



مطالعه رفتار خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، با و بدون ذرات خاک رس

روزبه قنادی آذر، محمد صادق اقارب پرست، محمد آزادی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

خستگی سایشی

روانکاری با روغن

آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر

نانو ذرات خاک رس

خلاصه: پدیده خستگی سایشی زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های تماسی باعث شکل‌گیری و در ادامه رشد ترک بین دو جسم یا سطوح در حال تماس شود. با در نظر گرفتن سایش‌های اصطکاکی و بارگذاری‌های متناوب مکانیکی امکان رخ دادن پدیده خستگی سایشی در قطعات موتور خودرو وجود دارد. با توجه به وجود بارگذاری‌های سیکلی و وجود سایش در سرسیلندر خودرو احتمال وقوع پدیده خستگی سایشی را افزایش می‌دهد در این پژوهش، تأثیر روانکاری و نیروی سایشی بر رفتار خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج برای مقایسه نمونه‌های با و بدون ذرات نانو بدست آمده است. بررسی ریزساختار و سطح شکست توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است. نتایج نشان داد که اعمال روانکاری و کاهش نیروی سایشی سبب افزایش عمر خستگی برای نمونه با ذرات نانو شده است. همچنین، با توجه به نتایج بدست آمده از نمودار، تأثیر افزودن ذرات نانو به آلیاژ سرسیلندر در شرایط بدون اعمال روانکاری و در سطح نیرو سایشی ۱۵ نیوتن، سبب افزایش ۵۰ برابری عمر خستگی شده است.

۱- مقدمه

عبارت فرتینگ^۱ به حرکت نسبی مماسی غالباً در مقیاس کوچک گفته می‌شود که بین دو جسم یا سطوح در حال تماس، زمانی که تحت بارگذاری‌های ارتعاشی و یا نیروهای متغیر قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد. مقیاس دامنه نوسان در ابعاد میکرومتر و یا میلی‌متر است اما گاهی می‌تواند به اندازه چند نانومتر نیز کوچک باشد [۱]. پدیده خستگی فرتینگ^۲ یا خستگی سایشی هنگامی رخ می‌دهد که تنش‌های تماسی باعث شکل‌گیری و در ادامه رشد ترک بین دو جسم یا سطوح در حال تماس شود. با در نظر گرفتن سایش‌های اصطکاکی و بارگذاری‌های متناوب مکانیکی امکان رخ دادن پدیده خستگی سایشی در قطعات موتور خودرو وجود دارد [۲].

در ادامه برخی از مطالعات انجام شده بر رفتار خستگی سایشی آلیاژهای آلومینیومی بررسی شده است. احمد و همکاران [۳]، تأثیر سختی بر عمر خستگی سایشی آلیاژ $AlV0.75-T6$ با افزایش لایه اکسید^۳ را بررسی

کرده‌اند. هدف از این تحقیق، به دست آوردن بالاترین سختی سطح با روش بهینه‌سازی پارامترهای لایه اکسید آلیاژ $AlV0.75-T6$ ، بوده است. همچنین مجزوبی^۴ و همکاران [۴]، عمر خستگی سایشی آلیاژ $AlV0.75-T6$ با روکش تیتانیومی را بررسی کرده‌اند. هدف از این آزمایش، بهبود عمر خستگی سایشی آلیاژ $AlV0.75-T6$ با روکش تیتانیوم و با استفاده از دو روش پرتو یونی^۵ و لایه برداری شات^۶ بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده، اعتقاد بر این است که پوشش تیتانیوم با استفاده از تکنیک پرتو یونی سبب کاهش عمر خستگی در تنش‌های بالا شده و تنها در تنش‌های پایین‌تر، عمر خستگی را افزایش داده است. مجزوبی^۷ و همکاران [۵]، میزان اثرات ساچمه‌زنی^۸ و نورده عمیق^۹ بر طول عمر خستگی سایشی آلیاژ $AlV0.75-T6$ را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد نورده عمیق نسبت به ساچمه‌زنی سبب افزایش بیشتری در عمر خستگی سایشی شده است. سانتوس^{۱۰} [۶]، میزان

- 4 Majzooobi
- 5 Ion-Beam-Enhanced Deposition (IBED)
- 6 Peeling shot
- 7 Majzooobi
- 8 Shot Peening
- 9 Deep rolling
- 10 Santus

- 1 Fretting
- 2 Fretting fatigue
- 3 Anodized

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_azadi@semnan.ac.ir



می‌توان نتیجه گرفت که آسیب خستگی سایشی سبب رشد و تکثیر ترک و کاهش عمر نمونه شده است. کمالی و آزادی [۱۰]، خصوصیات تریبولوژیکی^۸ و مکانیکی آلیاژ Al-Si-Cu با تقویت ذرات نانو رس^۹، ارزیابی کرده‌اند. هدف از این تحقیق، رفتارهای مکانیکی از جمله سختی و استحکام فشار، مدول الاستیک و خاصیت سایشی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی نوری روبشی^{۱۰}، مقاومت به سایش نانو کامپوزیت‌های مختلف از نظر نوع آلیاژ، دو تا پنج برابر افزایش یافته است. نتایج نشان داده، با افزودن ذرات نانو کامپوزیت به آلیاژ آلومینیوم در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، سختی و مقاومت به سایش افزایش یافته است. ناصر و ناصر [۱۱]، خواص نانو کامپوزیت‌های آلومینیوم تهیه شده توسط پودر متالورژی^{۱۱}، بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، نانو کامپوزیت آلومینیوم خالص با نانو دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_۲)، تقویت شده و با استفاده از پودر متالورژی تولید شده است. با استفاده از پرتو ایکس ری^{۱۲} و میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۳}، مشاهده شده است که سختی Al-TiO_۲ با افزایش مقدار نانو ذرات TiO_۲ افزایش یافته و همچنین میزان سایش با افزایش درصد نانو کاهش یافته است. با توجه با آزمایش‌های انجام شده، ذرات تقویت شده با انتقال بار ساده، سبب افزایش استحکام کششی در کامپوزیت شده است. نتایج نشان داده، با افزودن نانو ذرات TiO_۲ به آلومینیوم، مقاومت به سایش و سختی افزایش یافته و سبب بهبود چشمگیر در کشش نهایی و استحکام در عملکرد کامپوزیت‌ها شده است. آزادی و همکاران [۱۲]، تأثیر نانو ذرات SiO_۲ بر خواص تریبولوژیکی و مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم به روش پراکندگی، را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه نانو ذرات SiO_۲ با استفاده از روش ریخته‌گری به آلیاژ آلومینیوم برای تولید نانو کامپوزیت‌های مختلف اضافه شدند. برای ارزیابی اثرات روش پراکندگی، از روش‌های پیش گرمایش و فرزکاری انجام شده است. همچنین در این تحقیق، چگالی، سختی، مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش و ریزساختار نانو کامپوزیت‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، توزیع ذرات نانو در ماتریس آلومینیوم برای همه کامپوزیت‌ها نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان، ارزیابی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، وجود نانو ذرات SiO_۲ در ماتریس آلومینیوم، منجر به افزایش سختی، مقاومت در برابر

مقاومت و استحکام منته در برابر خستگی را بررسی کرد. آلیاژ آلومینیوم به دلیل استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی در اتصالات فولادی استفاده می‌شود، که از نظر خستگی حائز اهمیت است. در این پژوهش با بررسی منحنی خستگی وهلر^۱، پارامتر مربوط به لغزش را برای شناسایی شرایط سختی مطرح شده است. همچنین نتایج تحقیق نشان داده است که نتایج آزمون‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق تطابق خوبی داشته است. سولوینسکی^۲ و فریس [۷]، عمر خستگی سایشی آلیاژ Al_{۲۰۲۴}-T_{۳۵۱} را بررسی کرده‌اند. یکی از پیامدهای سایش، تشکیل و رشد ترک در لبه تماس است که به عنوان خستگی سایشی شناخته شده است. در این تحقیق، خستگی ناشی از سایش، یک مکانیسم مهم خستگی در اتصالات ساختاری هواپیما و تیغه‌های توربین معرفی شده است. نمودار تنش-عمر به دست آمده در آزمایشگاه، با نظریه کرنش-عمر هم‌محور بوده و می‌توان ترک حاصل از خستگی را پیش بینی کرد. همچنین داده‌های جمع‌آوری شده برای آلیاژ Al_{۲۰۲۴}-T_{۳۵۱} با این پیش بینی مطابقت داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده، تنش تماسی^۳ نقش مهمی در ایجاد ترک خستگی و کشش‌های سطحی ایجاد شده سبب افزایش تنش کششی^۴ در لبه تماس شده است. شینده^۵ و هوپنر [۸]، رفتار خستگی سایشی آلیاژ Al_{۷۰۷۵}-T_۶ را بررسی کرده است. هدف از این تحقیق، بررسی رفتار خستگی سایشی این نوع آلیاژ آلومینیوم در قسمت‌های آسیب دیده، برای شناسایی جوانه زدن ترک بوده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها، آسیب‌های تدریجی و رشد ترک، ناشی از سایش که بر روی سطح نمونه ایجاد شده، را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده که آسیب ناشی از سایش، بستگی به ریزساختار دارد و نظر می‌رسد که خسارت‌های ایجاد شده ناشی از حفره‌های ریز ساختاری در نمونه بوده است. هوپنر^۶ و گوس [۹]، آسیب خستگی سایشی آلیاژ Al_{۷۰۷۵}-T_۶ در متالوگرافیک^۷ را بررسی کرده‌اند. آن‌ها آزمایش خستگی سایشی را با استفاده از بار محوری در حداکثر سطح تنش برای آلیاژ آلومینیوم انجام داده‌اند و با استفاده از متالوگرافیک به بررسی بین آسیب‌های سایشی، ایجاد ترک ناشی از سایش و کاهش عمر خستگی نمونه‌ها پرداختند. با توجه به آزمایش انجام شده، در تمام سطوح تنش، ترک در قسمت سایش نمونه ایجاد شده است. با مطالعات متالوگرافی

- 8 Tribological
- 9 Clay
- 10 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)
- 11 Metallurgy
- 12 X-ray
- 13 Scanning Electron Microscopy (SEM)

- 1 Wholer
- 2 Szolwinski
- 3 Contact stresses
- 4 Tensile stresses
- 5 Shinde
- 6 Hoepfner
- 7 Metallographic

و همکاران [۱۶]، نشان داده‌اند که با افزودن نانو ذرات Al_2O_3 به زمینه آلومینیومی عمر خستگی پرچرخه آن افزایش پیدا خواهد کرد. این مواد اجزاء اصلی سازنده خاک رس می‌باشند. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که خاک رس نیز به مانند ذرات اشاره شده به خوبی در زمینه آلومینیومی قرار می‌گیرند و باعث تقویت خواص خستگی ماده می‌شود. از بررسی نمودارهای تنش-عمر می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ها پس از تقویت در ناحیه تنش کمتر (پرچرخه) به مراتب بیشتر از ناحیه تنش زیاد افزایش یافته است. سنی کومار^۴ و همکاران [۱۷]، نیز در تحقیق خود نشان دادند که با افزودن نانو ذرات سرامیکی به آلیاژ آلومینیومی عمر خستگی کم‌چرخه آن بهبود خواهد یافت. رشنو و همکاران [۱۸]، نیز نشان دادند که با افزودن نانو ذرات خاک رس به آلیاژ سرسیلندر درصد افزایش طول آن به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در نتیجه علت اصلی افزایش عمر در فرایند کم‌چرخه در این تحقیق، افزایش خواص مکانیکی به ویژه درصد افزایش طول بوده است. همچنین در فرایند پرچرخه، سهندی زنگ‌آباد و همکاران [۱۹]، نشان دادند که با افزودن نانو ذرات سرامیکی علاوه بر افزایش خواص مکانیکی، عمر خستگی پرچرخه آلیاژ آلومینیومی بهبود قابل توجه پیدا کرده است. علت اصلی این افزایش بهبود ریز ساختار نمونه تقویت شده در مقایسه با نمونه بدون نانو ذرات بوده است. در پژوهش صورت گرفته توسط یانگ^۵ و همکاران [۲۰]، نیز نشان داده شده است که اعمال عملیات حرارتی می‌تواند باعث افزایش عمر خستگی در ناحیه تنش پایین شود. موارد بیان شده نشان می‌دهد، افزودن ذرات نانو و اجرای عملیات حرارتی می‌تواند خواص سایشی آلیاژ آلومینیوم را بهبود ببخشد. آزادی و همکاران [۲۱]، نشان دادند که با افزودن نانو ذرات به آلیاژ آلومینیوم پیستون و لحاظ کردن اثرات دما، عمر خستگی کم‌چرخه افزایش یافته است. در این مقاله از آلیاژ آلومینیوم پیستون برای آزمون خستگی خستگی کم‌چرخه و در شرایط بدون روانکاری استفاده شده است. اما در این پژوهش با استفاده از آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، آزمون خستگی سایشی را در شرایط روانکاری و در دو سطح نیرو فرتینگ انجام شده است.

در مطالعات انجام شده، از نانو کامپوزیت‌ها، به عنوان ماده تقویت‌کننده خواص مکانیکی استفاده شده است [۱۴-۲۰]، که می‌توان یکی از روش‌های تقویت آلومینیوم را افزودن ذرات نانو دانست، اما اثر ذرات نانو بر خستگی سایشی در حد کافی مطالعه نشده است. در صورتی که در این تحقیق اثر

سایش و مدول الاستیک شده، که همراه با کاهش کشیدگی و چقرمگی بوده است. همچنین در این آزمایش نسبت سختی به مدول الاستیک، بهترین معیار برای پیش‌بینی مقاومت در برابر سایش نمونه‌های مختلف بوده است. سمیع‌زاده و همکاران [۱۳]، اثر ذرات نانو کامپوزیت $MoSi_2$ بر سختی و سایش آلیاژ آلومینیوم، را بررسی کرده‌اند. ذرات نانو کامپوزیت در فشار سرد و گرم تلفیق شده و سپس عملیات حرارتی (T_6) انجام شده است. اثرات اندازه ذرات $MoSi_2$ ، کسر حجمی و عملیات حرارتی بر روی سختی و سایش با استفاده از آزمایش‌های سختی برینل^۱ و پین بر روی دیسک^۲ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اگر چه عملیات حرارتی کلیه نمونه‌ها نسبت به شرایط فشار گرم افزایش یافته اما سختی پیری کاهش یافته است و به دلیل تراکم جابجایی زیاد کسر حجمی $MoSi_2$ افزایش پیدا کرده است. همچنین آزمایش سایش نشان داد که مقاومت به سایش در نمونه‌های عملیات حرارتی شده، بیشتر از شرایط فشار گرم شده است و با افزودن ذرات نانو، این مقاومت افزایش یافته است.

آزادی و همکاران [۱۴]، تأثیر رفتار تریبولوژیکی و فشاری نانو ذرات SiO_2 بر کامپوزیت آلومینیوم پس از عملیات حرارتی T_6 ، را بررسی کرده‌اند. هدف از این مقاله، ارائه نتایج آزمایشگاهی از خواص تریبولوژیکی و فشرده‌سازی نانو کامپوزیت‌های آلومینیوم پس از عملیات حرارتی T_6 بوده است. این عملیات حرارتی شامل سه مرحله بود: محلول سازی در $500^\circ C$ درجه سانتیگراد به مدت ۵ ساعت، خنک‌کاری در آب و قرار گرفتن در $180^\circ C$ درجه سانتیگراد به مدت ۹ ساعت و همچنین از روش ریخته‌گری همزن برای تولید نانو کامپوزیت استفاده شده است. با توجه به تصاویر گرفته شده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب نانو ذرات SiO_2 در ماتریس آلومینیوم، مقاومت به سایش نانو کامپوزیت‌ها را افزایش داده است. بنابراین، شکل‌گیری سوراخ‌ها و ترک‌ها به طور واضح برای سطوح نانو کامپوزیت هنگام تست سایش کاهش یافته است. رفتار سایشی آلیاژ آلومینیوم و اثر عملیات حرارتی بر رفتار سایشی مواد توسط محققین، مورد مطالعه قرار گرفته است. آزادی و همکاران [۱۵]، نشان داده‌اند که با افزودن نانو ذرات و همچنین انجام عملیات حرارتی می‌توان خواص خستگی پرچرخه آلیاژهای آلومینیومی را به میزان قابل قبولی افزایش داد. از این رو در این پژوهش، به منظور افزایش حداکثری خواص خستگی، اجرای هر دو عملیات تقویتی به طور همزمان، انتخاب شده است. راجو^۳

- 1 Brinell
- 2 Pin-on-disc
- 3 Raju

4 Senthilkumar
5 Yang

جدول ۱. مقایسه ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد مطالعه با مرجع [۲۲]

Table 1. The comparison of the chemical composition for studied alloys with reference [22]

آلیاژ	مس	سیلیسیوم	منیزیم	منگنز	آهن	نیکل	روی	قلع	تیتانیوم	دیگر عناصر
آلومینیوم [۲۲] ۳۸۰	۳-۴	۷/۵-۹/۵	۰/۰۱	۰/۵۰	۲	۰/۵۰	۳	حداکثر ۰/۳۵	-	حداکثر ۰/۵۰
آلیاژ مورد مطالعه	۳/۵	۷/۲	۰/۲۶	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۰۱	۰/۰۷	<۰/۰۰۵	۰/۰۱	-

خالص افزایش می‌دهد که باعث استفاده زیاد آن‌ها برای اهداف ریخته‌گری شده است. مقدار سیلیسیوم معمولاً با توجه به نوع کاربرد، روش خنک کاری و برخی متغیرهای دیگر طراحی مشخص می‌شود. افزودن سیلیسیوم باعث کاهش وزن مخصوص و ضریب انبساط حرارتی ماده می‌شود. آلیاژهای حاوی بیش از ۱۰ درصد سیلیسیوم، ضریب انتقال حرارتی پایینی دارند و در دماهای بالا عملکرد مناسبی ندارند. با این حال اگر ذرات سیلیسیوم با درصد مناسب به صورتی مناسبی در زمینه پخش شوند باعث ایجاد خواص مناسب سایشی خواهند شد [۱۴]. وجود ۳ الی ۴ درصد مس در آلیاژ آلومینیوم باعث افزایش عملیات حرارتی پذیر بودن آن می‌شود. البته باید به این نکته اشاره کرد که وجود منیزیم جهت انجام عملیات حرارتی در کنار مس همواره باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود. از این رو از آلیاژهای آلومینیوم سیلیسیوم مس به‌طور گسترده در ساخت قطعات موتور خودرو استفاده می‌شود [۲۲]. در مرجع [۲۳]، آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-مس استفاده شده در این پژوهش تحت نام A۳۸۰ معرفی شده است. نقطه تقریبی آغاز فرایند ذوب شدن، دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد است. که با توجه به تحقیقات پیشین بررسی شده دمای مناسب جهت ریخته‌گری می‌تواند ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شود [۲۴].

جهت ساخت نمونه‌ها به روش ریخته‌گری، شمش‌های خام این آلیاژ تهیه شد، جرم این شمش‌ها در حدود ۱۴ کیلوگرم بود. در ادامه کار جهت مشخص شدن دقیق‌تر عناصر تشکیل دهنده آلیاژ از آزمون کوانتومتری^۱ استفاده شد. استاندارد استفاده شده در این آزمون ASTM-E۱۲۵۱-۱۱ [۲۵] بود. مقادیر به‌دست آمده از این آزمون در جدول ۱ با مقادیر موجود در مرجع دیگر مقایسه شده است.

افزودن ذرات نانو به آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر در آزمون خستگی سایشی مورد مطالعه قرار گرفته و پارامتر دما در این پژوهش مورد ادعا نیست.

مطالعات انجام شده روی مبحث خستگی سایشی نشان داد، برای انجام آزمایشات از شرایط متفاوت بارگذاری از لحاظ نوع بارگذاری استفاده می‌شود که همان‌طور که در مطالعات نشان داده شده است [۱۸]، از دستگاه آزمون خستگی چرخشی-خمشی برای انجام آزمون می‌توان کمک گرفت. همچنین در مطالعات انجام شده، کمتر به اثر نیرو و روانکار در آزمون خستگی سایشی اشاره شده و در این پژوهش نیز سعی به مقایسه تأثیر نیرو و روانکار در نمونه‌های با و بدون ذرات نانو خاک رس شده است.

۲- مواد و روش آزمون

ماده پایه استفاده شده در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-مس می‌باشد که بر اساس تحقیقات پیشین [۱۴]، به‌طور گسترده‌ای در ساخت قطعه سرسیلندر خودرو استفاده می‌شود. همچنین جهت تقویت ماده اصلی از نانو ذرات خاک رس استفاده شده است [۱۴]. به منظور چسبندگی هرچه بهتر نانو ذرات به ماده پایه در مرحله آسیاب کردن به آن میکرو ذرات مس اضافه شده است [۱۴]. آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-مس به‌صورت گسترده‌ای در ساخت قطعه سرسیلندر موتورهای درون سوز بنزینی استفاده می‌شود. بیشترین عنصر موجود در این آلیاژ آلومینیوم است و عناصری دیگری همچون سیلیسیوم و مس جهت بالا بردن برخی از خواص آن به عنصر اصلی افزوده شده است. وجود عنصر سیلیسیوم در این آلیاژ باعث بهبود خواص ریخته‌گری آلیاژ می‌شود، علاوه بر این سیالیت نیز نسبت به آلومینیوم

با میکرو ذرات مس، میزان تر شوندگی و پراکندگی ذرات در زمینه آلومینیومی نسبت به نانو ذراتی که با میکرو ذرات آلومینیوم ترکیب شده‌اند، افزایش پیدا کرده است. همچنین بهترین خواص مکانیکی مربوط به نمونه‌های ساخته شده به وسیله ترکیب مس و نانو ذرات است [۲۲]. به همین جهت در این پژوهش جهت بالا بردن میزان تر شوندگی، توزیع مناسب‌تر ذرات در زمینه و همچنین جلوگیری کردن از آگلومره شدن نانو ذرات خاک رس، از میکرو ذرات مس استفاده شده است. خلوص میکرو ذرات مورد استفاده بالای ۹۹ درصد می‌باشد و همچنین اندازه ذرات آن حداکثر ۴۵ میکرومتر انتخاب شده است. از مباحث مطرح شده، این نتیجه حاصل شد که روش مناسب جهت افزودن ذرات نانو به زمینه آلومینیومی، آسیاب کردن ذرات (بال میل) است [۲۲]. با توجه به اندازه‌های مناسب میکرو ذرات مس و نانو ذرات خاک رس در این مرحله از آسیاب سیاره‌ای تنها جهت ترکیب کردن دو ماده استفاده شده است. انتخاب ذرات مس به‌عنوان ماده ترکیبی با نانو ذرات به دلیل وجود این ماده در آلیاژ اولیه و همچنین چسبندگی بهتر نانو ذرات ترکیب شده با مس نسبت به سایر مواد در آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم-مس می‌باشد [۲۲]. محفظه‌های دستگاه آسیاب سیاره‌ای گلوله‌ای، استفاده شده در این پژوهش مانند سیاره‌های منظومه شمسی دارای ۲ حرکت وضعی (به دور خود) و حرکت انتقالی (به دور مرکز) می‌باشند. این نوع حرکت باعث می‌شود که گلوله‌های آسیاب کننده به دیواره‌ها نچسبیده و به‌طور مداوم در جهت قطر دایره محفظه پرتاب شوند. سرعت چرخش دستگاه متناسب با نوع مواد و اندازه دانه مورد نیاز قابل تنظیم می‌باشد. محفظه آسیاب متناسب با جنس پودر از مواد مختلف مانند فولادهای سخت کاری شده و زنگ‌نزن ساخته و ارائه می‌شود. قطر گلوله‌های مورد استفاده در آسیاب‌های سیاره‌ای در کوچک‌ترین حالت می‌تواند به‌صورت ۱:۱ (نسبت وزنی گلوله به پودر) باشد [۲]. در حالی که این نسبت تا مقدار بالا ۲۲۰:۱ نیز گزارش شده است [۲۲]، با این حال مناسب‌ترین و پراستفاده‌ترین نسبت استفاده شده برای گلوله‌ها در دستگاه آسیاب سیاره‌ای مقدار ۱۰:۱ است [۲۲]. دستگاه‌های آسیاب سیاره‌ای توانایی انجام فرایند آسیاب کردن و ترکیب کردن مواد را در شرایط خلأ و همچنین تحت محافظت گاز آرگون را دارا می‌باشند. از مهم‌ترین کاربردهای این دستگاه می‌توان به پودر کردن ذرات تا ابعاد نانومتر، آلیاژ سازی مکانیکی ذرات مختلف و امکان انجام واکنش شیمیایی در حین آسیاب کردن تحت گاز محافظ نام برد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد هدف اصلی استفاده از آسیاب سیاره‌ای در این پژوهش ترکیب کردن میکرو ذرات مس و نانو ذرات خاک رس است. در صورتی که ذرات خاک رس بر روی ذرات مس به درستی قرار

انواع ذرات نانو رس یا خاک رس بسته به ترکیب شیمیایی و ریخت شناسی به چند گروه مانند مونت موریلونیت^۱، بنتونیت، کائولن، هکتوریت^۲ و هالوسایت^۳ تقسیم می‌شود [۲۲]. نانو خاک رس، نانو ذرات سیلیکات معدنی لایه شده هستند. شرایط آب و هوایی محیط، ترکیب شیمیایی اولیه مواد آتشفشانی و محل پیدایش خاک رس از مهم‌ترین عوامل در تعیین نوع خاک رس و اجزا سازنده آن می‌باشند. استفاده از مونت موریلونیت به‌عنوان چسباننده^۴، پر کننده^۵، جاذب و کاتالیست باعث شده است تا از آن به‌عنوان یک خاک پر کاربرد در صنعت نام برده شود [۲۲]. با توجه به این موضوع که در این تحقیق از نانو ذرات خاک رس مونت موریلونیتی استفاده شده است در ادامه به بررسی دقیق‌تر این ماده پرداخته شده است. فرمول اختصاصی مونت موریلونیتها مورد استفاده در این تحقیق به صورت $(\text{Na,Ca})_{x/3}(\text{Al,Mg})_{y/3}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_z \cdot n\text{H}_2\text{O}$ می‌باشد [۲۶]. با توجه به فرمول و مرجع [۲۲]، آلومینیوم و سیلیسیوم بیشترین عنصر موجود در این ترکیب می‌باشند. نسبت طول به ضخامت مناسب و همچنین توانایی بالا برای قرار گرفتن بین لایه‌ای برای ذرات خاک رس، اخیراً استفاده از این ماده با هدف تقویت پلیمرها را بسیار مورد توجه قرار داده است [۲۲]. به‌طور کلی این موضوع ثابت شده است که با افزودن تقویت‌کننده‌های در ابعاد اتمی و مولکولی می‌توان تأثیر بیشتری بر خواص نهایی ماده گذاشت. در پایان می‌توان افزود که ذرات خاک رس به‌طور کلی برای تقویت مواد به‌صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۴-۲۰]. بنابراین، در این تحقیق از ذرات خاک رس، جهت افزایش عمر خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده برای ساخت سرسیلندر، استفاده شده است. ذرات نانو استفاده شده در این تحقیق دارای ابعادی در حدود ۲۰ تا ۳۰ نانومتر می‌باشند [۲۲]. همچنین جهت بهتر پخش شدن این ذرات در ماتریس پایه از ذرات میکرو مس استفاده شده است [۲۲]. جهت توزیع هرچه بهتر ذرات نانو در زمینه آلومینیومی (آلومینیوم-سیلیسیم-مس) روش‌های مختلفی تاکنون بررسی شده است. از جمله این روش‌ها، روش پیش گرم کردن ذرات نانو و روش بالمیل کردن ذرات نانو و افزودن عنصری با خلوص بالا در این مرحله به آن است. میکرو ذرات آلومینیوم جزو عناصر پر استفاده جهت افزودن به نانو ذرات در مرحله بالمیلینگ می‌باشد [۲]. علاوه بر ذرات میکرو آلومینیوم در مرجع [۱۲] نشان داده شده است که با ترکیب کردن نانو ذرات تقویت‌کننده

- 1 Montmorillonite
- 2 Hectorite
- 3 Halloysite
- 4 Binder
- 5 Filler

نگیرند در مرحله اضافه شدن به مذاب به یکدیگر می‌چسبند و باعث آگلومره شدن ذرات خاک رس می‌شود. لازم به توضیح است که هرچه فرایند آسیاب کاری با کیفیت بیشتری انجام شود، ذرات به صورت مناسب‌تری در زمینه پراکنده خواهند شد. حال نتایج مرجع [۲۲]، نشان می‌دهد که جهت بهتر نشستن ذرات نانو در زمینه آلومینیومی ترکیب کردن آن با یکی از عناصر اولیه موجود در آلیاژ روش بهتری می‌باشد. در مرحله آسیاب کاری میکرو ذرات مس با نانو ذرات خاک رس در آسیاب سیاره‌ای، مواد با نسبت جرمی ۱:۱ ترکیب شده‌اند و سپس داخل مخزن دستگاه قرار گرفته‌اند. در هنگام ترکیب شدن مواد باید همواره دو سوم از ظرفیت دستگاه خالی باشد تا امکان مخلوط شدن ذرات با یکدیگر بیشتر شود. ساچمه‌های فولادی مورد استفاده در دستگاه نسبت جرمی ۱:۱۰ را داشته‌اند. ساچمه‌ها دارای قطر ۸ و ۱۰ میلی‌متر به کاپ^۱ دستگاه اضافه شدند و پس از هواگیری کاپ، گاز آرگون به آن تزریق شد. نمونه‌ها در سه نوبت ۲۰ دقیقه‌ای با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه تحت عملیات آسیاب قرار گرفتند، پس از هر نوبت به نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه اجازه تنفس داده شد [۲۲].

عملیات حرارتی آلومینیوم در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا فرایند محلول سازی انجام و سپس عملیات پیرسازی به صورت مصنوعی صورت می‌گیرد. این روش از عملیات حرارتی، به منظور از بین بردن تنش‌های پسماند که از عملیات و فرایندهای تولید پروفیل یا مقاطع آلومینیومی به وجود می‌آیند [۲۲] و همچنین برای افزایش مقاومت به سایش و بالابردن مقاومت در برابر ضربه برای آلیاژ آلومینیوم استفاده شده است [۲۲].

برای مقایسه رفتار و مشخص شدن تأثیر روانکاری بر عمر خستگی سایشی، آزمون خستگی سایشی با اعمال روانکار بر روی هر کدام از مواد در سطح تنش ۱۰۰ مگاپاسکال صورت پذیرفته است. برای بررسی اثر روانکاری بر رفتار خستگی سایشی نانو کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، در هنگام اجرای آزمون خستگی سایشی، مجموعاً ۳ قطره روغن در هر ۱۵ ثانیه روی نمونه استاندارد و پدهای سایشی افزوده شده است [۱]. لازم به ذکر است، نام تجاری روغن ECONOMIC-ADDINOL ۰.۲۰ و نوع SAE-W2۰ و ساخت آلمان می‌باشد. در این پژوهش، از دستگاه آزمون خستگی خمشی- دورانی SFT-۶۰۰ شرکت سنتام، از نوع دو نقطه با بارگذاری کامل معکوس شونده استفاده گردیده است. به منظور ایجاد شرایط آزمون خستگی سایشی، ماژولی طراحی و ساخته شده است که توسط آن امکان اعمال نیروی سایشی به نمونه را محقق می‌کند [۲]. همچنین در این ماژول پدهای

1 Cup

سایشی موجود روی میله اعمال بار، به کمک فنرهای موجود نیروی تماسی ثابتی را روی سطح نمونه ایجاد می‌کنند. استاندارد مورد استفاده در آزمون خستگی ISO-۱۱۴۳ [۲۷] و برای آزمون فرتینگ ASTM-E۲۷۸۹-۱۰ [۲۵] می‌باشد دستگاه قابلیت کارکرد از ۱ تا ۱۰۰ هرتز را دارا می‌باشد، همچنین دستگاه در فرکانس ۱۰۰ هرتز دارای خروجی ۶۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. در مرجع [۲] اطلاعات بیشتری در مورد دستگاه مورد استفاده جهت آزمون خستگی نشان ارائه شده است. لازم به توضیح نمونه‌های در فک‌های دستگاه به وسیله ۶ پیچ در هر فک مهار می‌شوند (بهتر است جهت جلوگیری از هرگونه تنش اضافی در نمونه‌ها پیچ‌ها به صورت ضربدری محکم شوند).

برای مطالعه اثر خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، با و بدون ذرات نانو، پدای سایشی مورد استفاده در این پژوهش از رینگ‌های پیستون مورد استفاده در صنعت با جنس چند خاکستری جدا شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی رینگ پیستون^۲ استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است. پدهای سایشی در داخل میله اعمال نیرو قرار می‌گیرند. در ماژول سایشی پدها به میله اعمال نیرو چسبیده و ماژول نیز توسط دو عدد پیچ و مهره روی صفحه دستگاه خستگی، قرار گرفته است. مقدار نیروی اعمالی به نمونه در این دستگاه قابل تغییر است، به این صورت که برای اعمال نیروهای مختلف می‌توان از فنرهایی با سختی متفاوت یا با تغییر طول مختلف استفاده کرد. همچنین مقدار نیروی تماسی بین پد سایشی و نمونه آزمون بر اساس آزمون‌های سایشی و نیروی موجود در رینگ پیستون، برابر ۱۰ و ۱۵ نیوتن در نظر گرفته شده است [۲]. سطح سایش نیز شامل همان هندسه رینگ پیستون موتور است که قطعی از آن بریده شده و بر روی میله اعمال نیرو، قرار گرفته است.

در نهایت، بررسی ریزساختار به کمک میکروسکوپ نوری صورت گرفته است و سپس مطالعه سطح شکست نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان^۳ با دستگاه MIRA۳-TESCAN انجام گرفت. به منظور بررسی ریزساختار، پس از سنباده‌زنی تا شماره ۳۰۰۰ سطح نمونه‌ها با پودر آلومینا تحت پولیش کاری قرار گرفته است. دلیل استفاده از سنباده ۳۰۰۰ جهت پوس آب زدن، برای خشگیری و آماده سازی نمونه برای پولیش است [۲۲]. سپس برای مشخص شدن فازها از محلول اچ کلر با ترکیب شیمیایی شامل ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر، ۱ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوئوریک، ۱/۵ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک و ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک، کمک گرفته شده است [۲۲].

2 MF-116

3 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

جدول ۲. مشخصات رینگ پیستون مورد استفاده در آزمون خستگی سایشی [۲۲]

Table 2. Piston ring specifications used in fretting fatigue testing [22]

جنس رینگ	چدن
ترکیب شیمیایی	۲/۴۰ تا ۲/۹۰ درصد سیلیسیوم- ۰/۲۰ تا ۰/۸۰ درصد منگنز- ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ درصد منیزیم- حداکثر ۰/۱۵ درصد فسفر- حداکثر ۰/۰۳ درصد گوگرد- حداکثر ۰/۰۳۰ درصد مولیبدن- حداکثر ۰/۷۰ درصد نیکل
سختی	۳۵ تا ۴۵ راکول
مدول الاستیسیته	۱۴۵۰۰۰ تا ۱۸۵۰۰۰ مگاپاسکال
استحکام خمشی	۱۳۰۰ مگاپاسکال

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار ماده

در رابطه با بحث ریز ساختار، شکل ۱ نشان دهنده تصاویر مربوط به نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر با و بدون ذرات نانو استفاده شده در این پژوهش، می‌باشد. به طور کلی این نانو کامپوزیت‌ها، دارای زمینه آلومینیومی است که عمده رسوبات پراکنده شده در آن فاز سیلیسیوم است. این فاز سیلیسیوم، به دو شکل متفاوت شاخه‌ای و بلوکی در زمینه آلومینیومی شکل گرفته‌اند. با توجه به ریز ساختار نمونه‌های آلیاژ سرسیلندر مورد استفاده، فازهای گوناگونی همچون فاز سیلیسیوم^۱ و فاز α -Al، در شکل ۱، مشاهده شده است. همچنین در رابطه فازهای بین فلزی موجود از ترکیب و مس با آلومینیوم نیز در ریزساختار، همانطور [۱]، که در مطالعات آورده شده است، می‌توان اشاره کرد، که با بزرگنمایی‌های کوچک در میکروسکوپ نوری، تقریباً این فازهای بین فلزی، مشابه به نظر می‌آیند و تشخیص آن‌ها مشکل می‌باشد. در شکل ۱ (الف) و (ب) به ترتیب تصاویر ریزساختار نانو کامپوزیت پایه آلومینیومی، برای دو حالت با و بدون ذرات نانو، با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر آورده شده است. همچنین شکل ۱ (ج) و (د) به ترتیب پیشین، نمایشگر بزرگنمایی ۲۰۰ برابر هستند. بررسی ریزساختارها نشان می‌دهد که مشابه با مطالعات [۲۲]، در اثر عملیات حرارتی شکل و توزیع رسوبات سیلیسیوم و فازهای بین فلزی تغییر یافته است و مقدار رسوبات بلوکی شکل در زمینه آلومینیومی کاهش یافته است. همچنین میزان فازهای بین فلزی پس از اجرای عملیات حرارتی کاهش یافته است. برای بررسی این مورد، نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر در نواحی کاملاً اتفاقی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر به کمک نرم‌افزار آنالیز تصاویر متالوگرافی^۲ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند نتایج

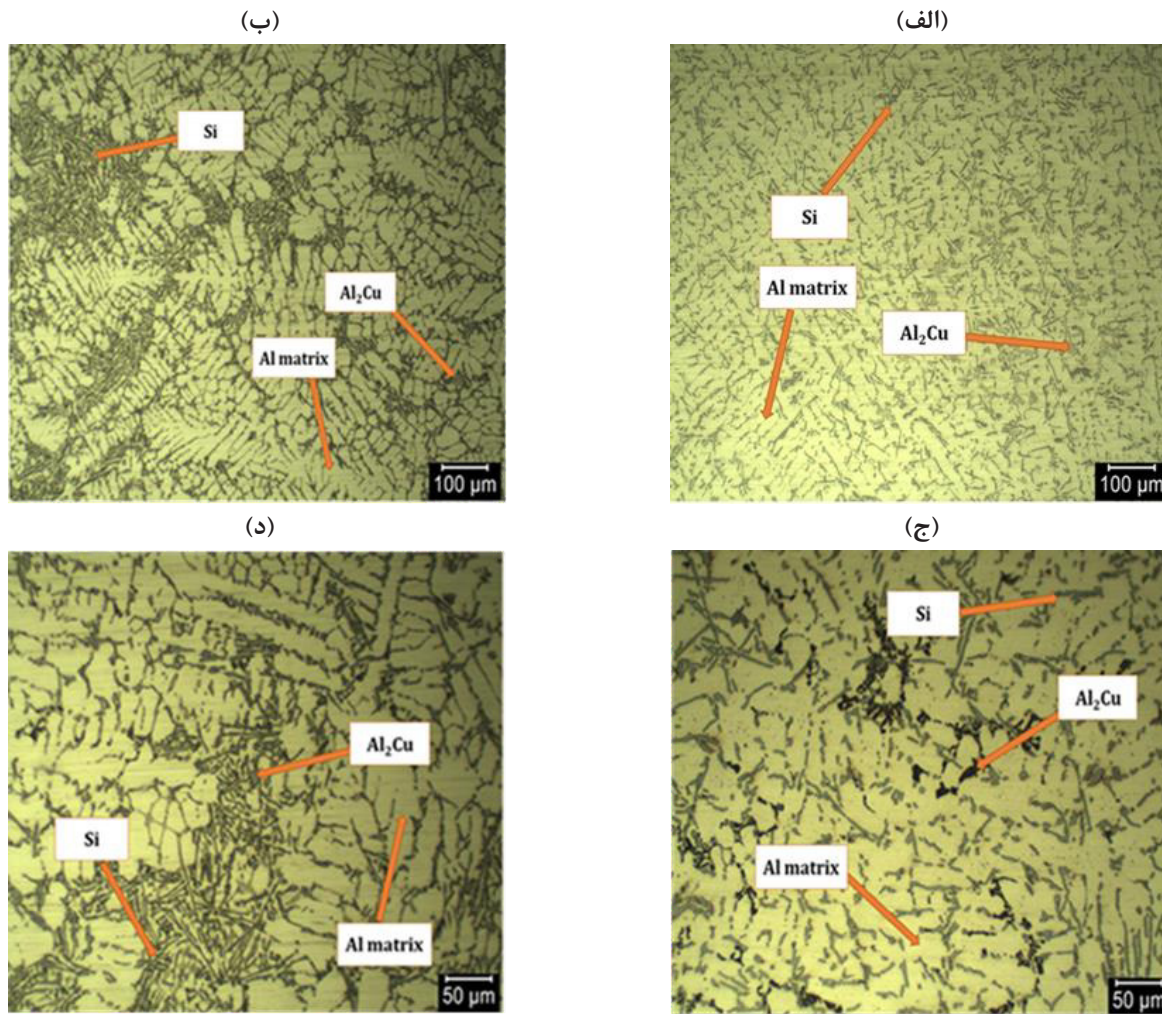
1 Silicon
2 ImageJ

حاصل در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی عملیات حرارتی انجام شده، فاز یوتکتیک سیلیسیوم نسبت به آلیاژ اولیه کاهش یافته است، اما در مورد فاز آلومینیوم- مس نمی‌توان با قطعیت بالایی نتیجه‌گیری مشخصی انجام داد. علت این موضوع وجود مس در این فاز می‌باشد که این فاز را به شدت نسبت به هرگونه تغییر دمایی حساس می‌کند. همچنین افزایش مساحت فاز آلومینیوم- مس، در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انحلال و در ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد پیرسازی شده بود، یکی از مهمترین دلایل کاهش میزان سختی است.

تمامی عملیات‌های حرارتی انجام شده باعث کاهش اندازه میانگین مساحت فاز یوتکتیک سیلیسیوم در آلیاژ شدند. کوچک‌ترین میزان مساحت اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها، مربوط به نمونه‌هایی بود که دما و زمان انحلال آن‌ها متفاوت بودند، اما دمای پیرسازی آنها ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است، که این مهم خود باعث افزایش برخی از خواص مکانیکی خواهد شد [۲۲].

۳-۲- عمر خستگی سایشی

در رابطه با بررسی عمر خستگی سایشی، در شکل ۲، نتایج حاصل از آزمون خستگی خمشی برای آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر با و بدون ذرات نانو، برای شرایط با و بدون روغن کاری آورده شده است. در این آزمون، برای در شکل ۲، عمر خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، در نیروی ۱۵ نیوتن در شرایط روغن کاری شده و بدون روغن کاری با موارد پیشین در نیروی ۱۰ نیوتن و در یک سطح تنش ۱۰۰ مگاپاسکال مقایسه شده است. نیروهای تماسی در این مقاله، بر اساس نیرو اعمالی در رینگ پیستون [۲]، انتخاب گردیده است و همچنین این مقادیر برای آلیاژ آلومینیوم در آزمون‌های خستگی- فرتینگ [۲۲]، نیز استفاده شده است.



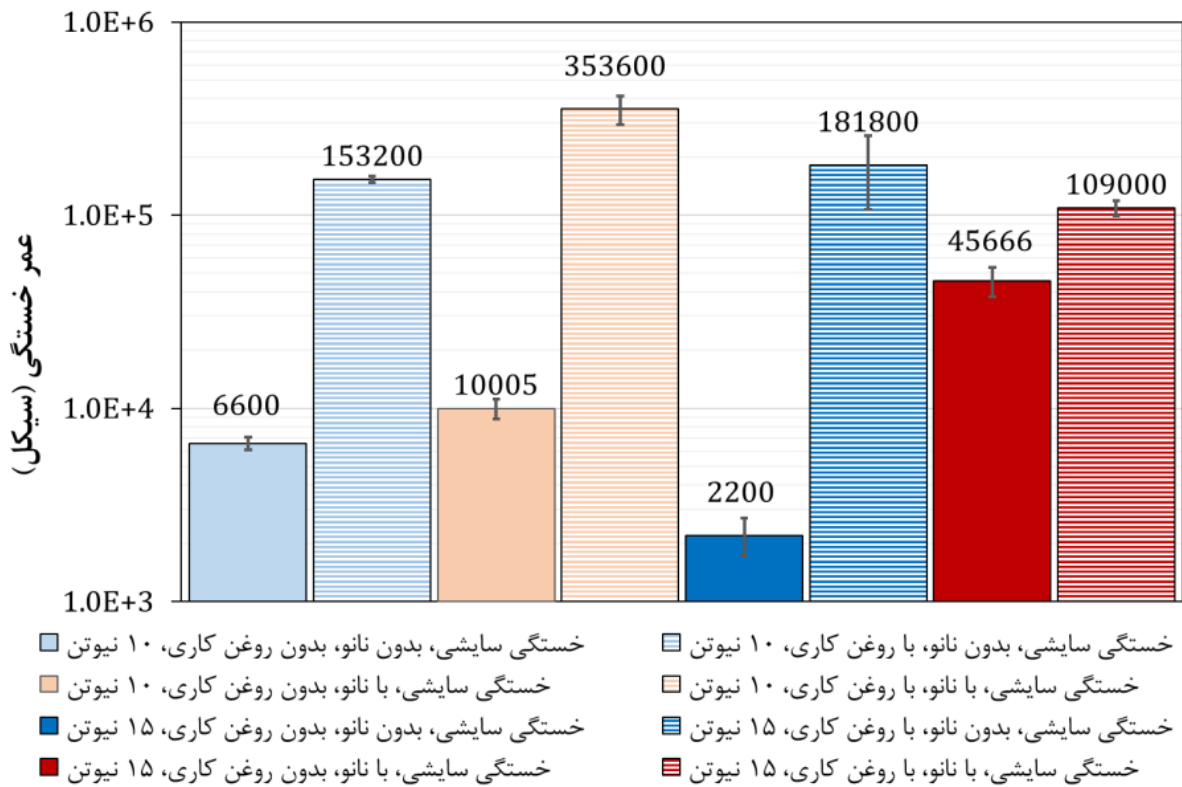
شکل ۱. ریزساختارهای آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر: (الف) بدون نانو ذرات با بزرگنمایی ۱۰۰، (ب) با نانو ذرات با بزرگنمایی ۱۰۰، (ج) بدون نانو ذرات با بزرگنمایی ۲۰۰ و (د) با نانو ذرات با بزرگنمایی ۲۰۰

Fig. 1. Cylinder head aluminum alloy microstructures: (a) without nanoparticles with magnification of 100X, (b) with nanoparticles with magnification of 100X, (c) without nanoparticles with magnification of 200X, and (d) with nanoparticles with magnification of 200X

جدول ۳. مقدار مساحت، درصد و میانگین اندازه فازهای یوتکتیک سیلیسیوم و آلومینیوم-مس با و بدون نانو ذرات

Table 3. The area, percentage and average size of silicon and aluminum-copper eutectic phases with and without nanoparticles

با نانو ذرات		بدون نانو ذرات		فاز
میانگین اندازه (میکرومتر مربع)	میانگین سطح (میکرومتر مربع)	میانگین اندازه (میکرومتر مربع)	میانگین سطح (میکرومتر مربع)	
۱۵۶/۸۸	۱۵/۷۴	۱۵۰/۴۸	۲۲/۴۹	سیلیسیوم
۱۶۷/۱۰	۱۴/۹۷	۱۷۴/۵۰	۲۰/۵۲	آلومینیوم-مس



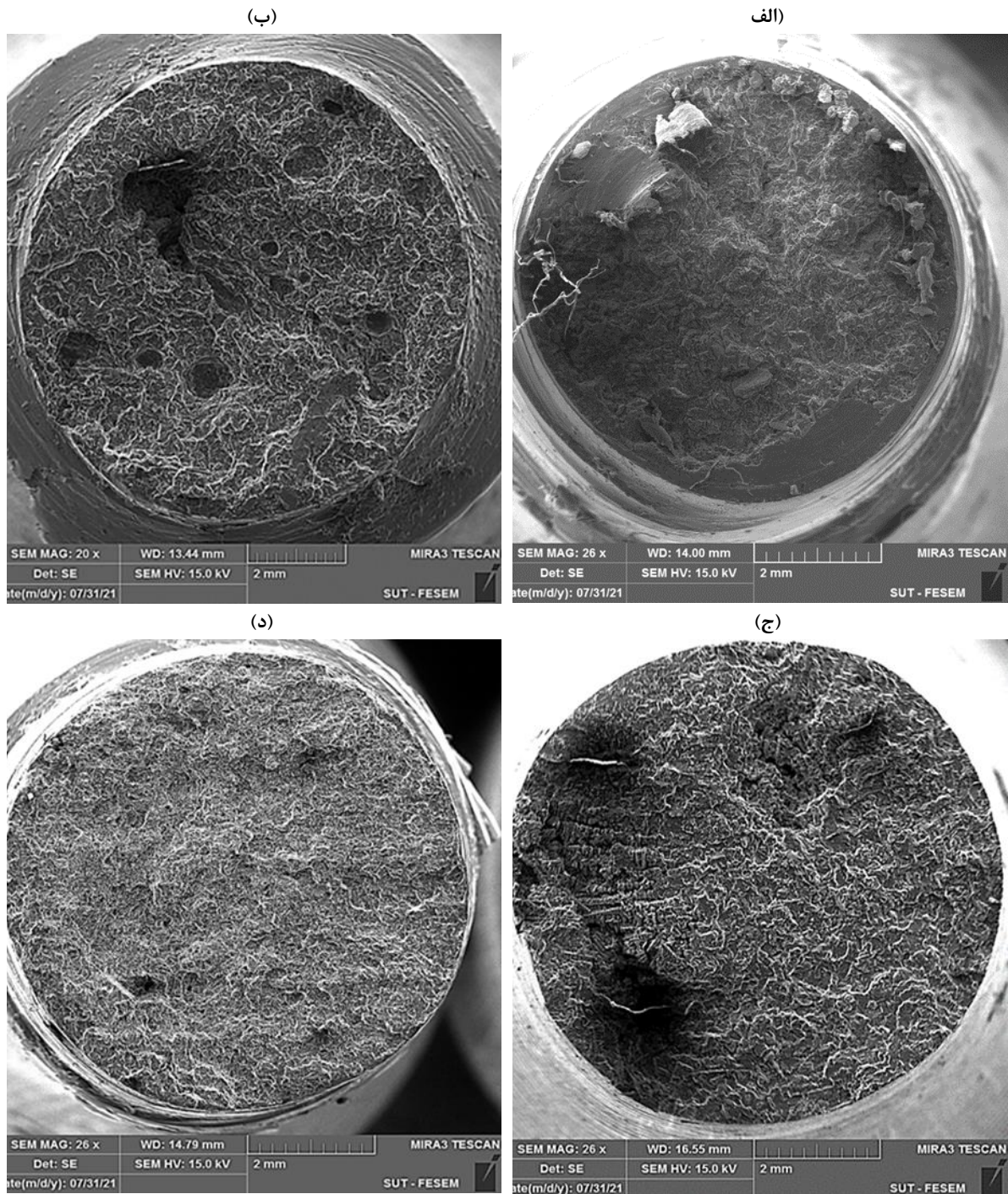
شکل ۲. تأثیر افزودن روانکار بر عمر خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر

Fig. 2. The effect of the lubricant addition on the fretting fatigue lifetime of cylinder head aluminum alloys

۳-۳- تحلیل سطح شکست

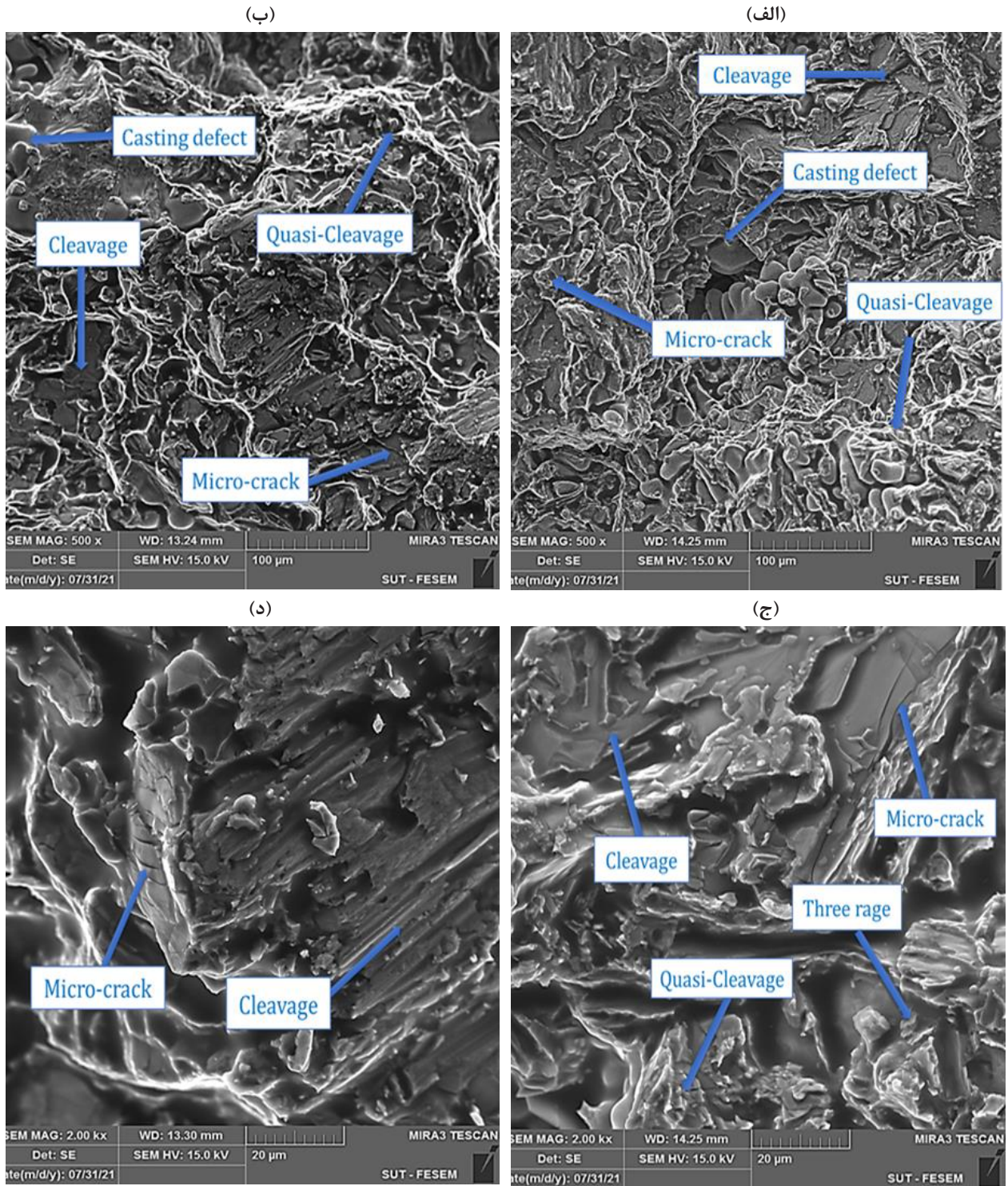
در رابطه با آنالیز شکست، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان، مربوط به سطح شکست حاصل از آزمون خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، برای دو حالت روغن کاری شده در نیروی ۱۵ و ۱۰ نیوتن، به ترتیب برای نمونه‌های بدون نانو ذرات و با نانو ذرات در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ مقایسه شده است. لازم به ذکر است، تمامی تصاویر برای آزمون خستگی سایشی در سطح تنش یکسان و معادل ۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۴ (الف)، (ب)، (ج) و (د)، به ترتیب، نمای کامل از سطح شکست نمونه روغن کاری شده در نیروی ۱۵ و ۱۰ نیوتن، برای نمونه‌های با و بدون نانو ذرات نشان داده شده است. با رعایت همین ترتیب، سطوح شکست نمونه‌های بدون نانو ذرات در شکل ۳ (الف)، (ب)، (ج) و (د)، برای بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و ۲۰۰۰ برابر نشان داده است. علاوه بر آن، با رعایت ترتیب فوق، شکل ۴ نشان‌دهنده سطح شکست نمونه‌های با نانو می‌باشد.

نتایج نشان داده، عمر خستگی نمونه با نانو ذرات در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو در شرایط روغن کاری و در نیرو ۱۰ نیوتن، افزایش ۲/۳ برابری داشته است، در صورتی که در شرایط بدون روغن کاری و در نیرو پیشین، عمر خستگی نمونه با ذرات نانو افزایش ۱/۵ برابری در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو را حاصل شده است. همچنین عمر خستگی نمونه با نانو ذرات در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو در شرایط با روغن کاری و در نیرو ۱۵ نیوتن، کاهش ۱/۶ برابری داشته است، در حالی که در شرایط بدون روغن کاری و در نیرو پیشین، عمر خستگی نمونه با ذرات نانو افزایش ۵۰ برابری در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو را داشته است. همچنین پژوهش [۲۲]، با بررسی تأثیر عملیات حرارتی و افزودن نانو ذرات، نشان داد که خواص خستگی پرچرخه آلیاژهای آلومینیومی به میزان قابل قبولی افزایش داد. در رابطه با اثر روانکاری بر عمر خستگی سایشی، استفاده از روغن و کاهش نیروی سایشی سبب افزایش قابل ملاحظه طول عمر در نمونه‌های حاوی نانو شده است.



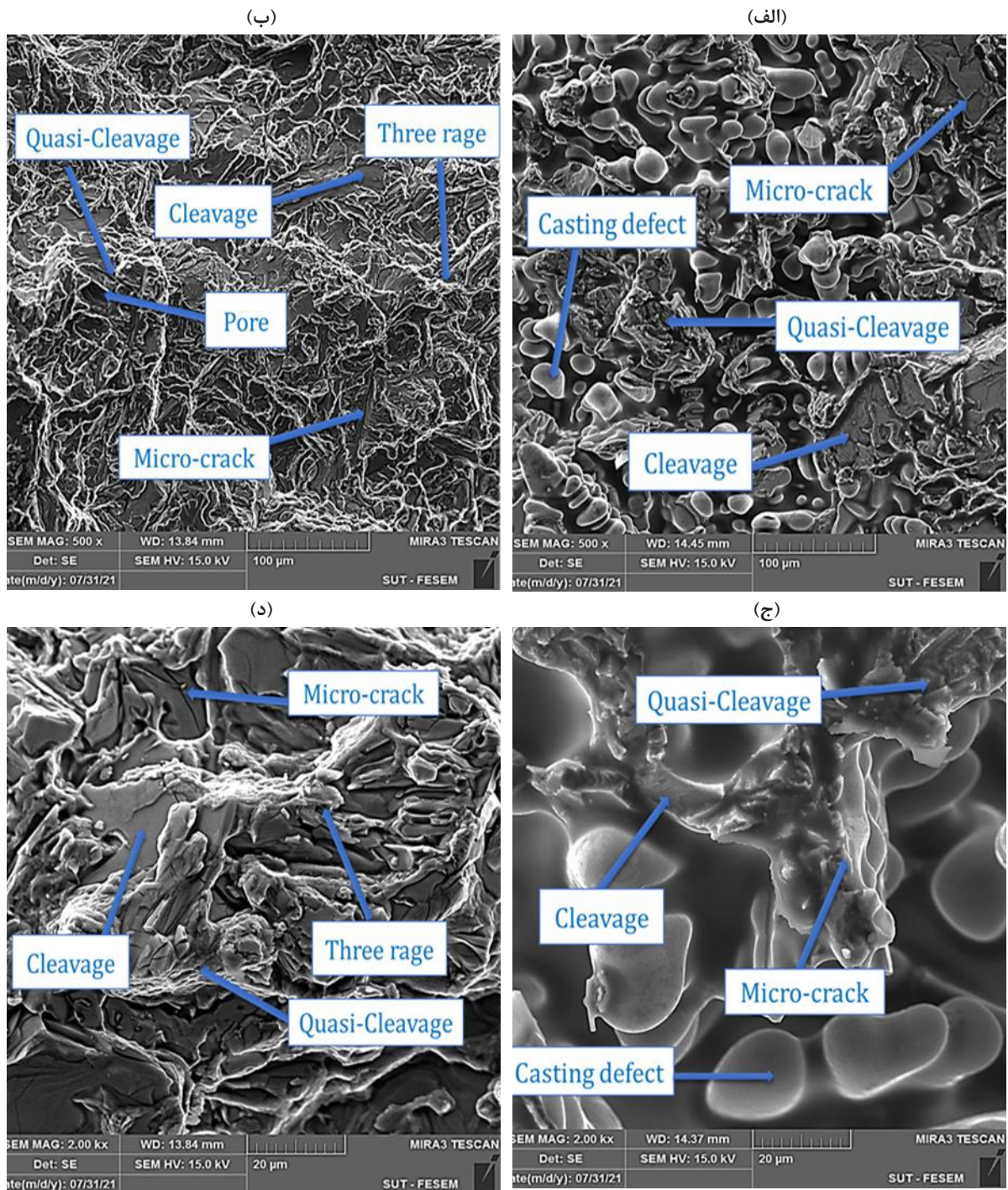
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از سطح شکست نمونه‌های با و بدون نانو ذرات: (الف) نمایی کامل از سطح شکست نمونه بدون نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۵ نیوتن، (ب) نمایی کامل از سطح شکست نمونه با نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۵ نیوتن، (ج) نمایی کامل از سطح شکست نمونه بدون نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۰ نیوتن و (د) نمایی کامل از سطح شکست نمونه با نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۰ نیوتن

Fig. 3. The field-emission scanning electron microscopy images from the fracture surface of samples with and without nanoparticles: (a) the full view from the fracture surface of the sample without nanoparticles and lubrication at 15 N, (b) the full view from the fracture surface of the sample with nanoparticles and with lubrication at 15 N, (c) the full view of the fracture surface of the sample without nanoparticles and with lubrication at 10 N, and (d) the full view of the fracture surface of the sample with nanoparticles and lubrication at a force of 10 N



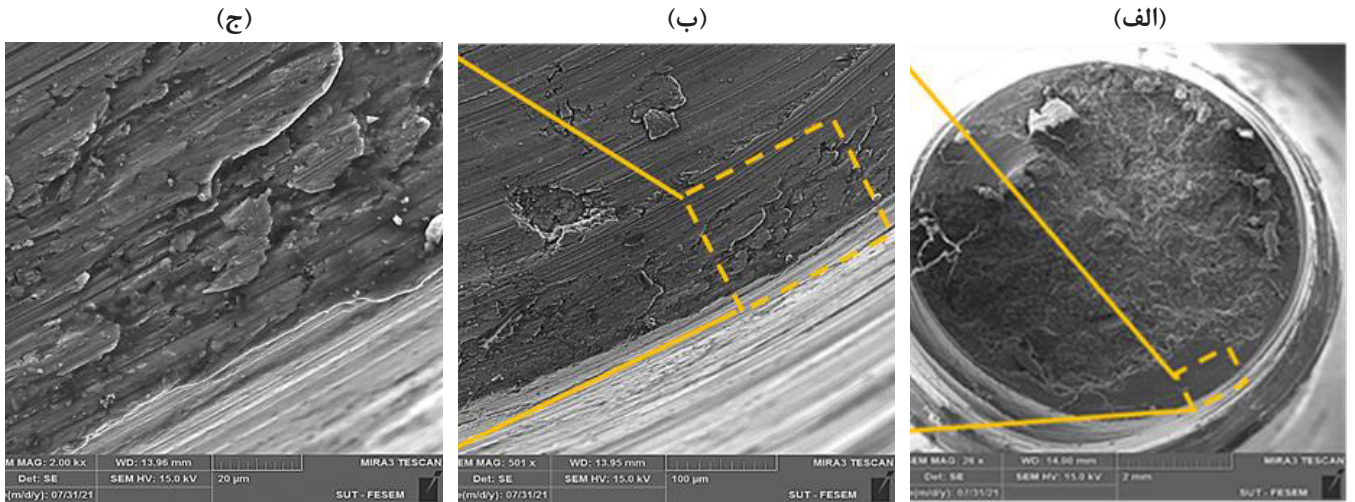
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از سطح شکست نمونه‌های با و بدون نانو ذرات: (الف) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر برای نمونه بدون نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۵ نیوتن، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر برای نمونه با نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۵ نیوتن، (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر برای نمونه بدون نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۵ نیوتن و (د) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر برای نمونه با نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۵ نیوتن

Fig. 4. The field-emission scanning electron microscopy images from the fracture surface of samples with and without nanoparticles: (a) 500X magnification for the sample without nanoparticles and lubrication at 15 N, (b) 500X magnification for the sample with nanoparticles and with lubrication at 15 N, (c) 2000X magnification for the sample without nanoparticles and with lubrication at 15 N, and (d) 2000X magnification for the sample with nanoparticles and with oil-Work at 15 Nm



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از سطح شکست نمونه‌های با و بدون نانو ذرات: (الف) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر برای نمونه بدون نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۰ نیوتن، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر برای نمونه با نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۰ نیوتن، (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر برای نمونه بدون نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۰ نیوتن و (د) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر برای نمونه با نانو ذرات و با روغن کاری در نیروی ۱۰ نیوتن

Fig. 5. Scanning electron microscope images of the field emission from the refractive index of samples with and without nanoparticles: (a) 500x magnification for the sample without nanoparticles and lubrication at 10 N, (b) 500x magnification for Sample with nanoparticles and with lubrication at 10 N, (c) 2000x magnification for sample without nanoparticles and with lubrication at 10 N and (d) 2000x magnification for sample with nanoparticles and with lubrication at a force of 10 N



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه بدون ذرات نانو با نیروی ۱۵ نیوتن در شرایط روانکاری شده: (الف) بزرگنمایی ۲۵ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر

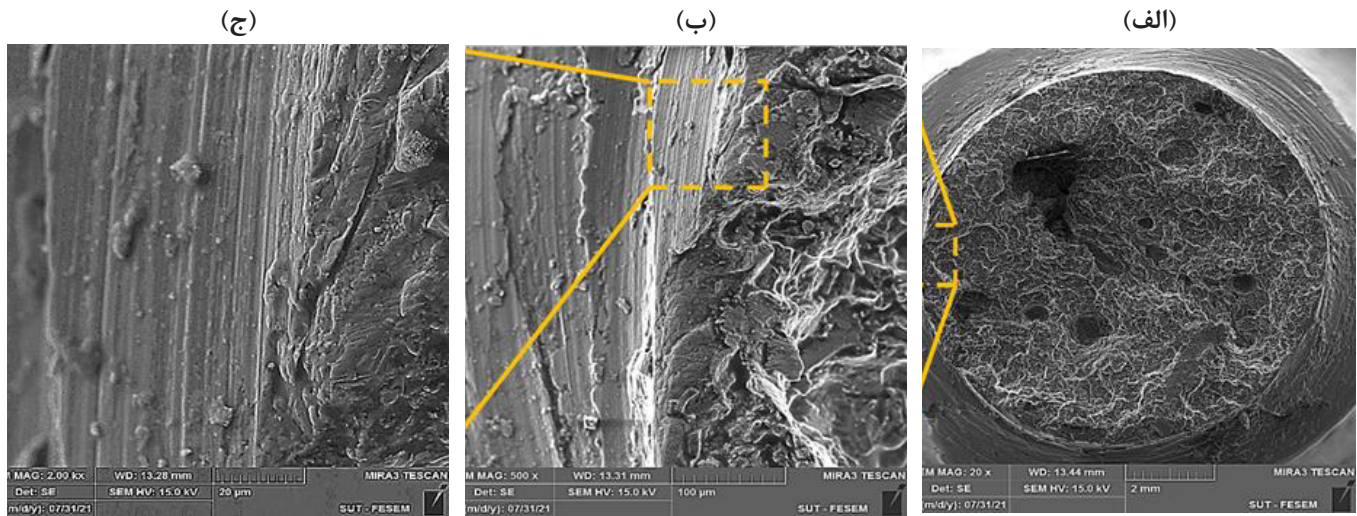
Fig. 6. The field-emission scanning electron microscopy images from the edge of the fracture surface of the sample without nanoparticles with a force of 15 N in lubricated conditions: (a) 25X magnification, (b) 500X magnification, and (c) 2000X magnification

در نمونه‌های بدون عیب، شکست از صفحات کلیوج با فاز سیلیسیوم و یا فازهای بین فلزی آغاز می‌شود [۲۹]، لذا با بهینه‌سازی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم پیستون و کاهش اندازه فاز سیلیسیوم و فازهای بین فلزی، باعث بهبود عمر خستگی می‌شود [۱۵]. علاوه بر این، فازهای سیلیسیوم مانند حفاظی در برابر رشد ترک نیز عمل می‌کنند [۲۸ و ۲۹]. از آنجایی که در این مطالعه شرایط بارگذاری از نوع خمش بوده است، بیشترین مقدار تنش در سطح نمونه ایجاد می‌شود. بنابراین عمده ترک‌های خستگی خمشی از نزدیک سطح آغاز می‌شوند [۱۵]. علاوه بر این، از آنجا که تنش‌های تماسی به علت تمرکز تنش، بیشترین مقدار محلی را در سطح تماس دارند، ترک‌های خستگی سایشی نیز، در این ناحیه ایجاد می‌شوند. لذا کاهش عمر خستگی سایشی به نظر می‌رسد، به دلیل کمتر شدن عمر ایجاد 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 می‌شود.

همان‌طور که در شکل‌های ۳، ۴ و ۵، مشخص شده است، رفتار شکست آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر به دلیل وجود نواحی کلیوج^۱ و شبه-کلیوج^۲ در سطح شکست، رفتار شکست نرم^۳ و ترد^۴ بوده است. آثار کلیوج اکثراً در امتداد صفحات کریستالوگرافی، با شکل ورقه‌های تخت ایجاد می‌شود. این ورقه‌ها گاهی می‌توانند شامل خطوط ساحلی^۵ هم جهت با مسیر رشد ترک باشند. وجود شبه‌کلیویج، به دلیل رفتار شکست ترکیبی میان شکست ترد و نرم است.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، مشخص می‌شود برای هر دو نمونه با و بدون ذرات نانو بررسی شده، با افزوده شدن روغن به آزمون خستگی سایشی و افزایش عمر خستگی، اندازه صفحات کلیوج بیشتر شده است. علاوه بر آن میزان نواحی شبه-کلیوج کاهش یافته است. همچنین تعداد و اندازه‌های میکروتورک‌ها و حفره‌های موجود قابل مشاهده، به دلیل عمر بیشتر خستگی، کمتر شده است. این موارد نشان می‌دهد شکست به حالت شکست ترد نزدیک‌تر شده است [۲۸]. غالباً برای آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم

- 1 Cleavage
- 2 Quasi-Cleavage
- 3 Ductile
- 4 Brittle
- 5 River Pattern



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه با ذرات نانو با نیروی ۱۵ نیوتن در شرایط روانکاری شده: (الف) بزرگنمایی ۲۵ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر

Fig. 7. The field-emission scanning electron microscopy images from the edge of the fracture surface of the sample with nanoparticles with a force of 15 N under lubricated conditions: (a) 25X magnification, (b) 500X magnification, and (c) 2000X magnification

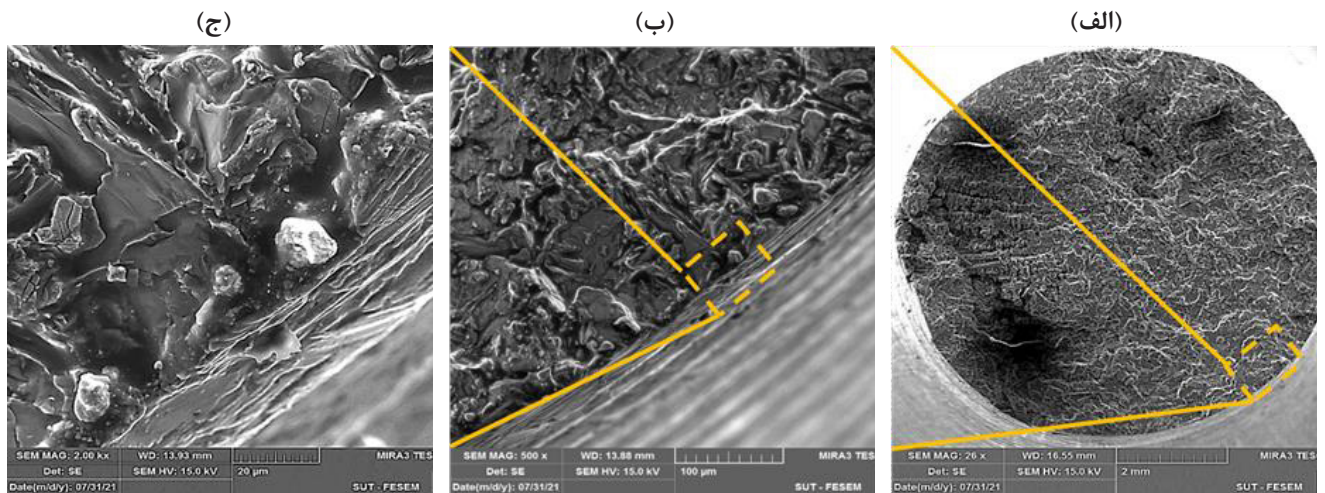
جدول ۴. مشخصات ناحیه آسیب سایشی در آزمون‌های مختلف همراه با روانکار

Table 4: The specifications of the abrasion damage area in different tests with lubricant

درصد مساحت ناحیه آسیب نسبت به کل مساحت سطح شکست	بیشترین ضخامت ناحیه آسیب (میلی‌متر)	مقدار نیرو (نیوتن)	شرایط ذرات نانو
(%)			
۱۵/۶۶	۰/۰۶۱۶۶۹	۱۵	بدون ذرات نانو
۱۱/۷۴	۰/۰۴۳۷۶۳	۱۵	با نانو ذرات
۸/۲۸	۰/۰۸۸۲۸	۱۰	بدون نانو ذرات
۱۵/۹۲	۰/۰۶۲۶۳۷	۱۰	با نانو ذرات

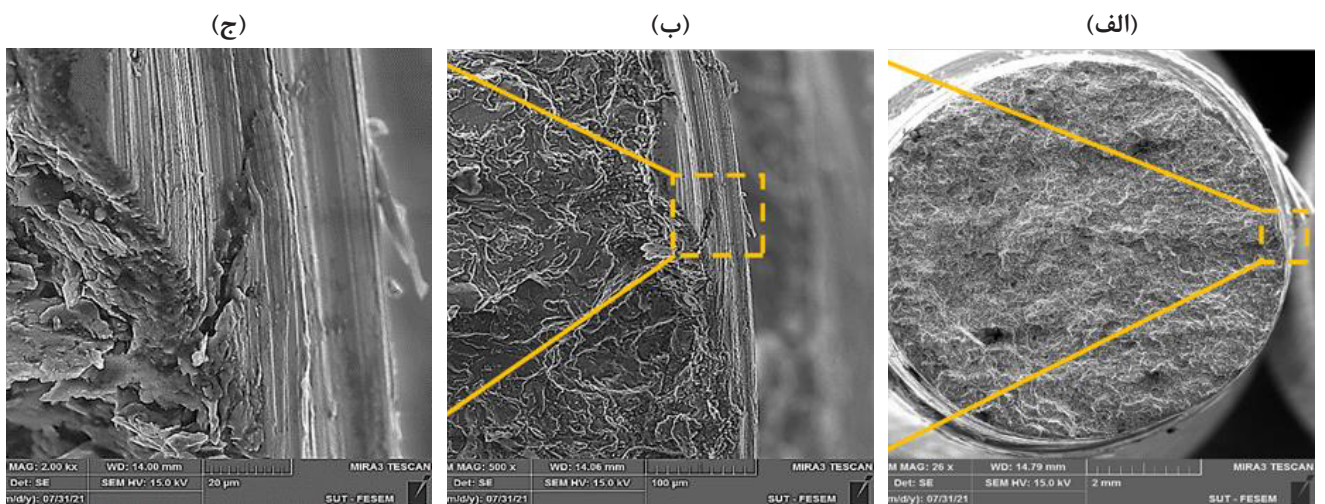
شکل‌های مربوط به لبه سطح شکست سایشی مشخص است، ناحیه‌ای از لبه نمونه‌ها، به دلیل آسیب شدید ناشی از سایش، دچار تغییر شکل شده است. با کمک نرم‌افزار نرم‌افزار آنالیز تصاویر متالوگرافی^۱، بیشترین ضخامت ناحیه آسیب ناشی از سایش و مساحت این ناحیه، اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری، در جدول ۴ آورده شده است.

در شکل‌های ۶ و ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان، از لبه نمونه‌های با و بدون نانو ذرات تحت آزمون خستگی سایشی در نیروی ۱۵ نیوتن، با بزرگنمایی‌های متفاوت، نشان داده شده است. همین مورد در شکل‌های ۸ و ۹ برای لبه نمونه‌های با و بدون نانو ذرات تحت آزمون خستگی سایشی در نیروی ۱۰ نیوتن، آورده شده است. همانطور که از



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه بدون ذرات نانو با نیروی ۱۰ نیوتن در شرایط روانکاری شده: (الف) بزرگنمایی ۲۵ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر

Fig. 8. The field-emission scanning electron microscopy images from the edge of the fracture surface of the sample without nanoparticles with a force of 10 N under lubricated conditions: (a) 25X magnification, (b) 500X magnification, and (c) 2000X magnification

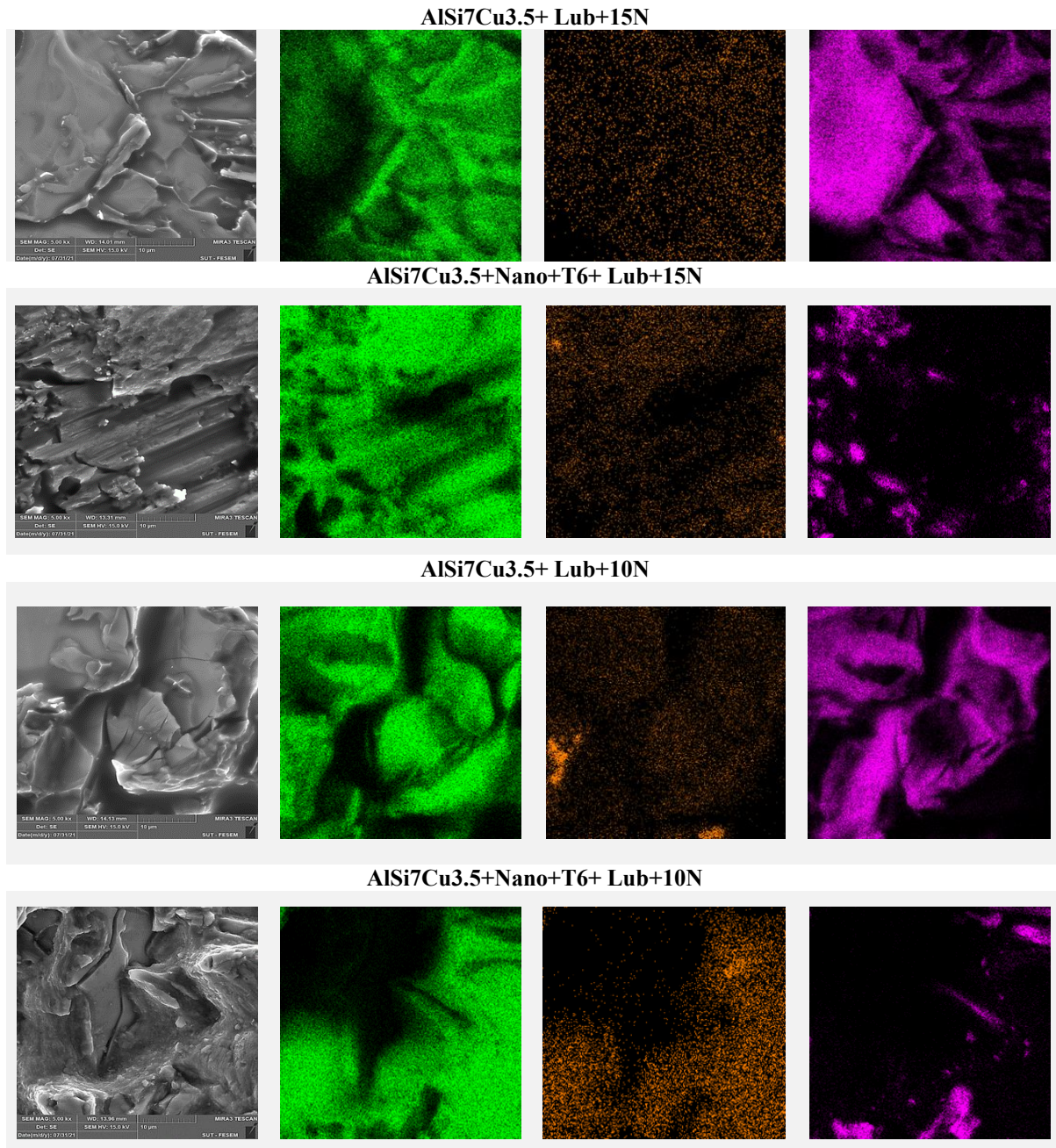


شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه با ذرات نانو با نیروی ۱۰ نیوتن در شرایط روانکاری شده: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر

Fig. 9. The field-emission scanning electron microscopy images from the edge of the fracture surface of the sample with nanoparticles with a force of 10 N under lubricated conditions: (a) 25X magnification, (b) 500X magnification, and (c) 2000X magnification

همچنین، جهت بررسی اثر عناصر و فازهای مختلف در نحوه شکست ماده از تصاویر FE-SEM استفاده شد. همچنین از سطوح شکست ماده تحلیل EDX map صورت گرفت. این تصاویر در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشند. با توجه به شکل ۱۰، عناصر آلومینیوم را با رنگ سبز، مس را با رنگ نارنجی و سیلیسیم را با رنگ بنفش نشان داده شده است. با بررسی تصاویر نشان می‌دهد که فاز سیلیسیم و فازهای بین فلزی در سطح شکست هر سه نمونه وجود دارد. طبق نتایج مطالعه [۳۰]، این رسوبات ناحیه مستعد

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که کاهش نیرو همراه با افزودن روانکار در حین اجرای آزمون خستگی سایشی، در بیشترین ضخامت ناحیه آسیب، باعث افزایش رشد $0.26/0$ میلی‌متری برای نمونه بدون نانو ذرات و افزایش رشد $0.18/0$ میلی‌متری برای نمونه با نانو ذرات شده است. همچنین مساحت ناحیه آسیب نسبت به کل مساحت سطح شکست، باعث کاهش $7/38$ درصدی برای نمونه بدون نانو ذرات و افزایش $4/18$ درصدی برای نمونه با نانو ذرات شده است.



شکل ۱۰. تصاویر FE-SEM با آنالیز EDX از سطوح شکست برای نمونه‌های آلومینیومی با و بدون ذرات نانو

Fig. 10. FE-SEM images with the EDX analysis of fracture surfaces for aluminum samples with and without nanoparticles

کمتری بر روی مکانیزم شکست دارد. همچنین از آنجا که در سطوح تنش بالاتر بیشتر زمان عمر خستگی صرف رشد ترک می‌شود، در نتیجه افزایش این فازها باعث رشد سریع‌تر ترک خواهد شد. در نهایت این موضوع بدان معناست که در نمونه تقویت‌شده ذرات یاد شده به گونه همگن‌تری در زمینه آلومینیوم پخش شده‌اند. همین موضوع باعث افزایش عمر خستگی سایشی نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه‌های سرسیلندر شده است [۲-۱].

برای شروع میکروتُرک‌ها شوند، یعنی ترک‌ها در نزدیکی رسوبات بین فلزی و سیلیسیوم تشکیل و منجر به شکست نهایی می‌گردند. لی^۱ و همکاران [۳۱]، نیز در بررسی نحوه شکست آلیاژ آلومینیومی مشاهده کردند که فازهای یاد شده علت اصلی شکست در این گونه آلیاژها می‌باشد و فاز زمینه تأثیر

1 Li

مساحت ناحیه آسیب سایشی نیز، افزایش یافته است.

۴- جمع بندی

در این پژوهش، اثر افزودن روانکار و تأثیر نیروی تماسی بر عمر خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-مس سربلندر با و بدون ذرات نانو ذرات خاک رس بررسی شد. برای بررسی دقیق‌تر از رینگ پیستون مورد استفاده در صنعت به عنوان پد سایشی استفاده شد. آزمون خستگی سایشی و بررسی ریزساختار و سطح شکست صورت پذیرفت و نتایج حاصل به شرح زیر آورده شده است.

- بررسی ریزساختاری نشان داد که در این آلیاژ آلومینیوم سربلندر، اکثر رسوبات شامل فاز سیلیسیوم هستند که در زمینه آلومینیومی پراکنده شده‌اند. همچنین بعد از اعمال عملیات حرارتی اندازه رسوبات فاز سیلیسیومی و فازهای بین فلزی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند باعث کاهش تمرکز تنش و در نتیجه بهبود عمر خستگی شود.

- عمر خستگی نمونه با ذرات نانو در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو در شرایط افزودن روانکار، در سطح نیرو ۱۵ نیوتن، کاهش ۱/۶ برابری را داشته است. با کاهش سطح نیرو فرتینگ این مقدار افزایش یافته و در سطح نیرو ۱۰ نیوتن، عمر خستگی افزایش ۱/۵ برابری را داشته است.

- عمر خستگی نمونه با ذرات نانو در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو در شرایط بدون روانکار، در سطح نیرو ۱۰ نیوتن، افزایش ۱/۵ برابری را داشته است. در حالی که با افزایش سطح نیرو به ۱۵ نیوتن، عمر خستگی ۵۰ برابر افزایش یافته است.

- عمر خستگی نمونه با ذرات نانو در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو در سطح نیرو ۱۰ نیوتن و همراه با روانکار، افزایش ۲/۳ برابری را داشته است. در صورتی که بدون استفاده از روانکار در آزمون تجربی، عمر خستگی ۱/۵ برابر افزایش یافته است.

- عمر خستگی نمونه با ذرات نانو در مقایسه با نمونه بدون ذرات نانو در سطح نیرو ۱۵ نیوتن و همراه با روانکار، کاهش ۱/۶ برابری را داشته است. در صورتی که بدون استفاده از روانکار در آزمون تجربی، عمر خستگی ۵۰ برابر افزایش یافته است.

- بررسی سطح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان نشان داد که ماهیت اصلی شکست از نوع ترد بوده است اما وجود نواحی شبه-کلیوج رفتار شکست در برخی نواحی، به شکست نرم متمایل شده است. همچنین، افزودن روانکار حین آزمون خستگی سایشی، باعث افزایش رفتار شکست ترد، در نمونه‌ها شده است. علاوه بر آن، بررسی لبه نمونه‌ها نشان داد با افزایش عمر خستگی سایشی، ضخامت و نسبت

منابع

- [1] M.S. Aghareb Parast, H. Aroo, M. Azadi, M. Azadi, Investigation on effects of lubrication and heat treatment on frerring fatigue behavior of aluminum-matrix nano-composite, Modares Mechanical Engineering, 21(8) (2021) 527-540 (in Persian)
- [2] M.S. Aghareb Parast, M.H. Haji Esmaili, M. Azadi, Comparing bending fatigue and fretting fatigue properties in aluminum-silicon alloy under working conditions of engine piston-ring system, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 11(2) (2021) 157-174 (in Persian)
- [3] A.D. Ahmed, E. Sarhan, M. Zalnezhad, M. Hamdi, The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of hard anodized aerospace AL7075-T6 alloy, Materials Science and Engineering A, 560 (2013) 377-387
- [4] G.H. Majzoobi, J. Nemati, A.J. Novin Rooz, G.H. Farrahi, Modification of fretting fatigue behavior of AL7075-T6 alloy by the application of titanium coating using IBED technique and shot peening, Tribology International, 42 (2009) 121-129
- [5] G.H. Majzoobi, K. Azadikhah, J. Nemati, The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6, Materials Science and Engineering A, 516 (2009) 235-247
- [6] C. Santus, Fretting fatigue of aluminum alloy in contact with steel in oil drill pipe connections, modeling to interpret test results, International Journal of Fatigue, 30 (2008) 677-688
- [7] M.P. Szolwinski, T.N. Farris, Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy, Wear, 221 (1998) 24-36
- [8] S.R. Shinde, D.W. Hoepfner, Fretting fatigue behavior in 7075-T6 aluminum alloy, Wear, 261 (2006) 426-434
- [9] D.W. Hoepfner, G.L. Goss, Metallographic analysis of fretting fatigue damage in Ti-6Al-4V MA and 7075-T6 aluminum, Wear, 27 (1974) 175-187

- Chemistry and Physics, 16(6) (2020) 27-30
- [19] P. Sahandi Zangabad, F. Khodabakhshi, A. Simchi, A.H. Kokabi, Fatigue fracture of friction-stir processed Al-Al₃Ti-MgO hybrid nanocomposites, *International Journal of Fatigue*, 87 (2016) 266-278
- [20] D. Yang, Y. Liu, S. Li, L. Ma, C. Liu, J. Yi, Effects of aging temperature on microstructure and high cycle fatigue performance of 7075 aluminum alloy, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 32(3) (2017) 677-684
- [21] M. Azadi, H. Bahmanabadi, F. Gruen, G. Winter. 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. *Materials Science and Engineering: A*, 788 (2020) 139497
- [22] M. Sharifi, M. Azadi, M. Azadi, Fabrication of heat-treated nano-clay-composite for improving high-cycle fatigue properties of AlSiCu aluminum alloy under stress-controlled fully-reversed bending loads, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(19) (2020) 4143-4160
- [23] ASM Metals Handbook, Volume 2: Properties and Selections - Nonferrous, ASM International, 1990
- [24] ASM Metals Handbook, Volume 2: Properties and Selections - Nonferrous, ASM International, 1990
- [25] American Society for Testing and Materials: ASTM D2789, Standard Test Method for Hydrocarbon Types in Low Olefinic Gasoline by Mass Spectrometry, ASTM International, (2016)
- [26] S. Kores, B. Tonn, H. Zak, Aluminum alloys for cylinder heads, *Materials and Geoenvironment*, 3(55) (2008) 307-317
- [27] Metallic materials-rotating bar bending fatigue testing, Standard No. ISO-1143, ISO International Standard, (2010)
- [28] S. Rezanejad, M. Azadi, M. Azadi, Influence of heat treatment on high cycle fatigue and fracture behaviors of piston aluminum alloy under fullyreversed cyclic
- [10] F. Kamali, M. Azadi, An evaluation of tribological and mechanical properties of Al-Si-Cu alloy with nano-clay particles reinforcement, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(19-20) (2019) 7062-7076
- [11] A.E. Nassar, E.E. Nassar, Properties of aluminum matrix Nano composites prepared by powder metallurgy processing, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29 (2017) 295-299
- [12] M. Azadi, M. Zolfaghari, S. Rezanezhad, M. Azadi, Effects of SiO₂ nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix composites by different dispersion methods, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 124 (5) (2018) 377
- [13] M. Sameezadeh, M. Emamy, H. Farhangi, Effects of particulate reinforcement and heat treatment on the hardness and wear properties of AA 2024-MoSi₂ nanocomposites, *Materials and Design*, 32 (2011) 2157-2164
- [14] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, Investigation of tribological and compressive behaviors of Al/SiO₂ nanocomposites after T6 heat treatment, *Sadhana*, 45(1) (2020) 45-28
- [15] M. Azadi, M. Zolfaghari, S. Rezanezhad, M. Azadi, Characterization of high-cycle bending fatigue behaviors for piston aluminum matrix SiO₂ nano-composites in comparison with aluminum-silicon alloys, *International Journal of Metalcasting*, 15(1) (2021) 152-168
- [16] P.R.M. Raju, S. Rajesh, K.S.R. Raju, V.R. Raju, Evaluation of fatigue life of Al2024/Al₂O₃ particulate nano composite fabricated using stir casting technique, *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A) (2017) 3188-3196
- [17] R. Senthilkumar, N. Arunkumar, M. Manzoor Hussian, A comparative study on low cycle fatigue behaviour of nano and micro Al₂O₃ reinforced AA2014 particulate hybrid composites, *Results in Physics*, 5 (2015) 273-280
- [18] K. Rashnoo, M.J. Sharifi, M. Azadi, M. Azadi, Influences of reinforcement and displacement rate on microstructure, mechanical properties and fracture behaviors of cylinder-head aluminum alloy, *Materials*

- Al-Si piston alloy during low-cycle fatigue loading, *Materials Science and Engineering: A*, 561 (2013) 26-33
- [31] Z. Li, N. Limodin, A. Tandjaoui, P. Quaegebeur, J.F. Witz, D. Balloy, Influence of control on the damage mechanism in A319 aluminum alloy: Tensile tests and digital image correlation, *Engineering Fracture Mechanics*, 183 (2017) 94-108
- bending, *Metals and Materials International*, 27 (2021) 860-870
- [29] F. Grosselle, Development of innovative applications in non-ferrous metals, PhD Thesis, University of Padua, Italy, 2010
- [30] Zhang G, Zhang J, Li B, Cai W, Double-stage hardening behavior and fracture characteristics of a heavily alloyed

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Ghanadi Azar, M. S. Aghareb Parast, M. Azadi, Study of Fretting Fatigue Behavior of Cylinder head Aluminum Alloy, with and without nano-Clay-Particles , *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(4) (2022) 885-904.

DOI: [10.22060/mej.2022.20588.7266](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20588.7266)



