



مطالعه و آزمایش تجربی بارگذاری خستگی در نانوکامپوزیت‌های ذره‌ای آلومینیوم ۷۰۷۵ با ذرات سیلیکون کارباید

امیرحسین فرضی^۱، مصطفی سیاح بادخور^{۲*} و مسعود بابائی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۳ مربی، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، ایوان کی، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

چکیده

در این پژوهش به منظور دست یابی به مقادیر بهینه تنش تسلیم، استحکام نهایی کشش، شکل پذیری و طول عمر خستگی تحت تاثیر دو پارامتر اندازه ذرات و کسر جرمی ذرات تقویت کننده، ابتدا آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 به عنوان فاز زمینه و از ذرات سیلیکون کارباید به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. طبق طراحی آزمایش انجام شده، سیلیکون کارباید با سه اندازه ذره مختلف، در مقیاس‌های نانومتر، زیرمیکرون و میکرون تهیه شد. پودر سیلیکون کارباید با کسر جرمی‌های مختلف با آلومینیوم، به روش ریخته‌گری گردابی توسط کوره مقاومتی مجهز به کویل الکترومغناطیسی و پمپ خلأ ترکیب، و نمونه‌های کامپوزیتی طبق طراحی آزمایش انجام شده، ریخته‌گری شدند. سپس نمونه‌ها تحت عملیات انحلال قرار گرفتند. در ادامه عملیات حرارتی T6 روی نمونه‌ها انجام شد. در انتها آزمون‌های کشش و خستگی بر روی نمونه‌های آزمایشی تهیه شده، طبق استانداردهای مربوطه انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، تقویت کردن آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 با ذرات سیلیکون کارباید منجر به بهبود خواصی مانند استحکام تسلیم، استحکام نهایی کشش و عمر خستگی شد؛ اما ازدیاد طول و شکل پذیری نمونه‌ها کاهش یافت. بهترین نتیجه مربوط به نمونه ۱ درصد با اندازه ذرات نانو است که ۲۱/۳۳ درصد استحکام نهایی کشش را بهبود بخشیده است، همچنین بیشترین استحکام خستگی را نیز داشته است.

کلمات کلیدی: آلومینیوم ۷۰۷۵؛ سیلیکون کارباید؛ بارگذاری خستگی؛ رشد ترک؛ عملیات حرارتی T6.

Experimental Study of Fatigue Loads in 7075 Aluminum Nano Composite with SiC Particles

A. H. Farzi¹, M. Sayah Badkhor^{2*}, M. Babaei³

¹ MsC., Mech. Eng., University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

³ Instructor., Mech. Eng., University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

Abstract

In this study, Aluminum 7075-T6 was selected as the base phase and Silicon Carbide (SiC) particles were used as the reinforcing phase for the composite for the experiments on the yield strength, ultimate tensile strength, and fatigue life. According to the experiment design, the SiC was prepared with three different particle sizes, in nanometer, submicron and micron scales. SiC powder with different mass fractions with Aluminum was cast by vortex casting by a resistive furnace equipped with an electromagnetic coil and a vacuum pump, and the composite samples were cast according to the experimental design. The samples were then subjected to dissolution. Afterward, T6 heat treatment was performed on the samples. Ultimately, the prepared experimental samples were subjected to tensile and fatigue tests, followed by the relevant standards. According to the results, reinforcement of aluminum 7075-T6 with SiC particles improved properties such as yield strength, ultimate tensile strength, and fatigue life, but reduced the elongation and ductility of the samples. The results indicate that 1% sample with nanoparticle size has improved the final tensile strength by 21.33% and has the highest fatigue strength.

Keywords: 7075 Aluminum; Silicon Carbide; Fatigue Loads; Crack Growth; T6 Heat Treatment.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها موادی هستند که از دو یا چند جزء با خواص فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوت تشکیل شده‌اند و با مخلوط شدن آنها خواصی به دست می‌آید که بر خواص همه اجزا ارجحیت دارد. این مواد از یک فاز زمینه، فاز تقویت‌کننده تشکیل شده‌اند. فاز زمینه معمولاً استحکام مکانیکی خیلی کمتری نسبت به فاز تقویت‌کننده دارد. در اثر حضور فاز تقویت‌کننده و توزیع مناسب آن در فاز زمینه خواص مکانیکی مناسبی ایجاد می‌گردد. امروزه از مواد مختلفی در فاز زمینه استفاده می‌شود و بر همین اساس کامپوزیت‌ها به چند دسته از جمله کامپوزیت‌های زمینه فلزی، زمینه پلیمری، زمینه سرامیکی تقسیم می‌شوند [۱].

بسیاری از نیازهای صناعی چون صنایع هوایی، دریایی، الکتریکی، خودرو و راکتورسازی با استفاده از مواد شناخته شده‌ی موجود قابل دستیابی نیست و لذا نیاز به تقویت و بهبود مواد احساس می‌شود. استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی که با ذرات سرامیکی تقویت شده‌اند، این نیاز را تأمین می‌کند؛ چرا که ترکیبات سرامیکی ساخته شده از عناصری با عدد اتمی پایین (آلومینیوم اکسید، سیلیکون کارباید، برم کارباید، برم نیتريد و غیره) بهترین شرایط اولیه را برای رسیدن به استحکام بالا و چگالی کم مهیا می‌کنند؛ در نتیجه این کامپوزیت‌ها استحکام، مدول الاستیک، استحکام خستگی، مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، پایداری حرارتی و پایداری ابعادی بالایی دارند. البته افزودن ذرات تقویت‌کننده به آلیاژهایی با استحکام بالا باعث افت انعطاف-پذیری می‌شود؛ بنابراین بیشتر پژوهش‌های انجام شده روی کامپوزیت‌هایی با زمینه‌ی فلزی نرم، مانند منیزیم و آلومینیوم انجام شده است [۲].

آقای داویدسون در سال ۱۹۸۹ با مطالعه نرخ رشد ترک خستگی در بین ذرات آلیاژهای آلومینیوم تقویت شده با سیلیکون کارباید به این نتیجه رسید که برای این دسته از آلیاژها، ماتریس فلزی بدون ذرات تقویت‌کننده، به دلیل اینکه ترک عمدتاً در بین ماتریس فلزی رشد می‌کند، منحنی‌های نرخ رشد ترک خستگی به طور کلی مشابه هستند [۳].

در سال ۱۹۹۳ آقای کوما‌ی و همکارش، مطالعاتی روی اثرات محیط آبی بر رفتار شکست خستگی و شکست کششی

کامپوزیت آلومینیوم ۷۰۷۵ تقویت شده با ذرات سیلیکون کارباید انجام دادند و با انجام تست‌های کشش و خستگی در دو شرایط هوای اتاق و محیط آبی به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی به جز ازدیاد طول تا لحظه شکست، برای آلومینیوم تقویت شده با ذرات سیلیکون کارباید نسبت به آلیاژ بدون ذرات تقویت‌کننده، مقادیر بالاتری دارند [۴].

آقای چن و همکارش در سال ۲۰۰۴ به بررسی اثرات اندازه ذرات بر جوانه‌زنی ترک و همچنین رشد ترک‌های کوچک در آلیاژهای آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات سیلیکون کارباید پرداختند. آنها کامپوزیت‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ ساخته شده به روش متالورژی پودر را تحت بارگذاری محوری کاملاً معکوس شونده، قرار دادند و نتیجه گرفتند که استحکام خستگی در آلیاژهایی با اندازه ذرات تقویت‌کننده ۵ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر در مقایسه با آلیاژ بدون ذرات تقویت‌کننده تقریباً تفاوتی ندارد، در حالی که در آلیاژهایی با اندازه ذرات تقویت‌کننده ۶۰ میکرومتر استحکام خستگی نسبت به آلیاژ بدون ذرات تقویت‌کننده، کمتر شده است [۵].

آقای سودت به همراه همکارش آقای سوحا در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی بر روی تاثیر ذرات سیلیکون کارباید بر رفتار خستگی کامپوزیت‌هایی با زمینه آلیاژهای آلومینیوم انجام دادند و مقایسه‌ای بین رفتار خستگی کامپوزیت آلومینیوم با ذرات تقویت‌کننده سیلیکون کارباید و آلیاژ آلومینیوم شامل ۱۲ درصد وزنی سیلیسیوم انجام شد و آزمایش‌های سختی سنجی و خمش سه نقطه روی نمونه‌ها انجام گرفت و نتیجه گرفتند که مقادیر سختی و استحکام خمشی با افزایش کسر جرمی ذرات تقویت‌کننده افزایش می‌یابد و همچنین از منحنی تنش-عمر به سادگی می‌توان دریافت که استحکام خستگی بهبود یافته است [۶].

در سال ۲۰۱۰ آقای چاولا و همکارش، رشد ترک خستگی و تاثیرات نسبت R (نسبت حداقل تنش به حداکثر تنش اعمالی)، در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات سیلیکون کارباید را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق مقایسه‌ای بین رفتار رشد ترک خستگی آلومینیوم ۲۰۸۰ و آلومینیوم ۲۰۸۰ تقویت‌شده با ذرات سیلیکون کارباید انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که هر دو نمونه

مکانیکی می‌شود که بهترین درصد جرمی به منظور بهبود خواص مکانیکی، ۴٪ بود [۱۱].

مأمون و همکارش در سال ۲۰۲۰ به بررسی و تحلیل خستگی در آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت شده با نانوذرات سیلیکون کارباید با درصد جرمی‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵، تولید شده به روش ریخته‌گری همزنی پرداختند. استحکام و عمر خستگی را با استفاده از منحنی‌های تنش-عمر (S-N) برای نسبت‌های مختلف وزنی استخراج کردند. بیشترین استحکام و عمر خستگی در نسبت ۲٪ رخ داد که به دلیل تقویت فاز زمینه با توزیع یکنواخت ذرات نانو، حداقل تخلخل مشاهده شد [۱۲].

با توجه به مطالعه و تحقیقات صورت گرفته در حوزه نانوکامپوزیت‌ها، نتیجه می‌شود که این مواد از جنبه‌ها و دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی و کنکاش قرار گرفته‌اند. با توجه که مطالبی که در بخش فوق (مروری بر منابع) آورده شده‌است، نانوکامپوزیت‌ها از لحاظ چگونگی ساخت و تولید، روش‌های مختلف تولید، نقش ذرات مختلف در بهبود خواص مکانیکی، اثر محیط‌های گوناگون بر خواص، تأثیر پارامترهای مختلف بر خواص مکانیکی و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین تحقیقاتی در زمینه ارائه مدل‌ها و روش‌های جدید برای بررسی خواص مکانیکی انجام شده است.

در این تحقیق تأثیر اندازه و کسر جرمی ذرات مختلف بر تنش، استحکام کششی و ازدیاد طول با ثابت در نظر گرفتن دیگر پارامترهای مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها (از قبیل پارامترهای مؤثر در ساخت نمونه‌ها و پارامترهای مؤثر در انجام آزمون‌ها) بررسی شده، تا یک دید جامع نسبت به چگونگی اثر ذرات بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها ارائه شود.

۲- روش انجام آزمایش

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

مطابق با استانداردهای ASTM E647 و ASTM E8 نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام تست رشد ترک خستگی و تست کشش از نانوکامپوزیت ریخته شده، توسط دستگاه فرز CNC استخراج شد.

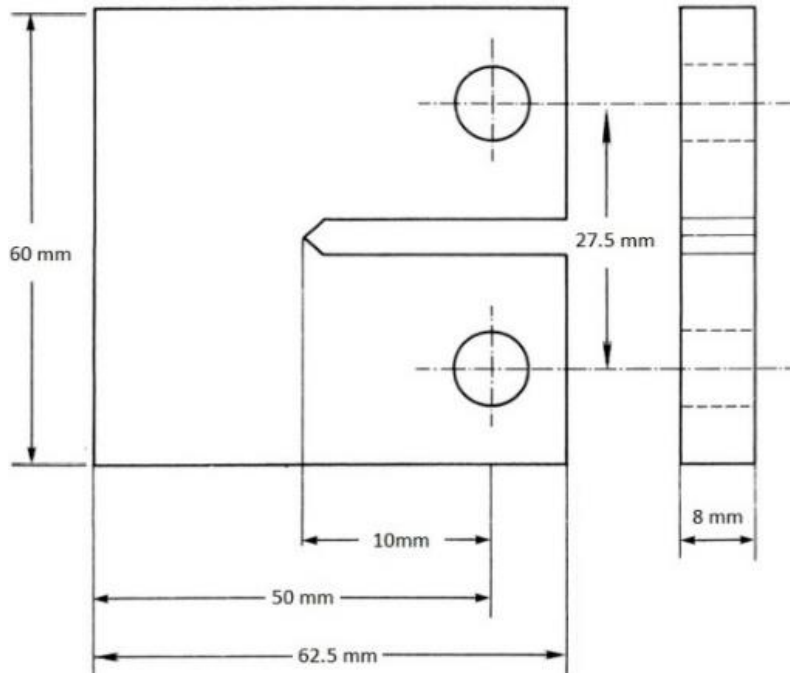
فوق توسط نسبت R تحت تأثیر هستند و با افزایش نسبت R، فاکتور شدت تنش (ΔK_{th}) کاهش می‌یابد [۷].

در سال ۲۰۱۵ آقای بلاجی و همکارانش تحقیقی در مورد ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی با آلیاژ زمینه آلومینیوم ۷۰۷۵ و تقویت‌کننده سیلیکون کارباید به روش ریخته‌گری همزنی انجام دادند. از نتایج این بررسی می‌توان به بهبود چگالی کامپوزیت نسبت به آلیاژ بدون تقویت‌کننده اشاره کرد [۸].

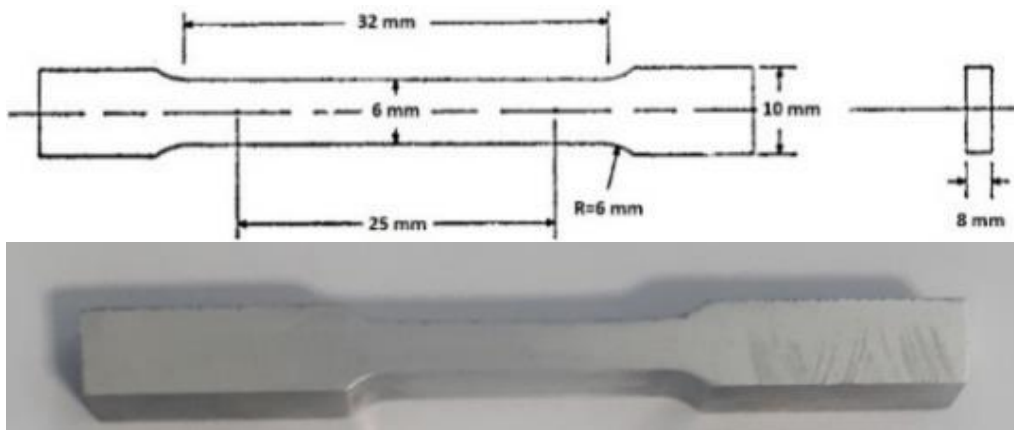
آقای عزت‌پور و دیگر همکارانش در سال ۲۰۱۶ تحقیقاتی راجع به ریزساختار، تجزیه و تحلیل مکانیکی و انتخاب بهینه نانوکامپوزیت با زمینه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تقویت شده با ذرات آلومینا انجام دادند و تأثیرات درصد وزنی‌های مختلف نانوذرات آلومینا، فرآیند اکستروژن بر میکروساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تولید شده را بررسی کردند. در این تحقیق مشخص شد که، تخلخل نانو کامپوزیت با افزایش درصد وزنی ذرات آلومینا، افزایش می‌یابد و با به کارگیری فرآیند اکستروژن، کاهش می‌یابد؛ همچنین اضافه کردن نانوذرات و به کارگیری فرآیند اکستروژن باعث بهبود خواص مکانیکی آلومینیوم ۷۰۷۵ شد [۹].

در سال ۲۰۱۸ آقای اُتیونز و همکارانش به بررسی رشد ترک خستگی در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۵۰ پرداختند. آنها رشد ترک خستگی را در این آلیاژ با استفاده از نمونه‌های استاندارد به صورت تجربی بدست آوردند؛ همچنین رویکرد استفاده شده در آزمایش‌های تجربی را به صورت عددی و با توجه به هندسه، بارگذاری و رفتار ماده در پیش گرفتند و رفتار چرخه‌ای پلاستیک ماده را با استفاده از منحنی تنش-کرنش به دست آمده در تست خستگی کم چرخه مدل کردند و پیش‌بینی عددی از بازشدگی نوک ترک برای طول ترک‌های مختلف را بدست آوردند [۱۰].

در سال ۲۰۱۹ آلوکای و همکارانش با هدف بهبود خواص مکانیکی و خستگی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۴۹ از ذرات اکسید زیرکونیوم در ابعاد نانو و با میانگین قطر ۳۰-۴۰ نانومتر با درصد‌های مختلف ۲، ۴، ۶ و ۷ درصد استفاده کردند. به دلیل صرفه اقتصادی از روش ریخته‌گری همزنی استفاده شد و نتایج تجربی نشان داد که افزودن اکسید زیرکونیوم به عنوان ماده تقویت‌کننده منجر به بهبود خواص



شکل ۱- ابعاد نمونه تست خستگی طبق استاندارد ASTM E647 [۱۳]



شکل ۲- ابعاد نمونه تست کشش طبق استاندارد ASTM E08 [۱۳]

می‌یابد. به همین دلیل با انجام مرحله دوم عملیات حرارتی مقداری از استحکام کاسته می‌شود و نرمی و انعطاف‌پذیری بهبود می‌یابد.

بعد از اتمام فرآیند عملیات حرارتی، به منظور دستیابی به صافی سطح مناسب، سطح نمونه‌ها سنباده زده شدند. این کار به منظور اطمینان از بر طرف شدن هرگونه عیب سطحی حین انجام تست رشد ترک خستگی انجام شد که امکان جوانه‌زنی و رشد ترک را از بین ببرد.

سپس نمونه‌های ماشین‌کاری شده تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند [۱۴]. به اینصورت که در مرحله اول نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد نگاه‌داشته شدند، سپس از کوره خارج و در آب کوئینچ شدند. در مرحله بعد به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس در محیط سرد شدند. مرحله اول عملیات حرارتی به منظور افزایش استحکام انجام می‌شود؛ اما با افزایش استحکام، نرمی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت کاهش

۲-۲- نحوه اجرای مراحل

تست‌های کشش و رشد ترک خستگی در این پژوهش توسط دستگاه SAF-50 شرکت سنتام انجام شد. لودسل دستگاه ۵۰۰۰ کیلوگرم-نیرو از نوع S Type در کلاس ۰/۵ با حداکثر خطای ۰/۵ درصد عدد خوانده شده در بازه ۲ درصد تا ۱۰۰ درصد ظرفیت لودسل مطابق استاندارد ISO 7500 و EN 10002 (به همراه برگه کالیبراسیون شرکت سنتام) است؛ همچنین حداکثر فرکانس دستگاه جهت اعمال بارهای سیکلی ۵۰ هرتز است.

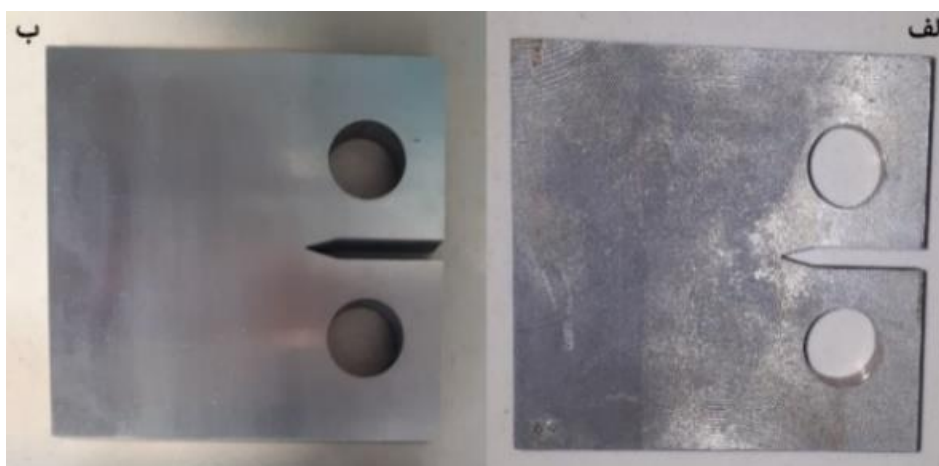
۲-۳- تست کشش

ابتدا نمونه‌ها در فک‌های دستگاه محکم شدند و سپس با سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه، تا شکسته شدن نمونه‌ها تحت کشش قرار گرفتند.

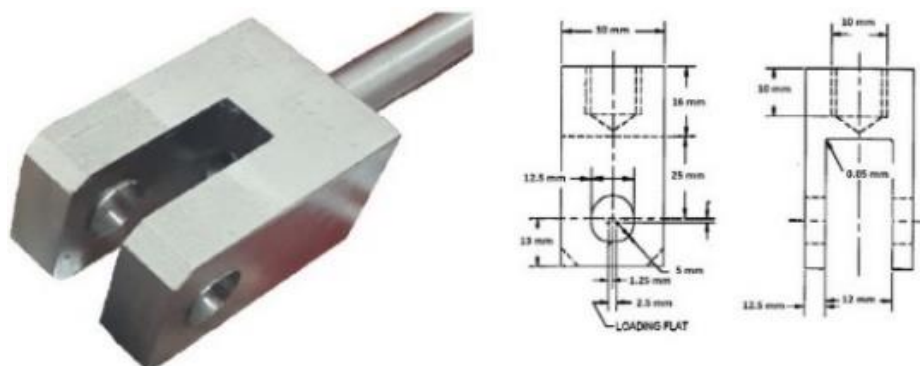
۲-۴- تست رشد خستگی

به منظور نگه داشتن نمونه‌های آماده شده در فک‌های دستگاه، مطابق استاندارد ASTM E647 فیکسچرهایی ساخته شدند. فیکسچرها توسط دستگاه فرز CNC و از Steel 304 تراشیده شدند. در شکل ۴ فیکسچرهای ساخته شده و ابعاد آن را نشان می‌دهد.

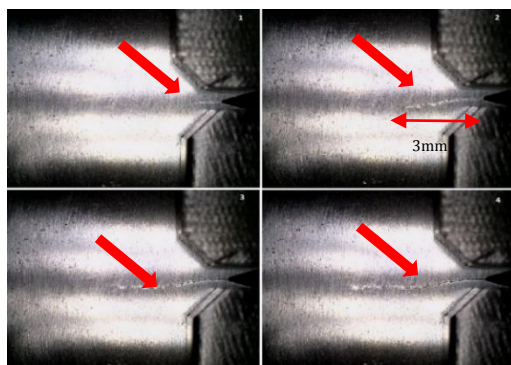
جهت مشاهده ترک و به منظور اندازه‌گیری طول ترک در هر لحظه، از دوربین میکروسکوپ دیجیتال Dino-Light AM-7915MZT-Edge استفاده شد. این دوربین با کیفیت ۵ مگاپیکسل و توانایی بزرگنمایی ۲۲۰ برابر به راحتی امکان روئیت ترک و تهیه فیلم و عکس از آن را فراهم می‌کند؛ همچنین با استفاده از نرم‌افزار جانبی آن، امکان کالیبره کردن میکروسکوپ و اندازه‌گیری ترک با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر فراهم بود.



شکل ۳- نمونه‌های تست خستگی ماشین‌کاری شده (الف) قبل از سنباده زنی و (ب) بعد از سنباده زنی



شکل ۴- فیکسچر ساخته شده و ابعاد آن جهت بستن نمونه‌های تست خستگی در دستگاه [۱۳]



شکل ۵- چهار تصویر از مراحل مختلف رشد ترک خستگی

جدول ۱- ترکیبات آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ [۱۵]

عنصر	درصد وزنی
Al	Base
Mg	۲/۳۵
Cu	۱/۳۶
Cr	۰/۲۳۳
Zn	۵/۲
Ti	۰/۰۱۴۶
Si	۰/۱۷۴
Mn	۰/۱۵۶
Fe	۰/۲۲۳
Ni	۰/۰۰۴۳
Be	۰/۰۰۰۰۳
Pb	۰/۰۰۶۹
Sb	۰/۰۰۲۸
Sn	<۰/۰۰۰۰۵
V	۰/۰۱۰۷
Zr	۰/۰۰۸۴

همانطور که در شکل ۵ و ۴ مرحله رشد ترک در آن قابل مشاهده است، ابتدا نمونه‌ها جهت ایجاد پیش‌ترک در آنها، تحت بارگذاری تناوبی با شکل موجی سینوسی و بیشترین تنش ۲۰ مگاپاسکال، کمترین تنش ۲ مگاپاسکال و فرکانس ۱۰ هرتز قرار گرفتند. این شرایط تست تا ایجاد شدن ترکی به طول ۳ میلی‌متر در قطعه ادامه یافت (مرحله ۱ و ۲). سپس جهت داده برداری رشد ترک خستگی نمونه؛ نمونه‌ها تحت بارگذاری تناوبی با شکل موج سینوسی با بیشترین تنش ۳۰ مگاپاسکال، کمترین تنش ۲ مگاپاسکال و فرکانس ۱۰ هرتز قرار گرفتند. این شرایط تست تا شکست کامل نمونه‌ها ادامه یافت (مرحله ۳ و ۴) و داده‌های رشد ترک بر حسب تعداد سیکل استخراج شد.

۲-۵- بررسی ریزساختاری و آنالیز شیمیایی

جهت بررسی بیشتر و دقیق‌تر ریزساختاری، نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مورد بررسی قرار گرفتند؛ همچنین جهت بررسی آنالیز عنصری نقاط مختلف در تصاویر میکروسکوپ الکترونی^۲ از استفاده گردید که نتایج آنها در ادامه بیان خواهد شد.

۳- نتایج و بحث

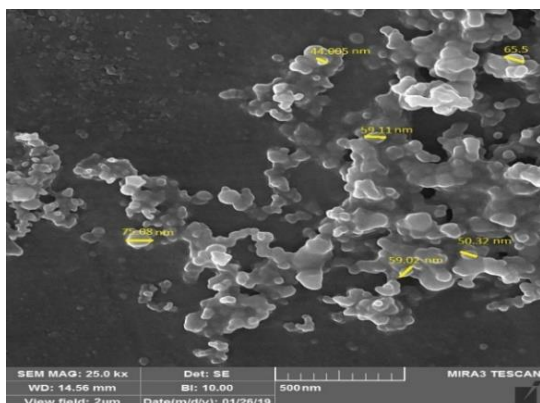
۳-۱- نتیجه آزمون کوانتومتری

نتیجه آزمون کوانتومتری انجام شده بر روی آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ خریداری شده، به منظور صحت‌سنجی و اطمینان از گرید آلومینیوم تهیه شده در زیر آورده شده است. این آزمون در آزمایشگاه متالورژی جهاد دانشگاه شریف انجام شده است.

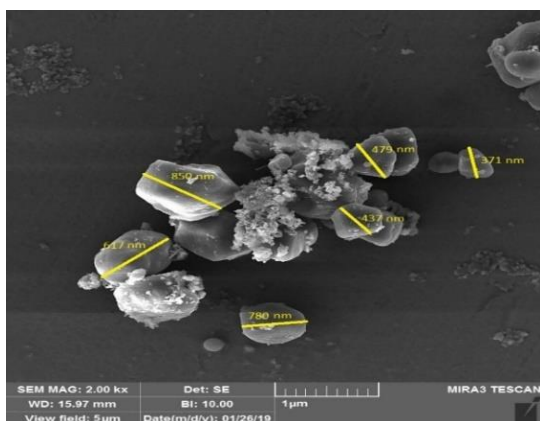
مقادیر عناصر آلیاژی در آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ مطابق استانداردهای جهانی، در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول ۲ مشاهده می‌شود که نتایج آزمون کوانتومتری در محدوده مقادیر ارائه شده در استاندارد است.

^۱ SEM
^۲ EDS

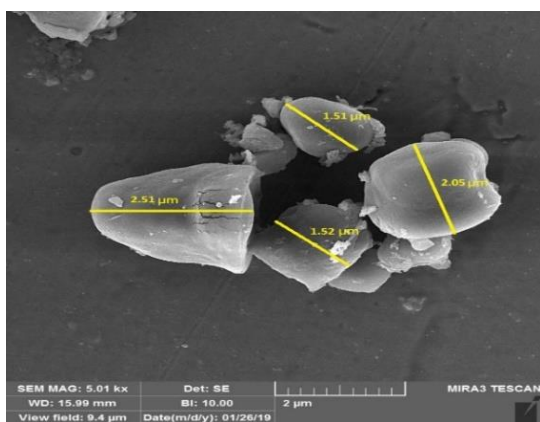
بیشترین بهبود در استحکام کشش نهایی مربوط به نمونه یک درصد بوده است.



شکل ۶- تصویر ذرات سیلیکون کارباید با اندازه ذرات نانو



شکل ۷- تصویر ذرات سیلیکون کارباید با اندازه ذرات زیرمیکرون



شکل ۸- تصویر ذرات سیلیکون کارباید با اندازه ذرات میکرون

جدول ۲- نتایج آزمون کوانتومتری آلومینیوم T۶-۷۵

عنصر	درصد وزنی
Al	۸۷/۹۱-۱/۴
Mg	۲/۲-۱/۹
Cu	۱/۳-۲
Cr	۰/۰-۱۸/۳۸
Zn	۵/۶-۱/۱
Ti	۰/۲ ماکزیمم
Si	۰/۴ ماکزیمم
Mn	۰/۳ ماکزیمم
Fe	۰/۵ ماکزیمم
Other, each	۰/۰۵ ماکزیمم
Other, total	۰/۱۵ ماکزیمم

۳-۲- نتایج آزمون SEM پودرها

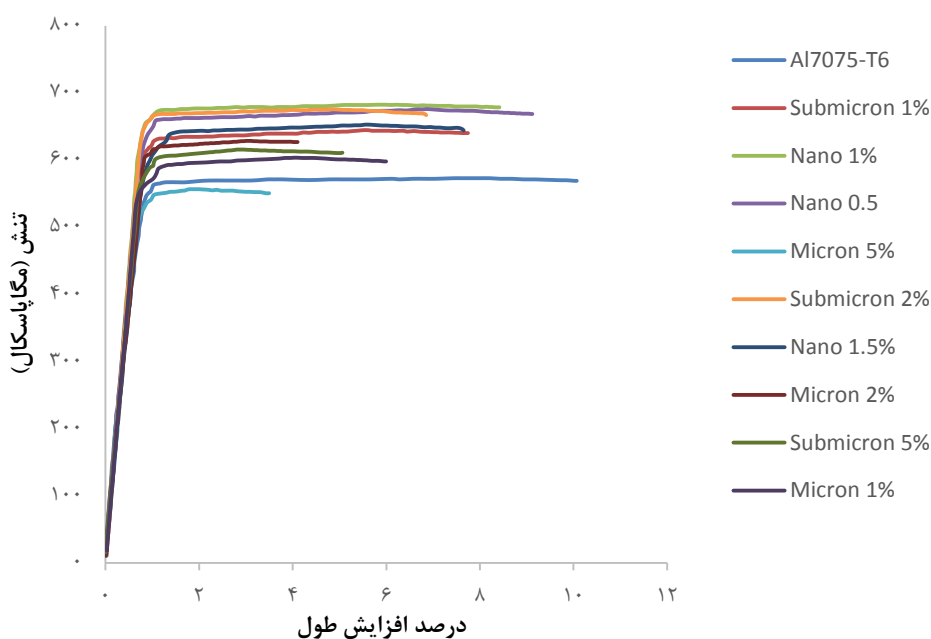
در زیر تصاویر SEM مربوط به هر سه نمونه پودر بعد از خرید از بازار و قبل از اعمال هرگونه فرآیندی ارائه شده است، همچنین سایز ذرات هر نمونه روی شکل درج شده است. همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، ذرات سیلیکون کارباید با اندازه ذرات نانو در در بازه ۷۵/۰۸-۴۴/۰۰۵ نانومتر می باشند. به همین ترتیب شکل ۷ که مربوط به ذرات سیلیکون کارباید با اندازه ذرات زیرمیکرون در بازه ۰/۳۷۱-۰/۸۵ میکرومتر و شکل ۸ تصویر ذرات سیلیکون کارباید با اندازه ذرات میکرون در بازه ۱/۵۱-۲/۵۱ میکرومتر می باشند.

۳-۳- نتایج آزمون کشش

با دقت در شکل ۹ که نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها را به صورت تجمیعی نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با اضافه کردن نانو ذرات به آلومینیوم، استحکام کشش نهایی افزایش یافته است؛ اما در مقابل شکل‌پذیری کامپوزیت‌های ساخته شده نسبت به آلومینیوم ۷۰۷۵ دچار افت شده است.

نهایی افزایش یافته است؛ اما در مقابل شکل‌پذیری کامپوزیت‌های ساخته شده نسبت به آلومینیوم ۷۰۷۵ دچار افت شده است. بیشترین بهبود در استحکام کشش نهایی مربوط به نمونه ۲ درصد بوده است (جدول ۳). با مقایسه استحکام‌های نهایی کشش در نمونه‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، مشخص می‌شود که به ترتیب نمونه‌هایی با اندازه ذرات نانو، زیرمیکرون و میکرون از لحاظ بهبود استحکام نهایی کششی عملکرد بهتری داشته‌اند.

همچنین مشاهده می‌شود که با اضافه کردن ذرات زیرمیکرون به آلومینیوم استحکام کشش نهایی افزایش یافته است؛ اما در مقابل شکل‌پذیری کامپوزیت‌های ساخته شده نسبت به آلومینیوم ۷۰۷۵ دچار افت شده است. بیشترین بهبود در استحکام کشش نهایی مربوط به نمونه ۲ درصد بوده است. در نهایت با اضافه کردن ذرات میکرون به آلومینیوم، به جز نمونه ۵ درصد وزنی، در دیگر نمونه‌ها استحکام کشش



شکل ۹- نمودار تجمیع شده تنش- کرنش تمامی نمونه‌ها

جدول ۳- خواص مکانیکی گزارش شده از تست کشش

نوع ذرات تقویت کننده	Al7075-T6	ذرات نانو	ذرات زیرمیکرون	ذرات میکرون
درصد جرمی	-	۰/۵	۱	۱/۵
استحکام تسلیم	۴۹۶/۲۷	۶۱۱/۱۹	۶۲۴/۷۷	۵۹۶/۱۹
استحکام کشش نهایی	۵۶۱/۹۶	۶۷۵/۵۴	۶۸۱/۸۶	۶۴۹/۲۲
مدول الاستیک	۷۰/۶۰	۷۹/۰۵	۸۲/۲۶	۷۶/۰۱
درصد ازدیاد طول	۱۰/۰۶	۹/۱۲	۸/۴۱	۷/۶۵

وزنی و یک درصد وزنی است؛ همچنین مشاهده می‌شود که در مقایسه با آلومینیوم هر سه کامپوزیت ساخته شده با ذرات نانو، طول ترک کمتری داشته‌اند. هر چقدر درصد ذرات تقویت‌کننده بیشتر شده، از طول ترک نهایی کاسته شده است (جدول ۴).

سپس مشاهده می‌شود که در بین کامپوزیت‌های ساخته شده با ذرات زیرمیکرون بیشترین طول ترک و بیشترین تعداد سیکل به ترتیب مربوط به نمونه یک درصد وزنی و ۲ درصد وزنی است؛ همچنین مشاهده می‌شود که در مقایسه با آلومینیوم، هر سه کامپوزیت ساخته شده با ذرات زیرمیکرون، طول ترک کمتری داشته‌اند. هر چقدر درصد ذرات تقویت‌کننده بیشتر شده است از طول ترک نهایی کاسته شده است. به عبارت دیگر؛ مشابه ذرات نانو، ذرات تقویت‌کننده نقش مخرب در شکل‌پذیری ماده داشته‌اند؛ اما باعث شده‌اند که آلومینیوم تعداد سیکل بیشتری را تحمل کند (جدول ۴).

در نهایت مشاهده می‌شود که در بین کامپوزیت‌های ساخته شده با ذرات میکرون بیشترین طول ترک و بیشترین تعداد سیکل به ترتیب مربوط به نمونه یک درصد وزنی و ۲ درصد وزنی است؛ همچنین مشاهده می‌شود که در مقایسه با آلومینیوم هر سه کامپوزیت ساخته شده با ذرات زیرمیکرون، طول ترک کمتری داشته‌اند. هر چقدر درصد ذرات تقویت‌کننده بیشتر شده است از طول ترک نهایی کاسته شده است. به عبارت دیگر در این حالت نیز ذرات تقویت‌کننده نقش مخرب در شکل‌پذیری ماده داشته‌اند. ذرات تقویت‌کننده در دو نمونه یک درصد وزنی و ۲ درصد وزنی باعث شده‌اند، آلومینیوم تعداد سیکل بیشتری را تحمل کند؛ اما در نمونه ۵ درصد، هم شکل-پذیری و هم تعداد سیکل قطعه کاهش یافته است. جدول ۴ با توجه به نمودار تجمیعی ارائه شده مشخص می‌شود که حداکثر اندازه ترک در نمونه آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ بدست آمده است. با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده هر چند عمر قطعات افزایش یافته است، اما اندازه ترک نهایی کاهش یافته است؛ همچنین مشاهده می‌شود هر چقدر اندازه ذرات تقویت‌کننده استفاده شده جهت ساخت نانو کامپوزیت بزرگتر باشد، اندازه ترک نهایی کاهش بیشتری را خواهد داشت؛ همچنین در شرایطی که اندازه ذرات تقویت‌کننده یکسان باشند و کسر جرمی ذرات تقویت‌کننده تغییر کند، طول ترک تحت تاثیر قرار می‌گیرد و با افزایش کسر جرمی، اندازه ترک نهایی کاهش می‌یابد.

در بین نمونه‌هایی با اندازه ذره نانو، نمونه با یک درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده از دیگر نمونه‌ها بهتر عمل کرده است و استحکام کشش نهایی را بهبود بیشتری بخشیده است، که این بهبود معادل ۲۱/۳۳ درصد است. نمونه با ۰/۵ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده نیز بهبودی معادل ۲۰/۲۱ درصد و نمونه با ۱/۵ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده بهبودی معادل ۱۵/۵۲ درصد داشته است.

در بین نمونه‌هایی با اندازه ذره زیرمیکرون، نمونه با ۲ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده از دیگر نمونه‌ها بهتر عمل کرده است و استحکام کشش نهایی را بهبود بیشتری بخشیده است، که این بهبود معادل ۱۶/۱۰ درصد است. نمونه با یک درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده نیز بهبودی معادل ۱۴/۶۱ درصد و نمونه با ۵ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده بهبودی معادل ۹/۵۴ درصد داشته است.

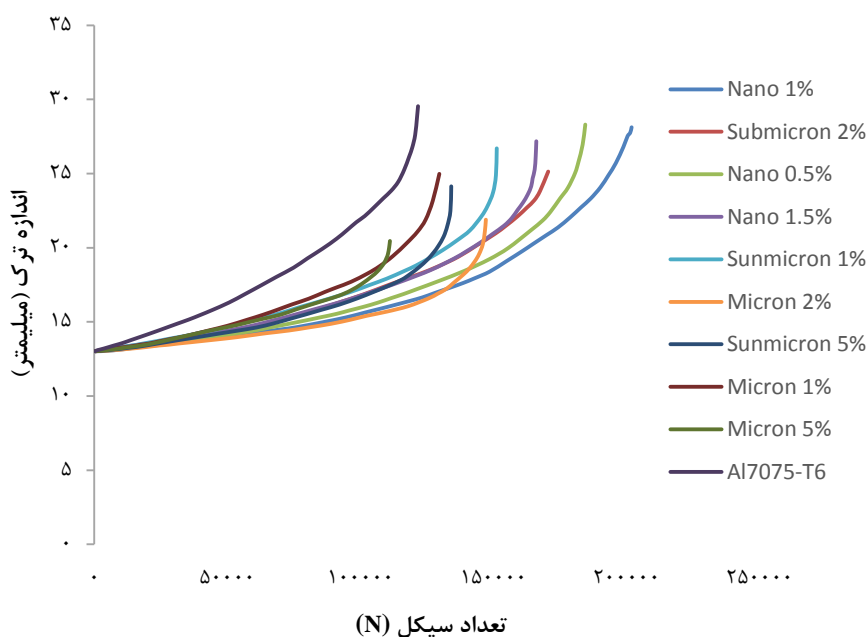
در بین نمونه‌هایی با اندازه ذره میکرون، نمونه با ۲ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده از دیگر نمونه‌ها بهتر عمل کرده است و استحکام کشش نهایی را بهبود بیشتری بخشیده است که این بهبود معادل ۱۱/۶۵ درصد است. نمونه با یک درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده نیز بهبودی معادل ۷/۱۸ درصد داشته است؛ اما نمونه با ۵ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده باعث کاهشی معادل ۱/۱۲ درصد در استحکام نهایی کشش شده است (جدول ۳).

۳-۳-۱- تاثیر ذرات تقویت‌کننده بر ازدیاد طول

با بررسی داده‌های به دست آمده از تست کشش، مقادیر ازدیاد طول مربوط به هر نمونه، استخراج شد و در شکل ۹ به صورت تجمیعی گزارش شد. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر جرمی ذرات تقویت‌کننده درصد ازدیاد طول روند کاهشی دارد؛ همچنین اندازه ذرات تقویت‌کننده نیز در ازدیاد طول مؤثر است، به این صورت که با افزایش اندازه ذرات تقویت‌کننده، ازدیاد طول کاهش می‌یابد (جدول ۳).

۳-۴- نتایج آزمون رشد ترک خستگی

با توجه به شکل ۱۰ که نمودار تجمیعی اندازه ترک خستگی برحسب تعداد سیکل است، مشاهده می‌شود که در بین کامپوزیت‌های ساخته شده با ذرات نانو بیشترین طول ترک و بیشترین تعداد سیکل به ترتیب مربوط به نمونه ۰/۵ درصد



شکل ۱۰- نمودار تجمیع شده اندازه ترک خستگی بر حسب تعداد سیکل

جدول ۴- اندازه ترک و تعداد سیکل گزارش شده از آزمون رشد ترک خستگی

ذرات میکرون			ذرات زیرمیکرون			ذرات نانو		Al7075-T6	نوع ذرات تقویت کننده	
۵	۲	۱	۵	۲	۱	۱/۵	۱	۰/۵	-	درصد جرمی
۲۰/۴۵	۲۱/۸۸	۲۴/۹۷	۲۴/۱۳	۲۵/۱۳	۲۶/۶۹	۲۷/۱۷	۲۸/۱۲	۲۸/۳۰	۲۹/۵۴	طول ترک نهایی (میلیمتر)
۱۱۱۱۲۰	۱۴۷۱۳۰	۱۲۹۶۵۰	۱۳۴۱۳۰	۱۷۰۵۴۰	۱۵۱۲۲۰	۱۶۶۰۷۰	۲۰۱۸۷۰	۱۸۴۴۸۷	۱۲۱۶۵۰	تعداد سیکل

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ شده و بنابراین ناحیه‌های زیادی در برابر حرکت نابجایی‌ها مانع ایجاد می‌کنند [۱۶].
 ۲- مکانیزم استحکام‌دهی اوروان^۲ که بیان می‌کند تنش لازم برای عبور نابجایی‌ها از بین ذرات، متناسب با معکوس فاصله بین آنهاست. طبق این مکانیزم حلقه نابجایی مقاومت زیادی در برابر حرکت نابجایی‌های بعدی ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که این مکانیزم در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات میکرومتری خیلی قابل توجه نیست؛ زیرا ذرات تقویت کننده درشت هستند و فاصله بین آنها زیاد است [۱۶].

² Orowan

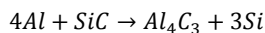
۳-۵- نتایج بررسی ریزساختاری

همانطور که ملاحظه می‌شود استحکام نمونه‌های دارای ذرات تقویت کننده بالاتر از نمونه بدون ذرات تقویت کننده است. دلیل این امر میکرومکانیزم‌های استحکام‌دهی ذرات تقویت کننده روی زمینه فلزی است که در زیر به آنها اشاره شده است.
 ۱- استحکام دهی طبق اثر هال-پچ^۱ که در آن مرز دانه‌ها به عنوان مانعی در برابر حرکت و لغزش نابجایی‌ها عمل می‌کنند. ذرات سیلیکون کارباید باعث ریز شدن دانه‌های

¹ Hull-Petch

می‌شود و پیوند قوی‌تری نیز برقرار می‌شود. در واقع با کوچکتر شدن ذرات، امکان آگلومره شدن آنها افزایش یافته و پراکنده کردن یکنواخت این ذرات کاری دشوار است [۱۹]. علاوه بر موارد گفته شده در بالا، تشکیل رسوبات بین فلزی در حین فرآیند ساخت نمونه نیز تأثیری قابل توجهی در افزایش استحکام دارد [۱۶ و ۲۰].

در حین فرآیند ریخته‌گری بین ذرات تقویت‌کننده و فاز زمینه، واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد که باعث تشکیل رسوبات فلزی می‌شود. در زیر واکنش افتاده بین ذرات سیلیکون کارباید و آلومینیوم ۷۰۷۵ آورده شده است [۲۰].

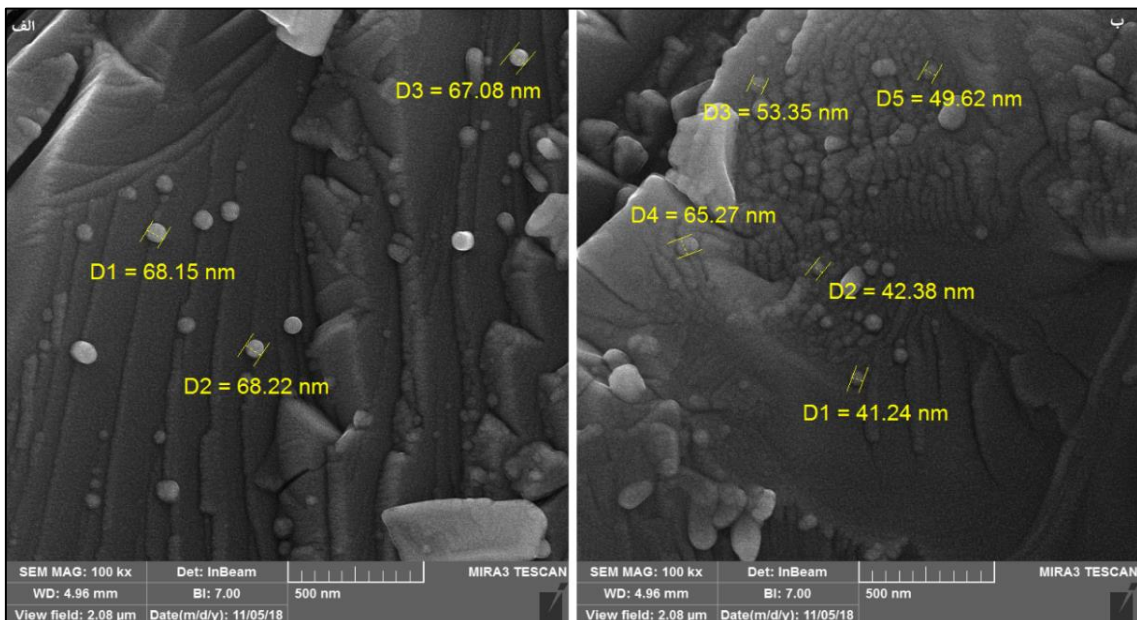


همانطور که ملاحظه می‌شود، فرآورده‌های واکنش، رسوب آلومینیوم کارباید و عنصر سیلیسیوم است. رسوب آلومینیوم کارباید باعث افت استحکام می‌شود. از طرفی سیلیسیوم آزاد شده در مذاب با منیزیم موجود در آلیاژ آلومینیوم و همچنین منیزیمی که برای بهبود ترشوندگی به مذاب اضافه شده، واکنش داده و منجر به تشکیل رسوب سیلیسید منیزیم می‌شود.

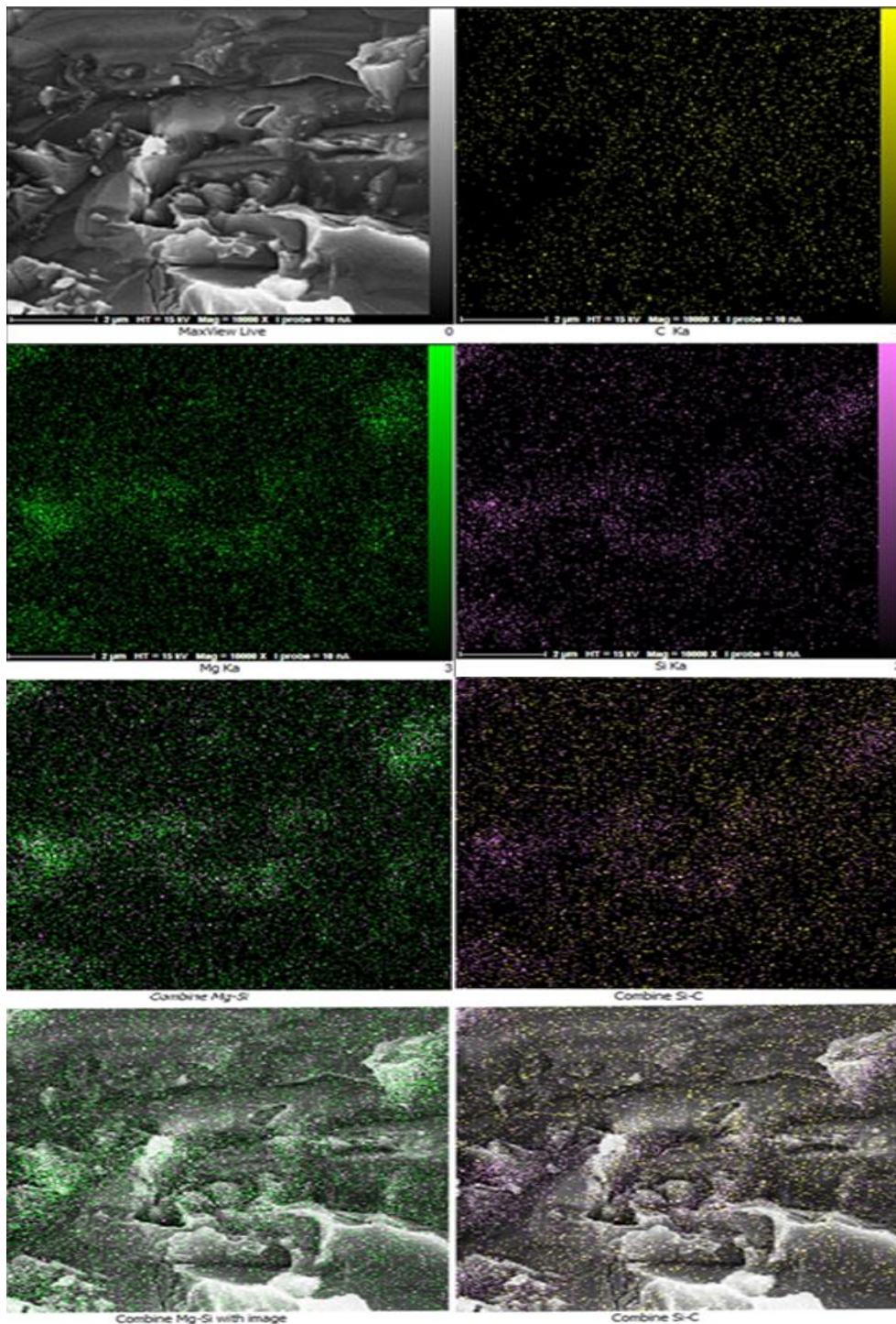
۳- ذرات تقویت‌کننده با قرار گرفتن در مسیر حرکت ترک باعث می‌شوند که ترک برای رشد بیشتر یا آنها را دور بزند و یا با شکافتن ذرات از داخل آنها عبور کند که هر دو حالت باعث افزایش استحکام می‌شود [۱۶].

۴- انتقال بار از زمینه فلزی با استحکام کمتر به ذرات تقویت‌کننده سفت و سخت سیلیکون کارباید، منجر به افزایش استحکام می‌شود. در این مورد هر چه پیوند بین ذرات تقویت‌کننده و فاز زمینه محکم‌تر باشد، افزایش استحکام بیشتر است [۱۶]. شکل ۱۱ فصل مشترک قوی، جابه‌جایی و توزیع بار از زمینه به تقویت‌کننده را ممکن می‌سازد و سبب افزایش مدول الاستیک و استحکام می‌شود [۱۷]. از نظر متالوگرافی، مناطق سطحی مورد نظر در کامپوزیت به چند عامل وابسته است:

- ۱- تماس بسیار نزدیک بین تقویت‌کننده و زمینه برای ترشوندگی مناسب بین تقویت‌کننده‌ها با زمینه.
 - ۲- واکنش‌پذیری کم شیمیایی در فصل مشترک و نفوذ داخلی بسیار ناچیز بین فازهای تشکیل دهنده، برای جلوگیری از تخریب تقویت‌کننده‌ها [۱۸].
- در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با کوچکتر شدن اندازه ذرات مورد استفاده، جمع شدن آنها در کنار هم بیشتر مشاهده



شکل ۱۱- توزیع در فاز زمینه در نمونه یک درصد با ذرات نانو (الف) پیوند ضعیف بین ذرات و فاز زمینه و (ب) پیوند قوی بین ذرات و فاز زمینه



شکل ۱۲- آنالیز عنصری یک قسمت از نمونه یک درصد با ذرات نانو شامل عناصر: C, Ka, Mg, Si

می‌ماند که باعث رشد سریع‌تر ترک در قسمت‌هایی که سیلیسیوم وجود دارد می‌شود [۱۶ و ۲۰].

وجود این رسوب باعث افزایش استحکام خواهد شد؛ همچنین مقداری از سیلیسیوم به صورت آزاد در زمینه باقی

۲- تنش تسلیم و استحکام نهایی کشش آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ تقویت شده به وسیله ذرات سیلیکون کارباید، با افزایش کسر جرمی ذرات تقویت کننده تا یک مقدار بهینه، بهبود می یابد و پس از آن با افزایش کسر جرمی افت می کند.

۳- در کسر جرمی های یکسان، با افزایش اندازه ذرات فاز تقویت کننده، در مقادیر تنش تسلیم، استحکام نهایی کشش و طول عمر خستگی نانوکامپوزیت کاهش محسوس مشاهده می شود. به عبارت دیگر هر چقدر اندازه ذرات فاز تقویت کننده ریزتر باشد، مقادیر تنش تسلیم، استحکام نهایی کشش، شکل پذیری و طول عمر خستگی مطلوب تر است.

۴- به طور کلی شکل پذیری و درصد ازدیاد طول با اضافه کردن ذرات تقویت کننده کاهش می یابد. هر چه اندازه ذرات و کسر جرمی ذرات تقویت کننده بیشتر باشد، کاهش شکل-پذیری و درصد ازدیاد طول بیشتر است.

۵- طول ترک نهایی تحت تأثیر اندازه و کسر جرمی ذرات تقویت کننده است.

۶- طول عمر خستگی با اندازه ذرات و کسر جرمی ذرات تقویت کننده مرتبط است.

۷- با افزایش اندازه ذرات تقویت کننده در یک کسر جرمی مشخص، عمر خستگی کاهش می یابد. به عبارت دیگر هر چه اندازه ذرات تقویت کننده ریزتر باشد، طول عمر خستگی بیشتر است.

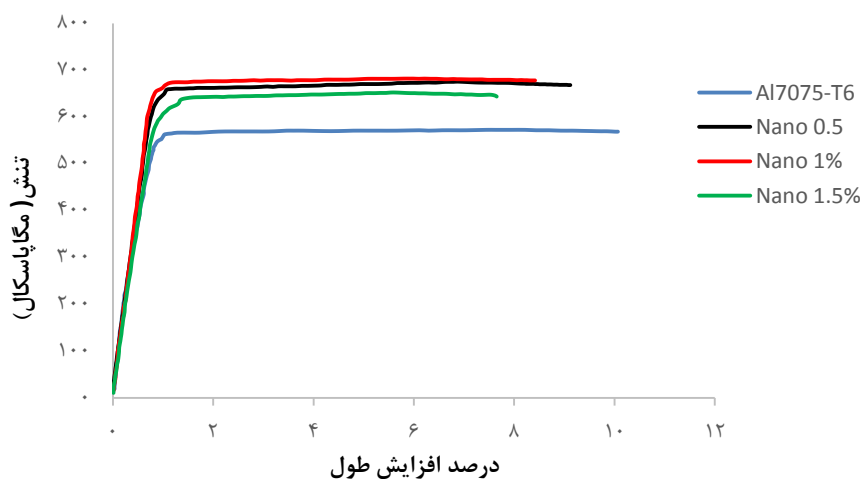
شکل (۱-۱۲) و شکل (۲-۱۲) آنالیز عنصری یک قسمت از نمونه یک درصد با ذرات نانو را نشان می دهند. شکل (۱-۱۲) پراکندگی عنصرهای مختلف نظیر C, Ka, Mg, Si و شکل (۲-۱۲) شامل ترکیباتی مانند Mg-Si, Si-C بوده که در قسمت مورد نظر، تأیید کننده ادعای تشکیل رسوبات گفته شده در قسمت فوق است.

عواملی دیگری مانند وجود خلل و فرج و مکها بر استحکام نهایی نانوکامپوزیت اثرگذار هستند. از دلایل به وجود آمدن تخلخل می توان به جذب گاز هنگام همزدن مکانیکی مذاب جهت حل کردن ذرات، تبخیر رطوبت موجود در بین ذرات اشاره کرد؛ همچنین روی سطح اکثر ذرات گاز وجود دارد. بیشترین گاز مشاهده شده بخار آب است که با افزایش سایز ذرات و کسر جرمی ذرات حجم این گاز افزایش خواص نهایی به دست آمده برای هر یک از نمونه های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق نتیجه اندرکنش عواملی است که در بالا به آنها اشاره شد.

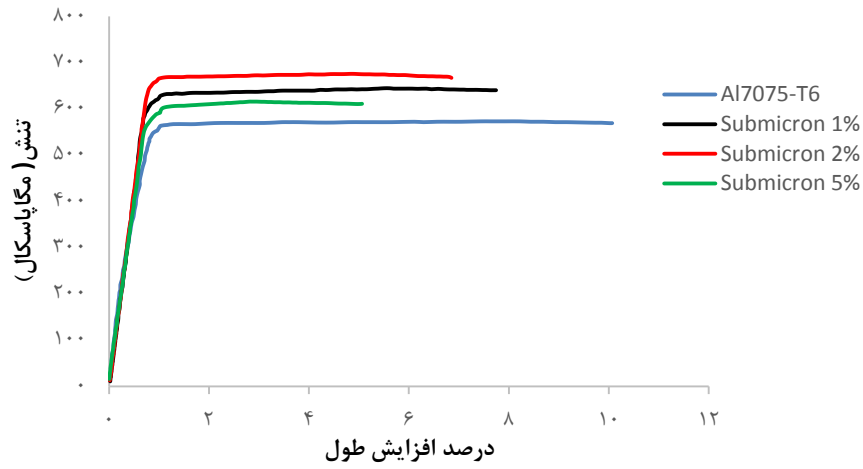
۳-۶- جمع بندی نتایج

۱- مقادیر تنش تسلیم، مدول الاستیک، استحکام نهایی کشش، شکل پذیری و طول عمر خستگی آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ تقویت شده با ذرات سیلیکون کارباید، تحت تأثیر هر دو پارامتر اندازه ذرات و کسر جرمی ذرات تقویت کننده است.

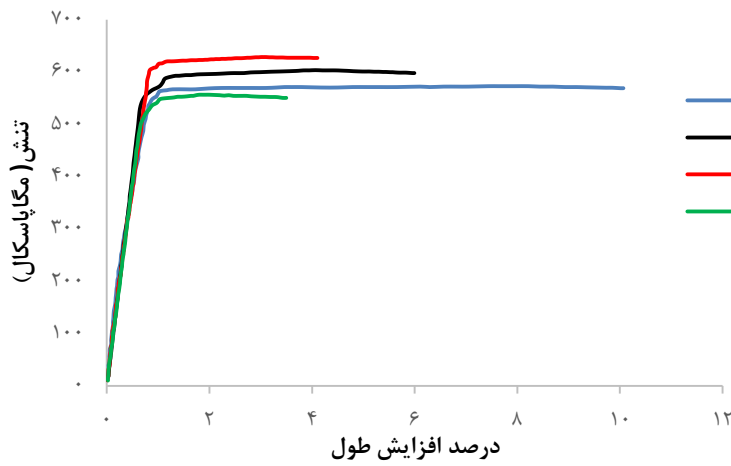
۵- ضمائم



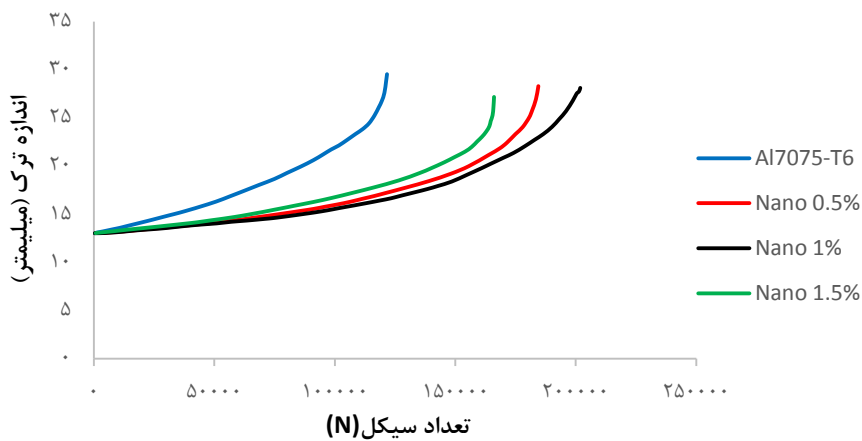
شکل ۱۳- نمودارهای تنش- کرنش مربوط به اندازه ذره نانو



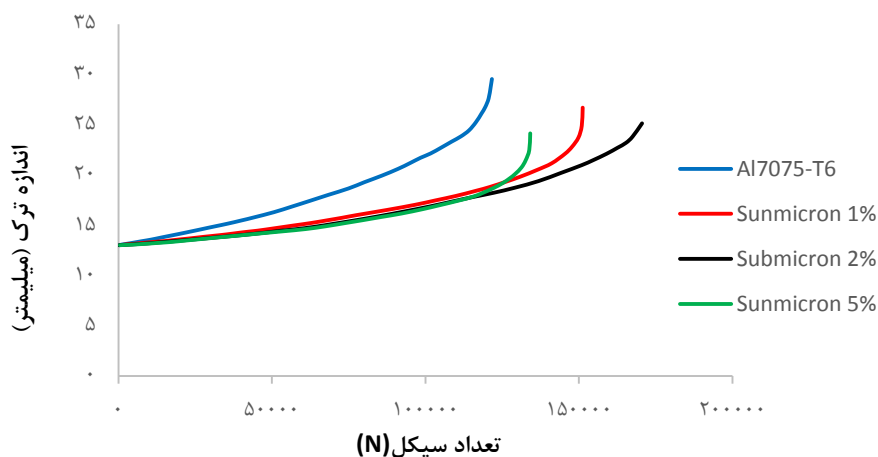
شکل ۱۴- نمودارهای تنش- کرنش مربوط به اندازه ذره زیر میکرون



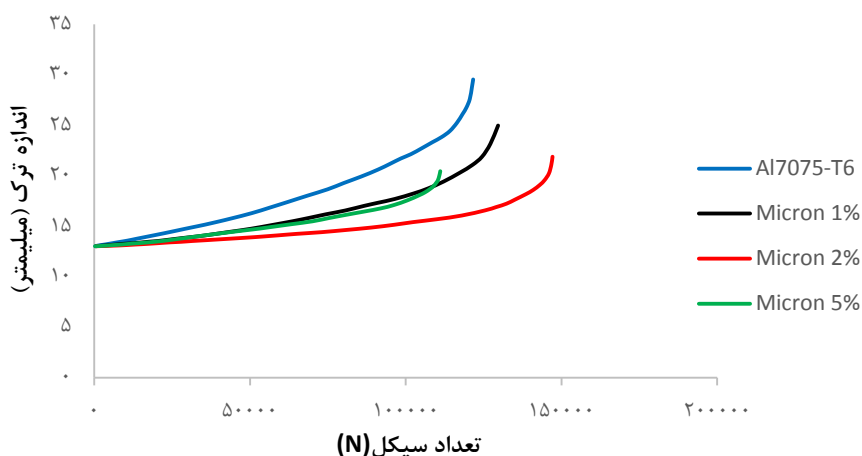
شکل ۱۵- نمودارهای تنش- کرنش مربوط به اندازه ذره میکرون



شکل ۱۶- نمودارهای اندازه ترک- تعداد سیکل مربوط به اندازه ذره نانو



شکل ۱۷- نمودارهای اندازه ترک-تعداد سیکل مربوط به اندازه ذره زیرمیکرون



شکل ۱۸- نمودارهای اندازه ترک-تعداد سیکل مربوط به اندازه ذره میکرون

[5] Chen Z, Tokaji K (2004) Effects of particle size on fatigue crack initiation and small crack growth in SiC particulate-reinforced aluminium alloy composites. *Mater Lett* 58(17-18): 2314-232.

[6] Kaynak C, Boylu S (2006) Effects of SiC particulates on the fatigue behaviour of an Al-alloy matrix composite. *Mater Des* 27(9): 776-782

[7] Chawla N, Ganesh V (2010) Fatigue crack growth of SiC particle reinforced metal matrix composites. *Int J Fatigue* 32(5): 856-863.

[8] Balaji V, Sateesh N, Hussain MM (2015) Manufacture of aluminium metal matrix composite (Al7075-SiC) by stir casting technique. *Mater Today: Proc* 2(4-5): 3403-3408.

[9] Ezatpour H, Parizi MT, Sajjadi SA, Ebrahimi G, Chaichi A (2016) Microstructure, mechanical analysis and optimal selection of 7075 aluminum

۴- مراجع

[1] Williams JC, Starke EA (2003) Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Mater* 51(19): 5775-5799.

[2] Azadi M, Rezanezhad S, Zolfaghari M, Azadi M (2020) Investigation of tribological and compressive behaviors of Al/SiO₂ nanocomposites after T6 heat treatment. *Sadhana* 45(1): 28.

[3] Davidson D (1989) The growth of fatigue cracks through particulate SiC reinforced aluminum alloys. *Eng Fract Mech* 33(6): 965-977.

[4] Komai K, Minoshima K, Ryoson H (1993) Tensile and fatigue fracture behavior and water-environment effects in a SiC-whisker/7075-aluminum composite. *Compos Sci Technol* 46(1): 59-66.

- by plasma activated sintering. *J Alloy Compd* 588: 265-270.
- [16] Amory K, Amory J, Ahmadifard S, Kazazi M, Kazemi S (2017) Preparation and characterization of A356 composite reinforced with SiC nano- and microparticles by stir casting method. *Modares Mech Eng* 16(10): 335-342.
- [17] Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ (2001) The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy. *J Mater Process Technol* 119: 324-328.
- [18] Wang N, Wang Z, Weatherly G.C (1992) Formation of magnesium aluminate (spinel) in cast SiC particulate reinforced Al (A356) metal matrix composites. *Metall Mater Trans A* 23.5: 1423-1430.
- [19] Ezatpour HR, Sajjadi SA, Sabzevar MH, Huang Y (2014) Investigation of microstructure and mechanical properties of Al6061-nanocomposite fabricated by stir casting. *Mater Des* 55: 921-928.
- [20] Sritharan T, Chan L, Tan L, Hung N (2001) A feature of the reaction between Al and SiC particles in an MMC. *Mater Charact* 47(1): 75-77.
- [21] Hashim J, Looney L, Hashmi M (1999) Metal matrix composites: production by the stir casting method. *J Mater Process Technol* 92-93: 1-7.
- alloy based composite reinforced with alumina nanoparticles. *Mater Chem Phys* 178: 119-127.
- [10] Antunes F, Serrano S, Branco R, Prates P (2018) Fatigue crack growth in the 2050-T8 aluminium alloy. *Int J Fatigue* 115: 79-88.
- [11] Alalkawi HJM, Khenyab AY, Abduljabar H.A (2019) Improvement of Mechanical and Fatigue Properties for Aluminum Alloy 7049 By Using Nano Composites Technique. *Al-Khwarizmi Eng J* 15(1): 1- 9.
- [12] Mamoon AA, Jaafari AL (2020) Fatigue Behavior of Aluminum SiC Nano Composites Material with Different Reinforcement Ratio. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 870(1): 012159.
- [13] Das P, Jayaganthan R, Chowdhury T, Singh I V (2011) Fatigue behaviour and crack growth rate of cryorolled Al 7075 alloy. *Mater Sci Eng A* 528(24): 7124-7132.
- [14] Mahathaninwong N, Plookphol T, Wannasin J, Wisutmethangoon S (2012) T6 heat treatment of rheocasting 7075 AL alloy. *Mater Sci Eng A* 532: 91-99.
- [15] Shen Q, Wu C, Luo G, Fang P, Li C, Wang Y, Zhang L (2014) Microstructure and mechanical properties of Al-7075/B4C composites fabricated