



Experimental Investigation on the Effect of Using CrN and DLC Coatings on Wear Properties of the Internal Combustion Engine Piston Ring

Alireza Hajjalimohammadi^{1*}, Seyed Mohammad Musavi Rad², Hamed Ghare Bagheri³

¹Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

²Master's Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

³Undergraduate Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 11.19.2022

Revised: 01.03.2023

Accepted: 03.11.2023

Keyword:

Piston Ring

Wear

Wear Test

Diamond-like Carbon

Chromium Nitride

Hard Chromium

*Corresponding Author:

Alireza Hajjalimohammadi

Email: ahajjali@semnan.ac.ir

The composition of the coating used in the piston ring has a great effect on friction and wear in combustion engines. In the present study, the wear behavior of three samples of TU3 engine rings with hard chromium, chromium nitride, and diamond-like carbon coatings were studied and compared. Various coating properties including chemical composition, microstructure, thickness, roughness, and hardness were studied. Furthermore, the microstructure and wear mechanism was studied using a scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive analysis (EDX). A reciprocating wear test device was used to check the wear behavior of the piston rings. Finally, an attempt was made to investigate the relationship between properties and tribological behavior created in piston rings. The high hardness and presence of graphite as a solid lubricant were among the most important factors for the appropriate wear behavior of the piston ring with a diamond-like carbon coating. Due to the lack of complexity and high hardness, the piston ring with hard chromium coating had a sticky wear mechanism and did not show proper wear behavior. The worst wear behavior was observed in the piston ring sample with chromium coating. Low adhesion to the substrate, low hardness, high roughness and thickness, and single layer could be considered as the most important factors of inappropriate wear behavior of this sample. In addition, the results showed that the wear resistance of diamond-like carbon coating is almost four times that of chromium nitride coating and six times that of hard chromium.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Piston rings are one of the integral components of internal combustion engines. The piston ring is responsible for establishing a gas seal between the combustion chamber and the crankshaft chamber, transferring the heat generated from the piston to the cylinder wall and the cooling system, and limiting the amount of oil that is transferred from the crankshaft to the combustion chamber. The rings must match the grooves of the piston and the cylinder wall. The piston ring is exposed to wear due to its function in the internal combustion engine because the temperature in this part of the engine is high. Nowadays, according to the development of internal combustion engines by different companies around the world, the use of new coatings in the manufacturing of the piston rings is suggested. Thus far, various coatings have been utilized for piston rings for use in combustion engines. One of these common coatings is the use of hard chromium coatings. These coatings are in demand in the automotive industry due to their thickness and adhesion to the base metal. However, today, different coatings are used for rims such as chromium -ceramic composites, chromium nitride, diamond-like carbon, and nano scale coatings. Due to their low cost and availability of chromium and vapor phase physics coating methods, hard chromium coatings are one of the suitable coatings for internal combustion engine piston rings. However, it is necessary to study different coatings and coating methods and one method of studying piston ring properties is using wear test.

Methodology

To study the properties of the piston ring in the wear test, three different coatings of hard chromium, chromium nitride (CrN) and diamond-like carbon (DLC) were used. In the wear testing machine, it was not possible to use a complete ring, and a segment was used.

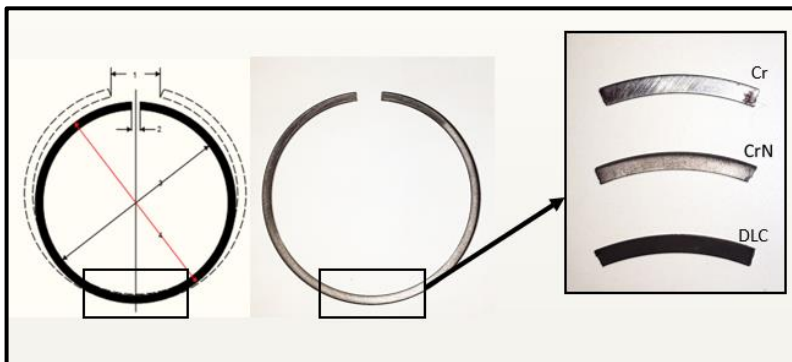


Figure 1. Piston ring wear sample after cutting.

In order to study the tribological behavior of the piston ring under real conditions, the wear test was performed in the absence of lubricant to simulate the most acute working conditions of the piston ring. A wear test was performed for a distance of 500 meters for

each piston ring sample. According to the limitations of the wear test device, the sliding speed between the piston ring and the cylinder liner was set at 0.35 m/s. The piston ring was pressed to the cylinder liner body, so the force was selected in the range of 10 to 50 Newton. In addition, the humidity was controlled and set at 35 ± 5 . The purpose of this research was to investigate the wear behavior of piston ring with three types of chromium coating, chromium nitride and diamond carbon with thicknesses of 100, 30 and 25 microns, respectively.

Results and discussion

The graphs of the coefficient of friction according to the distance traveled for the sample of the piston ring with hard chromium coating, chromium nitride and diamond-like carbon are shown in Figure 2. In the wear test of the piston ring with diamond-like carbon coating, the highest friction coefficient was observed at the beginning of the movement due to the high roughness of the coating surface. However, with the passage of time and the lubrication effect of graphite in the coating structure, the friction coefficient decreased (a). The friction coefficient was low at the beginning of the test for hard chromium coating, but after time passing, the friction coefficient increased significantly. The corresponding friction diagram also illustrated many fluctuations (b). In the wear test of the piston ring with chromium nitride coating, due to the high wear at the beginning of the movement, the friction coefficient was high because the chromium nitride coating structure is highly dependent on the coating parameters and there is a possibility of non-uniform coating of the piston ring. As a result, some areas of the piston ring had different thicknesses. With time passing, the amount of friction coefficient decreased significantly and increased again in the final stages of the test.

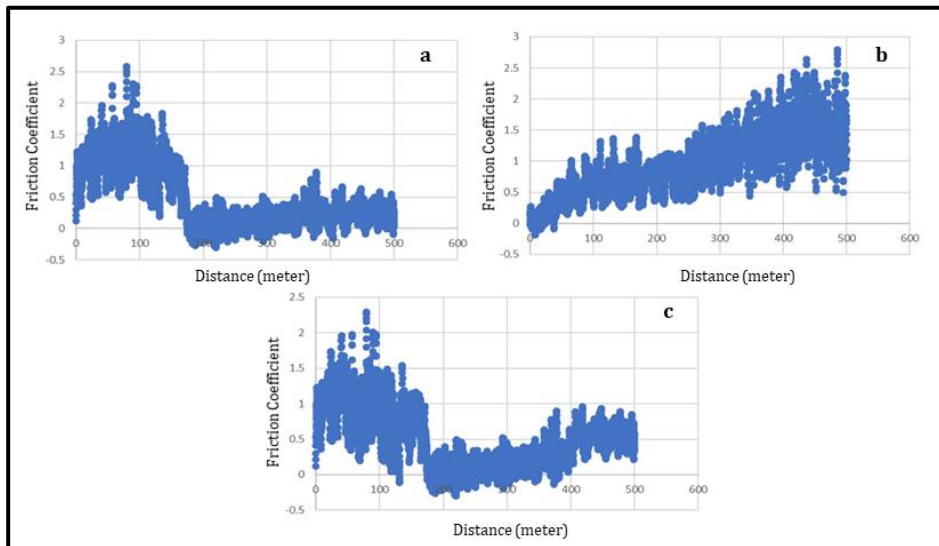


Figure 2. Friction coefficient according to the distance traveled by the ring sample with cover: a) Diamond-Like Carbon, b) Hard Chromium, c) Chromium Nitride.

Conclusion

According to the research conducted on the piston rings of the TU3 commercial engine produced in Iran and wear tests for three types of hard chrome coating, the results showed that the wear resistance of diamond-like carbon coating was almost four times that of chromium nitride coating and six times that of hard chromium. Furthermore, by using EDX and SEM results, adhesive wear was detected from the worn surface of the piston ring with hard chrome coating. The SEM images prepared from the worn surface of the piston ring with chromium nitride coating also indicated the occurrence of abrasive and adhesive wear on the surface of the piston ring. Graphite acts as a solid stabilizer in the diamond like carbon coating, and the presence of diamond reduces the wear losses of this sample.

Acknowledgement

The authors of the article express their gratitude to the Ring Khodro Pars company for the financial support of the research and production of piston ring samples.

مطالعه تجربی اثر استفاده از پوشش‌های نیتريد کروم و کربن الماس گون روی خواص سایشی رینگ پیستون موتور احتراقی داخلی

علیرضا حاجی علی محمدی^{۱*}، سید محمد موسوی راد^۲، حامد قره‌باقری^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲- دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳- فارغ‌التحصیل کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

ترکیب پوشش مورد استفاده در رینگ پیستون، تأثیر زیادی بر روی اصطکاک و سایش در موتورهای احتراقی دارد. در پژوهش حاضر، رفتار سایشی سه نمونه رینگ پیستون موتور TU3 با پوشش‌های کروم سخت، نیتريد کروم و کربن الماس گون مطالعه و مقایسه شد. خواص مختلف پوشش از جمله ترکیب شیمیایی، ریزساختار، ضخامت، زبری و سختی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز تفکیک انرژی (EDX) ریزساختار و مکانیزم سایش مطالعه شد. برای بررسی رفتار سایشی رینگ پیستون از دستگاه آزمون سایشی رفت و برگشتی استفاده شد. در پایان تلاش شد تا رابطه بین خواص و رفتار تریبولوژیکی ایجاد شده در رینگ پیستون مورد بررسی قرار بگیرد. سختی بالا و حضور گرافیت به عنوان روانکار جامد از جمله مهم‌ترین عوامل رفتار سایشی مناسب رینگ پیستون با پوشش کربن شبیه الماس بود. رینگ پیستون با پوشش کروم سخت به علت نداشتن پیچیدگی و سختی بالا دچار مکانیزم سایش چسبنده شده و رفتار سایشی مناسبی از خود نشان نداد. بدترین رفتار سایشی در نمونه‌های رینگ پیستون با پوشش کروم مشاهده شد. چسبندگی کم به زیر لایه، سختی پایین، زبری و ضخامت بالا و تک لایه بودن از جمله مهم‌ترین عوامل رفتار سایشی نامناسب این نمونه بودند. نتایج همچنین نشان داد که میزان مقاومت به سایش پوشش کربن الماس گون تقریباً چهار برابر پوشش نیتريد کروم و شش برابر کروم سخت می‌باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

کلید واژگان:

رینگ پیستون
سایش
آزمون سایش
کربن الماس گون
نیتريد کروم
کروم سخت

*نویسنده مسئول: علیرضا حاجی

علی محمدی

پست الکترونیکی:

ahajiali@semnan.ac.ir

مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون توان و گشتاور خروجی موتورهای احتراقی، نیاز به کاهش اصطکاک و افزایش مقاومت به سایش قطعات متحرک موتور بیش از پیش احساس می‌شود [۱]. رینگ پیستون^۱ و قسمت بوش سیلندر^۲ که در دماهای بالا کار می‌کند، بیشتر در معرض سایش قرار دارند [۲؛ ۳]. معمولاً بوش سیلندر به دلیل دماهای بالا و شروع و توقف‌های متوالی، عمدتاً دچار سایش خورنده می‌شود. همچنین امکان وقوع سایش خورنده ناشی از عدم روغن رسانی صحیح به دیواره بوش سیلندر به دلیل آسیب دیدگی رینگ‌های روغن وجود دارد؛ زیرا احتمال حضور عناصری مانند کلسیم و سیلیسیم در ترکیبات روغن وجود دارد، حضور این عناصر و برخورد روغن با بوش سیلندر، سبب سایش خورنده می‌شود. در سیلندرهای تر، به دلیل ارتعاشات و لرزش‌های رخ داده، پدیده کاویتاسیون اتفاق می‌افتد و در نتیجه خوردگی حبابی نیز رخ می‌دهد [۴]. مجموعه رینگ پیستون ۲۰ تا ۳۰ درصد تلفات اصطکاک را شامل می‌شود، پس درک این که چگونه جنبه‌های تریبولژیکی آن باعث بهبود راندمان موتور و کاهش مصرف روغن می‌شود، ضروری است [۵]. بنابراین، اطلاعات بیشتری در مورد حد استقامت مواد رینگ در مجموعه پیستون مورد نیاز است تا از عملکرد مؤثر آن در برابر سایش تحت شرایط کاری با فشار زیاد اطلاع کسب کرد و به طور هم‌زمان ویژگی‌های سایش سطوح تماس در آزمون سایش باید به خوبی درک شوند. امروزه پوشش‌های مختلفی برای مقاومت در برابر سایش و بهبود عملکرد در شرایط سخت استفاده می‌شوند [۶]. برای پوشش‌دهی قطعات باید از روش‌های مقرون به صرفه استفاده کرد؛ زیرا حجم تولید قطعات بالا است و این قطعات باید در زمان کوتاهی پوشش‌دهی شوند [۷]. در میان آنها، پوشش کروم سخت به دلیل چسبندگی مناسب با قطعه‌کار، مقاومت به سایش بالاتری ایجاد می‌کند [۸]. به خصوص، پوشش کامپوزیت کروم-سرامیک که عملکرد ثابتی را در برابر تنش‌های بسیار زیاد در موتور ارائه می‌دهد. یکی دیگر از پوشش‌های مورد استفاده، نیتريد کروم است که توسط روش‌های رسوب‌دهی بخار فیزیکی ایجاد می‌شود و به عنوان جایگزینی برای کروم سخت در نظر گرفته می‌شود [۹]. در میان فناوری‌های مختلف پوشش‌دهی به روش رسوب بخار فیزیکی، شیوه تخریب قوس کاتدی بیشترین کاربرد را دارد [۱۰]. پوشش‌های نیتريد کروم به دلیل چقرمگی مناسبی که دارند می‌توانند مقاومت در برابر سایش، آسیب، خوردگی و خستگی را فراهم کنند [۱۱؛ ۱۲]. با این حال، چنین پوشش‌هایی در صورت نبود روانکار، مستعد ساییدگی هستند. کربن الماس گون یکی از لایه‌های کربن آمورف سخت است [۱۳]. با این حال، چنین فیلم‌هایی از کربن الماس گون، محدودیت ضخامت تا ۳ میکرون را دارند. تلاش‌های قابل توجهی برای توسعه پوشش کربن الماس گون فوق ضخیم انجام شده است تا عملکرد آنها تا جایی که ممکن است بهبود داده شود [۱۴]. به دلیل وجود گرافیت در ساختار پوشش کربن الماس گون، مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به پوشش‌های کروم دارند [۱۵]. کیفیت پوشش، یکی دیگر از ویژگی‌های مهم پوشش‌ها است که با افزایش تماس یا ظرفیت حمل بار تعیین می‌شود [۱۶]. در ابتدا، محفظه میل لنگ حاوی روغن می‌باشد و با دوران میل لنگ، روغن به مجموعه رینگ پیستون منتقل می‌شود. متعاقباً، زمانی که شرایط احتراق سخت‌تر می‌شود، یعنی دما، فشار و سرعت پیستون بالاتر می‌رود، رینگ‌های روغن وظیفه روغن رسانی را به عهده دارند [۴]. ترنبل و همکاران [۱۷] بررسی افت‌های اصطکاک ناشی از رینگ اول موتور احتراقی را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند اصطکاک عامل اصلی افزایش بخارات محفظه لنگ و دلیل افت‌های مربوطه است. بررسی اثر استفاده از پوشش آلومینا-کروم توسط کازمیرزاک [۱۸] انجام شد و ارتباطی بین انرژی آزاد سطحی و نرخ سایش رینگ پیستون به دست آمد. یاشین و همکاران [۱۹] رفتار سایشی پوشش کربن الماس گون را در دماهای بالا مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند، با افزایش دما ضریب اصطکاک پوشش افزایش می‌یابد و نرخ سایش پوشش در دمای ۴۰۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ۱۰ برابر بیشتر از نرخ سایش در دمای محیط است.

¹ Piston ring

² Cylinde liner

هدف پژوهش

هدف از این پژوهش بررسی رفتار سایشی رینگ پیستون با سه نوع پوشش کروم، نیتريد کروم و کربن الماس گون با ضخامت‌های ۱۰۰، ۳۰ و ۲۵ میکرون می‌باشد. برای مطالعه رفتار سایشی، ابتدا سه نوع رینگ پیستون با پوشش‌های نام برده تهیه و قطعی از آنها برش داده شد. در نهایت آزمون سایش با استفاده از دستگاه سایش رفت و برگشتی انجام شد. سپس رفتار سایشی رینگ‌های پیستون با استفاده از تصاویر SEM مورد ارزیابی قرار گرفت.

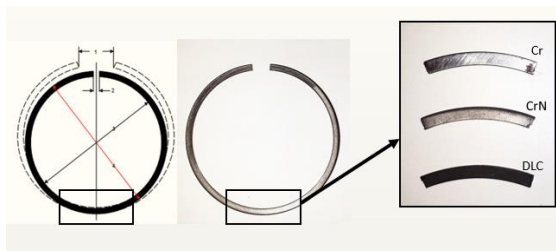
روش آزمایش

برای بررسی رفتار سایشی رینگ پیستون از دستگاه سایش رفت و برگشتی WA5۰ ساخت شرکت فراگیر صنعت مهربین که در آن تغییراتی جهت استفاده و نصب رینگ پیستون ایجاد شده بود، استفاده شد. همچنین برای مقید کردن سیلندر از گیره استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۱. دستگاه آزمون سایش رفت و برگشتی.

برای آزمون سایش از سه نمونه رینگ با پوشش‌های کروم سخت، نیتريد کروم و کربن الماس گون استفاده شد. رینگ‌های پیستون توسط شرکت رینگ خودروپارس ساخته شده و پوشش‌دهی آنها توسط دستگاه Hauzer Flexicoat ۱۰۰۰ شرکت هاوزر انجام گرفت. در این تحقیق از رینگ پیستون و بوش سیلندر موتور TU۳ استفاده شد تا نتایج آزمون‌ها با شرایط عملی قابل انطباق باشد. قابل ذکر است در حال حاضر در موتور TU۳ از رینگ پیستون با پوشش کروم استفاده می‌شود و مشخصات پوشش مورد استفاده عیناً شبیه رینگ‌هایی که در خودرو استفاده می‌شوند، انتخاب شد. در هنگام انجام آزمون سایش امکان استفاده از تمام رینگ و بوش سیلندر وجود ندارد و باید قطاع کوچکی از رینگ پیستون را استفاده کرد. طول قطاع مورد استفاده از سیلندر بسیار مهم می‌باشد، طبق استاندارد G1۸۱ طول تماس رینگ پیستون با نمونه سیلندر باید ۵ تا ۱۰ برابر ضخامتی از رینگ پیستون که مورد سایش قرار می‌گیرد باشد. به همین دلیل قسمتی از رینگ پیستون برش داده شد.



شکل ۲. نمونه سایشی رینگ پیستون بعد از برش.

قبل از انجام آزمون سایش، محل تماس هر نمونه به منظور حذف اسیدها، ناخالصی‌ها و چربی‌ها توسط محلول اسیدکلریدریک و استون شسته و هر نمونه به صورت جداگانه وزن شد. روش آزمایش که توسط استانداردهای ASME و API تدوین شده‌اند، علاوه بر آماده‌سازی مواد، شامل جزئیات بارها، سرعت لغزشی و زمان آزمایش نیز می‌باشند. جهت مطالعه رفتار تریبولوژیکی رینگ پیستون در شرایط واقعی، آزمون سایش در عدم حضور روانکار انجام شد تا حادثترین حالت کاری رینگ پیستون شبیه‌سازی شده باشد. آزمون سایش در مسافت ۵۰۰ متر برای هر نمونه رینگ پیستون انجام شد. بیشترین شرایط سایشی در نزدیک نقاط مرگ اتفاق می‌افتد. از این رو برای شبیه‌سازی آزمون سایش، سرعت باید به گونه تنظیم شود که نزدیک به حالت واقعی باشد. سرعت رینگ پیستون در نزدیکی نقاط مرگ، کمتر از یک متر بر ثانیه می‌باشد [۱۶]. همچنین برای مشابهت دادن شرایط کاری موتور، باید حرکت رفت و برگشتی و سرعت لغزش در شرایط حد را هم معادل سازی کرد. با توجه به محدودیت‌های دستگاه آزمون سایش، سرعت لغزشی بین رینگ پیستون و بوش سیلندر برابر ۰.۳۵ متر بر ثانیه تنظیم شد. همان‌طور که بیان شد، رینگ پیستون به بدنه بوش سیلندر فشرده می‌شود، از این رو نیروی عمودی طبق استاندارد G۱۳۳ و G۹۹ باید در محدوده ۱۰ تا ۵۰ نیوتون انتخاب شود. بدین منظور برای اعمال نیروی ۴۰ نیوتونی طبق قانون اهرم، وزنه ۱/۱ کیلوگرمی در انتهای بازوی افقی دستگاه تست سایش قرار گرفت. پارامتر دیگری که باید در قبل از آزمایش بررسی شود، رطوبت است؛ زیرا میزان رطوبت کم سبب تغییر در مقدار سایش نسبت به شرایط معمولی محیطی می‌شود [۱۵]. از این رو رطوبت تحت کنترل و برابر 35 ± 5 تنظیم شد.

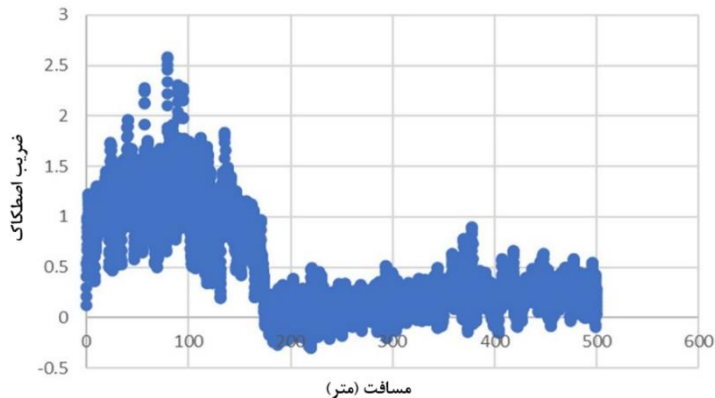
نتایج و بحث

جهت مطالعه رفتار تریبولوژیکی رینگ‌های پیستون، بررسی سطح مقطع و سطوح سایشی، از اطلاعات حاصل از آزمون سایش که به طور تجربی مفید بودن پوشش در یک محیط سرویس خاص را بررسی می‌کند، استفاده شد. یعنی استفاده از منحنی وزن-مسافت و منحنی ضریب اصطکاک-مسافت. همچنین از تجهیزات آزمایشگاهی مثل میکروسکوپ الکترونی روبشی و دستگاه پراش پرتو ایکس با استفاده از لامپ مسی و پروفیل سختی کمک گرفته شد تا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پوشش‌ها مشخص گردد. تصاویر SEM قبل و بعد از آزمون سایش تهیه شد. در جدول شماره ۱ میزان ضخامت و سختی پوشش‌های مورد استفاده مشخص شده‌اند. با توجه به این‌که در این مقاله سعی شده بود حتی الامکان ضخامت پوشش‌ها به شرایط واقعی کارکرد رینگ پیستون در موتور نزدیک باشد، ضخامت در نظر گرفته شده برای سه پوشش متفاوت بود. در موتورهای احتراقی پوشش کروم سخت با ضخامت حداقل ۱۰۰ میکرون و پوشش نیتريد کروم با ضخامت 25 ± 5 میکرون استفاده می‌شود و در حال حاضر پوشش‌های کربن الماس گون کاربرد تجاری ندارند ولی ضخامت آن در محدوده پوشش نیتريد کروم در نظر گرفته شد؛ زیرا هم با روشی مشابه و متفاوت از کروم تولید می‌شود و هم از نظر فنی و اقتصادی امکان به‌کارگیری ضخامت‌هایی معادل ضخامت کروم سخت وجود ندارد.

جدول ۱. میزان ضخامت و سختی پوشش‌ها.

| نوع پوشش | سختی (HV) | ضخامت (μm) |
|----------------|-----------|------------|
| کروم سخت | ۹۰۰ | ۱۰۰ |
| نیتريد کروم | ۵۰۰ | ۳۰ |
| کربن الماس گون | ۲۲۰۰ | ۳۵ |

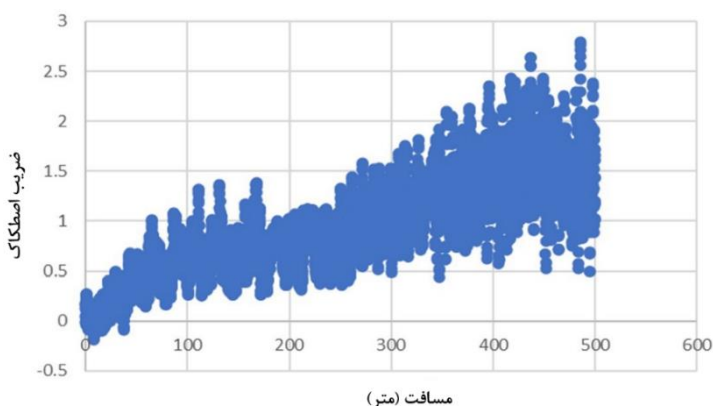
نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای نمونه رینگ پیستون با پوشش کربن الماس گون در شکل ۳ نمایش داده شده است. در آزمون سایشی رینگ پیستون با پوشش کربن شبیه الماس، بیشترین ضریب اصطکاک در ابتدای حرکت مشاهده می‌شود. با ادامه حرکت، ضریب اصطکاک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و با گذشت زمان و طی شدن مراحل پایانی آزمون، ضریب اصطکاک به میزان مطلوبی می‌رسد. چسبندگی مناسب بین پوشش و سطح، سختی بالا پوشش و وجود گرافیت در ساختار کربن الماس گون عوامل تأثیرگذار در کاهش ضریب اصطکاک می‌باشند. گرافیت موجود در پوشش کربن الماس گون نقش روانکار را ایفا می‌کند، زیرا کریستال‌های موجود در ساختار را موقعیت‌دهی کرده و لایه‌ها به حالت موازی با سطوح قرار می‌گیرند و به راحتی بر روی سطوح حرکت می‌کنند. در نتیجه میزان اصطکاک و حرارت بین لایه‌ها کاهش می‌یابد. در پوشش کربن الماس گون به دلیل چسبندگی بهتر به زیرلایه، جدایش پوشش اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه احتمال وقوع مکانیزم‌های سایش شدید مانند سایش چسبان، پایین می‌باشد و تنها احتمال ایجاد مکانیزم سایش خستگی امکان پذیر است.



شکل ۳. ضریب اصطکاک بر حسب فاصله طی شده توسط نمونه رینگ با پوشش کربن الماس گون.

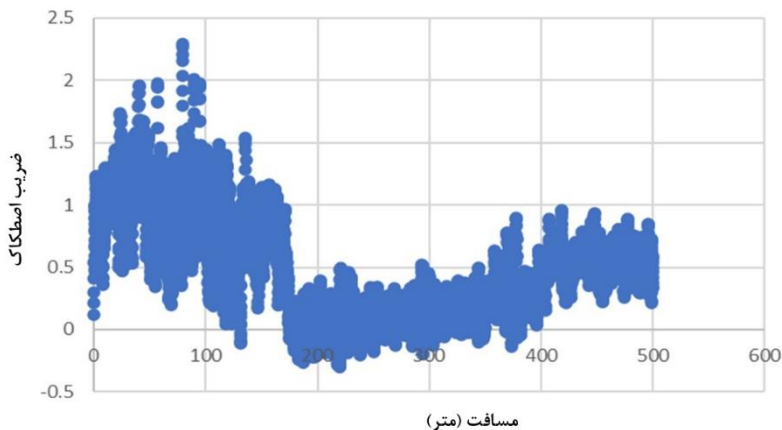
در شکل ۴ ضریب اصطکاک اندازه‌گیری شده برای نمونه رینگ پیستون با پوشش کروم سخت نشان داده شده است. در قسمت اولیه نمودارها میزان ضریب اصطکاک کم می‌باشد ولی با گذشت زمان از آزمون، میزان ضریب اصطکاک به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین نمودار دامنه تغییرات بسیاری دارد و در مناطقی به صورت پلکانی (ناگهانی) تغییر می‌کند. نمودار ضریب اصطکاک رینگ پیستون با پوشش کروم سخت با تئوری‌های نوین اصطکاک هم‌خوانی دارد. در مرحله اول لغزش تئوری اصطکاک، چسبندگی به خاطر آلودگی طبیعی نقش ایفا نمی‌کند. پایین بودن ضریب اصطکاک در شروع لغزش ناشی از تشکیل لایه اکسیدی، آلودگی طبیعی سطح و زبری سطح پایین سطح می‌باشد. در مرحله دوم لغزش آلودگی سطحی به دلیل اثر سایش مرحله اول، لغزش برطرف شده و شکست آنها در بین سطوح لغزش نیز سبب ایجاد شیارهای ناهموار بر روی سطح و افزایش شیب منحنی می‌شود. همچنین در این مرحله چسبندگی به

تدریج افزایش می‌یابد. در مرحله سوم لغزش به علت به دام افتادن ذرات سایشی بین سطوح تماس، ضریب اصطکاک به شدت افزایش می‌یابد. همچنین در این مرحله تغییر شکل ناهمواری‌ها توسط ذرات سایشی به طور مداوم اتفاق می‌افتد. در مرحله بعد، ذرات سایشی به دام افتاده بین سطوح ثابت باقی می‌مانند. ضریب اصطکاک در این مرحله بالاترین مقدار بوده و ثابت می‌باشد. بیشینه ضریب اصطکاک در این مرحله ناشی از بیشترین چسبندگی بین سطوح پوشش و سطوح سایشی می‌باشد. ضریب اصطکاک بالای اندازه‌گیری شده رینگ پیستون با پوشش کروم سخت، نشان‌گر وقوع مکانیزم شدید سایشی می‌باشد. در مکانیزم سایش چسبان خرده‌های حاصل از سایش در ترک‌ها جمع شده و یا غلتیده و از مسیر سایش خارج می‌شوند. به یکباره خارج شدن خرده‌های حاصل از سایش، باعث تغییر ناگهانی ضریب اصطکاک شده و باعث ایجاد حالت پلکانی در نمودار می‌شود. کمترین سایش رینگ پیستون با پوشش کروم سخت زمانی تحقق می‌یابد که ضریب اصطکاک به علت پرداخت اولیه سطح رینگ پیستون کمترین میزان خود را دارد. ولی با گذشت زمان و غلبه سایش چسبنده، میزان ساییدگی این نمونه به توجه به افزایش ناحیه تماس بین سطوح سایشی و تشدید سایش چسبنده، افزایش می‌یابد.



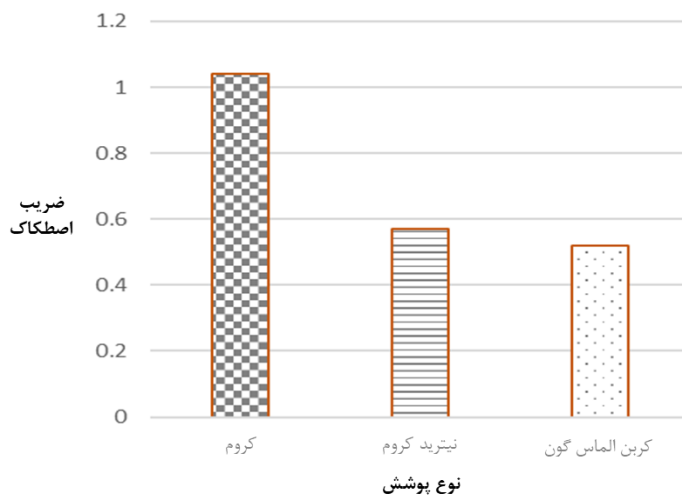
شکل ۴. ضریب اصطکاک بر حسب فاصله طی شده توسط نمونه رینگ با پوشش کروم سخت.

شکل ۵ نمودار ضریب اصطکاک-مسافت نمونه رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم را نمایش می‌دهد. در آزمون سایش رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم، در ابتدا حرکت به علت بالا بودن سایش، ضریب اصطکاک بالا است زیرا ساختار پوشش نیتريد کروم وابستگی زیادی به پارامترهای پوشش‌دهی دارد و امکان عدم پوشش‌دهی یکنواخت رینگ پیستون وجود دارد؛ در نتیجه برخی نواحی رینگ پیستون دارای ضخامت‌های مختلف هستند. با گذشت زمان میزان ضریب اصطکاک کاهش قابل توجهی داشته و در مراحل پایانی آزمون، دوباره افزایش می‌یابد. سختی پایین پوشش و وابستگی زیادی به پارامترهای پوشش‌دهی، عامل بسیار مهمی در رفتار نامناسب تریبولوژیکی این رینگ پیستون می‌باشد. ضخامت پوشش نیتريد کروم عامل دیگری است که بر روی اندازه دانه‌ها، چسبندگی به زیرلایه و خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد.

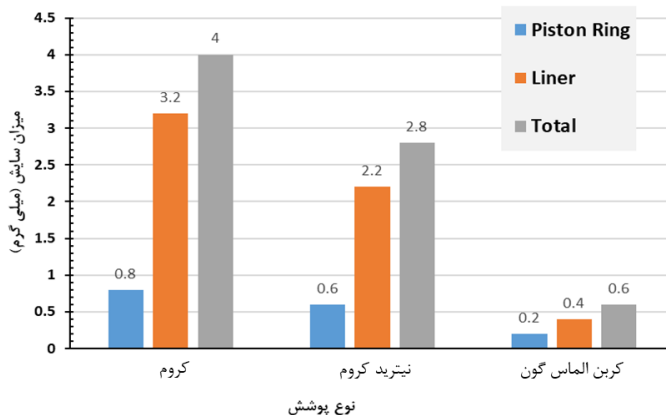


شکل ۵. ضريب اصطكاك بر حسب فاصله طی شده توسط نمونه رینگ با پوشش نیتريد کروم.

در شکل ۶ و ۷ مقایسه ضريب اصطكاك و میزان سایش اندازه‌گیری شده برای نمونه رینگ پیستون با پوشش‌های کروم سخت، نیتريد کروم و کربن الماس گون نشان داده شده است. مقادير نشان داده شده در شکل مقادير میانگين محاسبه شده در ۵۰۰ متر آزمون اندازه‌گیری اصطكاك هستند که با توجه به مقادير ثبت شده در دستگاه به دست آمدند.

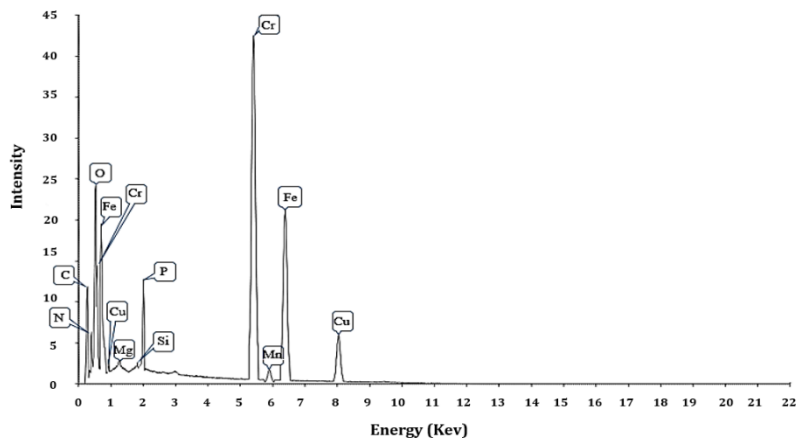


شکل ۶. میانگين ضريب اصطكاك اندازه‌گیری شده برای سه پوشش کروم سخت، نیتريد کروم و کربن الماس گون بعد از ۵۰۰ متر.



شکل ۷. نمودار میزان سایش اندازه‌گیری شده برای رینگ پیستون و بوش سیلندر موتور به دست آمده از آزمون سایش.

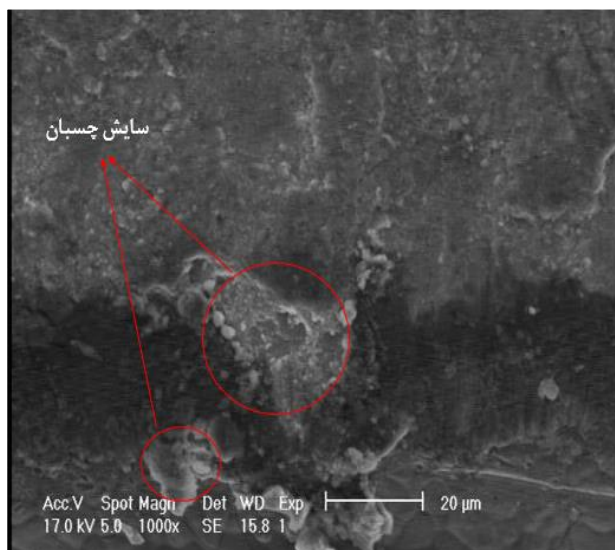
نتایج آنالیز EDX پوشش کروم سخت در شکل ۸ نشان داده شده است. طرح طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس تهیه شده از سطح ساییده شده نمونه رینگ پیستون با پوشش کروم سخت نشان دهنده کربن، سیلیسیم، مس، فسفر، منیزیم و منگنز در سطح ساییده شده است. از آنجا که این عناصر در ترکیب شیمیایی پوشش قبل از آزمون وجود ندارند می‌توان نتیجه گرفت که این عناصر با مکانیزم سایش چسبان از سطح بوش سیلندر به سطح ساییده شده رینگ پیستون منتقل شدند. مشابه چنین نتیجه‌ای برای پوشش‌های نیتريد کروم و کربن الماس گون نیز حاصل شد.



شکل ۸. الگوی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس سطح ساییده شده نمونه رینگ پیستون با پوشش کروم سخت.

علاوه بر آنالیز EDX، تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز وجود سایش چسبان را اثبات می‌کند. رینگ پیستون با پوشش کروم سخت برای عملکرد بهتر، تحت عملیات پرداخت کاری سطح قرار گرفت. در ابتدا این عامل بر مکانیزم سایش چسبیده غلبه کرد و طبق نتایج آزمون سایش، میزان سایش در مسافت ۵۰۰ متر ابتدایی کم بود. ولی با گذشت زمان، مکانیزم سایش چسبیده غالب شد و باعث کاهش چشمگیر وزن پوشش شد. با توجه به چسبندگی پایین پوشش

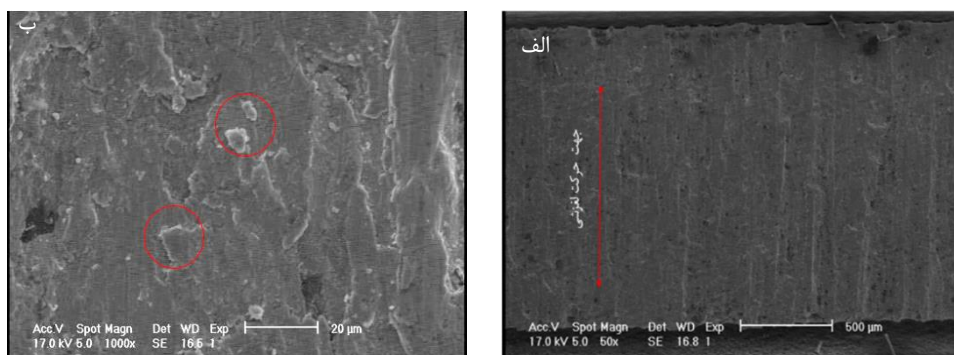
به زیرلایه، احتمال تغییر فرم و شکست پوشش زیاد است. تغییر فرم زیاد پوشش نیز احتمال وقوع سایش چسبان را افزایش می‌دهد. در این حالت ایجاد اتصالات موضعی بین پوشش و بوش سبب جدا شدن پوشش و چسبیدن آن به بوش می‌گردد. در مرحله بعد این اتصال ممکن است بین پوشش و تکه‌ای از آن که به بوش چسبیده نمایان شود که شرایط بحرانی را ایجاد می‌نماید. با دقت در تصاویر میکروسکوپ الکترونی حاصل از سطح ساییده شده نمونه کروم سخت، با مسافت سایشی ۵۰۰ متر که در شکل ۹ نمایش داده شده است، به وضوح سایش چسبنده و تجمع ذرات ریز حاصل از سایش در ترک‌ها قابل رویت است.



شکل ۹. سطح ساییده شده نمونه رینگ پیستون با پوشش کروم سخت.

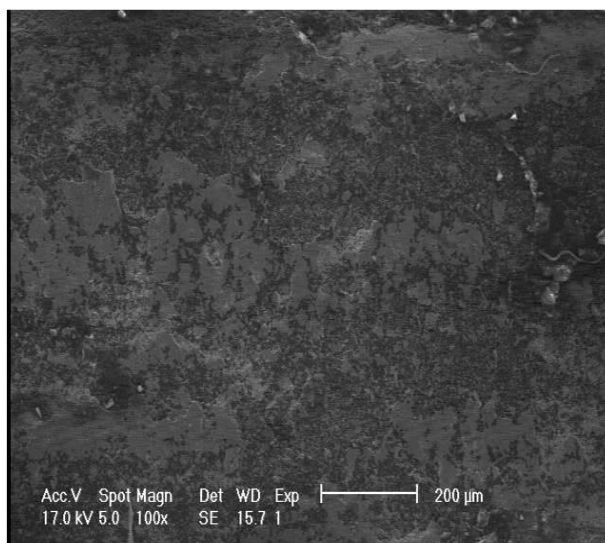
در پوشش نیتريد کروم، کروم عنصر اصلی می‌باشد و عنصر نیتروژن به عنوان عنصر بین‌نشین در شبکه کریستالی، جهت افزایش سختی به آن افزوده شده است. مشاهده می‌شود که ساختار پوشش نیتريد کروم وابستگی زیادی به پارامترهای پوشش‌دهی از قبیل ولتاژ، فشار محفظه و دمای پوشش‌دهی دارد. روش‌های مورد استفاده برای تهیه این پوشش‌ها به دلیل داشتن مزایایی همچون آماده سازی سطح در خود فرآیند، ایجاد ریزساختار بهینه، سخت نمودن سطح و امکان کنترل فازهای تشکیل شده، افزایش مقاومت به سایش و خستگی را به دنبال دارد. امروزه این روش‌ها نسبت به دیگر فرایندهای اصلاح سطح، توانایی‌های بیشتری دارند [۱۹]. با توجه به موارد ذکر شده، مکانیزم سایشی بسیار شدید رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم دور از ذهن نیست. شکل ۱۰ تصویر سطح ساییده شده رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم را ارائه می‌کند. در تصاویر با بزرگنمایی پایین، خطوط سایشی هم جهت با جهت لغزش مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وقوع سایش ساییده می‌باشد. هم چنین در تصاویر با بزرگنمایی بالاتر، مشخص می‌شود که سایش شدید چسبنده رخ داده است. ظرفیت تحمل بار کم نمونه پوشش‌دهی شده نیتريد کروم و تلفات اصطکاکی بالای آن، به علت تعداد کم لایه‌ها و چسبندگی کم پوشش به فلز پایه، باعث سایش ساییده می‌شود که این پوشش، پوشش مناسبی برای مقاومت در برابر سایش نخواهد بود. در تصاویر الکتروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از سطح ساییده شده رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم، خطوط سایشی هم راستا با جهت لغزش مشاهده می‌شود، همین خطوط گواهِ از وجود سایش ساییده می‌باشند. با بررسی دقیق‌تر سطوح سایشی رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم در

بزرگنمایی بالاتر، با توجه به جدا شدن پوسته‌ای و ورقه‌ای و وجود ترک‌های اشاعه یافته و تغییر فرم شدید پلاستیک، سایش ورقه‌ای نیز در این پوشش اتفاق افتاده است.



شکل ۱۰. سطح ساییده شده رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم (الف) مکانیزم سایش ساییده، (ب) مکانیزم سایش چسبنده.

گرافیت یکی از اصلی‌ترین و قدیمی‌ترین روانکارهای جامد به شمار می‌آید. در نتیجه، گرافیت موجود در ترکیب شیمیایی پوشش کربن الماس گون به عنوان عنصر روانکار و الماس موجود در این پوشش به عنوان عضو سخت، سبب کاهش ضریب اصطکاک و سایش رینگ پیستون می‌شود. در پوشش کربن الماس گون احتمال تغییر فرم و شکست پوشش به دلیل چسبندگی بهتر به زیرلایه کمتر است. مطابق شکل ۱۱ هیچ گونه سایش شدید، از جمله سایش ساییده و چسبان دیده نمی‌شود. از این رو با توجه به آثار کندگی و ترک‌های سطحی می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم غالب سایش رینگ پیستون با پوشش کربن الماس گون، مکانیزم سایش خستگی می‌باشد.



شکل ۱۱. سطح ساییده شده رینگ پیستون با پوشش کربن الماس گون.

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی انجام شده روی رینگ‌های پیستون موتور تجاری TU3 تولید شده در ایران و انجام آزمون‌های سایش برای سه نوع پوشش کروم سخت، نیتريد کروم و کربن الماس گون، مقاومت به سایش رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم به میزان ۱/۳ و مقاومت به سایش رینگ پیستون با پوشش کربن الماس گون به میزان ۴ برابر مقاومت به سایش رینگ پیستون پایه با پوشش کروم سخت است. ضریب اصطکاک پوشش‌های ضخیم نیتريد کروم و کربن الماس گون تقریباً نصف پوشش کروم سخت است.

با توجه به تصاویر EDX و SEM تهیه شده از سطح ساییده شده رینگ پیستون با پوشش کروم سخت، مکانیزم سایش چسبان تشخیص داده شد. سختی پایین، عدم پیچیدگی ساختاری و نزدیک شدن ترکیب شیمیایی دو جفت سایشی به علت تجمع خرده‌های حاصل از سایش در ترک سطح پوشش کروم سخت، از مهم‌ترین عوامل رخ دادن مکانیزم سایش چسبنده رینگ پیستون بود. همچنین تصاویر SEM تهیه شده از سطح ساییده شده رینگ پیستون با پوشش نیتريد کروم، حاکی از وقوع سایش ساینده و چسبنده در سطح رینگ پیستون است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، پوشش‌های ایجاد شده به روش رسوب‌دهی فیزیکی بخار برای رینگ پیستون به عنوان نسل جدید پوشش، پیشنهاد می‌شود. حضور گرافیت در ساختار شیمیایی رینگ پیستون با پوشش کربن الماس گون به عنوان روانکار جامد از مهم‌ترین عوامل رفتار سایشی مناسب این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین به خاطر حضور الماس در ساختار آن، تلفات سایشی نمونه کم می‌شود. چسبندگی مناسب پوشش کربن الماس گون به فلز پایه، از راحت جدا شدن پوشش جلوگیری به عمل می‌آورد و در نتیجه تنها راه سایش، سایش خستگی می‌باشد. به دلیل مقاومت دمایی پایین پوشش کربن الماس گون، این پوشش به شکلی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، قابل استفاده در موتور احتراقی نمی‌باشد و لازم است آزمون‌های بیشتری جهت صحت‌گذاری آن انجام شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت رینگ خودروپارس (Ring Khodro Pars) جهت حمایت مالی از تحقیق و تولید نمونه‌های رینگ‌های پیستون و شرکت Hauzer جهت پوشش‌دهی نمونه‌ها اعلام می‌دارند.

References

- [1] Saligheh, A., Hajjalimohammadi, A., & Abedini, V. (2020). Cutting Forces and Tool Wear Investigation for Face Milling of Bimetallic Composite Parts Made of Aluminum and Cast Iron Alloys. *International Journal of Engineering*, 33(6), 1142-1148. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.06c.12>
- [2] Akbari, M., Asadi, P., & Asiabaraki, H. R. (2022). Investigation of wear and microstructural properties of A356/TiC composites fabricated by FSP. *Surface Review and Letters*, 29(10), 1-10. <https://doi.org/10.1142/S0218625X2250130X>
- [3] Rahimi Asiabaraki, H., Akbari, M., & Asadi, P. (2022). Improving the wear and microstructural properties of piston alloys using ZrO₂ reinforcing particles. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 9(2), 52-59. <https://doi.org/10.22034/ijme.2022.157562>
- [4] Adamkiewicz, A., & Drzewieniecki, J. (2017). Operational evaluation of piston-rings-cylinder liner assembly wear in high power marine diesel engines. *Tribologia*, 271(1), 5-15. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0010.6357>
- [5] Delprete, C., & Razavykia, A. (2018). Piston ring-liner lubrication and tribological performance evaluation: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*:

- Journal of Engineering Tribology*, 232(2), 193-209. <https://doi.org/10.1177/1350650117706269>
- [6] Takabi, J., & Khonsari, M. M. (2015). On the thermally-induced seizure in bearings: A review. *Tribology International*, 91, 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.030>
- [7] Meng, X., Gu, C., & Zhang, D. (2017). Modeling the wear process of the ring/liner conjunction considering the evaluation of asperity height distribution. *Tribology International*, 112, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.025>
- [8] Morris, N., Rahmani, R., Rahnejat, H., King, P. D., & Fitzsimons, B. (2013). Tribology of piston compression ring conjunction under transient thermal mixed regime of lubrication. *Tribology International*, 59, 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.09.002>
- [9] Kennedy, M., Hoppe, S., & Esser, J. (2014). Lower Friction Losses With New Piston Ring Coating. *Motortechnische Zeitschrift worldwide*, 75(4), 24-29. <https://doi.org/10.1007/s38313-014-0135-7>
- [10] Whitehouse, D. J. (1997). Surface metrology. *Measurement Science and Technology*, 8(9), 955-972. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/9/002>
- [11] Friedrich, C., Berg, G., Broszeit, E., Rick, F., & Holland, J. (1997). PVD CrxN coatings for tribological application on piston rings. *Surface and Coatings Technology*, 97(1-3), 661-668. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00335-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00335-6)
- [12] Li, Z., Zhang, H., He, W., Xu, L., Zhang, G. a., Nie, X., Liao, B., & Li, Y. (2019). Tribological performance of GLC, WC/GLC and TiN films on the carburized M50NiL steel. *Surface and Coatings Technology*, 361, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.038>
- [13] Wang, J., Pu, J., Zhang, G., & Wang, L. (2015). Architecture of superthick diamond-like carbon films with excellent high temperature wear resistance. *Tribology International*, 81, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.08.017>
- [14] Makowski, S., Wehnacht, V., Schaller, F., & Leson, A. (2014). Ultra-low friction of biodiesel lubricated ta-C coatings. *Tribology International*, 71, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.11.002>
- [15] Dalibón, E. L., Escalada, L., Simison, S., Forsich, C., Heim, D., & Brühl, S. P. (2017). Mechanical and corrosion behavior of thick and soft DLC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 312, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.006>
- [16] Herd, S., Wood, R. J. K., Wharton, J. A., & Higgs, C. F. (2018). Explicit fracture modelling of cemented tungsten carbide (WC-Co) at the mesoscale. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.109>
- [17] Turnbull, R., Dolatabadi, N., Rahmani, R., & Rahnejat, H. (2020). An assessment of gas power leakage and frictional losses from the top compression ring of internal combustion engines. *Tribology International*, 142, 105991. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105991>
- [18] Kaźmierczak, A. R. (2021). Analysis of the results from a goniometer and tribotester of a diamond derivative coating on the first piston ring of an internal combustion engine. *Wear*, 477(2), 203812. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203812>
- [19] Yashin, M., Baroninš, J., Menezes, P. L., Viljus, M., Raadik, T., Bogatov, A., Antonov, M., & Podgursky, V. (2017). Wear rate of nanocrystalline diamond coating under high temperature sliding conditions. *Solid State Phenomena*, 267, 219-223. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.267.219>