بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه آلومینیمی با اعمال فرایندهای ایکپ و اکستروژن

علیرضا فدوی بوستانی[1*]، رضا طاهرزاده موسویان[2]، محمدرضا روشن[3]، کامران امینی[4] مجتبی سلطانپور[5]

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، باشگاه پژوهشگران جوان، اصفهان، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، گروه مهندسی مواد، زنجان، ایران

۳- دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

۴- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تیران، تیران، ایران

۵- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرضا، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، شهرضا، ایران

*fadavi_82@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۲۶)

چکیده

یکی از روش‌های ساخت کامپوزیت‌های فلزی روش ریخته گری گردابی می‌باشد. کامپوزیت حاصله از این روش دارای خواص مکانیکی نامطلوبی بوده و مقادیر قابل توجهی تخلخل و ذرات تقویت کننده آگلومره شده در میکروساختار این مواد دیده می‌شود. در این پژوهش اثرات فرایندهای ثانویه اکستروژن داغ و ایکپ گرم بر خواص مکانیکی و میکروساختار کامپوزیت‌های ریختگی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله از آزمایشات حاکی از اثر قابل توجه این فرایندهای ثانویه بر استحکام کششی، سختی، دانسیته و انعطاف پذیری و استحکام تسلیم مواد کامپوزیتی می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که فرایندهای اکستروژن در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و ایکپ در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اثرات کاملا متفاوتی بر خواص مواد کامپوزیتی نهایی دارند.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت پایه آلومینیوم، اکستروژن، ایکپ، ریخته گری گردابی

۱- مقدمه

امروزه، احتیاجات زیادی برای تحقیق و بررسی بر روی موادی که خواصی بالاتر از مواد سنتی دارند، وجود دارد. در اینگونه مطالعات کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی توجه خاصی را مخصوصا در صنایع هوافضا و اتومبیل سازی به خود جلب کرده است. این مواد در ساخت پیستون اتومبیل، دیسک ترمز، سیلندر و خیلی از کاربردهایی که مقاومت به سایش مهم باشد به کار می‌روند. این کامپوزیت‌ها به عنوان جایگزین خوبی برای فولاد محسوب می‌شوند [۱]. روش متالورژی پودر، روش درجا و روش ریخته گری کوبشی (squeeze casting) جز روش‌های متداول ساخت این کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات هستند. این روش‌ها در کنار اینکه هر کدام مزایا و معایبی دارند اما همگی گران هستند. امروزه محققان بر روی ساخت

کامپوزیت‌های ارزان قیمت تمرکز کرده‌اند. ریخته گری تلاطمی (stir casting) با تکنیک گردابی جز روش‌های قابل قبول برای تولید این کامپوزیت‌ها در مقیاس صنعتی و تجاری است. سادگی در تولید و تولید در حجم‌های بالا جز ویژگی‌های منحصر بفرد این روش محسوب می‌شود. این روش ارزان‌ترین روش شناخته شده برای ساخت کامپوزیت‌های پایه فلزی می‌باشد و قابلیت تولید قطعات با بزرگ را دارد [۱-۴].

با این وجود در این روش معایبی وجود دارد که وجود تخلخل در قطعه ریختگی و عدم توزیع مناسب ذرات تقویت کننده از آن جمله است. تکنیک‌های ثانویه بعد از ریخته گری این مواد را به موادی مورد استفاده با شکل و اندازه مناسب تبدیل می‌کند و هم‌چنین خواص مکانیکی را به مقدار بسیار بالایی بهبود می‌بخشد. آهنگری، نورد، اکستروژن و ایکپ (ECAP) جز روش‌های ایجاد تغییر فرم پلاستیک گرم یا سرد بوده که خواص قطعه را تا حد مطلوبی بالا می‌برند [۳-۵].

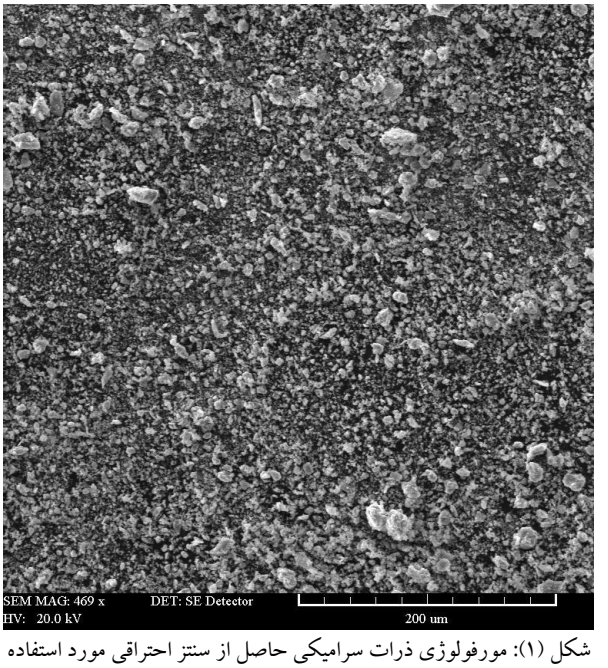
اکستروژن جز روش‌های مرسومی است که برای تولید کامپوزیت‌های پایه فلزی تقویت شده با ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکستروژن نه تنها ماده را به شکل و اندازه دلخواه تبدیل می‌کند بلکه از طریق توزیع مناسب‌تر ذرات، کاهش تخلخل و ایجاد ساختار دانه ریز باعث بهبود نهایی ساختار می‌شود و در نهایت خواص مکانیکی مثل داکتیلیته، مدول الاستیک و استحکام را بهبود می‌دهد [۴-۶].

فرآیند ایکپ (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) یکی از روش‌های تغییر فرم شدید پلاستیکی می‌باشد که قابلیت تولید با ساختار دانه ریز و حتی نانو را دارد و در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این روش خواص مکانیکی و فیزیکی مواد را تا حد زیادی مورد تغییر قرار می‌دهد. این روش قابلیت تولید قطعات بزرگ را دارد. معمولا از این روش برای فلزات خالص یا آلیاژها استفاده می‌شود. اخیرا تحقیقات مختصری مبنی بر استفاده از این روش برای کامپوزیت‌های پایه فلزی صورت گرفته است [۷-۸].

در این پژوهش با استفاده از ذرات سرامیکی پایدار شده از لحاظ ترمودینامیکی، کامپوزیت پایه آلومینیوم به روش ریخته گری گردابی ساخته و سپس فرایندهای اکستروژن و ایکپ به طور جداگانه اعمال شده و نهایتا خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بعد و قبل از ریخته گری مقایسه گردیدند.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ذرات سرامیکی (Al_2O_3-TiB_2) با اندازه ذره متوسط ۲۰ میکرون که به روش سنتز احتراقی بدست آمده است به عنوان تقویت کننده، استفاده شد. شکل (۱) مورفولوژی این ذرات را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود ذرات شکل کروی نداشته و اندازه آن‌ها نسبت به یکدیگر یکسان نمی‌باشند.



شکل (۱): مورفولوژی ذرات سرامیکی حاصل از سنتز احتراقی مورد استفاده برای تقویت زمینه آلومینیمی.

به منظور وارد کردن این ذرات به داخل مذاب از تکنیک ریخته گری گردابی استفاده شد. جزییات مربوط به این روش و تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی در تحقیقات قبلی [۲-۴] مطرح شده است. مقدار تقویت کننده اضافه شده به مذاب طوری بوده است که کامپوزیت حاصله دارای ۲ درصد وزنی تقویت کننده باشد.

لازم به ذکر است که ذرات سرامیکی، ترشوندگی ضعیفی با مذاب آلومینیم داشته و لذا پس از انجام آزمایشات متعدد نویسندگان مقاله به این نتیجه رسیدند که یکی از راه‌های مناسب افزایش ترشوندگی مخلوط کردن و آسیاکاری این ذرات با پودر آلومینیم به کمک آسیاب مکانیکی سیاره‌ای می‌باشد. بدین ترتیب ذرات سرامیکی به مدت ۲ ساعت به کمک آسیاب سیاره‌ای و با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه و نسبت گلوله به پودر ده به یک همراه با پودر آلومینیم آسیا شده و ذرات حاصله در فویل‌های آلومینیمی پیچیده و به درون گردابی از مذاب ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ریخته شدند. بعد از ساخت کامپوزیت‌ها، نمونه‌ها برای انجام فرایند اکستروژن و ایکپ آماده سازی شدند. به منظور جلوگیری از آسیب دیدن به دیواره داخلی قالب در حین ایکپ از لوله‌های مسی با ضخامت لایه ای 1 mm استفاده شد. برای این کار از قالبی با زاویه مقطعی ۹۰ درجه استفاده و این فرایند در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ جابجایی ۰.۵ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. فرایند اکستروژن با نسبت سطح مقطع ۲۰ به یک و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. سرعت اکستروژن ۰.۲ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد. بعد از انجام هر ۲ فرایند، نمونه‌ها ماشین کاری شده و برای انجام آزمون‌های مختلف آماده سازی شدند.

آزمون کشش برای هر ۳ نمونه ریخته گری شده، ایکپ شده و اکسترود شده در دمای محیط انجام شد. استحکام تسلیم در کرنش ۰.۲ درصد، استحکام کششی نهایی و مقدار ازدیاد طول از روی نتایج حاصل از این آزمون بدست آمد. هم‌چنین آزمون میکروسختی ویکرز نیز از ماده زمینه (آلومینیوم) گرفته شد. با استفاده از روش ارشمیدس دانسیته نسبی کامپوزیت‌ها برای هر ۳ نمونه محاسبه و مقایسه گردید تا بر روی حذف مقدار تخلخل‌ها بعد از شکل دهی گرم کامپوزیت ها بحث شود. دانسیته تئوری با استفاده از قانون مخلوط‌ها محاسبه گردید. به منظور بررسی ساختار کامپوزیت، توزیع ذرات تقویت کننده و تخلخل‌ها از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. هم‌چنین سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش مورد بررسی میکروساختاری قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقادیر دانسیته نسبی

مقادیر دانسیته نسبی کامپوزیت‌های ریخته گری شده، ایکپ شده و اکسترود شده در جدول (۱) آورده شده است. اصولا عوامل مختلفی منجر به ایجاد مقادیر قابل توجهی تخلخل در کامپوزیت حاصل از ریخته گری گردابی می‌شود. گیر کردن گاز در حین هم زدن، وجود رطوبت روی سطح ذرات سرامیکی، وجود هوا بین ذرات سرامیکی و انقباض بعد از انجماد از جمله این عوامل می‌باشند. مشخصا در اثر هم زدن شدید همزن به منظور ایجاد گرداب، مقادیر قابل توجهی گاز میتواند وارد مذاب شود [۱-۴]. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، دانسیته نسبی نمونه‌ها بعد از فرایند ایکپ و اکستروژن به مقدار قابل توجهی بالاتر رفته که حاکی از حذف تخلخل‌ها در حین تغییر فرم پلاستیک گرم دارد.

جدول (۱): دانسیته نمونه های ریخته گری و شکل دهی شده با استفاده از روش ارشمیدس

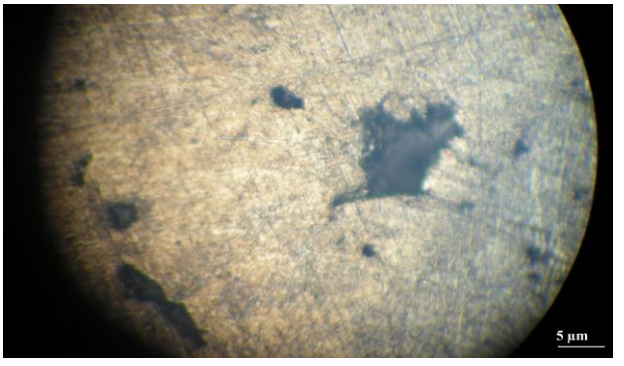
نمونه	کامپوزیت ریختگی	بعد از فرایند ایکپ	بعد از فرایند اکستروژن
دانسیته نسبی	۹۴.۲	۹۹.۱	۹۹.۲

همانطور که از جدول بالا مشخص است، تفاوت چندانی بین دانسیته نسبی کامپوزیت بعد از ایکپ و اکستروژن دیده نمی‌شود. در واقع در هر دوی این روش‌ها در اثر تغییر فرم پلاستیک و نیرویی که بین کامپوزیت و محفظه ایجاد می‌شود، آلومینیوم حرکت کرده و وارد خلل و فرج شده و تخلخل‌ها را پر می کند.

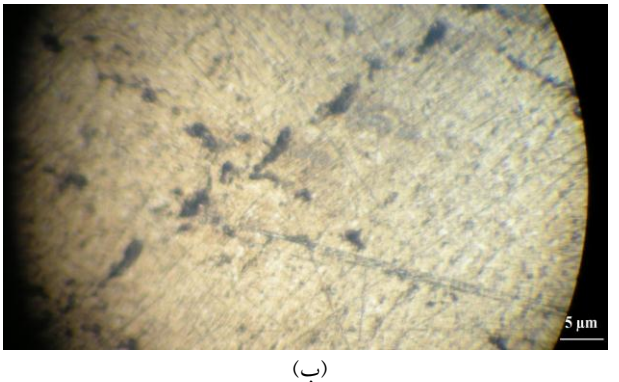
۳-۲- بررسی‌های میکرو ساختاری

به منظور بررسی تخلخل‌ها، توزیع ذرات تقویت کننده و آگلومره شدن از تصاویر میکروسکوپ نوری بعد از ریخته گری و بعد از اکستروژن و ایکپ استفاده گردید.

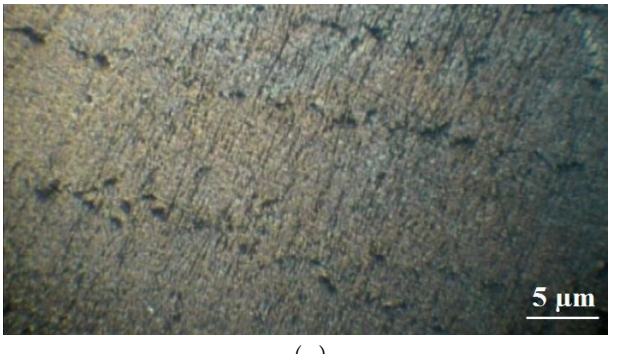
شکل (۲) نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی را نشان می‌دهد. در حین ریخته گری گردابی، ذرات آسیاکاری شده در درون فویل‌های آلومینیومی پیچیده می‌شود و در حین تشکیل گرداب به داخل مذاب انداخته می‌شود. عمل هم زدن باعث پخش شدن این ذرات در مذاب شده و در واقع در حالت ایده ال انتظار می‌رود که این ذرات بدون اینکه بهم بچسبند به طور یکنواختی در مذاب پخش شوند. اما در حالت واقعی این اتفاق به سختی می‌افتد. در واقع در دمای بین ۷۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد احتمال به هم چسبیدن پودر ها در مذاب وجود دارد. همانگونه که در شکل ۲- الف دیده میشود ذراتی دیده می‌شود که کاملا به شکل آگلومره هستند. این تصویر مربوط به نمونه ریخته گری شده می‌باشد. معمولا کامپوزیت‌های حاصله بعد از ریخته گری گردابی دارای ذرات تقویت کننده ای به شکل آگلومره بوده و توزیع ذرات در آن‌ها نامناسب است. اندازه ذرات و توزیع آن‌ها بعد از ایکپ و اکستروژن تغییر کرده است. ذرات اگلومره شده سرامیکی حالت تردی داشته و در اثر تغییر فرم پلاستیکی که در حین ایکپ و اکستروژن روی می‌دهد شکسته می‌شوند. در همین حال در حین تغییر فرم گرم، آلومینیوم به اطراف و درون ذرات در حال شکسته شدن وارد می‌شود. نتیجه این اتفاقات کوچک شدن ذرات، پر شدن تخلخل‌ها، توزیع مناسب تر ذرات و بالارفتن خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت خواهد بود. شکل ۲- ب و ۲- ج این تغییرات میکروساختاری را تائید می‌کنند. مخصوصا در نمونه اکسترودشده کشیده شدن ذرات در جهت اکستروژن که همراه با شکسته شدن و ریز تر شدن و توزیع بهتر می‌باشد کاملا مشهود می‌باشد. برای بررسی‌های بیشتر میکروساختاری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل (۳) میکروساختار نمونه ریختگی را در کنار آنالیز خطی EDAX عبور کرده از یک ذره تقویت کننده نشان می‌دهد. فلش‌های قرمز تخلخل‌های موجود در نمونه ریختگی را نشان می‌دهد که بیشتر در کنار ذرات تقویت کننده دیده می‌شوند.



(الف)



(ب)



(ج)

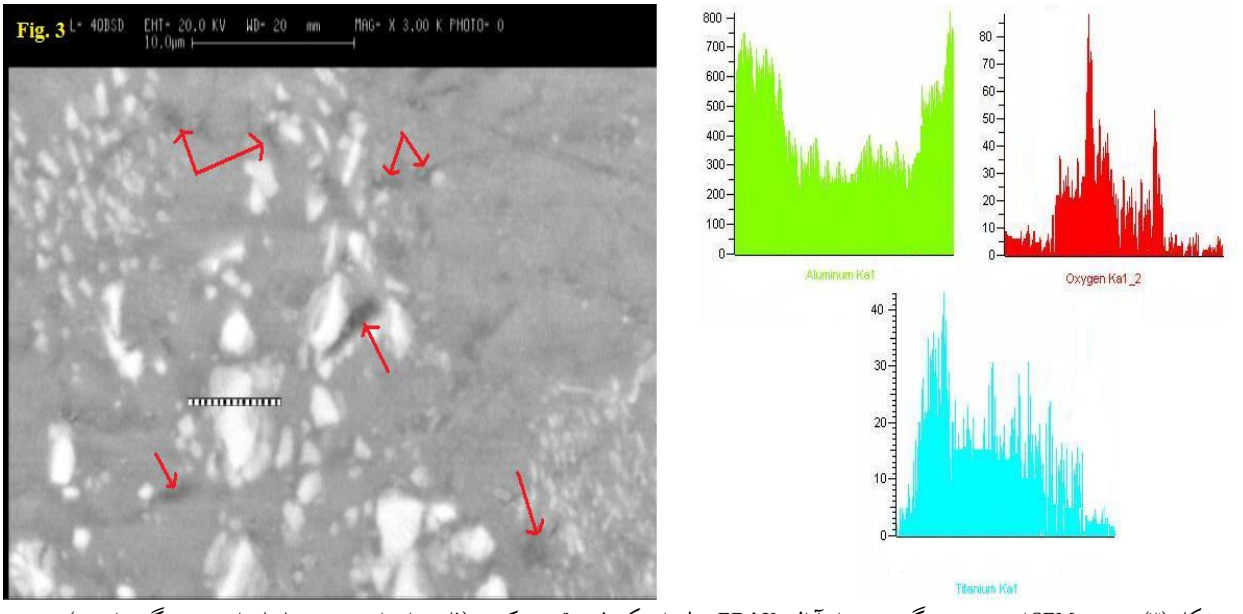
شکل(۲): تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط یه میکروساختار نمونه‌های ریخته گری شده (الف)، ایکپ شده (ب) و اکسترود شده (ج).

همانگونه که دیده می‌شود ذرات بیشتر به حالت اگلومره شده دیده می‌شوند. نتایج آنالیز عنصری حضور عناصر اکسیژن، آلومینیم و تیتانیم را بر روی ذره تقویت کننده تائید می‌کند در حالی که عنصر بور به دلیل شعاع اتمی کوچک قابل شناسایی نمی‌باشد. به دلیل اینکه ذرات تقویت کننده حاوی پودرهای

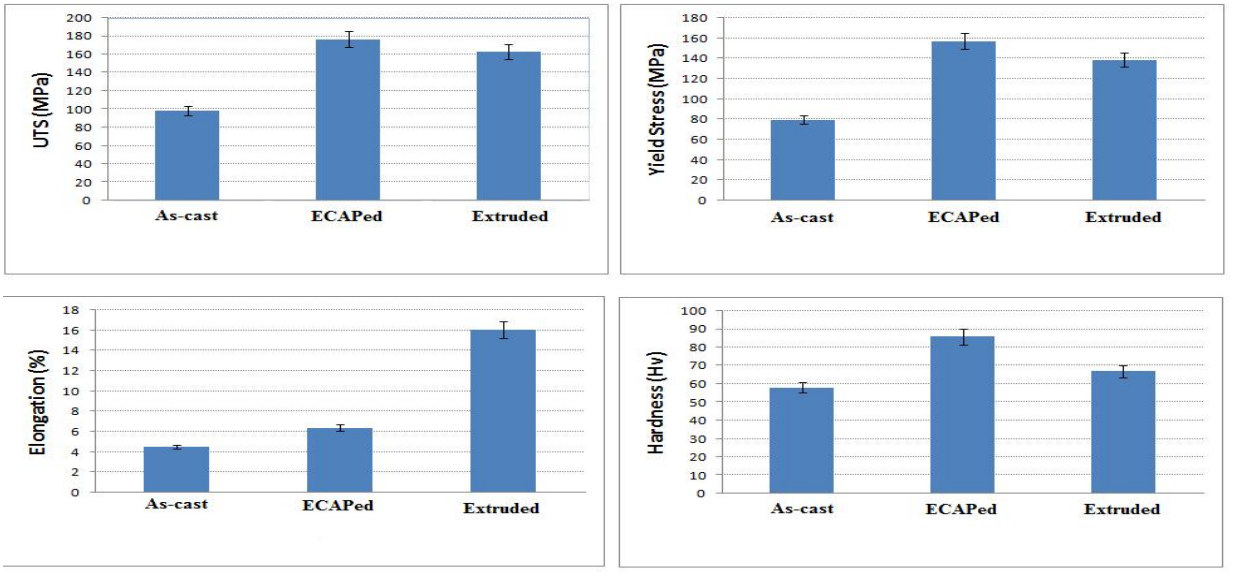
آلومینیم نیز می‌باشند مقدار آلومینیم شناسایی شده روی ذره بیش از حد مورد انتظار می‌باشد.

۳-۳- نتایج آزمون کشش و سختی

خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بعد از ریخته گری و تغییر فرم گرم در شکل (۴) ارائه شده است. همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود به دلیل وجود تخلخل‌هایی که در نمونه ریختگی وجود دارد، مقدار استحکام نمونه ریختگی بسیار پایین می‌باشد. سختی این نمونه مقدار ۴۳ ویکرز بدست آمد که تفاوت چندانی با مقدار سختی آلومینیوم خالص نداشته است.

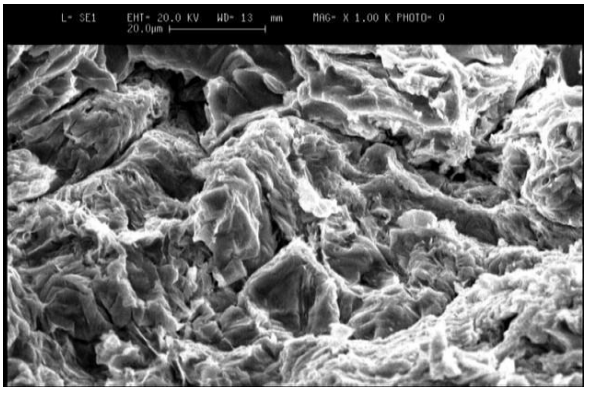


شکل (۳): تصویر SEM از نمونه ریختگی به همراه آنالیز EDAX خطی از یک ذره تقویت کننده (فلش‌ها نشان دهنده تخلخل‌های ریخته گری است.)

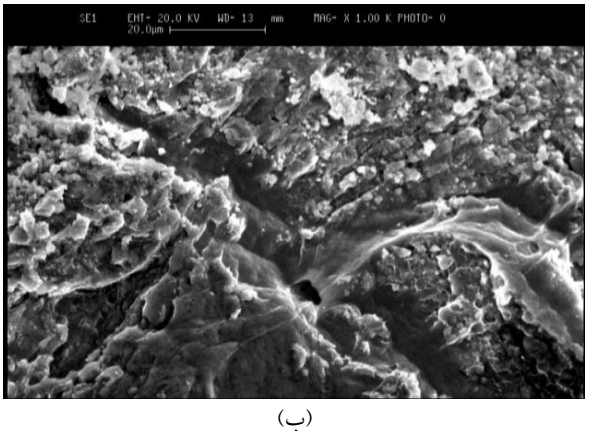


شکل (۴): نتایج آزمون کشش و میکروسختی سنجی حاصل از نمونه های ریختگی، ایکپ شده و اکسترودشده.

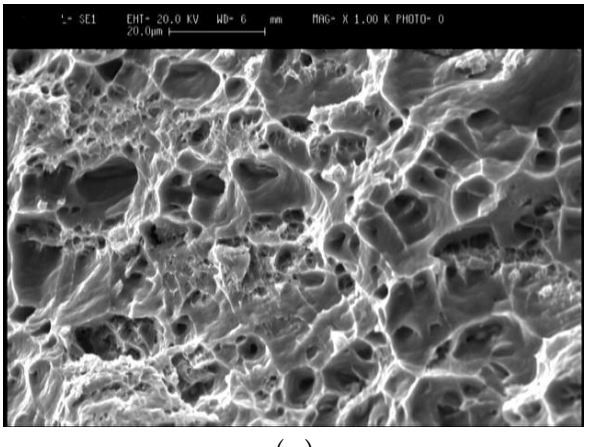
در واقع این مساله بدان معنی نیست که وجود ۲ درصد وزنی تقویت کننده بی اثر بوده است. در واقع تخلخل‌های موجود در کامپوزیت موجب کاهش مقدار سختی کامپوزیت نسبت به مقدار مورد انتظار می‌شود. اما همانگونه که انتظار می‌رفت، نمونه‌های ایکپ شده و اکسترود شده دارای خواص مکانیکی بسیار بالاتری نسبت به حالت ریختگی هستند. در واقع در حین تغییر فرم گرم تخلخل‌های موجود در ساختار از بین رفته و نمونه‌ها در حین ایکپ دچار کار سختی و افزایش قابل ملاحظه دانسیته نابجایی و ریز دانه شدن می‌شوند. آنچه که مشخص است تفاوت خواص مکانیکی نمونه‌های ایکپ شده و اکسترود شده است. ایکپ در دمای ۲۰۰ درجه یعنی در دمای کمتر از دمای بازیابی آلومینیوم انجام شده واکستروژن در دمای ۵۰۰ درجه یعنی دمایی بالاتر از دمای بازیابی انجام می‌شود. نوع و شرایط تغییر فرم در حین اکستروژن با ایکپ متفاوت می‌باشد. با وجود اینکه اکستروژن با نسبت ۲۰ به یک انجام می‌شود اما مقدار تغییر فرم در ایکپ به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است [۹]. نمونه ایکپ شده سختی و استحکام بسیار بالاتری داشته و داکتیلیته کمی دارد. در مقابل به دلیل کاهش مقدار دانسیته نابجایی و از بین رفتن اثرات کار سختی، داکتیلیته نمونه اکسترود شده بسیار بالاتر از حد مورد انتظاربدست آمده است. این در حالی است که سختی و استحکام تسلیم و کششی این نمونه کمتر از نمونه ایکپ شده می‌باشد. شکل (۵) سطح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش را نشان می‌دهد. در تفاوق با نتایج بدست آمده از آزمون کشش، سطح نمونه‌های ریخته گری شده و ایکپ شده و اکسترود شده دارای ویژگی های خاصی می‌باشد. شکل ۵- الف مربوط به نمونه ریختگی است که بدون اینکه بار چندانی بدان اعمال شود دچارشکست ترد شده است. در این تصویر مناطقی دیده می‌شوند که نشانگر وجود تخلخل‌ها و ترک‌ها می‌باشند. هم‌چنین وجود ذرات تقویت کننده آگلومره شده تائید می‌شود و این مناطق از جمله عوامل مهم ایجاد شکست ترد هستند. این در حالی است که در سطح شکت نمونه ایکپ شده، توزیع مناسب‌تر ذرات دیده شده اما همچنان سطح شکست، ترد می‌باشد. در نمونه اکسترود شده، ذرات توزیع شده و همانند نمونه ایکپ شده اثری از تخلخل و ترک دیده نمی‌شود. سطح شکست کاملا داکتیل بوده و دیمپل‌ها در همه جای آن دیده می‌شوند. نتایج سطح شکست به طور کلی نتایج قبلی را تائید می‌کنند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵): سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش: (الف) نمونه ریختگی، (ب) نمونه ایکپ شده، (ج) نمونه اکسترود شده.

٤- نتیجه گیری

در اثـر اعمـال ایکـپ و اکسـتروژن بعـد از ریختـه گـری کامپوزیت‌های ریختگی به طور بسیار فزاینده با افـزایش خـواص مکـانیکی همـراه شـده و بـه شـکل دلخـواه در آمدنـد. کـاهش چشمگیر مقدار تخلخل، کار سختی، افزایش دانسته نابجـایی‌هـا، ریز دانه شدن، توزیع بهتر ذرات تقویت کننده همراه بـا شکسـت این ذرات از حالت آگلومره و ... از عـواملی بـوده اسـت کـه در حین فرایندهای تغییر فرم گرم ایکـپ و اکسـتروژن در نمونـه‌هـا اتفاق می‌فتند و منجر به افزایش خواص کامپوزیت‌ها شده اسـت. ایکـپ در دمـای ۲۰۰ و اکسـتروژن در دمـای ۵۰۰ درجـه انجـام شدند. این موضوع به همراه نوع و مقدار تغییـر فرمـی کـه اتفـاق می‌افتند منجر بـه تفـاوت در خـواص نمونـه‌هـای ایکـپ شـده و اکسترود شده می‌شوند.

٥- مراجع

[1] H. Abdizadeh, H.R. Baharvandi, K. Shirvani Moghaddam, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 498, pp.53-58, 2008.

[2] A. Sakthivel, R. Palaninathan, R. Velmurugan, P. Raghothama Rao, J. Mater. Sci., Vol. 43, pp. 7047-7056, 2008.

[3] A. Mazahery, H. Abdizadeh, H.R. Baharvandi, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 518, Vol. 61-64, 2009.

[4] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi, J. Mater. Process Technol, Vol. 92-93, pp. 1-7, 1999.

[5] G. Ramu, Ranjit Bauri, Mater. Des., Vol. 30, pp. 3554-3559, 2009.

[6] T. Liu, W. Zhang, S.D. Wu, C.B. Jiang, S.X. Li, Y.B. Xu Shenyang, Mater. Sci. Eng. A 360 345-349, 2003.

[7] K.M. Shorowordi, T. Laoui, A.S.M.A. Haseeb, J.P. Celis, L. Froyen, J. Mater. Process Technol., Vol. 142, pp. 738-743, 2003.

[8] Zhangwei Wang, Min Song, Chao Sun, Daihong Xiao, Yuehui He, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, pp. 6537-6542, 2010.

[9] X.J. Wang, K. Wu, H.F. Zhang, W.X. Huang, H. Chang, W.M. Gan, M.Y. Zheng, D.L. Peng, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 465, pp. 78-84, 2007.