

## عملکرد تقویت کننده‌های کامپوزیتی $Al_2O_3-TiB_2/Fe$ در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم

مجید طاووسی\*، شهرام ریزانه و غلامحسین برهانی  
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۱۲)

**چکیده** - هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر ذرات تقویت کننده سه جزئی  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم می‌باشد. در این راستا ذرات تقویت کننده مورد بررسی با انجام واکنش‌های مربوطه طی فرایند آسیاکاری و عملیات حرارتی تهیه شد. در ادامه، درصد‌های مختلف (۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد حجمی) از ذرات به همراه پودر آلومینیم خالص به مدت زمان ۱۰ ساعت آسیاکاری گردید و سپس اکستروژن گرم شد. بررسی‌های ساختاری، فازی و مکانیکی نمونه‌های حاصل توسط پراش سنچ پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون کشش انجام شد. نتایج نشان داد که رسوبات غنی از آهن در ذرات تقویت کننده کامپوزیتی بخش سرامیکی ذرات را به زمینه فلزی متصل نموده و نقش مؤثری در بهبود انعطاف پذیری آنها دارد. بهینه درصد ذرات تقویت کننده مورد بحث برای استحکام بخشی آلومینیم ۲/۵ درصد حجمی تشخیص داده شد. استحکام و درصد ازدیاد طول حاصل از این نمونه کامپوزیتی به ترتیب ۵۰۰ مگاپاسکال و ۶ درصد تعیین شد.

واژگان کلیدی: تقویت کننده فلزی - سرامیکی، آسیاکاری، پرس گرم، کامپوزیت

## The Function of $Al_2O_3-TiB_2/Fe$ Composite Reinforcements in Aluminum Matrix Composites

M. Tavoosi\*, S. Rizaneh and G. H. Borhani

Department of Materials Engineering, Malek- Ashtar University of Technology (MUT), Shahin-Shahr, Isfahan, Iran

**Abstract:** Investigating the effect of  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  complex reinforcement (CCMR) on the mechanical properties of aluminum composites was the goal of this study. For this purpose, the  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  reinforcement powders were synthesized

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: ma.tavoosi@gmail.com

during milling and subsequent annealing. Different volume percentages of the produced reinforcement powders (1.25, 2.5 and 5 vol.%) were added to aluminum matrix, milled for 10 h and then hot extruded. The structural phasic and mechanical investigations of the specimens were carried out using X-ray diffraction, scanning electron microscopy and tensile test. The results showed that the metallic component (Fe rich phase) in this new type of reinforcement stuck the ceramic parts ( $Al_2O_3$ - $TiB_2$ ) to aluminium matrix, and has an importance role in the flexibility of the product. The best volume percentage of CCMR in aluminium matrix was about 2.5%. This nanocomposite had a combination of strength and ductility of about 500 MPa and 6%, respectively.

**Keywords:** Ceramic-Metal Reinforcements, Milling, Hot extrusion, Composite

## ۱- مقدمه

زمینه فلزی فعالیت‌های تحقیقاتی مختلفی صورت گرفته است.

این فعالیت‌ها به صورت خاص از چند جنبه قابل بررسی است:

۱- استفاده از تقویت کننده مناسب: در این رابطه تلاش می‌شود تا از ذرات تقویت کننده‌ای بهره گرفته شود که تطابق شبکه‌ای بیشتر و به بیان دیگر ترشوندگی بهتری با زمینه آلومینیم داشته باشند. به عنوان نمونه ثابت شده است که ذرات تقویت کننده  $TiB_2$ ، از عملکرد مناسب‌تری در مقایسه با تقویت کننده‌های دیگر در استحکام بخشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم برخوردار هستند [۵ و ۱].

۲- کاهش اندازه ذرات تقویت کننده تا حدود نانومتر: با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده تا ابعاد نانواندازه، در حضور درصد پایین تر ذرات تقویت کننده، امکان حصول استحکام بالاتر و انعطاف پذیری بیشتر در کامپوزیت‌های حاصل وجود دارد [۶ و ۵]. در این رابطه؛ فعالیت تحقیقاتی محبوب و همکاران [۷] قابل توجه است. این محققین با استفاده از روش آسیاکاری و پرس گرم در حضور هشت درصد ذرات تقویت کننده با متوسط اندازه ذرات ۳۰ نانومتر موفق به حصول استحکام ۲۶۳ مگاپاسکال شدند. البته انعطاف پذیری محصولات نیز مناسب گزارش شده است.

۳- استفاده از تقویت کننده‌های کامپوزیتی: با توجه به خواص متفاوت ذرات تقویت کننده مختلف، امکان استفاده از ذرات تقویت کننده کامپوزیتی برای بهبود خواص مکانیکی وجود دارد. به عنوان نمونه روشن و همکاران [۸] در بررسی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم از ذرات تقویت کننده کامپوزیتی  $Al_2O_3$ - $TiB_2$  تولید شده به روش سنتز احتراقی خود پیش‌رونده استفاده نمودند. استحکام نهایی

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم گروه ویژه‌ای از مواد مهندسی هستند که به دلیل چگالی کم، ضریب الاستیک بهبود یافته، استحکام بالا و مقاومت خزشی و سایشی برجسته از جایگاه ویژه‌ای در صنایع هوایی، اتومبیل‌سازی و حمل و نقل برخوردار می‌باشند [۵-۱]. در میان انواع مختلف کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم، کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات تقویت کننده به دلیل امکان کنترل خواص مکانیکی با تغییر نوع، درصد، شکل و توزیع ذرات در زمینه اهمیت زیادی دارند [۶].

تاکنون دسته وسیعی از ذرات تقویت کننده سرامیکی شامل انواع اکسیدها، نیتریدها و کاربیدها برای استحکام بخشی و افزایش مقاومت به سایش به آلومینیم و آلیاژهای آن افزوده شده است. با وجود عملکرد مناسب ذرات تقویت کننده سرامیکی در بهبود سختی و مقاومت سایش کامپوزیت‌های حاصل، بسته به نوع ذرات تقویت کننده، در اکثر موارد کامپوزیت‌های تهیه شده از انعطاف پذیری کمی برخوردار هستند و استحکام نهایی آنها نیز از مقدار استحکام تئوری پیش‌بینی شده فاصله دارد. به عنوان نمونه عزت‌پور و همکاران [۲] در مطالعه خواص کامپوزیت‌های  $Al/Al_2O_3$  تولید شده به روش اکستروژن گرم گزارش نمودند که استحکام تسلیم این کامپوزیت‌ها در حضور هفت درصد حجمی ذرات تقویت کننده (با اندازه ۲۰ میکرومتر) به حدود ۶۰ مگاپاسکال می‌رسد، این در حالی است که مقدار استحکام تئوری پیش‌بینی شده در مورد این کامپوزیت بسیار بالاتر است. در راستای بهبود عملکرد ذرات تقویت کننده در افزایش همزمان استحکام و انعطاف پذیری کامپوزیت‌های

حاصل از این تحقیق در حدود ۱۶۰ مگاپاسکال و انعطاف‌پذیری حدود شش درصد گزارش شده است.

با توجه به عملکرد اثبات شده ذرات تقویت کننده کامپوزیتی  $Al_2O_3-TiB_2$  بر استحکام بخشی کامپوزیت های زمینه آلومینیم، اخیراً تیم تحقیقاتی متمرکز بر این پژوهش، دسته جدیدی از تقویت کننده های کامپوزیتی سه جزئی  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  را معرفی نمودند. با توجه به روش تهیه این گروه جدید از ذرات تقویت کننده (با انجام یک واکنش شیمیایی به صورت درجا)، قفل مکانیکی مناسبی میان اجزای فلزی و سرامیکی برقرار می شود. حضور رسوبات فلزی در این کامپوزیت نوید بخش اتصال مکانیکی بهتر میان ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی است. نتایج ابتدایی در مورد این گروه از کامپوزیت ها حاکی از استحکام و انعطاف پذیری بالای محصولات بوده است [۹].

در این تحقیق تلاش شده تا به مطالعه دقیق نحوه عملکرد ذرات تقویت کننده کامپوزیتی  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  در استحکام بخشی کامپوزیت های زمینه فلزی پرداخته شود. در این رابطه، بررسی های ساختاری و فازی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و دستگاه پراش پرتو ایکس و بررسی های مکانیکی توسط آزمون سختی سنجی و کشش صورت پذیرفته است.

## ۲- مواد مورد استفاده و روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل پودرهای فروتیتانیم تجاری ( $20 \text{ wt.}\% \text{ Fe}-80 \text{ wt.}\% \text{ Ti}$ ) ساخت شرکت میلر (با اندازه متوسط ۶۰ میکرومتر)، اکسید بور (با اندازه متوسط ۴۰ میکرومتر) و آلومینیم (ساخت شرکت متالورژی پودر خراسان با متوسط اندازه ۲۵۰ میکرومتر) می باشد. فرایند آسیاکاری در آسیاب گلوله ای شافتی (جنس محفظه فولاد کرم سخت) با سرعت چرخشی ۳۶۰ دور در دقیقه تحت گاز آرگون با نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ انجام شد. به منظور سنتز ذرات پودر تقویت کننده، مخلوطی از فروتیتانیم، اکسید بور و آلومینیم براساس

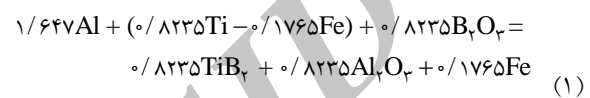
ترکیب استوکیومتری واکنش (۱) در محفظه آسیا وارد و به مدت زمان ۲۰ ساعت آسیاکاری شد. پودرهای حاصل از این مرحله در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه آنیل شد. پس از تهیه ذرات تقویت کننده و به منظور تهیه نمونه های کامپوزیتی، درصد های مختلف (۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد حجمی) از ذرات تولیدی به همراه مقدار مناسب از ذرات پودر آلومینیم وارد محفظه آسیا شده و تحت شرایط مشابه نمونه قبل به مدت ۱۰ ساعت آسیاکاری شد. از فرایند اکستروژن گرم با نسبت اکستروژن ۶ به ۱، سرعت سمبه ۵ میلی متر بر ثانیه و دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد برای انجام فشرده سازی شده و تولید قطعات حجیم استفاده شد. عملیات حرارتی نمونه های کامپوزیتی در محدوده دمایی ۴۰۰ الی ۵۰۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های مختلف انجام شد. به منظور ممانعت از اکسیداسیون، قبل از انجام عملیات حرارتی نمونه ها در داخل محفظه کوارتز و تحت خلاء  $10^{-2}$  تور کیسوله شد.

بررسی های فازی نمونه های حاصل توسط دستگاه پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD) مدل PW3710 ساخت شرکت فیلیپس، بررسی های ساختاری و مورفولوژیکی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> (SEM) مدل TESCAN-XMU ساخت شرکت وگا آلمان با ولتاژ ۱۵ کیلوولت انجام شد. آزمون کشش توسط دستگاه کشش آمسالر مدل FM2750 ساخت شرکت ولپرت آلمان در نرخ کرنش ۰/۵ میلی متر بر دقیقه و طبق استاندارد انجمن آزمون و مواد آمریکا شماره E8 انجام شد. سختی نمونه ها نیز براساس معیار ویکرز برآورد شد. اعداد سختی براساس میانگین پنج مرتبه سختی سنجی ارائه شده است. در ضمن چگالی نمونه های حاصل نیز با روش ارشمیدس محاسبه شد.

## ۳- نتایج و بحث

به منظور تهیه ذرات تقویت کننده فلزی-سرامیکی، مواد اولیه شامل فروتیتانیم، آلومینیم و اکسید بور با نسبت استوکیومتری معین براساس واکنش (۱) مخلوط و عملیات آسیاکاری در مورد

آنها انجام شد. انتظار بر این است که با انجام این واکنش، آلومینیم با اکسید بور وارد واکنش شده و تبدیل به بور و اکسید آلومینیم گردد. پس از آن، محتوای بور موجود با تیتانیم واکنش داده و ترکیب بین فلزی بروماید تیتانیم ( $TiB_2$ )، حاصل آید. در نهایت نیز آهن موجود در فروتیتانیم به عنوان یک فاز مجزا در ساختار باقی بماند و به این ترتیب کامپوزیت مورد نظر تهیه شود. شایان ذکر است که نسبت حجمی  $Al_2O_3$ ،  $TiB_2$  و Fe در محصول نهایی با انجام واکنش مورد نظر به ترتیب برابر ۶۰، ۳۶ و ۴ درصد خواهد بود.



$$\Delta G_{298}^{\circ} = (0/8235 \times \Delta G_{298}^{\circ} TiB_2 + 0/8235 \times \Delta G_{298}^{\circ} Al_2O_3) - (0/8235Ti \times \Delta G_{Ti}^{298} + 0/8235 \times \Delta G_{B_2O_3}^{298} + 1/647 \Delta G_{Ti}^{298})$$

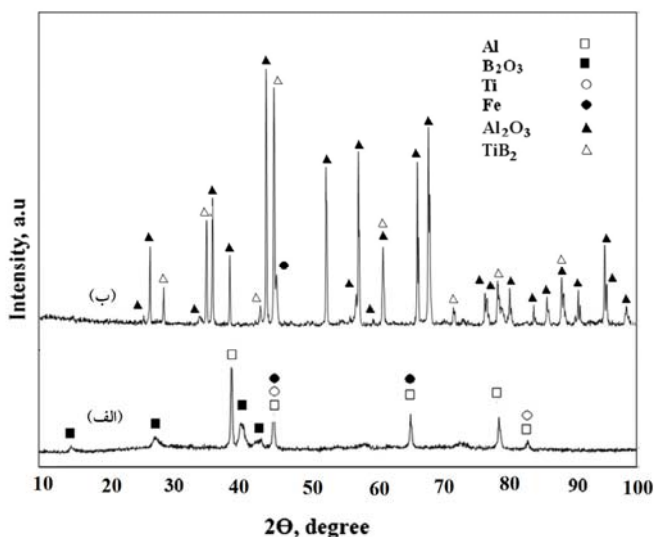
$$\Delta G_{298}^{\circ} = -579/43 \text{ kJ}$$

الگوی پراش پرتوایکس مربوط به مخلوط پودری فروتیتانیم، آلومینیم و اکسید بور پس از گذشت ۲۰ ساعت از انجام فرایند آسیاکاری در شکل ۱-الف ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، این الگوی پراش تنها شامل قله های مواد اولیه بوده و با انجام فرایند آسیاکاری به مدت ۲۰ ساعت، هیچ واکنشی بین مخلوط پودری مشاهده نشد. با وجودی که تغییرات انرژی آزاد گیبس این واکنش در دمای محیط منفی است و این واکنش از دیدگاه ترمودینامیک انجام پذیر است (رابطه ۱)، به منظور عدم آلودگی پودرهای تولیدی، فرایند آسیاکاری پس از گذشت ۲۰ ساعت قطع و تلاش شد تا انجام واکنش در حین عملیات حرارتی دنبال شود. بنابر مطالعات پیشین صورت گرفته، دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد برای انجام این کار مناسب تشخیص داده شد [۹]. الگوی پراش پرتوایکس مربوط به نمونه مورد بحث پس از انجام عملیات آنیل در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه در شکل ۱-ب قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود، قله های موجود در این شکل تنها مربوط به  $TiB_2$ ،  $Al_2O_3$  و

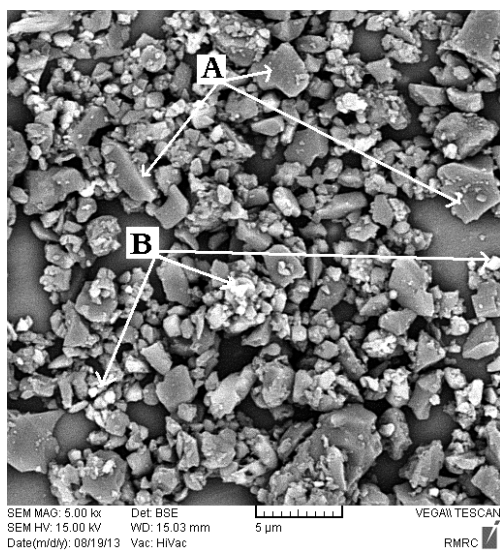
Fe بوده و قله های مربوط به مواد اولیه از الگوهای پراش پرتوایکس حذف شده است این موضوع نشان از این دارد که واکنش میان مواد اولیه پس از انجام آسیاکاری و عملیات حرارتی بعدی انجام گرفته و محصول کامپوزیتی مورد نظر تشکیل شده است.

با توجه به کلوخه ای بودن محصول کامپوزیتی حاصل (ذرات با متوسط قطر ۱ سانتی متر)، به منظور امکان استفاده از آن به عنوان تقویت کننده، فرایند آسیاکاری مجدد در مورد آنها به مدت یک ساعت انجام شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات پودر تقویت کننده کامپوزیتی مورد بحث پس از انجام آسیاکاری به مدت یک ساعت در شکل ۲ ارائه شده است. علاوه بر این نتایج آنالیز عنصری فازهای مختلف نشان داده شده در شکل ۲-ب، در شکل ۳ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، ذرات پودر کامپوزیتی متشکل از دو فاز تیره و روشن می باشند. براساس نتایج آنالیز عنصری و همچنین الگوی پراش پرتوایکس مربوطه، ذرات تیره رنگ موجود در شکل ۲ به ترکیب کامپوزیتی  $TiB_2-Al_2O_3$  نسبت داده می شود. شایان ذکر است که به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات روشن (در حدود ۲۵۰ نانومتر) در این تصویر، دقت آنالیز عنصری در مورد آن چندان زیاد نیست. با توجه به درصد بالاتر آهن در آنالیز عنصری حاصل از این فاز و حضور قله آهن خالص در الگوی پراش مربوطه، این فاز به فاز غنی از آهن نسبت داده شد. در ضمن متوسط اندازه ذرات کامپوزیتی  $TiB_2-Al_2O_3$  در حدود ۳ میکرومتر و متوسط اندازه ذرات غنی از آهن در حدود ۲۵۰ نانومتر برآورد شد.

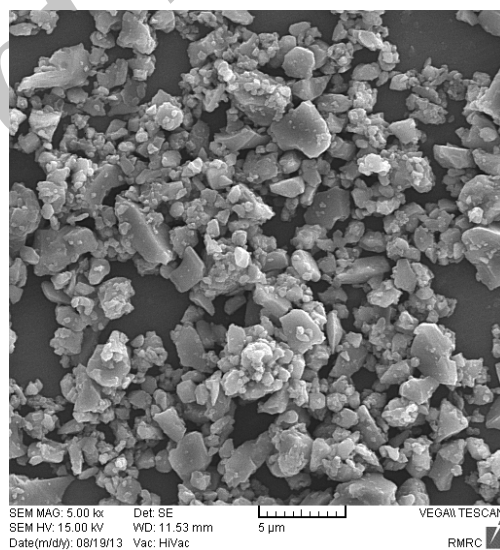
پس از ساخت ذرات تقویت کننده، در مرحله بعد تلاش شد تا مقادیر ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد حجمی از ذرات تقویت کننده به آلومینیم اضافه شده و کامپوزیت هایی از نمونه های مورد بحث ساخته شود. در این رابطه مخلوط های پودری به مدت زمان ۱۰ ساعت آسیاکاری شده و با استفاده از فرایند اکستروژن گرم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد فشرده سازی شد. در واقع، زمان ۱۰ ساعت آسیاکاری برای تهیه کامپوزیت های نهایی با توجه به رسیدن اندازه ذرات پودر نهایی



شکل ۱- الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به مخلوط پودری فروتیتانیم، اکسید بور و آلومینیم پس از انجام ۲۰ ساعت آسیاکاری: (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات حرارتی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه (واحد شدت، اختیاری است)



(ب)

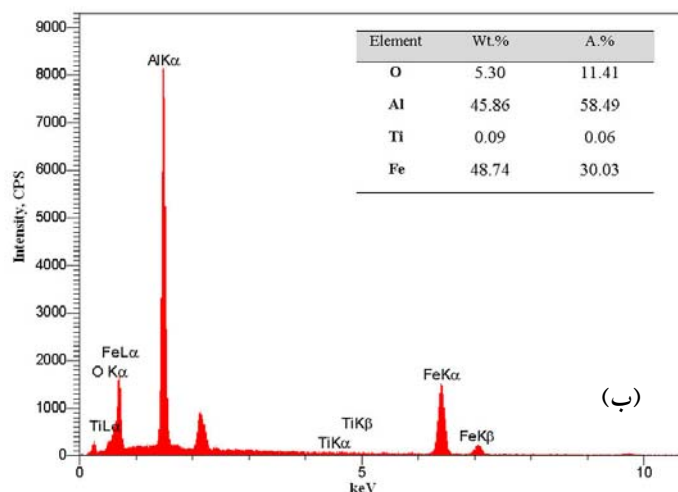
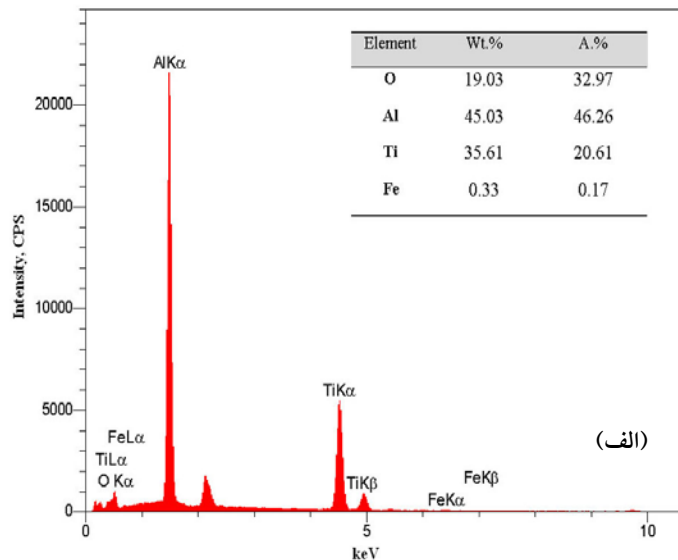


(الف)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مخلوط پودری فروتیتانیم، اکسید بور و آلومینیم پس از انجام: (الف) ۲۰ ساعت آسیاکاری و (ب) عملیات حرارتی بعدی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه

است. با توجه به این شکل چند نکته قابل توجه است:  
 ۱- همانطور که مشاهده می شود، هیچ گونه تخلخلی در ساختار حاصل مشاهده نمی شود که این موضوع نشان از فشرده سازی مناسب نمونه های کامپوزیتی دارد. در مورد تمامی

به شرایط پایدار در این زمان (با متوسط اندازه ۵۰ میکرومتر) و کاهش میزان آلودگی ذرات پودر توسط محفظه انتخاب شد. تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونه کامپوزیتی حاوی ۲/۵ درصد تقویت کننده به صورت نمونه در شکل ۴ آورده شده



شکل ۳- نتایج آنالیز عنصری مربوط به مخلوط پودری فروتیتانیم، اکسید بور و آلومینیم پس از انجام ۲۰ ساعت آسیاکاری و عملیات حرارتی بعدی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه (الف) مربوط به نقطه A و (ب) مربوط به نقطه B نشان داده شده در شکل ۲-ب

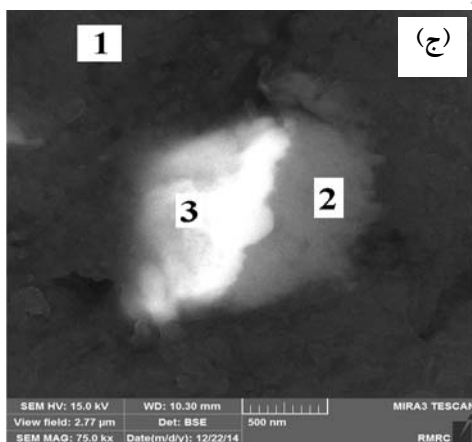
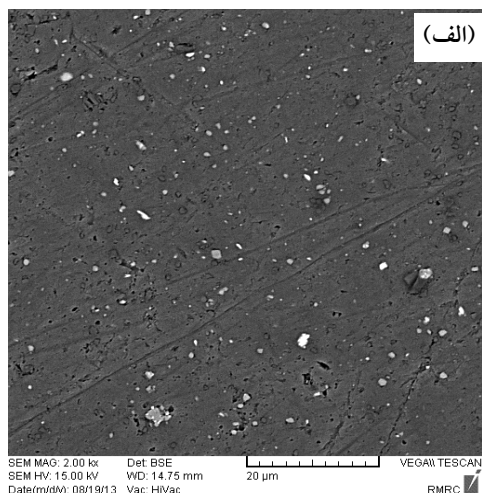
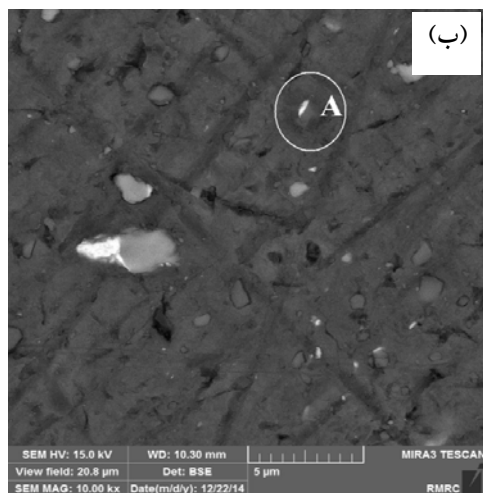
آهن و رسوبات تیره رنگ ذرات کامپوزیتی  $TiB_2-Al_2O_3$  می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اجزای مختلف تقویت کننده در تماس با یکدیگر بوده و به‌نظر می‌رسد از استحکام پیوندی مناسبی برخوردار هستند.

نمودار تنش- کرنش کششی در مورد نمونه‌های کامپوزیتی حاوی درصد‌های مختلف تقویت کننده در شکل ۶ و خواص مکانیکی مربوط به آنها در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه

نمونه‌های کامپوزیتی، چگالی محاسبه شده بیش از ۹۸ درصد چگالی تئوری برآورد گردید.

۲- ذرات تقویت کننده به‌خوبی در ساختار توزیع شده و ساختار کامپوزیتی مناسبی را شکل داده‌اند.

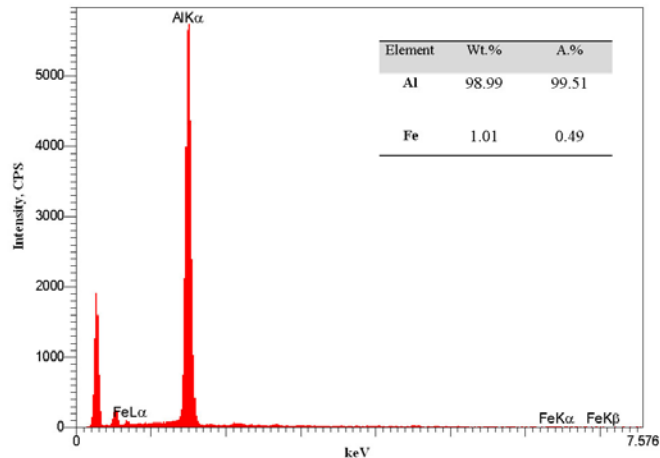
۳- ذرات تقویت کننده، شامل دو فاز مجزا هستند. مطابق آنچه بیان شد و با توجه به نتایج آنالیز عنصری (شکل ۵) مشخص شد که رسوبات روشن موجود مربوط به فاز غنی از



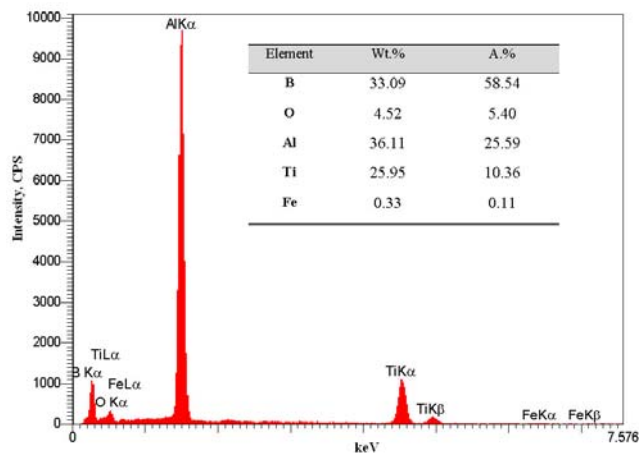
شکل ۴- الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه کامپوزیتی زمینه آلومینیم حاوی ۲/۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننده کامپوزیتی  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  در بزرگنمایی های مختلف، ج) تصویر ناحیه A در شکل (ب) در بزرگنمایی بالاتر

کننده به حدود ۶ درصد می‌رسد که مقدار بسیار بالایی برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی است [۹-۱۲]. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست مربوط به این دو نمونه که در شکل ۷ آورده شده است (ظاهر دیمپلی شکل سطح شکست) نیز این مطلب را تأیید می‌کند. شایان ذکر است که افزایش بیشتر درصد ذرات تقویت کننده تا ۵ درصد، تأثیر چندانی بر استحکام نداشته اما کاهش شدید انعطاف‌پذیری را به دنبال داشته است. در این راستا درصد حجمی ۲/۵ درصد، به‌عنوان درصد بهینه ذرات تقویت کننده در ساختار تعیین شد. علت اصلی افزایش استحکام نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش

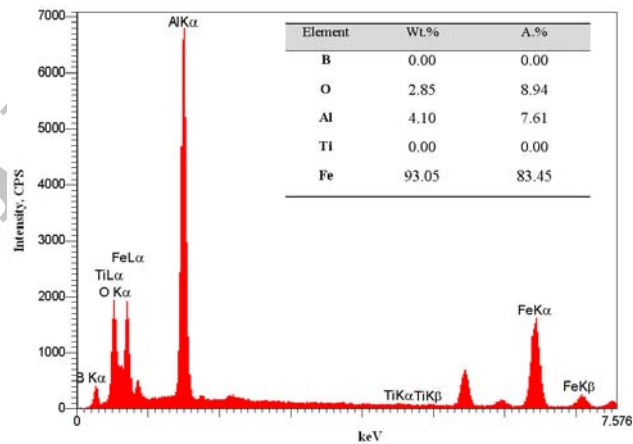
که مشاهده می‌شود، نمونه کامپوزیتی حاوی ۱/۲۵ درصد حجمی تقویت کننده دارای استحکام کششی ۳۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. با افزایش درصد ذرات تقویت کننده تا ۲/۵ درصد، استحکام تا حدود ۵۰۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. این مقدار استحکام بسیار بالاتر از استحکام گزارش شده توسط روشن و همکاران [۸] در حضور ذرات تقویت کننده کامپوزیتی دو جزئی  $Al_2O_3-TiB_2$  می‌باشد (۱۶۰ مگاپاسکال). نکته جالب توجه در این رابطه، انعطاف‌پذیری بالای محصولات کامپوزیتی حاصل می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود انعطاف‌پذیری نمونه‌های حاوی ۱/۲۵ و ۲/۵ درصد حجمی ذرات تقویت



(الف)



(ب)



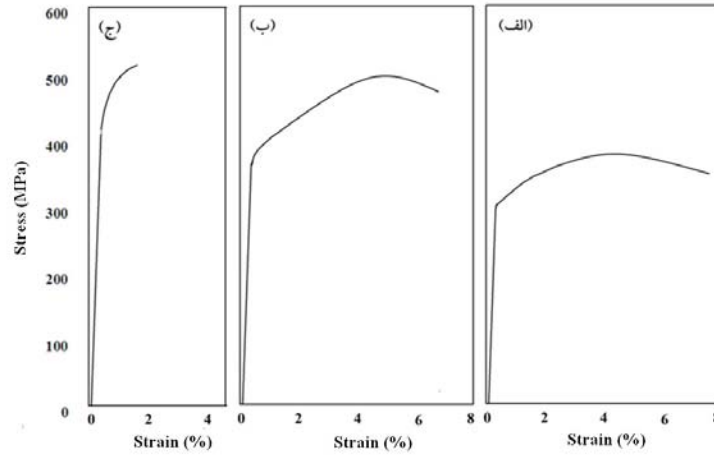
(ج)

شکل ۵- نتایج آنالیز عنصری مربوط به نواحی: (الف) ۱، (ب) ۲ و (ج) ۳ مشخص شده در شکل ۴- ج

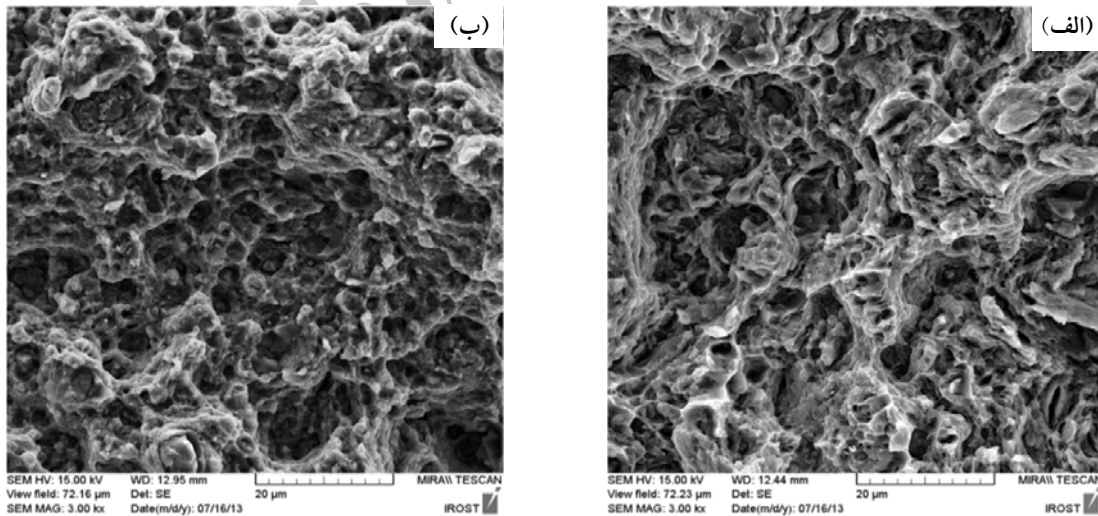


جدول ۱- خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی حاوی درصدهای مختلف ذرات تقویت کننده

درصد حجمی ذرات تقویت کننده	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول نسبی	سختی (ویکرز)
۱/۲۵	۳۰۵	۳۲۵	۷	۱۰۰±۵
۲/۵	۴۶۵	۵۰۰	۶	۱۴۵±۳
۵	۴۷۰	۵۱۵	۱	۱۵۰±۶



شکل ۶- نمودار تنش- کرنش مهندسی مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی حاوی: (الف) ۱/۲۵، (ب) ۲/۵ و (ج) ۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننده



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست نمونه‌های کامپوزیتی حاوی: (الف) ۱/۲۵ و (ب) ۲/۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننده

درصد ذرات تقویت کننده با توجه به نقش مؤثر ذرات تقویت کننده در ممانعت از حرکت نابجایی‌ها و همچنین افزایش چگالی نابجایی‌ها در مناطق اطراف ذرات تقویت کننده (به دلیل تفاوت ضریب انبساط حرارتی) قابل تحلیل است [۱۸-۱۳]. دلیل اصلی انعطاف‌پذیری بالای نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با کامپوزیت‌های مشابه تقویت شده با ذرات تقویت کننده سرامیکی تک‌جزئی به طبیعت تقویت کننده مورد بررسی مربوط می‌باشد. در راستای درک بهتر این موضوع تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (توسط الکترون‌های برگشتی) از سطح مقطع شکست نمونه حاوی ۲/۵ درصد حجمی تقویت کننده در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ چند نکته قابل توجه است:

۱- ذرات تقویت کننده حاصل به‌صورت دو فاز تیره ( $TiB_2-Al_2O_3$ ) و روشن (فاز غنی از آهن) در کنار یکدیگر در داخل دیمپل‌ها قابل مشاهده هستند (شکل ۸).

۲- رسوبات فاز روشن (فاز غنی از آهن) همانند پین‌های مستحکمی ذرات تقویت کننده را به زمینه متصل نموده‌اند. استحکام اتصال این ذرات با زمینه آلومینیم از نوع پیوندهای متالورژیکی (پیوندهای فلزی) می‌باشد که به مراتب بالاتر از استحکام اتصال ذرات سرامیکی و بین‌فلزی ( $TiB_2-Al_2O_3$ ) با زمینه آلومینیم است.

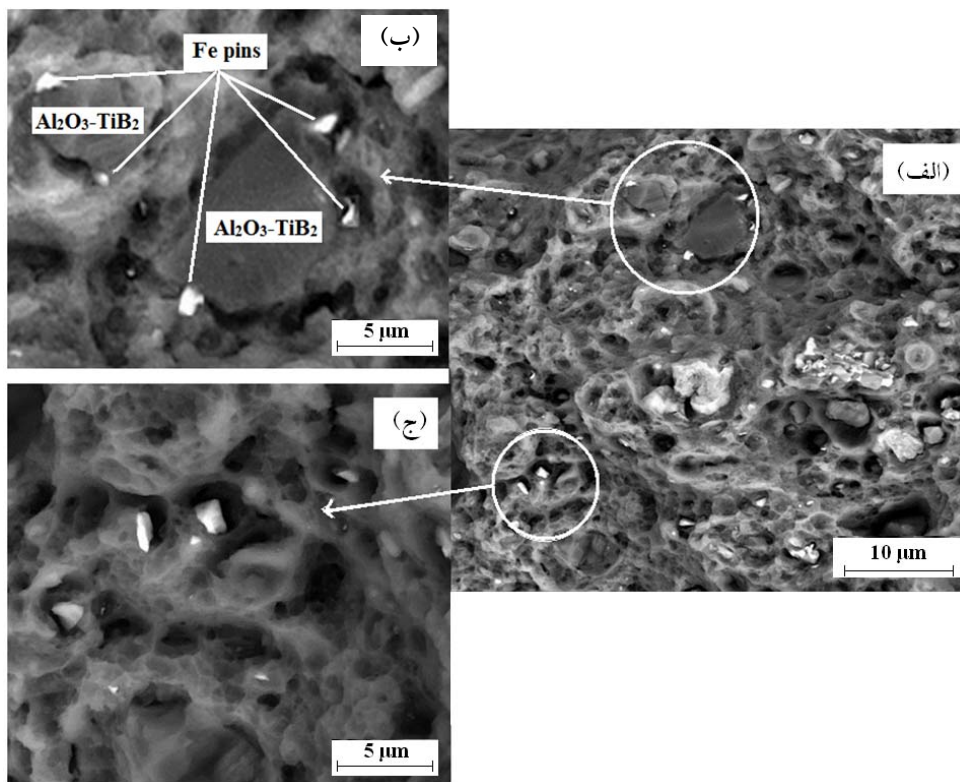
در هر حال به‌نظر می‌رسد علت اصلی انعطاف‌پذیری مناسب نمونه‌های کامپوزیتی، مربوط به حضور فاز غنی از آهن در تقویت‌کننده‌های مورد بررسی باشد. در واقع فاز غنی از آهن که قفل‌های مکانیکی مستحکمی با ذرات تقویت کننده سرامیکی برقرار نموده‌اند، مشابه پین‌های مستحکمی، ذرات تقویت کننده را به زمینه متصل نموده و زمینه را برای افزایش انعطاف‌پذیری به‌همراه داشته‌اند.

در هر حال همان‌طور که اشاره شد، محصولات کامپوزیتی به‌دلیل نقش برجسته رسوبات غنی از آهن موجود، از استحکام و انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار هستند. البته شایان ذکر است که این کامپوزیت از پایداری

حرارتی بالایی برخوردار نبوده و با قرارگیری در دماهای نسبتاً بالا، به تدریج رسوبات آهن در زمینه نفوذ نموده و با تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد، کاهش استحکام و انعطاف‌پذیری را به‌همراه خواهند داشت. به‌منظور بررسی پایداری حرارتی نمونه‌های کامپوزیتی، نمونه‌ها در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت زمان‌های مختلف آنیل شده و پس از خنک شدن تا دمای محیط، تحت آزمون سختی سنجی قرار گرفت. در این رابطه نمودار پایداری حرارتی نمونه کامپوزیتی حاوی ۲/۵ درصد تقویت کننده به‌عنوان نمونه در شکل ۹ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه‌های کامپوزیتی از پایداری حرارتی بالایی در دماهای کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برخوردار هستند. البته با افزایش دما به مقادیر بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، سختی نمونه‌ها به‌صورت جزئی کاهش می‌یابد. در واقع دو دلیل عمده برای کاهش مقادیر سختی با افزایش دما قابل ارائه است:

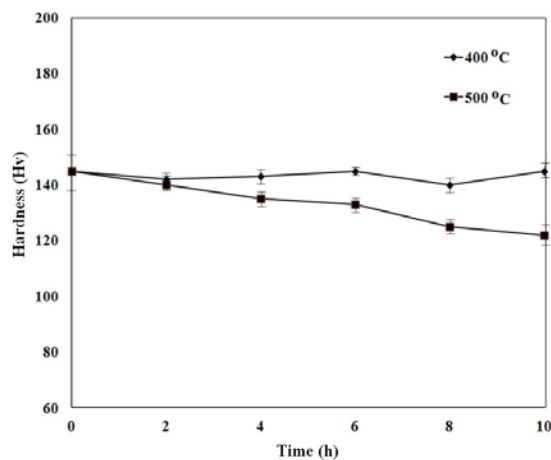
۱- افزایش دانه‌های کریستالی آلومینیم زمینه: به‌دلیل قرارگیری نمونه‌های حاصل در دماهای بالا به‌مدت زمان طولانی، احتمال رشد دانه‌های کریستالی آلومینیم وجود دارد. این موضوع می‌تواند به‌عنوان یکی از دلایل کاهش سختی نمونه‌ها مطرح باشد. البته شایان ذکر است که به‌دلیل نقش مؤثر ذرات تقویت کننده در قفل مرزخانه‌ها، احتمال این رخداد بسیار ضعیف بوده، به‌نظر می‌رسد عامل دوم در این زمینه نقش بیشتری داشته باشد.

۲- انحلال رسوبات غنی از آهن در زمینه: نفوذ اتم‌های آهن از فاز غنی از این عنصر به داخل زمینه و از بین رفتن نقش مؤثر آنها در قفل نمودن ذرات تقویت کننده، می‌تواند دلیل اصلی کاهش سختی نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش دما و زمان آنیل باشد. این موضوع در تأیید کار حق‌شناس و همکاران [۱] قرار دارد. این محققین دریافتند که در صورت انحلال آهن در شبکه آلومینیم، این عنصر با تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد و شکننده، کاهش انعطاف‌پذیری محصول کامپوزیتی را به‌همراه دارد.



شکل ۸- الف) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی براساس الکترون‌های برگشتی از سطح مقطع شکست نمونه کامپوزیتی حاوی ۲/۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننده، ب و ج) تصاویر بخش‌های مشخص شده در شکل (الف) در بزرگ‌نمایی بالاتر

با توجه به این نکته می‌توان گفت که با وجود نقش ارزنده پین‌های آهنی متصل به ذرات تقویت کننده در بهبود همزمان استحکام و انعطاف‌پذیری محصولات کامپوزیتی، ذرات تقویت کننده مورد بحث از پایداری حرارتی مناسبی برخوردار نبوده و قرارگیری طولانی مدت نمونه‌ها در دماهای بالا، منجر به از بین رفتن نقش مؤثر آنها در استحکام و انعطاف‌پذیری می‌شود. در این ارتباط در شکل ۱۰ نمودار تنش- کرنش مهندسی مربوط به نمونه حاوی ۲/۵ درصد تقویت کننده، پس از قرارگیری به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نمونه مورد بحث از انعطاف‌پذیری بسیار کمتری در مقایسه با نمونه کامپوزیتی اولیه برخوردار است. در واقع این موضوع نیز پایداری حرارتی ضعیف ذرات تقویت کننده فلزی مورد بررسی را تأیید می‌کند.



شکل ۹- نمودار تغییرات سختی نمونه کامپوزیتی حاوی ۲/۵ درصد تقویت کننده پس از عملیات حرارتی در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف

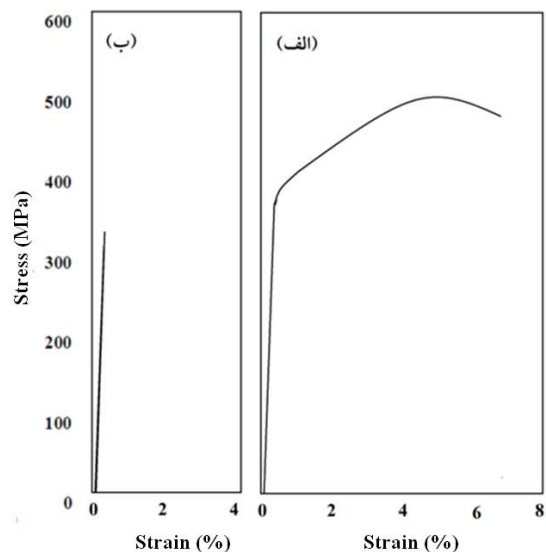
حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱- امکان تولید تقویت کننده کامپوزیتی سه جزئی  $Al_2O_3-TiB_2/Fe$  با انجام فرایند آسیاکاری مخلوط پودری آلومینیم، اکسید بور و فروتیتانیم به مدت زمان ۲۰ ساعت و انجام عملیات آنیل در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد به مدت زمان ۹۰ دقیقه وجود دارد.

۲- مقدار بهینه ذرات تقویت کننده کامپوزیتی در زمینه آلومینیم ۲/۵ درصد تشخیص داده شد. در این حالت نمونه های کامپوزیتی از استحکامی بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول نسبی بالاتر از ۶ درصد برخوردار هستند.

۳- قدرت اتصال پیوندی پین های آهنی موجود در ذرات تقویت کننده بسیار زیاد بوده و منجر به اتصال مستحکم ذرات تقویت کننده به زمینه شده و افزایش قابل توجه انعطاف پذیری را به همراه دارد.

۴- ذرات تقویت کننده معرفی شده از پایداری حرارتی مناسبی برخوردار نبوده و قرارگیری طولانی مدت آنها در دماهای به اندازه کافی بالا، منجر به کاهش عملکرد آنها می شود.



شکل ۱- نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه کامپوزیتی حاوی ۲/۵ درصد ذرات تقویت کننده: الف) قبل و ب) پس از قرارگیری در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ ساعت

#### ۴- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، توسعه نسل جدیدی از تقویت کننده های کامپوزیتی به منظور استحکام بخشی آلومینیم بود. مهم ترین نتایج

#### واژه نامه

1. x-ray diffraction (XRD)

2. scanning electron microscopy (SEM)

#### مراجع

- Haghshenas Jazi, E., Borhani, Gh., Esalmi, R., and Farsani, R., "Preparation of Al-Fe/TiB<sub>2</sub> Nanocomposite Powder by Ball Milling and Subsequent Heat Treatment", *Micro & Nano Letters*, Vol. 7, No. 5, pp. 448-452, 2012.
- Ezatpour, H. R., Torabi-Parizi, M., and Sajjadi, S. A., "Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Fabricated by Stir-Casting Process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, pp. 1262-1268, 2013.
- Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A., Celis, J. P., and Froyen, L., "Microstructure and Interface Characteristics of B<sub>4</sub>C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Al Matrix Composites: A Comparative Study", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 738-743, 2003.
- Ipek, R., "Adhesive Wear Behaviour of B<sub>4</sub>C and SiC Reinforced 4147 Al Matrix Composites (Al/B<sub>4</sub>C-Al/SiC)", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, pp. 71-75, 2005.
- Sadeghian, Z., Lotfi, B., Enayati, M. H., and Beiss, P., "Microstructural and Mechanical Evaluation of Al-TiB<sub>2</sub> Nanostructured Composite Fabricated by Mechanical Alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 506, pp. 7758-7763, 2011.
- Khorshid, M. T., Jahromi, S., and Moshksar, M. M., "Mechanical Properties of Tri-Modal Al Matrix Composites Reinforced by Nano- and Submicron-Sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulates Developed by Wet Attrition Milling and Hot Extrusion", *Materials & Design*,

- Vol. 31, pp. 3880-3884, 2010.
7. Mahboob, H., Sajjadi, S. A., and Zebarjad, S. M., "Synthesis of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-Composites by Mechanical Alloying and Evaluation of the Effect of Ball Milling Time on the Microstructure and Mechanical Properties", *The International Conference on MEMS and nanotechnology*, Kuala Lumpur Malaysia, pp. 240-245, 2008.
  8. Roshan, M. R., Taherzadeh Mousavian, R., Ebrahimkhani, H., and Mosleh, A., "Fabrication of Al-Based Composites Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub> Ceramic Composite Particulates using Vortex-Casting Method", *Journal of Mining and Metallurgy*, Vol. 49, pp. 229-305, 2013.
  9. Rizaneh, Sh., Borhani, Gh., and Tavoosi, M., "Synthesis and Characterization of Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/Fe) Nanocomposite by Means of Mechanical Alloying and Hot Extrusion Processes", *Advanced Powder Technology*, Vol. 25, pp. 1693-1698, 2015.
  10. Kang, Y. C., Chan, S. L. I., "Tensile Properties of Nanometric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 85, pp. 438-443, 2004.
  11. Nardone, V. C., and Prewo, K. M., "On the Strength of Discontinuous Silicon Carbide Reinforced Aluminum Composites", *Scripta Metallurgica*, Vol. 20, pp. 43-48, 1986.
  12. Nardone, V. C., "Assessment of Models used to Predict the Strength of Discontinuous Silicon Carbide Reinforced Aluminum Alloys", *Scripta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 1313-1318, 1987.
  13. Vogelsang, M., Arsenault, R. J., and Fisher, R. M., "An Insitu HVEM Study of Dislocation Generation at Al/SiC Interfaces in Metal Matrix Composites", *MTA*, Vol. 17, pp. 379-389, 1986.
  14. Shi, N., Wilner, B., and Arsenault, R. J., "An FEM Study of the Plastic Deformation Process of Whisker Reinforced SiC/Al Composites", *Acta Metallurgica & Materialia*, Vol. 40, pp. 2841-2854, 1992.
  15. Immarigeon, J. P., Holt, R. T., Koul, A. K., Zhao, L., Wallace, W., and Beddoes, J. C., "Light Weight Materials for Aircraft Applications", *Materials Characterization*, Vol. 35, pp. 41-67, 1995.
  16. Ahamed, H., and Senthilkumar, V., "Experimental Investigation on Newly Developed Ultrafine-Grained Aluminium based Nano-Composites with Improved Mechanical Properties", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 182-192, 2012.
  17. Alizadeh, A., Taheri-Nassaj, E., and Hajizamani, M., "Hot Extrusion Process Effect on Mechanical Behavior of Stir Cast Al Based Composites Reinforced with Mechanically Milled B<sub>4</sub>C Nanoparticles", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 27, pp. 1113-1119, 2011.
  18. Wang, Z., Song, M., Sun, C., Xiao, D., and He, Y., "Effect of Extrusion and Particle Volume Fraction on the Mechanical Properties of SiC Reinforced Al-Cu Alloy Composites", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 6537-6542, 2010.