

УДК 621.891

ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ ПРИ МАСЛЯНОМУ ГОЛОДУВАННІ В ПАРІ ТЕРТЯ
«ПОРШНЕВЕ КІЛЬЦЕ – ГІЛЬЗА ЦИЛІНДРА»

Д-р техн. наук М. Ф. Дмитриченко, асп. І. М. Богданов

CAUSES OF DESTRUCTION DURING OIL STARVING IN THE FRICTION COUPLE
"PISTON RING - CYLINDER LINER"

D. Sc. (Tech.) M. Dmytrychenko, postgraduate student Bogdanov I. M.

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262663>



Анотація. У дослідженні йдеться про явище зношування в парі тертя «поршневе кільце – гільза циліндра» під час стендових випробувань на дослідних зразках. Трибологічну характеристику сухого тертя, яке імітувало масляне голодування [9], оцінювали з використанням зворотно-поступального руху трибометра. Значний знос спостерігався на поверхні гільзи, виготовленої з сірого чавуну, при контакті зі сталеву хромовану поверхню. Це можна пояснити значним градієнтом жорсткості трибопари в спряженні. При хромованому покритті, що має помітну твердість, по краю гільзи спостерігається екструзія і спінювання поверхні, що свідчить про зміну зносу. Коефіцієнт тертя при сухому ковзанні зі ступінчастими збільшеннями навантаження показав нестійкий стан тертя, що недооцінюється при роботі будь-якої трибологічної системи.

Ключові слова: масляне голодування, пара тертя, руйнування, поршневе кільце, гільза циліндра.

Abstract. The study deals with the phenomenon of wear in the friction pair of the piston ring - cylinder liner during bench tests on prototypes. The tribological performance of dry friction simulating oil starvation was evaluated using the reciprocating motion of the tribometer. Significant wear was observed on the surface of the sleeve, made of gray cast iron, in contact with the chrome steel surface. This can be explained by a significant gradient in the rigidity of the tribopair in conjugation. With a chrome coating that has a noticeable hardness, extrusion and foaming of the surface are observed along the edge of the sleeve, which indicates a change in wear. The coefficient of friction in dry sliding with stepped load increases showed an unstable state of friction, which is not appreciated in the operation of any tribological system.

Piston rings are used to seal the exhaust outlet gap between the piston and the liner for efficient operation of the internal combustion engine. The distribution surface of the cylinder liner and piston ring during reciprocating motion is subject to continuous wear due to constant stresses, high temperatures and intense loads. Thus, the performance and reliability of such heavy-duty engine components depend on the topography of the conjugate surfaces and the associated tribological interactions. Therefore, it is necessary to study the tribological behavior of conjugates of liners - rings that are subject to wear during oil starvation, and designed to effectively prevent exfoliation. This phenomenon leads to new surface coatings and modifications with significant wear properties in difficult operating conditions.

Under certain conditions of loading, sliding and lubrication, the temperature rises to a critical state, the formation of the lubricating film is stopped and any formed lubricating film is destroyed, which leads to a catastrophic increase in friction. This continuous thermal feedback with the contact zone leads to wear of the friction pair of the piston ring - the cylinder liner. Given the changes in the design and materials of the engine, despite the fact that engine performance has increased significantly with reduced emissions, it is impossible to exclude increased performance and engine failure.

Keywords: oil starving, friction couple, destruction, piston ring, cylinder liner.

Вступ. Поршневі кільця застосовуються для ущільнення зазора виходу вихлопного газу між поршнем і гільзою для ефективної роботи двигуна внутрішнього згорання. Поверхня розподілу гільзи циліндра та поршневого кільця при зворотно-поступальному русі зазнає безперервного зносу за рахунок постійних напружень, високої температури та інтенсивного навантаження [1]. Отже, продуктивність і надійність таких вузлів двигунів з великим навантаженням залежить від топографії спряжених поверхонь і пов'язаних з нею трибологічних взаємодій. Необхідно дослідити трибологічну поведінку спряження вкладиш – кільце, що зношується при масляному голодуванні, і призначення засобів для ефективного запобігання відшаруванню [2]. Це явище призводить до необхідності нових поверхневих покриттів і модифікацій з істотними властивостями зносу в складних умовах експлуатації.

Задир виникає тоді, коли збільшення тертя між трибоконтрактами наближається до катастрофічного стану, що призводить до сильного зварювання, пошкодження і розтріскування контактних поверхонь до такої міри, що вони стають потенційно непридатними для експлуатації. За відсутності будь-якої змащувальної плівки контактна область має тенденцію «зварюватися» разом. Однак цей зварний шов не дуже міцний, щоб зупинити відносне ковзання між гільзою циліндра і поршневим кільцем, а отже, повністю відокремлюється, що призводить до перенесення матеріалу з більш м'якої до більш твердої поверхні [3].

За певних умов навантаження, ковзання та мащення температура підвищується до

критичного стану, формування змащувальної плівки припиняється, і будь-яка сформована мастильна плівка руйнується, що призводить до катастрофічного зростання тертя. Цей безперервний тепловий зворотний зв'язок із зоною контакту призводить до зношування пари тертя «поршневе кільце – гільза циліндра» [3]. З урахуванням змін у конструкції і матеріалах двигуна, не дивлячись на те, що продуктивність двигуна значно зросла при зниженні викидів, не можна виключати підвищений знос і збої в роботі двигуна.

Аналіз проведених досліджень і публікацій. Поверхневі обробки, що застосовуються до гільз циліндрів, включають лазерне текстурування, хонінгування, поверхневе заглиблення, у той час як поверхня поршневих кілець включає технології осадження, такі як термічне розпилювання, гальванічне осадження, катодне осадження, лазерне легування поверхні і поверхневі обробки – ударне зміцнення, поверхневе азотування, поверхневе зміцнення зі структурою залізо-нітрид на області поверхні кільця [4...6].

Визначення мети та завдання дослідження. Визначення трибологічних характеристик пари тертя «гільза циліндра – поршневе кільце» при масляному голодуванні і засобів запобігання відшарування металу в парі при масляному голодуванні.

Завдання дослідження:

- визначити причини погіршення трибологічних характеристик у парі «гільза циліндра – поршневе кільце» в умовах масляного голодування;

- запропонувати оптимальний варіант фінішної обробки гільзи циліндрів ДВЗ, що працюють в умовах масляного голодування;

• визначити додаткові умови і матеріали для виготовлення поршневого кільця, які поліпшували б трибологічні характеристики контактної пари «гільза циліндра – поршневе кільце», що працюють в умовах масляного голодування.

Основна частина дослідження. Зразки поршневого кільця, використовувані в цьому трибологічному дослідженні, отримані з двигуна зі спалахом від стиску великої потужності. Поршневе кільце являє собою верхнє компресійне кільце з внутрішнім скошеним верхом і 9,4 мм номінального отвора циліндра. Контакт є чисто конформним, що гарантує будь-яке зміщення і контактну сумісність поршневого кільця (було розрізано на 13 частин). Гільза циліндра являє собою сірий чавун з типовим складом і властивостями (механічною і термічною). Спочатку кожен вкладиш розрізали на секції розміром 25,4×50,8 мм, але це спричинило б великі

втрати матеріалу. Замість них використовувались секції 12,18×50 мм від кожного зразка. Поверхня гільзи циліндра текстурована хонінгуванням алмазними хонами, розташованими під кутом 45° упоперек западин шорсткості (поперечних мікроотворів). Робота з хонінгування вершин шорсткості призводить до їх перехреснування, які під час робочих циклів двигуна ведуть себе як резервуари зі змащувальним матеріалом. Для всіх операцій механічної обробки і обробки зразків поверхні обох трибоелементів були збережені для їхньої оригінальності за шорсткістю поверхні і близькістю до узорів поверхні. Кільце має плазмове напилене хромоване покриття товщиною 42 мкм з текстурованими сферичними мікроотворами. Товщину покриття, яку вимірювали мікроскопом з використанням стандартного обладнання, показано на рис. 1, а.

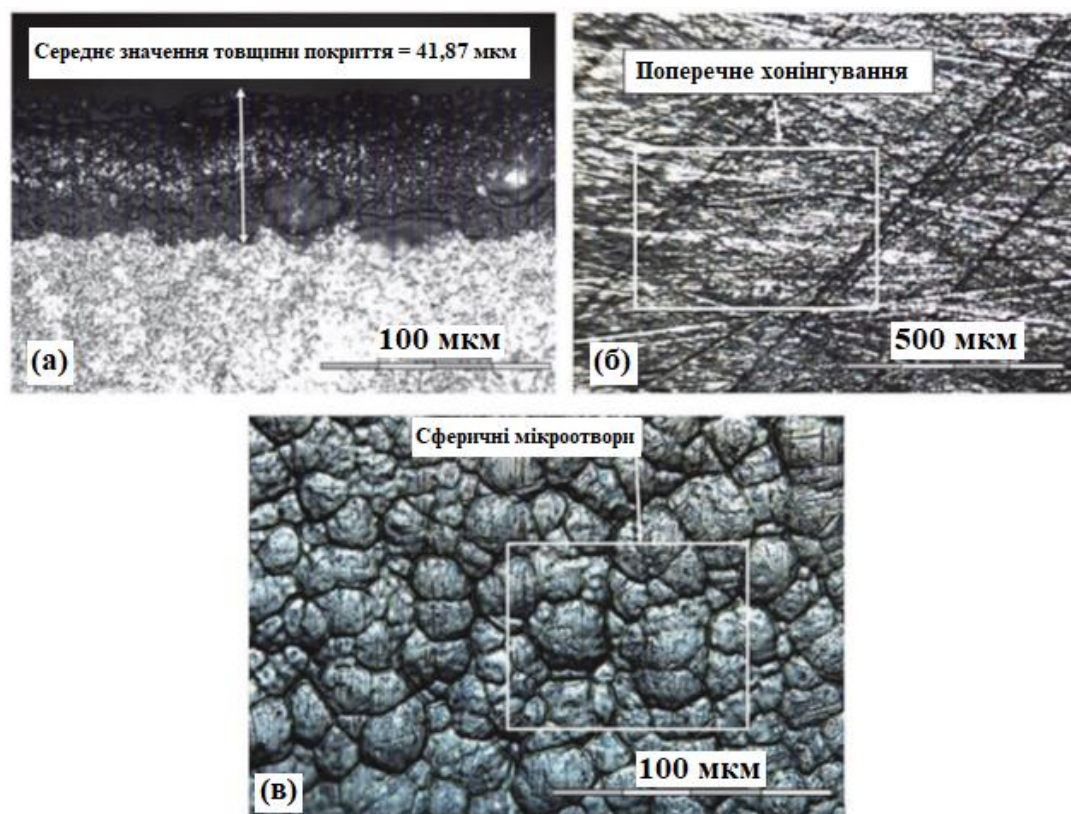


Рис. 1. Збільшені зображення товщини покриття, поверхні кільця та підложки: а – збільшене мікроскопічне зображення вимірювання товщини покриття; б – мікроскопічне зображення поверхні підложки; в – мікроскопічне зображення поверхні кільця

Кільцеві сегменти були закріплені у виготовленому конформному кільцевому тримачі, закріпленому у зворотно-поступальному важелі універсального трибометра. Помітний рисунок хонінгування поперечини добре видно на рис. 1, б, що відповідає сірим зразкам підложки, у той час як текстуровані сферичні мікроотвори можна бачити на рис. 1, в, що відповідають хромовому покриттю зразків кілець.

Коефіцієнт тертя як функція кумулятивного часу для моделювання сухого ковзання, що імітує масляне голодування, безперервно контролювали і оцінювали при нормальних навантаженнях 20, 40 і 60 Н на універсальному трибометрі Magnim. Відзначено, що будь-який приріст частоти зворотно-поступального руху під час експериментів означає зменшення середньої сили після падіння збору фрикційних даних і врешті-решт резонансного відгуку з помилками [7]. Отже забезпечується постійна частота зворотно-поступального руху і повторюваність принаймні з трьома наборами експериментів.

Усі отримані результати орієнтують на перші 3 хв ковзання. Безперервна стійка флуктуація може спостерігатися при сухому ковзанні при базовому навантаженні 20 Н упродовж триботестів і пояснюється орієнтацією зерен графітових включень після видалення нерівностей в області зносу від трибоелемента гільзи циліндра. Середнє значення отриманого коефіцієнта тертя становить 0.16. Цей вихід графітових включень міг би ініціювати часткове тверде мастило і, отже, обмежувати силу тертя. Після виходу графітових включень збільшується площа контакту через надмірне навантаження, що призводить до видалення нерівностей чистої поверхні і впливає на фрикційну характеристику.

Усі зразки, що піддавались трибовипробуванням, були промиті за допомогою ультразвуку ацетоном і витерті насухо перед тим, як продовжити мікроскопічні і

профілометричні дослідження. 3D профілометрія зі стандартною повторюваністю використовувалась для вимірювання об'єму зносу за рахунок інтегрування в область зносу рубців 16 паралельних профілів, доступних з використанням глибини рубця при оптичному дозволі 70. Середня шорсткість поверхні 0,18 мкм перед трибовипробуванням спостерігалась у поршневого кільця, покритого хромом, у той час як отриманий R_a гільзи становив 0,92 мкм. Після триботестування відбулося істотне зниження значень R_a як для поршневого кільця, так і гільзи циліндра 0,12 мкм і 0,48 мкм відповідно. Зменшення значень R_a після триботестування можна віднести на поверхневе зношування і заповнення заглиблень частинками зносу.

Сухе ковзання спряження показало гострі виступи на доріжках зносу, які видавлювались з поверхні при масляному голодуванні. Спостерігається постійне збільшення об'ємів зносу зі збільшенням нормального навантаження. Отримані значення коефіцієнта зносу становлять близько $2,2...3,5 \times 10^{-4}$ мм³/Нм для гільзи циліндра з середнім значенням 10,5 мкм, що можна пов'язати з найвищою зносостійкістю, що зазнає поступового збільшення навантаження. Отже, суттєва різниця у твердості та інших механічних властивостях трибоелементів у поєднанні з хромовим покриттям характеризує чудові характеристики зносу, у той час як гільза циліндра показує характеристики зносу з руйнуванням при масляному голодуванні [8].

Висновки. Встановлено, що причиною задрів і відшарування у трибосистемі «гільза циліндра – поршневе кільце» є катастрофічне зростання тертя в парі, що призводить до «зварювання» деталей і розтріскування контактних поверхонь.

Для ліквідації катастрофічного зростання тертя в парі «гільза циліндра – поршневе кільце» в умовах масляного голодування слід застосовувати площинно-вершинне хонінгування гільзи з

заповненням масляних резервуарів поверхні твердим мастилом.

Для поліпшення триботехнічних характеристик у контакті «гільза циліндра –

поршневе кільце» в умовах масляного голодування при роботі ДВЗ слід використовувати тверде PVD – покриття товщиною 2...5 мкм.

Список використаних джерел

1. Olander P., Hollman P. and Jacobson S. Piston Ring and Cylinder Liner Wear Aggravation Caused by Transition to Greener Ship Transports–Comparison of Samples from Test Rig and Field. *Wear*. 302. 1-2. 2013. 1345-1350.
2. John A. P. and Agarwal V. K. Optimization of Piston Skirt Profile Design to Eliminate Scuffing and Seizure in a Water Cooled Gasoline Engine. *SAE Technical Paper*. 2015-01-1726, 2015.
3. Enthoven J. C., Cann P. M. and Spikes H. A. Temperature and Scuffing. *Tribology Transactions*. 36. 2. 1993. 258-266.
4. Yoon K. -K., Kim W. -B. and Na S. -J. Shape Deformation of a Piston Ring Groove by Laser Surface Hardening. *Surface and Coatings Technology*. 78. 1-3. 1996. P. 157-167.
5. Ezhilmaran V., Vasa N. J. and Vijayaraghavan L. Investigation on Generation of Laser Assisted Dimples on Piston Ring Surface and Influence of Dimple Parameters on Friction. *Surface and Coatings Technology*. 335. 2018. P. 314-326.
6. Lin J., Wei R., Bitsis D. C. and Lee P. M. Development and Evaluation of Low Friction TiSiCN Nanocomposite Coatings for Piston Ring Applications. *Surface and Coatings Technology*. 298. 2016. P. 121-131.
7. Plint A. G. Friction Force Measurement in Reciprocating Tribometers. STLE, 2011.
8. Krushchov M. M. and Babichev M. A. The Connection between Hardness under Compression and Hardness during Abrasion in Metals and Minerals. (in Russian). *Wear*. 1, 3, 1957. 260.
9. Дмитриченко М. Ф., Гохар Р., Уэн Дж. Эластогидродинамическая смазка линейных контактов в условиях обильной смазки и масляного голодания. *Трение и износ*. 1993. Т. 14, № 13. С. 438–443.

Дмитриченко Микола Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство» Національного транспортного університету. ORCID iD: 0000-0003-4223-1838. Тел.: (044) 280-82-03. E-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua.

Богданов Іван Миколайович, аспірант кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство» Національного транспортного університету. ORCID iD: 0000-0001-6346-4388. Тел.: (044) 280-98-05. E-mail: gmiller180890@gmail.com.

Mykola Dmytrychenko, D. Sc. (Tech.), professor, department of Manufacturing repair and materialoved, National Transport University. ORCID iD: 0000-0003-4223-1838. Tel.: (044) 280-82-03. E-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua. Ivan Bogdanov, postgraduate student, department of Manufacturing repair and materialoved, National Transport University. ORCID iD: 0000-0001-6346-4388. Tel.: (044) 280-98-05. E-mail: gmiller180890@gmail.com.

Статтю прийнято 06.06.2022 р.