



Effect of Simultaneous Use of Silica Nanoparticles and Heat Treatment on High-Cycle Bending Fatigue Lifetime in Piston Aluminum Alloy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Azadi M.^{*1} PhD,
Rezanezhad S.¹ MSc,
Zolfaghari M.¹ MSc,
Azadi M.² PhD

How to cite this article

Azadi M, Rezanezhad S, Zolfaghari M, Azadi M. Effect of Simultaneous Use of Silica Nanoparticles and Heat Treatment on High-Cycle Bending Fatigue Lifetime in Piston Aluminum Alloy. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1463-1473.

¹Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

²Material & Metallurgical Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, Technical & Engineering Complex, In Front of Sokan Park, Semnan, Iran. Postal Code: 3513119111

Phone: +98 (23) 31530000

Fax: +98 (23) 33321005

m_azadi@semnan.ac.ir

Article History

Received: August 10, 2019

Accepted: December 7, 2019

ePublished: June 20, 2020

ABSTRACT

Aluminum-silicon alloys have vast applications in-vehicle components, such as the piston. Usually, such parts are under thermal and mechanical cyclic loadings, and therefore, they should have enough fatigue strength. For strengthening methods, the heat treatment and the addition of nanoparticles could be mentioned. In this research, the effect of the simultaneous use from SiO₂ nanoparticles and the heat treatment was investigated on the high-cycle fatigue lifetime of the piston alloy, which is the novelty of this study. The stir-casting method was used for adding nanoparticles into the aluminum matrix, and the T6 heat treatment was done on samples. The microstructure was examined by the optical microscopy and also the field-emission scanning electron microscopy (FESEM), and high-cycle bending fatigue tests were performed, under fully-reversed loading conditions. Based on FESEM images, no agglomeration of nanoparticles was observed in the matrix. In addition, it was found that using SiO₂ nanoparticles, heat treatment, and the combination of two approaches, caused to the improvement of the fatigue lifetime, for 304, 411 and 237%, respectively. According to high-cycle bending fatigue data, the fatigue strength coefficient of the piston alloy increased by the heat treatment, and the addition of nanoparticles.

Keywords Piston Aluminum Alloy; Silica Nano-Particles; Heat Treatment; High-Cycle Bending Fatigue Lifetime

CITATION LINKS

- [1] Improvements of fatigue behaviour in 2014-Al alloy by solution heat treating and age-...
- [2] Effects of SiO₂ nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix composites by different dispersion ...
- [3] Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue ...
- [4] Low-cycle fatigue properties and life prediction of Al-Si piston alloy at elevated ...
- [5] Preparation of various aluminium matrix composites reinforcing by nano-particles with ...
- [6] The effect of heat-treatment on aluminum-based piston ...
- [7] Impacts of nano particles on fatigue strength of aluminum based metal matrix composites ...
- [8] Evaluation of fatigue life of Al2024/Al2O3 particulate nano composite fabricated using stir ...
- [9] Development of high-performance ...
- [10] High-temperature mechanical properties and fracture mechanisms of Al-Si piston alloy reinforced with ...
- [11] Pistons and engine ...
- [12] ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and ...
- [13] A parametric study on mechanical properties of aluminum-silicon/SiO₂ nano-composites ...
- [14] Effects of various ageing heat treatments on microstructural features and hardness of ...
- [15] ASM Handbook volume 9: Metallography and ...
- [16] Evaluation of high-cycle bending fatigue and fracture behaviors in EN-GJS700-2 ductile ...
- [17] The exponential law of endurance ...
- [18] Effect of the casting process on microstructure and lifetime of the Al-piston-alloy AlSi12Cu4Ni3 under thermo-mechanical fatigue with superimposed high-cycle ...
- [19] Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg ...
- [20] Microstructural and mechanical properties of Al-SiO₂ nanocomposite foams ...
- [21] Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic ...
- [22] Influences of complex modification of P and RE on microstructure and mechanical ...
- [23] Correlation between mechanical properties and amount of dendritic α -Al phase in as-cast near-eutectic ...
- [24] A statistical study on the dry wear and friction characteristics of Al-12.6 Si-3Cu-(2-2.6 wt.%) Ni piston ...
- [25] Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties and fracture ...
- [26] Die cast A356 aluminium ...
- [27] Double-stage hardening behavior and fracture characteristics of a heavily alloyed Al-Si piston alloy during low-cycle fatigue ...
- [28] Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: Effects of strontium ...
- [29] Fatigue behaviour of SiC particulate-reinforced A359 aluminium ...

اثر استفاده همزمان از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم و عملیات حرارتی بر عمر خستگی پرچرخه خمشی در آلیاژ آلومینیوم پیستون

محمد آزادی* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

سعید رضائاد MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مهرداد ذوالفقاری MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

محبوبه آزادی PhD

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم کاربردهای بسیاری در قطعات خودرو همچون پیستون دارند. معمولاً این‌گونه قطعات، تحت بارهای سیکلی مکانیکی و حرارتی قرار دارند و لذا باید استحکام خستگی کافی را در مقابل این بارگذاری‌ها داشته باشند. از روش‌های استحکام بخشی به مواد، اجرای عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات است. در این پژوهش، اثر استفاده همزمان از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم و عملیات حرارتی بر عمر خستگی پرچرخه خمشی آلیاژ پیستون بررسی شده است که نوآوری این تحقیق است. از روش ریخته‌گری گردابی برای اضافه‌کردن نانوذرات به زمینه آلومینیومی استفاده شد و فرآیند عملیات حرارتی T6 بر روی نمونه‌ها اجرا شد. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، بررسی شد و آزمون خستگی پرچرخه خمشی نیز بر روی نمونه‌های استاندارد، در شرایط بارگذاری کاملاً معکوس‌شونده، اجرا شد. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، نواحی تجمع و بهم‌پیوستگی نانوذرات در زمینه مشاهده نشد. همچنین، مشاهده شد که استفاده از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، عملیات حرارتی T6 و استفاده همزمان از این دو فرآیند، باعث بهبود عمر خستگی به ترتیب به مقدار ۳۰۴، ۴۱۱ و ۲۳۲٪ شد. مطابق با داده‌های آزمون خستگی پرچرخه خمشی، ضریب استحکام خستگی آلیاژ پیستون، با عملیات حرارتی و اضافه‌نمودن نانوذرات، افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: آلیاژ آلومینیوم پیستون، نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، عملیات حرارتی، عمر خستگی پرچرخه خمشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۶

*نویسنده مسئول: m_azadi@semnan.ac.ir

مقدمه

امروزه مهندسان طراح، اهدافی همچون بهبود عملکرد موتور با استفاده از بهبود فرآیند احتراق را دنبال می‌کنند. بنابراین، برای رسیدن به چنین اهدافی، دمای کارکرد قطعات به ناچار افزایش می‌یابد. لذا باید مواد مورد استفاده در ساخت قطعات موتور خودرو را تقویت نمود. از روش‌های استحکام‌بخشی مواد، افزودن ذرات نانو به آن و یا انجام عملیات حرارتی روی قطعات و یا انجام هر دو فرآیند، به‌صورت همزمان است. یکی از مواد پرکاربرد در ساخت قطعات خودرو و موتور (به‌خصوص پیستون)، آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم هستند. معمولاً این‌گونه قطعات، تحت بارهای سیکلی

مکانیکی و حرارتی قرار دارند و لذا باید استحکام خستگی کافی، در مقابل این بارگذاری‌های سیکلی را دارا باشند [1,2].

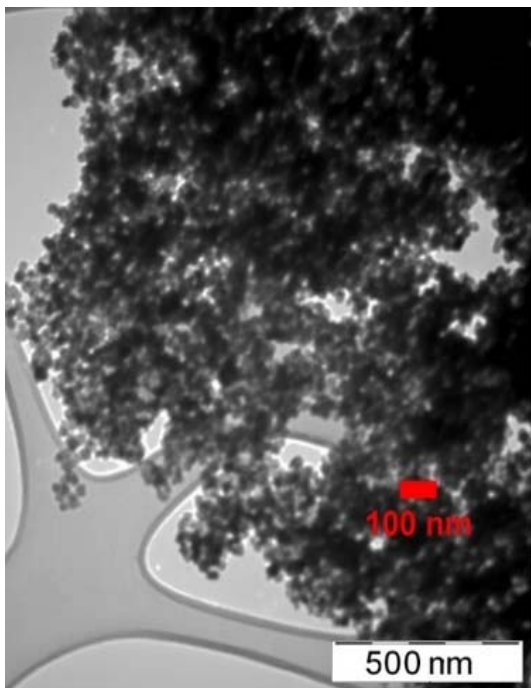
در این زمینه تحقیقاتی، مقالات متعددی تاکنون ارائه شده است که در ادامه، به جزئیات برخی از آنها اشاره می‌شود. *سادلر* و همکاران [1]، رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم Al2014، که بر روی آن عملیات حرارتی T6 صورت گرفته است را بررسی کردند. آنها نشان دادند عملیات حرارتی باعث بهبود عمر خستگی آلیاژ در حدود ۴۳٪ شده است. *آزادی* و *شیرازآباد* [3]، اثر عملیات حرارتی بر خواص خستگی ترمومکانیکی و خستگی کم‌چرخه آلیاژ آلومینیوم A356 را بررسی نمودند. نتایج آزمون‌ها نشان داد، عملیات حرارتی اثر قابل توجهی بر خواص مکانیکی و رفتار خستگی کم‌چرخه این آلیاژ در دمای اتاق داشته، اما اثر چندانی بر عمر خستگی ترمومکانیکی نداشته است. *وانگ* و همکاران [4]، به مطالعه اثر دما بر ریزساختارها، خواص کششی، خستگی کم‌چرخه و مکانیزم‌های خرابی Al-14.3Si مورد استفاده در ساخت پیستون پرداختند. نمونه‌ها را پیش از آزمون، با فرآیند T6 عملیات حرارتی کردند. نتایج آزمون کشش حاکی از کاهش استحکام کششی با افزایش دما بود. با رسم منحنی هیستریزس پایدارشده خستگی کم‌چرخه در دماها مختلف به‌ازای دامنه کرنش کل یکسان در دامنه تنش، افت مشاهده شد که بیانگر نرم‌شوندگی ماده با زیادکردن دما بود. همچنین با افزایش دما، تغییر شکل پلاستیک سازه افزایش یافت به‌علاوه اینکه عیوب ریزساختاری نیز تا حدودی رفع شد و مقاومت در برابر رشد ترک افزایش یافت. البته با افزایش دما، چگالی ترک‌ها در سطح افزایش یافت و این امر می‌تواند سبب پیدایش ترک‌های ماکروسکوپی و آسیب خستگی شود. *آزادی* و همکاران [5]، آسیاب‌کاری و یا پیش‌گرم کردن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم جهت افزودن به مذاب آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم را بررسی کردند. تحقیقات آنها نشان داد که نانوذرات بعد از فرآیند آسیاب‌کاری آگلومره نشده است. *زرین* [6]، اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژهای مختلف پیستون با درصد‌های مختلف سیلیسیوم را بررسی کرده است. او دما و زمان انحلال را به‌ترتیب ۵۰۰درجه سانتی‌گراد و ۵ساعت، دما و زمان پیرسازی را به‌ترتیب ۱۸۰درجه سانتی‌گراد و ۹ساعت در نظر گرفته و در انتها نتایج سختی برینل برای نمونه‌های بدون عملیات حرارتی و عملیات حرارتی‌شده را با یکدیگر مقایسه کرده است، که نتایج آن نشان از افزایش سختی برینل نمونه‌های عملیات حرارتی شده داشت. *دیوآگر* و همکاران [7]، از دو نوع نانوذره برای تقویت زمینه آلومینیومی استفاده کردند. در پژوهش آنها نانوذرات آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) به میزان ۵٪ به‌طور ثابت در همه نمونه‌ها وجود داشتند و اثر افزودن نانوذرات سیلیکون کارباید (SiC) به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵٪ بررسی شدند. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه‌ها نشان از توزیع مناسب ذرات نانو در زمینه آلومینیومی داشته است. آنها برای انجام آزمون خستگی از دستگاه خمش دورانی استفاده کرده و مشاهده نمودند که افزودن SiC باعث بهبود استحکام خستگی نمونه شده و عمر خستگی نمونه نیز افزایش یافته است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم-سیلیسیوم به‌عنوان ماده زمینه و نیز نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با ابعاد ۲۰ تا ۳۰ نانومتر و پودر آلومینیوم با ابعاد ۴۵ میکرومتر به‌عنوان مواد تقویت‌کننده استفاده شدند. این آلیاژ در ساخت پیستون خودروهای سواری کاربرد دارد [11] و درصد عناصر تشکیل‌دهنده آن در جدول ۱ ذکر شده است. برای تعیین درصد عناصر تشکیل‌دهنده این آلیاژ از روش طیف‌سنجی نشر جرقه (کوانتومتری) استفاده شده است. شکل ۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم را نشان می‌دهد که مطابق با آن، ابعاد این ذرات در حدود ۳۰ نانومتر است. نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم جامد بی‌شکل و سفیدرنگ هستند [2].

جدول ۱) درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ $AlSi12Cu3Ni2Mg$ در مقایسه با مرجع [11]

عنصر	نماد شیمیایی	عناصرسنجی	مرجع [11]
سیلیسیوم	Si	۱۲/۵۰	۱۱/۰ تا ۱۳/۰
مس	Cu	۲/۴۰	۲/۰ تا ۴/۵
منیزیم	Mg	۰/۷۴	۱/۰ تا ۵/۵
نیکل	Ni	۲/۲۰	۰/۸ تا ۳/۱
آهن	Fe	۰/۴۱	بیشینه ۰/۷
منگنز	Mn	۰/۳۰	بیشینه ۰/۳
تیتانیوم	Ti	۰/۰۲	بیشینه ۰/۲
روی	Zn	۰/۰۷	بیشینه ۰/۳
زیرکونیم	Zr	۰/۰۰۳	بیشینه ۰/۲
وانادیوم	V	۰/۰۱	بیشینه ۱/۸
کروم	Cr	۰/۰۰۵	بیشینه ۰/۰۵
آلومینیوم	Al	عنصر پایه	عنصر پایه

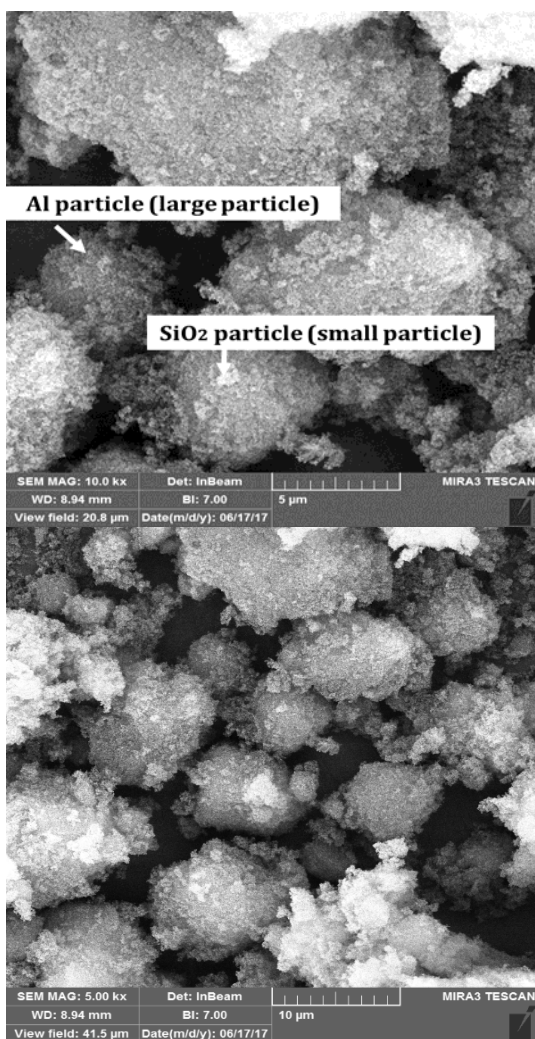


شکل ۱) میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم

بهترین نتیجه در ترکیب ۵% Al_2O_3 و ۱۰% SiC حاصل شده است. نانو کامپوزیت‌های تقویت‌شده با این ترکیب، بیشترین عمر و بالاترین استحکام خستگی را دارا بودند. راجو و همکاران [8]، با تغییر درصد نانوذرات Al_2O_3 در زمینه آلومینیوم $Al2024$ عمر خستگی پرچرخه نانوکامپوزیت‌های حاصل را بررسی کردند. آنها نمونه‌هایی با صفر تا ۲% جرمی از ذرات تقویت‌کننده و با ترکیب روش‌های متالورژی پودر و ریخته‌گری گردابی تولید کردند. آنها این ذرات را به مدت ۲ ساعت و همراه با ذرات آلومینیوم در دستگاه آسیاب سیاره‌ای قرار داده و با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه آسیاب‌کاری کردند. پس از آسیاب‌کاری، پودر حاصل را، در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم کردند و سپس به مذاب اضافه نمودند و آزمون کشش و خستگی پرچرخه (از نوع خمشی دورانی) روی نمونه‌ها انجام دادند. نتایج آزمون کشش حاکی از بهبود خواص کششی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با آلومینیوم پایه بوده اما بیشترین شیب نمودار تنش-کرنش و بالاترین استحکام نهایی در نانوکامپوزیت با ۱/۵% جرمی از ذرات تقویت‌کننده مشاهده شده است. در خصوص عمر خستگی پرچرخه نیز فقط آزمون بر روی نانوکامپوزیت با ۱/۵% نانو انجام شده که نتیجه آزمون‌ها بیانگر عمر بیشتر نانوکامپوزیت در مقایسه با آلومینیوم پایه بوده است. مظاهری و عبدی‌زاده [9]، نانوذرات آلومینا را به زمینه آلومینیوم A356 اضافه کرده و نانوکامپوزیت‌هایی با ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ و ۵% تولید کردند. این نانوکامپوزیت‌ها به روش ریخته‌گری گردابی و با دور همزن ۶۰۰ دور بر دقیقه ساخته شدند. نمونه با ۱/۵% نانو بالاترین استحکام کششی و بیشترین تنش تسلیم را دارا بوده و نمونه با ۲/۵% نانو بیشترین سختی را از خود نشان داده است. در باقی موارد نیز افزودن ذرات نانو سبب بهبود خواص شد. هان و همکاران [10]، ۴% وزنی از نانوذرات تیتانیوم دی‌برمید (TiB_2) با ابعاد حدود ۵۰ نانومتر را به زمینه آلومینیوم پیستون $AlSi12$ اضافه کردند. تابع هدف در این پژوهش، بررسی اثر دما و افزودن نانوذرات TiB_2 بر خواص کششی و سطح شکست نمونه‌های آزمون بوده است. نمونه‌ها پس از تولید، طی فرآیند T6 عملیات حرارتی شده‌اند. آزمون‌ها در دمای ۲۵، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از نانوذرات، بیانگر بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی کشش در دمای اتاق بوده است. اما در دماهای بالاتر، تقویت زمینه با نانوذرات TiB_2 اثر چندانی بر خواص کششی نداشته است.

با توجه به مقالات بررسی‌شده، برای بهبود خواص مکانیکی و عمر خستگی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم، هم از فرآیند عملیات حرارتی استفاده شده و هم از افزودن نانوذرات مختلف بهره برده شده است. در این مقاله اثر عملیات حرارتی، اثر افزودن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم و نیز اثر همزمان هر دو فرآیند بر عمر خستگی پرچرخه خمشی آلیاژ پیستون بررسی شده است. علاوه بر آن، ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، بررسی شده است.

آرگون ترکیب شدند. هدف از این فرآیند، نشانند نانوذرات بر روی میکروذرات آلومینیوم است تا به‌طور عمده از بهم‌پیوستگی و آگلومره‌شدن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم در مذاب جلوگیری شده و برای اضافه‌شدن به فلز پایه آماده شوند[2]. پس از انجام فرآیند آسیاب‌کاری، به‌منظور حصول اطمینان از کیفیت ترکیب نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با میکروذرات آلومینیوم، تصویر دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از پودرهای آسیاب‌کاری‌شده، تهیه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل بیانگر آن است که پس از فرآیند آسیاب‌کاری سیاره‌ای، نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم به خوبی سطح میکروذرات آلومینیوم را پوشش داده‌اند.



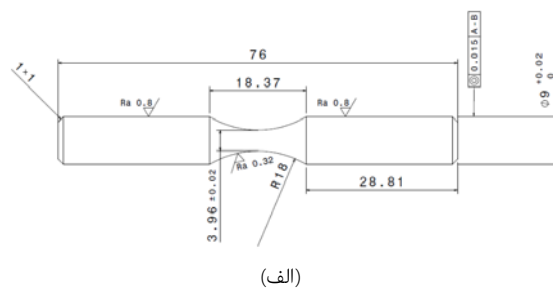
شکل ۳) میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از ترکیب پودر نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با میکروذرات آلومینیوم پس از فرآیند آسیاب سیاره‌ای

شایان ذکر است که مکانیزم پوشش‌دهی فوق به‌صورت هسته و پوسته است، به این ترتیب که ذرات میکروآلومینیوم در مرکز قرار گرفته و ذرات نانو دی‌اکسید سیلیسیوم اطراف آن را احاطه کرده‌اند[13]. همچنین ملایی و همکاران[13]، بر روی پودر آسیاب‌کاری‌شده، آزمون پراش اشعه ایکس را اجرا نمودند و مشخص

در این پژوهش، چهار دسته نمونه، تولید شده و تحت آزمون قرار گرفتند که جزییات آنها در جدول ۲ بیان شده است. دسته اول آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم است که در ساخت پیستون خودرو کاربرد دارد و از این پس با نام پیستون استفاده می‌شود. به‌منظور یکسان‌بودن شرایط ساخت، آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم به کمک روش ذوبی و در دمای مذاب ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، ریخته‌گری ثقلی شد. این فرآیند توسط کوره زمینی، با قابلیت اتصال همزن، برای هم‌زدن مذاب به‌منظور ایجاد توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه آلومینیومی، اجرا شد و مذاب تولیدشده، در قالب نمونه آزمون، ذوب‌ریزی شد. تصویر نقشه نمونه آزمون خستگی پرچرخه خمشی مطابق با استاندارد ISO-11143:2012[12] در شکل ۲-الف و همچنین تصویر نمونه پس از فرآیند ماشین‌کاری در شکل ۲-ب نشان داده شده است.

جدول ۲) انواع نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش

نام نمونه	آلیاژ پایه	تقویت‌کننده	فرایند عملیات حرارتی
پیستون	آلومینیوم-سیلیسیوم (پیستون)	-	-
نانوپیستون	آلومینیوم-سیلیسیوم (پیستون)	نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم	-
پیستون عملیات حرارتی شده	آلومینیوم-سیلیسیوم (پیستون)	-	T6
نانوپیستون عملیات حرارتی شده	آلومینیوم-سیلیسیوم (پیستون)	نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم	T6



(الف)



(ب)

شکل ۲) الف) نقشه نمونه استاندارد آزمون خستگی پرچرخه خمشی، ب) نمونه آزمون پس از ساخت و ماشین‌کاری

برای ساخت پیستون تقویت‌شده با استفاده از نانوذرات (نانوپیستون)، ابتدا نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با میکروذرات آلومینیوم با استفاده از روش آسیاب‌کاری سیاره‌ای و در اتمسفر گاز

تجهیزات تنظیم فرکانس بارگذاری است. در طول زمان یک آزمون خستگی، میزان تنش ثابت بوده و با استفاده از وزنه در انتهای محور دورانی دستگاه، به صورت بارگذاری خمشی، اعمال شد. دستگاه آزمون مورد استفاده، در شکل ۴ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که در شرایط بارگذاری کاملاً عکس‌شونده، نسبت تنش برابر ۱- است، که نسبت کمترین تنش به بیشینه تنش اعمالی است. شایان ذکر است که در اینجا 2×10^6 سیکل، به عنوان حد عمر خستگی در نظر گرفته شده است [16].

جدول ۳) مواد تشکیل‌دهنده محلول کلر [15] (اعداد برحسب میلی‌لیتر)

نام ماده	مقدار
آب مقطر	۱۹۰
اسید نیتریک (HNO_3)	۵
اسید هیدروکلریک (HCl)	۳
اسید هیدروفلوئوریک (HF)	۲



شکل ۴) دستگاه آزمون خستگی پرچرخه دورانی خمشی

فرکانس بارگذاری در تمامی آزمون‌های خستگی 10^4 هرتز، معادل 6000 دور بر دقیقه تنظیم شده است. این شرایط بارگذاری براساس بیشینه قدرت (معادل بیشترین بارهای مکانیکی وارده به موتور) که در سرعت دورانی 6000 دور بر دقیقه اتفاق می‌افتد انتخاب شده است [16]. تمامی آزمون‌های خستگی در دمای اتاق ($25^\circ C$) درجه ۳ آزمون در هر سطح تنش در نظر گرفته شده است. آزمون خستگی پرچرخه خمشی در سطح تنش‌های 125 ، 153 ، 180 ، 208 و 236 مگاپاسکال، معادل با وزنه‌های اعمال بار 200 ، 300 ، 400 و 500 گرم انجام شده است. به منظور استخراج پارامترهای خستگی (شامل ضریب و توان استحکام خستگی)، از رابطه ۲ استفاده شده است [17]:

$$\sigma_a = \sigma_f (2N_f)^b \quad (2)$$

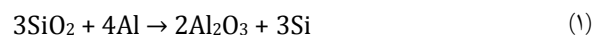
اگر از رابطه ۲ لگاریتم گرفته شود، رابطه ۳، به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\log(\sigma_a) = \log(\sigma_f) + b \times \log(2N_f) \quad (3)$$

در این رابطه، σ_a دامنه تنش، N_f نمایانگر تعداد سیکل‌های منجر به شکست، σ_f ضریب استحکام خستگی و b توان استحکام خستگی است. با استفاده از برازش منحنی در فضای لگاریتمی، توان و ضریب استحکام خستگی برای هر یک از منحنی‌های تنش-عمر به دست آمده است.

کردند که فاز جدیدی همچون اکسید آلومینیوم، تشکیل نشده است. مطابق با پژوهش آزادی و همکاران [5] نیز، نتایج آزمون آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس نشان داد که واکنش احتمالی برای تبدیل دی‌اکسید سیلیسیوم به اکسید آلومینیوم، وجود نداشت. همچنین، قابل ذکر است که انتخاب زمان کوتاه و دمای کم، برای همزدن در فرآیند ریخته‌گری، از عواملی است که باعث عدم ایجاد چنین واکنشی می‌شود.

برای ساخت نانوپستون از روش ریخته‌گری گردابی استفاده شد. در این روش، پس از اضافه کردن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم به مذاب آلیاژ پیستون در دمای $750^\circ C$ سانتی‌گراد، مخلوط حاصل به مدت ۲ دقیقه و با سرعت 100 دور بر دقیقه همزده شد. شایان ذکر است میکروآلومینیومی که نانوذرات SiO_2 محصور کرده بودند با این نانوذرات واکنش ندادند و نهایتاً دی‌اکسید سیلیسیوم وارد آلیاژ زمینه، شده است. مطابق با فرمول شیمیایی رابطه ۱، اگر آلومینیوم با دی‌اکسید سیلیسیوم واکنش دهد، در انتها باید فاز Al_2O_3 تشکیل شود که مطابق با الگوی نتایج آزمون پراش اشعه ایکس در پژوهش مولایی و همکاران [13]، که از همین مواد استفاده کرده است، بعد از فرآیند ریخته‌گری، این فاز مشاهده نشد. ضمناً درصد وزنی SiO_2 خیلی کمتر از آلومینیوم است.



دسته‌های دیگر از نمونه‌ها، برای بررسی اثر عملیات حرارتی T6 روی پیستون و اثر همزمان عملیات حرارتی T6 و افزودن نانوذرات روی پیستون بر رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم استفاده شدند. فرآیند عملیات حرارتی مورد استفاده شامل مراحل همگن‌سازی و پیرسازی است. در فرآیند همگن‌سازی، نمونه‌ها در دمای $500^\circ C$ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹ ساعت در کوره الکتریکی (شرکت کاوش‌آرما؛ ایران) قرار گرفتند و بعد از آن در آب، خنک شدند؛ سپس به منظور پیرسازی به مدت ۹ ساعت در دمای $180^\circ C$ درجه سانتی‌گراد مجدداً در کوره قرار گرفته است و پس از خروج از کوره، در هوا خنک شدند [14]. جزییات بیشتر در مورد نحوه انتخاب فرآیند عملیات حرارتی فوق، در مطالعه آزادی و همکاران [14] آمده است.

برای انجام متالوگرافی و تهیه تصاویر ریزساختار، نیاز به آماده‌سازی نمونه است. نمونه‌های مورد استفاده برای این آزمون، ابتدا سمباده‌کاری شدند. برای این کار از سمباده‌های با شماره ۲۲۰ تا ۳۰۰۰ استفاده شد. پس از آن، نمونه با آب مقطر شسته شد و سطح نمونه‌ها با استفاده از محلول آلومینا و آب مقطر، پولیش‌کاری شدند. به منظور آشکارشدن فازهای موجود، سطح نمونه با استفاده از محلول کلر (Keller) و به مدت ۴ ثانیه، میکرو اچ (Micro-Etch) شد. مواد تشکیل‌دهنده محلول کلر در جدول ۳ آورده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه، سطح آنها توسط میکروسکوپ نوری مشاهده شد و تصاویر ریزساختار تهیه شدند.

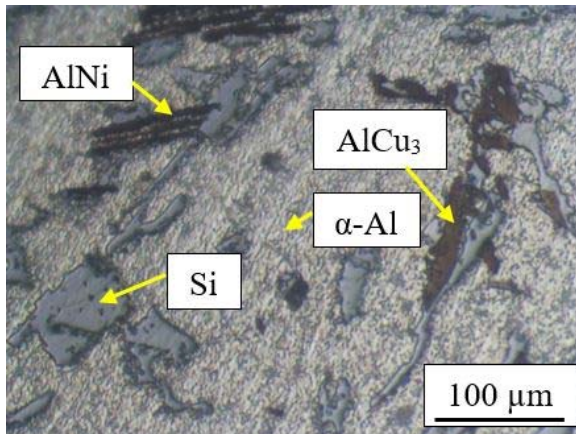
آزمون خستگی تحت بارگذاری کاملاً عکس‌شونده، به وسیله دستگاه آزمون خستگی پرچرخه دورانی خمشی از نوع SFT-600 (شرکت سنتام؛ ایران) اجرا شد. این دستگاه مجهز به حسگر تعداد سیکل و

تفسیر و تحلیل نتایج

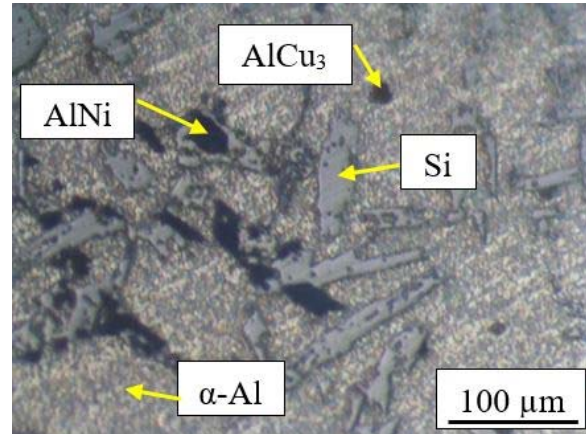
جهت بررسی ریزساختار، آزمون متالوگرافی انجام گرفته است، با توجه به تصاویر موجود در شکل ۵ نمونه‌های ساخته شده دارای فازهای مختلف هستند. این فازها شامل α -Al، Si، $AlCu_3$ و $AlNi$ است که در فاز α -Al پخش شده‌اند. مشابه این ریزساختار در مراجع دیگر [6, 13] نیز مشاهده شده است. لازم به ذکر است که وجود این

فازها توسط آزمون پراش اشعه ایکس در نمودار ۱ نشان داده شده است.

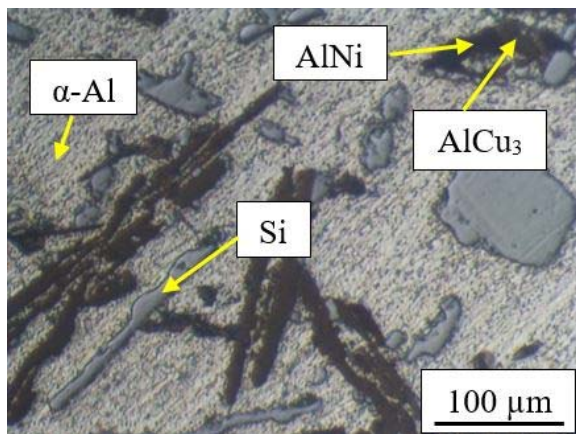
برای بررسی بیشتر ریزساختار، از نمونه پیستون، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی تهیه شده که در شکل ۶ نمایش داده شده است. همچنین برای این تصویر میکروسکوپی، آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس، برای نقاط ۱ تا ۴ موجود در این شکل، در جدول ۴ گزارش شده است.



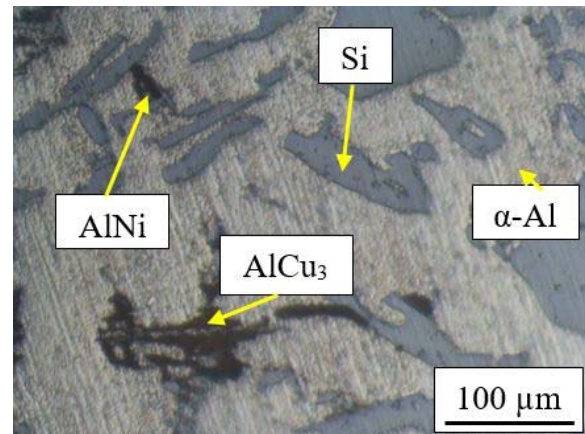
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

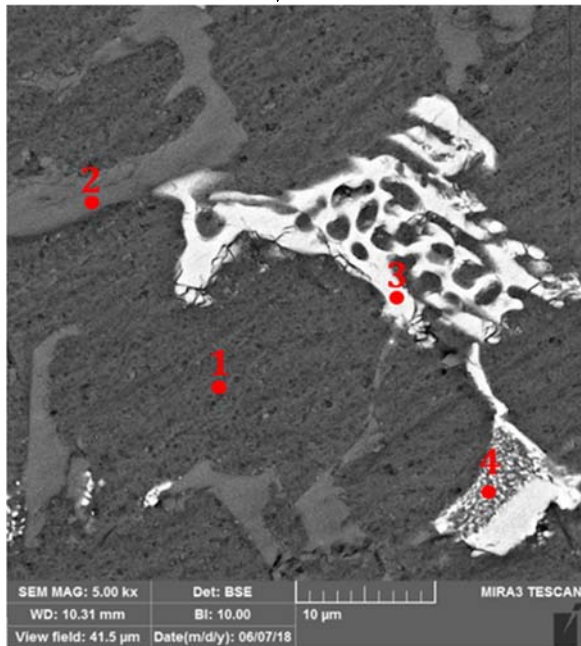
شکل ۵) میکروسکوپ نوری از ریزساختار: (الف) پیستون، (ب) نانوپیستون، (ج) پیستون عملیات حرارتی شده، (د) نانوپیستون عملیات حرارتی شده

جدول ۴) جزئیات نتایج طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس برای نقاط ۱ تا ۴ در نمودار ۱

عنصر	نقطه ۱		نقطه ۲		نقطه ۳		نقطه ۴	
	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی
آلومینیوم	۹۶/۹۴	۹۵/۶۵	۲/۶۲	۴/۶۵	۸۹/۱۱	۹۰/۳۲	۸۲/۳۴	۸۲/۶۳
سیلیسیوم	۱/۸۱	۲/۰۴	۹۶/۴۹	۹۲/۳۵	۱/۵۱	۱/۴۵	۱/۲۹	۱/۵۳
نیکل	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۷/۹۴	۷/۲۲	۰/۴۶	۰/۲۴
مس	۰/۰۰	۰/۴۵	۰/۰۰	۰/۳۲	۰/۵۷	۰/۸۹	۱۵/۸۲	۱۵/۰۳
منیزیم	۱/۲۵	۱/۸۶	۰/۸۹	۲/۶۶	۰/۸۷	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۵۷

فازهای (Al,Cu) و (Al,Ni) هستند و با توجه به نتایج آزمون پراش اشعه ایکس در نمودار ۱، نقاط ۳ و ۴ فازهای بین فلزی هستند که با ترکیب شیمیایی $AlNi$ و $AlCu_3$ شناخته می‌شوند. شایان ذکر است که مشابه ریزساختار مشاهده شده برای آلیاژ پیستون، در

براساس شکل ۶ و جدول ۴، نقاط ۱ و ۲ به ترتیب شامل بیشترین درصد از عناصر Al و Si هستند و براساس نتایج آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس، نقطه ۱ فاز α -Al و نقطه ۲ فاز Si را نشان می‌دهد. همچنین نقاط ۳ و ۴ در شکل ۶، به ترتیب بیانگر

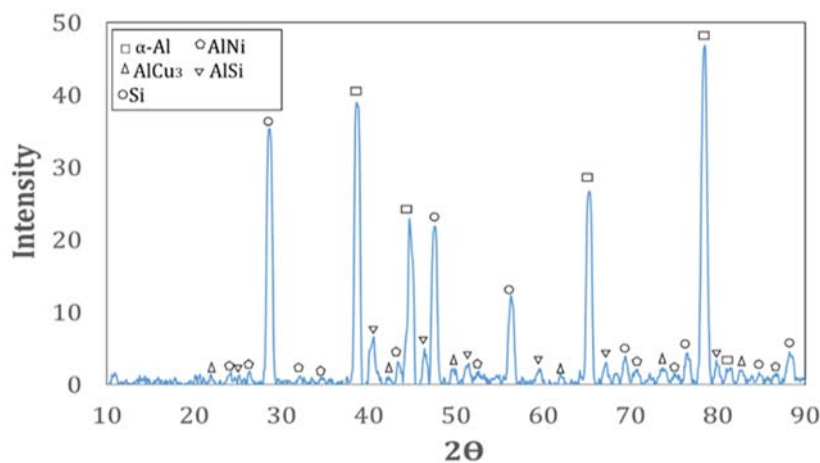


شکل ۶ میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از آلیاژ پیستون

پژوهش‌های هامبرجین و بک [18] و همچنین، هان و همکاران [19] مشاهده شده است. میانگین اندازه و درصد فازهای Si بلوکی در نمونه عملیات حرارتی شده، کمتر شده است اما کاملاً حذف نشده است. این امر به دلیل مرحله اول (انحلال) در فرآیند عملیات حرارتی است. به منظور تحلیل کمی ریزساختارها، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، درصد فاز، درصد کروی شدن و میانگین مساحت فازهای Si، AlNi و AlCu₃ اندازه‌گیری شد که در جدول ۵ نمایش داده شده است. مطابق با آن، افزودن نانو، عملیات حرارتی و یا هر دو مورد بر روی آلیاژ پیستون، باعث افزایش درصد فاز، درصد کروی شدن و میانگین مساحت فازهای Si و AlCu₃ شد. همچنین، میانگین مساحت فاز AlNi برای هر سه حالت فوق، نسبت به آلیاژ پیستون نیز افزایش یافت. اما درصد کروی شدن در حالت افزودن نانو و حالت نانوپیستون عملیات حرارتی شده، با کاهش روبرو شد و با اجرای عملیات حرارتی، افزایش یافت. درصد فاز AlNi، با افزودن نانو، نسبت به آلیاژ پیستون کاهش یافت اما با عملیات حرارتی بر روی نانوپیستون و پیستون افزایش یافت.

جدول ۵) درصد فاز، درصد کروی شدن و میانگین مساحت فاز براساس عکس‌های ریزساختار با نرم‌افزار ImageJ

آلیاژ	درصد فاز			درصد کروی شدن			میانگین مساحت فاز (μm ²)		
	AlCu ₃	AlNi	Si	AlCu ₃	AlNi	Si	AlCu ₃	AlNi	Si
پیستون	۰/۷	۲/۸	۱۰/۳	۵۶/۴	۵۳/۰	۳۰/۴	۱/۹	۴/۲	۸/۹
نانوپیستون	۳/۰	۲/۶	۱۱/۳	۵۷/۳	۳۶/۰	۳۵/۴	۷/۸	۵/۳	۱۰/۴
پیستون عملیات حرارتی شده	۱/۰	۴/۳	۲۱/۰	۶۵/۲	۵۶/۱	۵۱/۳	۳/۱	۱۵/۶	۱۳/۲
نانوپیستون عملیات حرارتی شده	۱/۳	۹/۹	۱۲/۱	۷۰/۸	۲۹/۶	۵۳/۹	۳/۵	۱۸/۱	۱۱/۷

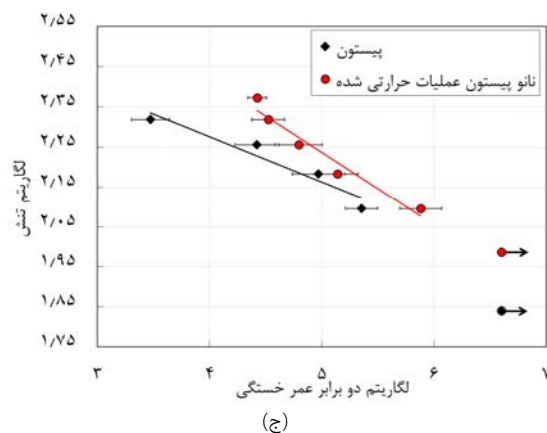
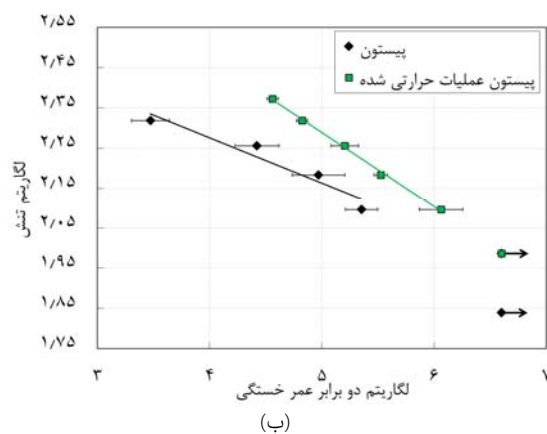
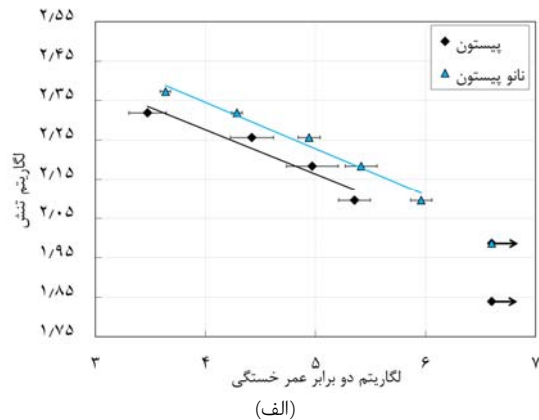


نمودار ۱) پراش اشعه ایکس از آلیاژ پیستون

شکل Si قرار دارد [21, 22] و کاهش ابعاد فاز بلوکی Si می‌تواند سبب بهبود آن خواص شود [22, 23]. همچنین با اضافه کردن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، پخش فازهای بین فلزی در نمونه نانوپیستون همگن‌تر شده است. فازهای بین فلزی به خصوص فازهای شامل Ni و نیز فاز Si شاخه‌ای نقش به‌سزایی در بهبود خواص آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم در دماهای بالا دارند [24]. لذا توزیع یکنواخت فازهای بین فلزی در زمینه می‌تواند سبب بهبود خواص مکانیکی شود [24]. با انجام فرآیند عملیات حرارتی T6 بر روی آلیاژ پیستون،

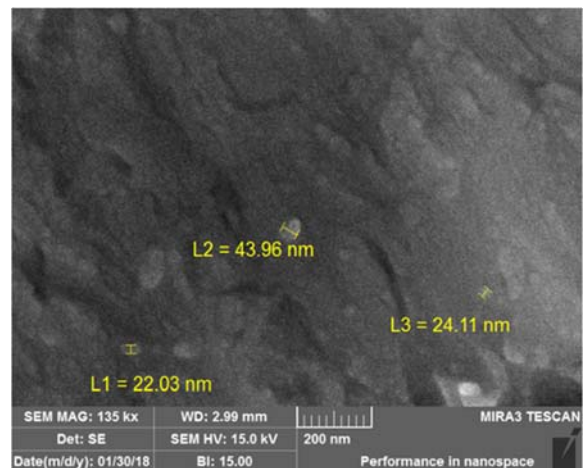
ریزساختار آلیاژهای آلومینیوم با افزودن نانوذرات تغییر می‌کند [20]. مطابق شکل ۵-ب، با افزودن ذرات دی‌اکسید سیلیسیوم به آلیاژ پیستون نیز شکل فاز AlNi به صورت شاخه‌ای در آمده است. نکته قابل توجه آنکه با افزودن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم به زمینه، میانگین کریستال‌های چندوجهی آن کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که نسبت قطر به طول برای فازهای بین فلزی و فاز Si کمتر شده است [21]. لازم به ذکر است که خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم به‌طور عمده به تحت تاثیر فاز بلوکی

T6، نانوپیستون و نانوپیستون عملیات حرارتی شده T6 به دست آمده است. این نمودار یک بار برای میانگین داده‌های حاصل از آزمون و بار دیگر برای همه داده‌ها در هر سطح تنش به ترتیب در نمودارهای ۲ و ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای میانگین‌گیری از داده‌های عمر در هر سطح تنش، داده‌های غیرقابل اعتماد حذف شده‌اند. داده‌های غیرقابل اعتماد شامل نتایج حاصل از نمونه‌های شکسته شده در شروع آزمون و داده‌های با عمر نامحدود (بیشتر از ۲ میلیون سیکل) هستند.



نمودار ۲) تنش (مگاپاسکال) برحسب عمر (سیکل) برای میانگین داده‌های خستگی: الف) پیستون و نانوپیستون، ب) پیستون و پیستون عملیات حرارتی شده T6، ج) پیستون و نانوپیستون عملیات حرارتی شده T6

فاز Si از حالت بلوکی شکل به صورت رسوبات بزرگ سوزنی شکل و رسوبات کوچک شبه کروی تبدیل شد که به صورت همگن در فاز α -Al پخش شده‌اند. علاوه بر آن، اندازه فازهای بین فلزی افزایش چشمگیری داشت. مطابق با پژوهش ژو و همکاران [25]، عملیات حرارتی T6 بر روی آلیاژ پیستون، باعث تغییر چشمگیر ریزساختار آن می‌شود و فاز Si را به رسوبات کوچک کروی شکل تبدیل می‌کند و باعث بهبود خواص مکانیکی خواهد شد. پیو [26] نیز در پژوهش‌های خود نشان داد که عملیات حرارتی T6 بر روی آلیاژ پیستون باعث پخش همگن فاز Si در زمینه α -Al می‌شود. همچنین پخش همگن فازهای کوچک بین فلزی، می‌تواند خواص خستگی آلیاژ پیستون را بهبود بخشد [27]. با انجام عملیات حرارتی T6 بر روی نانوپیستون در مقایسه با آلیاژ پیستون، مقدار فاز بین فلزی در سطح افزایش چشمگیر یافته است. افزایش فازهای بین فلزی، می‌تواند زمینه‌ساز بهبود استحکام و خواص مکانیکی و خستگی آلیاژ شود. فاز Si پس از عملیات حرارتی اغلب به صورت شاخه‌ای یا سوزنی در آمده است. برای مشاهده نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم در آلیاژ پایه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی تهیه شده است که در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق با این شکل، اندازه نانوذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که بیانگر آن است که نواحی تجمع و بهم‌پیوستگی نانوذرات در زمینه مشاهده نشده است. لازم به ذکر است که وجود نواحی با تجمع نانوذرات، می‌تواند نقاط مستعد برای تمرکز تنش و شروع رشد و پخش ترک باشد. ضمناً توضیحات بیشتر در این مورد و همچنین اثبات وجود نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با حضور اکسیژن و سیلیسیوم در زمینه آلومینیومی، با استفاده از نتایج آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس، در پژوهش آزادی و همکاران [5] پرداخته شده است.



شکل ۷) میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از توزیع نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم در آلیاژ پیستون

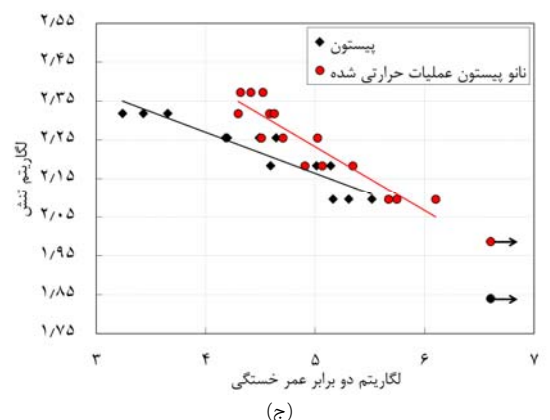
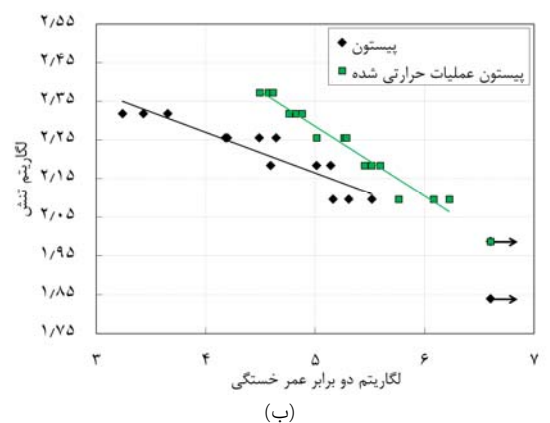
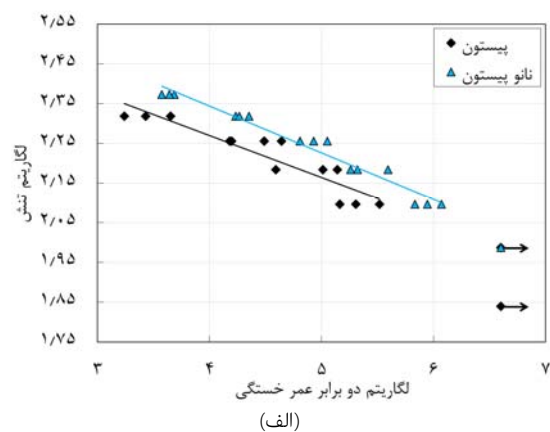
مطابق با داده‌های حاصل از آزمون خستگی پرچرخه خمشی، نمودار تنش-عمر برای آلیاژ پیستون، آلیاژ پیستون عملیات حرارتی شده

همچنین استفاده از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم در محدوده تنش زیاد و کم، عمر خستگی آلیاژ پیستون را به ترتیب تا ۶ و ۴ برابر افزایش داده است. این افزایش به دلیل پیوند نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با زمینه و تقویت آلیاژ زمینه اتفاق افتاده است. در پژوهشی که توسط مایرینویس و همکاران انجام شده نیز از نانوذرات سرامیکی برای تقویت آلومینیوم استفاده شده که در این مورد نیز افزایش عمر خستگی نانوکامپوزیت گزارش شده است [29]. دیوگر و همکاران [7] نیز در پژوهشی به بررسی استحکام خستگی آلومینیوم با استفاده از ترکیب نانوذرات آلومینا و SiC پرداخته‌اند که در این مورد نیز افزایش استحکام خستگی در اثر استفاده از این ذرات بیان شده است. راجو و همکاران [8] نیز اثرگذاری اضافه‌کردن نانوذرات آلومینا بر عمر خستگی آلومینیوم بهبودبخش گزارش داده‌اند. اجرای فرآیند عملیات حرارتی T6 بر روی نانوپيستون باعث شد که عمر خستگی در رژیم کم‌چرخه در مقایسه با نانوپيستون و پیستون بیشتر شود. اما در مقابل، عمر خستگی در رژیم پرچرخه در مقایسه با نانوپيستون و پیستون، مقدار افزایش کمتری داشته است. البته این رفتار مشابه زمانی است که فقط فرآیند عملیات حرارتی انجام شود که دلیل آن نیز مشابه بودن شیب نمودارهای تنش-عمر نمونه عملیات حرارتی‌شده با نمودار تنش-عمر نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده است که خود گواه بر این موضوع است که در رفتار خستگی آلیاژ مورد مطالعه، عملیات حرارتی غالب بر افزودن نانوذره است. دلیل دیگر افزایش عمر خستگی در نمونه عملیات حرارتی‌شده نسبت به نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده، این است که درصد کرووی بودن فاز Si و فازهای بین فلزی (مطابق با جدول ۵) در نمونه پیستون عملیات حرارتی‌شده، بیشتر از ۵۱٪ بوده است و این در حالی است که در سایر نمونه‌ها، حداقل یکی از سه فاز، درصد کرووی بودن کمتر از ۵۰٪ داشتند. به عبارت دیگر، حداقل یکی از این فازها در نمونه پیستون (شامل فاز سیلیسیوم)، نمونه نانوپيستون (شامل فاز سیلیسیوم و فاز بین فلزی آلومینیوم-نیکل) و نمونه نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده (شامل فاز بین فلزی آلومینیوم-نیکل)، بیشتر سوزنی‌شکل شده‌اند که خود می‌تواند عاملی بر تمرکز تنش و کاهش عمر خستگی ماده باشد.

جدول ۶ درصد بهبود عمر خستگی آلیاژهای نانوپيستون، پیستون عملیات حرارتی‌شده و نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده نسبت به آلیاژ پیستون در بیشترین و کمترین سطح تنش

آلیاژها نسبت به آلیاژ پیستون	بیشترین سطح تنش	کمترین سطح تنش
نانوپيستون	۵۴۹	۳۰۴
پیستون عملیات حرارتی‌شده	۲۱۴۶	۴۱۱
نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده	۱۰۲۱	۲۳۷

با استفاده از برازش منحنی بر داده‌های تنش-عمر و نیز مقایسه معادله منحنی برازش‌شده با رابطه ۳، ضریب استحکام خستگی و توان استحکام خستگی برای آلیاژهای پیستون، نانوپيستون، پیستون عملیات حرارتی‌شده و نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده،



نمودار ۳ تنش (مگاپاسکال) برحسب عمر (سیکل) برای همه داده‌های خستگی؛ الف) پیستون و نانوپيستون، ب) پیستون و پیستون عملیات حرارتی‌شده T6، ج) پیستون و نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده T6

مقدار بهبود عمر خستگی برای نانوپيستون، پیستون عملیات حرارتی‌شده T6 و نانوپيستون عملیات حرارتی‌شده T6 نسبت به آلیاژ پیستون برای بیشترین و کمترین سطح تنش در جدول ۶ گزارش شده است. مطابق با این جدول، بهبود عمر خستگی در رژیم کم‌چرخه (بیشترین سطح تنش) قابل ملاحظه‌تر است. نتایج مشابه با پیستون عملیات حرارتی‌شده T6 در پژوهش هسکل و همکاران [28] بر روی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم مورد استفاده در سرسیلندر خودرو مشاهده شده است. آنها نشان دادند که عملیات حرارتی T6 باعث بهبود عمر خستگی در رژیم کم‌چرخه می‌شود.

با حداقل ضریب تعیین (R^2) ۸۱٪ به دست آمد. این مقادیر در جدول ۷ گزارش شده است. مطابق با داده‌های این جدول، ضریب استحکام خستگی و توان استحکام خستگی آلیاژهای نانوپیستون، پیستون عملیات حرارتی شده T6 و نانوپیستون عملیات حرارتی شده T6

نسبت به آلیاژ پیستون افزایش یافته است. این امر بیانگر آن است که استفاده از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، عملیات حرارتی و یا ترکیب این دو فرآیند، سبب افزایش استحکام خستگی و در نتیجه بهبود عمر خستگی آلیاژ پیستون شده است.

جدول ۷) ثوابت خستگی پرچرخه استخراج شده از آزمون تجربی برای نمونه‌های مختلف

آلیاژ	کل داده‌های آزمون			میانگین داده‌های آزمون		
	R^2 (%)	σ_f	b	R^2 (%)	σ_f	b
پیستون	۸۵	۴۹۳/۰۶۰	-۰/۱۱۲۹	۹۲	۵۳۴/۰۷۲	-۰/۱۱۲۹
نانوپیستون	۸۱	۶۵۰/۱۳۰	-۰/۱۱۸۱	۹۹	۶۵۷/۲۰۴	-۰/۱۱۸۱
پیستون عملیات حرارتی شده	۹۵	۱۵۵۴/۱۷۵	-۰/۱۸۵۳	۹۹	۱۶۴۱/۳۴۵	-۰/۱۸۵۳
نانوپیستون عملیات حرارتی شده	۸۵	۱۱۵۱/۵۹۶	-۰/۱۸۰۹	۹۴	۱۳۸۳/۸۸۵	-۰/۱۸۰۹

نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر مکانیزم‌های استحکام‌بخشی شامل افزودن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، اجرای عملیات حرارتی T6 و ترکیب این دو فرآیند بر آلیاژ پیستون، با هدف بهبود عمر خستگی پرچرخه خمشی بررسی شده است. نتایج زیر حاصل شده است:

۱- آلیاژ پیستون شامل فازهای Si، AlSi، AlCu₃ و AlNi است که در فاز α -Al پخش شده‌اند.

۲- اضافه کردن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم باعث کاهش ابعاد فاز بلوکی Si می‌شود و پخش فازهای بین فلزی را همگن‌تر می‌کند. با انجام فرآیند عملیات حرارتی T6 بر روی آلیاژ پیستون، فاز Si از حالت بلوکی شکل به صورت رسوبات بزرگ سوزنی‌شکل و رسوبات کوچک شبه کروی تبدیل شد که به صورت همگن در فاز α -Al پخش شده‌اند. علاوه بر آن، اندازه فازهای بین فلزی افزایش چشمگیری داشت. همچنین اجرا عملیات حرارتی T6 بر روی نانوپیستون در مقایسه با آلیاژ پیستون، باعث افزایش مقدار فازهای بین فلزی در سطح شده است. در مجموع کروی شدن فاز Si، افزایش فازهای بین فلزی و پخش همگن فازها، زمینه‌ساز بهبود استحکام و خواص مکانیکی و خستگی می‌شود.

۳- با بررسی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از نانوپیستون، مشخص شد که توزیع ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینیومی، مناسب است.

۴- استفاده از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، عملیات حرارتی T6 و ترکیب این دو فرآیند بر آلیاژ پیستون در کمترین مقدار خود باعث بهبود عمر خستگی به میزان ۳۰۴، ۴۱۱ و ۲۳۷٪ شده است.

۵- بهبود رفتار خستگی با فرآیند صرفاً عملیات حرارتی T6، بیشتر از بهبود با افزودن نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم و عملیات حرارتی T6، به طور همزمان شد.

۶- استفاده از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، عملیات حرارتی T6 و یا ترکیب این دو فرآیند، سبب بهبود ضریب استحکام خستگی و توان استحکام خستگی آلیاژ پیستون می‌شود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت موتورسازی پویانستانک، و همچنین مدیران و کارشناسان آن شرکت،

بابت تامین مواد خام اولیه و کمک‌های ایشان در اجرای فرآیند ریخته‌گری، اعلام می‌دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان، با متن مقاله موافق بوده و برای ارسال آن به مجله مکانیک مدرس، توافق دارند. ضمناً اصالت نتایج این مقاله را تأیید می‌کنند.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارضی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: محمد آزادی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ سعید رضائزاد (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ مهرداد ذوالفقاری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)؛ محبوبه آزادی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۵٪).

منابع مالی: بخشی از منابع مالی (به صورت تهراتری) توسط شرکت موتورسازی پویانستانک و بخشی دیگر توسط دانشگاه سمنان (از طریق گرنت پژوهشی)، تامین شده است.

فهرست علائم

σ_f	ضریب استحکام خستگی (MPa)
σ_a	توان استحکام خستگی
b	عمر خستگی (Cycle)
N_f	دامنه تنش (MPa)

منابع

- 1- Sadeler R, Totik Y, Gavgali M, Kaymaz I. Improvements of fatigue behaviour in 2014-Al alloy by solution heat treating and age-hardening, *Materials & Design*. 2004;25(5):439-445.
- 2- Azadi M, Zolfaghari M, Rezanezhad S, Azadi M. Effects of SiO₂ nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix composites by different dispersion methods. *Applied Physics A*. 2018;124:377.
- 3- Azadi M, Shirazabad MM. Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356. 0 aluminum alloy. *Materials & Design*. 2013;45:279-285.
- 4- Wang M, Pang J, Li S, Zhang Z. Low-cycle fatigue properties and life prediction of Al-Si piston alloy at elevated temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;704:500-520.
- 5- Azadi M, Zolfaghari M, Rezanezhad S, Azadi M. Preparation of various aluminium matrix composites reinforcing by nano-particles with different dispersion

AlSi12Cu4Ni3 under thermo-mechanical fatigue with superimposed high-cycle fatigue loading. *International Journal of Fatigue*. 2013;53:67-74.

19- Han L, Sui Y, Wang Q, Wang K, Jiang Y. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;695:1566-1572.

20- Salehi A, Babakhani A, Zebarjad SM. Microstructural and mechanical properties of Al-SiO₂ nanocomposite foams produced by an ultrasonic technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;638:54-59.

21- Weixi S, Bo G, Ganfeng T, Shiwei L, Yi H, Fuxiao Y. Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic Al-15% Si alloy. *Journal of Rare Earths*. 2010;28(Suppl 1):367-370.

22- Chong C, Liu ZX, Bo R, Wang MX, Weng YG, Liu ZY. Influences of complex modification of P and RE on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007;17(2):301-306.

23- Liao H, Sun Y, Sun G. Correlation between mechanical properties and amount of dendritic α -Al phase in as-cast near-eutectic Al-11.6% Si alloys modified with strontium. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;335(1-2):62-66.

24- Sunil B, Rajeev V, Jose S. A statistical study on the dry wear and friction characteristics of Al-12.6 Si-3Cu-(2-2.6 wt.%) Ni piston alloys. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(1):1131-1137.

25- Zhu M, Jian Z, Yang G, Zhou Y. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties and fracture behavior of the modified A356 alloys. *Materials & Design*. 2012;36:243-249.

26- Pio LY. Die cast A356 aluminium alloy. *Journal of Applied Sciences*. 2011;11:2048-2052.

27- 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.

28- 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;114:1-10.

29- Myriounis D, Matikas T, Hasan S. Fatigue behaviour of SiC particulate-reinforced A359 aluminium matrix composites. *Strain*. 2012;48(4):333-341.

methods. *Proceedings of Iran International Aluminium Conference*; 2018 April 24-25; Tehran: IIAC; 2018.

6- Zeren M. The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys. *Materials & Design*. 2007;28(9):2511-2517.

7- Divagar S, Vigneshwar M, Selvamani S. Impacts of nano particles on fatigue strength of aluminum based metal matrix composites for aerospace. *Materials Today: Proceedings*. 2016;3(10):3734-3739.

8- Raju PRM, Rajesh S, Raju KSR, Raju VR. Evaluation of fatigue life of Al2024/Al₂O₃ particulate nano composite fabricated using stir casting technique. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(2):3188-3196.

9- Mazahery A, Abdizadeh H, Baharvandi H. Development of high-performance A356/nano-Al2O₃ composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;518(1-2):61-64.

10- Han G, Zhang W, Zhang G, Feng Z, Wang Y. High-temperature mechanical properties and fracture mechanisms of Al-Si piston alloy reinforced with in situ TiB₂ particles. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;633:161-168.

11- Gmbh M, editors. *Pistons and engine testing*. Berlin: Springer; 2012.

12- ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and fracture. Geauga County: ASM International; 1996.

13- Mollaei M, Azadi M, Tavakoli H. A parametric study on mechanical properties of aluminum-silicon/SiO₂ nanocomposites by a solid-liquid phase processing. *Applied Physics A*. 2018;124(7):1-6.

14- Azadi M, Rezanezhad S, Zolfaghari M. Effects of various ageing heat treatments on microstructural features and hardness of piston aluminum alloy. *International Journal of Engineering*. 2019;32(1):92-98.

15- Kieppura RT, Sanders BR, editors. *ASM Handbook volume 9: Metallography and microstructures*. Geauga County: ASM International; 1985.

16- 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.

17- Basquin O. The exponential law of endurance tests. *American Society for Testing and Materials Proceedings*. 1910;10:625-630.

18- Humbertjean A, Beck T. Effect of the casting process on microstructure and lifetime of the Al-piston-alloy