 2 – Коефіцієнти для визначення форми кілець із плазмовими покриттями

ψ, град.	Параметр К							
	0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034
	Коефіцієнти λ_1 для визначення ΔR_i							
2	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,009	0,012	0,012	0,012	0,013	0,015	0,016	0,017
12	0,028	0,042	0,046	0,051	0,054	0,059	0,063	0,067
20	0,105	0,116	0,127	0,139	0,150	0,162	0,173	0,185
30	0,231	0,255	0,279	0,304	0,329	0,355	0,380	0,406
46	0,510	0,563	0,618	0,673	0,728	0,784	0,841	0,898
64	0,889	0,982	1,030	1,125	1,221	1,318	1,416	1,565
80	1,221	1,350	1,480	1,611	1,743	1,877	2,011	2,147
90	1,398	1,545	1,693	1,842	1,992	2,146	2,299	2,454
104	1,571	1,735	1,900	2,067	2,235	2,405	2,576	2,748
108	1,599	1,766	1,934	2,104	2,274	2,446	2,619	2,794
112	1,616	1,785	1,955	2,126	2,298	2,471	2,635	2,820
114	1,622	1,790	1,960	2,131	2,303	2,476	2,650	2,826
120	1,618	1,785	1,953	2,122	2,293	2,464	2,636	2,809
130	1,546	1,704	1,862	1,021	2,181	2,341	2,501	2,662
140	1,386	1,525	1,664	1,803	1,942	2,080	2,219	2,357
150	1,135	1,245	1,354	1,463	1,570	1,677	1,783	1,887
160	0,992	0,863	0,933	1,001	1,067	1,132	1,195	1,255
170	0,362	0,389	0,407	0,426	0,442	0,455	0,466	0,474
176	0,074	0,074	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073
	Коефіцієнти λ_2 для визначення $R_{осн}$							
	4,274	4,709	5,144	5,582	6,020	6,460	6,901	7,344

Особливості методики розрахунку форми кілець із плазмовими покриттями (кілець із додатково корегованою епюрою радіальних тисків) визначаються експериментальними даними, отриманими у ході дійсних досліджень. Вони полягають у наступному:

— зміни величини умовного модуля пружності по периметру враховуються значенням коефіцієнта А з рівняння (2), який дорівнює $-0,10$. Це дозволяє забезпечити задану епюру радіальних тисків і компенсувати нерівномірність С з рівняння (3);

— абсолютна величина коефіцієнта залишкової деформації С повинна визначатися дослідним шляхом (таблиця 1) у процесі конкретного виробництва кілець у залежності від матеріалу і конструкції. При розрахунку форми заготівки С вводиться у розрахунок через рівняння (6);

— для розрахунку форми осьової лінії заготівки поршневого кільця за таблицею 2 необхідно за початковими даними розрахувати параметр К для визначення відповідної колонки коефіцієнтів λ_1 і λ_2 . Модуль пружності Е для розрахунку К встановлюють у процесі конкретного виробництва кілець залежно від матеріалу і конструкції;

— відповідно до розрахованого параметра К в його колонці за коефіцієнтами λ_2 розраховуються значення основного радіуса заготівки $R_{осн}$, які в сумі з розрахованими по коефіцієнтах λ_1 приращенням ΔR_i дають значення полярних координат осьової лінії заготівки через вказані в таблиці кутові інтервали. При розрахунку $R_{осн}$ і ΔR_i слід користуватися такими формулами:

$$R_{осн} = r \left(1 + \frac{0,5\lambda_2}{1-C} 10^{-2} \right); \Delta R_i = \frac{\lambda_1 r}{1-C} 10^{-2}.$$

Зношування додатково корегованих поршневих кілець у двигуні. Результати стендових випро-

бувань двигунів із серійними і дослідними верхніми компресійними поршневими кільцями приведені у таблиці 3.

Результати випробувань показують, що сумарний знос сполучення “дослідне кільце з плазмовим покриттям – гільза циліндра”, який характеризує довговічність циліндро-поршневої групи дизельного двигуна, зменшується при додатковій корекції епюри радіальних тисків на 22–24 % і досягає рівня зношування серійних кілець із хромовим покриттям, що дає можливість застосовувати плазмово напиляні кільця у форсованих двигунах, не зменшуючи їхнього моторесурсу.

Таблиця 3 – Результати стендових випробувань поршневих кілець з корегованою епюрою

Покриття і наявність корекції епюри	Знос кільця, мм	Знос гільзи, мм
Серійні кільця, розраховані за звичайно корегованою епюрою, покриття – хром гальванічний	0,12	0,08
Дослідні кільця, розраховані за звичайно корегованою епюрою, покриття – молібден плазмовий	0,30	0,16
Дослідні кільця із додатково корегованою епюрою, покриття – молібден плазмовий	0,22	0,13
Дослідні кільця, розраховані за звичайно корегованою епюрою, покриття – молібден плазмовий + іонне азотування	0,16	0,11
Дослідні кільця із додатково корегованою епюрою, покриття – молібден плазмовий + іонне азотування	0,12	0,09

Висновки. Дослідженнями встановлено, що нанесення плазмових покриттів на поршневе кільце призводить до певних змін його епюри радіальних тисків, збільшення залишкових деформацій і зменшення умовного модуля пружності, тобто характеристик, які можуть визначати працездатність і довговічність кільця.

Розроблено метод урахування впливу нанесення плазмового покриття при розрахунку форми заготовки кільця, розраховано таблицю необхідних для розрахунку даних для виготовлення таких кілець в умовах підприємства – виготовлювача. На кореговане кільце отримано патент України [9].

Випробуваннями двигунів показано, що використання розробленої додаткової корекції епюри поршневих кілець з плазмовими покриттями дозволяє зменшити сумарний знос сполучення “кільце – циліндр” у форсованих дизельних двигунах за рахунок рівномірного прилягання кільця до циліндра і довести знос до рівня зношування кілець із твердими гальванічними хромовими покриттями.

Література

1. Александров А. Ю., Спирин Р. В. Износ и эксплуатационные характеристики высоконагруженных деталей с различными видами защиты рабочего слоя материала // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 2. – С. 2–5.
2. Петров С. В., Коржик В. Н., Горбань В. Ф., Демидов В. Д., Новоселов А. В. Газотермические покрытия для упрочнения тяжело нагруженных деталей мощных дизелей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 6. – С. 20–30.
3. Алехин С. А., Грицок А. В., Краюшкин И. А., Овчаров Е. Н. Современные дизельные двигатели разработки КП "Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению" // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 1. – С. 4–8.
4. Соколов О. Д. Оцінка зносостійкості та надійності хромових покриттів для розробки технології їх нанесення на деталі вузла тертя // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2003. – №2. – С. 130–135.
5. Маннапова О. В. Соколов О. Д. Підвищення зносостійкості трибосполучення «циліндр-кільце-поршень» форсованих двигунів електрофізичними методами зміцнення поверхні // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – 2009. – Вип. 36. – Т. 1. – С. 268–274. Друкована. 0,5 д.а. № 243.
6. Гинцбург Б. Я. Теория поршневого кольца. – М.: Машиностроение, 1979. – 271 с.
7. Молдаванов В. П., Пикман А. Р., Авербух В. Х. Производство поршневых колец двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1980. – 199 с.
8. 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.
9. 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.