

بررسی اثر افزودن ذرات نانورس بر ریزساختار، سطح شکست و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم پیستون در موتور خودرو

محمد آزادی* (استادیار)

حامد بهمن آبادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

جهانگیر ترکیان (دانشجوی دکتری)

غزاله نصرت (دانشجوی کارشناسی)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۳۹۹)
دوری ۳-۲، شماره ۲، ص. ۴۹-۳۱

در این پژوهش اثر افزودن ذرات نانورس بر ریزساختار، سطح شکست و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم پیستون در موتور خودرو بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌های آلومینیومی با/بدون ذرات نانو، به ترتیب ریخته‌گری گردابی و ثقلی شدند. با بررسی ریزساختاری مشخص شد که اندازه ذرات سیلیسیم در نتیجه‌ی افزودن ذرات نانورس، بزرگ‌تر و اندازه ذرات در فاز بین فلزی، کوچک‌تر شده است. نتایج آزمون کشش نشان داد که در نتیجه افزودن ذرات نانورس، تنش تسلیم، تنش کشش نهایی و تغییر طول آلیاژ پایه، افزایش و مدول یانگ، کاهش یافته است. با بررسی سطح شکست، مشخص شد که تقویت آلیاژ پایه با ذرات نانورس، منجر به افزایش تعداد ترک‌ها و کاهش طول آن‌ها شده است. تحلیل شیمیایی سطح شکست نیز نشان داد که آغاز و رشد میکروتُرک‌ها، در نواحی شامل ذرات بین فلزی صورت گرفته و افزودن نانوذرات، تأثیری در محل آغاز و رشد میکروتُرک‌ها نداشته است.

m.azadi@semnan.ac.ir
h.bahmanabadi1992@semnan.ac.ir
jahangir.torkian@gmail.com
ghazaleegh_74@yahoo.com

واژگان کلیدی: آلیاژ آلومینیوم، پیستون موتور خودرو، ذرات نانورس، خواص مکانیکی، ریزساختار، سطح شکست.

۱. مقدمه

آلومینیوم فلزی است که به دلیل خواص فوق‌العاده، کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف دارد. وزن مخصوص پایین، انتقال حرارت و هدایت الکتریکی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، شکل‌پذیری خوب و خواص مکانیکی عالی، جزء خواص فوق‌العاده‌ی این فلز است. وزن کم و هدایت حرارتی بالای آلیاژ آلومینیوم، کاربرد آن را در موتورهای خنک‌شونده با هوا، بسیار بالا برده است.^[۱] فناوری نانو عبارت است از توانایی ساخت، کنترل و استفاده از ماده در ابعاد بسیار کوچک. امروزه، استفاده از نانو مواد، در حوزه‌های مختلف پژوهشی و صنعتی، به‌طور چشم‌گیری در حال افزایش است.^[۲] لذا پژوهش‌گران فعال در زمینه‌های مهندسی مکانیک نیز مانند سایر پژوهش‌گران، در تحقیقات خود، اثر نانو ذرات مختلف را بر بهبود خواص مکانیکی و خستگی آلیاژهای مختلف بررسی کرده‌اند. علی‌رغم کم بودن مطالعات در این زمینه، در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره خواهیم کرد.

لی^۱ و همکاران،^[۳] در مطالعه‌شان اکستروژن و فورج متالورژی پودر کامپوزیت

* نویسنده مسئول

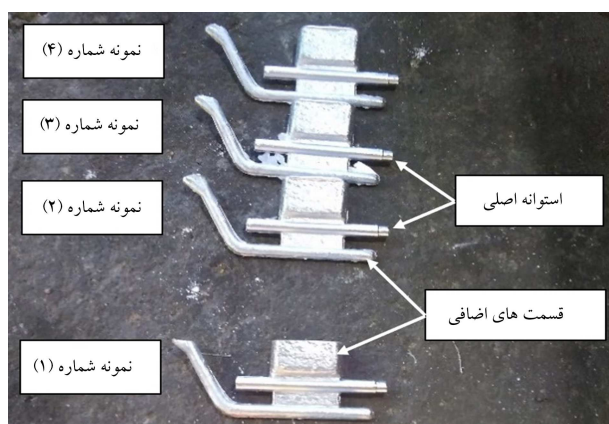
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۳.

DOI:10.24200/J40.2020.54945.1542

Al/SiC ساخته شده را که منجر به افزایش مقاومت کشش از ۷۱ مگاپاسکال به ۴۳۰ مگاپاسکال و افزایش سختی ویکرز از ۲۹ به ۱۰۳ شد، نشان دادند. اسمانگورینسکی^۲ و همکاران،^[۳] اظهار کردند که نورد، می‌تواند حفره‌ها را در کامپوزیت‌های متالورژی پودر، به‌طور کامل رفع کند. یانگ^۳ و همکاران،^[۴] اثر ذرات نانوی SiC را در آلیاژ آلومینیوم ذوب شده با امواج فرا صوت، مورد بررسی قرار دادند. لن^۴ و همکاران،^[۵] ریزساختار و ریزسختی کامپوزیت منیزیم تقویت شده با ذرات نانوی SiC را که با روش فراصوت ساخته شده بود، مطالعه کردند. رستمزاده و همکاران،^[۶] پودر نانوکامپوزیت آلومینیوم ۵ درصد حجمی SiC_p را مطالعه کردند و نشان دادند که پودر نانوکامپوزیت تقریباً کروی است؛ ذرات SiC به‌طور یکنواخت در زمینه‌ی آلومینیوم توزیع شده بود. مطاهری و همکاران،^[۷] آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ تقویت شده با ذرات نانوی SiC را که با روش ریخته‌گری گردابی ساخته شده، بررسی کردند و اظهار داشتند که مقاومت تسلیم، مقاومت کششی نهایی و مدول کشسانی آن طی افزودن ذرات نانو، بهبود یافته است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که بیشترین مقاومت تسلیم و مقاومت کششی نهایی، با افزودن ۳/۵ درصد ذرات نانوی SiC به دست آمده است. قاناراجا^۵ و همکاران،^[۸] ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت پایه فلز آلومینیومی ساخته شده



شکل ۱. مذاب درون بوت، پیش از سرباره‌گیری.



شکل ۲. نمونه‌های ساخته شده به روش ریخته‌گری گرانشی.

جدول ۱. عناصر تشکیل‌دهنده نانورس مورد استفاده.

درصد	عنصر
۵۰/۹۵	سیلیسیم اکسید
۱۹/۶۰	آلومینیوم اکسید
۵/۶۲	آهن اکسید
۳/۲۹	منیزیم اکسید
۱/۹۷	کلسیم اکسید
۰/۹۸	سدیم اکسید
۰/۸۶	پتاسیم اکسید
۰/۶۲	تیتانیوم اکسید
۱۵/۴۵	سایر

۲/۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید (HNO_3)، ۱/۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید (HCL)

و ۱ میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید (HF) استفاده شده است.^[۱]

پس از آماده‌سازی، به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری^{۱۰} مدل Olympus استفاده شد. یکی از اهداف این پژوهش، بررسی تغییرات ریزساختار آلیاژ پایه پس از افزودن ذرات تقویتی نانورس بوده است که بدین منظور، برای بررسی اندازه ذرات، از نرم‌افزار ImageJ استفاده شده است. همچنین، به منظور بررسی نوع ترکیب شیمیایی موجود در نمونه‌ها، آزمون پراش اشعه‌ی ایکس^{۱۱} با دستگاه SEM XL۳۰ philips انجام شده است. به منظور استخراج خواص مکانیکی نمونه بدون نانو و با نانو، آزمون کشش تک‌محوره با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه، روی سه نمونه‌ی

به روش ریخته‌گری گردابی و اکستروژن داغ را با مقادیر صفر، ۳ درصد، ۶ درصد، ۹ درصد و ۱۲ درصد حجمی از تقویت‌کننده ذرات Al_2O_3 ، مورد بررسی قرار دادند. سنشیکومار^۶ و همکاران،^[۹] آلیاژ آلومینیوم تقویت شده با ذرات میکرو و نانوی آلومینا را با روش متالورژی پودر و اکستروژن داغ ساختند. آن‌ها اظهار داشتند که خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم، با افزودن ذرات نانوی آلومینا، در مقایسه با کامپوزیت تقویت شده با ذرات میکرو، به میزان بیشتری بهبود یافته و عمر دوره‌ی کامپوزیت تقویت شده با ذرات نانو، نسبت به کامپوزیت تقویت شده با ذرات میکرو، بیشتر بوده است. دی‌سالازار^۷ و همکاران،^[۱۰] به تحلیل اثر عملیات حرارتی بر رفتار خوردگی کامپوزیت پایه‌فلز آلومینیوم تحت تأثیر انحلال سدیم کارید ۳/۲۵ درصد پرداختند. در پژوهش آن‌ها، کاهش نرخ سایش بر اثر تشکیل لایه‌های اکسید روی سطح سایش نیز گزارش شد. آزادی و همکاران،^[۱۱] اثر روش‌های مختلف افزایش نانوذرات SiO_2 را بر خواص مکانیکی کامپوزیت پایه‌آلومینیوم بررسی کردند؛ بر اساس نتایج به دست آمده، نانوذرات SiO_2 با روش پیش‌گرمایش، به شکل بهتری در آلیاژ پایه توزیع شده بود.

با توجه به منابع مطالعه شده، می‌توان دریافت که پژوهش‌گران روش‌های مختلفی را برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای مختلف، از جمله آلومینیوم، بررسی کرده‌اند. اما با اطمینان می‌توان ابراز داشت که بررسی اثر افزودن ذرات نانورس بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم، تاکنون مورد توجه پژوهش‌گران این حوزه قرار نگرفته است. این امر یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

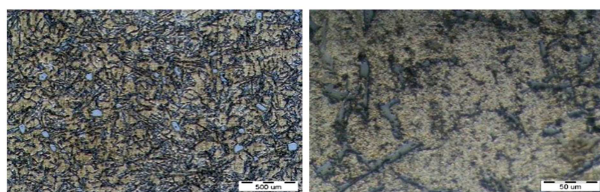
۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، اثر افزودن ذرات نانورس بر ریزساختار، سطح شکست و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم بیستون موتور خودرو بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم بدون نانو به روش ریخته‌گری ساخته شد. سپس ذرات نانورس $(\text{H}_2\text{O})_2 \cdot \text{Na}_{0.23}[(\text{OH})_2\text{Si}_2\text{O}_5] \cdot (\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.23})$ به مذاب آلیاژ پایه اضافه شده و نمونه‌های با نانو ساخته شد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که ذرات نانو به مدت بیست دقیقه در دمای حدود ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، پیش‌گرم و سپس به مذاب افزوده شد. ضمناً، به منظور توزیع یکنواخت نانوذرات در مذاب، از هم‌زن دستی استفاده شده است. شایان ذکر است که دمای مذاب حدود ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب قبل از مذاب‌ریزی حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، دمای محیط خنک‌سازی نمونه‌ها پس از خروج از قالب معادل ۲۱ درجه سانتی‌گراد و مدت نگهداری مذاب درون قالب به منظور انجماد معادل ۳ دقیقه بوده است. در شکل ۱ مذاب درون بوت پیش از سرباره‌گیری و در شکل ۲ نمونه‌های ساخته شده به روش ریخته‌گری نشان داده شده است. شایان ذکر است که نمونه‌های ۱ و ۲ نمونه‌های بدون نانو و نمونه‌های ۳ و ۴ نمونه‌های با نانو هستند.

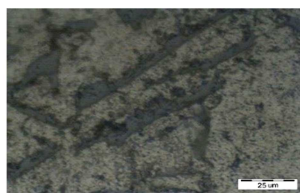
عناصر تشکیل‌دهنده نانورس مورد استفاده در این پژوهش، مطابق کاتالوگ ارائه شده توسط شرکت نانوثانی، در جدول ۱ ثبت شده است.

پس از ساخت نمونه‌ها، قسمت‌های اضافی از نمونه‌ها جدا شده و نمونه برای متالوگرافی آماده شد. به منظور صیقلی شدن سطح نمونه‌ها برای متالوگرافی، از سنباده با اندازه دانه ۱۸۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۴۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ میکرومتر بر اینچ مربع، استفاده شد.^[۱]

شایان ذکر است که جهت صیقلی کردن، از پودر آلومینا (Al_2O_3) با ابعاد کمتر از ۱ میکرومتر و به منظور اچ کردن،^۹ از محلول کپلر،^۹ شامل ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر،

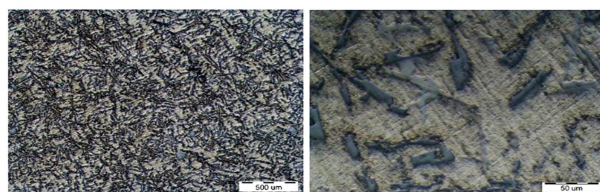


الف) ۵۰ برابر؛ ب) ۵۰۰ برابر؛



ج) ۱۰۰۰ برابر.

شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه بدون نانو با بزرگ‌نمایی.



الف) ۵۰ برابر؛ ب) ۵۰۰ برابر؛



ج) ۱۰۰۰ برابر.

شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه با نانو با بزرگ‌نمایی.

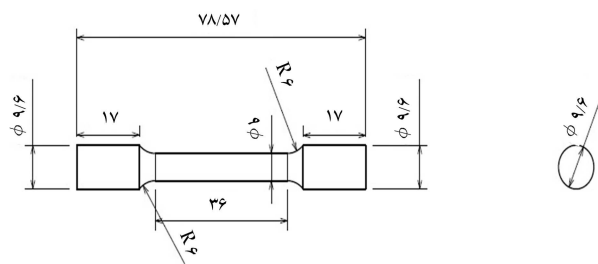
جدول ۲. درصد فازهای تشکیل‌دهنده نمونه با/ بدون نانو.

درصد تشکیل		
فاز	نمونه بدون نانو	نمونه با نانو
سیلیسیم	۱۱/۴۱	۱۲/۷۷
ذرات بین فلزی	۳۴/۴۱	۳۲/۱۶

مکانیکی نمونه می‌شود (جدول ۲)، در نتیجه افزودن ذرات نانو به آلیاژ آلومینیوم پیستون موتور، اندازه‌ی ذرات سیلیسیم، با افزایش و اندازه‌ی ذرات بین فلزی، با کاهش مواجه بوده که البته مقدار این افزایش و کاهش، چشم‌گیر نبوده است. بنابراین، عدم تغییر چشم‌گیر در خواص مکانیکی آلیاژ پایه، در نتیجه افزودن ذرات نانورس، چندان دور از انتظار نخواهد بود.

برای بررسی فاز زمینه و فازهای بین فلزی و نیز توزیع ذرات در نمونه، به تحلیل شیمیایی^{۱۴} نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی پرداخته شده است.

در شکل ۶، نتایج حاصل از تحلیل شیمیایی نمونه‌های بدون نانو و در شکل ۷ نتایج تحلیل شیمیایی نمونه‌های با نانو نشان داده شده است. در این شکل‌ها فاز زمینه (آلومینیوم) و نیز توزیع ذرات فازهای بین فلزی شامل مس، آهن، منیزیم، نیکل، اکسید و سیلیسیم در فاز زمینه، به ترتیب برای نمونه‌ی بدون نانو و نمونه‌ی با نانو قابل مشاهده است. بر اساس نتایج ارائه شده و مقایسه‌ی تحلیل شیمیایی



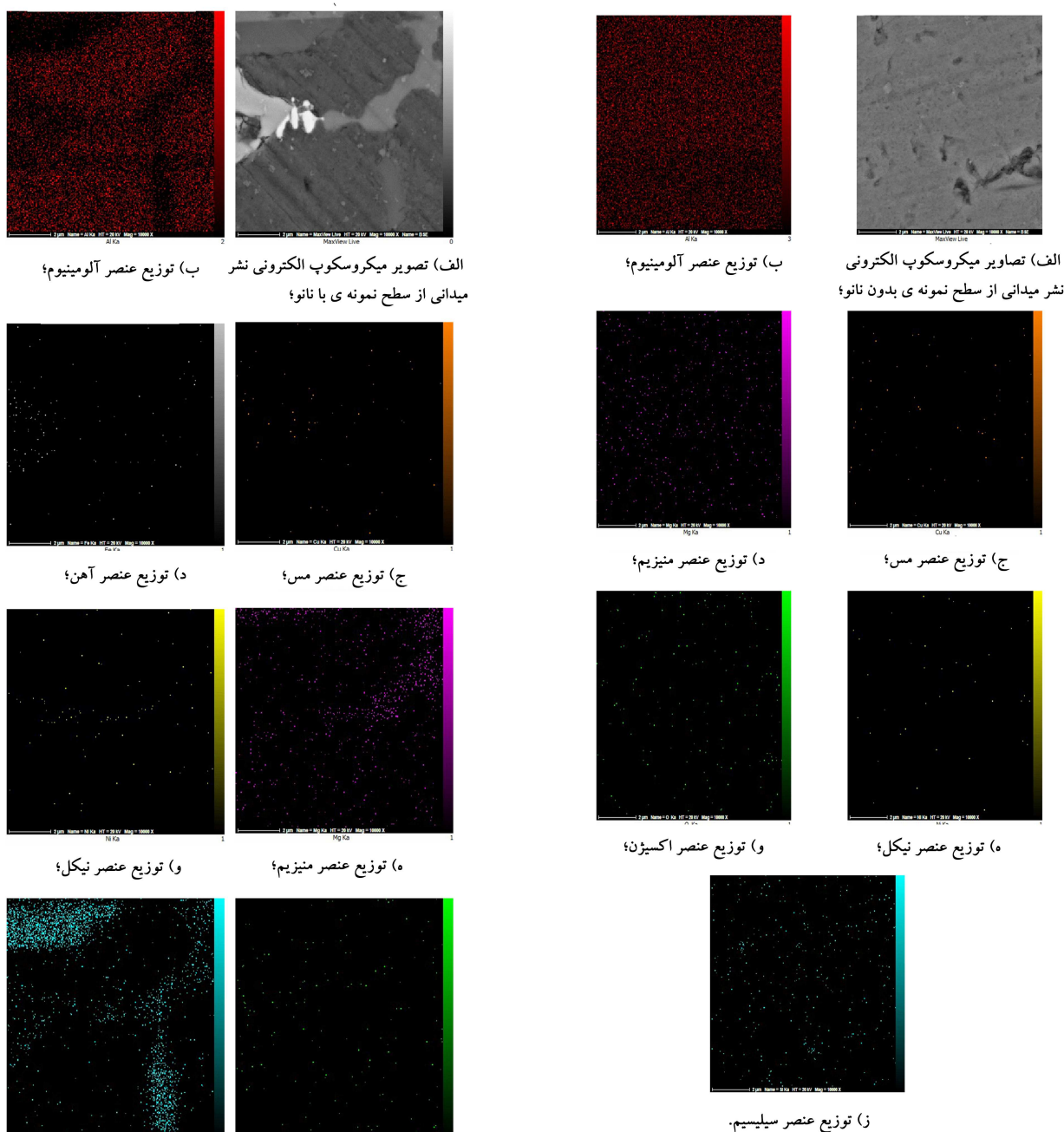
شکل ۳. ابعاد نمونه‌ی آزمون کشش تک‌محوره.

بدون نانو و سه نمونه‌ی با نانو اجرا شده است (شکل ۳). نمونه استاندارد آزمون کشش تک‌محوره، مطابق استاندارد ASTM&M^[۱۲] تهیه شده است. بدین منظور، از دستگاه آزمون کشش تک‌محوره SANTAM STM - ۴۰۰ استفاده شده است. پس از اجرای این آزمون، سطح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی^{۱۲} Tescan Mira مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که پس از اجرای آزمون کشش تک‌محوره، به منظور بررسی دقیق‌تر سطح شکست و ناحیه‌ی رشد ترک‌ها، به تحلیل شیمیایی سطح شکست نمونه‌های با/ بدون نانو با استفاده از طیف‌نمایی اشعه‌ی ایکس^{۱۳} پرداخته شد.

۳. تحلیل نتایج آزمایش

ابتدا به بررسی ریزساختاری سطح نمونه بدون نانو و نمونه با نانو می‌پردازیم. در شکل ۴ و ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری را به ترتیب از سطح نمونه‌ی بدون نانو و با نانو، پس از سنباده‌زنی و صیقل‌کاری و با بزرگ‌نمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در منابع نیز بدان اشاره شده، با افزودن ذرات نانو به آلیاژ آلومینیوم، ریزساختار آن دستخوش تغییرات می‌شود.^[۱۳، ۱۴] با توجه به شکل، می‌توان فاز زمینه (آلومینیوم)، ذرات سیلیسیم و فازهای بین فلزی - متشکل از آهن، مس، نیکل، منگنز، منیزیم، روی و دیگر عناصر - را مشاهده کرد که مشابه نتایج ارائه شده،^[۱۳، ۱۶] بوده است. شایان ذکر است که در شکل ۴ و ۵ فاز زمینه قهوه‌یی روشن، و فاز سیلیسیم خاکستری رنگ است.^[۱۷] به دلیل تشابه ظاهری، امکان تشخیص ذرات بین فلزی از یکدیگر با بزرگ‌نمایی‌های پایین وجود ندارد.^[۱۸] ذرات بین فلزی،^[۱۸، ۱۹] به ویژه فاز بین فلزی حاوی ذرات نیکل،^[۲۰] طی فرایند آلیاژسازی تشکیل شده و می‌توانند عملکرد پیستون را در دمای بالا بهبود بخشند. بر اساس موارد مطالعه شده، خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم - سیلیسیم، عمدتاً تحت تأثیر اندازه‌ی ذرات بلوکی شکل سیلیسیم بوده^[۲۱، ۲۲] و کاهش ابعاد آن سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود.^[۲۳، ۲۴] رضائزاد و همکاران،^[۲۱] ابراز داشتند که کاهش اندازه ذرات بین فلزی، موجب بهبود خواص مکانیکی و خستگی آلیاژ پایه شده است. نتایج تحلیل کمی ریزساختار نمونه‌ها و بررسی اندازه ذرات تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده که مطابق آن، با افزودن نانوذرات به آلیاژ پایه، درصد ذرات سیلیسیم در سطح نمونه افزایش یافته و درواقع، اندازه‌ی این ذرات، حدود ۱۲ درصد بزرگ‌تر شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در منابع مختلف، این تغییرات موجب کاهش خواص مکانیکی و خستگی ماده خواهد شد.^[۲۳-۲۵] همچنین، با افزودن ذرات نانورس به آلیاژ آلومینیوم پایه، درصد ذرات بین فلزی کاهش یافته درواقع، اندازه‌ی این ذرات، به مقدار تقریبی ۶ درصد کوچک‌تر شده است. مطابق نتایج مراجع مختلف، کاهش اندازه‌ی این ذرات، موجب بهبود خواص مکانیکی و خستگی ماده خواهد شد.^[۲۶] با توجه به این که اساساً کاهش اندازه‌ی ذرات تشکیل دهنده، موجب بهبود خواص



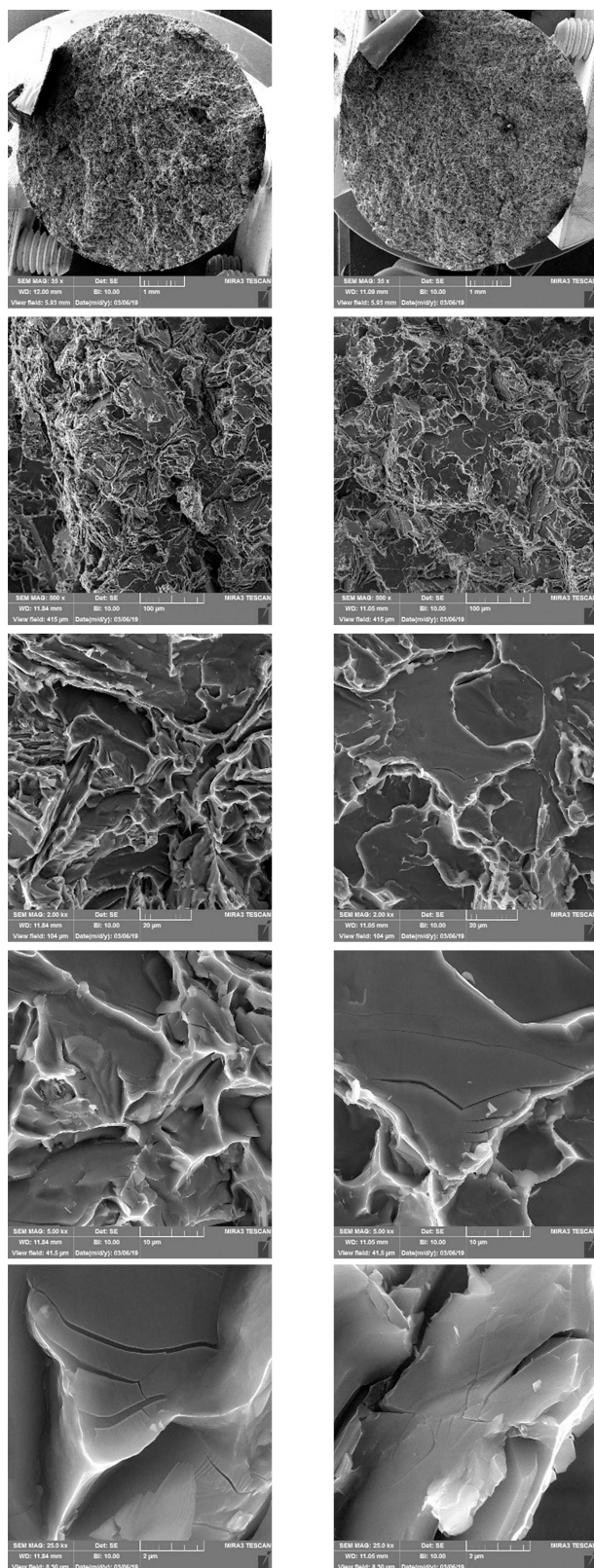
شکل ۶. نتایج تحلیل شیمیایی نمونه بدون نانورس.

نمونه بدون نانورس و نمونه با نانورس مشاهده می‌شود که تغییر چشم‌گیری در توزیع ذرات تشکیل‌دهنده آلیاژ پایه صورت نگرفته و تنها حجم فاز سیلیسیم در برخی نواحی افزایش یافته است. این امر با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۱ که مطابق آن، سیلیسیم اکسید بیش از ۵۰ درصد نانورس را شامل شده است، منطقی به نظر می‌رسد. همچنین در برخی نواحی، شدت حضور ذرات بین فازهای آهن و منیزیم در نمونه با نانورس افزایش یافته است؛ علت این امر، وجود مقادیر زیادی اکسید آهن و اکسید منیزیم در ترکیب تشکیل‌دهنده نانورس، پس از سیلیسیم اکسید و آلومینیوم اکسید بوده است. [۲۹-۲۷، ۱۱]

نتایج آزمون پراش اشعه ایکس اجرا شده روی نمونه‌ها در شکل ۸ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، پس از فاز زمینه (آلومینیوم)، سیلیسیم بیشترین

شکل ۷. نتایج تحلیل شیمیایی نمونه با نانورس.

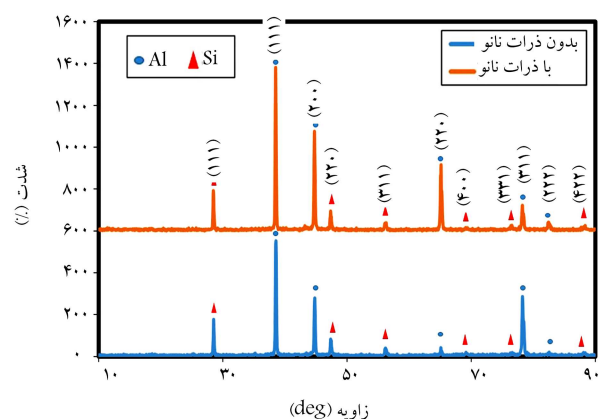
مقدار را در سطح هر دو نمونه بدون نانورس و با نانورس داشته است. این امر مؤید نتایج ارائه شده در جدول ۱ است. [۱۱] همچنین، می‌توان اظهار کرد که تغییر فاز جدیدی رخ نداده اما جهت رشد ترجیحی آلومینیوم، به دلیل حضور ذرات نانورس به عنوان ذرات جوانه‌زا، تغییر پیدا کرده است. [۳۰، ۲۷] پس از مذاب‌ریزی درون قالب ریخته‌گری، مذاب از ناحیه‌ای تماس با قالب شروع به انجماد می‌کند. در واقع نواحی درونی مذاب، دیرتر از نواحی اطراف آن منجمد می‌شود که این امر، امکان یکنواخت بودن ریزساختار ماده را در تمامی نواحی نمونه از بین می‌برد. بدین منظور گاهی به مذاب ذراتی اضافه می‌شود تا انجماد به شکل نسبتاً یکنواخت در تمامی نواحی صورت پذیرد. این ذرات، به ذرات جوانه‌زا معروف‌اند. با توجه به این که ذرات نانورس، سرامیکی



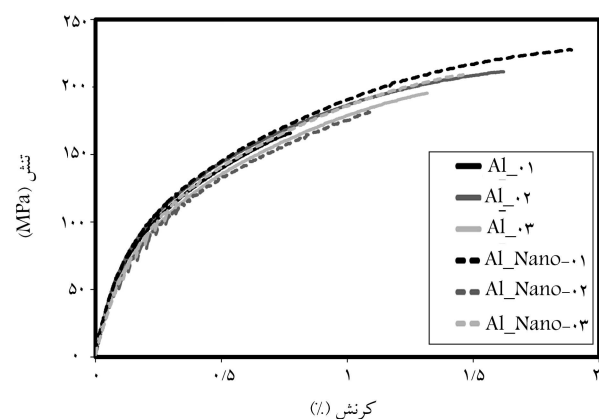
ب) با نانو.

الف) بدون نانو.

شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی از سطح شکست نمونه، پس از آزمون کشش تک محوره به ترتیب با بزرگنماییهای ۳۵، ۵۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ برابر برای نمونههای الف و ب.



شکل ۸. نتایج آزمون پراش اشعه‌ی ایکس.



شکل ۹. نتایج آزمونهای کشش اجرا شده روی نمونه‌های با/ بدون نانو.

بوده و دمای ذوب بالاتری نسبت به آلومینیوم دارند، ذرات جوانه‌زا محسوب شده و چون انجماد، علاوه بر دیواره‌های قالب، از سطح ذرات جامد رس نیز آغاز می‌شود، جهت رشد ترجیحی فاز آلومینیوم نیز عوض می‌شود.

به منظور بررسی اثر افزودن نانوذرات بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم در پیستون موتور خودرو، آزمون کشش تک محوره روی نمونه‌ها اجرا شده است. در شکل ۹ نتایج آزمون کشش را مشاهده می‌کنید. خواص مکانیکی استخراج شده از آزمون کشش نیز در جدول ۳ ارائه شده است. شایان ذکر است که مقادیر ارائه شده در این جدول، مقادیر میانگین نتایج آزمونهای کشش اجرا شده روی سه نمونه‌ی بدون نانو و سه نمونه‌ی با نانو بوده است. بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول ۳، بر اثر افزودن نانو ذرات به آلیاژ آلومینیوم در نتیجه‌ی افزودن نانوذرات به آلیاژ پایه، تنش تسلیم حدود ۱۷ درصد، تنش کششی نهایی حدود ۸ درصد، و تغییر طول حدود ۴ درصد افزایش یافته است که این امر با نتایج ارائه شده‌ی قبلی^[۹] مطابقت دارد. اما مدول یانگ آلیاژ پایه در نتیجه‌ی افزودن نانوذرات، حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است.

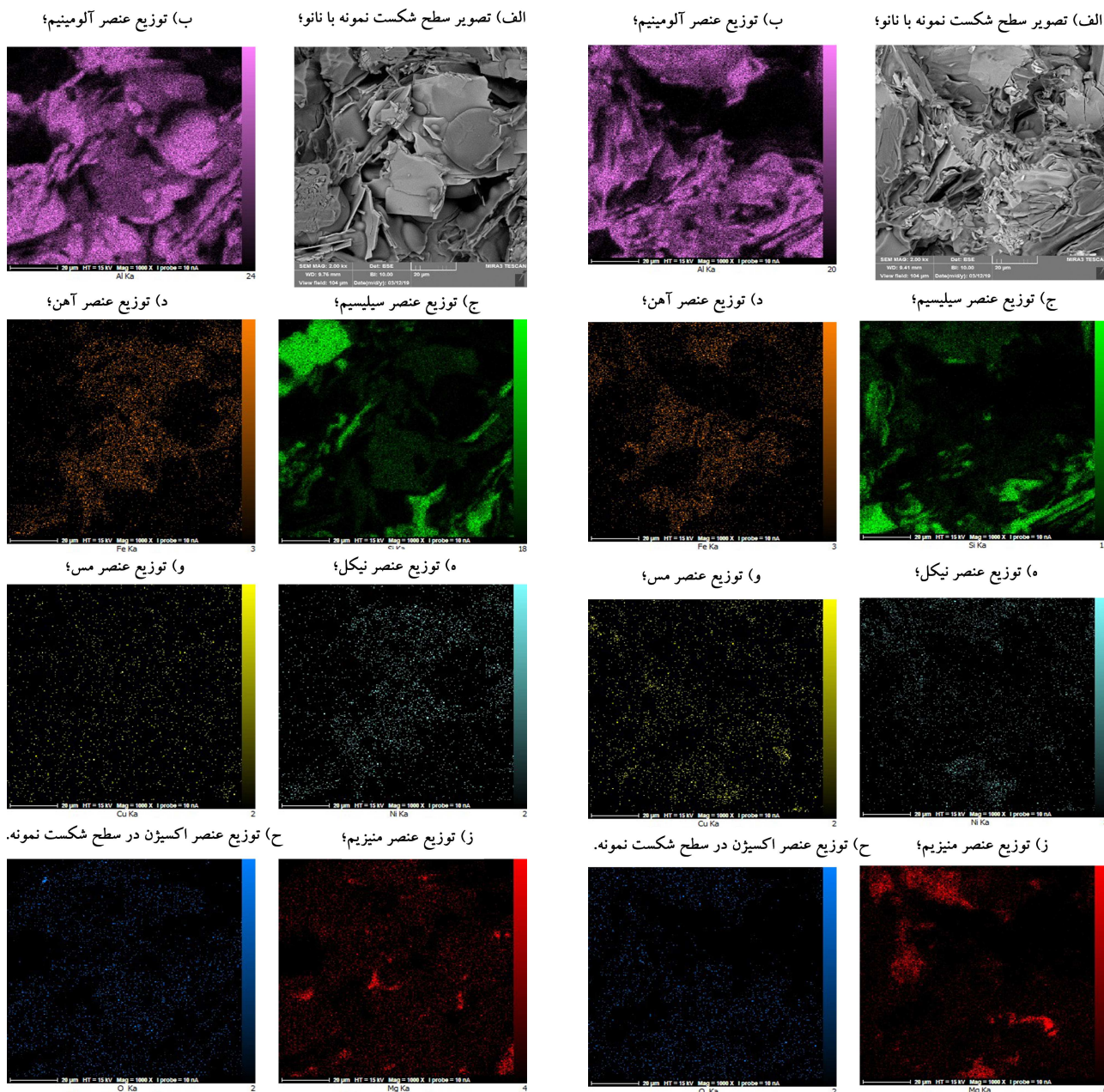
مطابق نتایج آزمون کشش تک محوره که در جدول ۳ ارائه شده، می‌توان ابزار داشت که افزودن ذرات نانورس به آلیاژ آلومینیوم پیستون موتور، تغییر محسوسی در خواص مکانیکی آلیاژ پایه ایجاد نکرده است. در مطالعات پیشین^[۲۱،۲۲] چنین اشاره شده که خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم، تحت تأثیر اندازه ذرات سیلیسیم بوده و کوچک‌تر شدن آن و نیز ذرات بین فازی موجب بهبود خواص مکانیکی شده است، و اینک بر اساس مطالعه حاضر می‌توان بیان کرد که علت عدم تغییر چشم‌گیر

جدول ۳. خواص مکانیکی استخراج شده از آزمون کشش.

نمونه	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش کششی نهایی (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	تغییر طول (درصد)
آلومینیوم بدون نانو	$72/67 \pm 9/06$	$190/86 \pm 18/82$	$70/07 \pm 3/01$	$2/07 \pm 0/65$
آلومینیوم با نانو	$84/78 \pm 10/02$	$206/11 \pm 18/92$	$63/15 \pm 2/82$	$2/16 \pm 0/29$

جدول ۴. تعداد و طول ترک در نمونه‌های با و بدون نانو.

طول ترک (میکرومتر)	تعداد ترک
نمونه بدون نانو	نمونه بدون نانو
نمونه با نانو	نمونه با نانو
$13,63 \pm 11,37$	$4,12 \pm 2/79$
30	10



شکل ۱۲. نتایج تحلیل شیمیایی سطح شکست نمونه با نانو.

شکل ۱۱. نتایج تحلیل شیمیایی سطح شکست نمونه بدون نانو.

افزودن نانوذرات به آلیاژ پایه بوده است. همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که آغاز و رشد میکروتکرها غالباً در ذرات بین فلزی صورت گرفته است.

با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، با افزودن ذرات نانورس به آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم پیستون موتور خودرو، تغییر چشمگیری در اندازه ذرات تشکیل دهنده آلیاژ پایه ایجاد نمی‌شود، به طوری که اندازه ذرات سیلیسیم افزایش و اندازه ذرات بین فلزی کاهش یافته است. همچنین، تقویت آلیاژ آلومینیوم با ذرات نانورس تغییرات فاحشی در توزیع ذرات در سطح نمونه ایجاد نکرده است. بنابراین، خواص مکانیکی آلیاژ پایه در نتیجه‌ی تقویت با ذرات نانو، تغییر چشمگیری نکرده و این امر با توجه به نتایج پژوهش چندان دور از انتظار نبوده است.

۴. نتیجه‌گیری

از بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نتیجه گرفتیم که:

- اندازه ذرات سیلیسیم پس از افزودن نانورس، در مقایسه با آلیاژ بدون نانو بزرگ‌تر شده است.
- اندازه ذرات فاز بین فلزی پس از افزودن نانو ذرات کوچک‌تر شده است.
- جهت رشد ترجیحی آلومینیوم، به دلیل حضور ذرات نانو به عنوان ذرات جوانه‌زا، تغییر یافته و در نتیجه امکان بهبود خواص مکانیکی وجود دارد.
- تقویت آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم، توزیع ذرات را در سطح نمونه دست‌خوش تغییرات چشمگیر نکرده است.
- افزودن نانوذرات، موجب افزایش تنش تسلیم، تنش کشش نهایی و تغییر طول نمونه می‌شود؛ در مقابل، مدول ینگ کاهش یافته اما این تغییرات چشمگیر نبوده است.
- افزودن ذرات نانورس، موجب افزایش تعداد ترک و در مقابل، کاهش مجموع طول ترک‌ها در سطح شکست نمونه‌ی تحت آزمون کشش شده است.
- آغاز و رشد میکروتکرها، اغلب در ذرات بین فلزی صورت گرفته و تقویت آلیاژ پایه (آلومینیوم پیستون) با نانوذرات رس موجب تقویت ذرات بین فلزی به جهت آغاز و رشد میکروتکرها نبوده است.

تقدیر و تشکر

در پایان، از مسئولین محترم آزمایشگاه مواد دانشکده‌ی مواد و متالورژی دانشگاه سمنان، که در مسیر انجام این پژوهش نهایت همکاری را داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. ضمناً از شرکت موتورسازی پویانستانک بابت تأمین مواد اولیه و همکاری در اجرای فرایند ریخته‌گری قدردانی می‌شود.

خواص مکانیکی آلیاژ در این پژوهش، افزایش ۱۲ درصدی مقدار ذرات سیلیسیم و کاهش ۶ درصدی مقدار ذرات بین فلزی در سطح نمونه بوده است.

در شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی، از سطح شکست نمونه‌های با/بدون نانورس از آزمون کشش تک‌محوره نشان داده شده است. با توجه به شکل و بررسی کیفی سطح شکست می‌توان دریافت که طول، عمق و عرض ترک‌ها پس از افزودن نانو ذرات کاهش یافته است.

به منظور بررسی کمی ابعاد و تعداد ترک‌ها، با استفاده از نرم افزار ImageJ، تصاویر سطح شکست با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر بررسی و نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزودن نانو ذرات به آلیاژ پایه، تعداد ترک‌ها در سطح شکست نمونه افزایش یافته و مجموع طول ترک‌ها کاهش یافته است. بنابراین، می‌توان دریافت که افزودن ذرات نانورس به آلیاژ آلومینیوم پیستون، ترک‌های سطح شکست را به ترک‌های بیشتر ولی با مجموع طول کمتر تبدیل کرده است. این امر احتمالاً به دلیل افزایش شکل‌پذیری^{۱۵} آلیاژ پایه بر اثر افزودن نانوذرات بوده که موجب کاهش طول ترک‌ها شده است.

نتایج تحلیل شیمیایی سطح شکست نمونه‌های بدون نانو در شکل ۱۱ و نتایج تحلیل شیمیایی سطح شکست نمونه‌های با نانو در شکل ۱۲، نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۱، میکروتکرها در ذرات تشکیل دهنده‌ی فاز بین فلزی شامل سیلیسیم، آهن، نیکل و مس قابل مشاهده‌اند. بر اساس مطالعات انجام شده‌ی قبلی، ذرات بین فلزی ترد^{۱۶} آهن نسبت به نواحی شکل‌پذیرتر، محل‌های مناسبی برای آغاز و رشد میکروتکرها هستند.^[۳۱] غیر از ذرات بین فلزی شامل آهن، ذرات سیلیسیم نیز بسیار کشسان بوده و خمیرسانی پایینی دارند و آغاز و رشد میکروتکرها در آن‌ها نیز محتمل‌تر خواهد بود.^[۳۲] ذرات بین فلزی شامل سیلیسیم و آهن، به دلیل داشتن کشسانی متفاوت با فاز زمینه (آلومینیوم)، در معرض تمرکز تنش هستند.^[۳۳-۳۴] بر اساس نتایج پژوهش انجام شده توسط ژیانگ و همکاران،^[۳۴] تمرکز تنش بالا در ذرات سیلیسیم، امکان اتصال میکروتکرها را افزایش داده و موجب سرعت بخشیدن به رشد ترک‌ها می‌شود. نتایج فوق، در مورد سطح شکست نمونه‌ی با نانو نیز صادق است و می‌توان نتیجه گرفت که تقویت آلیاژ پایه با نانوذرات، تأثیری در محل آغاز و رشد ترک (ذرات بین فلزی) نداشته است.

در این پژوهش، اثر افزودن ذرات نانورس بر ریزساختار، سطح شکست و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم پیستون موتور خودرو، مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی‌های صورت گرفته، مشخص شد که پس از افزودن نانوذرات، اندازه ذرات سیلیسیم بزرگ‌تر و اندازه ذرات در فاز بین فلزی کوچک‌تر شده است. بدین منظور، امکان پیش‌بینی دقیق خواص مکانیکی و خستگی ماده بر اساس ریزساختار، غیر قابل پیش‌بینی بوده است. همچنین، بر اساس نتایج حاصل می‌توان دریافت که خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم، در نتیجه‌ی افزودن نانوذرات رس، اندکی بهبود یافته و فقط مدول ینگ آلیاژ اندکی کاهش داشته است. با بررسی سطح شکست نمونه‌های با/بدون نانو، مشخص شد که نمونه تقویت شده با نانوذرات، دارای ترک‌های بیشتر با مجموع طول ترک کمتر بوده است؛ این امر احتمالاً به دلیل افزایش شکل‌پذیری نمونه در نتیجه‌ی

پانویس‌ها

1. Lee
2. Smagorinski

3. Yang
4. Lan
5. Ghanaraja
6. Senthilkumar

7. De Salazar A. Etching: «آج کردن» به مفهوم ایجاد خوردگی بسیار ضعیف در قسمت های ناپایدار سطح نمونه آماده و پرداخت شده است.
9. keller
10. optical microscopy (OM)
11. X-Ray diffraction (XRD)
12. field emission scanning electron microscopy (FESEM)
13. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)
14. map analysis
15. ductility
16. brittle

منابع (References)

1. Bahmanabadi, H. "Experimental and numerical study on low-cycle fatigue behavior of aluminum metal matrix nano-composite at different temperatures", MSc. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (In Persian) (2020).
2. Lee, H.S., Yeo, J.S., Hong, S.H. and et al. "The fabrication process and mechanical properties of SiC_p/Al-Si metal matrix composites for automobile air-conditioner compressor pistons", *Journal of Materials Processing Technology*, **113**, pp. 202-208 (2001).
3. Smagorinski, M.E., Tsantrizos, P.G., Grenier, S. and et al. "The properties and microstructure of Al-based composites reinforced with ceramic particles", *Materials Science and Engineering A*, **244**, pp. 86-90 (1998).
4. Yang, Y., Lan, J. and Li, X. "Study on bulk aluminium matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion on nano sized SiC particles in molten aluminium alloy", *Materials Science and Engineering A*, **380**, pp. 378-383 (2004).
5. Lan, J., Yang, Y. and Li, X. "Microstructure and micro-hardness of SiC nano particles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method", *Materials Science and Engineering A*, **386**, pp. 284-290 (2004).
6. Rostamzadeh, T. and Shahverdi, H.R. "Microstructure study on Al-5%SiC nano composite powders", *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, **8**, pp. 32-39 (2011).
7. Mazahery, A. and Shabani, M.O. "Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, pp. 275-280 (2012).
8. Ghanaraja, S., Vinuth Kumar, K.L., Raju, H.P. and et al. "Processing and Mechanical Properties of Hot Extruded Al(Mg)-Al₂O₃ Composites", *Materials Today: Proceedings*, **2**(45), pp. 1291-1300 (2015).
9. Senthilkumar, R., Arunkumar, N. and Manzoor Hussian, M. "A comparative study on low cycle fatigue behaviour of nano and micro Al₂O₃ reinforced AA2014 particulate hybrid composites", *Results in Physics*, **5**, pp. 273-280 (2015).
10. De Salazar, J.M.G., Urena, A. Manzanedo, S. and et al. "Corrosion behaviour of AA6061 and AA7005 reinforced with Al₂O₃ particles in aerated 3.5% chloride solutions, potentiodynamic measurements and microstructure evaluation", *Corrosion Science*, **41**(3), pp. 529-545 (1998).
11. Azadi, M., Zolfaghari, M., Rezanezhad, S. and et al. "Effects of SiO₂ nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix composites by different dispersion methods", *Applied Physics A*, **124**, p.377 (2018).
12. Li, Y., Yang, Y., Wu, T. and et al. "Quantitative comparison of three Ni-containing phases to the elevated-temperature properties of Al-Si piston alloys", *Materials Science and Engineering A*, **527**(26), pp. 7132-7137 (2010).
13. Rezanezhad, S., Zolfaghari, M., Azadi, M. and et al. "Study of effect of simultaneous use from silica nano-particles and heat treatment on high-cycle bending fatigue lifetime in piston aluminum alloy", *Modares Mechanical Engineering*, **20**(6) (In Persian) (2020).
14. Salehi, A., Babakhani, A. and Zebarjad, S.M. "Microstructural and mechanical properties of Al-SiO₂ nanocomposite foams produced by an ultrasonic technique", *Materials Science and Engineering: A*, **638**, pp. 54-59 (2015).
15. Humbertjean, A. and Beck, T., "Effect of the casting process on microstructure and lifetime of the Al-piston-alloy AlSi12Cu4Ni3 under thermo-mechanical fatigue with superimposed high-cycle fatigue loading", *International Journal of Fatigue*, **53**, pp. 67-74 (2013).
16. Han, L., Sui, Y., Wang, Q. and et al. "Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, **695**, pp. 1566-1572 (2017).
17. Zolfaghari, M., Azadi, M. and Azadi, M. "Characterization of high-cycle bending fatigue behaviors for piston aluminum matrix SiO₂ nano-composites in comparison with aluminum-silicon alloys", *International Journal of Metalcasting* (2020). DOI: <https://DOI.org/10.1007/s40962-020-00437-y>
18. E8/E8M. "Standard test methods for tension testing of metallic materials", ASTM (2011).
19. Qian, Z., Liu, X., Zhao, D. and et al. "Effects of trace Mn addition on the elevated temperature tensile strength and microstructure of a low-iron Al-Si piston alloy", *Materials Letters*, **62**, pp. 2146-2149 (2008).
20. Sunil, B., Rajeev, V. R. and Jose, S. "A statistical study on the dry wear and friction characteristics of Al-12.6Si-3Cu- (2-2.6wt.%) Ni piston alloys", *Materials Today: Proceedings*, **5**(1), pp. 1131-1137 (2018).
21. Rezanezhad, S., Azadi, M. and 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). DOI: <https://DOI.org/10.1007/s12540-019-00498-7>
22. Weixi, S., Bo, G., Ganfeng, T. and et al. "Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic Al-15% Si alloy", *Journal of Rare Earths*, **28**, pp. 367-370 (2010).
23. Chong, C., Liu, Z.X., Bo, R. and et al. "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*, **17**, pp. 301-306 (2007).

24. Firouzdor, V., Rajabi, M., Nejati, E. and et al. "Effect of microstructural constituents on the thermal fatigue life of A319 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A*, **455**, pp. 528-535 (2007).
25. Cai, C., Geng, H., Cui, Q. and et al. "Materials characterization low cycle fatigue behavior of AlSi10Mg(Cu) alloy at high temperature", *Materials Characterization*, **145**(5), pp. 594-605 (2018).
26. Nicoletto, G., Konecna, R. and Fintova, S. "Characterization of microshrinkage casting defects of Al-Si alloys by X-ray computed tomography and metallography", *International Journal of Fatigue*, **41**(8), pp. 39-46 (2012).
27. Azadi, M., Rezanezhad, S., Zolfaghari, M. and et al. "Investigation of tribological and compressive behaviors of Al/SiO₂ nanocomposites after T6 heat treatment", *Sad-hana*, **45**, p.28 (2020).
28. Mollaei, M., Azadi, M. and Tavakoli, H. "A parametric study on mechanical properties of aluminum-silicon/SiO₂ nano-composites by a solid-liquid phase processing", *Applied Physics A*, **124**, p.504 (2018).
29. Azadi, M., Rezanezhad, S. and Zolfaghari, M. "Effects of various ageing heat treatments on microstructural features and hardness of piston aluminum alloy", *International Journal of Engineering*, **32**(1), pp. 92-98 (2019).
30. Shabani, M. O., Shamsipour, M., Mazahery, A. and et al. "Performance of ANFIS coupled with PSO in manufacturing superior wear resistant aluminum matrix nanocomposites", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **71**, pp. 2095-2103 (2017).
31. Xiao-song, J., Guo-qiu, H.E., Bing, L. and et al. "Microstructure-based analysis of fatigue behaviour of Al-Si-Mg alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**(3), pp. 443-448 (2011).
32. Sasaki K. and Takahashi, T. "Low cycle thermal fatigue and microstructural change of AC2B-T6 aluminum alloy", *International Journal of Fatigue*, **28**, pp. 203-210 (2006).
33. Shi, W., Gao, B., Tu, G. and et al. "Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic Al-15Si alloy", *Journal of Rare Earths*, **28**(1), pp. 367-370 (2010).
34. Liao, H., Sun, Y. and 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*, **335**(1-2), pp. 62-66 (2002).