



بررسی اثرات دما و افزودن نانو ذرات اکسید سیلیسیم بر خواص مکانیکی دما بالا برای آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم پیستون

محمد آزادی^{1*}، آرش نادری²، عبدالحسین فریدون³

1- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی 19111-35131، m_azadi@semnan.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق اثر افزودن نانو ذرات سیلیسیم بر خواص مکانیکی دما بالا و دما محیط آلیاژ آلومینیوم پیستون بررسی شده است. نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم به صورت ریخته‌گری ثقلی در قالب چدنی تهیه شدند اما نمونه‌های نانو کامپوزیتی با روش ریخته‌گری گردابی و با اضافه کردن 1 درصد نانو ذرات اکسید سیلیسیم به مذاب، تولید شدند. به دلیل شرایط کاری پیستون موتور در دمای بالا، آزمون‌های کشش در دماهای 25، 250، 275 و 300 درجه سانتی‌گراد و با نرخ 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. پس از آزمون، تحلیل حساسیت با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب روی نتایج آزمون انجام شد. نتایج آزمون نشان داد برای همه نمونه‌ها، افزایش دما روی تنش تسلیم، استحکام نهایی کشش و کرنش شکست اثرگذار بوده است. در نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم (بدون نانو ذرات سیلیسیم)، افزایش دما، تنش تسلیم و استحکام نهایی کشش را کاهش و کرنش شکست را افزایش داده است. برای نمونه‌های نانو کامپوزیتی نیز، افزایش دما سبب افزایش کرنش شکست و کاهش تنش تسلیم و استحکام نهایی کشش شد. بطور کلی، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ آلومینیوم (پایه)، بهبود داشته است. بر این اساس، مدول الاستیک در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، 23 درصد افزایش و مقدار ازدیاد طول نیز در همین دما، 18 درصد کاهش یافته است. همین مقادیر بهبود یافته در دمای 300 درجه سانتی‌گراد، به ترتیب برابر با 58 درصد افزایش و 25 درصد کاهش است. بهبود تنش تسلیم با اضافه شدن نانو به میزان 4 و 9 درصد به ترتیب در دماهای 25 و 300 درجه سانتی‌گراد بوده است. در انتها، سطوح شکست نمونه‌ها برای استخراج مکانیزم خرابی نیز، بررسی شده است. با وجود میکروترک‌ها، صفحات کلویج و شبه کلویج، در سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت، رفتار ماده به صورت شکست ترد، مشاهده گردید.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 1 اسفند 1399
داوری اولیه: 15 فروردین 1400
پذیرش: 21 اردیبهشت 1400

کلیدواژگان:

آلیاژ آلومینیوم پیستون
نانو کامپوزیت
آزمون کشش دما بالا
تحلیل حساسیت

Investigation of effects of the temperature and adding nano-SiO₂-particles on high-temperature mechanical properties for the piston aluminum-silicon alloy

Mohammad Azadi^{*}, Arash Naderi, Abdolhossein Freidoon

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 20 February 2021
First Decision: 4 April 2021
Accepted: 11 May 2021

Keywords:

Piston Aluminum Alloy
Nano-composite
High-temperature Tensile Testing
Sensitivity Analysis

Abstract

In this paper, the effect of adding silica nanoparticles on the high- and room-temperature mechanical properties of the piston aluminum alloy is investigated. Aluminum alloy samples were fabricated by gravity-casting in the cast iron mold. However, nano-composite specimens were produced by stir-casting and with the addition of 1% of nano-SiO₂-particles to the melt. Due to the working conditions of the engine piston at high temperatures, tensile tests were performed at temperatures of 25, 250, 275 and 300°C and at a rate of 1 mm/min. After the tests, the sensitivity analysis was performed on the test results using the Minitab software. The experimental results showed that for all samples, the temperature increase had an effect on the yield stress, the ultimate tensile strength and the fracture strain. In aluminum alloy samples, increasing the temperature led to decrease in the yield stress and the ultimate tensile strength and the fracture strain increased. For nano-composite specimens, increasing the temperature enhanced the fracture strain and decreased the yield stress and the ultimate tensile strength. In general, mechanical properties of the nano-composite improved compared to the aluminum alloy. Therefore, the elastic module at 25°C increased as 23% and the elongation at this temperature decreased as 18%. These improvements at 300°C was the increase of 58% and the decrease of 25%. The improvement in the yield stress was 4% and 9% at 25 and 300°C respectively, by adding nano-particles. Finally, the fracture surfaces of samples were examined in order to find the failure mechanism. Due to the existence of micro-cracks, cleavage and quasi-cleavage planes on the fracture surfaces of the aluminum alloy and the nano-composite, the material behavior was observed as a brittle fracture.

Please cite this article using:

Mohammad Azadi, Arash Naderi, Abdolhossein Freidoon, Investigation of effects of the temperature and adding nano-SiO₂-particles on high-temperature mechanical properties for the piston aluminum-silicon alloy, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 47- 58, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

با توجه به کاربردهای زیاد آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف و اهمیت سبک‌سازی سازه‌ها، امروزه از روش‌هایی به منظور بهبود خواص آنها ارائه شده است [1-4]. آلومینیوم به عنوان یک آلیاژ سبک با هدایت حرارتی زیاد، ایده‌آل برای استفاده به عنوان یک ماده پیستونی است. با این حال، استحکام کششی بسیار کم است. در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده از نانو ذرات به عنوان فاز تقویت کننده آلیاژهای آلومینیوم اشاره شده است [5، 6]. در این زمینه، فعالیت‌های پژوهشی زیادی انجام شده است که در ادامه، به برخی از آنها اشاره می‌شود.

الهاداری و همکاران [7]، اثر درصد عناصر مختلف در آلیاژ آلومینیوم را بر عمر خستگی و خواص کششی نمونه‌ها بررسی کردند. نتایج آزمون کشش نشان داد که با اضافه کردن ذرات Ti، Zr و V استحکام نهایی کشش بهبود یافت. مایریونیس و همکاران [8]، 20 درصد از حجم مذاب را با نانو ذرات سیلیسیم کاربرد پر کردند و با این کار زمینه آلومینیوم A359 را تقویت کردند. آنها مشاهده کردند نمونه‌ها با افزودن نانو ذرات استحکام نهایی کششی بیشتری دارند. همچنین عملیات حرارتی نیز سبب افزایش استحکام نهایی کشش شده است. دیواگر و همکاران [9]، از دو نوع نانو ذره برای تقویت زمینه آلومینیوم 7075 استفاده کردند. آنها 5 درصد وزنی آلومینا و 5، 10 و 15 درصد وزنی سیلیسیم کاربرد برای تقویت آلیاژ زمینه استفاده کردند. آنها برای ساخت نمونه‌های آزمون از روش ریخته‌گری گردابی استفاده کردند. مشاهده شد، افزودن نانو ذرات سبب بهبود عمر خستگی نمونه‌ها شده است. نمونه‌ها با 5 درصد وزنی آلومینا و 10 درصد وزنی سیلیسیم کاربرد بیشترین عمر را داشتند.

راجو و همکاران [10]، اثر تغییرات درصد ذرات تقویت کننده آلومینا را بر عمر خستگی آلیاژ 2024 بررسی کردند. نتایج آزمون نشان داد که نمونه‌های نانو کامپوزیت استحکام کششی بیشتری در مقایسه با آلیاژ پایه دارند. کانگ و چان [11]، ذرات آلومینا را با روش فشار ایزوتروپیک سرد به زمینه آلومینیوم اضافه کردند و اثر آن را در سختی و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که سختی و استحکام کششی نانو کامپوزیت‌ها در مقایسه با آلومینیوم افزایش یافته است. بیشترین مقدار بهبود خواص با افزودن 4 درصد وزنی از نانو ذرات حاصل گردیده است. همانث [12]، از میکرو ذرات سیلیس از 3 الی 12 درصد حجمی، برای تقویت آلیاژ آلومینیوم پیستون استفاده کردند. با افزودن نانو ذرات، استحکام نهایی کشش و تنش تسلیم افزایش یافت و بیشترین افزایش در

استفاده از 9 درصد وزنی از ذرات تقویت کننده، بود.

مظاهری و همکاران [13]، از روش گردابی برای افزودن نانو ذرات آلومینا به زمینه آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر استفاده کردند. نشان دادند که با افزودن نانو ذرات، بهبود چشمگیری در استحکام کششی ایجاد شد. بیشترین بهبود در نمونه با 2/5 درصد وزنی از نانو ذره مشاهده شد. روهانگی و همکاران [14]، از ترکیب دو نوع نانو ذره منیزیم به مقدار 5 درصد وزنی و سیلیس به مقدار 9 یا 13 درصد وزنی برای تقویت زمینه آلومینیوم A206 استفاده کردند. با افزودن نانو ذرات، سختی افزایش یافت. بیشترین افزایش سختی در نمونه با 9 درصد وزنی سیلیسیم و 5 درصد وزنی منیزیم مشاهده گردید. انصاری یار و همکاران [15]، از نانو ذرات منیزیم اکسید با ابعاد 50 نانومتر برای تقویت آلیاژ A356.1 استفاده کردند. آنها مشاهده کردند سختی نمونه‌های تقویت شده از نمونه پایه بیشتر بوده است. همچنین با افزایش دمای مذاب، عدد سختی نیز افزایش یافت. آنها همچنین دریافتند که نانو کامپوزیت‌ها در مقایسه با آلیاژ پایه از استحکام فشاری و کششی بیشتری برخوردار بودند.

سجادی و همکاران [16]، پژوهشی در خصوص ابعاد ذرات تقویت کننده آلومینا بر سختی و خواص متالورژیکی آلومینیوم سرسیلندر انجام دادند. مشاهدات حاکی از آن بود که نمونه‌های تقویت شده با نانو ذرات آلومینا در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده با میکرو ذرات آلومینا، سختی بالاتر و ریزساختار منظم‌تری داشتند. سجادی و همکاران [17]، از میکرو ذرات و نانو ذرات آلومینا برای تقویت آلومینیوم سرسیلندر استفاده کردند. با افزایش درصد نانو ذرات و یا کاهش اندازه آنها، میزان ترشوندگی آنها کم شد. سختی و استحکام فشاری نانو کامپوزیت‌ها بیشتر از آلومینیوم پایه بود و بالاترین سختی و استحکام فشاری از نانو کامپوزیت با 3 درصد ذرات تقویت کننده و سرعت هم زدن 300 دور بر دقیقه گزارش شده است. چوی و همکاران [18]، به منظور تقویت آلیاژ آلومینیوم پیستون با 20 درصد وزنی سیلیسیم، از نانو ذرات آلومینا استفاده کردند. ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های نانو کامپوزیتی در مقایسه با آلیاژ پایه افزایش داشت.

مظاهری و استادشعبانی [19]، از نانو ذرات سیلیسیم کاربرد با ابعاد 50 نانومتر برای تقویت زمینه آلومینیوم سرسیلندر استفاده کردند. مشاهدات آنها حاکی از افزایش سختی و استحکام کششی پس از افزودن نانو ذرات سیلیسیم کاربرد بوده است. آنها همچنین مشاهده کردند که با افزایش درصد ذرات تقویت کننده، اگرچه استحکام کششی افزایش یافته، اما نمونه‌ها

2- مواد و آزمون

ماده مورد مطالعه در این تحقیق، آلیاژ آلومینیوم پیستون است که شامل عنصر اصلی آلومینیوم و عناصر آلیاژی سیلیسیم، مس، نیکل و منیزیم می‌باشد. ضمناً نام تجاری آن به صورت $AlSi12Cu3Ni2Mg$ شناخته می‌شود. پس از تامین ماده اولیه (توسط شرکت موتورسازی پویانستانک، تولید کننده پیستون)، برای تهیه نمونه استاندارد آزمون کشش دما بالا، ابتدا عناصر تشکیل دهنده آن، با آزمون عنصرسنجی (کوانتومتری)، بررسی شد. جدول 1 نتایج آزمون کوانتومتری در مقایسه با مرجع [24] را نشان می‌دهد که مطابق با آن از صحت آلیاژ آلومینیوم پایه تهیه شده، اطمینان ایجاد شد.

نانو ذرات سیلیس از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان (با برند US Research Nanomaterials) خریداری شدند. این ذرات، با ابعاد حداکثر 30 نانومتر و به میزان 1 درصد وزنی که به عنوان تقویت کننده فاز آلومینیوم، استفاده شدند و میکرو ذرات آلومینیوم با اندازه حداکثر 45 میکرومتر، در فرآیند آسیاب کاری بکار برده شدند. هدف از آسیاب کاری سیاره‌ای، نشان دادن ذرات نانو بر روی ذرات میکرون آلومینیوم است تا از بهم چسبیدن و آگلومره شدن نانو ذرات سیلیس، بطور عمده، در مذاب جلوگیری شود. هدف دوم، توزیع مناسب در مذاب است، زیرا که در غیر این صورت، به دلیل چگالی کم نانو ذرات سیلیس در سطح، به صورت سرباره جمع خواهند شد [6، 22]. پس از فرایند آسیاب کاری، تصویر میکروسکوپ روبشی نشر میدانی¹ از پودرهای آسیاب کاری شده، تهیه گردیده است.

جدول 1 درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیوم پیستون

Table 1 The weight percent of piston aluminum alloy components		
عنصر	کوانتومتری	مرجع [24]
سیلیسیم	12/5	13-11
مس	2/4	4-2/5
منیزیم	0/74	1/2-0/5
نیکل	2/2	3-1/75
آهن	0/41	0/7 بیشینه
منگنز	0/3	0/3 بیشینه
تیتانیوم	0/02	0/2 بیشینه
روی	0/07	0/3 بیشینه
زیر کونیوم	0/003	0/2 بیشینه
وانادیم	0/01	1/8 بیشینه
کروم	0/005	0/05 بیشینه
آلومینیوم	عنصر پایه	عنصر پایه

ترددتر شده‌اند. کندپل و سینگ [20]، برای تقویت آلومینیوم 6061 از ذرات آلومینا و با روش ریخته‌گری گردابی استفاده کردند. آنها دریافتند که با افزایش درصد نانو ذرات آلومینا، سختی و استحکام کششی نمونه‌ها افزایش یافته است. در پژوهشی دیگر، اثر استفاده همزمان از نانو ذرات دی‌اکسید سیلیسیم و عملیات حرارتی بر عمر خستگی پرچرخه خمشی آلیاژ پیستون بررسی شد [21]. نتایج نشان داد که استفاده از نانو ذرات دی‌اکسید سیلیسیم، عملیات حرارتی T6 و استفاده همزمان از این دو فرآیند، باعث بهبود عمر خستگی به ترتیب به مقدار 304، 411 و 237 درصد شد. مطابق با داده‌های آزمون خستگی پرچرخه خمشی، ضریب استحکام خستگی آلیاژ آلومینیوم پیستون، با عملیات حرارتی و اضافه نمودن نانو ذرات، افزایش یافت [21].

در تحقیقی، خواص خستگی پرچرخه نانو کامپوزیت ماتریس آلومینیوم تحت بارهای خمشی استخراج شده و سپس با آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، توسط آزادی و همکاران مقایسه شد [22]. داده‌های تجربی نشان داد که ذرات نانو تأثیر مهمی بر طول عمر خستگی در چرخه بالا دارند. دلیل این بهبود خواص چرخه بالا می‌تواند دانه‌های ریز، سختی بالاتر، توزیع مناسب ذرات نانو در ماتریس آلومینیوم و مقاومت پیوند قوی‌تر در اتصال Al/Si باشد. با این حال، بر اساس سطوح شکست، همه نمونه‌ها به دلیل وجود صفحات شبه کلویج، رفتار تردی داشتند [22]. در یک تحقیق دیگر، تجزیه و تحلیل حساسیت ویژگی‌های مکانیکی و شکست در آلیاژ آلومینیوم برای یافتن اثر نرخ بارگذاری و ذرات نانو انجام شد [23]. نتایج بدست آمده نشان داد که تنش تسلیم، مدول الاستیک و ازدیاد طول، به تعامل هر دو عامل (ضرب اضافه شدن ذرات نانو و میزان نرخ بارگذاری) حساس بودند. علاوه بر این، سطح شکست نشان داد که با افزایش مقدار نرخ بارگذاری و افزودن ذرات نانو، میزان ترد بودن مواد افزایش می‌یابد [23].

بر اساس پیشینه تحقیق ذکر شده، بررسی کمی اثرات دو عامل دما و نانو ذرات بر خواص مکانیکی در آلیاژ آلومینیوم، با تحلیل رگرسیون، از نوآوری‌های این مقاله، محسوب می‌گردد. لذا در این مقاله، اثر افزودن نانو ذرات سیلیس به آلیاژ آلومینیوم پیستون در موتور خودرو، بر خواص مکانیکی آن در دمای محیط و دماهای 250، 275 و 300 درجه سانتی‌گراد بررسی شده و نتایج آن با نرم‌افزار مینی‌تب نیز، تحلیل حساسیت شده است. در انتها، سطوح شکست نمونه‌ها بررسی شده است.

¹ Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

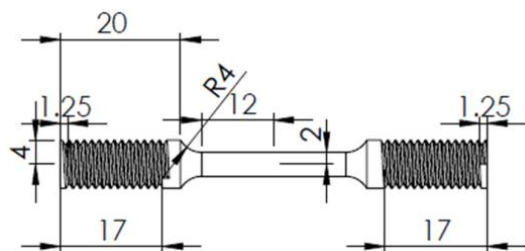


Fig. 1 The geometry of the high-temperature tensile test sample with thread

شکل 1 هندسه نمونه آزمون کشش دما بالا با رزوه

شرایط اثربخشی عوامل می‌تواند به شرح زیر باشد [29]:

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (2)$$

که در آن، $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ از آمار اعداد خروجی محاسبه می‌شود. سطح اطمینان 95 درصد در نظر گرفته شده و طبیعتاً مقدار خطا و ریسک α برابر 0/05 خواهد بود [29]. بطور کلی در تجزیه و تحلیل آماری، F-Value و P-Value را می‌توان برای پیدا کردن تأثیرگذاری و اثربخشی پارامترها استفاده کرد.

مقدار P-Value نشان می‌دهد که پیش‌بینی کننده به پاسخ واکنش ندارد [29]. P-Value برای مشخص کردن اثرگذاری عامل یا عوامل بر یک رفتار، بکار می‌رود. همان‌طور که اشاره شد، ریسک α برابر 0/05 در نظر گرفته شود و می‌توان این‌طور جمع‌بندی کرد که عواملی اثرگذار می‌باشد که P-Value آن کمتر از 0/05 باشد. مقدار F-Value نسبت واریانس باقی‌مانده در یک مدل پیش‌بینی در برابر بدون پیش‌بینی کننده است. همان‌طور که اشاره شد، F-Value بر اساس نسبت میانگین مربعات بدست می‌آید. F-Value برای این موضوع استفاده می‌شود که مفهوم و اهمیت مدل رگرسیونی را برای مقایسه مقادیر مختلف مدل‌ها، آزمون ترم‌های رگرسیونی خاص و آزمون برابری بیان کند [29].

3- یافته‌های تجربی و بحث

3-1- نتایج بررسی ریزساختاری

در این بخش، از کلمات آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت، به ترتیب، برای آلیاژ آلومینیوم پایه (بدون نانو ذرات) و آلیاژ آلومینیوم با تقویت کننده نانو ذرات، استفاده شده است. در ابتدا، کیفیت ساخت نانو کامپوزیت با استفاده از تصاویر میکروسکوپی ارزیابی می‌گردد. یکی از موارد مورد بحث در خصوص ساخت نانو کامپوزیت‌ها به روش ریخته‌گری، بررسی نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه است. یکنواخت بودن توزیع ذرات و عدم وجود نواحی تجمع ذرات سبب بهبود خواص مکانیکی نانو

برای اجرای فرایند ریخته‌گری، در ابتدا، شمش‌های آلومینیوم پیستون در کوره با دمای 750 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت [25]. پس از ذوب‌ریزی، نمونه‌های اولیه تولید شدند. برای تولید نانو کامپوزیت، نانو ذرات سیلیس به مقدار یک درصد وزنی در فویل آلومینیوم پیچیده شده و درون مذاب قرار گرفت. پس از اضافه کردن ذرات تقویت کننده به مذاب، مخلوط حاصل به مدت 2 دقیقه و با سرعت 100 دور بر دقیقه هم زده شد. پس از ریخته‌گری، نمونه‌های با و بدون نانو ذرات، با روش ماشینکاری CNC و طبق استاندارد ASTM-E8 [26]، نقشه نمونه آزمون کشش که در شکل 1 نشان داده شده است، ساخته شد. ریزساختار آلیاژ آلومینیوم پیستون، با و بدون ذرات نانو نیز، با میکروسکوپ نوری¹ مشاهده و بررسی شد.

آزمون‌های کشش در دماهای مختلف (25، 250، 275 و 300 درجه سانتی‌گراد)، بر اساس کاربرد مواد مورد مطالعه در پیستون موتور خودرو و دماهای کارکردی این قطعه [24]، انجام شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه STM-150 شرکت سنتام بهمراه یک کوره المنتی، طبق استاندارد ASTM-E8، با نرخ بارگذاری 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت. برای بررسی مکانیزم‌های شکست و آنالیز سطح آن، محل تخریب نمونه‌ها، با استفاده از میکروسکوپ روبشی نشر میدانی مشاهده شد.

برای درک صحیح عکس‌العمل یک خاصیت یا یک رفتار به داده‌های متغیر خروجی یک آزمایش و سپس بهینه‌سازی آن می‌توان از روش تحلیل حساسیت بهره برد که قسمتی از طراحی آزمایش‌ها می‌باشد. با استفاده از تحلیل آماری اعداد و خروجی‌ها تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد. یکی از اصول پایه‌ای که در این تحقیق رعایت شده، تکرار آزمایش است که دو خاصیت مهم را در بردارد. مورد اول آنکه خطای آزمایش را کمتر می‌کند، دیگری آنکه اگر از میانگین داده‌های آزمون تکرار شده، استفاده شود، می‌توان به نتیجه‌گیری دقیق‌تری رسید. اطلاعات کامل و بیشتر در مورد طراحی آزمایش‌ها و تحلیل حساسیت در مرجع [27] آمده است. تحلیل‌های آماری و حساسیت در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار Minitab انجام گرفته است.

مقدار MS میانگین مربعات اعداد خروجی و متغیرهای آزمون است و در ادامه با محاسبات $MS_{treatment}$ و MS_{error} که به ترتیب معرف میانگین مربعات اثر و خطا می‌باشد و همچنین مقایسه با مقدار مرجع، تحلیل حساسیت انجام شده است [28].

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (1)$$

¹ Optical microscopy (OM)

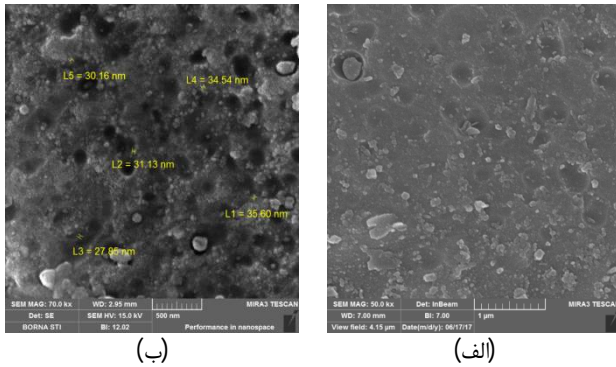


Fig. 2 Field emission scanning electron microscopy images of the distribution of reinforcing particles in the nano-composite matrix: with scale bar of (a) 1 micrometer and (b) 500 nm

شکل 2 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از نحوه پخش ذرات تقویت کننده در زمینه نانو کامپوزیت: با خط مقیاس (الف) 1 میکرومتر و (ب) 500 نانومتر

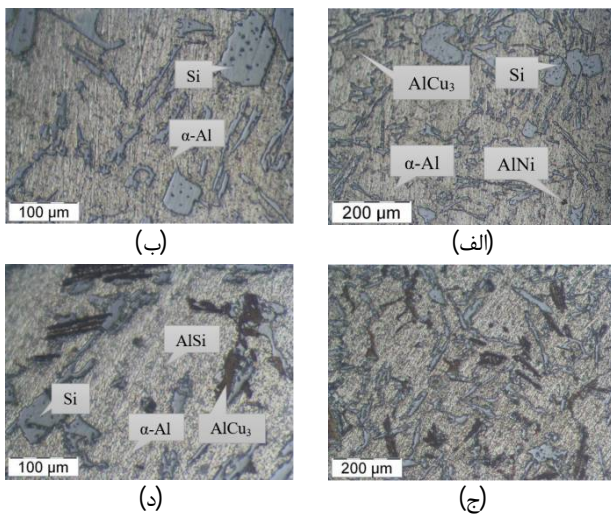


Fig. 3 The piston aluminum alloy microstructure: with magnification of (a) 200X and (b) 500X and the nano-composite microstructure: with magnification of (c) 200X and (d) 500X

شکل 3 ریزساختار آلیاژ آلومینیوم: با بزرگنمایی (الف) 200 و (ب) 500 برابر و ریزساختار نانو کامپوزیت: با بزرگنمایی (ج) 200 و (د) 500 برابر

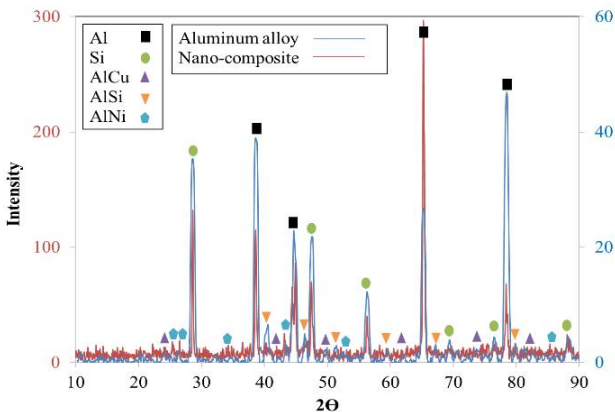


Fig. 4 The XRD pattern for the aluminum alloy and the nano-composite

شکل 4 الگوی XRD برای آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت

کامپوزیت در مقایسه با آلیاژ پایه شد. همچنین، وجود پیوند قوی بین ذرات تقویت کننده و زمینه نیز عاملی در جهت افزایش استحکام نمونه است [10، 30] عدم وجود تخلخل نیز از دیگر پارامترهای مهم در ریخته‌گری بشمار می‌آید [30]. به منظور بررسی کیفیت ساخت نمونه‌ها از دیدگاه متالورژیکی، از تصاویر میکروسکوپ روبشی نشر میدانی استفاده شده است. شکل 2 محل حضور نانو ذرات را در زمینه رصد کرده و وجود یا عدم وجود تخلخل در نمونه را نمایش می‌دهد که در آن زمینه، آلیاژ آلومینیوم پیستون است که با رنگ تیره‌تر مشاهده می‌شود. نانو ذرات با رنگ روشن‌تر در زمینه پخش شده‌اند. توزیع نانو ذرات در زمینه به صورت یکنواخت است و نقاط کلوخه شدن در اغلب نواحی با ابعاد کمتر از 100 نانومتر هستند و در مجموع، از دیدگاه متالورژیکی نمونه‌ها دارای کیفیت مطلوب هستند. در پژوهش‌های دیگر [5، 31] نیز توزیع نانو ذرات سیلیس در زمینه آلیاژ آلومینیوم پیستون، یکنواخت دیده شده است.

برای بررسی اثرگذاری نانو ذرات سیلیس روی آلیاژ آلومینیوم پیستون، ریزساختار نمونه‌های نانو کامپوزیت پس از ریخته‌گری گردابی، با ماده پایه مقایسه شد. در شکل 3 ریزساختار آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت نشان داده شده است. مطابق با این شکل، هر دو ماده چند فاز مشابه دارند. فاز اول و عمده که α -Al نام دارد، به شکل نواحی خاکستری روشن دیده می‌شود. فاز دیگر، Al-Si است که در زمینه به صورت همگن در ابعاد بسیار ریز توزیع شده است. فاز بعد، Si است که به حالت بلوکی از کریستال‌های چندوجهی به همراه شاخه‌های پرشمار، دیده می‌شود. نکته قابل توجه آنکه آلیاژهای آلومینیوم پیستون معمولاً دارای دو نوع فاز سیلیسیم به شکل غلاف‌های سوزنی و به صورت ذرات درشت هستند [32]. فاز دیگر Al-Ni است که ترکیبی بین‌فلزی است و به فرم بلوک‌های سیاه رنگ مشاهده می‌شود. فاز آخر Al-Cu است که آن نیز یک ترکیب بین‌فلزی است و با رنگ قهوه‌ای روشن دیده می‌شود [33]. این فازها در تحقیقی که توسط هان و همکاران انجام شده نیز مشاهده شده است [34].

برای اثبات وجود این فازها، نتایج آزمون XRD در شکل 4 نشان داده شده است که ترکیب شیمیایی فازهای موجود در زمینه را مشخص می‌کند. الگوی XRD نشان می‌دهد غالب‌ترین فاز در زمینه، Si است. با توجه به پیک‌های یکسان در شکل 4، ترکیب فازهای ریزساختار در دو ماده مورد مطالعه (آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت)، کاملاً مشابه هستند. نتایج آزمون EDX در تحقیقات پیشین [6، 33]، این نتایج را تأیید می‌کنند.

2-3- نتایج آزمون کشش

تکرارپذیری، تحت آزمون کشش قرار گرفتند که خواص مواد شامل تنش تسلیم (σ_y)، استحکام نهایی (σ_u)، مدول الاستیک (E) و درصد ازدیاد طول (e) در دماهای 25، 250، 275 و 300 درجه سانتی‌گراد، در جدول 2 آورده شده است. بطور کلی، با افزایش دما، جز در مواردی، طبق انتظار اولیه، خواص مکانیکی مواد کاهش یافته است. در دمای 250 درجه سانتی‌گراد، برخی از خواص شامل استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم، تنش تسلیم، استحکام کششی و مدول الاستیک نانو کامپوزیت، به مقدار کمی نسبت به دمای محیط، افزایش یافته است. دلیل این امر می‌تواند پدیده پیرسازی باشد که احتمالاً دمای 250 درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه پیرسازی و در نتیجه افزایش استحکام ماده است.

خیشه و همکاران [36، 37] نشان دادند که برای آلیاژ آلومینیوم A380 در طی یک فرایند عملیات حرارتی (شامل همگن‌سازی و پیرسازی در 200 درجه سانتی‌گراد برای 3 ساعت)، عمر خستگی خمشی پرچرخه ماده، بین 26 تا 85 درصد افزایش می‌یابد. ضمناً با این فرایند، سختی و استحکام کششی نیز در بیشینه مقدار قرار گرفت. آزادی [38] دمای پیرسازی 180 درجه سانتی‌گراد در 3 ساعت را برای آلیاژ آلومینیوم A356 لحاظ کرد و پاسخ تنش- کرنش ماده را استخراج نمود و آسیب خستگی ترمومکانیکی را تخمین زد.

آزادی و شیرازآباد [39]، دلیل افزایش استحکام و عمر خستگی کم‌چرخه در دمای 200 درجه سانتی‌گراد برای آلیاژ آلومینیوم A356 را تغییرات ریزساختاری در ماده، اعلام کردند. آزادی و همکاران [40]، آزمون‌های خستگی کم‌چرخه در دماهای مختلف روی آلیاژ آلومینیوم پیستون، با و بدون ذرات نانو رس را اجرا نمودند. نتایج آنها نشان داد که آلیاژ آلومینیوم در دمای 300 درجه سانتی‌گراد، دارای بیشترین عمر خستگی کم‌چرخه است و نمونه‌های نانو کامپوزیت نیز، در دمای 250 درجه سانتی‌گراد، عمر بیشتری نسبت به سایر دماها داشتند. دلیل این پدیده، کاهش رسوبات موجود در ریزساختار ماده در دمای مد نظر بوده است. این فازهای بین‌فلزی، معمولاً محلی برای ایجاد ترک در ریزساختار ماده هستند که با کاهش مقدار یا اندازه آنها، احتمال رخداد ترک، طبعاً کمتر می‌شود. لذا افزایش استحکام در این تحقیق، برای دمای 250 درجه سانتی‌گراد، می‌تواند همین تغییرات ریزساختاری شامل کاهش اندازه و مقدار رسوبات بین‌فلزی، بخصوص در نانو کامپوزیت است. در تحقیقات پیشین [۱، ۵، ۶، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۳۳، ۴۰]، اثبات شده بود که ذرات نانو باعث کوچکتر شدن ریزساختار و دانه‌بندی ماده، در نانو کامپوزیت در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم پایه می‌شود.

در این تحقیق، 22 نمونه آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت، تحت آزمون کشش قرار گرفتند. نتایج آزمون کشش در دماهای مختلف برای آلیاژ آلومینیوم، در شکل 5 نشان داده شده است. یکی از موارد مشهود در شکل 5 این است که با افزایش دمای آزمون، کرنش شکست در آلیاژ آلومینیوم افزایش یافته است که با نتایج تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد [22، 24]. در ادامه، نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های نانو کامپوزیتی در دماهای مختلف در شکل 6 آمده است. برای بررسی دقیق‌تر داده‌های تجربی از تحلیل حساسیت استفاده شده است که در بخش بعدی، ارائه شده است.

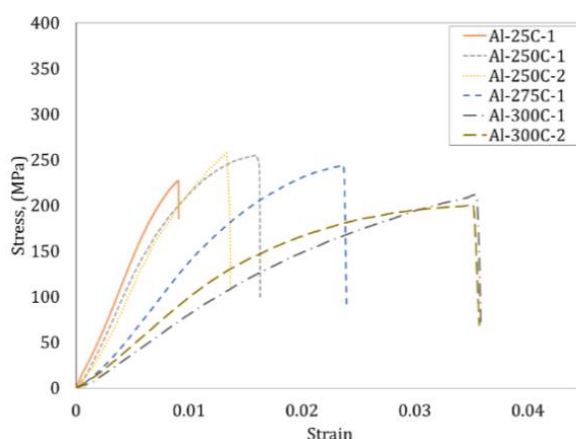


Fig. 5 The diagram for the stress (MPa) versus the strain (mm/mm) of aluminum alloy samples at different temperatures

شکل 5 نمودار برای تنش (MPa) بر حسب کرنش (mm/mm) نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم در دماهای مختلف

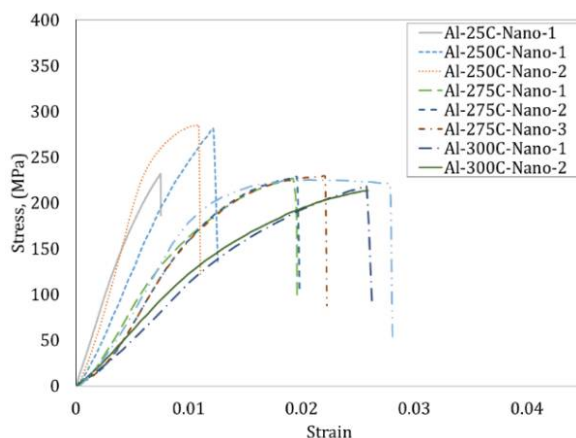


Fig. 6 The diagram for the stress (MPa) versus the strain (mm/mm) of nano-composite samples at different temperatures

شکل 6 نمودار برای تنش (MPa) بر حسب کرنش (mm/mm) نمونه‌های نانو کامپوزیتی در دماهای مختلف

نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی، با لحاظ کردن

ترتیب برابر با 4، 2 و 23 درصد افزایش و 18 درصد کاهش، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، افزایش یافته است. همین مقادیر برای دمای 300 درجه سانتی‌گراد، به ترتیب برابر با 7، 58 درصد افزایش و 25 کاهش داشته است. به عبارت دیگر، فرایند تقویت‌کنندگی ذرات نانو، به مفهوم افزایش استحکام و کاهش میزان شکل‌پذیری، به خوبی نقش خود را ایفا کرده‌اند.

3-3- نتایج تحلیل حساسیت

بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیون، P-Value و ضرایب تعیین R² در جدول 3 ذکر شده است که اثرگذار بودن یا نبودن دما بر خواص مکانیکی را مشخص می‌کند. شایان ذکر است که مقدار R² بیان‌کننده آن است که منحنی حاصل از معادله رگرسیونی مد نظر، تا چه اندازه با نقاط روی نمودار انطباق دارد [35].

مطابق با جدول 3، فرمول‌های خواص مکانیکی بر حسب دما برای آلیاژ آلومینیوم در تحلیل رگرسیون به صورت روابط (3) تا (6) می‌باشند:

$$E = 75.30 - 0.0280 \times T - 0.000600 \times T^2 \quad (3)$$

$$e = 0.02 - 0.0003 \times T + 0.000001 \times T^2 \quad (4)$$

$$\sigma_y = 138.50 + 1.8420 \times T - 0.00646 \times T^2 \quad (5)$$

$$\sigma_u = 206.30 + 1.4250 \times T - 0.00469 \times T^2 \quad (6)$$

مطابق با جدول 3، فرمول‌های خواص مکانیکی بر حسب دما برای نانو کامپوزیت در تحلیل رگرسیون به صورت روابط (7) تا (10) می‌باشند:

$$E = 352.00 - 2.1500 \times T + 0.003400 \times T^2 \quad (7)$$

$$e = 0.01 - 0.0003 \times T + 0.000001 \times T^2 \quad (8)$$

$$\sigma_y = 183.30 + 0.9580 \times T - 0.00395 \times T^2 \quad (9)$$

$$\sigma_u = 200.13 + 1.2770 \times T - 0.00418 \times T^2 \quad (10)$$

برای تنش تسلیم نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده نیز 94/25 درصد بدست آمد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو پایین‌تر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که تنش تسلیم به دما حساس است. در جدول 2، با افزایش دمای آزمون، تنش تسلیم در نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم کاهش می‌یابد. برای استحکام نهایی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم نیز، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده، 90/97 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار و صحیح می‌باشد.

جدول 2 مقادیر خواص مکانیکی در دماهای مختلف برای نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی (اندیس 1، 2 و 3: آزمون شماره 1، 2 و 3)
Table 2 Values of mechanical properties at different temperatures for aluminum alloy and nano-composite samples (Index 1, 2 and 3: Test Number 1, 2 and 3)

خواص ماده	دمای آزمون کشش (درجه سانتی‌گراد)				تقویت کننده	ماده
	300	275	250	25		
$\sigma_{y,1}$ (MPa)	111/5	151/9	168/6	189/0	-	
$\sigma_{y,2}$ (MPa)	117/0	-	181/0	-	-	
انحراف معیار (MPa)	2/766	0	6/189	0	-	
$\sigma_{u,1}$ (MPa)	209/9	243/6	254/5	226/9	-	
$\sigma_{u,2}$ (MPa)	199/6	-	256/5	-	-	
انحراف معیار (MPa)	5/164	0	1/033	0	-	
E_1 (GPa)	8/2	14/2	24/8	28/6	-	
E_2 (GPa)	10/2	-	23/7	-	-	
انحراف معیار (GPa)	0/987	0	0/551	0	-	
e_1 (%)	3/59	2/40	1/63	0/91	-	
e_2 (%)	3/57	-	1/37	-	-	
انحراف معیار (%)	0/009	0	0/133	0	-	
$\sigma_{y,1}$ (MPa)	124/0	121/4	233/4	196/2	-	با نانو ذرات
$\sigma_{y,2}$ (MPa)	121/7	125/0	212/0	-	-	با نانو ذرات
$\sigma_{y,3}$ (MPa)	128/8	125/4	-	-	-	با نانو ذرات
انحراف معیار (MPa)	2/945	1/823	10/697	0	-	با نانو ذرات
$\sigma_{u,1}$ (MPa)	218/0	226/0	280/3	231/8	-	با نانو ذرات
$\sigma_{u,2}$ (MPa)	213/4	228/2	284/7	-	-	با نانو ذرات
$\sigma_{u,3}$ (MPa)	225/1	228/9	-	-	-	با نانو ذرات
انحراف معیار (MPa)	4/814	1/264	2/178	0	-	با نانو ذرات
E_1 (GPa)	11/6	19/0	41/6	35/1	-	با نانو ذرات
E_2 (GPa)	12/8	17/4	26/5	-	-	با نانو ذرات
E_3 (GPa)	19/3	17/4	-	-	-	با نانو ذرات
انحراف معیار (GPa)	3/395	0/748	7/535	0	-	با نانو ذرات
e_1 (%)	2/63	1/96	1/26	0/75	-	با نانو ذرات
e_2 (%)	2/59	1/98	1/10	-	-	با نانو ذرات
e_3 (%)	2/81	2/23	-	-	-	با نانو ذرات
انحراف معیار (%)	0/096	0/119	0/078	0	-	با نانو ذرات

مطابق با نتایج درج شده در شکل‌های 5 و 6 و جدول 2، می‌توان نتیجه گرفت که نانو کامپوزیت، خواص مکانیکی بهتری نسبت به آلیاژ آلومینیوم (پایه) داشته است. بر این اساس، تنش تسلیم، استحکام نهایی، مدول الاستیک و مقدار ازدیاد طول، به

جدول 3 تحلیل رگرسیون برای اثر دما بر خواص مکانیکی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی

Table 3 The regression analysis for the effect of mechanical properties of aluminum alloy and nano-composite samples

خواص مواد	تقویت کننده	P-Value			R ² (%)
		رگرسیون	دما	دما×دما	
σ_y	-	0/001	0/019	0/007	94/25
σ_u	-	0/002	0/001	0/001	90/97
E	-	0/119	0/594	0/794	57/32
e	-	0/000	0/002	0/001	97/83
σ_y	با نانوذرات	0/034	0/040	0/028	57/02
σ_u	با نانوذرات	0/006	0/003	0/002	71/69
E	با نانوذرات	0/006	0/948	0/664	71/73
e	با نانوذرات	0/000	0/001	0/000	92/66

250 درجه سانتی‌گراد تا 300 درجه سانتی‌گراد تنش تسلیم کاهش می‌یابد. برای استحکام نهایی نمونه‌های نانو کامپوزیتی، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده نیز 71/69 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو پایین‌تر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که استحکام نهایی به دما حساس است. با توجه به جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آزمون از 25 درجه سانتی‌گراد به 250 درجه سانتی‌گراد، استحکام نهایی افزایش یافته است و با افزایش دما از 250 درجه سانتی‌گراد تا 300 درجه سانتی‌گراد استحکام نهایی کاهش می‌یابد. برای مدول الاستیک نمونه‌های نانو کامپوزیتی، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده نیز 71/73 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو، بالاتر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که مدول الاستیک به دما حساس نمی‌باشد. برای درصد ازدیاد طول نمونه‌های نانو کامپوزیتی، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده نیز 92/66 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو، پایین‌تر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که درصد ازدیاد طول به دما حساس است. با توجه به جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آزمون، درصد ازدیاد طول نیز، افزایش می‌یابد.

3-4- نتایج بررسی سطوح شکست

تصاویر میکروسکوپ روبشی نشر میدانی از سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دماهای 25، 250، 275 و 300 درجه سانتی‌گراد، در شکل 7 قابل مشاهده است. در مجموع، با مشاهده صفحات کلیویج¹، تیرریج² و میکروتُرک‌ها، میکروتُرک‌ها، می‌توان این‌گونه برداشت نمود که شکست ماده، بطور کلی از نوع رفتار شکست ترد بوده است [22].

با مقایسه تصاویر شکل‌های 7- الف و ب که سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دمای 25 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که اضافه کردن نانو ذرات، سبب تعدد صفحات کلیویج در نمونه شده است. وجود این صفحات کلیویج حاکی از شکست ترد است. با مشاهده

همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو پایین‌تر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که استحکام نهایی به دما حساس است. با توجه به جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آزمون از 25 تا 250 درجه سانتی‌گراد، استحکام نهایی افزایش می‌یابد و با افزایش دما از 250 تا 300 درجه سانتی‌گراد استحکام نهایی در نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم کاهش می‌یابد. برای مدول الاستیک نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم، مقدار P-Value رگرسیون بالاتر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده 57/32 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار نمی‌باشد. مقدار P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو، بالاتر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که مدول الاستیک به دما حساس نمی‌باشد. برای درصد ازدیاد طول نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده 97/83 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو، پایین‌تر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که درصد ازدیاد طول به دما حساس است. با توجه به جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آزمون، درصد ازدیاد طول نیز، افزایش می‌یابد. برای تنش تسلیم نمونه‌های نانو کامپوزیتی، مقدار P-Value رگرسیون پایین‌تر از 0/05 و مقدار R² بدست آمده نیز 57/02 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای دمای درجه یک و دو، پایین‌تر از 0/05 می‌باشد که به این معنی است که تنش تسلیم به دما حساس است. با توجه به جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آزمون از 25 درجه سانتی‌گراد به 250 درجه سانتی‌گراد تنش تسلیم افزایش یافته است و با افزایش دما از

¹ Cleavage planes

² Tear-ridge

گاهی مرزدانه‌ها نیز محل شکست بوده‌اند [45].

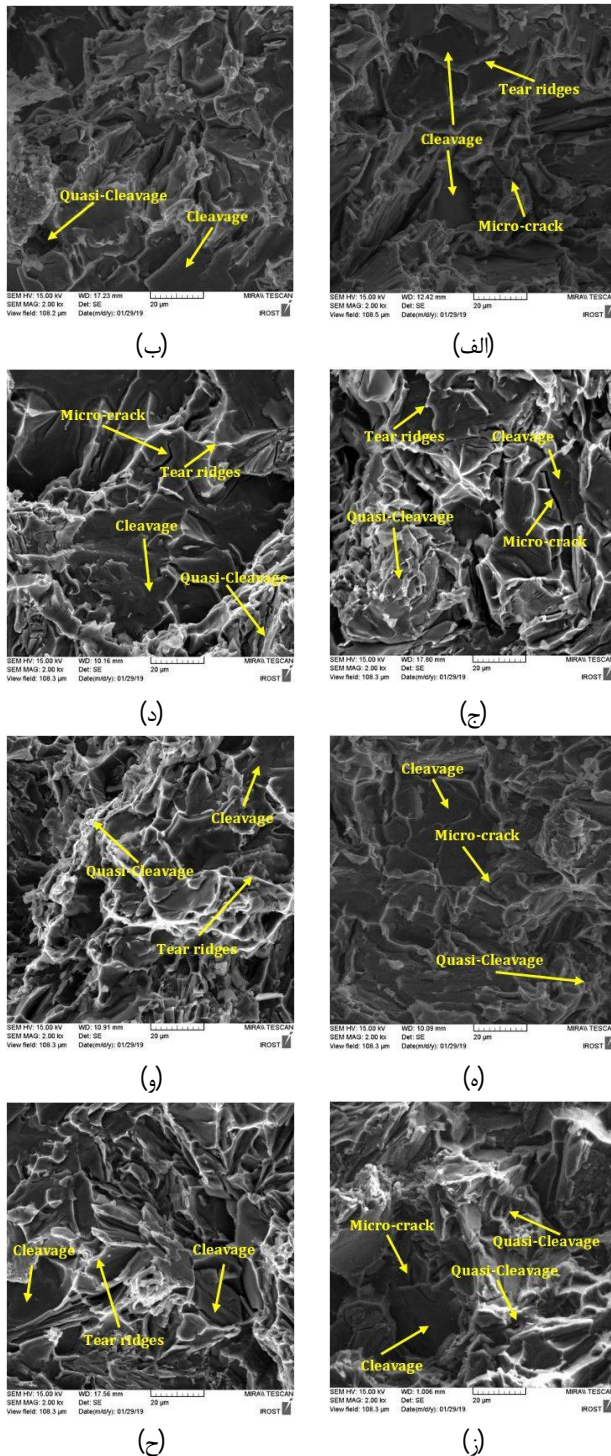


Fig. 7 Images of the fracture surface at 25 °C: (a) aluminum alloy and (b) nano-composite, at 250 °C: (c) aluminum alloy and (d) nano-composite, at 275 °C: (e) aluminum alloy and (f) nano-composite at 300 °C: (g) aluminum alloy and (h) nano-composite

شکل 7 تصاویر سطح شکست در دمای 25 درجه سانتی‌گراد: (الف) آلیاژ آلومینیوم و (ب) نانو کامپوزیت، در دمای 250 درجه سانتی‌گراد: (ج) آلیاژ آلومینیوم و (د) نانو کامپوزیت، در دمای 275 درجه سانتی‌گراد: (ه) آلیاژ آلومینیوم و (و) نانو کامپوزیت، در دمای 300 درجه سانتی‌گراد: (ز) آلیاژ آلومینیوم و (ح) نانو کامپوزیت

نواحی شبه‌کلیویج¹، شکست به سمت شکست نرم تمایل دارد اما تعدد صفحات کلیویج بیانگر ترد بودن شکست است. افزودن نانو ذرات، سبب تردتر شدن شکست شده است.

با مشاهده شکل‌های 7- ج و د که سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دمای 250 درجه سانتی‌گراد مشخص است که نواحی شبه‌کلیویج و حتی در یک ناحیه، دیمپل² در نمونه آلیاژ آلومینیوم وجود دارد که نشان از شکست نرم است. نواحی کلیویج نیز در این نمونه مشاهده می‌گردد اما با اضافه کردن نانو ذرات به ماده پایه، عملاً ابعاد صفحات کلیویج بیشتر شده و شکست ماده، کاملاً ترد شده است.

شکل‌های 7- ه و و سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دمای 275 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها، با افزایش دما، ابعاد صفحات کلیویج کوچک‌تر شده است و رفتار شکست به سمت شکست نرم رفته و تعدد صفحات کلیویج بیشتر شده است. اضافه کردن نانو ذرات سیلیس که معمولاً باعث تمایل ماده پایه به سمت رفتار ترد است، در این مورد، در برابر اثر دما، پدیده غالب نبوده و لذا رفتار شکست نانو کامپوزیت، نرم‌تر شده است.

شکل‌های 7- ز و ح سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دمای 300 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. دمای 300 درجه سانتی‌گراد، باعث شکست نرم در نمونه‌ها شده است. افزودن نانو ذرات صفحات کلیویج را متعدد کرده و رفتار شکست را به شکست ناگهانی و ترد تبدیل کرده است. صفحات کلیویج در شکست آلیاژ آلومینیوم پیستون در پژوهش‌هایی که توسط ژانگ و همکاران [41، 42] انجام شده است، دیده شده است. وانگ و همکاران [43] در بررسی سطح آلومینیوم نواحی شبه‌کلیویج نیز مشاهده کردند. آنها در برخی از نقاط سطح شکست، نواحی میکرو دیمپل مشاهده کردند که حاکی از آن است که شکست کاملاً از نوع ترد نبوده و در برخی نواحی شکست، به شکست نرم متمایل شده است. در پژوهشی که توسط دیواگر و همکاران [9] بر آلیاژ تقویت‌شده با نانو ذرات سیلیس انجام شده، در سطح شکست نواحی شبه‌کلیویج مشاهده شده است. هان و همکاران [44] در سطح شکست آلیاژ پیستون تقویت شده با نانو ذرات TiB_2 ، صفحات کلیویج مشاهده کردند. آنها شکست آلیاژ تقویت شده را دمای اتاق از نوع شکست ترد تشخیص دادند اما با این حال، نواحی شبه‌کلیویج نیز در سطح شکست، مشاهده کردند. اغلب شکست از فاز Si رخ داده اما

¹ Quasi-cleavage
² Dimple

کامپوزیتی در دمای 300 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که شکست در این نمونه‌ها، به صورت نرم بوده است. افزودن نانو ذرات صفحات کلیویج را متعدد کرده و رفتار شکست را به شکست ناگهانی و ترد تبدیل کرده است.

- بطور کلی، افزودن نانو ذرات سیلیس، باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم (پایه)، هم در دمای محیط و هم در دمای بالا شد. مدول الاستیک ماده در دماهای 25 و 300 درجه سانتی‌گراد، 23 و 58 درصد افزایش داشت. تنش تسلیم ماده نیز، به ترتیب، 4 و 9 درصد، بهبود داشته است.

5- فهرست علائم

F	مقدار مرجع حساسیت
M	میانگین
E	مدول الاستیک، GPa
e	ضریب ازدیاد طول، درصد

علائم یونانی

a	مقدار خطا و ریسک
σ	تنش تسلیم، MPa
σ	استحکام نهایی، MPa

زیرنویس‌ها

e	خطا
t_i	اثر

6- مراجع

- [1] S. Rezanezhad, M. Azadi, M. Azadi, 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. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00498-7>
- [2] S. Mohammadi Esfarjani, M. Salehi, Damage identification in aluminium T3-2024 alloy via cross correlation functions, *The 15th International Conference of Iranian Aerospace*, March 1-3, Tehran, Iran, 2016. (in Persian)
- [3] S. Mohammadi Esfarjani, Evaluation of effect changing temperature on lamb-wave based structural health monitoring, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, Vol. 3(43), No.4, pp. 329-336, 2020. <https://doi.org/10.30464/jmee.2019.3.4.329>
- [4] S. Mohammadi Esfarjani, M. Salehi, Detection of metallic impurities in alloys using the IPV and AMV methods, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. XIII, No. 2, pp. 131-137, 2016.
- [5] M. Azadi, M. Zolfaghari, S. Rezanezhad, and M. Azadi, Effects of SiO₂ nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix

مکانیزم شکست، در هر دو ماده آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت مشابه، مطابق با تحقیقات پیشین [۳۷،۴۰]، ایجاد ترک از محل فازهای سیلیسیم و یا فازهای بین‌فازی Al-Fe و Al-Ni در زمینه آلومینیومی بوده است. دلیل آن نیز، اختلاف در مدول الاستیک و سختی این فازها با فاز زمینه است [40]. در ادامه، ترک‌ها در کنار ذرات سیلیسیم و در فاز زمینه، به دلیل ترد بودن آنها، رشد می‌کند [37]. برای مطالعه دقیق‌تر، نیازمند تهیه تصاویر میکروسکوپی بهمراه نتایج آزمون EDX می‌باشد که در تحقیقات بعدی، مدنظر قرار خواهد گرفت.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثرات دما و نانو ذرات سیلیس بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون، مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- برای نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم، دما بر تنش تسلیم اثرگذار است. با افزایش دما، تنش تسلیم کاهش یافته است. دما بر استحکام نهایی کشش نیز، اثرگذار است. با افزایش دما از 250 تا 300 درجه سانتی‌گراد، استحکام نهایی کششی کاهش یافته است.

- در هر دو نمونه آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت، دما بر کرنش شکست اثرگذار است. با افزایش دما، کرنش شکست هر دو ماده، افزایش یافته است. نکته قابل توجه، عدم تأثیرگذاری دما بر مدول الاستیک هر دو ماده است.

- برای نمونه‌های نانو کامپوزیتی، دما بر استحکام نهایی و تنش تسلیم اثرگذار است. با افزایش دما از 250 تا 300 درجه سانتی‌گراد، تنش تسلیم کاهش یافته است.

- سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دمای 25 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات، سبب تردتر شدن شکست شده است.

- سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیتی در دمای 250 درجه سانتی‌گراد شامل شبه‌کلیویج و دیمپل (فقط در نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم) وجود دارد که نشان از شکست نرم است. با اضافه کردن نانو ذرات، ابعاد صفحات کلیویج بیشتر شده و شکست کاملاً ترد شده است.

- در دمای 275 درجه سانتی‌گراد، پدیده غالب اثر دما بوده است و اضافه کردن نانو ذرات به ماده پایه، نتوانسته است باعث شکست ترد شود. لذا در این مورد، شکست نرم‌تر بوده است.

- سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم و نانو

- casting, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 29–30, pp. 8765–8771, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.052>
- [18] H. Choi, H. Konishi, X. Li, Al₂O₃ nanoparticles induced simultaneous refinement and modification of primary and eutectic Si particles in hypereutectic Al–20Si alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 541, pp. 159–165, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.131>
- [19] A. Mazahery M. O. Shabani, Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 2, pp. 275–280, 2012.
- [20] B. C. Kandpal, J. Kumar, H. Singh, Fabrication and characterisation of Al₂O₃/aluminium alloy 6061 composites fabricated by stir casting, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 2783–2792, 2017.
- [21] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, Effect of simultaneous use of silica nanoparticles and heat treatment on high-cycle bending fatigue lifetime in piston aluminum alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 1463–1473, 2020. (in Persian)
- [22] M. Zolfaghari, M. Azadi, 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*, Vol. 15, pp. 152–168, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00437-y>
- [23] M. Azadi, M. Zomorodipour, A. Fereidoon, Sensitivity analysis of mechanical properties and ductile/brittle behaviors in aluminum–silicon alloy to loading rate and nano-particles, considering interaction effects, *Engineering Reports*, p. e12341, 2020. <https://doi.org/10.1002/eng2.12341>
- [24] Mahle GmbH, *Pistons and engine testing*. Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8662-0>
- [25] A. Dehghan Hamedan, M. Shahmiri, Production of A356-1wt% SiC nanocomposite by the modified stir casting method, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 921–926, 2012.
- [26] ASTM E8 / E8M - 16ae1; Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, (access 05 Feb 2021); <https://www.astm.org/Standards/E8>
- [27] S. Azadi, M. Azadi, F. Zahedi, NVH analysis and improvement of a vehicle body structure using DOE method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 11, pp. 2980–2989. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0909-z>
- [28] M. Azadi, M. Izziy, A. Marbout, M. Azadi, Optimization of solution temperature and time in nickel-based superalloy of engine turbo-charger based on hardness by design of experiment, *The Journal of Engine Research*, Vol. 43, p. 63, 2016. <http://engineerresearch.ir/article-1-509-en.html>
- [29] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley and Sons, 2009.
- [30] A. O. Inegbenebor, C. A. Bolu, P. O. Babalola, A. I. composites by different dispersion methods, *Applied Physics A*, Vol. 124, No. 5, p. 377, 2018.
- [6] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, and M. Azadi, Investigation of tribological and compressive behaviors of Al/SiO₂ nanocomposites after T6 heat treatment, *Sadhana*, Vol. 45, No. 1, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12046-019-1257-z>
- [7] H. A. Elhadari, H. A. Patel, D. L. Chen, W. Kasprzak, Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 28, pp. 8128–8138, 2011.
- [8] D. P. Myriounis, T. E. Matikas, S. T. Hasan, Fatigue behaviour of SiC particulate-reinforced A359 aluminium matrix composites, *Strain*, Vol. 48, No. 4, pp. 333–341, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00827.x>
- [9] S. Divagar, M. Vigneshwar, S. T. Selvamani, Impacts of nano particles on fatigue strength of aluminum based metal matrix composites for aerospace, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 3, No. 10, pp. 3734–3739, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.021>
- [10] 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*, Vol. 4, No. 2, pp. 3188–3196, 2017.
- [11] Y. C. Kang S. L. I. Chan, Tensile properties of nanometric Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum matrix composites, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 85, No. 2–3, pp. 438–443, 2004.
- [12] J. Hemanth, Quartz (SiO₂p) reinforced chilled metal matrix composite (CMMC) for automotive applications, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 323–329, 2009.
- [13] A. Mazahery, H. Abdizadeh, H. R. Baharvandi, Development of high-performance A356/nano-Al2O3 composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 518, No. 1–2, pp. 61–64, 2009.
- [14] P. K. Rohatgi, B. F. Schultz, A. Daoud, and W. W. Zhang, Tribological performance of A206 aluminum alloy containing silica sand particles, *Tribology International*, Vol. 43, No. 1–2, pp. 455–466, 2010.
- [15] A. A. Yar, M. Montazerian, H. Abdizadeh, and H. R. Baharvandi, Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy matrix composite reinforced with nano-particle MgO, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 484, No. 1–2, pp. 400–404, 2009.
- [16] S. A. Sajjadi, M. Torabi Parizi, H. R. Ezatpour, and A. Sedghi, Fabrication of A356 composite reinforced with micro and nano Al2O3 particles by a developed compocasting method and study of its properties, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 511, No. 1, pp. 226–231, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.08.105>
- [17] S. A. Sajjadi, H. R. Ezatpour, H. Beygi, Microstructure and mechanical properties of Al–Al2O3 micro and nano composites fabricated by stir

- loading, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 264, p. 124475, 2021.
- [38] M. Azadi, Cyclic thermo-mechanical stress, strain and continuum damage behaviors in light alloys during fatigue lifetime considering heat treatment effect, *International Journal of Fatigue*, Vol. 99, Part 2, pp. 303–314, 2017.
- [39] M. Azadi, M. M. Shirazabad, Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356.0 aluminum alloy, *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 279–285, 2013.
- [40] 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*, Vol. 788, p. 139497, 2020.
- [41] G. Zhnag, J. Zhang, B. Li, W. Cai, Characterization of tensile fracture in heavily alloyed Al-Si piston alloy, *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 21, No. 5, pp. 380–385, 2011.
- [42] G. Zhang, J. Zhang, B. Li, W. Cai, 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*, Vol. 561, pp. 26–33, 2013.
- [43] M. Wang, J. C. Pang, M. X. Zhang, H. Q. Liu, S. X. Li, Z. F. Zhang, Thermo-mechanical fatigue behavior and life prediction of the Al-Si piston alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 715, pp. 62–72, 2018.
- [44] G. Han, W. Zhang, G. Zhang, Z. Feng, Y. Wang, High-temperature mechanical properties and fracture mechanisms of Al–Si piston alloy reinforced with in situ TiB₂ particles, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 633, pp. 161–168, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.021>
- [45] M. Azadi, M. Zomorodipour, A. Fereidoon, Study of effect of loading rate on tensile properties of aluminum alloy and aluminum matrix nano-composite, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 1, pp. 9–18, 2021.
- Inegbenebor, O. S. I. Fayomi, Aluminum silicon carbide particulate metal matrix composite development via stir casting processing, *Silicon*, Vol. 10, No. 2, pp. 343–347, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12633-016-9451-7>
- [31] M. Mollaei, M. Azadi, H. Tavakoli, A parametric study on mechanical properties of aluminum–silicon/SiO₂ nano-composites by a solid–liquid phase processing, *Applied Physics A*, Vol. 124, No. 7, p. 504, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1929-2>
- [32] F. Zainon, K. Rafezi Ahmad, R. Daud, Effect of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Wear of Aluminum Alloy 332, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 786, pp. 18–22, 2015.
- [33] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, Effects of various ageing heat treatments on microstructural features and hardness of Piston aluminum alloy, *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*, Vol. 32, No. 1, pp. 92–98, 2019.
- [34] L. Han, Y. Sui, Q. Wang, K. Wang, Y. Jiang, Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 1–7, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.300>
- [35] M. Azadi, M. Alizadeh, H. Sayar, Sensitivity analysis for effects of displacement amplitude and loading frequency on low-cycle fatigue lifetime in carbon/epoxy laminated composites, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 165, p. 22021, 2018.
- [36] S. Khished, K. Khalili, M. Azadi, V. Zaker Hendoabadi, Heat treatment effect on microstructure, mechanical properties and fracture behavior of cylinder head aluminum-silicon-copper alloy, *The Journal of Engine Research*, Vol. 50, pp. 55–65, 2018.
- [37] S. Khished, K. Khalili, M. Azadi, V. Zaker Hendoabadi, Influences of roughness and heat treatment on high-cycle bending fatigue properties of A380 aluminum alloy under stress-controlled cyclic