

## بررسی پارامترهای موثر در تولید مواد مرکب زمینه آلومینیومی به روش اکستروژن گرم پودر

محمد رضا طرقي نژاد\*، مهدی صیادی\*\* و محمد محسن مشکسار\*\*\*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۸۳/۶/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۱۲/۲۸)

**چکیده** - از فرایند اکستروژن گرم پودر برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ۵٪ حجمی ذرات سرامیکی  $Al_2O_3$  و SiC استفاده شد. نمونه‌ها در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و کاهش سطح مقطع ۹۰ و ۹۵ درصد اکستروژن شدند. خواص محصول تولید شده با اندازه‌گیری استحکام، انعطاف‌پذیری، سختی و دانسیته نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. ریز ساختار و سطح شکست نمونه‌ها نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. نتایج نشان دادند که فرایند اکستروژن گرم پودر موجب توزیع مناسب ذرات تقویت‌کننده در زمینه و دستیابی به دانسیته نزدیک به دانسیته نظری می‌شود. حضور ذرات تقویت‌کننده افزایش سختی و استحکام را به دنبال خواهد داشت. به نظر می‌رسد که کاهش سطح مقطع ۹۰٪ برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی با استفاده از فرایند اکستروژن گرم پودر مناسب باشد. افزایش دمای اکستروژن تا  $600^\circ C$  موجب بهبود استحکام کششی نمونه‌ها شد. نتایج نشان داد که فشار لازم برای اکستروژن نمونه‌های پودری تابعی از سرعت سنبه است.

**واژگان کلیدی:** اکستروژن گرم پودر - کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی - ذرات تقویت‌کننده سرامیکی

# Investigation of Parameters Involved in the Production of Aluminum Matrix Composites Using Hot Powder Extrusion

M. R. Toroghinejad, M. Sayadi and M. M. Moshksar

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran.

**Abstract:** Aluminum matrix composites reinforced with  $Al_2O_3$  and SiC particles (5 Vol%) were produced using the hot powder extrusion method. Extrusion temperature and extrusion reduction in area were chosen in the range of 500 to 600 °C and 90 to 95%, respectively. The physical and mechanical properties of the extruded composites such as density, tensile strength, elongation and microhardness were evaluated and discussed as a function of extrusion parameters. The microstructure and fracture surface of the products were examined using SEM. The results showed that the composites were fully densified and reinforcement particles were distributed uniformly in the matrix. Presence of  $Al_2O_3$  and SiC particles increased both strength and microhardness, but decreased the ductility of the composites. Experimental results for hot extrusion of the compacted powder billets also showed that the extrusion pressure was dependent on the ram speed or deformation strain rate.

**Keywords:** Hot powder extrusion, Aluminum matrix composites, Reinforcing ceramic particles

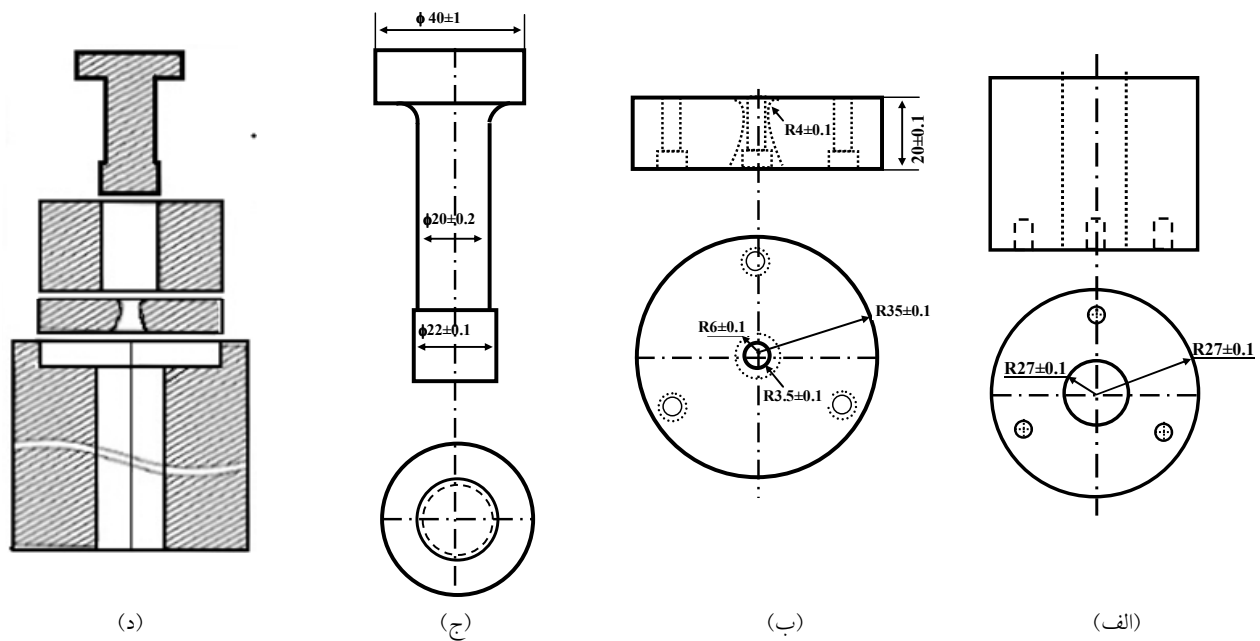
## ۱- مقدمه

می‌گردد. شکل‌دهی بالا، بهبود خواص به دلیل تصحیح ریزساختار، تولید بدون نیاز به مراحل تف‌جوشی و کاهش نیروی لازم برای شکل‌دهی از مزایای عمده استفاده از اکستروژن گرم پودر است [۹]. در این تحقیق کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی  $Al_2O_3$  و SiC با درصد حجمی کم (۵ درصد حجمی) به روش اکستروژن گرم پودر تولید شده و تأثیر پارامترهای موثر بر فرایند مانند نرخ کرنش، میزان کاهش سطح مقطع و نوع ذرات تقویت کننده بر خواص محصول تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق

پودر آلومینیوم تجاری با خلوص ۹۹/۵ درصد (اندازه متوسط ۴۵ میکرون) به طور جداگانه با ۵ درصد حجمی از پودر آلومینا و یا کاربید سیلیسیم (اندازه متوسط ۵ میکرون) به مدت یک ساعت و به صورت خشک مخلوط شد. لازم به ذکر است که درصدهای حجمی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از پودرهای آلومینیوم یا کاربید سیلیسیم نیز استفاده شد که نتایج آن در مرجع [۱۰] آورده شده است. مخلوط پودرها به صورت سرد و با فشار متوسط ۳۵۰ مگا پاسکال به شکل استوانه‌هایی به قطر

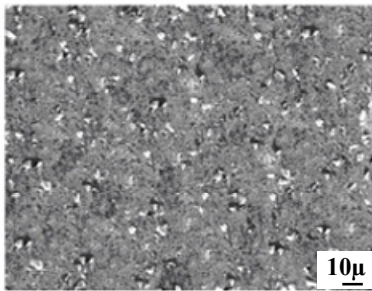
کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به دلیل استحکام و سختی بالا، دانسیته کم و مقاومت سایشی مناسب و حفظ خواص در دمای بالا در صنایع نظامی، اتومبیل سازی و هوا فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این مواد در مبدل‌های گرمایی و پره‌های فن توربین‌های گازی، میل لنگ و چرخ دنده‌های برخی از اتومبیل‌ها استفاده می‌شود [۱-۴]. روش ساخت (ریخته‌گری یا متالورژی پودر)، نوع تقویت کننده (فیبرهای پیوسته، ناپیوسته، ویسکرها و یا ذرات پراکنده) و زمینه کامپوزیت (انواع آلیاژهای آلومینیوم) از جمله عوامل موثر بر خواص کامپوزیت‌ها هستند. ذرات تقویت کننده معمولاً از مواد سرامیکی مانند  $Al_2O_3$  و SiC بوده که با روش‌های مختلف به زمینه اضافه می‌شوند [۵]. مخلوط‌سازی پودرهای تشکیل دهنده ماده مرکب و متراکم‌سازی آنها از پارامترهای مهم تولید کامپوزیت از طریق متالورژی پودر است. یکی از روش‌های موفق متراکم‌سازی پودر روش اکستروژن گرم است [۶-۸]. از روش اکستروژن گرم پودر برای تولید محصولات کامپوزیتی به صورت انواع مقاطع توپر و تو خالی مانند سیم، میله، تسمه و لوله استفاده می‌شود. سابقه اکستروژن پودر به روش علمی به سال‌های ۱۹۵۰ بر



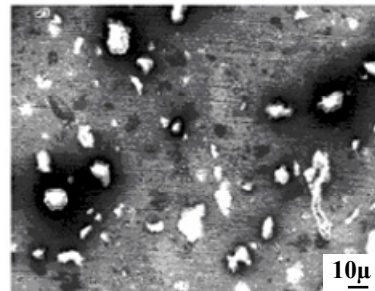
شکل ۱- نقشه اجزای قالب: الف) محفظه نگهدارنده ب) قالب با کاهش سطح مقطع ۹۰٪ ج) سنبه  
د) نحوه قرارگیری اجزای قالب روی پایه فولادی

مجهز به سیستم اندازه‌گیری نیرو، جابه‌جایی سنبه و کنترل سرعت اکستروژن شدند. طی فرایند اکستروژن کوره استوانه‌ای در اطراف مجموعه قالب قرار می‌گرفت تا دمای اکستروژن ثابت و کنترل شده باشد. به منظور بررسی تأثیر نرخ کرنش، فرایند اکستروژن با سرعت‌های ۸، ۷۲ و ۱۷۰ میلی‌متر در دقیقه انجام می‌گرفت. از روانساز پایه گرافیتی مولیکوت<sup>۱</sup> که قابلیت کار تا دمای ۱۰۰۰°C را دارد برای کاهش اصطکاک استفاده شد. تعدادی از نمونه‌ها نیز بدون حضور ذرات تقویت کننده و با روش مشابه اکستروژن شدند تا تأثیر حضور ذرات سرامیکی در زمینه آلومینیومی بررسی شود. رفتار و خواص مکانیکی نمونه‌ها به کمک آزمایش کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM B557M-84E1 (قطر ۶ میلی‌متر و طول ۳۶ میلی‌متر) تعیین شد. دانسیته نمونه‌های تولید شده طبق استاندارد ASTM C373-88 اندازه‌گیری شد. بررسی‌های ریز ساختاری و سطوح شکست به کمک میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. سختی نمونه‌ها نیز با استفاده از روش ریزسختی سنجی ویکرز و با میانگین‌گیری از داده‌های ۱۰ سختی سنجی به دست آمد.

۲۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر فشرده شدند. دانسیته پودر فشرده شده در این مرحله حدود ۷۵ درصد دانسیته نظری بوده است. برای اکستروژن گرم، قالبهای مناسب، شکل (۱)، طراحی و ساخته شد. به منظور بررسی تأثیر میزان تغییر شکل دو قالب با توانایی ایجاد کاهش سطح مقطع ۹۰ و ۹۵ درصد تهیه شد. برای کاهش اصطکاک و ایجاد محصول با سطح تمام شده مناسب، سطوح داخلی محفظه نگهدارنده نمونه‌ها، قالبها و سرسنبه به صورت مناسب صیقل کاری شد و سپس با عملیات حرارتی مناسب همه اجزای قالب سخت‌کاری شدند. از آنجا که در اکستروژن گرم مجموعه قالب، سنبه و محفظه نگهدارنده باید گرم شوند جنس مجموعه قالب از فولاد گرم‌کار X38CrMoV51 انتخاب شد. برای گرم کردن و گرم نگه داشتن مجموعه قالبها تا دمای ۶۰۰°C در هنگام اکستروژن یک کوره استوانه‌ای شکل مناسب طراحی و ساخته شد. پیش از انجام فرایند اکستروژن نمونه‌های فشرده شده در یک کوره مناسب تا دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و یا ۶۰۰ درجه سانتیگراد گرم شدند. سپس نمونه‌های پیش‌گرم شده در قالب اکستروژن به کمک یک پرس یونیورسال ۲۰ تنی



(ب)



(الف)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی (SEM) از ریز ساختار کامپوزیتهای تولید شده به روش اکستروژن گرم پودر

Al-5%SiC (ب) Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (الف)

### ۳- نتایج و بحث

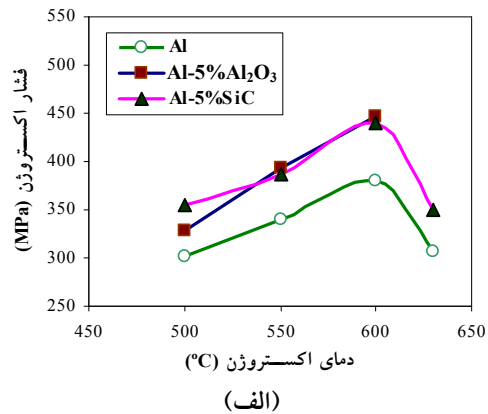
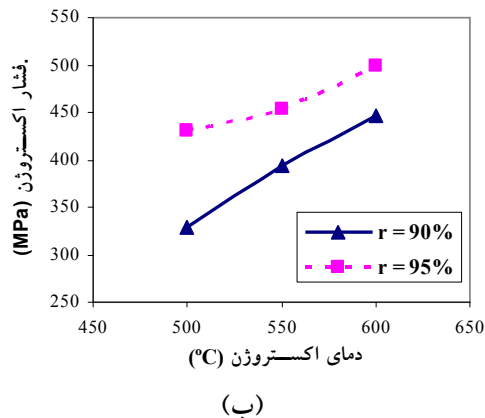
#### ۳-۱- دانسیته کامپوزیتهای اکستروژن شده

اندازه‌گیری دانسیته نمونه‌های اکستروژن شده Al خالص و Al-5%SiC حاکی از آن بود که در این نمونه‌ها هیچ گونه تخلخلی حضور ندارد. اما اندازه‌گیری دانسیته نمونه Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نشانگر این بود که در این ماده مقدار جزئی (۳٪) تخلخل وجود دارد. دانسیته نظری Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> که از قانون مخلوطها محاسبه می‌شود ۲/۷۶۴ گرم بر سانتیمتر مکعب باید باشد حال آنکه دانسیته اندازه‌گیری شده ۲/۶۸ به دست آمد. هر چند که در تصاویر میکروسکوپی تخلخل به صورت مشهود دیده نشد. شکل (۲) تصاویر میکروسکوپی هر دو نوع کامپوزیت را با بزرگنمایی یکسان نشان می‌دهد. دیده می‌شود که بافت زمینه در هر دو نمونه از پیوستگی خوبی برخوردار است و در آن حفره دیده نمی‌شود. در نمونه Al-5%SiC، ذرات SiC کاملاً به زمینه چسبیده‌اند و ذرات ریزتر و با پراکندگی مناسبتری در زمینه آلومینیومی توزیع شده‌اند. حال آنکه در نمونه Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> اندازه ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> درشت‌تر و طبیعتاً از پراکندگی نامطلوبتری نسبت به توزیع ذرات SiC برخوردار است. علاوه بر این در نمونه Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> برخی ذرات دچار آگلومراسیون شده‌اند و در برخی موارد چسبندگی کامل با زمینه ندارند. آگلومراسیون ذرات آلومینا از خصوصیات این نوع ذرات به شمار می‌رود. پدیده آگلومراسیون ذرات آلومینا در زمینه

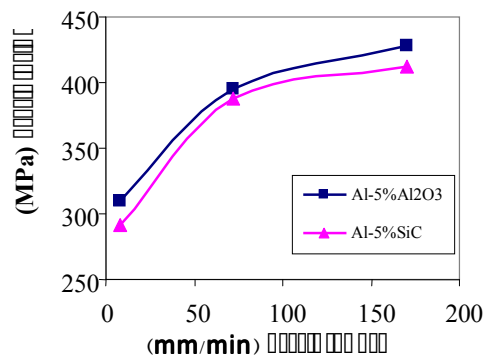
آلومینیوم توسط بوهم و همکارانش نیز مشاهده شده است [۱۱]. شاید کمتر بودن دانسیته نمونه‌های حاوی ذرات آلومینا از دانسیته نظری ناشی از عدم چسبندگی کامل ذرات تقویت کننده با زمینه و وجود تخلخل در اطراف دانه‌ها باشد. ضمن اینکه به نظر می‌رسد در بعضی نقاط ذرات آلومینا با یکدیگر چسبیده باشند و حضور تخلخلهای بسیار ریز در میان ذرات آلومینای به هم چسبیده محتمل است. لازم به ذکر است، افزایش دمای اکستروژن از ۵۰۰ درجه سانتیگراد به ۶۰۰ درجه سانتیگراد تغییری در دانسیته محصول مشاهده نشد و کاهش سطح مقطع اکستروژن از ۹۰٪ به ۹۵٪ نیز تغییر محسوسی در مقدار دانسیته محصول ایجاد نکرد. این امر نشان دهنده این واقعیت است که دمای ۵۰۰°C و کاهش سطح مقطع ۹۰٪ از نقطه نظر وجود تخلخل و دانسیته محصول برای تولید این کامپوزیتهای مناسب است.

#### ۳-۲- فشار اکستروژن

در محدوده دمای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد فشار اکستروژن برای هر سه نوع نمونه Al خالص، Al-5%SiC و Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با افزایش دمای نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همان طور که شکل (۳-الف) نشان می‌دهد، فشار اکستروژن در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۳۰٪ افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که دلیل این امر به بیشتر شدن استحکام نمونه‌ها در تف جوشی اولیه در دمای بالاتر کوره پیشگرم مربوط می‌شود. لازم به ذکر است که تف جوشی کامل پودر



شکل ۳- چگونگی تغییرات فشار اکستروژن گرم پودر بر حسب دما برای نمونه‌های کامپوزیتی در سرعت سنبه ۷۲ میلیمتر در دقیقه، (الف) در کاهش سطح مقطع ۹۰٪ (ب) Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

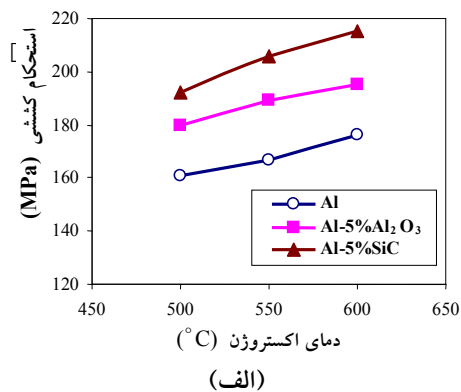
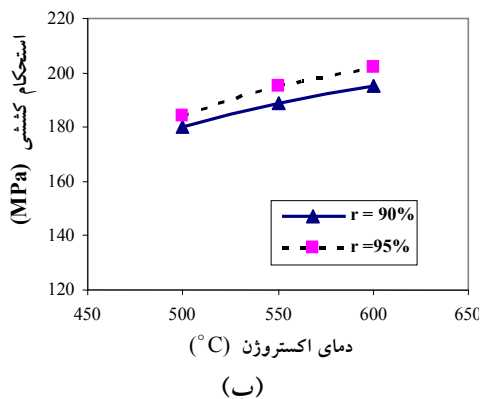


شکل ۴- منحنی تغییرات فشار اکستروژن بر حسب سرعت اکستروژن (دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد و کاهش سطح مقطع ۹۰٪)

شکل (۳-ب) دیده می‌شود که برای ماده مرکب Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با افزایش میزان کاهش در سطح مقطع، فشار اکستروژن افزایش می‌یابد. این پدیده به طور مشابه در نمونه‌های Al خالص و Al-5%SiC نیز دیده می‌شود.

وابستگی فشار اکستروژن گرم پودر به سرعت اکستروژن و یا نرخ کرنش در مقایسه با اکستروژن مواد جامد کمتر است [۹]. دلیل این امر تأثیر تخلخل و تشکیل پیوند بین ذرات پودر در طول تغییر شکل نمونه‌های پودری است، اما در هر حال با تغییر نرخ کرنش، فشار اکستروژن نیز تغییر می‌یابد. شکل (۴) منحنی تغییرات فشار بر حسب سرعت اکستروژن را برای کامپوزیتهای Al-5%SiC و Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود با افزایش سرعت سنبه فشار لازم

آلومینیوم در محدوده دمای ۵۷۵ تا ۶۲۵ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد [۱۲]. ضمن اینکه افزایش دما می‌تواند موجب افزایش ضریب اصطکاک بین ماده با جداره محفظه نگهدارنده و قالب شود که این خود در افزایش فشار اکستروژن موثر است. با افزایش دمای اکستروژن تا ۶۳۰°C به دلیل نزدیک شدن به دمای ذوب آلومینیوم و کاهش شدید در تنش سیلان، فشار اکستروژن به طور محسوس کاهش می‌یابد. وجود ذرات تقویت کننده در زمینه آلومینیومی، همان طور که در شکل (۳-الف) دیده می‌شود، فشار اکستروژن را به میزان حدود ۲۰٪ افزایش می‌دهد که این خود نشان دهنده این واقعیت است که حضور ذرات سرامیکی افزایش استحکام ماده مرکب نسبت به آلومینیوم خالص را به همراه دارد [۱۳]. در



شکل ۵- الف) تأثیر دمای اکستروژن بر استحکام نمونه‌های اکستروژن شده.

ب) تأثیر درصد کاهش سطح مقطع بر استحکام نمونه Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

استحکام کششی می‌شود [۱۴]. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که نمونه‌های Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> استحکام کششی کمتری نسبت به نمونه‌های Al-5%SiC از خود نشان می‌دهند. استحکام کمتر در این نمونه‌ها ناشی از درشت‌تر بودن ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، پراکنندگی نامطلوب‌تر و چسبندگی ضعیف‌تر این ذرات به زمینه نسبت به ذرات SiC و احتمالاً حضور تخلخل اندک در ساختار آنهاست. تصاویر میکروسکوپی در شکل (۲) تاییدی بر این ادعاست.

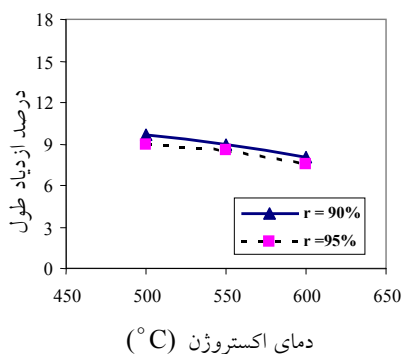
باید توجه داشت که چسبندگی بیشتر بین ذرات سرامیکی و زمینه موجب انتقال کامل تنش از زمینه به ذرات تقویت کننده با مدول الاستیک بالاتر شده و این امر افزایش استحکام را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این اختلاف ضرایب انبساط گرمایی ذرات تقویت کننده سرامیکی و زمینه آلومینیومی موجب تولید ناهم‌جایی‌های بیشتر می‌شود که خود یکی دیگر از عواملی است که بخصوص در دمای بالا مقاومت مکانیکی مناسب به کامپوزیت می‌بخشد [۱۵].

شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که با افزایش دمای اکستروژن، استحکام در تمامی نمونه‌ها افزایش یافته است. این امر به دلیل تف‌جوشی کامل‌تر نمونه‌های پودری و چسبندگی بیشتر بین ذرات تقویت کننده و زمینه پس از اکستروژن است. عامل دیگری که می‌تواند در افزایش استحکام نمونه‌های تهیه شده با این روش موثر باشد مربوط به اکسید شدن سطح دانه‌های پودر آلومینیوم است. به این

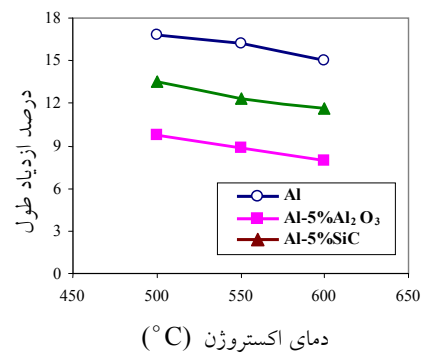
برای اکستروژن ماده از درون قالب افزایش می‌یابد. در برخی از آزمایشها تغییر سرعت سنبه از ۸ میلی‌متر بر دقیقه تا ۱۷۰ میلی‌متر بر دقیقه فشار اکستروژن را به میزان ۴۰٪ افزایش می‌داد. چنین رفتار مشابهی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۹]. دلیل افزایش فشار در اثر افزایش سرعت اکستروژن ناشی از حساسیت رفتار ماده به نرخ کرنش است. به خصوص آنکه ثابت حساسیت به نرخ کرنش (m) در رابطه معروف  $\sigma = C \dot{\epsilon}^m$ ، در دماهای بالا به طور محسوس افزایش می‌یابد. لذا در یک دمای ثابت بالا، افزایش نرخ کرنش و یا سرعت تغییر شکل افزایش تنش سیلان و طبیعتاً افزایش فشار اکستروژن افزایش را به دنبال خواهد داشت.

### ۳-۳- تأثیر پارامترهای اکستروژن بر استحکام کششی

شکل (۵-الف) تأثیر دمای اکستروژن و نوع ذرات تقویت کننده را بر استحکام کششی نمونه‌های اکستروژن شده نشان می‌دهد. به طور کلی نمونه‌های حاوی ذرات تقویت کننده سرامیکی استحکام بالاتری نسبت به آلومینیوم خالص از خود نشان می‌دادند. این افزایش استحکام را می‌توان به این صورت توجیه کرد که ایجاد کرنش در فصل مشترک ذره با زمینه موجب تولید ناهم‌جایی‌های بیشتر در کامپوزیت شده، ضمن اینکه خود این ذرات موانعی برای حرکت ناهم‌جایی‌ها به شمار می‌آیند و نرخ کارسختی را افزایش می‌دهند که این خود موجب افزایش



(ب)



(الف)

شکل ۶- الف) تأثیر دمای اکستروژن بر انعطاف پذیری نمونه‌های اکستروژن شده

ب) تأثیر درصد کاهش سطح مقطع بر انعطاف پذیری نمونه Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

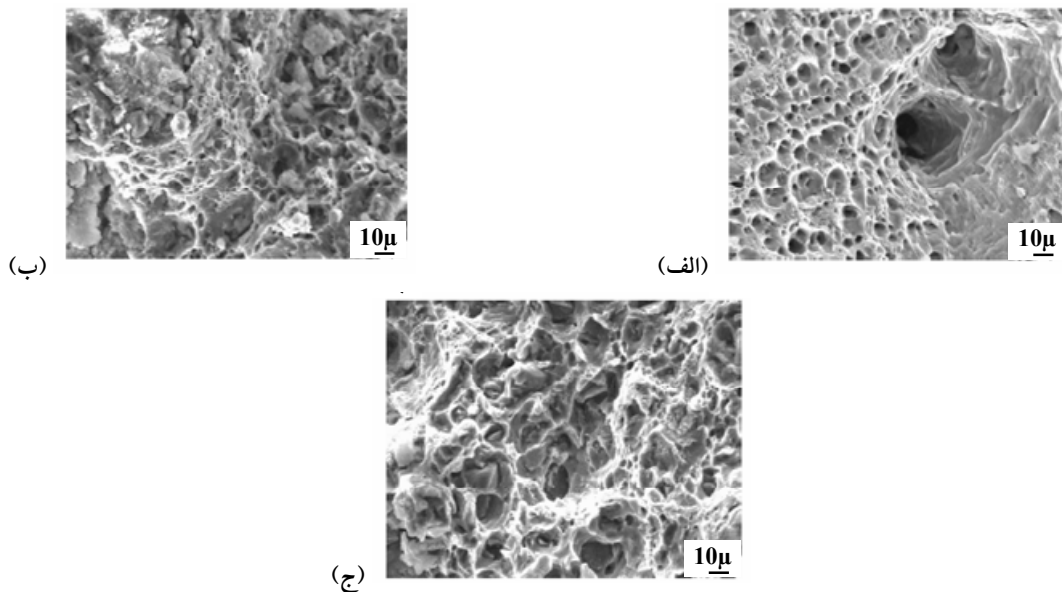
حضور تنشهای سه بعدی در اطراف ذرات تقویت کننده  
 سرامیکی کاهش خاصیت انعطاف پذیری ماده را به دنبال دارد. در  
 واقع تنشهای سه بعدی، تغییر شکل زمینه را در فضای بین ذرات  
 تقویت کننده که در نزدیکی هم قرار دارند محدود می کند. این امر  
 خود موجب تمرکز سیلان و ایجاد تنشهای موضعی بالاتر از تنش  
 تسلیم زمینه شده و باعث می شود که نمونه‌ها بدون تحمل تغییر  
 شکل پلاستیک قابل ملاحظه دچار شکست شوند. در شکل  
 (الف-۶) دیده می شود که انعطاف پذیری ماده مرکب حاوی ذرات  
 SiC از انعطاف پذیری ماده مرکب حاوی ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بالاتر  
 است. دلیل این امر توزیع یکنواخت تر ذرات تقویت کننده و  
 چسبندگی بیشتر ذرات با زمینه در نمونه‌های Al-5%SiC است.  
 همچنین دیده می شود که با افزایش دمای اکستروژن از ۵۰۰ به  
 ۶۰۰ درجه سانتیگراد، انعطاف پذیری نمونه‌ها کاهش یافته است.  
 به نظر می رسد با افزایش دما مقادیر بیشتری از پودر آلومینیوم  
 اکسید شده و این امر موجب کاهش انعطاف پذیری نمونه‌ها  
 گردیده است. تأثیر درصد کاهش سطح مقطع بر روی  
 انعطاف پذیری نمونه‌ها در شکل (ب-۶) نشان داده شده است.  
 انعطاف پذیری نمونه‌های Al-5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با افزایش درصد کاهش  
 سطح مقطع کمتر می شود. چنین رفتاری در مورد Al خالص و  
 Al-5%SiC نیز مشاهده شد. دلیل این امر همان ارتباط تنگاتنگ  
 بین افزایش استحکام و کاهش انعطاف پذیری در مواد مرکب  
 است.

معنا که با پیشگرم کردن نمونه‌ها در دمای بالا، ضخامت  
 لایه‌های اکسیدی روی سطح دانه‌های پودر آلومینیوم افزایش  
 می یابد. این لایه‌های اکسیدی حین فرایند اکستروژن خرد و  
 در زمینه توزیع می شوند که خود عامل دیگری برای افزایش  
 استحکام به حساب می آید [۹].

شکل (ب-۵) تأثیر کاهش سطح مقطع بر استحکام نمونه‌ها  
 را نشان می دهد. با تغییر مقدار کاهش سطح مقطع از ۹۰ به  
 ۹۵٪، استحکام کششی نمونه‌های Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به مقدار  
 ناچیزی افزایش می یابد. این اثر در نمونه‌های Al خالص و  
 Al-5%SiC نیز مشاهده شد.

### ۳-۴- تأثیر پارامترهای اکستروژن بر خاصیت انعطاف پذیری

شکل (۶) تأثیر دما و میزان کاهش در سطح مقطع اکستروژن را  
 بر انعطاف پذیری (در صد کشیدگی طول نمونه‌ها) نشان می دهد.  
 همان طور که در شکل (الف-۶) دیده می شود انعطاف پذیری  
 نمونه آلومینیوم خالص از سایر نمونه‌ها بیشتر است. در واقع  
 انعطاف پذیری کم از جمله محدودیتهای کامپوزیتهای زمینه  
 آلومینیومی در مقایسه با آلیاژهای آلومینیوم است. ذرات تقویت  
 کننده سرامیکی به طور ذاتی دارای استحکام بالا با خاصیت تردی  
 و شکنندگی زیادی اند که از ویژگیهای مواد سرامیکی است.  
 تفاوت این رفتار با زمینه آلومینیومی موجب پیدایش تمرکز تنش  
 و حالت تنش سه بعدی در اطراف ذرات تقویت کننده می شود.



شکل ۷- سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی الف) Al خالص، حفره‌های ریز و به هم پیوسته شکست نرم را نشان می‌دهند در هر دو نمونه ب)  $Al_2O_3$ -5%Al و ج)  $SiC$ -5%Al، مخلوطی از شکست نرم و ترد مشاهده می‌شود

#### ۴- بررسی سطوح شکست

شکل (۷) تصاویر میکروسکوب الکترونی روبشی از مقاطع شکست آلومینیوم خالص و مواد مرکب  $Al-5\%SiC$  و  $Al-5\%Al_2O_3$  تهیه شده به روش اکستروژن گرم پودر را نشان می‌دهد. در شکل (۷-الف) دیده می‌شود که شکست نمونه آلومینیوم خالص از نوع شکست نرم بوده است. سطح شکست در این نمونه‌ها دارای حفره‌های ریز به هم پیوسته و فرو رفته‌گیهای بزرگ است. حالت شکست به صورت مخروط و فنجان که از مشخصات شکست نرم است در این نمونه‌ها به خوبی مشاهده شد. شکل‌های (۷-ب) و (۷-ج) سطح شکست نمونه‌های  $Al-5\%SiC$  و  $Al-5\%Al_2O_3$  را نشان می‌دهند. تجمع حفره‌های ریز در سطح شکست این کامپوزیتها به خوبی دیده می‌شود. در برخی مناطق ذرات تقویت کننده از جای خود کنده شده و حفره‌هایی به جا گذاشته‌اند. زمینه اطراف ذرات تقویت کننده دچار تغییر شکل شده و سطوح شکست شامل پستی و بلندیهای زیاد است. حضور درصد حجمی کم ذرات سخت‌سرامیکی در زمینه موجب شده که شکست در این کامپوزیتها به صورت مخلوطی از شکست نرم و ترد باشد.

#### ۵- بررسی نتایج سختی سنجی

از آنجا که در آزمایش ریز سختی سنجی سوزن فرورونده در ناحیه بسیار کوچکی از ماده فرو می‌رود و درصد حجمی ذرات تقویت کننده نسبت به زمینه بسیار کمتر است، محدوده وسیعی از مقادیر ریز سختی به دست خواهد آمد. به عبارتی سختی کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات سرامیکی با میانگین‌گیری از نتایج چندین آزمایش سختی سنجی حاصل می‌شود. جدول (۱) مقادیر سختی هر سه نوع نمونه اکستروژن شده را نشان می‌دهد. مقادیر سختی، میانگین داده‌های حاصل از ۱۰ سختی‌سنجی است. محدوده تغییرات سختی در هر نمونه نیز آورده شده است. با اضافه شدن ذرات تقویت کننده به زمینه آلومینیومی، سختی نمونه‌های اکستروژن شده به طور مشهود افزایش یافته است. افزایش مقدار سختی در کامپوزیت  $Al-5\%Al_2O_3$  نسبت به  $Al-5\%SiC$  بیشتر بوده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از بزرگتر بودن ذرات تقویت کننده  $Al_2O_3$  در اثر به هم چسبیدن آنها و قرار گرفتن مستقیم سوزن فرورونده بر روی این ذرات سرامیکی باشد. دیده می‌شود که ۵٪ حجمی ذرات تقویت کننده  $SiC$  و  $Al_2O_3$  در زمینه آلومینیومی سختی نمونه‌ها را به ترتیب ۲۲ و ۳۲ درصد افزایش داده است.



جدول ۱- نتایج میکرو سختی ویکرز نمونه‌های اکستروود شده با کاهش سطح مقطع ۹۰ و ۹۵ درصد در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۷۲ میلیمتر در دقیقه ( بار اعمالی N2)

ماده	ریز سختی ویکرز	کاهش در سطح مقطع
Al	۵۳±۲	۹۰%
	۵۷±۲	۹۵%
Al-۵%SiC	۶۵±۴	۹۰%
	۶۹±۴	۹۵%
Al-۵%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷۰±۱۰	۹۰%
	۷۳±۱۰	۹۵%

## ۶- خلاصه نتایج

سرعت اکستروژن فشار لازم برای اکستروود شدن نمونه‌ها کاهش پیدا کرد.

۴- حضور ذرات تقویت کننده Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و SiC سختی زمینه آلومینیومی را به ترتیب ۳۲ و ۲۲ درصد افزایش دادند.

۵- به دلیل ریزتر بودن اندازه ذرات، پراکنندگی بهتر و چسبندگی بهتر ذرات سرامیکی SiC نسبت به ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ماده مرکب Al-5%SiC خواص مکانیکی بهتری نسبت به ماده مرکب Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> از خود نشان داد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مایل اند از معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز که هزینه این پژوهش را طی طرح شماره ۸۱-EN-1506-C199 تامین کرده‌اند تشکر و قدردانی کنند.

۱- به کمک اکستروژن گرم پودر، مواد مرکب Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al-5%SiC با درصد تخلخل فوق العاده کم و یا عاری از تخلخل و دانسیته یکسان با دانسیته نظری به دست آمد. توزیع ذرات سرامیکی تقویت کننده در زمینه ماده مرکب Al-5%SiC بسیار مطلوبتر از ماده مرکب Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بود.

۲- افزایش دمای اکستروژن و افزایش درصد کاهش سطح مقطع اکستروژن موجب افزایش استحکام و کاهش انعطاف پذیری نمونه‌ها می‌شود. مواد مرکب Al-5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al-5%SiC انعطاف پذیری کمتری نسبت به آلومینیوم خالص از خود نشان دادند.

۳- به دلیل تفجوشی کاملتر نمونه‌های اولیه در دمای بالاتر، فشار اکستروژن با افزایش دما از ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت. این در حالی است که با کاهش

## واژه نامه

1. Molykote

## مراجع

1. Ellis, M. B. D., "Joining of Aluminum Based Metal Matrix Composites," *International Materials Reviews*, Vol. 41, No. 2, pp. 41-58, 1996.
2. Samuel, F. H., and Samuel, A. M., "Heat Treatment Parameters for A359/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/10P Composite Modified

- with 0.07 wt% Strontium," *Composites Science and Technology*, Vol. 53, pp. 85-98, 1995.
3. Bialo D., Zhou J. and Duszczyc J., "The Tribological Characteristics of the Al-20Si-3Cu-1M, Alloy Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles in Relation to the

Hardness of a Mating Steel," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, pp. 5497-5501, 2000.

4. Ling Zhong, "Deformation Behavior and Microstructure Effect in 2124Al/SiCp Composite," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 2, pp. 101-115, 2000.
5. Sufappa, M. K., "Aluminum Matrix Composites: Challenges and Opportunities," *Sadhana*, Vol. 28, Parts 1 and 2, pp. 319-334, 2003.
6. Laue, K., and Stenger H., *Extrusion*, pp. 210-211, ASM, 1981.
7. Zhou, Y., and Xia, Y., "Experimental Study of the Rate-Sensitivity of SiC/Al Composites and the Establishment of a Dynamic Constitutive Equation," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 403-410, 2000.
8. Borrego, A., Fernandez, R., Cristina, M.C., Ibanez, J. and Gonzalez-Doncel, G., "Influence of Extrusion Temperature on the Microstructure and the Texture of 6061 Al-15 vol.%SiC PM Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 731-742, 2002.
9. Roberts, P. R. and Ferguson, B. L., "Extrusion of Metal Powders," *International Materials Reviews*, Vol. 36, No. 2, P. 62, 1991.

۱۰. صیادی، م.، "ساخت و بررسی خواص کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی با استفاده از فرایند اکستروژن گرم پودر،" پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده

مهندسی، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۳

11. Bohm, H., and Black Burn, S., "Agglomerate Breakdown in Fine Alumina Powder by Multiple Extrusion," *Journal of Materials Science*, Vol. 29, pp. 5770-5786, 1994.
12. *Metals Handbook*, "Powder Metallurgy, Vol. 7, p. 382, 1994.
13. Zhang, Z. F., Zhang, L. C. and Mal, Y. W., "Particle Effects on Friction and Wear of Aluminum Matrix Composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 30, pp. 5999-6004, 1995.
14. Arsenault, R.J. and Shi, N., "Dislocation Generation Due to Differences Between the Coefficients of Thermal Expansion," *Material Science and Engineering*, Vol. 81, pp. 175-187, 1986.
15. Datta, S., Bandyopadhyay, N.R., and Banerjee, M.K., "The Reinforcement of an Age Hardenable Al-Cr Matrix Alloy in-Situ by SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles: Tailoring of The Interface," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 451-456, 2000.