ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):527-540

Investigation on Effects of Lubrication and Heat Treatment on Fretting Fatigue Behavior of Aluminum-Matrix Nano-Composite

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Agharebparast[1] M.S.
Aroo[1] H,
Azadi[1] M,
Azadi[2] M.

How to cite this article
Agharebparast M S, Aroo H, Azadi M, Azadi M. Investigation on Effects of Lubrication and Heat Treatment on Fretting Fatigue Behavior of Aluminum-Matrix Nano-Composite Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):527-540.

[1]Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
[2]Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Correspondence
Address: Central Administration of Semnan University, Campus 1, Semnan, Iran, Zip-Code: 35131-19111.
Phone: -
Fax: -
m_azadi@semnan.ac.ir

Article History
Received: March 04, 2021
Accepted: April 17, 2021
ePublished: July 07, 2021

ABSTRACT

In internal combustion engines, due to cyclic loading and wear between the upper surface of the piston ring and the upper groove of the piston, the fretting fatigue phenomenon could occur. In this research, the effect of lubrication and the heat treatment on the fretting fatigue behavior of aluminum-matrix nano-composite have been investigated. The fretting fatigue test was performed in fully-reversed loading condition and at room temperature. In addition, the S-N curve and fretting fatigue properties of piston alloys were obtained. The microstructure and the fracture surface were examined by optical and microscopy and the field emission scanning electron microscopy. The results showed that the failure behavior was brittle. In addition, the lubrication and the heat treatment improved the fretting fatigue lifetime of the piston alloy.

Keywords Fretting Fatigue, Heat Treatment, Oil lubrication, Aluminum-Matrix Nano-Composite

CITATION LINKS

[1] A fracture mechanics-based approach for the... [2] Fretting fatigue. Comprehensive Structural Integrity. [3] Pistons and engine testing. [4] Predicting fretting fatigue in engineering design. [5] Mechanics of fretting fatigue… [6] The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys. [7] Effect of contact pressure on torsional fretting… [8] Study on the damage evolution of torsional fretting… [9] Study on bending fretting fatigue damages of... [10] Friction and wear of 7075 aluminum alloy… [11] Effect of fretting on fatigue behavior of… [12] Modelling the fretting fatigue crack… [13] Fretting fatigue simulation for aluminum… [14] Fatigue life of 7075-T6 aluminum alloy under… [15] Prediction of the Fretting Fatigue crack nucleation endurance of… [16] The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of… [18] Fretting fatigue behaviors and surface integrity of… [19] Elevated temperature fretting fatigue of… [20] Effect of hole lubrication on the fretting fatigue life of… [21] Experimental study on fretting-fatigue of bridge cable wires. [22] Fretting-fatigue induced failure of a connecting rod. [23] Fretting fatigue failure… [24] Fatigue on engine pistons – A compendium of… [25] An evaluation of tribological and mechanical properties of… [26] Effects of SiO2 nano-particles on tribological and mechanical properties of… [27] Investigation of nano-clay addition effect on… [28] Numerical simulation and experimental study of wear depth and… [29] Characteristics of friction and lubrication of… [30] Technical report on… [31] Evaluation of tensile and low-cycle fatigue… [32] Quantitative comparison of three Ni-containing phases… [33] Investigation of effects of nano-particles, heat treatment process and acid… [34] Evaluation of high-cycle bending fatigue and… [35] Influence of heat treatment on the fatigue behavior of… [36] Rotating and bending fatigue behavior of… [37] The effect of heat-treatment on aluminum-based piston… [38] Investigation of tribological and compressive behaviors of… [39] Study on the influence of T4 and T6 heat treatment on… [40] Microstructure evolution of Al–12Si–CuNiMg alloy under high temperature… [41] Double-stage hardening behavior and fracture characteristics of a heavily alloyed Al–Si piston alloy during… [42] Characterization of high-cycle bending fatigue behaviors for… [43] Influence of heat treatment on high cycle fatigue and fracture behaviors of… [44] Characterization of tensile fracture in heavily alloyed… [45] Development of Innovative Applications in…

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه اثرات روانکاری و عملیات حرارتی بر رفتار خستگی فرتینگ در نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم

محمد صادق اقارب پرست
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
هانیه ارو
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
محمد آزادی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
محبوبه آزادی
دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده
در موتورهای احتراق داخلی، به دلیل وجود بارگذاری متناوب و وجود سایش بین سطح بالایی رینگ پیستون و اولین شیار پیستون امکان وقوع پدیده خستگی فرتینگ در این ناحیه وجود دارد. در این پژوهش، تاثیر روانکاری و اعمال عملیات حرارتی بر رفتار خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم، مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون خستگی فرتینگ در شرایط بارگذاری کاملا معکوس‌شونده و در دمای محیط صورت گرفته است. علاوه بر آن منحنی تنش- عمر و خواص خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم پیستون تقویت‌شده با نانوذرات بدست آمده است. بررسی ریزساختار و سطح شکست توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان انجام شده است. نتایج نشان داد که رفتار شکست غالبا ترد بوده است و همچنین اعمال روانکاری و عملیات حرارتی باعث بهبود عمر خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی شده است.

کلیدواژه‌ها: خستگی فرتینگ، عملیات حرارتی، روانکاری با روغن، نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸
*نویسنده مسئول: m_azadi@semnan.ac.ir

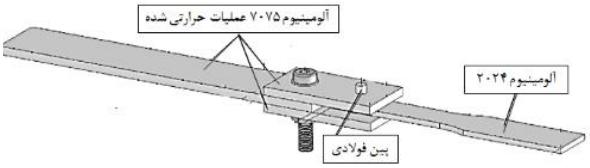
۱- مقدمه
عبارت "فرتینگ" به حرکت نسبی مماسی در مقیاس کوچک گفته می‌شود که بین دو جسم یا سطوح در حال تماس زمانی که تحت بارگذاری‌های ارتعاشی و یا نیروهای متغیر قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد[1,2]. در این شرایط، هنگامی که تنش‌های تماسی باعث شکل‌گیری و در ادامه رشد ترک شوند، پدیده خستگی فرتینگ و یا خستگی سایشی رخ می‌دهد[2]. با در نظر گرفتن سایش‌های اصطکاکی- ارتعاشی و بارگذاری‌های متناوب مکانیکی، امکان رخ دادن پدیده خستگی فرتینگ در قطعات موتور خودرو، به ویژه بین سطوح در تماس موجود در اولین رینگ پیستون و شیار رینگ بالایی پیستون خودرو، وجود دارد[3]. بر خلاف آن که مکانیزم آسیب فرتینگ، به عنوان یک آسیب جدی در قطعات برای حدود یک سده، مورد مطالعه قرار گرفته است، همچنان بررسی‌های بیشتری برای درک دقیق رفتار و شناخت اصول مکانیزم‌های فرتینگ لازم است[4,5]. با توجه به نیازهای صنعتی، لازم است که رفتار خستگی فرتینگ در قطعات توسط طراحان و پژوهشگران جهت دستیابی به قابلیت اطمینان بهتر در نظر گرفته شود[4].

امروزه در صنعت خودرو سازی خصوصا جهت تولید پیستون، آلیاژهای آلومینیوم- سیلیسیوم به جهت 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 فراوان قرار می‌گیرند[6]. با توجه به مطالب ذکر شده، به نظر لازم است که رفتار خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم پیستون خودرو، مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

در رابطه با پژوهش‌های پیشین، ابتدا بررسی‌های انجام شده بر رفتار خستگی فرتینگ آلومینیوم مطالعه شده است که در ادامه به آن اشاره می‌شود. پنگ و همکاران[7]، تاثیر فشار تماس بر آسیب خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را تحت بارگذاری پیچشی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که فشار تماسی یکی از موارد اصلی موثر بر عمر خستگی فرتینگ است. علاوه بر آن بررسی انجام شده نشان داد که افزایش فشار تماسی به دلیل ایجاد سطح بزرگتر اکسیداسیون باعث افزایش آسیب پیچشی فرتینگ می‌شود. در مطالعه دیگری، پنگ و همکاران[8]، منحنی تنش- عمر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را در شرایط بارگذاری پیچشی به‌دست آوردند. با افزایش تنش برشی پیچشی، مکانیزم‌های متفاوت فرتینگ پیچشی بررسی شد و نتایج آزمون نشان داد که مکانیزم‌های اصلی آسیب شامل سایش خراشان (Abrasive Wear)، سایش اکسایشی و لایه لایه شدگی می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که افزایش تنش پیچشی باعث رشد چشمگیر ضریب اصطکاک، سطح اکسیداسیون و عمق سایش در سطح تماس می‌شود. در مطالعه مشابه دیگری، پنگ و همکاران[9]، رفتار خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را تحت بارگذاری خمشی در برابر ساینده‌هایی از فولاد ۵۲۱۰۰ مطالعه کردند. علاوه بر مشاهده انواع آسیب مشابه با پژوهش‌های[8,10] نتایج نشان داد که عامل ایجاد ترک در ناحیه زیرین سطح، تمرکز تنش بوده است. سنگرال و همکاران[11]، آزمون خستگی فرتینگ را بر روی آلیاژ آلومینیوم ٦٠٦١ که تحت عملیات T4 قرار گرفته است، در دماهای مختلف و پدهای سایشی متفاوت انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که هر دو عامل هندسه و شکل پدهای سایشی و دما محیط می‌توانند از عوامل کلیدی موثر بر عمر خستگی فرتینگ باشند. علاوه بر این، مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی و پیش‌بینی عمر خستگی فرتینگ صورت گرفته است. در این بین، پانمایکر و همکارن[12]، مدلی برای شبیه‌سازی سرعت رشد ترک خستگی فرتینگ با در نظر گرفتن هر دو ناحیه رشد ترک‌های کوتاه و بلند برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰ ارائه کردند که نتایج آزمون خستگی فرتینگ نیز تطابق خوبی را نشان داده است. همچنین، کیم و یون[13]، مدلی بر اساس روش قانون ناحیه

چسبنده که شامل افت انرژی شکست و کاهش نرمی در طی افزایش دورها می‌شود را برای رفتار خستگی فرتینگ پرچرخه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰ ارائه دادند که نتایج حاصل توسط منحنی‌های تنش- عمر موجود مورد تایید قرار گرفته است. موتو[14]، مدلی برای تعیین عمر ایجاد و رشد ترک خستگی فرتینگ بر اساس تئوری چگالی انرژی کرنشی و ناحیه بحرانی تعریف نمودند. همچنین آزمون خستگی فرتینگ بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده در برابر پدهای سایشی از جنس فولاد EN24 انجام شد و نتایج حاصل محاسبات حاصل از مدل ارائه شده را تایید نمود. همچنین مطالعات محدودی بر روی آلیاژهای تقویت شده آلومینیومی صورت گرفته است. برای مثال، سرهان و همکاران[16]، اثر سختی سطح بر روی رفتار خستگی فرتینگ را با اعمال ضخامت‌های متفاوتی از پوشش آنودایزی روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش آنودایزی با سختی ۳۶۰ ویکرز باعث رشد عمر خستگی فرتینگ در ناحیه خستگی پرچرخه در تنش‌های کمتر می‌شود، در حالی که پوشش‌های آنودایزی با سختی بیشتر و در حدود ۳۹۰ ویکرز به دلیل شکنندگی پوشش و ایجاد میکرو ترک‌ها باعث کاهش عمر خستگی فرتینگ در سطح تنش‌های بالاتر می‌شوند. شینده و هوپنر[17]، رفتار خستگی فرتینگ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده را بررسی کردند. نتایج مشخص کرد که ریزساختارهای متفاوت می‌تواند بر روی شکل‌گیری و رشد ترک خستگی فرتینگ تاثیرگذار باشد. به طور کلی در رابطه با اثر روانکاری بر عمر خستگی فرتینگ مطالعات محدودی صورت گرفته است. از قبیل پژوهش‌هایی [18,19]که تاثیر روانکاری بر عمر خستگی فرتینگ آلیاژهای تیتانیومی را بررسی کردند. لذا با محدود کردن ماده مورد بررسی به آلیاژهای آلومینیومی، مطالعات بسیار اندکی برای بررسی باقی می‌ماند. در مطالعه‌ای، چاخرلو و همکاران[20]، تاثیر روانکاری در حفره متصل‌کننده پین موجود در اتصالات لبه‌ای برشی دوتایی (Double Shear Lap Joints) ساخته شده از جنس آلومینیوم ۲۰۲٤ را بررسی کردند. این پژوهش با تمرکز بر صفحه میانی اتصال که با کمک حفره مرکزی به دو صفحه خارجی متصل می‌شود، صورت گرفته است. نمایی از این اتصال و نمونه آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن بود که نمونه‌هایی که در محل حفره روغن‌کاری شده بودند، عمر خستگی فرتینگ بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون روغن‌کاری داشتند.

در حالی که اثر خستگی فرتینگ بر روی عمر برخی از کابردهای



شکل ۱) شماتیک پایه آزمون و نمونه استاندارد آزمون[20]

صنعتی مانند سیم‌های اتصال پل‌ها[21]، شاتون[22] و کمک فنر خودرو[23] مورد بررسی قرار گرفته است، اما مطالعه رفتار خستگی فرتینگ پیستون موتور به ندرت انجام شده است. این در حالی است که یکی از نواحی رایج شکست پیستون، در ناحیه شیار رینگ کمپرس است[24] در شکل‌های ۲ (الف) و ۲ (ب)، به‌ترتیب یک مطالعه موردی پیستون آسیب دیده در این ناحیه و جزئیات آسیب در شیار رینگ آورده شده است.

وجود خطوط ساحلی در ناحیه آسیب نشانگر رشد ترک و وجود مکانیزم خستگی در این قسمت می‌باشد[24]. همچنین توزیع تنش مشخص شده در شکل ۲ (ج) نشان می‌دهد که مقدار بیشینه تنش در انتها شیار رینگ وجود دارد که دلیل آن وجود تمرکز تنش در این ناحیه می‌باشد. به عبارت دیگر، حرکت رینگ بصورت عمودی، به دلیل بالا و پایین رفتن پیستون در سیلندر موتور، اتفاق می‌افتد که باعث ایجاد تنش خمشی بیشینه (همانند یک تیر یکسر گیردار)، در ریشه شیار رینگ روی پیستون می‌گردد. ضمنا حرکت دیگر رینگ در محل شیار رینگ، با یک دامنه بسیار کم، مباحث سایش را به پدیده خستگی، اضافه می‌کند. این حرکت رینگ، بصورت شعاعی بر روی محل شیار رینگ در پیستون، رخ می‌دهد. لذا در این مقاله، پدیده‌های توام خستگی و سایش، بصورت خستگی فرتینگ[3] برای مواد مورد استفاده در قطعه

(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۲) الف) پیستون شکسته شده، ب)خطوط ساحلی در ناحیه آسیب و ج) توزیع تنش در شیار رینگ[24]

پیستون موتور، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین علی‌رغم مطالعات محدودی که بر رفتار خستگی فرتینگ آلیاژهای آلومینیومی صورت گرفته است، هنوز نیاز به مطالعات بیشتری بر روی رفتار نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی وجود دارد و در ادامه نیز، همان‌طور که اشاره شد، بررسی اثر روانکاری بر عمر خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم به ندرت انجام شده است. در این پژوهش اثر افزودن روانکار روغن بر رفتار خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم پیستون تقویت شده با نانوذرات، برای دو نوع نمونه نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی و نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

ماده پایه بررسی شده در این مطالعه، آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم با نام تجاری AlSi12CuNiMg، مورد استفاده در پیستون موتور در خودروهای سواری می‌باشد. ترکیب شیمیایی حاصل از آزمون کوانتومتری نشان داد این آلیاژ شامل ۱۲/۷ درصد وزنی عنصر سیلیسیوم، ۱/۱۶ درصد وزنی عنصر مس، ۱/۰۰ درصد وزنی عنصر منیزیم، ۰/۸۰۱ درصد وزنی عنصر نیکل، ۰/۵۵۸ درصد وزنی عنصر آهن و عنصر آلومینیوم به عنوان ماده پایه بوده است. در این پژوهش، به منظور استحکام بخشی آلیاژ آلومینیومی، ذرات تقویت‌کننده نانورس هنگام ساخت به آلیاژ افزوده شده است. سپس جهت مقایسه تاثیر عملیات حرارتی بر رفتار ماده، دسته‌ای از نمونه‌های استاندارد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. جهت تولید نمونه‌های استاندارد خستگی، از روش ریخته‌گری ثقلی کمک گرفته‌شده است. در هنگام ریخته‌گری، پیش از افزوده شدن مذاب به قالب، با کمک روش پیش‌گرمایش، به میزان یک درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده نانورس به مذاب افزوده شده است که این مقدار از نانوذرات اضافه شده با توجه به نتایج موجود در مراجع[25,26]، درصد بهینه برای آلیاژ آلومینیومی پیستون بوده است. نانوذرات استفاده شده در این پژوهش، از جنس نانو رس از نوع مونتمریلونیت (Clay Montmorillonite K(10)) بوده است و از شرکت نانو ثانی تهیه گردیده است. ترکیب شیمیایی ذرات تقویت‌کننده نانورس استفاده شده در این پژوهش، در جدول ۱ آمده است. همچنین خواص نانو رس مونتمریلونیت در جدول ۲ آورده شده است. علاوه بر آن، شکل ۳ (الف) اندازه ذرات نانو رس خریداری شده را نشان می‌دهد. ذرات نانورس مورد استفاده نیز، در شکل ۳ (ب) آورده شده است. تصاویر مربوط به اثبات نانوذرات در زمینه آلومینیومی در شکل ۴ آورده شده است. تصاویر مربوط به عنصر سیلیسیوم و اکسیژن، به خوبی وجود ذرات نانو را نشان می‌دهد.

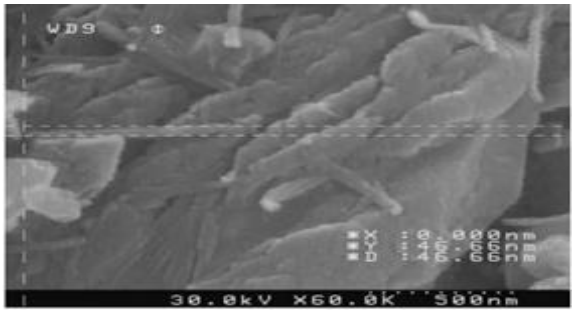
ذرات نانورس تا دمای ۱۰±۴۱۰ درجه سانتی‌گراد در کوره تحت فرآیند پیش‌گرمایش قرار گرفته‌اند و پس از آن به مذاب افزوده شده‌اند. پس از مذاب ریزی در قالب چدنی، نمونه‌های استوانه‌ای اولیه

جدول ۱) درصد عناصر تشکیل‌دهنده ذرات تقویت کننده نانورس[27]

عنصر	درصد	عنصر	درصد	عنصر	درصد
Na_2O	۰/۹۸	MgO	۳/۲۹	SiO_2	۵۰/۹۵
TiO_2	۰/۶۲	CaO	۱/۹۷	Al_2O_3	۱۹/۶۰
LOI	۱۵/۴۵	K_2O	۰/۸۶	Fe_2O_3	۵/۶۲

جدول ۲) خواص ذرات تقویت کننده نانو رس مونتمریلونیت بر اساس کاتالوگ شرکت نانو ثانی

نوع کانی	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	اندازه ذرات (نانو متر)	مساحت سطح ویژه (گرم بر سانتی متر مربع)	مقدار هدایت الکتریکی (میلی‌ولت)	ضریب تبادل یونی meg/) (100gr	فاصله خالی بین ذرات (انگستروم)	رطوبت (درصد)
مونتمریلونیت	۰/۷	۱ تا ۲	۲۲۰ تا ۲۷۰	۲۵	۴۸	۶۰	۱ تا ۲

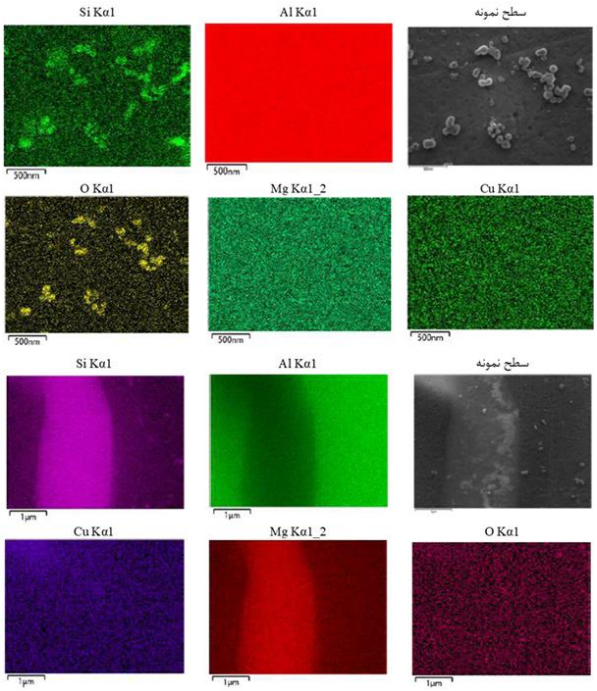


(الف)

(ب)

شکل ۳) الف) اندازه ارائه شده توسط شرکت نانوثانی برای نانوذرات تقویت‌کننده استفاده شده و ب) نانوذرات تهیه شده

ساخته شده در مجاورت با هوای آزاد سرد شده‌اند و در ادامه، با انجام فرآیند ماشین‌کاری نمونه‌های استاندارد آزمون خستگی حاصل شده است. برای اجرای عملیات حرارتی، نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد همگن‌سازی شدند و بعد از خنک‌کاری در آب و به مدت ۵ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت پیرسازی قرار گرفتند. لازم به ذکر است در ادامه مطلب و برای اختصار، آلیاژ آلومینیومی شامل ذرات تقویت‌کننده نانورس به عنوان نانوکامپوزیت بدون عملیات و آلیاژ آلومینیومی شامل ذرات تقویت‌کننده نانورس بهمراه عملیات حرارتی به عنوان نانوکامپوزیت با عملیات، نام برده می‌شود.

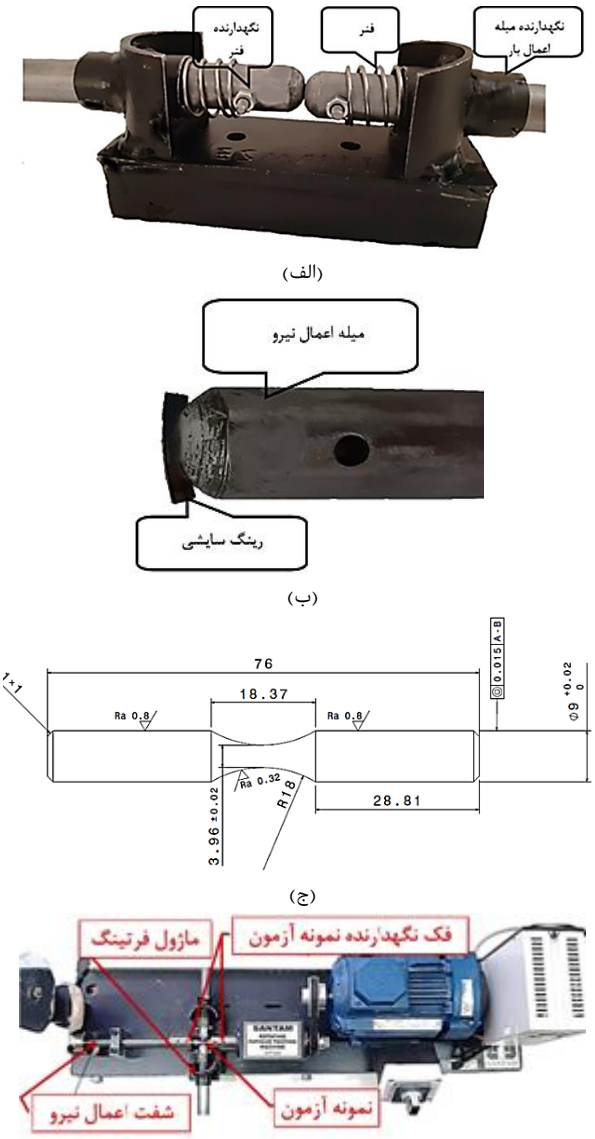


شکل ۴) اثبات وجود نانوذرات تقویت‌کننده در سطح نمونه در مقیاس ۵۰۰ میکرومتر

در این پژوهش، آزمون خستگی فرتینگ بدون روغن‌کاری برای هر ماده در ۴ سطح تنش متفاوت ۲۱۰، ۱۸۰، ۱۵۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال و با حداقل ۳ تکرار انجام گرفته است تا رفتار خستگی فرتینگ هر آلیاژ حاصل شود. سپس، برای مقایسه رفتار و مشخص شدن تاثیر روانکاری بر عمر خستگی فرتینگ، آزمون خستگی فرتینگ با اعمال روانکار بر روی هر کدام از مواد در ۳ سطح تنش ۱۸۰، ۱۵۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال و رعایت ۲ بار تکرار صورت پذیرفته است. تعداد سطوح کمتر در این بخش، به دلیل محدوده پراکندگی کوچکتر برای داده‌های آزمون بوده است. برای بررسی اثر روانکاری بر رفتار خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، در هنگام اجرای آزمون خستگی فرتینگ، مجموعا ۳ قطره روغن در هر ۱۵ ثانیه روی نمونه استاندارد و پدهای سایشی افزوده شده است. نام تجاری روغن ADDINOL ECONOMIC 020 و نوع SAE-0W20 و ساخت آلمان می‌باشد.

در این مقاله، از دستگاه آزمون خستگی خمشی- دورانی SFT-600 شرکت سنتام، از نوع دو نقطه با بارگذاری کاملا معکوس‌شونده استفاده گردیده است. به منظور ایجاد شرایط آزمون خستگی فرتینگ، ماژولی طراحی و ساخته شده است که توسط آن امکان اعمال نیروی سایشی به نمونه را محقق می‌کند. همانطور که در شکل ۵ (الف) قابل مشاهده است، در این ماژول پدهای سایشی موجود روی میله اعمال بار، به کمک فنرهای موجود نیرو تماسی ثابتی را روی سطح نمونه ایجاد می‌کنند.

در شکل ۵ (ب) نحوه قرارگیری پدهای سایشی روی میله اعمال نیرو و همچنین در شکل ۵ (ج) نقشه نمونه استاندارد استفاده شده در این پژوهش، آورده شده است. همچنین دستگاه آزمون و



شکل ۵) مشخصات دستگاه آزمون: (الف) نحوه اعمال نیرو سایشی، (ب) نحوه قرارگیری پد سایشی، (ج) نقشه نمونه استاندارد و (د) نمای دستگاه آزمون

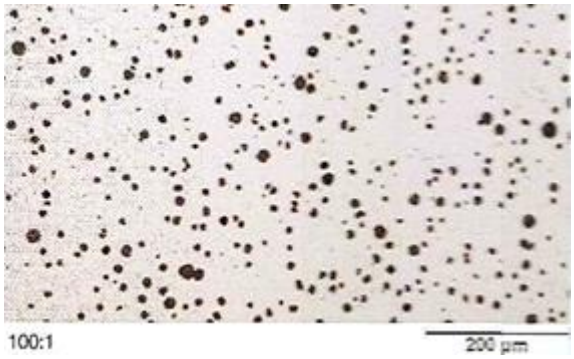
نحوه قرارگیری ماژول فرتینگ در شکل ۵ (د) نمایش داده شده است.

برای مطالعه اثر خستگی فرتینگ بر نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، پدهای سایشی مورد استفاده در این پژوهش از رینگ‌های پیستون مورد استفاده در صنعت با جنس چدن خاکستری جدا شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی رینگ پیستون استفاده شده (چدنی MF-116)، در جدول ۳ آورده شده است.

همچنین ریزساختار رینگ پیستون چدنی استفاده شده در این پژوهش، در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین مقدار نیروی تماسی بین پد سایشی و نمونه آزمون بر اساس آزمون‌های سایشی و نیروی موجود در رینگ پیستون، برابر با ۱۰ نیوتن در نظر گرفته شده است[28,29].

جدول ۳) مشخصات رینگ پیستون مورد استفاده در آزمون خستگی فرتینگ [30]

جنس رینگ پیستون	چدن کروی مارتنزیتی
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 ۰/۳۰ درصد مولیبدن حداکثر ۰/۷۰ درصد نیکل
سختی	۳۵ تا ۴۵ راکول
مدول الاستیسیته	۱۴۵۰۰۰ تا ۱۸۵۰۰۰ مگاپاسکال
استحکام خمشی	۱۳۰۰ مگاپاسکال



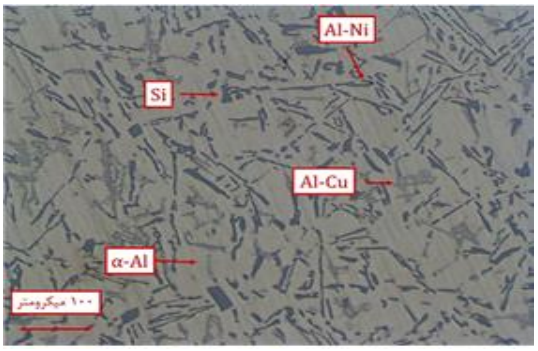
شکل ۶) ریز ساختار رینگ پیستون چدنی[30] (Cast Iron MF116)

سطح سایش نیز شامل همان هندسه رینگ پیستون موتور است که قطاعی 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 (FESEM) با دستگاه MIRA3-TESCAN انجام گرفت. به منظور بررسی ریزساختار، پس از سنباده زنی تا شماره ۵۰۰۰ سطح نمونه‌ها با پودر آلومینا تحت پولیش‌کاری قرار گرفته است. 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.

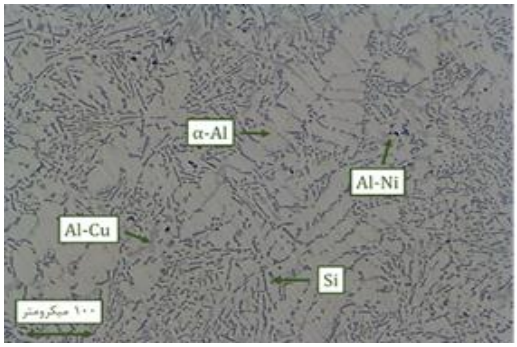
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار ماده

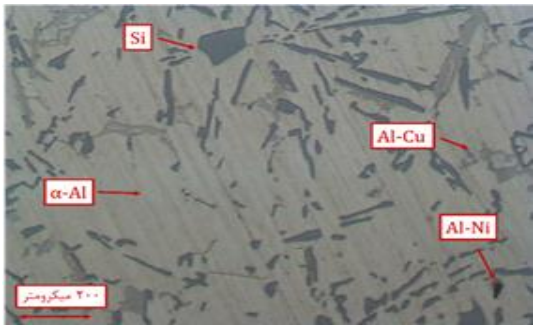
در رابطه با بحث ریزساختار، شکل ۷ نشان دهنده تصاویر مربوط به ریزساختارهای نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی استفاده شده در این پژوهش، می‌باشد. به طور کلی این نانوکامپوزیت‌ها، دارای زمینه آلومینیومی است که عمده رسوبات پراکنده شده در آن فاز سیلیسیوم است. این فاز سیلیسیومی، به دو شکل متفاوت شاخه‌ای و بلوکی در زمینه آلومینیومی شکل گرفته‌اند. با توجه به شکل ۷، فازهای گوناگونی همچون فاز سیلیسیوم (Si) و فاز α-Al در ریزساختارهای نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی مورد استفاده، وجود دارد. همچنین در رابطه فازهای بین فلزی موجود از ترکیبات نیکل و مس با آلومینیوم نیز در ریزساختار، همانطور که در مطالعات[31,32] آورده شده است، می‌توان اشاره کرد که با بزرگنمایی‌های کوچک در میکروسکوپ نوری، تقریبا این فازهای بین فلزی، مشابه به نظر می‌آیند و تشخیص آن‌ها مشکل می‌باشد.



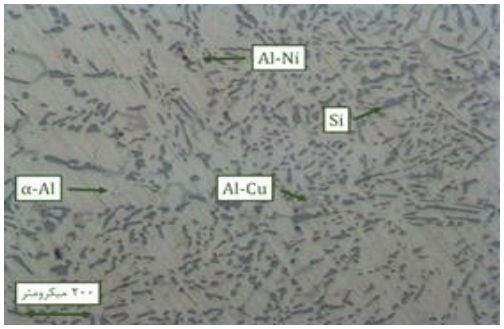
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷) ریزساختارهای نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم پیستون: (الف) بدون عملیات حرارتی با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، (ب) با عملیات حرارتی با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، (ج) بدون عملیات حرارتی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر و (د) با عملیات حرارتی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر

در شکل ۷ (الف) و (ب) به ترتیب تصاویر ریزساختار نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی، برای دو حالت با و بدون عملیات حرارتی، با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر آورده شده است. همچنین شکل ۷ (ج) و (د) به ترتیب پیشین، نمایشگر بزرگنمایی ۲۰۰ برابری هستند. بررسی ریزساختارها نشان می‌دهد که مشابه با مطالعات[31,33]، 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 ریزساختارهای نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی در نواحی کاملا اتفاقی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر به کمک نرم‌افزار ImageJ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و نتایج حاصل در جدول ٤ نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ٤ آمده است، عملیات حرارتی باعث ۵۷/۸٤ درصد کاهش در میانگین اندازه فاز سیلیسیوم شده است، در حالی که مقدار سیلیسیوم موجود ۳/۰٦۲ درصد افزایش داشته است. به عبارت دیگر، سیلیسیوم در اثر عملیات حرارتی ۱۲/۸۰ درصد سطح بیشتری را نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده، پوشش داده است. در مطالعه[31] نیز، افزایش سطح و درصد فاز سیلیسیوم بعد از اجرای عملیات حرارتی، مورد تایید قرار گرفته است.

۳-۲- عمر خستگی فرتینگ

در رابطه با بررسی عمر خستگی فرتینگ، در شکل ۸، منحنی تنش- عمر لگاریتمی (شامل لگاریتم تنش دامنه بر حسب عمر خستگی فرتینگ) برای نانوکامپوزیت‌های پیستون، برای شرایط با و بدون روغن‌کاری آورده شده است.

شکل ۸ (الف)، نشان‌دهنده نتایج تمامی آزمون‌های تجربی انجام شده است. همچنین میانگین نتایج حاصل شده از آزمون تجربی در شکل ۸ (ب) آمده است. علاوه بر آن مقادیر حاصل از این آزمون‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

به منظور محاسبه خواص مواد، با لگاریتم گرفتن از رابطه مانسون می‌توان نوشت[34]:

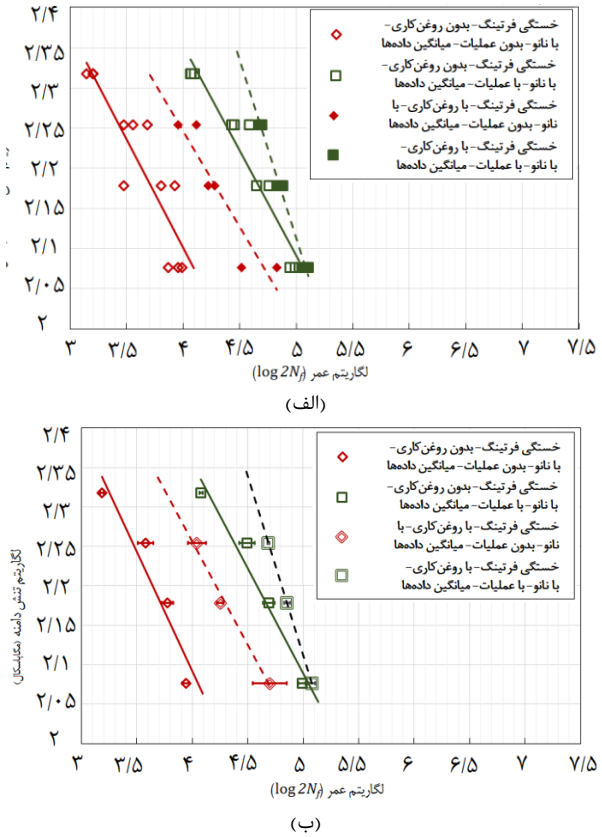
$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

$$Log(\sigma_a) = Log(\sigma'_f) + bLog(2N_f) \quad (2)$$

که در این روابط σ_a معادل تنش دامنه و N_f برابر عمر خستگی می‌باشد. همچنین σ'_f و b به ترتیب برابر ضریب استحکام

جدول ۴) مقدار مساحت، درصد و میانگین اندازه فاز سیلیسیوم در ریزساختار نانوکامپوزیت-بدون عملیات حرارتی و نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی

فاز	نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی			نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی		
	سطح (میکرومتر مربع)	درصد (%)	میانگین اندازه (میکرومتر مربع)	سطح (میکرومتر مربع)	درصد (%)	میانگین اندازه (میکرومتر مربع)
سیلیسیوم	۳۴۴۳۰۵/۶۳۱	۱۹/۴۱۵	۱۲۹۹/۲۶۷	۳۹۴۸۸۹/۹۱۴	۲۲/۴۷۷	۵۴۷/۶۹۸



شکل ۸) منحنی تنش- عمر لگاریتمی نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی: (الف) بدون عملیات حرارتی و (ب) با عملیات حرارتی

جدول ۵) نتایج حاصل از آزمون خستگی فرتینگ

نوع داده‌ها	شرایط روغن‌کاری	شرایط عملیات حرارتی	معادله خط	دقت مدل
تمام داده‌ها	بدون روغن‌کاری	بدون عملیات	$y = -0.2711x + 3.1833$	$R^2 = 0.7986$
تمام داده‌ها	بدون روغن‌کاری	با عملیات	$y = -0.2619x + 3.4007$	$R^2 = 0.9383$
تمام داده‌ها	با روغن‌کاری	بدون عملیات	$y = -0.2383x + 3.1991$	$R^2 = 0.8635$
تمام داده‌ها	با روغن‌کاری	با عملیات	$y = -0.4438x + 4.3317$	$R^2 = 0.9803$
میانگین داده‌ها	بدون روغن‌کاری	بدون عملیات	$y = -0.3041x + 3.3074$	$R^2 = 0.9049$
میانگین داده‌ها	بدون روغن‌کاری	با عملیات	$y = -0.2666x + 3.4227$	$R^2 = 0.9547$
میانگین داده‌ها	با روغن‌کاری	بدون عملیات	$y = -0.2635x + 3.3106$	$R^2 = 0.9852$
میانگین داده‌ها	با روغن‌کاری	با عملیات	$y = -0.4518x + 4.3711$	$R^2 = 0.9999$

خستگی و توان استحکام خستگی هستند. با توجه به معادله (۲) و رفتار خطی حاصل از آزمون‌های خستگی، خواص خستگی مواد استخراج می‌شود که این موارد در جدول ٦ نشان داده شده است.برای مقایسه تاثیر عملیات حرارتی، با توجه به نتایج حاصل از آزمون خستگی فرتینگ در جدول ٦ قابل مشاهده است که ضریب استحکام خستگی برای آزمون در شرایط بدون

جدول ۶) خواص خستگی فرتینگ استخراج شده از آزمون خستگی فرتینگ

نوع داده‌ها	شرایط روغن‌کاری	شرایط عملیات حرارتی	σ'_f (مگاپاسکال)	b
تمام داده‌ها	بدون روغن‌کاری	بدون عملیات	۱۵۲۵/۱۰۵۸	-۰.۲۷۱۱
تمام داده‌ها	بدون روغن‌کاری	با عملیات	۲۵۱۵/۹۳۸۳	-۰.۲۶۱۹
تمام داده‌ها	با روغن‌کاری	بدون عملیات	۱۵۸۱/۶۱۲۱	-۰.۲۳۸۳
تمام داده‌ها	با روغن‌کاری	با عملیات	۲۱۴۶۳/۴۷۳۱	-۰.۴۴۳۸
میانگین داده‌ها	بدون روغن‌کاری	بدون عملیات	۲۰۲۹/۵۵۱۱	-۰.۳۰۴۱
میانگین داده‌ها	بدون روغن‌کاری	با عملیات	۲۶۴۶/۶۷۱۲	-۰.۲۶۶۶
میانگین داده‌ها	با روغن‌کاری	بدون عملیات	۲۰۴۴/۵۶۰۶	-۰.۲۶۳۵
میانگین داده‌ها	با روغن‌کاری	با عملیات	۲۳۵۰۱/۷۳۹۰	-۰.۴۵۱۸

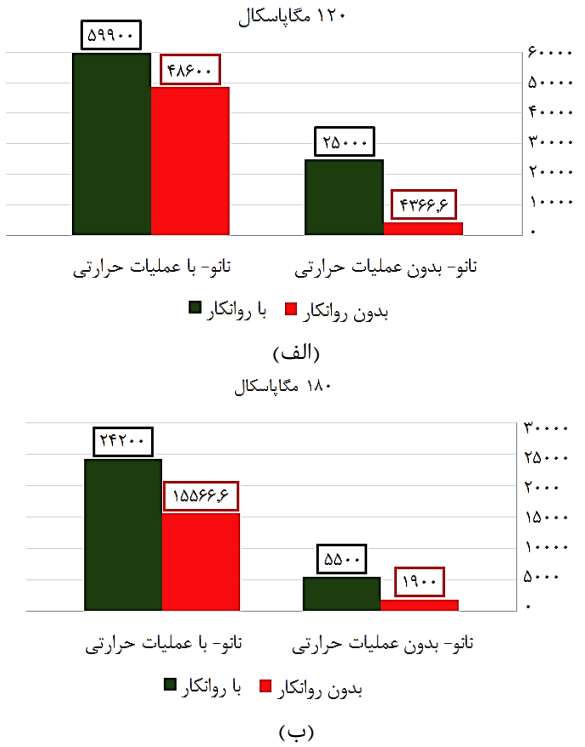
روغن‌کاری،برای مقادیر تمام داده‌ها و میانگین داده‌ها، به ترتیب ٦٤/٩٦ درصد و ۳۰/٤۰ درصد افزایش یافته است. همچنین با مقایسه مقادیر ضریب استحکام خستگی حاصل شده برای نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، با و بدون عملیات حرارتی، در آزمون خستگی فرتینگ، به‌همراه روانکار مشخص می‌شود برای مقادیر تمام داده‌ها و میانگین داده‌ها به ترتیب ۱۲۵۷/۰۹ درصد و ۱۰٤۹/٤۷ درصد، عملیات حرارتی باعث افزایش ضریب استحکام خستگی شده است. علی‌رغم آن که تاثیر عملیات حرارتی روی رفتار خستگی فرتینگ مستقیما به‌ندرت انجام شده است، اما مطالعات بسیاری مانند[31,35,36] تأثیر مثبت عملیات حرارتی بر عمر خستگی خمشی آلیاژهای آلومینیومی را نشان دادند. علاوه بر آن، در پژوهش[37]، با بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم پیستون، نتایج علاوه بر تایید افزایش مقدار سیلیسیوم، به دنبال انجام عملیات حرارتی، نشان داد که عملیات حرارتی باعث بهبود و رشد استحکام کششی و سختی نیز، می‌شود. به همین جهت، انتظار می‌رود با بهبود خواص مکانیکی و خواص خستگی آلیاژ آلومینیوم، خواص خستگی فرتینگ آن نیز، بهبود یابد.

در رابطه با اثر روانکاری بر عمر خستگی فرتینگ، همانطور که در جدول ٦ نشان داده شده است، مقدار ضریب استحکام خستگی بعد از اعمال روغن روی نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی برای مقادیر تمام داده‌ها و میانگین داده‌ها، به ترتیب ۳/۷۰ درصد و ۰/۷۳ درصد افزایش داشته است. همچنین این مقادیر برای نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی برابر ۷۵۳/۱۱ درصد و ۷۸۷/۹ درصد رشد بوده است. درشکل ۹، تاثیر روانکار بر عمر خستگی فرتینگ، در دو سطح تنش، نشان داده شده است. در شکل ۹ (الف) عمر خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، در کمترین سطح تنش (۱۲۰ مگاپاسکال) در شرایط روغن‌کاری شده و بدون روغن‌کاری مقایسه شده است. در ادامه در شکل ۹ (ب) نیز، موارد پیشین برای بیشترین سطح تنش مشترک (۱۸۰ مگاپاسکال) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در کمترین سطح تنش، برای نانوکامپوزیت‌های عملیات حرارتی نشده عمر خستگی فرتینگ، ٤۷۲/۵۱ درصد در اثر روانکاری بهبود یافته است.

این مقدار برای بیشترین سطح تنش مشترک برابر با ۱۸۹/٤۷ درصد بوده است. علاوه بر آن، مقادیر فوق برای نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی در سطوح تنش ۱۲۰ و ۱۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۲۳/۲۵ درصد و ۵۵/٤٦ درصد رشد را نشان می‌دهد. پژوهش[20]، افزایش عمر خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم را بر اثر اعمال روانکاری به علت کاهش ضریب اصطکاک تایید می‌کند.

در مورد توان استحکام خستگی که به نوعی نشان دهنده شیب منحنی تنش- عمر نیز می‌باشد، با توجه به داده‌های حاصل تمام آزمون‌ها موجود در جدول ٦ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار توان استحکام خستگی (b) تقریبا برای تمامی حالات آزمون یکسان است اما در نمونه‌های عملیات حرارتی شده، با توجه به رشد نسبتا اندک عمر خستگی فرتینگ در کمترین سطح تنش پس از روغن‌کاری، اندازه شیب نمودار بزرگتر شده است و باعث افزایش اندازه توان استحکام خستگی در این نوع آزمون شده است. علاوه بر آن، این امر دلیل رشد چشمگیر مقدار ضریب استحکام خستگی (عرض از مبدا منحنی تنش- عمر) در آزمون خستگی فرتینگ نمونه‌های عملیات حرارتی شده، به‌همراه روغن‌کاری نیز می‌توان دانست.

رفتار سایشی نانوکامپوزیت‌ها و اثر عملیات حرارتی بر رفتار سایشی مواد توسط محققین، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این رابطه آزادی و همکاران[38]، نشان دادند در حالی که در نمونه‌های حاوی نانوذرات، ضریب اصطکاک به دلیل افزوده شدن ذرات سخت به

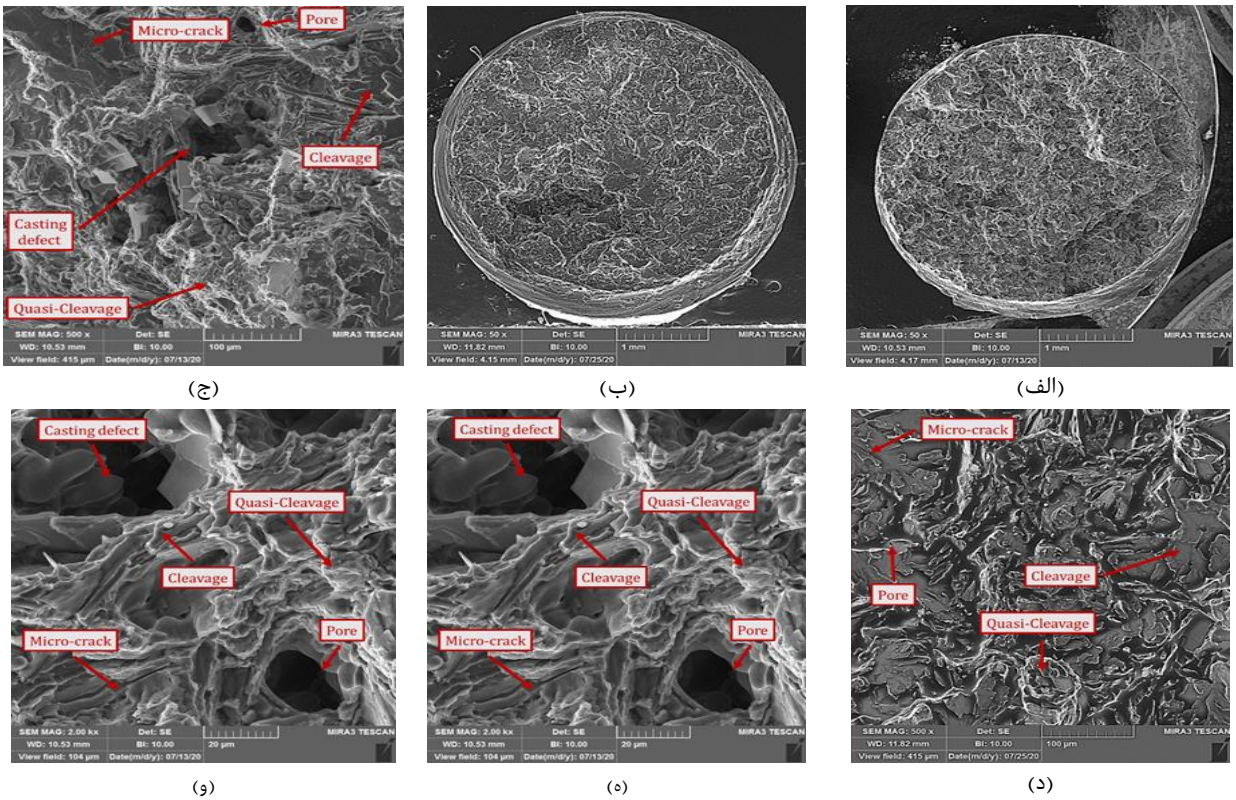


شکل ۹) تاثیر افزودن روانکار بر عمر خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های تقویت شده پیستون در سطح تنش: (الف) ۱۲۰ مگاپاسکال و (ب) ۱۸۰ مگاپاسکال

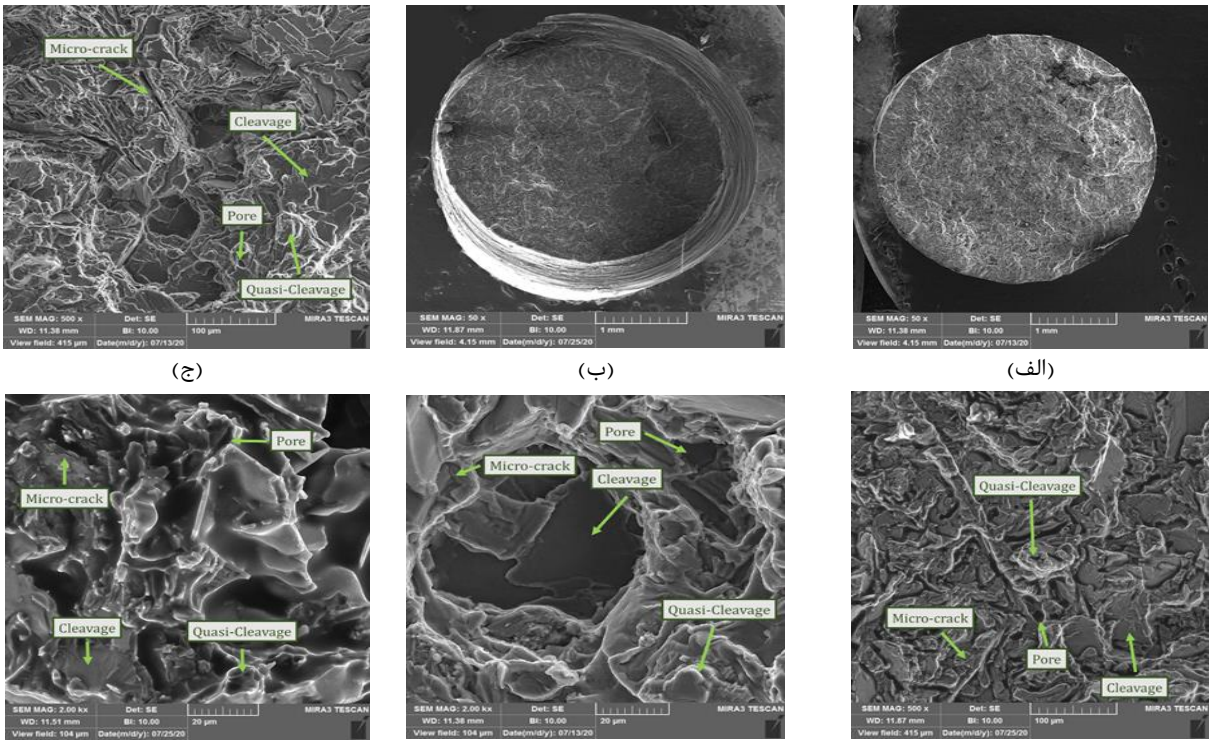
ماده بیشتر است اما مقاومت به سایش نانوکامپوزیت‌ها به دلیل سختی بیشتر نمونه‌ها بهبود یافته است و نرخ سایش کمتری در نمونه‌ها مشاهده شده است. علاوه بر این نشان دادند که انجام عملیات حرارتی به دلیل تغییر مورفولوژی سیلیسیوم باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. کاهش ضریب اصطکاک با کاهش دما، باعث بهبود رفتار سایشی می‌شود. همچنین سینگ و شارما[39] رفتار سایشی نانوکامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های عملیات حرارتی‌شده را مقایسه کردند و نشان دادند که نمونه‌های عملیات حرارتی شده به دلیل سختی بیشتر و ریزساختار مناسب، مقاومت بیشتری نسبت جدایش ماده نشان می‌هند و در نتیجه مقاومت به سایشی بیشتری را نسبت به نانوذرات دارا هستند. موارد بیان شده نشان می‌دهد، اجرای عملیات حرارتی می‌تواند خواص سایشی نانوکامپوزیت‌ها را بهبود ببخشد.

۳-۳- تحلیل سطح شکست

در رابطه با آنالیز شکست، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان، مربوط به سطح شکست حاصل از آزمون خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، برای دو حالت روغن‌کاری شده و بدون روغن‌کاری، به ترتیب برای نانوکامپوزیت- بدون عملیات و نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی در شکل ۱۰ و ۱۱ مقایسه شده است. لازم به ذکر است، تمامی تصاویر برای آزمون خستگی فرتینگ در سطح تنش یکسان و معادل ۱۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۱۰ (الف) و شکل ۱۰ (ب)، به ترتیب، نمایی کامل از سطح شکست نمونه بدون روغن‌کاری و روغن‌کاری شده، نشان داده شده است. با رعایت همین ترتیب، سطح شکست نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی در شکل ۱۰ (ج) و شکل ۱۰ (د) برای بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و همچنین در شکل ۱۰ (ه) و شکل ۱۰ (و) با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر نشان داده شده است. علاوه بر آن، با رعایت ترتیب فوق، شکل ۱۱ نشان دهنده سطح شکست نمونه‌های نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ و ۱۱ مشخص شده است، رفتار شکست نانوکامپوزیت‌های پیستون به دلیل وجود نواحی کلیویج (Cleavage) و شبه-کلیویج (Quasi-cleavage) در سطح شکست، رفتار شکست غالبا ترد (Brittle) بوده است. در مطالعات[31,40,43]، به رفتار شکست مشابهی برای آلیاژ آلومینیوم پیستون اشاره شده است. آثار کلیویج اکثرا در امتداد صفحات کریستالوگرافی، با شکل ورقه‌های تخت ایجاد می‌شود. این ورقه‌ها گاهی می‌توانند شامل خطوط رودخانه‌ای (River Pattern) هم جهت با مسیر رشد ترک باشند. وجود آثار شبه‌کلیویج، به دلیل رفتار شکست ترکیبی میان شکست ترد و شکست نرم است. همچنین وجود آثار دیمپل (Dimple) در سطح شکست که به نسبت شرایط تنشی می‌توانند حفره‌های بیضی یا سهمی شکل باشند، تایید کننده وجود رفتار شکست ترکیبی در بعضی نواحی می‌باشد[41,42]. با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱، مشخص می‌شود برای هر دو نانوکامپوزیت بررسی شده، با افزوده

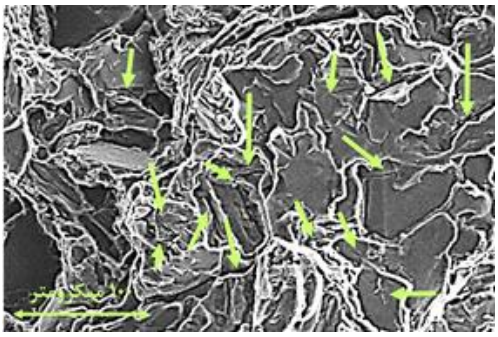


شکل ۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از سطح شکست نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر و آزمون بدون روانکاری، (ب) بزرگنمایی ۵۰ برابر و آزمون روانکاری شده، (ج) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و آزمون بدون روانکاری، (د) بزرگنمایی ۵۰ برابر و آزمون روانکاری شده، (ه) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و آزمون بدون روانکاری، و (و) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و آزمون روانکاری شده



شکل ۱۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از سطح شکست نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر و آزمون بدون روانکاری، (ب) بزرگنمایی ۵۰ برابر و آزمون روانکاری شده، (ج) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و آزمون بدون روانکاری، (د) بزرگنمایی ۵۰ برابر و آزمون روانکاری شده، (ه) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و آزمون بدون روانکاری، و (و) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و آزمون روانکاری شده

شدن روغن به آزمون خستگی فرتینگ و افزایش عمر خستگی، اندازه صفحات کلیویج بیشتر شده است. علاوه بر آن میزان نواحی شبه- کلیویج کاهش یافته است. همچنین تعداد و اندازه‌های میکروترک‌ها 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[42,43]. برای بررسی تاثیر عملیات حرارتی، مقایسه شکل ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که پس از اعمال عملیات حرارتی نیز تاثیری مشابه حالت قبل نشان داده است و رفتار شکست، بیشتر به شکست ترد نزدیک شده است.در مطالعات[42,44] نیز، سطح شکست آلیاژ آلومینیوم پیستون بررسی شده است که نتایج وجود صفحات کلیویج، نواحی شبه- کلیویج و همچنین در برخی از نقاط سطح شکست، نواحی دیمپل را تایید کرده است و این امر نشان می‌دهد که رفتار شکست کاملا ترد نبوده و در برخی نواحی شکست به شکست نرم متمایل شده است. غالبا برای آلیاژهای آلومینیوم- سیلیسیوم در نمونه‌های بدون عیب، شکست از صفحات کلیویج با فاز سیلیسیوم و یا فازهای بین فلزی آغاز می‌شود[45]. لذا با بهینه‌سازی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم پیستون و کاهش اندازه فاز سیلیسیوم و فازهای بین فلزی، باعث بهبود عمر خستگی می‌شود[42]. علاوه بر این، فازهای سیلیسیوم مانند حفاظی در برابر رشد ترک نیز عمل می‌کنند[41,43]. در شکل ۱۲، بخشی از میکروترک‌های ایجاد شده در بخش کلیویجی قسمتی



شکل ۱۲) میکروترک‌های ایجاد شده در صفحات کلیویج

از سطح شکست نمونه نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی نشان داده شده است.

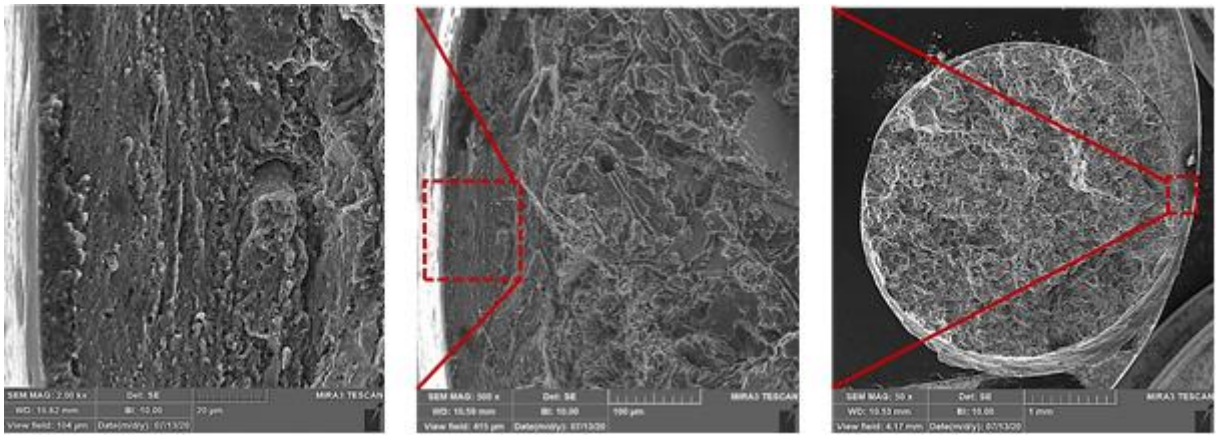
از آن‌جایی که در این مطالعه شرایط بارگذاری از نوع خمش بوده است، بیشترین مقدار تنش در سطح نمونه ایجاد می‌شود. بنابراین عمده ترک‌های خستگی خمشی از نزدیک سطح آغاز می‌شوند[42]. علاوه بر این، از آن‌جا که تنش‌های تماسی به علت تمرکز تنش، بیشترین مقدار محلی را در سطح تماس دارند، ترک‌های خستگی فرتینگ نیز، در این ناحیه ایجاد می‌شوند. لذا کاهش عمر خستگی فرتینگ به نظر می‌رسد، به دلیل کمتر شدن عمر ایجاد ترک و افزایش سرعت رشد ترک به دنبال وجود تمرکز تنش، در شرایط بارگذاری فرتینگ باشد. یکی از مکانیزم‌های اصلی رشد سرعت ترک

در فرتینگ، اثر گوه‌ای است. این امر زمانی رخ می‌دهد که براده‌های حاصل از سایش وارد ترک‌های کوچک خستگی فرتینگ ایجاد شده می‌شود و باعث افزایش سرعت رشد ترک می‌شود[16] در شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان، از لبه نمونه‌های تقویت‌شده با نانو و بدون عملیات حرارتی تحت آزمون خستگی فرتینگ بدون روغن‌کاری، با بزرگنمایی‌های متفاوت، نشان داده شده است. همین مورد در شکل ۱۴ برای نانوکامپوزیت‌های عملیات حرارتی نشده و آزمون خستگی فرتینگ همراه با روغن‌کاری آورده شده است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نیز، با همین ترتیب، شامل تصاویر لبه سطح شکست نمونه‌های تقویت‌شده با نانو و عملیات حرارتی‌شده می‌باشند. همانطور که از شکل‌های مربوط به لبه سطح شکست فرتینگ مشخص است، ناحیه‌ای از لبه نمونه‌ها، به دلیل آسیب شدید فرتینگ، دچار تغییر شکل شده است. با کمک نرم‌افزار ImageJ، بیشترین ضخامت ناحیه آسیب فرتینگ و مساحت این ناحیه، اندازه‌گیری شده است که نتایج حاصل از اندازه‌گیری، در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷) مشخصات ناحیه آسیب فرتینگ در آزمون‌های مختلف

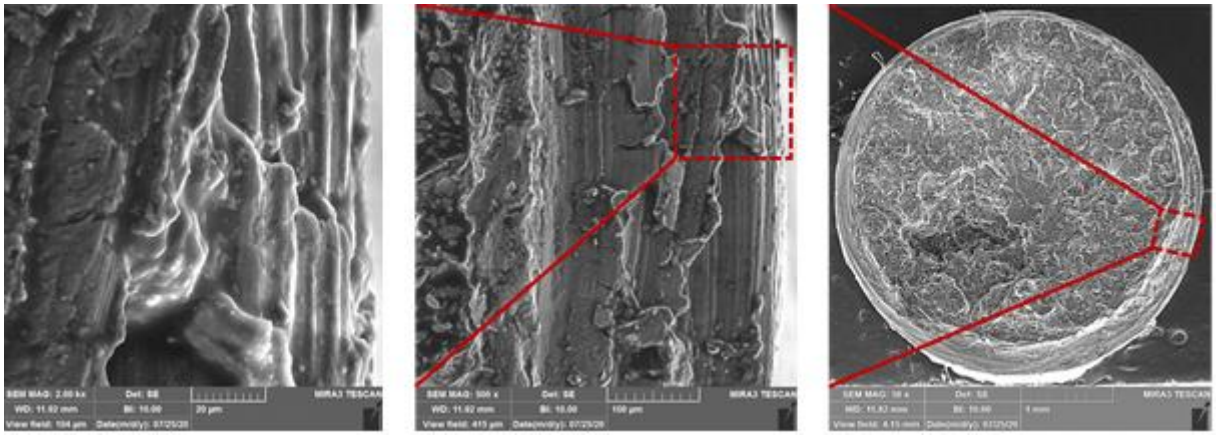
شرایط روغن‌کاری	شرایط عملیات حرارتی	بیشترین ضخامت ناحیه آسیب (میلی متر)	درصد مساحت ناحیه آسیب نسبت به کل مساحت سطح شکست (%)
بدون روغن‌کاری	بدون عملیات	۰/۲۵	۷/۳۴
با روغن‌کاری	بدون عملیات	۰/۳۷	۱۷/۴۴
بدون روغن‌کاری	با عملیات	۰/۰۸	۰/۸۹
با روغن‌کاری	با عملیات	۰/۴۲	۲۹/۹۶

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که افزودن روانکار در حین اجرای آزمون خستگی فرتینگ، باعث افزایش رشد ۰/۱۲ میلی‌متری بیشترین ضخامت ناحیه آسیب و ۱۰/۱۰ درصدی نسبت سطح ناحیه آسیب در نمونه‌های نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی شده است. این مقادیر برای نمونه نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی با همان ترتیب پیشین، برابر با ۰/۳٤ میلی‌متر و ۲۹/۰۷ درصد می‌باشد.



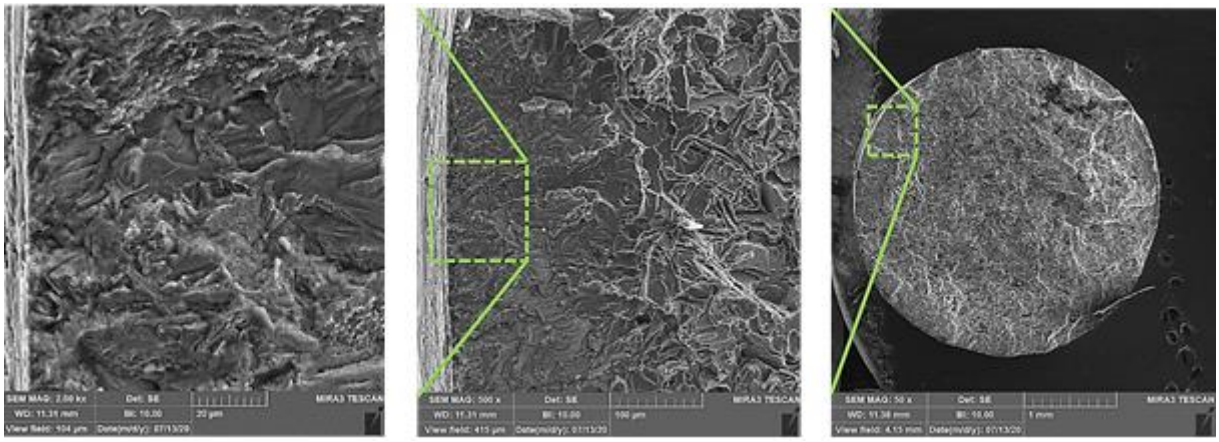
(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه نانوکامپوزیت- بدون عملیات حرارتی برای آزمون بدون روانکاری: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر



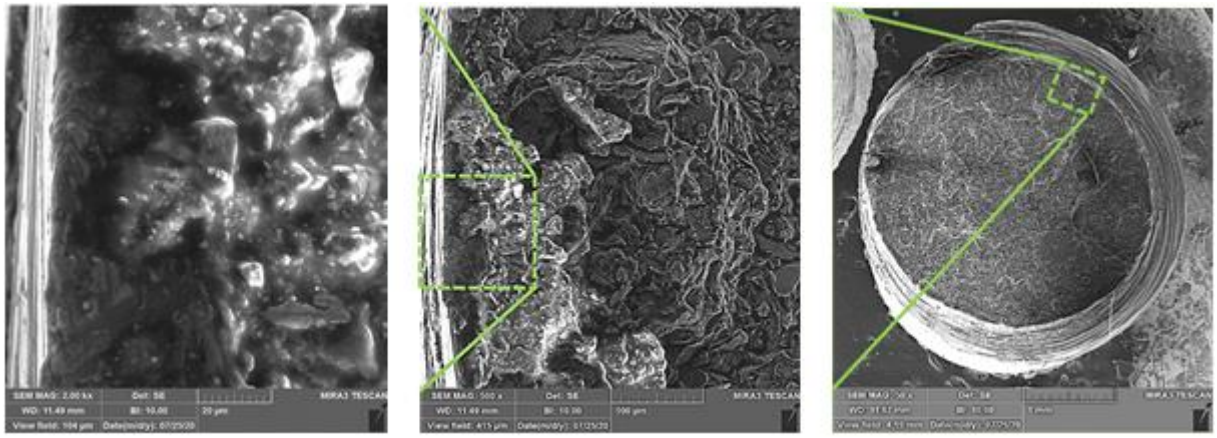
(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه نانوکامپوزیت - بدون عملیات حرارتی برای آزمون روانکاری شده: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی برای آزمون بدون روانکاری: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از لبه سطح شکست نمونه نانوکامپوزیت- با عملیات حرارتی برای آزمون روانکاری شده: (الف) بزرگنمایی ۵۰ برابر، (ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (ج) بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش، اثر افزودن روانکار و عملیات حرارتی بر عمر خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم پیستون تقویت‌شده با نانوذرات رس بررسی شد. برای بررسی دقیق‌تر از رینگ پیستون مورد استفاده در صنعت به عنوان پد سایشی استفاده شد. آزمون خستگی فرتینگ و بررسی ریزساختار و سطح شکست صورت پذیرفت و نتایج حاصل به شرح زیر آورده شده است.

• بررسی ریزساختاری نشان داد که در این نانوکامپوزیت‌ها، اکثر رسوبات شامل فاز سلیسیوم 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.

• اجرای عملیات حرارتی باعث بهبود عمر و خواص خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی شده است. علاوه بر آن، روانکاری در طول آزمون نیز باعث کاهش تمرکز تنش محلی و افزایش خواص خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی شده است. به طوری که بر اثر اعمال همزمان عملیات حرارتی و روانکار در کمترین سطح تنش (۱۲۰ مگاپاسکال) ۱۲۷۱/۷۵ درصد بهبود و برای بیشترین سطح تنش مشترک (۱۸۰ مگاپاسکال) ۱۱۷۳/۶۸ درصد، رشد عمر خستگی فرتینگ حاصل شده است.

• بررسی سطح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان نشان داد که ماهیت اصلی شکست از نوع ترد بوده است ولی وجود نواحی شبه- کلیویج رفتار شکست در برخی نواحی، به شکست نرم متمایل شده است. همچنین، اعمال عملیات حرارتی و یا روانکاری حین آزمون خستگی فرتینگ، باعث افزایش رفتار شکست ترد، در نمونه‌ها شده است. علاوه بر آن، بررسی لبه نمونه‌ها نشان داد با افزایش عمر خستگی فرتینگ، ضخامت و نسبت مساحت ناحیه آسیب فرتینگ نیز، افزایش یافته است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از شرکت موتورسازی پویانیستانک بابت تامین ماده اولیه، تشکر و قدرداني می‌نمایند.

تاییدیه اخلاقی: مقاله حاضر با رعایت تمامی اصول اخلاقی ثبت گردیده است و محتویات علمی مقاله، حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: محمد صادق اقارب پرست (نویسنده اول: ۳۰٪)، هانیه آرو (نویسنده دوم: ۲۰٪)، محمد آزادی (نویسنده سوم: ۳۰٪)، محبوبه آزادی (نویسنده چهارم: ۲۰٪)

منابع مالی: این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه سمنان انجام شده است.

منابع

1- Mangardich D, Abrari F, Fawaz Z. A fracture mechanics based approach for the fretting fatigue of aircraft engine fan dovetail attachments. International Journal of Fatigue. 2019;129:105213.

2- Farris TN, Murthy H, Matlik JF. 4.11-Fretting Fatigue. InComprehensive Structural Integrity 2007 (pp. 281-326). Elsevier Ltd.

3- Pistons and engine testing, Editor: MAHLE GmbH, Springer, 2016.

4 Sunde SL, Berto F, Haugen B. Predicting fretting fatigue in engineering design. International Journal of Fatigue. 2018;117:314-26.

5- Hills DA, Nowell D. Mechanics of fretting fatigue—Oxford's contribution. Tribology International. 2014;76:1-5.

6- The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys.

7- Peng J, Wang B, Jin X, Xu Z, Liu J, Cai Z, Luo Z, Zhu M. Effect of contact pressure on torsional fretting fatigue damage evolution of a 7075 aluminum alloy. Tribology International. 2019;137:1-0.

8- Peng J, Jin X, Xu Z, Zhang J, Cai Z, Luo Z, Zhu M. Study on the damage evolution of torsional fretting fatigue in a 7075 aluminum alloy. Wear. 2018;402:160-8.

9 Peng JF, Liu JH, Cai ZB, Shen MX, Song C, Zhu MH. Study on bending fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy. Tribology International. 2013;59:38-46.

10- Cai ZB, Zhu MH, Lin XZ. Friction and wear of 7075 aluminum alloy induced by torsional fretting. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20(3):371-6.

11- Sangral S, Achyuth K, Patel M, Jayaprakash M. Effect of fretting on fatigue behavior of Al alloys considering environmental effect. Materials Today: Proceedings. 2019;15:119-25.

12- De Pannemaecker A, Fouvry S, Buffiere JY, Brochu M. Modelling the fretting fatigue crack growth: From short crack correction strategies to microstructural approaches. International Journal of Fatigue. 2018; 117:75-89.

13- Kim K, Yoon MJ. Fretting fatigue simulation for aluminium alloy using cohesive zone law approach. International Journal of Mechanical Sciences. 2014;85:30-7.

14- Muthu J. Fatigue life of 7075-T6 aluminium alloy under fretting condition. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2014;74:200-8.

15- Ferre R, Fouvry S, Berthel B, Amargier R, Ruiz-Sabariego JA. 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 Engineering. 2013; 66:803-12.

16- Sarhan AA, Zalnezhad E, Hamdi M. The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of hard anodized aerospace AL7075-T6 alloy. Materials Science and Engineering: A. 2013; 560:377-87. 17-Shinde SR, Hoeppner DW. Fretting fatigue behavior in 7075-T6 aluminum alloy. Wear. 2006;261(3-4):426-34.

18- Du D, Liu D, Zhang X, Tang J. Fretting fatigue behaviors and surface integrity of Ag-TiN soft solid lubricating films on titanium alloy. Applied Surface Science. 2019;488:269-76.

19- Gean MC, Farris TN. Elevated temperature fretting fatigue of Ti-17 with surface treatments. Tribology international. 2009;42(9):1340-5.

20- Chakherlou TN, Mirzajanzadeh M, Vogwell J. Effect of hole lubrication on the fretting fatigue life of double shear lap joints: An experimental and numerical study. Engineering Failure Analysis. 2009;16(7):2388-99.

21 Guo T, Liu Z, Correia J, de Jesus AM. Experimental study on fretting-fatigue of bridge cable wires. International Journal of Fatigue. 2020;131:105321.

22 Hojjati-Talemi R, Zahedi A, De Baets P. Fretting fatigue failure mechanism of automotive shock absorber valve. International Journal of Fatigue. 2015 ;73:58-65.

23- Hojjati-Talemi R, Zahedi A, De Baets P. Fretting fatigue failure mechanism of automotive shock absorber valve. International Journal of Fatigue. 2015 ;73:58-65.

24-Silva FS. Fatigue on engine pistons–A compendium of case studies. Engineering failure analysis. 2006 ;13(3):480-92.

25- Kamali F, Azadi M. An evaluation of tribological and mechanical properties of Al-Si-Cu alloy with nano-clay particles reinforcement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2019 Oct;233(19-20):7062-76.

26- Azadi M, Zolfaghari M, Rezanezhad S, Azadi M. Effects of SiO 2 nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix composites by different dispersion methods. Applied Physics A. 2018;124(5):1-3.

27-Azadi M, Bahmanabadi H, Torkian J, Rasouli R. Investigation of nano-clay addition effect on microstructure, hardness and machining process in vehicle engine piston aluminum-silicon alloy, 4th National Congress on Mechanical Engineering and Chemical Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran, February 2019 (in Persian).

28- Suresh R, Kumar MP, Basavarajappa S, Kiran TS, Yeole M, Katare N. Numerical Simulation &

Experimental study of wear depth and Contact pressure distribution Of Aluminum MMC Pin on Disc Tribometer. Materials Today: Proceedings. 2017; 4(10):11218-28.
29- Takiguchi M, Ando H, Takimoto T, Uratsuka A. Characteristics of friction and lubrication of two-ring piston. JSAE review. 1996;17(1):11-6.
30-Technical report on piston ring, Irankhodro Powertrain Company, Iran, 2009.
31- Azadi M, Bahmanabadi H, Gruen F, Winter G. 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. 2020 ;788:139497.
32- Li Y, Yang Y, Wu Y, Wang L, Liu X. Quantitative comparison of three Ni-containing phases to the elevated-temperature properties of Al–Si piston alloys. Materials Science and Engineering: A. 2010 ;527(26):7132-7.
33- Aroo H, Parast MS, Azadi M, Azadi M. Investigation of effects of nano-particles, heat treatment process and acid amount on corrosion rate in piston aluminum alloy using regression analysis. In11th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, Tehran, Iran (in Persian) 2020.
34- Khameneh MJ, Azadi M. Evaluation of high-cycle bending fatigue and fracture behaviors in EN-GJS700-2 ductile cast iron of crankshafts. Engineering Failure Analysis. 2018;85:189-200.
35- May A, Belouchrani MA, Taharboucht S, Boudras A. Influence of heat treatment on the fatigue behaviour of two aluminium alloys 2024 and 2024 plated. Procedia Engineering. 2010;2(1):1795-804.
36- Haskel T, Verran GO, Barbieri R. Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: effects of strontium addition and T6 heat treatment. International Journal of Fatigue. 2018;114:1-0.
37- Zeren M. The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys. Materials & design. 2007;28(9):2511-7.
38- Azadi M, Rezanezhad S, Zolfaghari M, Azadi M. Investigation of tribological and compressive behaviors of Al/SiO 2 nanocomposites after T6 heat treatment. Sādhanā. 2020;45(1):1-3.
39- Singh G, Sharma N. Study on the influence of T4 and T6 heat treatment on the wear behavior of coarse and fine WC particulate reinforced LM28 Aluminium cast composites. Composites Part C: Open Access. 2021 ;4:100106.
40- Liu J, Zhang Q, Zuo Z, Xiong Y, Ren F, Volinsky AA. Microstructure evolution of Al–12Si–CuNiMg alloy under high temperature low cycle fatigue. Materials Science and Engineering: A. 2013;574:186-90.
41-Zhang G, Zhang J, Li B, Cai W. Double-stage hardening behavior and fracture characteristics of a heavily alloyed Al–Si piston alloy during low-cycle fatigue loading. Materials Science and Engineering: A. 2013;561:26-33.
42- Zolfaghari M, Azadi M, Azadi M. Characterization of High-Cycle Bending Fatigue Behaviors for Piston Aluminum Matrix SiO 2 Nano-composites in Comparison with Aluminum–Silicon Alloys. International Journal of Metalcasting. 2020:1-7.
43- Rezanezhad S, Azadi M, Azadi M. Influence of heat treatment on high-cycle fatigue and fracture behaviors of piston aluminum alloy under fully-reversed cyclic bending. Metals and Materials International. 2019:1-1.
44- Zhang GH, Zhang JX, Li BC, Wei CA. Characterization of tensile fracture in heavily alloyed Al-Si piston alloy. Progress in natural science: Materials International. 2011;21(5):380-5.
45-Grosselle F. Development of innovative applications in non-ferrous metals.