



DOR:

مقایسه خواص خستگی خمشی و خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم تحت شرایط کاری سامانه رینگ-پیستون موتور

محمد صادق اقارب پرست^۱، محمد حسین حاجی اسماعیلی^۲ و محمد آزادی^{۳*}

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

^۲ فارغ التحصیل کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

چکیده

پدیده خستگی سایشی در قطعات رینگ و پیستون موتور، سبب ایجاد آسیب و خرابی می‌شود. در این پژوهش، رفتارهای خستگی سایشی و خستگی خمشی در آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون، مقایسه شده است. سپس، تاثیر روانکاری و نیروی تماسی بر عمر خستگی سایشی ماده نیز، بررسی گردیده است. برای این منظور، آزمون‌های خستگی در شرایط بارگذاری کاملا معکوس شونده و در دمای محیط انجام شد. برای ایجاد شرایط کاری مشابه، از رینگ پیستون به عنوان پد سایشی استفاده گردید. ضمنا رفتار شکست ماده طی پدیده خستگی، به کمک میکروسکوپ روبشی نشر میدانی مطالعه شد. نتایج مشخص کرد که رفتار شکست آلیاژ آلومینیوم پیستون عمدتا ترد بوده است و در برخی نواحی رفتار شکست نیمه ترد مشاهده شد؛ همچنین، عمر خستگی سایشی ماده بین ۸۴ تا ۹۵ درصد نسبت به عمر خستگی خمشی، کاهش یافت. اعمال روانکار باعث افزایش قابل توجه ۴۳ تا ۷۵ درصدی عمر خستگی گردید. استفاده از روغن و کاهش نیروی تماسی از ۲۰ به ۱۰ نیوتن، سبب بهبود ۱۶ برابری عمر خستگی سایشی در آلیاژ کوئنچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم، تحت سطح تنش ۱۵۰ مگاپاسکال گردید.

کلمات کلیدی: خستگی خمشی؛ خستگی سایشی؛ روانکاری با روغن؛ نیروی تماسی؛ آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم.

Comparing Bending Fatigue and Fretting Fatigue Properties in Aluminum-Silicon Alloy under Working Conditions of Engine Piston-Ring System

M.S. Aghareb Parast¹, M.H. Haji Esmaili², M. Azadi^{3,*}

¹ MS.c. Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

² BS.c. Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

Abstract

The fretting fatigue phenomenon in engine piston and ring parts, leads to the damage and the failure. In this study, fretting fatigue and bending fatigue behaviors in the piston aluminum-silicon alloy were compared. Then, the effect of the lubrication and the contact force was investigated on the fretting fatigue lifetime of the material. For this objective, fatigue tests were conducted in a fully-reversed loading condition at room temperature. For a better working condition, piston rings were used as fretting pads. The material fracture behavior was studied by the field emission scanning electron microscopy. Obtained results indicated that the fracture surface of the piston aluminum alloy was brittle; however, in some areas, semi-brittle fracture behavior was observed. Moreover, the fretting fatigue lifetime of the material decreased as 84 to 95%, compared to the bending fatigue lifetime. Applying the lubricant led to a significant increase of 43 to 75% of the fatigue lifetime. Using the oil and reducing the contact force from 20 to 10 N caused the 16-time improvement in the fretting fatigue lifetime of the quenched piston aluminum-silicon alloy, under 150 MPa of the stress level.

Keywords: Bending Fatigue; Fretting Fatigue; Oil Lubrication; Contact Force; Aluminum-Silicon Alloy.

۱- مقدمه

شناسایی انواع مکانیزم‌های خرابی مکانیکی در سازه‌ها، یکی از مباحث مهم در علم مکانیک است. خستگی سایشی^۱ به عنوان یکی از پیچیده‌ترین مکانیزم‌های خرابی شناخته می‌شود که از ترکیب مودهای خستگی و سایشی به وجود می‌آید. به طور کلی، حرکت نسبی مماسی بین دو جسم در حال تماس، هنگامی که تحت بارگذاری‌های ارتعاشی و یا نیروهای متغیر قرار می‌گیرند، پدیده "فرتینگ" نام‌گذاری می‌شود [۱-۲] و گاهی از آن به خستگی سایشی یاد می‌شود. استمرار تنش‌های تماسی، باعث شکل‌گیری و در ادامه، رشد ترک می‌شود که به این پدیده، خستگی سایشی می‌گویند [۲]. پدیده خستگی سایشی، با در نظر گرفتن سایش‌های اصطکاکی- ارتعاشی و بارگذاری‌های متناوب مکانیکی، در قطعات موتور خودرو، به ویژه بین سطوح در تماس موجود در اولین رینگ پیستون و شیار رینگ بالایی پیستون موتور، اتفاق می‌افتد [۳]؛ لذا مکانیزم آسیب خستگی سایشی، یک آسیب جدی در قطعات عنوان می‌شود و با وجود مورد مطالعه قرار گرفتن این موضوع برای حدود یک قرن، همچنان بررسی‌های بیشتری برای درک دقیق رفتار و شناخت اصول مکانیزم‌های خستگی سایشی لازم است [۴-۵].

با توجه به نیازهای صنعتی، ضروری است که رفتار خستگی سایشی در قطعات توسط طراحان و پژوهشگران، برای دستیابی به قابلیت اطمینان بهتر در نظر گرفته شود [۴]. امروزه در صنعت خودروسازی، به ویژه برای تولید پیستون موتور، آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم، به دلیل خواص ویژه و مناسب آنها مانند مقاومت بالا نسبت به خوردگی و ساییدگی، ضریب انبساط حرارتی پایین و نسبت قابل توجه استحکام به وزن، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. از این‌رو، مطالعه و بررسی رفتار خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. به عنوان کارهای تجربی، تاثیر فشار تماس بر آسیب خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت بارگذاری پیچشی در مطالعه پنگ^۲ و همکاران [۷] بررسی گردید. نتایج بیانگر تاثیر عمده فشار تماسی بر عمر خستگی سایشی است.

همچنین، بررسی انجام شده نشان داد که افزایش فشار تماسی، به دلیل ایجاد سطح بزرگتر اکسیداسیون، سبب افزایش آسیب خستگی پیچشی سایشی می‌شود. در مطالعه-ای دیگر، پنگ و همکاران [۸]، منحنی تنش-عمر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در شرایط بارگذاری پیچشی به دست آمد. با افزایش مقدار تنش برشی پیچشی، مکانیزم‌های متفاوت خستگی پیچشی سایشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون نشان داد که مکانیزم‌های اصلی آسیب، شامل سایش غیرچسبنده^۳، سایش اکسایشی و لایه‌لایه شدگی^۴ است. افزایش تنش پیچشی باعث رشد چشمگیر ضریب اصطکاک، سطح اکسیداسیون و عمق سایش در سطح تماس می‌شود. در مطالعه مشابه دیگری، رفتار خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت بارگذاری خمشی در برابر ساینده‌هایی از فولاد ۵۲۱۰۰، توسط پنگ و همکاران [۹] مطالعه شده است. علاوه بر مشاهده انواع آسیب مشابه با پژوهش‌های [۸، ۱۰]، نتایج نشان داد که عامل ایجاد ترک در ناحیه زیرین سطح، تمرکز تنش ایجاد شده بر اثر نیروی تماسی موجود در اطراف ناحیه تماس بوده است. آزمون خستگی سایشی روی آلیاژ آلومینیوم 6061T4 توسط سنگرال^۵ و همکاران [۱۱]، در دماهای مختلف و پدهای سایشی متفاوت انجام شد. آنها نشان دادند که هندسه پدهای سایشی و دما از عوامل کلیدی موثر بر عمر خستگی سایشی هستند.

علاوه بر این، مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی و پیش‌بینی عمر خستگی سایشی صورت گرفته است. در این بین، مدلی برای شبیه‌سازی سرعت رشد ترک خستگی سایشی، با در نظر گرفتن هر دو ناحیه رشد ترک‌های کوتاه و بلند، برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰، توسط پانامیکر^۶ و همکاران [۱۲] ارائه گردید که با نتایج آزمون خستگی سایشی نیز تطابق خوبی را نشان داد؛ همچنین، مدلی بر اساس روش قانون ناحیه چسبنده که شامل افت انرژی شکست و کاهش نرمی در طی افزایش دور می‌شود، توسط کیم و یون^۷ [۱۳]، برای رفتار خستگی سایشی پرچرخه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰ ارائه شد.

³ Abrasive Wear

⁴ Delamination

⁵ Sengral

⁶ Pannemaecker

⁷ Kim and Yoon

¹ Fretting Fatigue

² Peng

با این که اثر خستگی سایشی روی عمر برخی از قطعات صنعتی مانند سیم‌های اتصال پل‌ها [۲۱]، شاتون [۲۲] و شیر کمک فنر خودرو [۲۳] مورد بررسی قرار گرفته است، اما مطالعه رفتار خستگی سایشی رینگ و پیستون موتور، به ندرت انجام شده است؛ همچنین علی‌رغم مطالعات محدودی که بر رفتار خستگی سایشی آلیاژهای آلومینیومی صورت گرفته است، هنوز نیاز به مطالعات بیشتری روی رفتار آلیاژ آلومینیوم پیستون و بررسی اثر روانکاری بر عمر خستگی سایشی ماده است؛ بنابراین، می‌توان موارد زیر را به عنوان نوآوری این پژوهش مطرح کرد:

- بررسی اثر نیروی تماسی بر رفتار و عمر خستگی خمشی برای آلیاژ خاص آلومینیوم پیستون
- مطالعه اثر روانکار بر رفتار و عمر خستگی خمشی سایشی در آلیاژ آلومینیوم

لذا در این پژوهش میزان بهبود عمر خستگی سایشی و رفتار شکست آلیاژ آلومینیومی مورد استفاده در پیستون موتور بر اثر افزودن روانکار، مطالعه شده است؛ همچنین، تاثیر تغییر نیروی تماسی بر رفتار خستگی سایشی آلیاژ آلومینیومی مورد استفاده در پیستون بررسی شده است.

۲- مواد و روش آزمون

ماده مورد بررسی در این پژوهش، آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم-سیلیسیوم است. این آلیاژ در پیستون موتور ملی (EF7) و بسیاری از خودروهای درونسوز دیگر کاربرد دارد. این ماده شامل، عنصر اصلی آلومینیوم و عناصر آلیاژی سیلیسیوم و مس است و با نام $AlSi12Cu3Ni2Mg$ یا A336.0 و با نام‌های سابق A332.0 و A132 شناخته می‌شود. این آلیاژ تحت عنوان M142 نیز معرفی شده است. روش ساخت این آلیاژ به صورت ریخته‌گری ثقلی است. به منظور حصول اطمینان از نوع آلیاژ و عناصر تشکیل دهنده آن، آزمون کوانتومتری^۵ انجام شده است. این آزمون در مرکز مرکز پژوهش متالورژی رازی و مطابق با استاندارد ASTM-E1251-11 انجام گردید. درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش، در جدول ۱ آمده است.

نتایج حاصل با منحنی‌های تنش-عمر موجود، مورد تایید قرار گرفت. مدلی برای تعیین عمر، ایجاد و رشد ترک خستگی سایشی، بر اساس تئوری چگالی انرژی کرنشی و ناحیه بحرانی، توسط موسو^۱ [۱۴]، تعریف شد؛ همچنین، آزمون خستگی سایشی روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده با پدهای سایشی از جنس فولاد EN24 انجام شد و نتایج حاصل از مدل ارائه شده را تایید کرد.

در دسته دیگری از تحقیقات قبلی، مطالعات محدودی روی آلیاژهای تقویت شده آلومینیومی صورت گرفته است. برای مثال، اثر سختی سطح بر روی رفتار خستگی سایشی با اعمال ضخامت‌های متفاوتی از پوشش آنودایزی روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده، مورد مطالعه سرهان^۲ و همکاران [۱۶] قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوشش آنودایزی با سختی ۳۶۰ ویکرز، سبب افزایش عمر خستگی سایشی در ناحیه خستگی پرچرخه می‌شود. درحالی‌که پوشش‌های آنودایزی با سختی بیشتر، به دلیل شکنندگی پوشش و ایجاد میکرو ترک‌ها، باعث کاهش عمر خستگی سایشی در سطح تنش‌های بیشتر می‌شوند. رفتار خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده، توسط شینده و هوپنر^۳ [۱۷]، مطالعه گردید. نتایج مشخص کرد که ریزساختارهای متفاوت می‌تواند روی شکل‌گیری و رشد ترک خستگی سایشی تاثیرگذار باشد.

به طور کلی، در رابطه با اثر روانکاری بر عمر خستگی سایشی، مطالعات محدودی صورت گرفته است. از این قبیل می‌توان به پژوهش‌های [۱۸، ۱۹] که به بررسی تاثیر روانکاری بر عمر خستگی سایشی آلیاژهای تیتانیومی پرداخته‌اند، اشاره کرد. در رابطه با آلیاژ آلومینیوم، تاثیر روانکاری در حفره متصل‌کننده پین موجود در اتصالات لبه‌ای برشی دوتایی^۴ ساخته شده از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴، مورد بررسی چاخولو و همکاران [۲۰]، قرار گرفت. نتایج نشان داد، نمونه‌هایی که در محل حفره روغن‌کاری شده‌اند، عمر خستگی سایشی بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون روغن‌کاری دارند.

¹ Muthu

² Sarhan

³ Shinde and Hoepfner

⁴ Double Shear Lap Joints

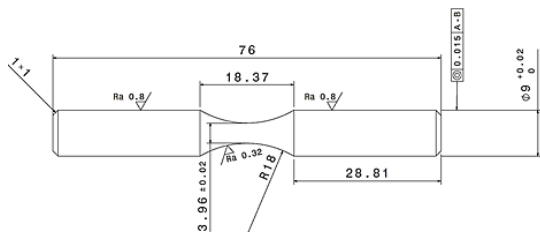
⁵ Quantometry



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱- الف) ماژول اعمال بار خستگی سایشی، ب) نحوه قرارگیری ماژول روی دستگاه آزمون خستگی، ج) نقشه نمونه استاندارد و د) نمونه آزمون خستگی

است؛ همچنین نقشه نمونه استاندارد و نمونه واقعی مورد استفاده در آزمون‌های خستگی و خستگی سایشی، در شکل ۱ (ج) و (د) نشان داده شده است. لازم به ذکر است، کلیات هندسه ماژول سایشی، نوع اعمال بار تماسی و بارگذاری خستگی سایشی، با مطالعه [۱۶] مطابقت دارد. به منظور تدارک آزمون خستگی سایشی، دستگاهی براساس الگوبرداری از استاندارد ASTM-E2789-10 و مراجع دیگر [۱۶ و ۲۴-۲۵]، طراحی و ساخته شده است [۲۶] که امکان اعمال نیروی تماسی سایشی به نمونه را محقق می‌کند. در این ماژول، پدها سایشی به میله اعمال نیرو متصل گردیده و به کمک فنر، نیروی ثابتی به نمونه آزمون وارد می‌کند. برای نزدیک شدن شرایط آزمون به شرایط کاری پیستون در

جدول ۱- مقایسه درصد عناصر اصلی آلیاژ با مراجع دیگر

عناصر	کوانتومتری	تامین کننده آلیاژ	مراجع [۳]
Si	۱۲/۵	۱۱ تا ۱۳	۱۱ تا ۱۳
Cu	۲/۴	۴ تا ۲/۵	۴ تا ۲/۵
Mg	۰/۷	۱/۲ تا ۰/۵	۱/۲ تا ۰/۵
Ni	۲/۲	۳ تا ۱/۸	۳ تا ۱/۸
Fe	۰/۴	۰ تا ۰/۷	بیشینه ۰/۷
Mn	۰/۳	۰ تا ۰/۳	بیشینه ۰/۳
Ti	۰/۰۲	۰ تا ۰/۲	بیشینه ۰/۲
Al	عنصر پایه	عنصر پایه	عنصر پایه

درصد عناصر اصلی تشکیل‌دهنده این آلیاژ با مراجع دیگر در جدول ۱ مقایسه گردیده است. برای ساخت نمونه‌ها پیش از استفاده از مذاب، فرآیند بهسازی و آماده‌سازی آن انجام گرفته است و بعد از گاززدایی به کمک گاز آرگون فرآیند ذوب‌ریزی انجام شده است. دمای مذاب در حین ذوب‌ریزی حدود ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بود و دمای قالب نیز، در محدوده ۱۵۰ الی ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد نگهداشته شد. پس از فرآیند مذاب‌ریزی در قالب، قطعه ذوب‌ریزی شده برای منجمد شدن مذاب، به مدت ۴ دقیقه درون قالب نگهداری گردید و پس از انجماد کامل، از قالب خارج شده و بلافاصله درون آب با دمای حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ دقیقه سردسازی یا کوئنچ^۱ شده است.

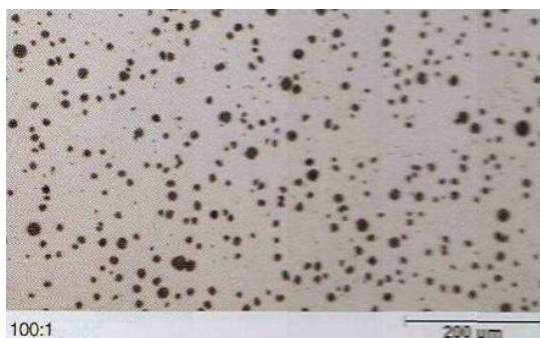
در این پژوهش، از دستگاه آزمون خستگی خمشی دورانی SFT-600 ساخت شرکت سنتام استفاده شده است. نوع بارگذاری کاملاً معکوس شونده و فرکانس بارگذاری ۱۰۰ هرتز بوده است. آزمون خستگی خمشی، در ۴ سطح تنش (۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال) و با حداقل ۳ مرتبه تکرار، مطابق با استاندارد ISO-1143، انجام گرفته است.

ماژول اعمال بار خستگی سایشی و نحوه اتصال آن به دستگاه آزمون به ترتیب در شکل ۱ (الف) و (ب) آورده شده

^۱ Quench

جدول ۲- مشخصات رینگ پیستون [۲۷]

Piston Ring Cast Iron (MF 116)	
جنس رینگ پیستون	چدن کروی مارتنزیتی
کربن: ۳/۵ تا ۴/۱۰	
سیلیسیم: ۲/۴۰ تا ۲/۹۰	
منگنز: ۰/۲۰ تا ۰/۸۰	
منیزیم: ۰/۰۲ تا ۰/۰۷	
نیکل: حداکثر ۰/۷۰	
مولیبدن: حداکثر ۰/۳۰	
سختی (راکول)	۳۵ تا ۴۵
مدول الاستیک (مگاپاسکال)	۱۴۵۰۰۰ تا ۱۸۵۰۰۰
استحکام خمشی (مگاپاسکال)	۱۳۰۰



شکل ۲- ریزساختار رینگ پیستون [۲۷]

برای اعمال نزدیک‌ترین حالت به شرایط کاری، هنگام اجرای آزمون خستگی سایشی مجموعاً ۳ قطره روغن در هر ۱۵ ثانیه روی نمونه استاندارد و پدهای سایشی افزوده شده است. ضمناً روغن مورد استفاده، ساخت کشور آلمان با نام تجاری ADDINOL ECONOMIC 020، از نوع SAE-0W20 است.

در نهایت، بررسی ریزساختار به کمک میکروسکوپ نوری صورت گرفته است و پس از آن مطالعه سطح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) به کمک دستگاه MIRA2-TESCAN انجام شده است. برای بررسی ریزساختار نیز، پس از انجام مراحل سنباده زنی تا شماره ۳۰۰۰، نمونه‌ها به کمک پودر آلومینا تحت

موتور، پدهای سایشی استفاده شده در این پژوهش، از رینگ پیستون مورد استفاده در موتور، برش داده شده است. این پدهای سایشی از جنس چدن کروی بوده است و داخل شیار میله اعمال نیرو قرار می‌گیرد. ویژگی‌های رینگ پیستون در جدول ۲ آورده شده است؛ همچنین، ریزساختار رینگ پیستون مورد استفاده به عنوان پد سایشی نیز، طبق مرجع [۲۷]، در شکل ۲ آورده شده است.

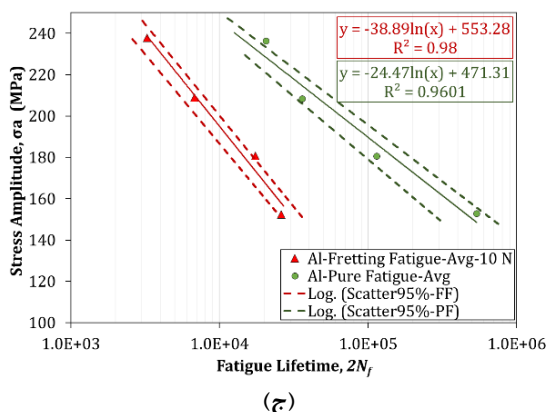
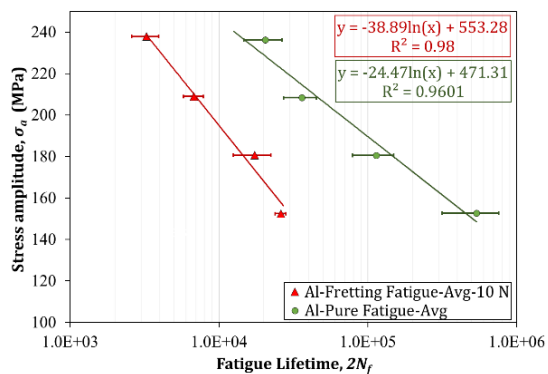
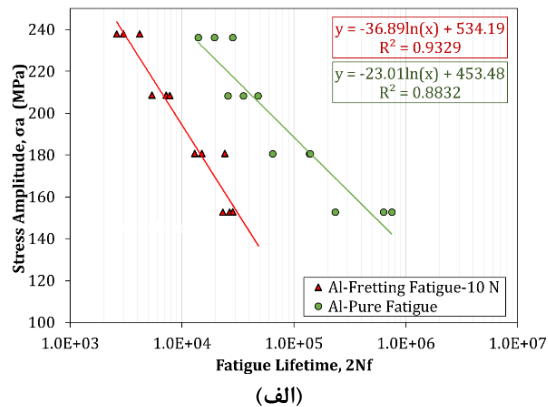
در این پژوهش، برای بررسی اثر نیرو اعمالی بر عمر خستگی سایشی آلیاژ کوئچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون، آزمون خستگی سایشی در سطح تنش ۱۵۰ مگاپاسکال در ۳ نیروی متفاوت (۱۰، ۱۵، ۲۰ نیوتن) انجام شده است؛ همچنین به منظور بررسی تاثیر روانکاری روی رفتار خستگی سایشی، آزمون خستگی سایشی در شرایط ذکر شده با اعمال روانکار تکرار شده است.

دلیل انتخاب سطح تنش ۱۵۰ مگاپاسکال برای مطالعه اثرات نیروی تماسی و روانکار، این بوده است که این سطح تنش، کمترین تنش و لذا بیشترین عمر را شامل شده است. افزایش محدوده پراکندگی عمر در سطوح تنش کمتر و لذا تغییرات محسوس‌تر عمر و دستیابی به سطح اطمینان بیشتر از داده‌های تجربی، دلیل دیگر بوده است. ضمناً تنش ۱۵۰ مگاپاسکال، در واقعیت، به تنش‌های اعمالی به پیستون موتور در خودروهای سواری، نزدیک‌تر است [۳].

نیروهای تماسی در این مقاله، بر اساس نیروی اعمالی در رینگ پیستون [۲۸-۲۹] انتخاب گردیده است و همچنین این مقادیر برای آلیاژ آلومینیوم در آزمون‌های سایش فرتینگ [۳۰-۳۱] و آزمون‌های سایش [۳۲-۳۴] نیز، استفاده شده است. شایان ذکر است که نیروی ۲۰ تا ۳۰ نیوتن برای مجموع رینگ‌ها [۲۸]، نیروی ۱۵ نیوتن برای رینگ اول [۲۹]، نیروهای ۱۰ تا ۳۰ نیوتن برای پدیده سایش فرتینگ [۳۰-۳۱]، نیروی ۱۰ تا ۵۰ نیوتن برای پدیده سایش [۳۳-۳۴]، گزارش شده است.

برای بحث مطالعه تاثیر روانکاری در پدیده سایش قطعات، معمولاً به دو صورت غوطه‌وری در روغن [۳۵] و یا آغشته‌سازی با روغن [۲۰] عمل می‌شود. با توجه به اینکه فرایند روانکاری در قطعات لاینر، رینگ و پیستون موتور، برای حالت طراحی ایده‌آل، از نوع هیدرودینامیک است [۳]، حالت آغشته‌سازی با روغن اعمال گردیده است؛ بنابراین،

شکل ۴ (الف) برحسب تمامی داده‌ها و شکل ۴ (ب) برحسب میانگین داده‌ها رسم شده است؛ همچنین در شکل ۴ (ج)، محدوده پراکندگی نتایج خستگی سایشی و خستگی خمشی نمایش داده شده است که این محدوده پراکندگی کوچک برای داده‌های تجربی می‌تواند به گونه‌ای نشان از صحت‌گذاری



شکل ۴- مقایسه رفتار خستگی خمشی و خستگی سایشی: (الف) منحنی تنش- عمر بر حسب تمام داده‌ها، (ب) منحنی تنش- عمر بر حسب میانگین داده‌ها و (ج) محدوده پراکندگی داده‌ها

پولیش کاری قرار گرفته است و برای مشخص شدن فازها از محلول اچ کلر با ترکیب شیمیایی ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲/۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید، ۱/۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید، ۱ میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید کمک گرفته شد.

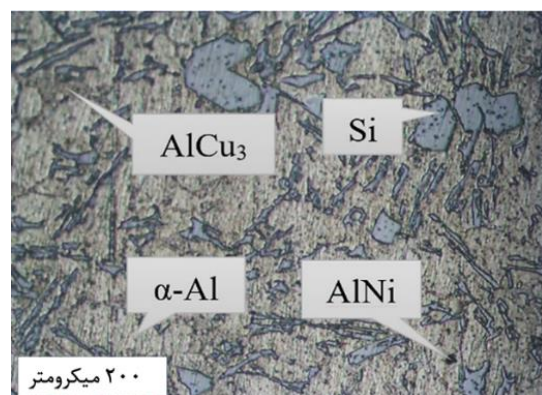
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

نتایج بررسی میکروسکوپ نوری ریزساختار آلیاژ کوئنچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، عمده رسوبات پراکنده شده در زمینه آلومینیومی این آلیاژ از فاز سیلیسیوم است که در دو حالت متفاوت رسوبات شاخه‌ای شکل و رسوبات بلوکی شکل در زمینه آلومینیومی شکل گرفتند؛ همچنین فازهای بین‌فلزی شامل ترکیبات آلومینیوم با عناصر نیکل و مس نیز در ریزساختار قابل مشاهده هستند. فازهای بین‌فلزی به ویژه فاز بین‌فلزی نیکل، می‌توانند باعث بهبود عملکرد آلیاژ آلومینیوم در دمای زیاد شوند [۳۶]. لازم به ذکر است، همانطور که در مطالعات [۳۶-۳۷] آورده شده است، در بزرگنمایی‌های کوچک میکروسکوپ نوری تشخیص فازهای بین‌فلزی نسبتاً مشکل است؛ همچنین، در رابطه با ریزساختار آلیاژ آلومینیوم پیستون، فازهای مشابهی در مطالعات پیشین [۳، ۶، ۳۸] مشاهده شده است.

۳-۲- عمر خستگی سایشی

عمر خستگی خمشی و خستگی سایشی آلیاژ کوئنچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون در شکل ۴ مقایسه شده است.



شکل ۳- ریزساختار آلیاژ AlSi12 بزرگنمایی ۲۰۰ برابر [۳۹]

عمر شکل‌گیری ترک و افزایش سرعت رشد ترک به دنبال وجود تمرکز تنش در شرایط بارگذاری خستگی سایشی باشد. یکی از مکانیزم‌های اصلی رشد سرعت ترک در خستگی سایشی، اثر گوه‌ای است. این امر زمانی رخ می‌دهد که براده‌های حاصل از سایش وارد ترک‌های کوچک خستگی سایشی ایجاد شده می‌شود و باعث افزایش سرعت رشد ترک می‌شوند [۱۶].

به منظور استخراج خواص (ثوابت) ماده، رابطه مانسون (معادله ۱)، در مقیاس لگاریتمی بازنویسی شده و معادله آن به صورت خطی و به فرم زیر حاصل می‌شود [۴۰]:

$$\sigma_a = \sigma'_f (\gamma N_f)^b \quad (1)$$

$$\text{Log}(\sigma_a) = \text{Log}(\sigma'_f) + b \text{Log}(\gamma N_f) \quad (2)$$

در این روابط، σ_a برابر با دامنه تنش^۱ و N_f معادل عمر شکست خستگی است؛ همچنین σ'_f معادل ضریب استحکام خستگی^۲ (عرض از مبدا منحنی تنش-عمر) و b برابر توان استحکام خستگی^۳ (شیب منحنی تنش-عمر) هستند. در ادامه، خواص خستگی حاصل از داده‌های آزمون، به همراه مقادیر ضریب تعیین^۴ (R^2) مربوط به آن، در جدول ۳ ارائه شده است. این مقدار نشان دهنده میزان تطبیق مدل و داده‌های تجربی است. معادلات حاصل از برازش داده‌های موجود در منحنی تنش-عمر در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳- خواص خستگی و خستگی خمشی

نمونه	تمامی داده‌ها		
	b	$\sigma'_f (MPa)$	R^2
خستگی خمشی [۳۹]	-۰/۱۳	۸۷۳/۹۷	۰/۶۸
خستگی سایشی	-۰/۱۹	۱۱۰۹/۴۳	۰/۹۱
میانگین داده‌ها			
خستگی خمشی [۳۹]	-۰/۱۶	۱۱۳۸/۱۵	۰/۹۷
خستگی سایشی	-۰/۲۰	۱۲۲۳/۴۸	۰/۹۶

¹ Stress Amplitude

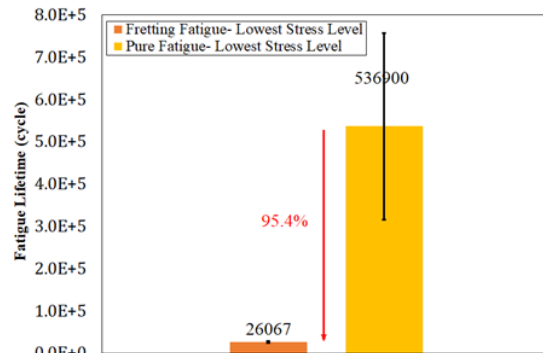
² Fatigue Strength Coefficient

³ Fatigue Strength Exponent

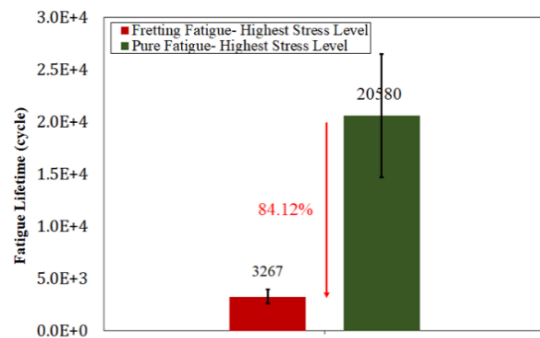
⁴ Coefficient of Determination

و قابلیت اطمینان نتایج باشد. این پراکندگی داده‌های بدست آمده از آزمون خستگی سایشی از آزمون خستگی خمشی کمتر شده است. به عبارت دیگر، سطح اطمینان بیشتر در داده‌های خستگی سایشی نسبت به داده‌های خستگی خمشی مشاهده می‌شود؛ همچنین، نتایج نشان داده است که وجود شرایط خستگی سایشی سبب کاهش عمر خستگی می‌شود که این امر در مراجع دیگری مانند مطالعه [۸] نیز، به‌دست آمده است. علاوه بر این مطالب، میانگین عمر خستگی ماده در بیشترین و کمترین سطح تنش نیز، به ترتیب در شکل ۵ (الف) و (ب) مقایسه شده است.

قابل ذکر است در کمترین سطح تنش، آسیب خستگی سایشی باعث کاهش ۹۵/۱۴ درصدی عمر خستگی شده است. این مقدار برای بیشترین سطح تنش ۸۴/۱۲ درصد بوده است. در مطالعات [۷-۹ و ۱۱] به کاهش عمر خستگی بر اثر اعمال آسیب خستگی سایشی اشاره شده است. کاهش عمر خستگی سایشی به نظر می‌رسد، به دلیل کمتر شدن



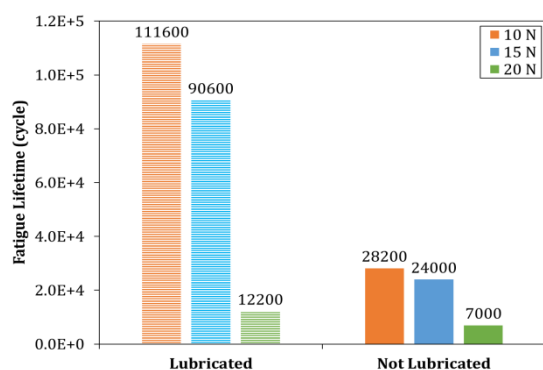
(الف)



(ب)

شکل ۵- مقایسه میانگین عمر خستگی سایشی و خستگی خمشی در (الف) کمترین و (ب) بیشترین سطح تنش

علاوه بر این، اثر روانکاری بر عمر خستگی سایشی در شکل ۶ نشان داده شده است. افزوده روغن حین آزمون برای نیروی تماسی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نیوتن به ترتیب باعث رشد $۷۴/۷۲$ ، $۷۳/۵۰$ و $۴۲/۶۲$ درصد در عمر خستگی سایشی شده است. در مطالعه [۲۰] به تاثیر مثبت روانکار بر رفتار خستگی سایشی به دلیل کاهش ضریب اصطکاک اشاره شده است. روانکاری می تواند باعث کاهش دما سطح شود. این امر نیز باعث بهبود عمر خستگی سایشی می شود [۱۱].



شکل ۶- تاثیر روانکار بر عمر خستگی سایشی

آزمون خستگی سایشی با اعمال روانکار در هر سه نیروی تماسی صورت گرفته است که نتایج در شکل ۶ آورده شده است. این نتایج نشان می دهد که عمر خستگی سایشی با افزایش نیروی تماسی کاهش می یابد. نتایج مطالعه [۷] نشان داد که با افزایش نیروی تماسی، احتمال ایجاد ترک بیشتر می شود و در نتیجه، عمر خستگی کاهش می یابد. هر چند با افزایش نیرو تا حد بحرانی، در محدوده خاصی ترک های ایجاد شده، قبل از آن که رشد داشته باشند، به دلیل سرعت زیاد میزان سایش، از بین می روند؛ لذا در محدوده خاصی از نیروی تماسی، با افزایش نیرو، عمر خستگی نیز افزایش می یابد.

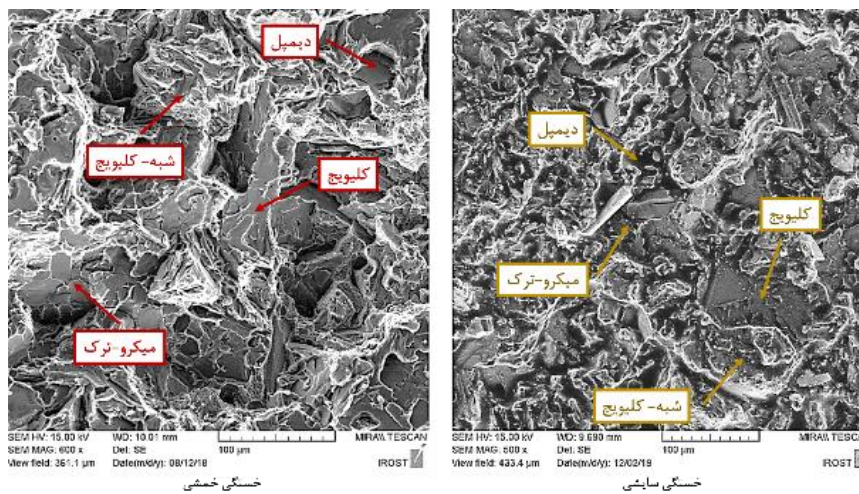
در آزمون خستگی سایشی- بدون روغن با افزایش نیروی تماسی از ۱۰ نیوتن به ۱۵ و ۲۰ نیوتن، به ترتیب عمر خستگی سایشی $۱۱/۳۷$ و $۶۷/۹۶$ درصد کاهش می یابد. این مقدار برای آزمون خستگی سایشی- با روغن، با رعایت ترتیب قبلی $۱۸/۸۱$ و $۸۶/۵۳$ درصد کاهش عمر بوده است؛ همچنین مقایسه میانگین عمر خستگی حاصل از آزمون های خستگی خمشی، خستگی سایشی- بدون روغن و خستگی سایشی- با روغن در جدول ۵ نشان داده شده است و درصد کاهش عمر خستگی برای هر حالت آورده شده است.

جدول ۴- معادلات استخراج شده از آزمون خستگی

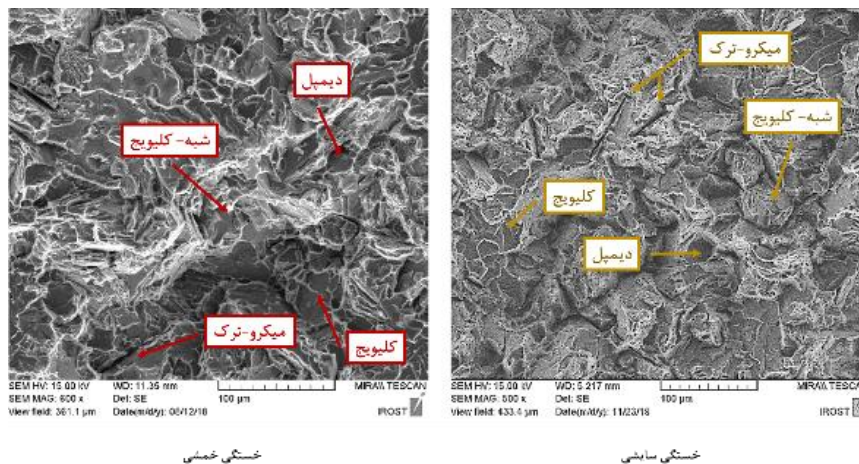
میانگین داده ها	تمامی داده ها	نمونه
$\sigma_a = 1138.15(2N_f)^{-0.162}$	$\sigma_a = 873.98(2N_f)^{-0.139}$	خستگی خمشی [۳۹]
$\sigma_a = 1223.49(2N_f)^{-0.201}$	$\sigma_a = 1109.43(2N_f)^{-0.191}$	خستگی سایشی

جدول ۵- کاهش عمر در اثر آسیب خستگی سایشی

نیروی تماسی (N)	میانگین عمر در سطح تنش ۱۵۰ مگاپاسکال (سیکل)	میزان کاهش عمر خستگی (درصد)			
		خستگی خمشی		خستگی سایشی	
		با روغن	بدون روغن	با روغن	بدون روغن
۱۰		۱۱۱۶۰۰	۲۶۰۶۶	٪۷۹/۲۱	٪۹۵/۱۴
۱۵	۵۳۶۹۰۰	۹۰۶۰۰	۲۳۱۰۰	٪۸۳/۱۲	٪۹۵/۶۹
۲۰		۱۲۲۰۰	۷۴۰۰	٪۹۷/۷۲	٪۹۸/۶۲



(الف)



(ب)

شکل ۷- مقایسه سطح شکست خستگی سایشی و خستگی خمشی در (الف) سطح تنش کم و (ب) زیاد

۳-۳- سطح شکست

در رابطه با آنالیز سطح شکست آلیاژ کونچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون، ابتدا تاثیر آسیب خستگی سایشی بر رفتار خستگی بررسی شده است. برای این امر، سطح شکست نمونه‌های خستگی سایشی با نیروی تماسی ۱۰ نیوتن با سطح شکست آزمون خستگی خمشی حاصل از پژوهش پیشین [۳۹] مقایسه شده است. در شکل ۷ (الف) و (ب) سطح شکست خستگی سایشی و خستگی خمشی به ترتیب در سطح تنش کم (۱۵۰ مگاپاسکال) و سطح تنش زیاد (۲۱۰ مگاپاسکال) مقایسه شده است. به طور کلی وجود آثار

کلیویج^۱ و نواحی شبه-کلیویج^۲ در سطح شکست نمونه‌ها نشان‌دهنده رفتار شکست ترد در آلیاژ پیستون است. رفتار شکست مشابهی در مطالعات [۳۸-۳۹ و ۴۱-۴۲] نیز مشاهده شده است. لازم به ذکر است، وجود آثار شبه-کلیویج نشان‌دهنده رفتار شکست ترکیبی میان شکست ترد و شکست نرم است [۳۸]. عمدتاً صفحات کلیویج در امتداد صفحات کریستالوگرافی و به صورت صفحات و ورقه‌های تخت شکل می‌گیرند؛ همچنین وجود آثار دیمپل^۳ در سطح

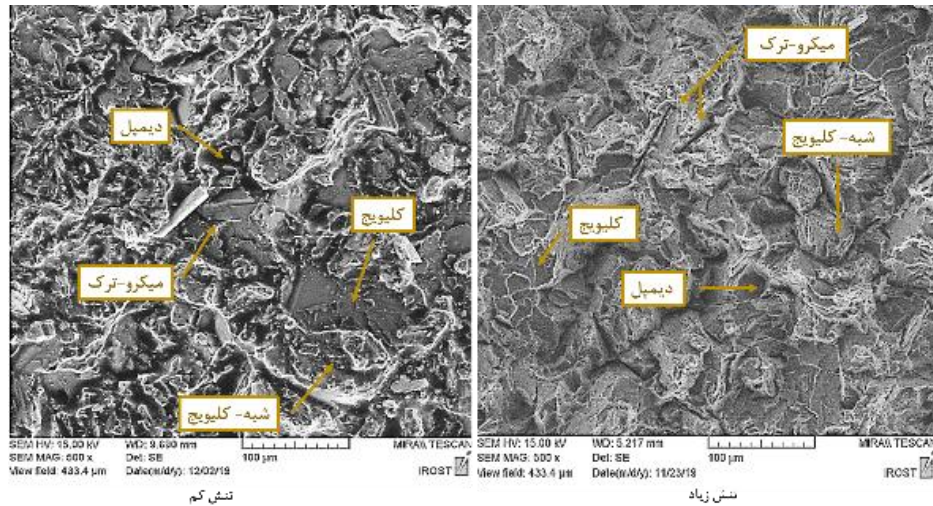
¹ Cleavage

² Quasi-Cleavage

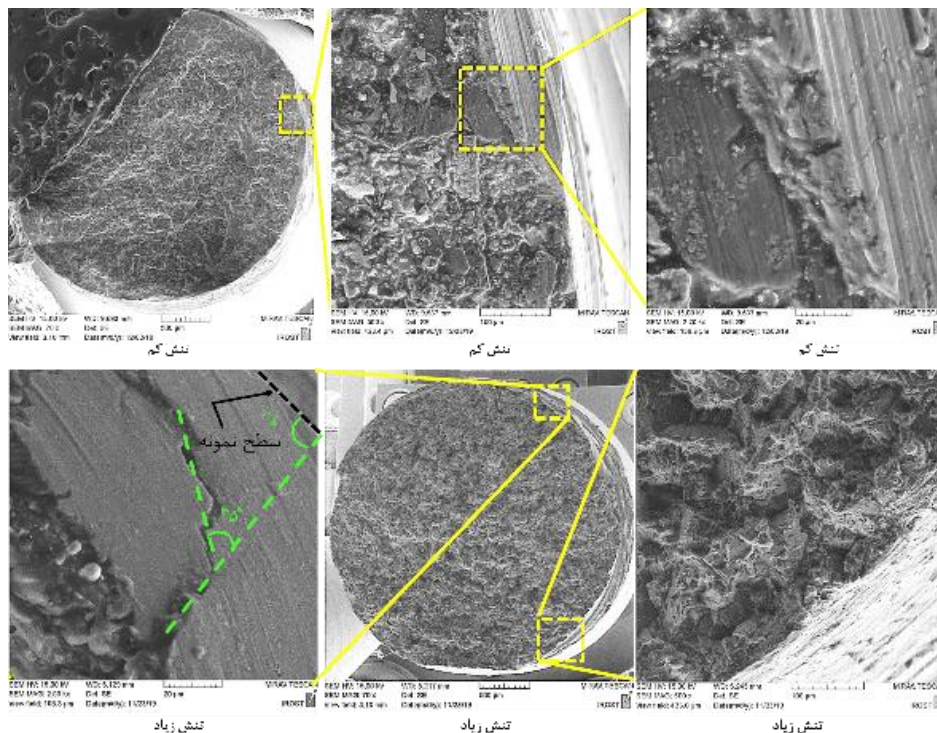
³ Dimple

شبه کلیویج و دیمپل، در کنار افزایش آثار کلیویج در سطح شکست خستگی سایشی، نشان‌دهنده تردتر شدن رفتار شکست خستگی سایشی به نسبت خستگی خمشی می‌باشد [۳۸]؛ همچنین در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود که اندازه نواحی دیمپل در کمترین سطح تنش کاهش

شکست نیز نشان‌دهنده وجود رفتار شکست ترکیبی در برخی از نواحی سطح شکست آلیاژ کوئنچ‌شده آلومینیوم-سیلیسیوم می‌باشد [۳۸،۴۲]. با مقایسه سطح شکست خستگی سایشی و خستگی خمشی در شکل ۷، مشاهده کوچکتر شدن نواحی



(الف)



(ب)

شکل ۸- سطح شکست خستگی سایشی در سطح تنش متفاوت: (الف) رفتار شکست و (ب) لبه سطح شکست

و همچنین شکل‌گیری ترک، با نیروی تماسی کنترل می‌شوند. افزایش نیروی تماسی مقدار ناحیه شکل‌گیری ترک را تحت تاثیر قرار داده و روی ناحیه رشد ترک تاثیر کمتری دارد [۷].

علاوه بر این، مطالعه [۲۰] نشان داد که روانکاری می‌تواند باعث تغییر مکان و زاویه رشد ترک در شکست خستگی سایشی شود؛ همچنین ایجاد ناحیه آسیب در لبه نمونه‌ها و ترک‌های شکل گرفته در لبه قابل مشاهده هستند. بررسی شکل ۹ (ب) و ۱۱ (د) نشان می‌دهد، تحت نیروی تماسی ۲۰ نیوتنی لبه شکست نمونه دچار آسیب لایه‌لایه‌شدگی شدید شده است. دوو همکاران [۱۸]، شکل آسیب لایه‌لایه‌شدگی مشابهی در سطح شکست خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم- تیتانیوم به‌دست آوردند؛ همچنین نشان دادند، این آسیب به دلیل ضعف در سختی و یا استحکام ماده است [۱۸]. به عبارت دیگر وجود این آسیب در سطح نمونه نشان می‌دهد، استحکام ماده در برابر نیروی تماسی ۲۰ نیوتنی کافی نمی‌باشد. این امر می‌تواند بهبود کمتر عمر آزمون خستگی سایشی روغن‌کاری‌شده در نیروی ۲۰ نیوتنی (۴۲/۶۲ درصد) را نسبت به دو نیروی تماسی ۱۰ و ۱۵ نیوتنی (۷۴/۷۲ و ۷۳/۵۰ درصد)، توجیه کند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن همزمان اثر روغنکاری و افزایش نیرو، همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با مقایسه سطح شکست نمونه آزمون روانکاری‌شده با دو نیروی تماسی ۱۰ و ۲۰ نیوتن مشاهده می‌شود که علی‌رغم بالا رفتن نیروی تماسی، رفتار شکست نمونه نرم‌تر است. این امر نشان‌دهنده تاثیر بیشتر روانکار بر رفتار شکست خستگی سایشی است.

در رابطه با بررسی مکانیزم سایش براده‌های حاصل از آزمون خستگی سایشی در آزمون خستگی سایشی با نیروی تماسی ۱۰ نیوتن و پد سایشی استفاده شده، مورد مطالعه قرار گرفتند. تصاویر مربوط به براده و رینگ چدنی به ترتیب در شکل ۱۲ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱۲ مشخص شده است، مکانیزم سایشی غالب در این پژوهش از نوع ساینده به همراه وجود صفحات لایه‌لایه‌شدگی بوده است. مکانیزم سایشی مشابهی روی آلیاژ آلومینیوم پیستون در مطالعه [۴۴] مشاهده شده است.

چشمگیری داشته است. در ادامه، برای مقایسه تاثیر سطح تنش بر رفتار خستگی سایشی، در شکل ۸ (الف) سطح شکست خستگی سایشی در سطح تنش کم و زیاد مقایسه شده است.

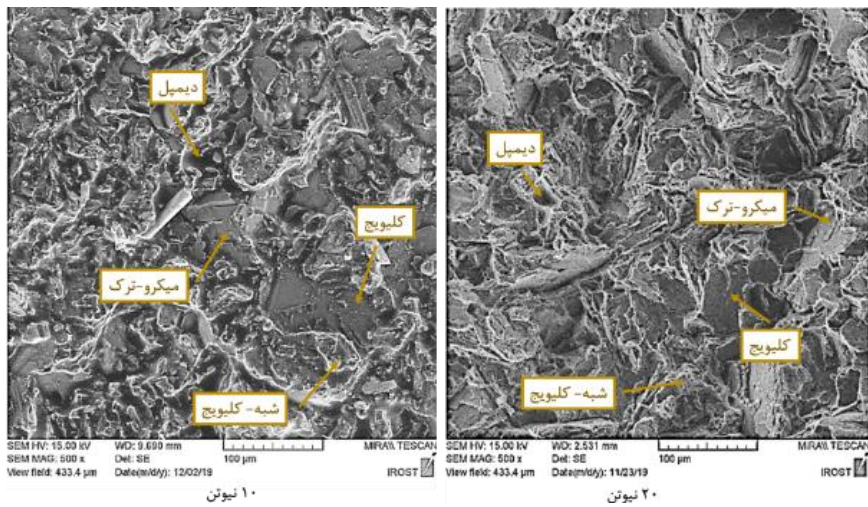
در شکل ۸ (ب) نیز این مقایسه برای لبه نمونه‌های خستگی سایشی انجام شده است. از آن جایی که در خستگی سایشی آسیب سایشی روی سطح نمونه اعمال می‌شود، برخی از نواحی نزدیک به لبه سطح دچار آسیب شدید و تغییر شکل می‌شوند [۱۸، ۱۷].

بررسی سطح شکست نشان داد که با افزایش سطح تنش، اندازه صفحات کلیویج بیشتر شده و نواحی شبه-کلیویج و دیمپل نیز کوچکتر شده است؛ لذا رفتار شکست خستگی در سطح تنش‌های بیشتر، تردتر بوده است. بررسی زاویه رشد ترک در شکل ۸ نشان داد که ترک ابتدا در زاویه ۵۵ درجه رشد کرده است. سپس در فاصله حدود ۶۰ میکرومتری از سطح نمونه، ترک پس از تغییر مسیر، با زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح رشد کرده است. پاپ و نئو [۴۳]، در مطالعه سطح شکست فرتیگ فولاد استحکام بالا، رشد ترک اولیه با زاویه ۵۴ درجه نسبت سطح و رشد عمودی ترک را مشاهده کردند. پنگ و همکاران [۸]، نشان دادند سطح تنش نرمال تماسی^۱ اکثرا کنترل‌کننده ایجاد ترک و زاویه رشد ترک اولیه است. اما رشد ترک توسط سطح تنش، کنترل می‌شود.

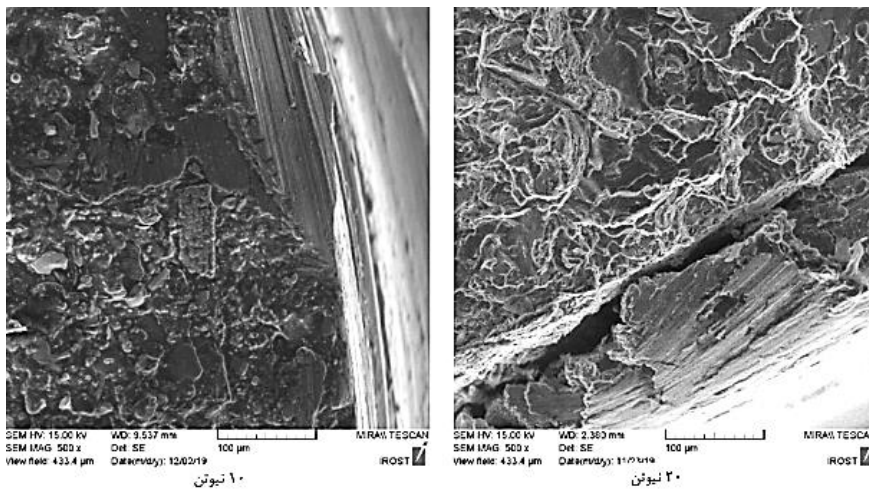
در رابطه با اثر افزایش نیرو بر رفتار شکست خستگی سایشی، سطح شکست نمونه آزمون تحت نیروی تماسی ۱۰ و ۲۰ نیوتن در شکل ۹ (الف) مقایسه شده است؛ همچنین لبه شکست نمونه‌ها در شکل ۹ (ب) مقایسه شده است. بررسی سطح شکست نشان می‌دهد، با افزایش نیروی تماسی، رفتار شکست خستگی سایشی تردتر شده است.

علاوه بر آن وجود نواحی آسیب در لبه هر دو نمونه و همچنین ترک در لبه سطح شکست و بزرگتر شدن ناحیه آسیب در نمونه ۲۰ نیوتنی در شکل ۹ (ب) قابل مشاهده است. در شکل ۹ (ج) و (د) با رعایت ترتیب پیشین، موارد فوق برای آزمون خستگی سایشی همراه با روانکار آورده شده است. پنگ و همکاران [۷]، نشان دادند که ناحیه ایجاد ترک

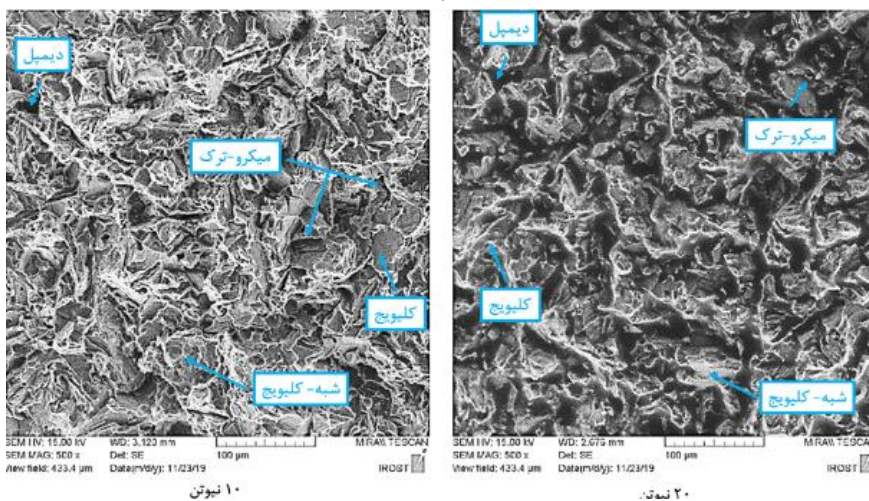
^۱ Normal Contact Stress



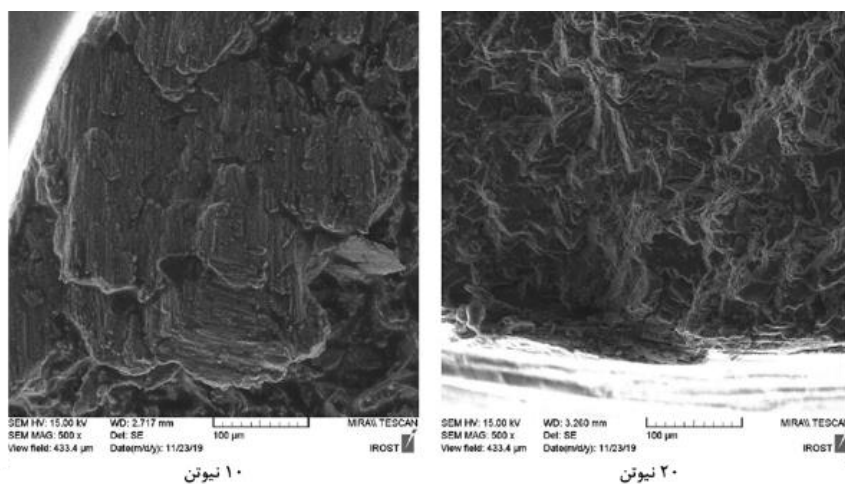
(الف)



(ب)

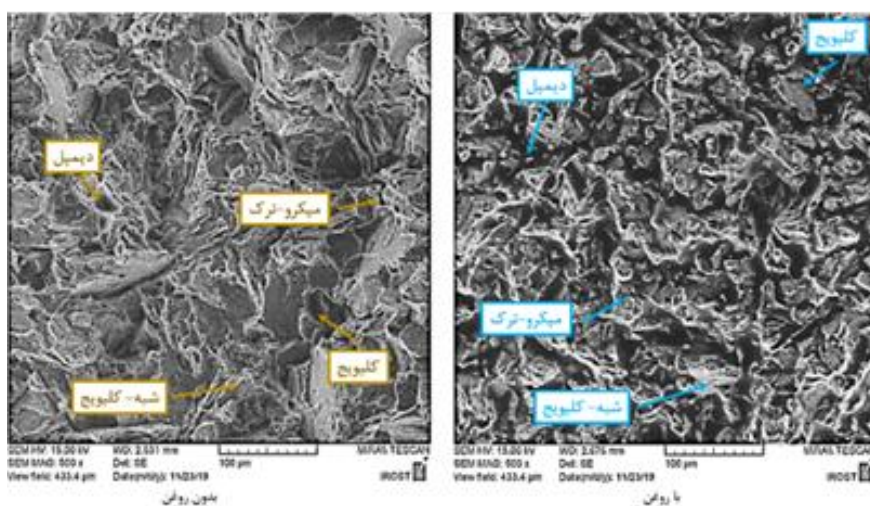


(ج)

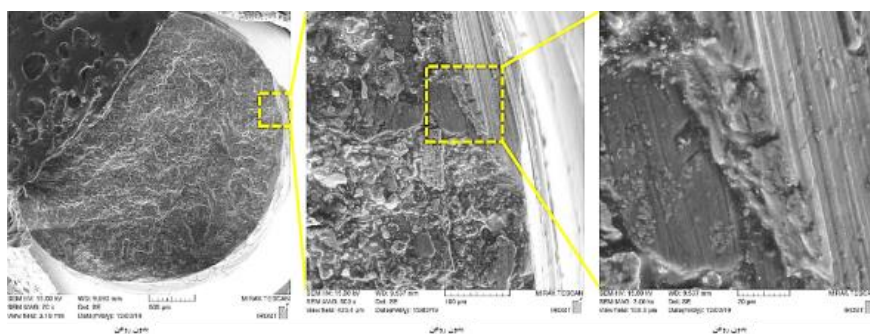


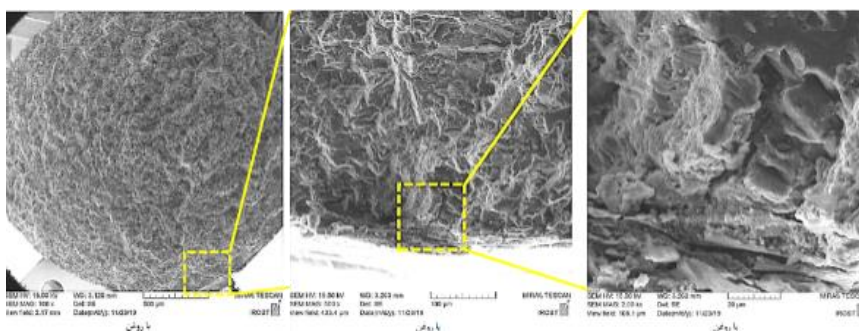
(د)

شکل ۹- تاثیر نیروی تماسی بر رفتار شکست خستگی سایشی: الف) رفتار شکست آزمون بدون روغن، ب) لبه شکست آزمون بدون روغن، ج) رفتار شکست آزمون با روغن و د) لبه شکست آزمون با روغن

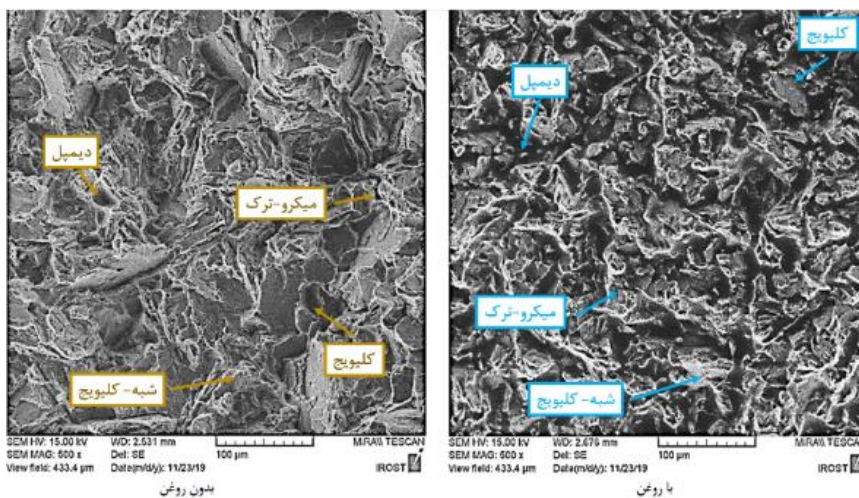


(الف)

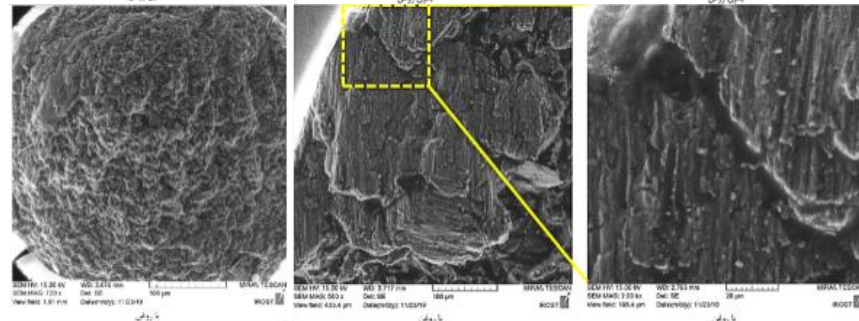
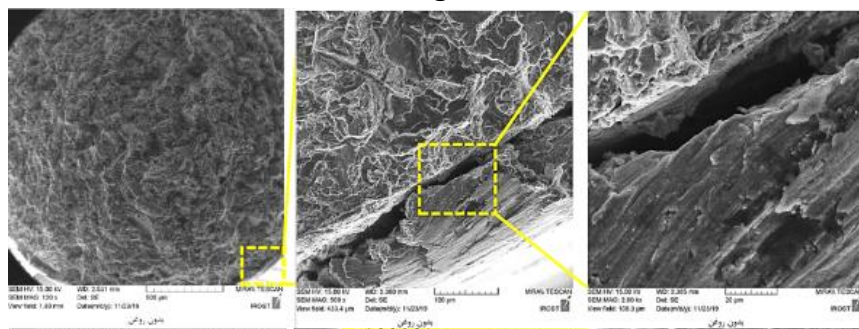




(ب)

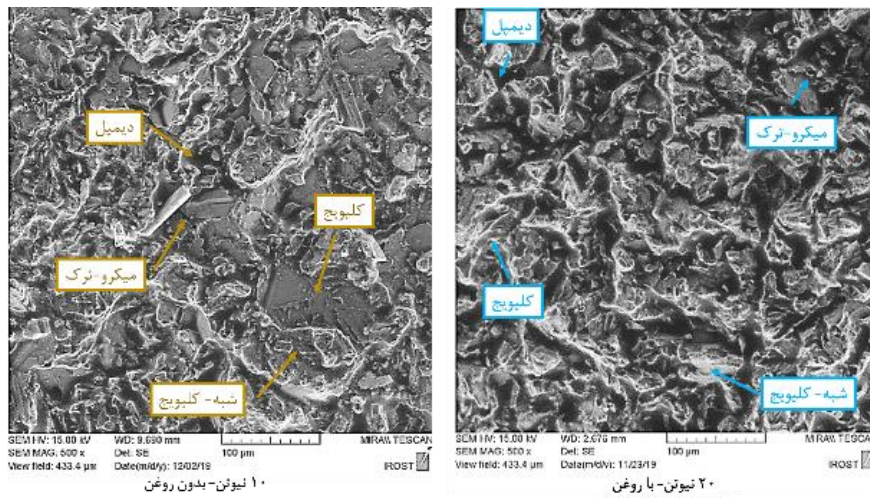


(ج)

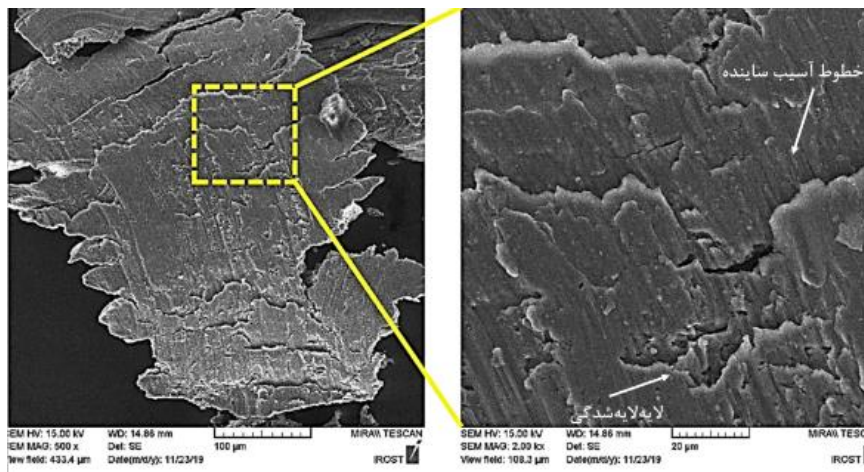


(د)

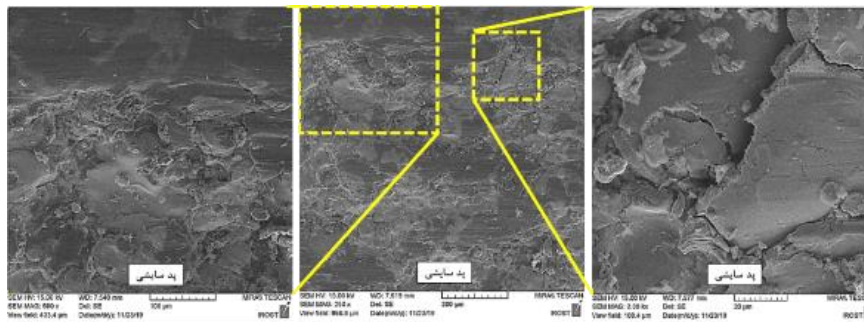
شکل ۱۰- اثر روانکاری بر رفتار خستگی سایشی، در نیروی تماسی الف و ب) ۱۰ نیوتن، ج و د) ۲۰ نیوتن



شکل ۱۱- تاثیر همزمان روانکاری و نیروی تماسی



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- الف) براده حاصل آزمون خستگی سایشی و ب) پد سایشی آزمون خستگی سایشی در نیروی تماسی ۱۰ نیوتن

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار خستگی سایشی آلیاژ کوئنچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون بررسی شده است و نتایج حاصل به ترتیب زیر آمده است:

- آسیب خستگی سایشی سبب کاهش ۹۵/۱۴ درصدی عمر خستگی در سطح تنش ۱۵۰ مگاپاسکال شده است. با افزایش سطح تنش این مقدار کاهش می‌یابد و در سطح تنش ۲۱۰ مگاپاسکال کاهش عمر به ۸۴/۱۲ درصد است. اثر آسیب خستگی سایشی در سطح تنش کمتر و عمرهای زیادتر، بیشتر بوده است.
 - با افزایش مقدار نیروی تماسی از ۱۰ نیوتن به ۱۵ و ۲۰ نیوتن، به ترتیب عمر خستگی سایشی برای آزمون‌های بدون روغن ۱۱/۳۷ و ۶۷/۹۶ درصد کاهش می‌یابد. برای آزمون خستگی سایشی با اعمال روانکار این مقادیر ۱۱/۳۷ و ۶۷/۹۶ درصد کاهش عمر در اثر افزایش نیروی تماسی است.
 - مقایسه نتایج عمر خستگی سایشی در نیروهای متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نیوتنی برای حالت با و بدون روانکار نشان داد که به ترتیب ۷۴/۷۲، ۷۳/۵۰ و ۴۲/۶۲ درصد عمر خستگی بهبود داشته است. افزایش کمتر عمر در نیروی تماسی ۲۰ نیوتن می‌تواند به دلیل آسیب لایه‌لایه‌شدگی زیاد مشاهده شده در لبه سطح شکست برای این آلیاژ در ازای اعمال نیروی ۲۰ نیوتنی باشد.
 - نتایج نشان داد که کاهش نیروی تماسی از ۲۰ به ۱۰ نیوتن و اعمال روانکار به صورت همزمان توانسته است، سبب بهبود حدوداً ۱۶ برابری عمر خستگی سایشی در سطح تنش ۱۵۰ مگاپاسکال شود.
 - بررسی سطح شکست خستگی سایشی آلیاژ کوئنچ شده آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون نشان داد که اعمال آسیب خستگی سایشی، باعث ترد شدن رفتار شکست می‌شود. علاوه بر آن افزایش تنش تماسی نیز منجر به ترد شدن سطح شکست نمونه‌ها شده است؛ درحالی‌که افزودن روانکار باعث نرم‌تر شدن سطح شکست خستگی سایشی می‌شود.
- در ادامه تحقیق انجام شده حاضر، می‌توان به عنوان یک نوآوری دیگر، پیشنهاد کرد که اثر انواع روانکارها را بر عمر خستگی سایشی در آلیاژ آلومینیوم بررسی کرد.

۵- تقدیر و تشکر

تأمین‌کننده آلیاژ برای این پژوهش، شرکت موتورسازی پویانستانک بوده است. ضمناً کلیه فرآیندهای ریخته‌گری و ساخت نمونه‌های استوانه‌ای اولیه، در محل کارخانه شرکت موتورسازی پویانستانک انجام شده است؛ لذا نویسندگان مقاله از این شرکت، کمال قدردانی و تشکر را دارند.

۶- مراجع

- [1] Mangardich D, Abrari F, Fawaz Z (2019) A fracture mechanics-based approach for the fretting fatigue of aircraft engine fan dovetail attachments. *Int J Fatigue* 129: 105213.
- [2] Farris NH, Murthy H, Matlik JF (2003) Chapter 4.11, Fretting fatigue. *Comprehensive Structural Integrity* 4: 281-326.
- [3] Pistons and engine testing. Editor: MAHLE GmbH, Springer Vieweg, (2016).
- [4] Sunde SL, Berto F, Haugen B (2018) Predicting fretting fatigue in engineering design. *Int J Fatigue* 117: 314-326.
- [5] Hills DA, Nowell D (2014) Mechanics of fretting fatigue-Oxford's contribution. *Tribol Int* 76: 1-5.
- [6] Zeren M (2007) The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys. *Mater Design* 28: 2511-2517.
- [7] Peng J, Wang B, Jin X, Xu Z, Liu J, Cai Z, Luo Z, Zhu M (2019) Effect of contact pressure on torsional fretting fatigue damage evolution of a 7075 aluminum alloy. *Tribol Int* 137: 1-10.
- [8] Peng J, Jin X, Xu Z, Zhang J, Cai Z, Luo Z, Zhu M (2018) Study on the damage evolution of torsional fretting fatigue in a 7075 aluminum alloy. *Wear* 402-403: 160-168.
- [9] Peng J, Liu J, Cai Z, Shen M, Song C, Zhu M (2013) Study on bending fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy. *Tribol Int* 59: 38-46.
- [10] Cai Z, Zhu M, Lin X (2010) Friction and wear of 7075 aluminum alloy induced by torsional fretting. *Trans Nonferr Metal Soc* 20(3): 371-376.
- [11] Sangral S, Achyuth K, Patel M, Jayaprakash M (2019) Effect of fretting on fatigue behavior of Al alloys considering environmental effect. *Mater Today: Proc* 15(1): 119-125.
- [12] de Pannemaeker A, Fouvry S, Buffiere JY, Brochu M (2018) Modelling the fretting fatigue crack growth: from short crack correction strategies to microstructural approaches. *Int J Fatigue* 117: 75-89.

- parameters between piston ring and cylinder liner in internal combustion engines. *Proc Inst Mech Eng Part K: J Multi-body Dyn*, 4: 329-349.
- [29] Takiguchi M, Ando H, Takimoto T, Uratsuka A (1996) Characteristics of friction and lubrication of two-ring piston. *JSAE Review* 17: 11-16.
- [30] Achyuth K, Patel M, Sangral M, Jayaprakash M (2019) Fretting wear degradation behavior of Al-Si-Ni based cast aluminum alloy under different environment. *Mater Today: Proc* 15: 103-108.
- [31] Yang Y, Wang C, Gesang Y, Shang H, Wang R, Liang Y, Wang T, Chen Q, Shao T (2021) Fretting wear evolution of γ -TiAl alloy. *Tribol Int* 154: 106721.
- [32] Reddappa HN, Suresh KR, Niranjana HB, Satyanarayana KG (2012) Studies on mechanical and wear properties of Al6061/beryl composites. *J Miner Mater Charact Eng* 11: 704-708.
- [33] Gladston JAK, Dinaharan I, Sheriff NM, Selvam JDR (2017) Dry sliding wear behavior of AA6061 aluminum alloy composites reinforced rice husk ash particulates produced using compocasting. *J Asian Ceram Soc* 5: 1-9.
- [34] Choi HJ, Lee SM, Bae DH (2010) Wear characteristic of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Wear* 270: 12-18.
- [35] Kontou A, Talor RI, Spikes HA (2021) Effects of dispersant and ZDDP additives on fretting wear. *Tribol Lett* 69: 6.
- [36] Azadi M, Bahmanabadi H, Gruen F, Winter G (2020) Evaluation of tensile and low-cycle fatigue properties at elevated temperatures in piston aluminum-silicon alloys with and without nano-clay-particles and heat treatment. *Mater Sci Eng A* 788: 139497.
- [37] Li Y, Yang Y, Wu Y, Wang L, Liu X (2010) Quantitative comparison of three Ni-containing phases to the elevated-temperature properties of Al-Si piston alloys. *Mater Sci Eng A* 527(26): 7132-7137.
- [38] Zolfaghari M, Azadi M, Azadi M (2021) Characterization of high-cycle bending fatigue behaviors for piston aluminum matrix SiO₂ nano-composites in comparison with aluminum-silicon alloys. *Int J Metalcast* 15: 152-168.
- [39] Rezanejad S, Azadi M, Azadi M (2019) Influence of heat treatment on high-cycle fatigue and fracture behaviors of piston aluminum alloy under fully-reversed cyclic bending. *Met Mater Int* 27: 860-870.
- [40] Budynas RG, Nisbett JK (2019) Shigley's Mechanical Engineering Design. 11th edn. McGraw-Hill.
- [13] Kim K, Yoon MJ (2014) Fretting fatigue simulation for aluminum alloy using cohesive zone law approach. *Int J Mech Sci* 85: 30-37.
- [14] Muthu J (2014) Fatigue life of 7075-T6 aluminum alloy under fretting condition. *Theor Appl Fract Mech* 74: 200-208.
- [15] Ferre R, Fouvry S, Berthel B, Amargier R, Ruiz-Sabariego JA (2013) Prediction of the fretting fatigue crack nucleation endurance of a Ti-6V-4Al/Ti-6V-4Al interface: Influence of plasticity and tensile/shear fatigue properties. *Procedia Eng* 66: 803-812.
- [16] Sarhan AD, Zalnezhad E, Hamdi M (2013) The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of hard-anodized aerospace Al7075-T6 alloy. *Mater Sci Eng A* 560: 377-387.
- [17] Shinde SR, Hoepfner DW (2006) Fretting fatigue behavior in 7075-T6 aluminum alloy. *Wear* 261(3-4): 426-434.
- [18] Du D, Liu D, Zhang X, Tang J. (2019) Fretting fatigue behaviors and surface integrity of Ag-TiN soft solid lubricating films on titanium alloy. *Appl Surf Sci* 488: 269-276.
- [19] Gean MC, Farris TN (2009) Elevated temperature fretting fatigue of Ti-17 with surface treatments. *Tribol Int* 42: 1340-1345.
- [20] Chakherlou TN, Mirzajanzadeh M, Vogwell J (2009) Effect of hole lubrication on the fretting fatigue life of double shear lap joints: An experimental and numerical study. *Eng Fail Anal* 16: 2388-2399.
- [21] Gou T, Liu Z, Correia J, de Jesus MP (2020) Experimental study on fretting-fatigue of bridge cable wires. *Int J Fatigue* 131: 105321.
- [22] Chao J (2019) Fretting-fatigue induced failure of a connecting rod. *Eng Fail Anal* 96: 186-201.
- [23] Hojjati-Talemi R, Zahedi A, De Baets P (2015) Fretting fatigue failure mechanism of automotive shock absorber valve, *Int J Fatigue* 73: 58-65.
- [24] Zalnezhad E, Sarhan AAD, Jahanshahi P (2014) A new fretting fatigue testing machine design, utilizing rotating-bending principal approach. *Int J Adv Manuf Technol* 70: 2211-2219.
- [25] Neu RW (2011) Progress in standardization of fretting terminology and testing. *Tribol Int* 44: 1371-1377.
- [26] Azadi M, Zolfaghari M, Hajiesmaeili MH, Rezanejad S (2019) Fretting fatigue test machine with functionality in lubricant and high temperature. Patent Number: 98399, International Category: G01N/34.
- [27] Technical Report (2008) Piston Ring, Irankhodro Powertrain Company.
- [28] Ahmed Ali M, Xianjun H, Turkson R, Ezzat M (2015) An analytical study of tribological

- [43] Pape JA, Neu RW (2007) Subsurface damage development during fretting fatigue of high strength steel. *Tribol Int* 40: 1111-1119.
- [44] Azadi M, Rezanezhad S, Zolfaghari M, Azadi M (2020) Investigation of tribological and compressive behaviors of Al/SiO₂ nanocomposites after T6 heat treatment. *Sadhana* 45: 28.
- [41] Liu J, Zhang Q, Zue Z, Xiong Y, Ren F, Volinsky A (2013) Microstructure evolution of Al-12Si-CuNiMg alloy under high temperature low cycle fatigue. *Mater Sci Eng A* 574: 186-190.
- [42] Zhang G, Zhang J, Li B, Cai W (2013) Double-stage hardening behavior and fracture characteristics of a heavily alloyed Al-Si piston alloy during low-cycle fatigue loading. *Mater Sci Eng A* 561: 26-33.