

# عملکرد تقویت کنندههای کامپوزیتی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/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)

چكیده – هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر ذرات تقویت كننده سه جزئی Al2O3-TiB2/Fe بر خواص مكانیكی كامپوزیتهای زمینه آلومینیم میباشد. در این راستا ذرات تقویت كننده مورد بررسی با انجام واكنشهای مربوطه طی فرایند آسیاكاری و عملیات حرارتی تهیه شد. در ادامه، درصدهای مختلف (۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد حجمی) از ذرات بههمراه پودر آلومینیم خالص بهمدت زمان ۱۰ ساعت آسیاكاری گردید و سپس اكستروژن گرم شد. بررسیهای ساختاری، فازی و مكانیكی نمونههای حاصل توسط پراشسنج پرتوایكس، میكروسكوپ الكترونی روبشی و آزمون كشش انجام شد. نتایج نشان داد كه رسوبات غنی از آهن در ذرات تقویت كننده كامپوزیتی بخش سرامیكی ذرات را به زمینه فلزی متصل نموده و نقش مؤثری در بهبود انعطاف پذیری آنها دارد. بهیئه درصد ذرات تقویت كننده مورد بحث برای استحكام بخشی آلومینیم ۲/۵ درصد حجمی تشخیص داده شد. استحكام و درصد ازدیاد طول حاصل از این نمونه كامپوزیتی به میم میگروسكوپ الكترونی روبشی و آزمون كشش انجام شد. نتایج نشان داد كه رسوبات غنی از آهن در ذرات تقویت كننده كامپوزیتی بخش سرامیكی ذرات را به زمینه فلزی متصل نموده و نقش مؤثری در بهبود انعطاف پذیری آنها دارد. بهیئه درصد ذرات تقویت كننده مورد بحث برای استحکام بخشی آلومینیم ۲/۵ درصد حجمی تشخیص داده شد. استحکام و درصد ازدیاد طول حاصل از این نمونه كامپوزیتی به م

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

# The Function of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/Fe complex reinforcement (CCMR) on the mechanical properties of aluminum composites was the goal of this study. For this purpose, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/Fe reinforcement powders were synthesized

\* مسئول مكاتبات پست الكترونيكي: 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>) 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

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

تاكنون دسته وسيعي از ذرات تقويت كننده سراميكي شامل انواع اکسیدها، نیتریـدها و کاربیـدها بـرای اسـتحکام بخشـی 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 کامپوزیت های تهیه شده از انعطاف پذیری کمی برخوردار هستند و استحکام نهایی آنها نیز از مقدار استحکام تئوری پیش بینی شده فاصله دارد. به عنوان نمونه عزت پرور و همکاران [۲] در مطالعه خرواص کامپوزیت های Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تولید شده بهروش اکستروژن گرم گزارش نمودند که استحکام تسلیم این کامپوزیتها در حضور هفت درصد حجمی ذرات تقویت کننده (با اندازه ۲۰ میکرومتر) به حدود ۶۰ مگایاسکال می رسد، این درحالی است که مقدار استحکام تئوری پیش بینی شده در مورد این کامپوزیت بسیار بالاتر است. در راستای بهبود عملکرد ذرات تقویت کننده در افزایش همزمان استحکام و انعطاف پذیری کامپوزیت های

زمینه فلزی فعالیتهای تحقیقاتی مختلفی صورت گرفته است. این فعالیتها بهصورت خاص از چند جنبه قابل بررسی است: ۱- استفاده از تقویت کننده مناسب: در این رابطه تـلاش میشود تا از ذرات تقویت کنندهای بهره گرفته شـود کـه تطابق شبکهای بیشتر و به بیان دیگر ترشوندگی بهتری با زمینه آلومینیم داشته باشند. به عنوان نمونه ثابت شده است که ذرات تقویت کننده یا TiB2، از عملکرد مناسب تری در مقایسه با تقویت کننده های دیگر در استحکام بخشی کامپوزیتهای زمینه آلومینیم بر خوردارهستند [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 کننده های کامپوزیتی: با توجه به خواص متفاوت ذرات تقویت کننده مختلف، امکان استفاده از ذرات تقویت کننده کامپوزیتی برای بهبود خواص مکانیکی وجود دارد. بهعنوان نمونه روشن و همکاران [۸] در بررسی کامپوزیت های زمینه آلومینیم از ذرات تقویت کننده کامپوزیتی Al2O3-TiB2 تولید شده بهروش سنتز احتراقی خود پیشرونده استفاده نمودند. استحکام نهایی

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

با توجه به عملکرد اثبات شده ذرات تقویت کننده کامپوزیتی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub> بر استحکام بخشی کامپوزیتهای زمینه آلومینیم، اخیراً تیم تحقیقاتی متمرکز بر این پژوهش، دسته جدیدی از تقویت کننده های کامپوزیتی سهجزئی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub>/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 کامپوزیتها حاکی از استحکام و انعطاف پذیری بالای محصولات بوده است [۹].

در ایس تحقیق تسلاش شده تسا به مطالعه دقیق نحوه عملکرد ذرات تقویست کننده کسامپوزیتی TiB<sub>2</sub>/Fe در استحکامبخشی کامپوزیتهای زمینه فلزی پرداخته شود. در این رابطه، بررسسی هسای سساختاری و فسازی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و دستگاه پراش پرتو ایکس و بررسی هسای 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 (Ti %Fe-80 wt.% کو 20 wt.% Fe-80 wt. (با اندازه متوسط ۶۰ میکرومتر)، اکسید بور (با اندازه متوسط ۴۰ میکرومتر) و آلومینیوم (ساخت شرکت متالورژی پودر خراسان با متوسط اندازه ۲۵۰ میکرومتر) میباشد. فرایند آسیاکاری در آسیاب گلولهای 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. بهمنظور سنتز ذرات پودر تقویت کننده، مخلوطی از فروتیتانیم، اکسید بور و آلومینیم براساس

> مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶ www.SID.ir

ترکیب استوکیومتری واکنش (۱) در محفظه آسیا وارد و بهمدت زمان ۲۰ ساعت آسیاکاری شد. پودرهای حاصل از ایـن مرحله در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد بهمدت ۹۰ دقیقه آنیل شد. پس از تهیـه ذرات تقویـت کننـده و بـهمنظـور تهیـه نمونـههـای کامپوزیتی، درصدهای مختلف (۲/۵، ۲/۵ و ۵ درصد حجمی) از ذرات تولیدی بههمراه مقدار مناسب از ذرات پـودر آلـومینیم وارد محفظه آسیا شده و تحت شرایط مشابه نمونه قبل بهمـدت ۱۰ ساعت آسیاکاری شد. از فرایند اکستروژن گـرم بـا نسبت اکستروژن ۶ به ۱، سرعت سمبه ۵ میلیمتر بر ثانیه و دمای ۵۰۰ محیم استفاده شد. عملیات حرارتی نمونـههای کـامپوزیتی در رجعیم استفاده شد. عملیات حرارتی نمونـههای کـامپوزیتی در محدوده دمـایی ۲۰۰ الـی ۵۰۰ درجـه سـانتی گـراد در مـدت زمانهای مختلف انجام شد. بهمنظور ممانعت از اکسیداسـیون، قبل از انجام عملیات حرارتی نمونهها در داخل محفظه کـوارتز و تحت خلاء ۲<sup>-۱</sup> تور کپسوله شد.

بررسی های فازی نمونه های حاصل توسط دستگاه پراش پرتوایکس <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 آمسلر مدل FM2750 ساخت شرکت ولپرت آلمان در نرخ کرنش ۵/۵ میلیمتر 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- نتايج و بحث

بهمنظور تهیه ذرات تقویت کننده فلزی– سرامیکی، مـواد اولیـه شامل فروتیتانیم، آلومینیم و اکسید بور با نسـبت اسـتوکیومتری 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 (TiB2)، حاصل آید. در نهایت نیز آهن موجود در فروتیتانیم بهعنوان یک فاز مجزا در ساختار باقی بماند و به این ترتیب کامپوزیت مورد نظر تهیه شود. شایان ذکر است که نسبت حجمی Al2O3، 2lB2 و Fe در محصول نهایی با انجام واکنش مورد نظر بهترتیب برابر ۶۰، ۳۶ و ۴ درصد خواهد بود.

$$\begin{split} \mathsf{N}/\mathsf{FFVAl} + (\circ/\mathsf{ATTG}Ti - \circ/\mathsf{NVFG}Fe) + \circ/\mathsf{ATTG}B_{\mathsf{Y}}O_{\mathsf{Y}} = \\ \circ/\mathsf{ATTG}TiB_{\mathsf{Y}} + \circ/\mathsf{ATTGAl}_{\mathsf{Y}}O_{\mathsf{Y}} + \circ/\mathsf{NVFG}Fe \end{split} \tag{1}$$

$$\begin{split} \Delta G_{\gamma \eta \lambda}^{\circ} &= (\circ / \operatorname{Att} \Delta \times \Delta G_{\gamma \eta \lambda}^{\circ TiB_{\gamma}} + \circ / \operatorname{Att} \Delta \times \Delta G_{\gamma \eta \lambda}^{\circ Al_{\gamma}O_{\gamma}}) \\ &- (\circ / \operatorname{Att} \Delta Ti \times \Delta G_{Ti}^{298} + \circ / \operatorname{Att} \Delta \times \\ \Delta G_{B_{\gamma}O_{\gamma}}^{\eta \eta \lambda} + i / \operatorname{St} \vee \Delta G_{Ti}^{298}) \end{split}$$

 $\Delta G_{\textrm{yga}}^{\circ} = -\textrm{ang}/\,\textrm{yg}\,kJ$ 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، ایـن الگـوی پـراش تنهـا شـامل قلههای مواد اولیه بوده و با انجام فرایند آسیاکاری بهمدت ۲۰ ساعت، هیچ واکنشی بین مخلوط پودری مشاهده نشد. با وجودی که تغییرات انرژی آزاد گیـبس ایـن واکـنش در دمـای محیط منفی است و این واکنش از دیدگاه ترمودینامیک انجام پذیر است (رابطه ۱)، بـ منظور عـدم آلـودگی پودرهـای 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 بهمدت ۹۰ دقیقه در شکل ۱- ب قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می شود، قلههای موجود در این شکل تنها مربوط به TiB<sub>2</sub> ،Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و

Fe بوده و قلههای 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 کلوخهای بودن محصول کامپوزیتی حاصل (ذرات با متوسط قطر ۱ سانتیمتر)، بهمنظور امکان استفاده از آن بهعنوان تقویت کننده، فرایند آسیاکاری مجدد در مورد آنها بهمدت یک ساعت انجام شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات پودر تقویت کننده کامپوزیتی مورد بحث پس از انجام آسیاکاری بهمدت 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 میباشند. براساس نتایج آنالیز عنصری و همچنین الگوی پراش پرتوایکس مربوطه، ذرات تیره رنگ موجـود در شكل ۲ به تركيب كامپوزيتي TiB<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نسبت داده مي شود. شایان ذکر است که بهدلیل 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 آهـن خـالص در الگوی پراش مربوطه، این فاز به فاز غنی از آهان نسبت داده شد. در ضمن متوسط اندازه ذرات کامپوزیتی TiB<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 کامپوزیتهایی از نمونههای مورد بحث ساخته شود. در این رابطه مخلوطهای پودری بهمدت زمان ۱۰ ساعت آسیاکاری شده و با استفاده از فرایند اکستروژن گرم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد فشردهسازی شد. در واقع، زمان ۱۰ ساعت آسیاکاری برای تهیه



شکل ۱– الگوهای پراش پرتوایکس 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 سانتیگراد بهمدت ۹۰ دقیقه (واحد شدت، اختیاری است)



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 سانتیگراد بهمدت ۹۰ دقیقه

است. با توجه به این شکل چند نکته قابل توجه است: ۱- همانطور که مشاهده می دود، هیچگون تخلخلی در ساختار حاصل مشاهده نمی شود که این موضوع نشان از فشردهسازی مناسب نمونههای کامپوزیتی دارد. در مورد تمامی

به شرایط پایدار در این زمان (با متوسط اندازه ۵۰ میکرومتـر) و کاهش میزان آلودگی ذرات پودر توسـط محفظـه انتخـاب شـد. تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونـه کـامپوزیتی حـاوی ۲/۵ درصد تقویت کننده بهصـورت نمونـه در شـکل ۴ آورده شـده

> مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶ www.SID.ir



شکل ۳– نتایج آنالیز عنصری مربوط به مخلوط پودری فروتیتانیم، اکسید بور و آلومینیم پس از انجام ۲۰ ساعت آسیـاکاری و عملیات حـرارتی بعـدی در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد بهمدت ۹۰ دقیقـه الف) مربوط به نقطه A و ب) مربوط به نقطه B نشان داده شده در شکل ۲– ب

> نمونههای کامپوزیتی، چگالی محاسبه شده بیش از ۹۸ درصد چگالی تئوری بر آورد گردید.

۲- ذرات تقویت کننده بهخوبی در ساختار توزیـع شـده و ساختار کامپوزیتی مناسبی را شکل دادهاند.

۳– ذرات تقویت کننده، شامل دو فاز مجزا هسـتند. مطـابق آنچه بیان شد و با توجـه بـه نتـایج آنـالیز عنصـری (شـکل ۵) مشخص شد که رسوبات روشن موجود مربوط به فـاز غنـی از

آهن و رسوبات تیره رنگ ذرات کامپوزیتی TiB2-Al2O3 میباشند. همان طور که مشاهده می شود، اجزای مختلف تقویت کننده در تماس با یکدیگر بوده و به نظر می رسد 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



شکل ۴- الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه کامپوزیتی زمینه آلومینیم حاوی ۲/۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننـده کامپوزیتی Al2O3-TiB2/Fe در بزرگـنماییهای مختلف، ج) تصویر ناحیه A در شکل (ب) در بزرگـنمایی بالاتر

کننده به حدود ۶ درصد می رسد که مقدار بسیار بالایی برای کامپوزیت های زمینه فلزی است [۱۲-۹]. 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 انعطاف پذیری را بهدنبال داشته است. در این راستا درصد حجمی ۲/۵ درصد، بهعنوان درصد بهینه ذرات تقویت کننده در ساختار تعیین شد. که مشاهده می شود، نمونه کامپوزیتی حاوی ۱/۲۵ درصد حجمی تقویت کننده دارای استحکام کششی ۳۲۵ مگاپاسکال می باشد. 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 داند مایوریتی در ۱۶۰ مگاپاسکال). نکته جالب توجه در این رابطه، انعطاف پذیری بالای محصولات کامپوزیتی حاصل می باشد. همان طور که مشاهده می شود انعطاف پذیری نمونه های حاوی ۱/۲۵ و ۲/۵ درصد حجمی ذرات تقویت

> مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶ www.SID.ir



سکل 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				
سختى	درصد	استحكام كششى	استحكام تسليم	درصد حجمی ذرات
(ويكرز)	ازدياد طول نسبي	(مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)	تقويت كننده
۱۰۰±۵	٧	۳۲۵	۳۰۵	١/٢٥
1407L	۶	۵۰۰	480	۲/۵
۱۵۰±۶	١	۵۱۵	۴۷۰	۵







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 (بهدلیل تفاوت ضریب انبساط حرارتی) قابل تحلیل است [۸۸–۱۳]. دلیل اصلی انعطاف پذیری بالای نمونههای کامپوزیتی در مقایسه با کامپوزیتهای مشابه تقویت شده با ذرات تقویت کننده سرامیکی تکجزئی به طبیعت تقویت کننده مورد بررسی مربوط مرامیکی تکجزئی به طبیعت تقویت کننده مورد بررسی مربوط میراشد. 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 تقویـت کننـده حاصـل بـهصـورت دو فـاز تیـره (TiB2-Al2O3) و روشن (فاز غنی از آهن) در کنار یکـدیگر 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 (TiB2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) با زمینه آلومینیم است.

در هر حال بهنظر میرسد علت اصلی انعطاف پذیری مناسب نمونه های کامپوزیتی، مربوط به حضور فاز غنی از آهن در تقویت کننده های مورد بررسی باشد. در واقع فاز غنی از آهن که قفلهای مکانیکی مستحکمی با ذرات تقویت کننده سرامیکی برقرار نموده اند، مشابه پین های مستحکمی، ذرات تقویت کننده را به زمینه متصل نموده و زمینه را برای افزایش انعطاف پذیری به همراه داشته اند.

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

حرارتی بالایی برخوردار نبوده و با قرارگیری در دماهای نسبتاً بالا، به تدريج رسوبات آهن در زمينه نفوذ نموده و يا بـا تشكيل تركيبات بين فلزي ترد، كاهش استحكام و انعطاف پذیری را به همراه خواهند داشت. به منظور بررسی پایداری حرارتی نمونههای کامپوزیتی، نمونهها در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی گراد 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 به عنوان نمونه در شکل ۹ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود نمونه های کامپوزیتی از پایداری حرارتی بالایی در دماهای کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی گراد برخوردار هستند. البته با افزایش دما به مقادیر بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی گراد، سختی نمونهها بهصورت جزئی کاهش می یابد. در واقع دو دلیل عمده برای کاهش مقادیر سختی با افـزایش 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 زمینه وجود دارد. این موضوع می تواند بهعنوان یکی از دلایل کاهش سختی نمونهها مطرح باشد. البته شایان ذکر است که بهدلیل نقش مؤثر نمونهها مطرح باشد. البته شایان ذکر است که بهدلیل نقش مؤثر فیویت کننده در قفل مرزدانهها، احتمال این رخداد بسیار ضعیف بوده، بهنظر می رسد 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، می تواند دلیل اصلی کاهش سختی نمونههای کامپوزیتی با افزایش دما و زمان آنیل باشد. این موضوع در تأیید کار حق شناس 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 انعطاف پذیری محصول کامپوزیتی را به همراه 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 می توان گفت که با وجود نقش ارزنده پینهای آهنی متصل به ذرات تقویت کننده در بهبود همزمان استحکام و انعطاف پذیری محصولات کامپوزیتی، ذرات تقویت کننده مورد بحث از پایداری حرارتی مناسبی برخوردار نبوده و قرارگیری طولانی مدت نمونهها در دماهای بالا، منجربه از بین رفتن نقش مؤثر آنها در استحکام و انعطاف پذیری می شود. در این ارتباط در شکل ۱۰ نمودار تنش – کرنش مهندسی مربوط به نمونه حاوی ۲/۵ درصد تقویت کننده، پس از قرار گیری بهمدت ۱۰ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود، نمونه مورد بحث از انعطاف پذیری 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 می کند.



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

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶ شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶ www.SID.ir



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

### واژەنامە

2. scanning electron microscopy (SEM)

# مراجع

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*,

حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- امکان تولید تقویت کننده کامپوزیتی سهجزئی
  ۱- امکان تولید تقویت کننده کامپوزیتی سهجزئی
  ۲۰ محلوط پودری
  آلومینیم، اکسید بور و فروتیتانیم بهمدت زمان ۲۰ ساعت و
  انجام عملیات آنیل در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد بهمدت
  زمان ۹۰ دقیقه وجود دارد.
- ۲- مقدار بهینه ذرات تقویت کننده کامپوزیتی در زمینه آلومینیم ۲/۵ درصد تشخیص داده شد. در این حالت نمونههای 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 منجربه 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، منجربه کاهش عملکرد آنها میشود.

### 1. x-ray diffraction (XRD)

- 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/Al2O3 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,

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶

Vol. 31, pp. 3880-3884, 2010.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.