

بررسی اثر کسر حجمی فاز تقویت کننده بر خواص کششی کامپوزیت Al6061/SiC به روش اکستروژن گرم

محمد رضا ستاری^۱، محمد رنجبران^{۲*}

* نویسنده مسئول : m.ranjbaran@srttu.edu

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت زمینه آلومینیم، ذرات کاربید سیلیسیم، فرآیند اکستروژن، تخلخل، خواص کششی

چکیده

در این پژوهش تاثیر کسر حجمی فاز تقویت کننده بر خواص کششی کامپوزیت Al6061/SiC با اعمال اکستروژن گرم مورد بررسی قرار می‌گیرد. کامپوزیت های آلومینیم - سیلیسیم به دلیل خواص سایشی و مکانیکی بالا مورد توجه هستند. برای انجام این تحقیق کامپوزیت Al6061/SiC با درصدهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد کاربید سیلیسیم به روش ریخته‌گری هم‌زدنی تولید شد و بر روی نمونه‌های کامپوزیتی حاوی کسرهای حجمی ذکر شده، عملیات اکستروژن گرم انجام شد. سپس خواص کششی محصول مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش میزان کاربید سیلیسیم تا ۵ درصد وزنی باعث افزایش استحکام کششی کامپوزیت فوق گردید. همچنین اعمال فرآیند اکستروژن باعث کاهش میزان تخلخل نسبت به حالت ریخته‌گری و در نتیجه بهبود خواص کششی شد.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های آلومینیم-کاربید سیلیسیم به دلیل دارا بودن استحکام عالی، انعطاف پذیری خوب، خواص خوردگی مطلوب، ضریب انبساط حرارتی پایین و قیمت مناسب جزء پرکاربردترین کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند. تولید کامپوزیت‌های ریختگی به طور معمول با مشکلاتی نظیر توزیع نامناسب فاز ثانویه، تخلخل و تشکیل خوشه‌های ذرات مواجه است که عوامل مختلفی از جمله کسر حجمی فاز تقویت کننده، دما و نسبت اکستروژن می‌توانند با کاهش مشکلات فوق بر خواص مکانیکی کامپوزیت تاثیر مثبت داشته باشند. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که افزایش دما و نسبت اکستروژن باعث بهبود خواص کششی کامپوزیت می‌شود [۱].

در پی تلاش‌های مداوم برای افزایش عملکرد و بهبود خواص مواد مختلف، که می‌تواند معیارهای متعددی اعم از کاهش وزن، خواص مکانیکی بالاتر و کاهش هزینه‌های تولید را در برگیرد، مواد فعلی و سنتی مورد استفاده در صنایع مختلف به بالاترین حد قابلیت‌های خود رسیده‌اند [۲-۳]. در این میان می‌توان به انواع قطعات فولادی و چدنی مورد استفاده در صنعت خودرو اشاره کرد که در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیاد برای جایگزینی این قطعات با مواد جدید انجام گرفته است. هزینه‌های بالای تولید و شکل دهی، همچنین نیاز به عملیات نهایی بعد از تولید نظیر ماشینکاری و عملیات حرارتی برای اکثر قطعات فولادی و چدنی مورد استفاده در خودروها، تولید کنندگان را به فکر جایگزینی با مواد جدید واداشته است [۴].

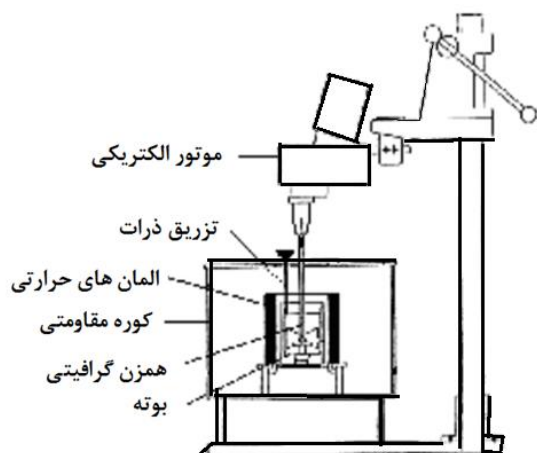
کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با استفاده از فاز سرامیکی به‌عنوان بهترین مواد جدید محسوب می‌شوند. کاهش مصرف سوخت خودروها، بهبود عملکرد و خواص قطعات مختلف در دماهای بالا و در عین حال افزایش کیفیت،

عمر و ضریب اطمینان خودروها و در یک کلام تولید خودروی سبز به‌عنوان بزرگترین چالش‌هایی هستند که هر روزه توسط خودروسازان مطرح و بزرگ ارائه می‌شوند. به‌عنوان مثال کاهش ۱۰٪ در وزن خودروها، میزان ۵/۵٪ در مصرف سوخت صرفه جویی حاصل می‌کند [۶-۷]. یکی از قابلیت‌های مهم کامپوزیت‌های زمینه فلزی، امکان تغییر و بهبود خواص آنها با انتخاب مناسب روش تولید، نوع، شکل و درصد حجمی فاز تقویت کننده و همچنین انتخاب بهینه فاز زمینه می‌باشد. با انتخاب مناسب و کنترل بر روی تمامی پارامترهای ذکر شده می‌توان قطعاتی با خواص مناسب نظیر مدول الاستیک، استحکام کششی، استحکام خستگی و استحکام خمشی بالا و نیز مقاومت به سایش بالا تولید کرد که افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با همتای فولادی یا چدنی آنها حاصل می‌شود [۸-۹].

برای اولین بار در این پژوهش کامپوزیت Al6061 تقویت شده با درصدهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی ذرات کاربید سیلیسیم با اندازه متوسط ۴۶ میکرون به روش ریخته‌گری هم‌زدنی تولید شد و سپس عملیات اکستروژن گرم در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد بر روی تمامی نمونه‌ها انجام گرفته است. در نهایت تاثیر کسر حجمی فاز تقویت کننده بر خواص کششی با آلیاژ خام و ریختگی مقایسه می‌شود.

۲- روش‌ها و مواد

برای تولید آلیاژ Al6061، شمش‌های آلومینیم خالص، سیلیسیم، آمیزان‌های Al-50%Mg، Al-10%Cr و میله نازک مسی به مقدار مورد نیاز استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ بر اساس نتایج کوانتومتری به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل (۱) تصویر نمادین تجهیزات به کار گرفته شده برای تولید کامپوزیت به روش ریخته‌گری هم‌زدنی.

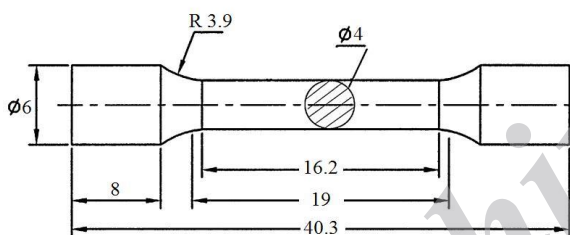
برای تهیه شمشال‌های اکستروژن هر بار حدود ۱ کیلوگرم از شمش کامپوزیتی درون کوره مقاومتی مجدداً ذوب شد و دوغاب حاصل توسط یک ملاقه دستی، کمی هم‌زده و در قالب‌های استوانه‌ای شکل با قطر داخلی ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰ میلی‌متر ریخته‌گری شد. شکل ۲ تصویری نمادین از تجهیزات مورد استفاده برای انجام فرآیند اکستروژن و شکل ۳ قالب اکستروژن را نشان می‌دهد. برای این منظور از یک پرس ۱۰۰ تن استفاده گردید که سرعت جابجایی سنبه در آن بین ۱ تا ۷ میلی‌متر بر ثانیه قابل تغییر بود. برای گرم کردن قالب و محفظه نگهدارنده، همچنین نمونه‌ها از کوره‌ای مقاومتی به شکل استوانه که به دور آنها قرار می‌گرفت، استفاده شد. با رسیدن قالب به دمای مورد نظر و نگهداری در دمای مزبور به مدت ۴۵ دقیقه، فرآیند اکستروژن در دمای یکسان قالب و نمونه انجام گرفت. برای کاهش اصطکاک بین نمونه، قالب و محفظه نگهدارنده نیز از یک روانکار که ترکیبی از گرافیت و روغن بود استفاده شد.

جدول (۱) آنالیز ترکیب شیمیایی آلیاژ Al6061

عنصر	Al	Cr	Fe	Cu	Si	Mg
درصد وزنی	باقیمانده	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۶۱	۱/۰۹

مراحل ساخت کامپوزیت شامل آماده‌سازی ذرات فاز تقویت‌کننده، تهیه مذاب زمینه، اضافه کردن ذرات سرامیکی به مذاب و ریخته‌گری است. ابتدا ذرات کاربید سیلیسیم با ابعاد ۴۶ میکرون ساخت کشور ایتالیا به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد در یک کوره مقاومتی تحت عملیات اکسیداسیون غیر فعال قرار گرفتند تا لایه اکسیدی بر سطح آنها شکل گیرد. سپس پودرهای اکسید شده به صورت دستی الک شدند تا کلوخه‌های ذرات جدا شوند. برای تهیه شمش کامپوزیت ابتدا حدود ۲ کیلوگرم مذاب Al6061 در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد در بوته‌ای درون کوره مقاومتی آماده شد. سپس عملیات هم‌زدن با سرعت ۶۸۰ دور بر دقیقه آغاز و پس از ۳۰ ثانیه تزریق ذرات به صورت دستی بر روی گرداب انجام شد. این عمل به مدت ۱۵ دقیقه ادامه پیدا کرد. سپس همزن خارج و دوغاب کامپوزیتی به صورت شمش‌هایی با جرم تقریبی ۱ کیلوگرم ریخته‌گری شد. با افزودن مقادیر مختلفی از کاربید سیلیسیم، در نهایت کامپوزیت‌های Al6061-10%SiC، Al6061-5%SiC و Al6061-15%SiC و Al6061-20%SiC تهیه شدند. شکل ۱ تصویری نمادین از روش به کار گرفته شده برای تولید کامپوزیت را نشان می‌دهد.

میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX60M مورد بررسی ساختار قرار گرفتند. همچنین برای اندازه گیری دانسیته و درصد تخلخل نمونه ها از روش ارشمیدس استفاده شد. برای تهیه نمونه های آزمایش کشش، قطعات ریختگی و اکستروژن شده، تحت عملیات ماشین کاری قرار گرفتند. ابعاد نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM-E 8M انتخاب شد. در شکل ۴ نمونه استاندارد کششی با قطر ۴ میلی متر نشان داده شده است. برای انجام آزمایش کشش از دستگاه MTS با سرعت جابجایی فک ۰/۱ میلی متر بر ثانیه استفاده شد. این دستگاه به رایانه ای متصل بوده و داده های کششی شامل مدول الاستیک، درصد ازدیاد طول و استحکام کششی توسط نرم افزار مربوطه محاسبه شد. به منظور اطمینان از اطلاعات به دست آمده برای هر حالت، ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین داده های حاصل گزارش شد.



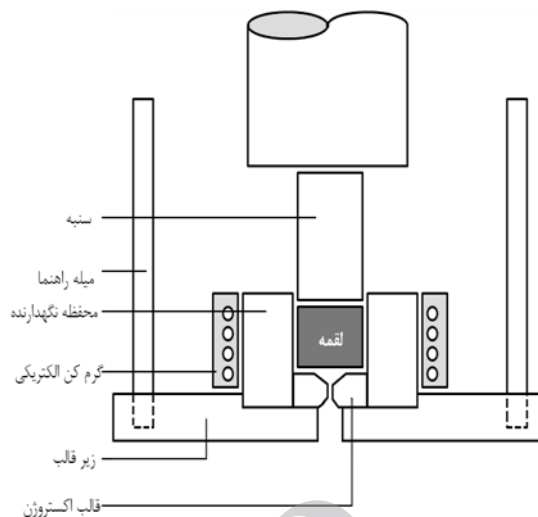
شکل (۴) ابعاد نمونه کششی گرد طبق استاندارد ASTM E8-04 (ابعاد بر حسب میلیمتر است).

سطوح شکست به دست آمده از آزمایش کشش بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Camscan MV2300 مجهز به آنالیزور پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله از تصاویر الکترون های ثانویه برای مشاهده سطوح استفاده شد.

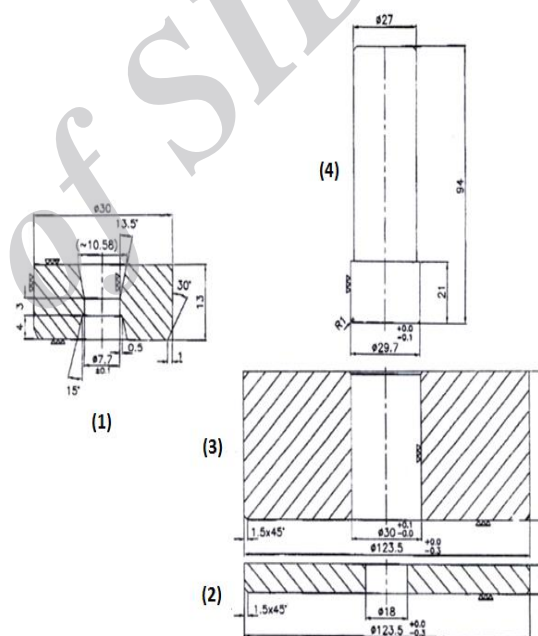
۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی های ریزساختاری

شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت Al606-SiC حاوی درصد های مختلف SiC را در دو حالت ریختگی و



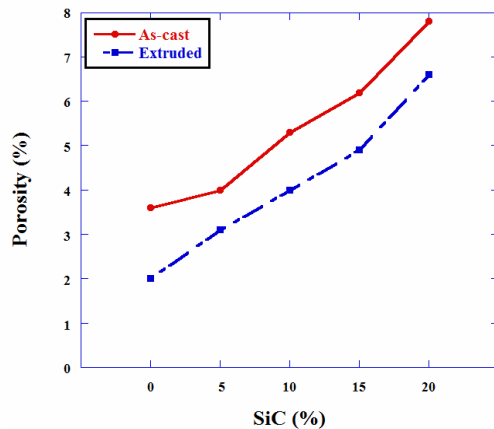
شکل (۲) تجهیزات مورد استفاده برای انجام فرآیند اکستروژن



شکل (۳) قالب مورد استفاده جهت انجام اکستروژن

برای بررسی ریزساختار و نحوه توزیع ذرات فاز ثانویه، در مقاطع طولی نمونه های ریختگی و اکستروژن شده، برش ایجاد شد. ابعاد نمونه ها حدود ۲×۲ سانتی متر متغیر است. سپس عملیات سمباده زنی با استفاده از سمباده های شماره ۶۰ تا ۲۵۰۰ و در نهایت پولیش بر روی پارچه نمدی انجام گرفت. به منظور حکاکی نمونه ها نیز از محلول Keller (HF=1(ml) – HCL=1.5(ml) – HNO₃=2.5(ml)) و بقیه آب) استفاده شد. نمونه های حکاکی شده توسط

و در مناطق عاری از ذرات پخش می‌شوند. بنابراین تجمع‌های اولیه ذرات فاز تقویت کننده موجود در شمشال ریختگی کاهش می‌یابد [۷]. شکل ۶ درصد تخلخل را با افزایش میزان SiC نشان می‌دهد که مطالب ذکر شده فوق را تایید می‌کند.

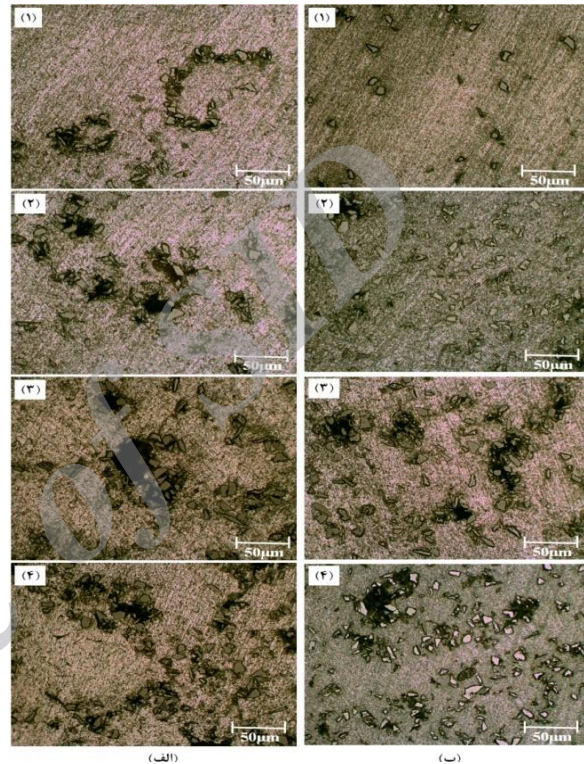


شکل (۶) تغییرات درصد تخلخل با درصد SiC در دو حالت ریختگی و اکستروژن شده کامپوزیت Al6061-SiC حاوی (۱) ۵٪، (۲) ۱۰٪، (۳) ۱۵٪ و (۴) ۲۰٪ SiC.

۳-۲- خواص مکانیکی

شکل ۷- الف تغییرات استحکام کششی نهایی و شکل ۷- ب تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی بر حسب تغییر مقدار فاز تقویت کننده کاربرد سیلیسیم را قبل و بعد از اعمال فرآیند اکستروژن نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل می‌توان گفت که اولاً افزایش درصد SiC تا ۵ درصد وزنی، در هر دو حالت منجر به افزایش استحکام کامپوزیت نسبت به آلیاژ اولیه می‌شود. از سوی دیگر، از آنجایی که فاز SiC فازی ترد محسوب می‌شود، اضافه کردن آن به کامپوزیت اولیه باعث افت انعطاف پذیری کامپوزیت می‌شود. از طرفی اعمال فرآیند اکستروژن به دلیل اثرات مثبت ایجاد شده در ریزساختار، باعث بهبود استحکام و انعطاف پذیری کامپوزیت ریختگی می‌گردد.

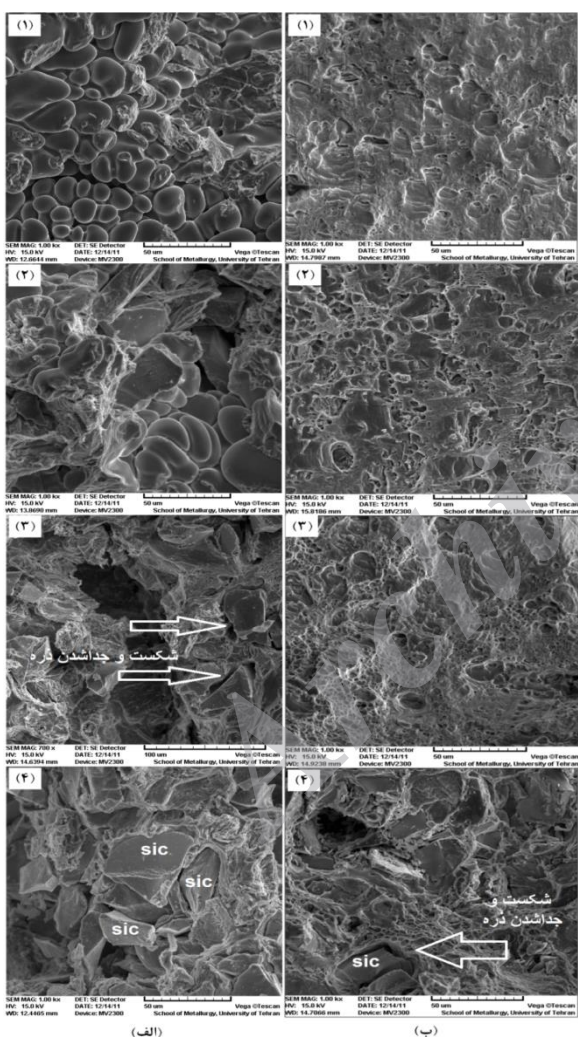
اکستروژن شده نشان می‌دهد. با مشاهده تصاویر الی ۱۱ در هر دو حالت، می‌توان گفت که با افزایش مقدار فاز تقویت کننده، غیر یکنواختی‌ها در توزیع ذرات تقویت کننده و حفرات انقباضی و تخلخل‌ها در زمینه و بین ذرات افزایش می‌یابد. حضور این حفرات به همراه ذرات SiC، بیانگر ضعیف بودن فصل مشترک بین ذرات با زمینه است.



شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت Al6061-SiC حاوی (۱) ۵٪، (۲) ۱۰٪، (۳) ۱۵٪ و (۴) ۲۰٪ SiC در دو حالت (الف) ریختگی و (ب) اکستروژن شده.

با توجه به سخت‌تر بودن مناطق حاوی ذرات تجمع یافته و تغییر شکل کمتر آنها نسبت به آلیاژ زمینه، اعمال فرآیند اکستروژن در کامپوزیت سبب می‌گردد تا زمینه فلزی قبل از ذرات تجمع یافته (خوشه‌ها) سیلان یابد. این امر باعث ایجاد تنش‌های برشی در ماده شده که بر اثر آن، ذرات موجود در فصل مشترک زمینه - خوشه از ذرات درون خوشه که تحت تنش بیشتری هستند جدا شده و در زمینه پخش گردند. با اعمال فرآیند اکستروژن، ذرات از سطح خوشه‌ها کنده شده

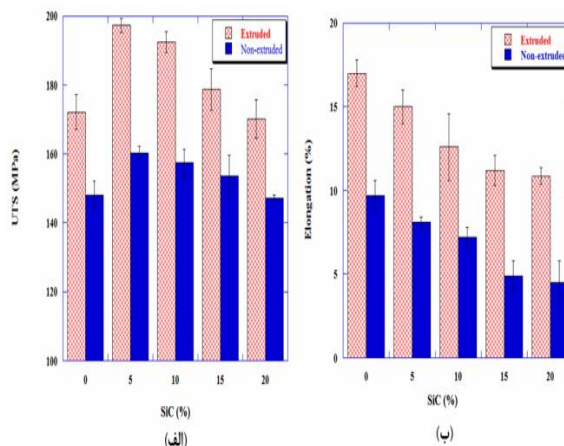
مقایسه با تصویر سطح شکست نمونه‌های ریختگی و نمونه-های اکستروژن شده نشان دهنده این مطلب است که با اعمال این فرآیند دیمپل‌ها از حالت کشیده به حالت لانه زنبوری تغییر شکل می‌یابند و اندازه‌ی آنها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین همانگونه که ملاحظه می‌شود با اعمال اکستروژن خرد شدن ذرات SiC افزایش یافته است. با توجه به این دلایل، تغییر مکانیزم شکست از حالت ترد به نرم را با اعمال عملیات اکستروژن می‌توان تفسیر نمود [۹].



شکل (۷) تصاویر سطوح شکست کامپوزیت Al6061-SiC حاوی ۱٪،

(۲) ۵٪، (۳) ۱۰٪ و (۴) ۱۵٪ SiC در دو حالت (الف) ریختگی و (ب)

اکستروژن شده.



شکل (۷) تغییرات (الف) استحکام کششی نهایی و (ب) درصد ازدیاد طول نهایی کامپوزیت با تغییر درصد وزنی SiC در دو حالت ریختگی و اکستروژن شده.

۳-۳- شکست نگاری

شکل ۷ تصاویر سطوح شکست کامپوزیت Al6061-SiC حاوی درصد‌های مختلف SiC را در دو حالت ریختگی و اکستروژن شده نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح شکست کامپوزیت ریختگی اولیه، حاوی تعداد زیادی دیمپل با اندازه پایین بوده و در حقیقت دارای مشخصات یک شکست نرم است. این در حالی است که با توجه به تصاویر، کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات SiC دارای مشخصات شکست ترد به همراه شکست نرم هستند. در واقع در تمام کامپوزیت‌های تقویت شده، سطح شکست حاوی تعدادی دیمپل به همراه نشانه‌هایی از شکسته شدن و جدا شدن ذرات از زمینه هستند. دیمپل‌ها نتیجه جوانه‌زنی حفرات، پیوستن آن‌ها به یکدیگر در اثر تغییر شکل برشی و در نهایت رخداد شکست در صفحات برشی هستند. از سوی دیگر، شکست و جدایش ذرات SiC را می‌توان با استناد به کارسختی و خرد شدن فاز تقویت کننده در اثر تمرکز تنش بالا توجیه کرد [۸]. با توجه به تصاویر مربوط به سطح شکست می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش کسر حجمی ذرات SiC موجب افت انعطاف پذیری کامپوزیت‌ها می‌شود.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات و بررسی ادله موجود نتایج زیر حاصل می شود:

۱- افزودن فاز تقویت کننده کاربید سیلیسیم به کامپوزیت Al6061-SiC در حالت ریختگی سبب ایجاد حفرات و تخلخل در زمینه گشته و غالباً این ذرات به صورت غیریکنواختی در زمینه توزیع می شوند.

۲- افزودن ذرات SiC به آلیاژ Al6061 تا ۵ درصد وزنی سبب افزایش استحکام کششی نهایی تا ۱۶۰ MPa گشته و سبب افت مقدار ازدیاد طول نسبی کامپوزیت نسبت به زمینه آلیاژی می شود. همچنین حضور این ذرات سبب افزایش تمایل کامپوزیت به شکست ترد می شوند.

۳- اعمال فرآیند اکستروژن بر روی کامپوزیت ریختگی با درصدهای مختلف SiC سبب توزیع یکنواخت تر ذرات در زمینه گشته و همچنین مقدار حفرات و تخلخل های موجود در زمینه را به طور قابل ملاحظه ای کاهش داده است.

۴- عملیات اکستروژن بر روی کامپوزیت Al6061-SiC سبب افزایش استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی کامپوزیت نسبت به حالت ریختگی می شود. سطوح شکست نمونه ها در حالت اکستروژن شده دارای دیمپل های ریزتری در حالت ریختگی و اکستروژن شده است.

۵- مراجع

- [1] Miracle D.B., "Metal matrix composites- From science to technological significance, *Composites Science and Technology*, vol. 65, 2005, pp. 2526-2540.
- [2] Matthews F.L., Rawlings R.D., "Composite Materials: Engineering and Science", 2009, London, Chapman & Hall.
- [3] Callister W.D., "Materials Science and Engineering: An Introduction", Wiley Asia Student, 2008, USA, Chapman & Hall.
- [4] Taha M.A., "Practicalization of Cast Metal Matrix Composites (MMCCs)", *Materials and Design*, vol. 22(6), 2001, pp. 431-441.
- [5] Allison J.E., Cole. G.S., "Metal-Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges", *JOM*, vol. 45(1), 1993, pp. 19-24.
- [6] Srivatsan T.S., Ibrahim I.A., Mohamed F.A., Lavernia E.J., "Processing Techniques for Particulate Reinforced Metal Aluminum Matrix Composites", *Journal of Materials Science*, vol. 26(22), 1991, pp. 5965- 5978.
- [7] Clegg A., "Squeeze Casting, A New Process Technology for the Engineer", *Foundry Trade Journal*, vol. 166(354), 1993, pp. 484-485.
- [8] Wua Y., Kim G.Y., Anderson I.E., Lograsso T.A., "Fabrication of Al6061 composite with high SiC particle loading by semi-solid powder processing", vol. 58(13), 2010, pp. 4398-4405.
- [9] Verma S.K., Fishman S.G., "Manufacturing of Composites by Squeeze Casting", *Proceeding of the International Symposium on Advances in Cast Reinforced Metal Composites*, Chicago, Illinois, USA, 1988, pp. 24-30
- [10] Cöcen Ü., Önel K., "Ductility and strength of extruded SiCp/aluminum-alloy composites", *Composites Science and Technology*, vol. 62(12), 2002, pp. 275-282