

## بررسی تأثیر فرآیند اکستروژن بر ریزساختار و استحکام کامپوزیت Al6061-SiC

امیر پاکدل<sup>۱</sup>، مسعود امامی<sup>۲</sup>، حسن فرهنگی<sup>۳\*</sup> و محمد حبیبی پارسا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۱۲/۱۱، تاریخ تصویب ۸۸/۴/۲۵)

### چکیده

کامپوزیت های آلومینیم-کاربید سیلیسیم از نظر استحکام عالی، انعطاف پذیری خوب، خواص خوردگی مطلوب، ضریب انبساط حرارتی پایین و قیمت مناسب از پرکاربردترین کامپوزیت های زمینه فلزی می باشند. تولید کامپوزیت های ریختگی، به طور معمول با مشکلاتی نظیر توزیع نامناسب فاز ثانویه، به دلیل ترشوندگی ضعیف ذرات سرامیکی توسط مذاب، تخلخل و تشکیل خوشه های حفره-ذرات مواجه است. بنابراین برای رسیدن به خواص مطلوب و تکرارپذیری، استفاده از فرآیندهای ثانویه برای این مواد، موضوعی ضروری به نظر می رسد. در این پژوهش کامپوزیت Al6061-10Vol.%SiC با اندازه متوسط ذرات ۴۸ میکرومتر به روش ریخته گری هم زدن تولید و تأثیر فرآیند اکستروژن بر ریزساختار و استحکام کششی آن بررسی شد. نتایج حاصل نشان می دهد که اعمال فرآیند اکستروژن، باعث کاهش اندازه ذرات تقویت کننده و میزان تخلخل نسبت به حالت ریختگی می شود. همچنین با افزایش دما و یا نسبت اکستروژن استحکام کششی در کامپوزیت افزایش می یابد زیرا حفره های موجود در ریزساختار کاهش و پیوند در فصل مشترک بهبود می یابد.

**واژه های کلیدی:** کامپوزیت زمینه آلومینیم، ذرات کاربید سیلیسیم، فرآیند اکستروژن، تخلخل، استحکام کششی

### مقدمه

مطلوب، ضریب انبساط حرارتی پایین و قیمت مناسب دارند. در این میان آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر مانند Al-Si-Mg توجه ویژه ای را به خود جلب کرده اند [۳].

برای تولید کامپوزیت های آلومینیم-کاربید سیلیسیم، انتخاب روش ساخت اهمیت زیادی دارد، زیرا فرآیند تولید بر خواص مکانیکی و قیمت نهایی کامپوزیت تأثیر بسزایی دارد [۲]. در میان همه روش های موجود، ریخته گری همزدنی پرکاربردترین فرآیند برای ساخت این مواد است. روش همزدنی شامل تولید مذاب از آلیاژ زمینه، افزودن ماده تقویت کننده به درون مذاب و به دست آوردن توزیعی مناسب از ذرات در حین همزدن است و از راحت ترین و اقتصادی ترین فرآیندها در تولید کامپوزیت های زمینه فلزی محسوب می شود. همچنین قابلیت تولید در ابعاد بزرگ و استفاده از تجهیزات معمول ریخته گری از مزایای دیگر این روش است اگر چه به دلیل ترشوندگی ضعیف ذرات سرامیکی توسط زمینه فلزی مذاب، به دست آوردن توزیع مناسبی از فاز ثانویه با مشکل رو به رو است. تشکیل تخلخل و واکنش های گسترده در فصل مشترک نیز از عیوب این روش به شمار

کامپوزیت های زمینه فلزی، مجموعه ای هستند از زمینه آلیاژی نرم و افزودنی استحکام بخش (به طور معمول سرامیکی) که ترکیبی از خواص فلزی مانند چکش خواری و مقاومت به ضربه و خواص سرامیکی مانند سختی و استحکام بالا دارند [۱]. این گروه از مواد طی سه دهه گذشته، پیشرفت و توسعه چشمگیری داشته اند، زیرا با انتخاب نوع، اندازه، شکل و کسر حجمی فاز ثانویه می توان خواص مورد نیاز را در آنها به وجود آورد. حمایت های اولیه از کامپوزیت های زمینه فلزی از سوی صنایع هوافضا برای استفاده در ساختمان هواپیما و سفینه های فضایی انجام گرفت و با گذشت زمان، این مواد در صنایع اتومبیل سازی و الکترونیک نیز کاربرد زیادی یافتند. در ابتدا خواصی همچون استحکام و سفتی در طراحی کامپوزیت ها مد نظر بود، ولی امروزه ضریب انبساط حرارتی، مقاومت به سایش و هدایت حرارتی این مواد نیز بسیار مورد توجه است [۲]. در بین کامپوزیت های زمینه فلزی، کامپوزیت های Al-SiC، متداول ترین سیستم مورد مطالعه هستند، زیرا ویژگی هایی مثل استحکام عالی، انعطاف پذیری خوب، خواص خوردگی

می روند [۶-۴].

می شود و تنش های هیدرواستاتیک فشاری محصور شده در زمینه بین دو ذره مجاور، می توان گفت که تنش های هیدرواستاتیک کششی داخلی در انتهای ذرات به طور کامل خنثی شده و بر اثر برآیند فشاری تنش های سه بعدی موجود در زمینه، نه تنها از ایجاد حفره در طی تغییر شکل جلوگیری می شود بلکه حفره های اولیه موجود نیز از بین می روند و کیفیت پیوند در فصل مشترک زمینه- ذره بهبود می یابد [۹].

در این پژوهش کامپوزیت Al6061 تقویت شده با ۱۰ درصد حجمی ذرات کاربید سیلیسیم با اندازه متوسط ۴۸ میکرومتر به روش ریخته گری همزدنی تولید شد. برای بررسی تأثیر عوامل فرآیند تغییر شکل بر ریزساختار و استحکام کامپوزیت از سه نسبت ۱:۶، ۱:۱۲ و ۱:۱۸ و دماهای ۴۵۰°C، ۵۰۰°C و ۵۵۰°C و سرعت جا به جایی سنبه ۱mm/s، برای انجام عملیات اکستروژن استفاده شد.

### روش ها و مواد

برای تولید آلیاژ Al6061 شمش های آلومینیم خالص، سیلیسیم، آمیزان های Al-10%Cr، Al-50%Mg و میله نازک مسی به مقدار مورد نیاز آماده شد. ابتدا آلومینیم در دمای ۷۵۰°C و در یک کوره مقاومتی ذوب و سپس دمای مذاب به ۸۵۰°C رسانده شد و مس اضافه نیز شد، پس از انحلال مس، دمای مذاب به ۷۵۰°C بازگردانده و به ترتیب سیلیسیم، کروم و منیزیم به مذاب افزوده شدند. در نهایت مذاب در قالب های فراهم شده به صورت شمش ریخته گری شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ بر اساس نتایج کوانتومتری به دست آمده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: آنالیز ترکیب شیمیایی آلیاژ Al6061

عنصر(درصد وزنی)					
Al	Mg	Si	Cu	Fe	Cr
بقیه	۱/۱۲	۰/۷۱	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۰۵

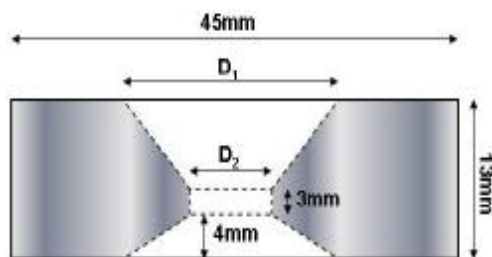
ذرات کاربید سیلیسیم مورد استفاده نیز دارای اندازه ۳۲۰ مش، رنگ خاکستری و به شکل گوشه دار بودند. مراحل ساخت کامپوزیت شامل آماده سازی ذرات فاز تقویت کننده، تهیه مذاب زمینه، اضافه کردن ذرات سرامیکی به مذاب و ریخته گری است. ابتدا ذرات کاربید سیلیسیم به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۹۵۰°C در یک

استفاده از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک نظیر اکستروژن، نورد و آهنگری باعث کاهش تخلخل، شکسته شدن خوشه های ذرات و بهبود پیوند بین ذره و زمینه می شوند که این عوامل به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت کمک می کند. متداول ترین فرآیند ثانویه در بین روش های تغییر شکل کامپوزیت های زمینه فلزی با تقویت کننده های غیر پیوسته، اکستروژن است که موجب هم راستا شدن مطلوب ذرات در زمینه می شود [۷]. با استفاده از این فرآیند، می توان محصولاتی با شکل توپر مانند میله یا توخالی مانند لوله و یا اشکالی با سطح مقطع غیر منظم تولید کرد. از آن جایی که در حین اکستروژن، تنش های فشاری بزرگی بر شمشال فلزی وارد می شود، از این فرآیند می توان برای شکل دادن آلیاژهایی که شکل پذیری چندان بالایی ندارند استفاده کرد. اصول عملیات اکستروژن در کامپوزیت های Al-SiC مشابه با آلیاژهای تقویت نشده است، ولی با توجه به اینکه در رفتار تغییر شکل آنها تفاوت هایی وجود دارد نیاز است که در عوامل فرآیند تغییراتی ایجاد شود. به عنوان مثال بررسی های انجام شده حاکی از آن است که در نمودارهای نیرو بر حسب جا به جایی سنبه، برای آغاز تغییر شکل و برش در کامپوزیت ها، به کار بیشتری در مقایسه با آلیاژهای تقویت نشده احتیاج است [۸]. به طور کلی کامپوزیت های زمینه فلزی به خاطر حضور تقویت کننده های ترد و تقریباً غیر قابل شکل دادن، اکستروژن پذیری ضعیفی دارند. در تحقیقات زیادی به شکست ذرات تقویت کننده، جدایش در فصل مشترک و یا ترک های سطحی پس از اکستروژن نمونه های کامپوزیتی اشاره شده است. بنابراین نیاز است که طراحی مراحل ساخت و کنترل عوامل فرآیند به صورت مناسبی انجام گیرد تا نمونه اکستروژن شده بدون عیب و با خواصی مطلوب حاصل شود [۷].

تحلیل های عددی به کارگرفته شده برای بررسی رفتار اکستروژن کامپوزیت های زمینه فلزی حاکی از آن است که تنش های هیدرواستاتیک کششی در انتهای محل قرارگیری ذرات در زمینه به وجود می آید که می تواند نیروی محرکه ای برای جدایش پیوند بین ذرات و زمینه باشد. ولی با در نظر گرفتن تنش- های هیدرواستاتیک فشاری بسیار بزرگی که در حین اکستروژن بر ماده اعمال

شد.

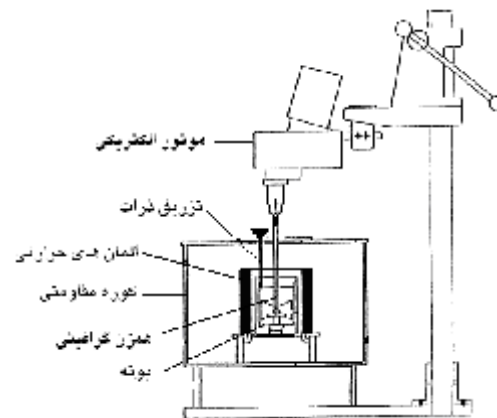
برای انجام فرآیند اکستروژن داغ نیاز به تجهیزاتی بود که استحکام و سختی خود را در دماهای بالا حفظ کنند. برای این هدف قالب های اکستروژن، محفظه نگهدارنده، زیرقالب، سنبه و میله های راهنما از فولاد گرم کار H13 ساخته شدند. مراحل ساخت این اجزا شامل برش کاری، ماشین کاری، عملیات حرارتی و سنگ زنی بود. سختی قطعات قالب پس از انجام عملیات حرارتی ۵۵ HRC بود. شکل (۲) نقشه قالب ها و شکل (۳) تصویری شماتیک از تجهیزات مورد استفاده برای انجام فرآیند اکستروژن را نشان می دهد. برای این منظور از یک پرس ۴۵ تن استفاده گردید که سرعت جا به جایی سنبه در آن، بین ۷-۱ میلی متر بر ثانیه قابل تغییر بود. برای گرم کردن قالب و محفظه نگهدارنده، کوره ای مقاومتی به شکل استوانه به دور آنها قرار می گرفت. برای گرم کردن سنبه و نمونه ها نیز از کوره ای مقاومتی استفاده می گردید. با رسیدن قالب به دمای مورد نظر و نگهداری آن در دمای مزبور به مدت ۱۵ دقیقه نمونه کامپوزیتی و سنبه به محفظه قالب انتقال داده شده و در نهایت فرآیند اکستروژن در دمای یکسان قالب و نمونه انجام گرفت. برای کاهش اصطکاک بین نمونه، قالب و محفظه نگهدارنده نیز از یک روانکار گرافیتی به صورت اسپری استفاده شد.



شکل ۲: نقشه قالب اکستروژن، مقادیر ( $D_1$  و  $D_2$ ) برای نسبت های ۱:۶، ۱:۱۲ و ۱:۱۸ به ترتیب برابر با (۲/۱۵ و ۴/۱۸)، (۵/۱۲ و ۳/۱۳) و (۶/۱۰ و ۳/۱۱) میلی متر است.

برای بررسی ریزساختار و نحوه توزیع ذرات فاز ثانویه، در مقاطع طولی نمونه های ریختگی و اکستروژن شده، برش ایجاد شد. سپس عملیات سمباده زنی با استفاده از سمباده های شماره ۶۰ تا ۲۵۰ و در نهایت پولیش بر روی پارچه نمدی انجام گرفت. پس از طی مراحل آماده سازی، نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری

کوره مقاومتی تحت عملیات اکسیداسیون غیر فعال قرار گرفتند تا لایه اکسیدی بر سطح آنها شکل گیرد. این فرآیند باعث بهبود قابلیت ترشوندگی آنها توسط مذاب می شود. سپس پودر های اکسید شده به صورت دستی الک شدند تا کلوخه های ذرات جدا شوند. برای تهیه شمش کامپوزیت ابتدا حدود ۷ Kg مذاب Al6061 در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  در بوتله درون کوره مقاومتی آماده شد، سپس همزن گرافیتی طوری در داخل مذاب قرار گرفت که حدود ۳۰٪ از حجم مذاب در زیر آن قرار گیرد. ارتفاع همزن از سطح مذاب طوری تنظیم شد که قدرت کافی برای مکش ذرات سرامیکی به داخل مذاب را داشته باشد. عملیات هم زدن 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 شمش هایی با جرم تقریبی ۴ Kg ریخته گری شد. شکل (۱) شماتیکی از روش به کار گرفته شده برای تولید کامپوزیت را نشان می دهد.



شکل ۱: شماتیکی از تجهیزات به کار گرفته شده برای تولید کامپوزیت با روش ریخته گری هم زدن.

برای تهیه شمشال های اکستروژن هر بار حدود یک کیلوگرم از شمش کامپوزیتی درون کوره مقاومتی بار دیگر ذوب شد و دوغاب حاصل توسط یک ملاقه دستی، کمی همزده و در قالب های استوانه ای شکل با قطر داخلی ۴۴ میلی متر و ارتفاع ۵۰ میلی متر ریخته گری شد. برای تهیه نمونه های ریختگی نیز از قالب های استوانه ای با قطر داخلی ۴۴ میلی متر و ارتفاع ۱۲۰ میلی متر همراه با یک شیب ۳ درجه برای سهولت خروج نمونه ها استفاده

برای انجام آزمایش کشش از دستگاه MTS با سرعت جا به جایی فک ۱ mm/s استفاده شد. این دستگاه به رایانه‌ای متصل بود و داده‌های کششی شامل مدول الاستیک، درصد ازدیاد طول و استحکام کششی توسط نرم افزار مربوطه محاسبه می‌شد. برای اطمینان از اطلاعات به دست آمده برای هر حالت، ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین داده‌های حاصل گزارش شد. پس از انجام آزمایش کشش، سطوح شکست نمونه‌های ریختگی و اکستروژن شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی CamScan MV2300 بررسی شد.

### نتایج و بحث

بررسی‌های اولیه روی ریزساختار کامپوزیت برسی Al6061-SiC در حالت ریختگی و بعد از اکستروژن نشان داد که همان گونه که انتظار می‌رفت، ریزساختار کامپوزیت در حالت ریختگی دارای عیوبی مانند عدم توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده، تخلخل و حفره‌های انقباضی بود، ولی با انجام فرآیند اکستروژن داغ بر روی نمونه‌ها، تخلخل کاهش یافته و توزیع همگن تری از ذرات همراه با جهت گیری آنها در راستای اکستروژن حاصل شد. در ادامه تأثیر عوامل اکستروژن بر شکست ذرات و میزان تخلخل در ریزساختار بررسی خواهد شد.

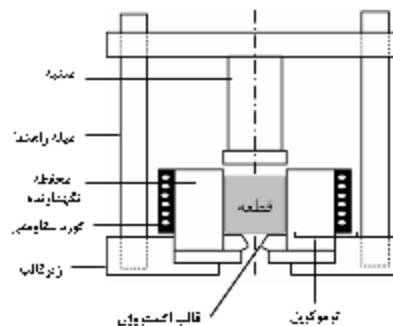
### شکست ذرات

هنگام کاهش سطح مقطع شمشال کامپوزیتی در قالب اکستروژن، زمینه آلیاژی تغییر شکل پلاستیک می‌یابد، اما ذرات سخت و ترد سرامیکی به دلیل نداشتن قابلیت تغییر شکل، با فراتر رفتن تنش‌های موضعی اعمالی بر آنها، از تنش شکستشان دچار شکست می‌شوند. در جدول (۲) تغییرات قطر متوسط ذرات کاربید سیلیسیم اندازه گیری شده با دستگاه تحلیل گر تصویری بر حسب نسبت اکستروژن در سه دمای ۴۵۰°C، ۵۰۰°C و ۵۵۰°C برای کامپوزیت Al6061-SiC نشان داده شده است. در ادامه تأثیر عوامل مختلف اکستروژن بر شکست ذرات مورد بحث قرار خواهد گرفت.

### تأثیر نسبت اکستروژن بر شکست ذرات

همان گونه که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت اکستروژن در دمای پایین، اندازه ذرات کاربید سیلیسیم کاهش می‌یابد، اما در دماهای بالاتر میزان

Olympus و نرم‌افزار تحلیل تصویری Omnimet مورد بررسی‌های ریزساختاری و تحلیلی قرار گرفتند.



شکل ۳: شماتیکی از وسایل به کار گرفته شده برای انجام فرآیند اکستروژن.

برای تعیین میزان تخلخل در نمونه‌های ریختگی و اکستروژن شده از رابطه (۱) استفاده شد:

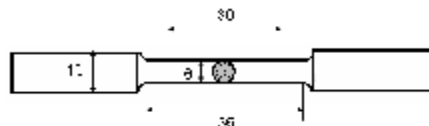
$$\%P = \frac{\rho_{th} - \rho_r}{\rho_{th}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $\rho_r$  دانسیته واقعی و  $\rho_{th}$  دانسیته تئوری نمونه است. برای محاسبه دانسیته تئوری کامپوزیت از قانون مخلوط‌ها، دانسیته ذرات کاربید سیلیسیم برابر با  $g/cm^3$  و دانسیته آلیاژ ۶۰۶۱ نیز از قانون ارشمیدس محاسبه و با توجه به تعداد ارقام معنا دار ذکر شده برای فاز تقویت کننده  $g/cm^3$  در نظر گرفته شد. برای محاسبه دانسیته واقعی نمونه‌ها از روش ارشمیدس نیز بر اساس استاندارد ISO2738 و با استفاده از رابطه (۲) عمل شد.

$$\rho_r = \frac{m}{m - m_w} \times \rho_w \quad (2)$$

در این رابطه  $m$  جرم نمونه،  $m_w$  جرم نمونه در آب و  $\rho_w$  دانسیته آب مقطر است. برای اندازه گیری جرم قطعات ریختگی و اکستروژن شده، نمونه‌های ۱۰-۵ گرمی بریده و از ترازویی با دقت ۰/۱ میلی گرم استفاده شد.

برای تهیه نمونه‌های آزمایش کشش، قطعات ریختگی، اکستروژن شده و عملیات حرارتی شده مورد عملیات ماشین کاری قرار گرفتند. ابعاد نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-E 8M انتخاب شد. در شکل (۴) نمونه استاندارد کششی گرد با قطر ۶ میلی متر نشان داده شده است.



شکل ۴: ابعاد نمونه کششی گرد مطابق با استاندارد ASTM (ابعاد بر حسب میلی متر است).

شکست ذرات کمتر شده است. ۱۸:۱ به بیشترین مقدار می‌رسد. اما در دماهای بالا با افزایش نسبت اکستروژن از نرخ تغییر در اندازه ذرات کاسته می‌شود.

### تأثیر دمای اکستروژن بر شکست ذرات

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای اکستروژن از میزان شکست ذرات کاسته شده و اندازه ذرات بزرگ‌تر می‌شود. هنگام تغییر شکل کامپوزیت های زمینه فلزی حضور فاز تقویت کننده سخت در زمینه نرم باعث تجمع چشم گیر تنش های سه محوره موضعی در اطراف ذرات می‌شود. کاهش شکست ذرات در اثر افزایش دمای اکستروژن می‌تواند ناشی از نرم شدن آلیاژ زمینه و رهاسازی نابعیاتی‌ها در دمای بالا باشد که این موضوع باعث کاهش تنش‌های موضعی اطراف ذرات شده و در نتیجه شکست فاز تقویت کننده به حداقل می‌رسد. همچنین باید به تأثیر مکانیزم های بازبایی و تبلور دوباره دینامیکی در نرم شدن ماده در دماهای بالاتر نیز اذعان کرد. کاهش تنش سیلان زمینه در دماهای بالا، چرخش راحت تر و شکست کمتر ذرات را به دنبال خواهد داشت.

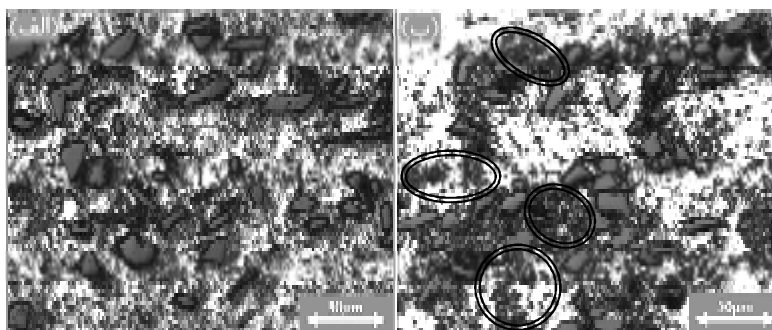
### درصد تخلخل

میزان تخلخل و اندازه حفره های موجود در یک کامپوزیت ریختگی نقش مهمی را در تعیین خواص مکانیکی آن بر عهده دارد و همواره مطلوب است که تخلخل را به حداقل برسانیم. در کامپوزیت های تولید شده با روش ریخته گری همزدنی منابع متعددی برای ایجاد تخلخل وجود دارد که مهمترین آنها مکش گاز و اکسیدهای سطحی به درون مذاب بر اثر ایجاد گرداب حین همزدن می‌باشد.

جدول ۲: تغییرات قطر متوسط ذرات کاربرد سیلیسیم در کامپوزیت Al6061-SiC بر حسب نسبت و دمای اکستروژن (اعداد بر حسب میکرومتر است).

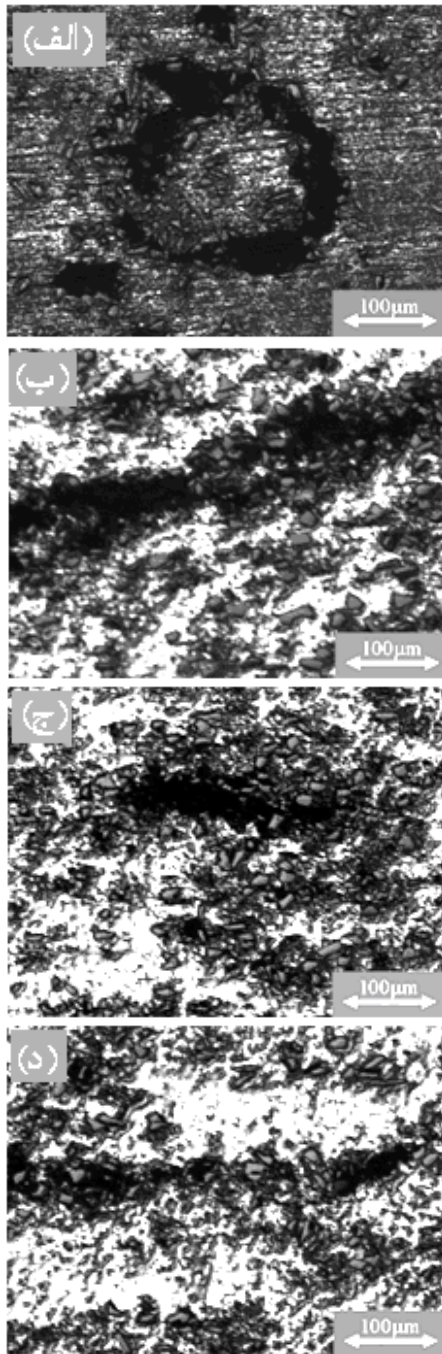
نسبت دما	۶:۱	۱۲:۱	۱۸:۱	حالت ریختگی
۴۵۰°C	۳۰/۶	۲۹/۶	۲۸/۳	-
۵۰۰°C	۳۴/۴	۳۳/۲	۳۲/۶	۳۵/۴
۵۵۰°C	۳۴/۷	۳۳/۷	۳۳/۴	-

هنگام ساخت کامپوزیت، ذرات به صورت کاملاً اتفاقی در زمینه جهت گیری می‌کنند. با اعمال فرآیند اکستروژن، میزان تنش برشی که از طرف زمینه بر ذرات وارد می‌شود، به دلیل قرارگیری ذرات در جهات مختلف، متفاوت است. علاوه بر این به دلیل هم راستا نبودن همگی ذرات با محور اکستروژن، تنش‌های اعمالی باعث به وجود آمدن گشتاور در ذرات می‌شوند. حال اگر این نیرو به اندازه کافی بزرگ باشد و زمینه در مقابل حرکت فاز تقویت کننده مقاومت زیادی از خود نشان ندهد، ذرات دچار چرخش خواهند شد، ولی در صورتی که چرخش میسر نباشد و تنش های اعمالی از مقادیر بحرانی فراتر رود، شکست ذرات روی خواهد داد. به طور معمول با توجه به اینکه در دماهای پایین، زمینه تنش سیلان بالایی دارد، چرخش ذرات درون زمینه مشکل بوده و شکست ذرات محتمل تر است. اما افزایش دما، نرم شدن زمینه را در پی خواهد داشت و باعث قرارگیری راحت تر ذرات در امتداد جهت اکستروژن می‌شود. بنابراین همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در دمای ۴۵۰°C با افزایش نسبت اکستروژن، شکست ذرات افزایش یافته و در نسبت



شکل ۵: تأثیر نسبت اکستروژن بر شکست فاز تقویت کننده در کامپوزیت Al6061-10Vol%SiC اکستروژن شده در دمای ۴۵۰°C با سرعت ۱mm/s (الف) نسبت ۶:۱ و (ب) نسبت ۱۸:۱ (به عنوان نمونه، برخی مناطق حاوی ذرات شکسته در شکل ب مشخص شده است).





شکل ۶: تخلخل در ریزساختار کامپوزیت Al6061-SiC در حالت (الف) ریختگی، (ب) اکستروژن شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  با نسبت ۱۲:۱، (ج) اکستروژن شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  با نسبت ۱۸:۱ و (د) اکستروژن شده در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  با نسبت ۱۲:۱.

#### تأثیر دمای اکستروژن بر درصد تخلخل

ریزساختار کامپوزیت Al6061-SiC در حالت ریختگی و پس از اعمال اکستروژن در شکل (۶) و تغییرات درصد تخلخل با دمای اکستروژن در جدول (۳) نشان داده شده

در جدول (۳) تغییرات درصد تخلخل با دما و نسبت اکستروژن برای کامپوزیت Al6061-SiC نشان داده شده است. در ذیل تأثیر پارامترهای اکستروژن بر مقدار تخلخل کامپوزیت مذکور مورد بحث قرار خواهد گرفت.

جدول ۳: تغییرات درصد تخلخل برحسب دما و نسبت اکستروژن در کامپوزیت Al6061-10Vol%SiC.

نسبت دما	۶:۱	۱۲:۱	۱۸:۱	حالت ریختگی
$450^{\circ}\text{C}$	٪۲/۰۲	٪۱/۸۳	٪۱/۶۷	-
$500^{\circ}\text{C}$	٪۱/۹۴	٪۱/۷۱	٪۱/۵۲	٪۴/۳۲
$550^{\circ}\text{C}$	٪۱/۸۲	٪۱/۶۲	٪۱/۴۰	-

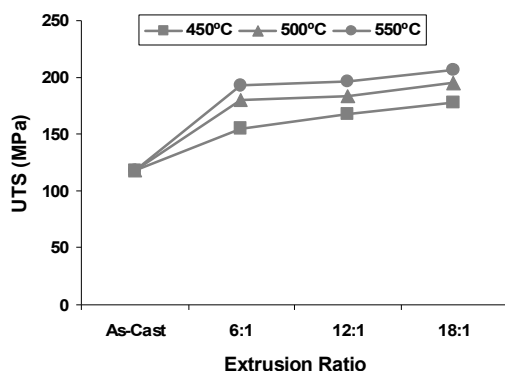
#### تأثیر نسبت اکستروژن بر درصد تخلخل

همان گونه که در جدول (۳) مشاهده می شود با توجه به درصد بالای تخلخل در حالت ریختگی، اعمال فرآیند اکستروژن باعث کاهش قابل توجه میزان تخلخل در کامپوزیت شده است. با توجه به حضور تنش های هیدرواستاتیک فشاری بسیار بزرگ هنگام اکستروژن، می توان گفت که تنش های کششی داخلی در انتهای ذرات به طور کامل خنثی شده، در نتیجه نه تنها از ایجاد حفره در طی تغییر شکل جلوگیری می شود، بلکه تنش های برشی موجود باعث برش خوردن لایه های زمینه بر روی یکدیگر و حذف تخلخل های بزرگ و یا کشیده شدن آنها در جهت اکستروژن می شوند.

مطابق با جدول (۳) ملاحظه می شود که در نسبت های اکستروژن بالا، میزان تخلخل کاهش بیشتری می یابد، زیرا افزایش نسبت اکستروژن منجر به ازدیاد نیروی تغییر شکل شده و به دنبال آن فشار هیدرواستاتیک وارد بر شمشال کامپوزیتی افزایش می یابد، در نتیجه انتظار می رود که میزان تخلخل در کامپوزیت کاهش یابد.

با این وجود همان طور که قبلاً اشاره شد، شکست ذرات پدیده اجتناب ناپذیر دیگری است که طی فرآیند اکستروژن اتفاق می افتد و در صورت عدم سیلان مناسب آلیاژ زمینه، باعث ایجاد ریز حفره هایی در اطراف ذرات شده و درصد تخلخل را بالا می برد.

زمینه اطراف فاز ثانویه به وجود می آیند که منجر به افزایش دانسیته نابجایی ها می شوند. در شکل (۷) روند تغییرات استحکام کششی کامپوزیت با نسبت و دمای اکستروژن نشان داده شده است.



شکل ۷: روند تغییرات استحکام کششی کامپوزیت Al6061-SiC بر حسب نسبت و دمای اکستروژن.

به طور معمول اضافه کردن فاز تقویت کننده به زمینه، همراه با افزایش شدید درصد تخلخل است که این موضوع منجر به کاهش استحکام کششی کامپوزیت های ریختگی می شود، اما پس از اعمال فرآیند اکستروژن با کم شدن تخلخل در کامپوزیت، استحکام افزایش می یابد. تشکیل احتمالی ترک در ذرات کاربرد سیلیسیم حین اکسیداسیون نیز می تواند باعث کاهش استحکام نمونه ریختگی شود ولی با اعمال فرآیند اکستروژن احتمال شکسته شدن ذرات ترک دار و تبدیل آنها به ذرات ریزتر زیاد است، در نتیجه در نمونه های اکستروژن شده، استحکام نهایی افزایش می یابد. همچنین اکستروژن داغ باعث بهبود پیوند بین سطحی در فصل مشترک ذره- زمینه شده و از این راه نیز به بهبود استحکام کامپوزیت کمک می کند.

جدول ۴: تأثیر نسبت و دمای اکستروژن بر استحکام کششی کامپوزیت Al6061-SiC (اعداد بر حسب مگا پاسکال است).

نسبت دما	۶:۱	۱۲:۱	۱۸:۱	حالت ریختگی
۴۵۰°C	۱۵۵	۱۶۸	۱۷۸	-
۵۰۰°C	۱۸۰	۱۸۴	۱۹۵	۱۱۸
۵۵۰°C	۱۹۳	۱۹۶	۲۰۶	-

است. همان گونه که انتظار می رود با افزایش دمای اکستروژن میزان تخلخل در کامپوزیت کاهش می یابد. دلیل این موضوع کاهش تنش سیلان و نرم شدن زمینه است که باعث راحت تر شدن سیلان آلیاژ به درون حفرات پراکنده در زمینه و ریزحفره های اطراف ذرات می شود. همچنین با توجه به افزایش اندازه ذرات با زیاد شدن دمای اکستروژن، مقدار ریز حفرات ناشی از شکست فاز تقویت کننده نیز کاهش می یابد.

همان گونه که در جدول (۳) مشاهده می شود، با افزایش دما و یا نسبت اکستروژن، شاهد کاهش تخلخل در کامپوزیت هستیم. شایان ذکر است که در تحقیق حاضر با توجه به میزان زیاد تخلخل در کامپوزیت ریختگی، فرآیند اکستروژن قادر به حذف کامل حفره ها در ریزساختار نبوده و مطابق با شکل (۶) در برخی موارد فقط باعث کشیده شدن حفره ها در جهت تغییر شکل می شود.

## استحکام

در ارتباط با مکانیزم های استحکام بخشی در کامپوزیت های زمینه فلزی، تئوری های متفاوتی ارائه شده است. با در نظر گرفتن ذرات کاربرد سیلیسیم به عنوان فاز تقویت کننده سخت و غیر قابل شکل دهی، می توان سه مکانیزم عمده برای افزایش استحکام کامپوزیت نسبت به آلیاژ تقویت نشده در نظر گرفت: ۱- مدل انتقال بار از زمینه به فاز تقویت کننده، که در مورد کامپوزیت های تقویت شده با ذرات در مقایسه با رشته های پیوسته اهمیت کمتری دارد. ۲- تئوری اروان که تنش لازم برای خم شدن و عبور نا به جایی از بین ذرات را متناسب با معکوس فاصله بین آنها پیش بینی می کند. بر اساس این تئوری با حرکت هر نابجایی بر صفحه لغزش، یک حلقه نابجایی به دور هر یک از ذرات اضافه می شود. این حلقه ها یک تنش بازگشتی بر منابع تولید نابجایی وارد کرده و در نتیجه برای تولید نابجایی های جدید و ادامه تغییر شکل به تنش بیشتری نیاز است. ۳- تئوری افزایش دانسیته نابجایی در کامپوزیت که مهم ترین مکانیزم برای افزایش استحکام این مواد محسوب می شود. در حین سرد شدن کامپوزیت پس از مراحل تولید، به دلیل اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی زمینه فلزی و تقویت کننده سرامیکی، تنش های پسماند کششی در

### تأثیر نسبت اکستروژن بر استحکام

در جدول (۴) تغییرات استحکام کششی با دما و نسبت اکستروژن برای کامپوزیت Al6061-SiC ارائه شده است. در بررسی تأثیر نسبت اکستروژن بر استحکام کششی کامپوزیت، باید به دو دسته عوامل متضاد توجه کرد: ۱- با افزایش نسبت اکستروژن بر اثر برش خوردن بیشتر لایه‌های آلیاژ زمینه در حین تغییر شکل، میزان تخلخل و خوشه‌های ذرات در کامپوزیت کاهش یافته و پیوند فصل مشترک زمینه-ذره بهبود می‌یابد؛ در نتیجه تأثیر فاز ثانویه در استحکام بخشی کامپوزیت زیاد می‌شود. همچنین بهبود وضعیت جهت گیری ذرات در راستای محور اکستروژن باعث می‌شود تا سطحی از ذرات که انتقال بار را برعهده دارد افزایش یابد که این عامل نیز اثر مثبتی بر استحکام نهایی کامپوزیت دارد. ۲- با افزایش نسبت اکستروژن (به خصوص در دماهای پایین) شکست در ذرات کاربرد سیلیسیم افزایش می‌یابد که اگر سیلان آلیاژ زمینه آن گونه نباشد که ریزترک‌های به وجود آمده را برکند، شاهد افت استحکام کامپوزیت خواهیم بود. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت اکستروژن، استحکام کامپوزیت افزایش یافته است. این بدان معنی است که مجموعه عواملی که بر بهبود استحکام نهایی تأثیر مثبت دارند، قوی‌تر از عامل تضعیف کننده شکست ذرات عمل کرده‌اند.

### تأثیر دمای اکستروژن بر استحکام

با افزایش دمای تغییر شکل، زمینه فلزی نرم‌تر و چرخش ذرات در زمینه آسان‌تر می‌شود، شکست ذرات کاهش و جهت گیری فاز تقویت کننده در راستای

### مراجع

- 1 - Miracle, D. B. (2005). "Metal matrix composites – From science to technological significance." *Composites Science and Technology*, Vol. 65, PP. 2526-2540.
- 2 - William, C. and Harrigan, Jr. (1998). "Commercial processing of metal matrix composites." *Materials Science and Engineering A*, Vol. 244, PP. 75-79.
- 3 - Hong, S. I. and Seo, Y. S. (1999). "Effect of microstructure on wear behavior of Al-Mg-Si alloy matrix-10 vol.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite." *Materials Science and Engineering A*, Vol. 265, PP. 29-41.
- 4 - Ray, S. (1993). "Review synthesis of cast metal matrix particulate composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 28, PP. 5397-5413.

اکستروژن بهبود می‌یابد، در نتیجه سطح مؤثر ذرات برای انتقال نیرو بیشتر می‌شود. همچنین سیلان راحت‌تر آلیاژ زمینه در دماهای بالا باعث پُر شدن ریزترک‌ها، حفره‌ها، دربرگرفتن بهتر فاز ثانویه و بهبود پیوند در فصل مشترک شده که همگی این عوامل مطابق با جدول (۴) به افزایش استحکام کامپوزیت Al6061-SiC کمک می‌کنند.

### نتیجه گیری

۱- با اعمال فرآیند اکستروژن، اندازه ذرات کاربرد سیلیسیم در زمینه، نسبت به حالت ریختگی کاهش می‌یابد که این موضوع با افزایش نسبت اکستروژن و کاهش دما تشدید می‌شود، زیرا در دماهای پایین، زمینه دارای تنش سیلان بالایی دارد و چرخش ذرات درون زمینه مشکل است، در نتیجه شکست ذرات محتمل‌تر است.  
 ۲- اعمال فرآیند اکستروژن باعث کاهش چشمگیر تخلخل در کامپوزیت ریختگی و در نتیجه بهبود استحکام این ماده می‌شود.  
 ۳- با افزایش دمای اکستروژن، زمینه فلزی نرم‌تر شده و بر اثر سیلان راحت‌تر آن، میزان حفره‌های موجود در ریزساختار کاهش و در نتیجه پیوند در فصل مشترک بهبود می‌یابد. بنابر این افزایش دمای اکستروژن، افزایش استحکام کششی کامپوزیت را به همراه داشته است.  
 ۴- افزایش نسبت اکستروژن منجر به افزایش نیروی تغییر شکل و شکست ذرات می‌شود، با این حال با توجه به برش خوردن بیشتر ماده، میزان تخلخل و خوشه‌های ذرات در ریزساختار کاهش و به دنبال آن استحکام کششی کامپوزیت بهبود می‌یابد.



- 5 - Naher, S., Brabazon, D. and Looney, L. (2004). "Development and assessment of a new quick quench stir caster design for the production of metal matrix composites." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, PP. 430–439.
- 6 - Akhlaghi, F., Lajevardi, A. and Maghanaki, H. M. (2004). "Effects of casting temperature on the microstructure and wear resistance of compocast A356/SiCp composites: a comparison between SS and SL routes." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155–156, PP. 1874–1880.
- 7 - Kim, N. H., Kang, C. G. and Kim, B. M. (2001). "Die design optimization for axisymmetric hot extrusion of metal matrix composites." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43. PP. 1507-1520.
- 8 - *Fundamentals of metal matrix composites* (1993). Suresh S., Mortensen A. and Needleman A., *Butterworth-Heinemann*, 3-41.
- 9 - Tham, L. M., Gupta, M. and Cheng, L. (2002). "Effect of reinforcement volume fraction on the evolution of reinforcement size during the extrusion of Al-SiC composites." *Materials Science and Engineering A*, Vol. 326, PP. 355–363.