

بررسی خواص نانوکامپوزیت $Al/Al_2O_3-B_4C$ تولید شده به روش فرآیند اتصال نوردی تجمعی با کاربردز نانوذرات Al_2O_3 و B_4C

حسین اکبری بنی*^۱، محمود برهانی^۲، محمد سمیعی^۱، محمدعلی زارع^۳، احسان برهانی^۴

چکیده

در این پژوهش کامپوزیت زمینه آلومینیومی با نانو ذرات تقویت کننده Al_2O_3 و B_4C به وسیله روش اتصال نوردی تجمعی ساخته شد و اثر نانو ذرات تقویت کننده روی خواص مکانیکی و ریز ساختاری آن مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی ساختاری و ریزساختاری کامپوزیت تولید شده از پراش پرتو X و میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. خواص مکانیکی نمونه ها به وسیله آزمون های سختی و کشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سیکل های ARB استحکام کششی و میکروسختی کامپوزیت ها افزایش می یابد. نتایج نشان داد که در مقایسه با آلومینیوم خالص ARB شده (بدون ذرات تقویت کننده) حضور نانو ذرات باعث افزایش استحکام کامپوزیت ها می شود.

واژه های کلیدی: اتصال نوردی تجمعی، کامپوزیت های زمینه فلزی، خواص مکانیکی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز.

۲- دانشیار بخش فیزیک، دانشگاه یزد.

۳- مربی گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.

۴- استادیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه سمنان.

*- نویسنده مسئول مقاله: akbari_hosain65@yahoo.com

پیشگفتار

و روش‌های حالت مذاب مثل ریخته‌گری [۸، ۹] را نام برد. یکی از روش‌های حالت جامد تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی که در سال ۲۰۰۸ میلادی به وسیله نویسندگان استفاده شد، روش اتصال نوردی تجمعی (ARB) می‌باشد [۱۰-۱۲]. فرایند اتصال نورد تجمعی اغلب در دمای اتاق انجام می‌شود و اساس کار آن تغییر شکل پلاستیک شدید است که نسبت به روش‌های دیگر تولید کامپوزیت دارای مزایای زیر است: (۱) توانایی تولید کامپوزیت نانو ساختار به وسیله این روش. (۲) درصد تخلخل در کامپوزیت تولید شده با این روش کم است. (۳) عدم تشکیل فازهای بین‌فلزی در این روش به دلیل انجام فرایند در دمای اتاق [۶].

استفاده از فرایند اتصال نورد تجمعی برای تولید کامپوزیت نیز دارای برخی معایب از جمله تجمع ذرات تقویت کننده در زمینه می‌باشد که البته راه‌کارهایی جهت رفع این عیب ارائه شده است. برای مثال، با افزایش شمار سیکل‌های فرایند می‌توان توزیع بهتری از ذرات را داشت یا این‌که می‌توان از فرایند اتصال نوردی تجمعی متقاطع به جای فرایند اتصال نورد تجمعی در تولید کامپوزیت استفاده کرد [۶].

هدف از این پژوهش ساخت نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی با استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم و کاربرد بور به وسیله فرایند اتصال نورد تجمعی و بررسی برخی خواص ساختاری، ریزساختاری و خواص مکانیکی آن می‌باشد.

روش پژوهش

در این پژوهش برای ساخت کامپوزیت از ورق‌های آلومینیوم تجاری ۱۰۵۰ با طول ۲۰۰، عرض ۳۰ و ضخامت ۰/۴ میلی‌متر به عنوان زمینه استفاده شد که ترکیب شیمیایی این ورق‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

آلیاژهای آلومینیوم به علت دارا بودن وزن سبک دارای کاربردهای متعددی در صنایع گوناگون از جمله هوافضا و صنایع دریایی می‌باشند [۱]. از سوی دیگر، کاربرد آلیاژهای آلومینیوم به علت پایین بودن استحکام و مدول الاستیک در مواردی که استحکام بالا لازم است، محدود می‌باشد [۱]. به همین دلیل، تلاش‌های زیادی جهت افزایش استحکام آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است. یکی از روش‌های افزایش استحکام آلیاژهای آلومینیوم کامپوزیت‌سازی می‌باشد. بتازگی پژوهشگران با ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با استفاده از ذرات تقویت کننده توانسته‌اند استحکام، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیوم را افزایش داده و لذا، موفق به توسعه کاربرد آلیاژهای آلومینیوم در صنایع گوناگون همچون خودرو سازی، هواپیما سازی، انتقال برق و کاربردهای مهندسی شده‌اند [۱]. تاثیر ذرات اضافه شونده در خواص کامپوزیت به پارامترهایی گوناگون از جمله نوع ذره، اندازه، شکل و نحوه توزیع ذرات بستگی دارد [۲، ۳]. این ذرات افزون بر این‌که باعث افزایش استحکام می‌شوند، باعث تغییر خواص فیزیکی زمینه نیز می‌شوند. برای مثال، برخی از آن‌ها روی رسانایی الکتریکی و حرارتی زمینه تاثیر می‌گذارند [۴]. ذرات تقویت کننده گوناگونی در ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی استفاده شده‌اند که هر کدام خواص ویژه را به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی می‌دهد. برای مثال، ذرات اکسید آلومینیوم باعث افزایش استحکام و ذرات کاربرد بور باعث افزایش سختی و جذب نوترون می‌شوند [۵، ۶].

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به وسیله روش‌های گوناگونی تولید می‌شوند که هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان روش‌های حالت جامد مثل متالورژی پودر [۷]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق‌های بکار رفته در فرآیند ARB.

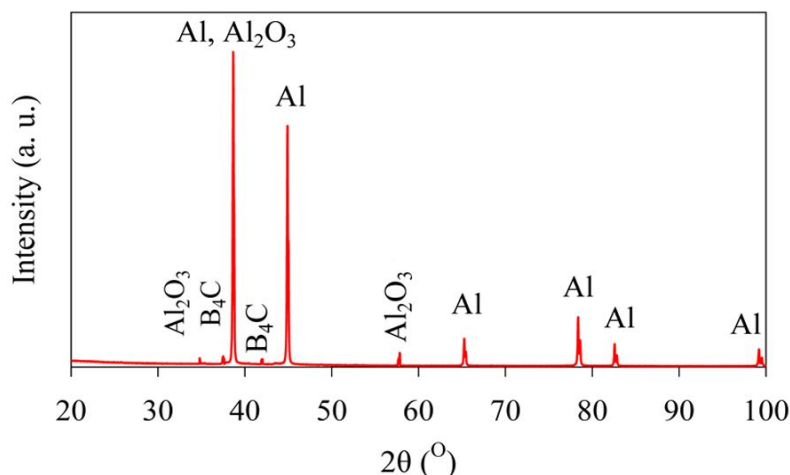
عنصر آلیاژی	عنصر آلیاژی								
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Zr	Ti	Cr	Ni
درصد عناصر	۹۹/۳۴۴	۰/۱	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۴

سیکل تکرار شد (کرنش $7/2$) تا کامپوزیت Al/Al_2O_3 - B_4C تولید شود. بررسی ساختاری کامپوزیت تولید شده به وسیله روش ARB به وسیله یک دستگاه تفرق اشعه X مدل Broker انجام شد. در این دستگاه از اشعه $K\alpha_1$ برای آنالیز فازی استفاده شد. این عملیات در دمای اتاق و با محدوده 2θ بین 20° تا 70° صورت گرفت. در این آنالیز اندازه گام و نرخ اسکن کردن به ترتیب 0.3° و 6 ثانیه بود. ریزساختار این نانوکامپوزیت‌ها به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا (FEI, Tecanai G2 F30) و هم‌چنین، سختی آن‌ها به وسیله یک دستگاه میکروسختی سنج Wolpert Wilson با اعمال نیروی 15 گرم به مدت 15 ثانیه اندازه گیری شد. استحکام این نمونه‌ها در سیکل‌های گوناگون به وسیله دستگاه کشش پس از آماده سازی نمونه‌ها در طول 5 و عرض 1 سانتی‌متر بررسی شد.

نتایج و بحث

بررسی آنالیز فازی و ریز ساختار

شکل ۱ آنالیز XRD کامپوزیت تولید شده به روش اتصال نوردی تجمعی را پس از 9 سیکل نشان می‌دهد.



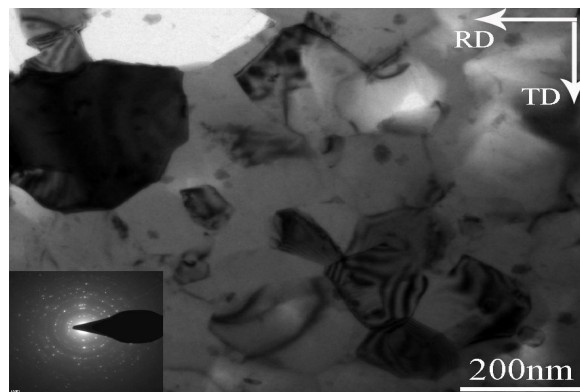
شکل ۱- الگوی پراش پرتو X نمونه کامپوزیت Al/Al_2O_3 - B_4C ساخته شده با کاربرد از فرآیند ARB پس از سیکل نهم. همان گونه که مشاهده می‌شود، فاز اصلی Al و فازهای جزئی دیگر Al_2O_3 و B_4C هستند. مشاهده می‌شود که در حین فرآیند اتصال نوردی تجمعی هیچ گونه ترکیبات بین فلزی تشکیل نشده است. علت این

هم‌چنین، از مخلوط پودر Al_2O_3 و B_4C (هر یک به مقدار مساوی 2 درصد حجمی در میانگین اندازه 50 نانومتر) به عنوان تقویت کننده استفاده شد. ابتدا عملیات چربی زدایی ورق‌ها به وسیله استون انجام شد و سپس سطح آن‌ها به وسیله برس سیمی فولادی به قطر 90 میلی‌متر و با سرعت چرخش 14 متر در ثانیه برسکاری شد. برای تولید کامپوزیت به روش اتصال نوردی تجمعی 4 ورق آلومینیوم در حالی که در بین آن‌ها پودر مخلوط شده Al_2O_3 و B_4C پاشیده شده بود، روی هم قرار داده شد. سپس 2 طرف ورق‌ها با سیم فولادی محکم بسته شد تا در حین عملیات نورد ورق‌ها روی هم نلغزند. این مجموعه با یک کاهش ضخامت 66 درصدی در دمای اتاق نورد شد تا ورق‌ها به وسیله جوش سرد متصل شوند. سپس از طول به 2 قسمت مساوی بریده شد و به مدت 1 ساعت در دمای 623 درجه‌کلوین مورد عملیات آنیل قرار گرفت. در مرحله بعدی ورق‌های نورد و آنیل شده پس از شست و شو در استون و برسکاری بدون هیچ پاشش پودر بین آن‌ها روی هم قرار گرفتند و با یک تغییر ضخامت 50 درصدی نورد شدند. فرآیند نورد، مشابه با سیکل توضیح داده شده در بالا، یعنی با کاهش ضخامت 50 درصدی و بدون انجام هیچ‌گونه آنیل به اندازه 9

استون و برسکاری پیش از هر سیکل تقریباً تمام آلودگی‌ها و لایه اکسیدی از بین می‌روند [۱۳]، اما چون تمایل به اکسید شدن در آلومینیوم در دمای اتاق بالاست، در فاصله بین شست و شو، برسکاری و نورد لایه اکسیدی تشکیل می‌شود. این ذرات اکسیدی در افزایش استحکام تاثیر دارند و به عنوان ذرات تقویت کننده در کامپوزیت رفتار می‌کنند [۱۳].

شکل ۲ تصویر TEM و مدل SAD کامپوزیت $Al/Al_2O_3-B_4C$ ساخته شده با روش ARB را روی صفحه به موازات نورد پس از سیکل ۹ نشان می‌دهد.

اصطکاک بین غلطک نورد و ورق‌ها و اختلاف بین ضریب هدایت حرارت بین زمینه و ذرات دمای کامپوزیت افزایش می‌یابد، اما این افزایش دما بسیار پایین است [۱۳]. درصد فازهای موجود در کامپوزیت تولید شده مقایسه گردید و مشاهده شد که مقدار فاز Al_2O_3 بیش‌تر از مقدار استفاده شده در پیش از فرآیند اتصال نوردی جمع می‌شود. گزارش شده است که مقدار اضافی Al_2O_3 ناشی از اکسید شدن سطحی ورق‌های بکار رفته در طول فرآیند اتصال نوردی جمع می‌شود [۱۳]. همچنین، گزارش شده است که با انجام عملیات شست و شو در



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM و الگوی پراش SAD نمونه $Al/Al_2O_3-B_4C$ پس از سیکل نهم از فرآیند ARB.

مرزهای با زاویه زیاد می‌شوند و در نتیجه، دانه‌های فراریز در کل ساختار توسعه پیدا می‌کنند. ساختار نمونه پس از سیکل ۹ شامل دانه‌های فرا ریز به شکل کیک پهن می‌باشد که اگر از سطح به موازات نورد دیده شود، سطح مقطع این دانه‌ها به صورت تقریباً هم محور است و روی صفحه عرضی دانه‌ها به صورت کشیده شده در جهت نورد مشاهده می‌شوند.

خواص مکانیکی

جدول ۲ تغییرات استحکام کششی کامپوزیت و آلومینیوم خالص تولید شده به روش ARB را بر حسب تعداد سیکل‌های نورد نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود دانه‌های هم محور فرا ریز در زمینه آلومینیوم بوجود آمده است به گونه‌ای که میانگین اندازه دانه‌ها حدود ۱۸۰ نانومتر می‌باشد. تسوجی و همکارانش مکانیزم ریز شدن دانه‌ها در فرآیند ARB را تقسیم شدن دانه‌ها عنوان کردند [۱۱]. در این مکانیزم دانه‌های درشت اولیه به واسطه تغییر فرم پلاستیک اعمالی به چند دانه کوچک‌تر تقسیم می‌شوند به این صورت که در سیکل‌های ابتدایی شمار زیادی نابه‌جایی در ساختار بوجود می‌آید و با افزایش شمار سیکل‌ها دانسیته نابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد و آن‌ها دانه‌های فرعی را بوجود می‌آورند. دانه‌های بوجود آمده در این مرحله دارای مرزهایی با زاویه کم هستند. در مراحل بعدی فرآیند ARB مرزهای زاویه کم تبدیل به

جدول ۲- استحکام کششی آلومینیوم خالص ARB شده و نانو کامپوزیت $Al/Al_2O_3-B_4C$

تعداد سیکل	استحکام کششی	
	آلومینیوم خالص ARB شده (MPa)	$Al/Al_2O_3-B_4C$ (MPa)
۰	۵۰	-
۱	۱۰۲	۱۵۵
۲	۱۱۸	۱۸۳
۳	۱۲۷	۱۹۷
۴	۱۳۶	۲۱۰
۵	۱۴۷	۲۲۹
۶	۱۵۶	۲۴۶
۷	۱۷۱	۲۶۰
۸	۱۷۴	۲۶۵
۹	۱۷۵	۲۶۹

شامل ذرات تقویت کننده با اندازه کم تر از یک میکرون باشند، مکانیزم اوروان یکی از مکانیزم های مهم جهت افزایش استحکام بشمار می آید [۲]. در این مکانیزم، اساس استحکام بخشی به وسیله ذرات، ایجاد یک فضای بسته و جلوگیری از حرکت نابهجایی است که در نهایت، منجر به تولید نابهجایی می شود. در این مکانیزم نابهجایی های موجود در نمونه با اعمال تنش شروع به حرکت می کنند و با فضای بسته سخت ایجاد شده به وسیله ذرات نانو برخورد می کنند و گیر می افتند. با افزایش تنش اعمالی نابهجایی ها به سختی از این فضای بسته عبور می کنند و در اطراف ذرات حلقه های نابهجایی تولید می شود. هرچه فاصله ذرات کم تر باشد، حرکت نابهجایی سخت تر است و تنش زیادتری لازم است تا نابهجایی از فضای بین دو ذره عبور کند. در فرایند ARB با افزایش تعداد سیکل ها ذرات به صورت یکنواخت توزیع می شوند که این توزیع یکنواخت باعث کاهش فاصله ذرات می شود. این توزیع یکنواخت ذرات را می توان در تصویر TEM گرفته شده از کامپوزیت $Al/Al_2O_3-B_4C$ نورد شده پس از ۹ سیکل مشاهده کرد (شکل ۲).

از سوی دیگر، به دلیل نبود تطابق هدایت حرارتی در فصل مشترک ذرات و زمینه در حین فرایند اتصال نوردی تجمعی تنش حرارتی بوجود می آید که این تنش حرارتی

دیده می شود که با افزایش تعداد سیکل ها استحکام کششی هر دو کامپوزیت و آلومینیوم خالص افزایش می یابد و استحکام کششی نمونه کامپوزیتی و آلومینیوم خالص پس از ۹ سیکل ۲۶۹ و ۱۶۵ مگاپاسکال می باشد. افزایش استحکام در فرایند ARB بر اساس دو مکانیزم است: (۱) کارسختی به وسیله نابهجایی: در سیکل های اولیه ARB علت افزایش استحکام، کار سختی می باشد. به بیان دیگر، کارسختی یا افزایش استحکام به وسیله نابهجایی ها نقش اصلی را در استحکام دهی بازی می کند و دانه های فرعی در حد میکرون تولید شده و باعث استحکام دهی می شوند. (۲) ریز شدن دانه: با افزایش تعداد سیکل های ARB نقش کار سختی در استحکام دهی کم شده و ریز شدن دانه ها بر اساس مکانیزم حال- پیچ باعث افزایش استحکام می شود. در واقع، با افزایش سیکل های ARB مرزدانه های با زاویه کم به مرزهای با زاویه زیاد تبدیل می شوند و یک ساختار ریز دانه بوجود می آید.

در کامپوزیت ساخته شده به روش ARB افزون بر مکانیزم های استحکام دهی که در بالا توضیح داده شد، مکانیزم های دیگری نیز فعال می شوند، از جمله این مکانیزم ها مکانیزم اوروان^۱ می باشد. در کامپوزیت هایی که

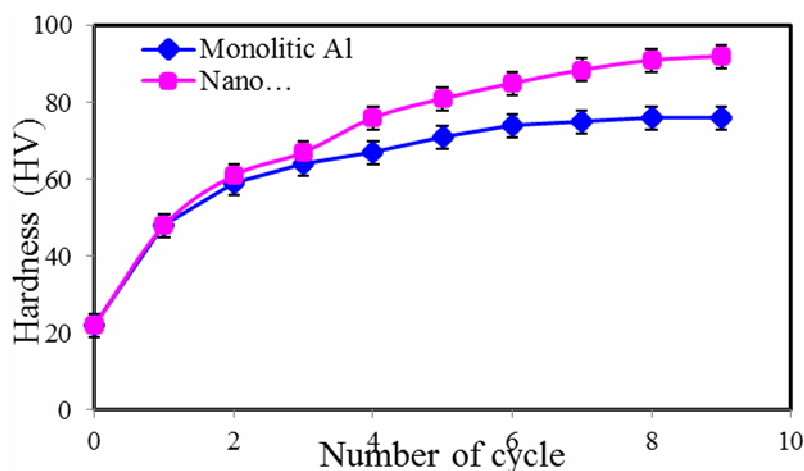
^۱ - Oroman Mechanism

توزیع یکنواخت ذرات در زمینه باعث افزایش برخی از خواص از جمله خواص مکانیکی می شود. گزارش شده که در صورت توزیع نا یکنواخت ذرات در زمینه افزون بر این که خواص مکانیکی را افزایش نمی دهد، حتی در مواردی آن ها را کاهش می دهد [۱۵].

تغییرات میکرو سختی کامپوزیت $Al/Al_2O_3-B_4C$ و آلومینیوم خالص ساخته شده با فرآیند اتصال نوردی تجمعی بر حسب تعداد سیکل های نورد در شکل ۳ نشان داده شده است.

باعث افزایش چگالی نابه جایی در اطرف ذرات شده [۱۴] و باعث افزایش استحکام در کامپوزیت می شود.

اختلاف قابل توجهی که بین استحکام کامپوزیت و Al خالص ARB شده وجود دارد و در جدول ۲ قابل مشاهده است ناشی از وجود ذرات تقویت کننده در کامپوزیت و فعال کردن مکانیزم های استحکام دهی در آن است. توجه به این نکته ضروری است که یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر خواص کامپوزیت ها چگونگی توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه می باشد.



شکل ۳- تغییرات میکروسختی کامپوزیت $Al/Al_2O_3-B_4C$ و Al خالص ARB شده بر حسب تعداد سیکل فرآیند ARB

سختی می شوند. عامل دیگری که باعث افزایش سختی می شود، حضور لایه اکسیدی تشکیل شده پیش از فرآیند ARB و شکست آن در حین فرآیند و معرفی ذرات اکسید آلومینیوم به داخل زمینه آلومینیوم است [۱۶ و ۱۳]. این ذرات نابه جایی ها را افزایش داده و باعث کاهش اندازه دانه می شوند و دیده شده است که سختی بوجود آمده در آلومینیوم ARB شده از روش های دیگر که مقدار کرنش مساوی به قطعه اعمال می کند، بیش تر است که این موضوع به حضور ذرات اکسید آلومینیوم نسبت داده شده است. نکته قابل توجه در این شکل تشابه روند افزایش سختی در هر دو نمونه کامپوزیتی و آلومینیوم خالص می باشد. همان گونه که مشاهده می شود سرعت افزایش سختی در سیکل های اولیه در هر دو نمونه نسبت به سیکل های پایانی زیادتر است که این مختص فرآیند ARB است و به وسیله پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است. علت این افزایش زیاد در سیکل نخست کارسختی

هم چنین، سختی آلومینیوم آنیل شده نیز از این شکل قابل مشاهده است. همان گونه که دیده می شود $Al/Al_2O_3-B_4C$ و Al خالص ساخته شده به روش فرآیند اتصال نوردی تجمعی در سیکل های اولیه تا سیکل دوم تقریباً کم است، ولی با افزایش تعداد سیکل ها این اختلاف افزایش می یابد. این اختلاف ناشی از آن است که سختی از سطح نمونه گرفته شده است و از آن جایی که در سیکل های اولیه ذرات تقویت کننده هنوز در زمینه به گونه کامل پخش نشده اند، ذرات بر عدد سختی تاثیر ندارند، ولی در سیکل های بعدی ذرات پخش شده باعث افزایش سختی کامپوزیت می شوند. پس از ۹ سیکل سختی کامپوزیت و Al خالص نورد شده به ترتیب ۹۲ و ۷۶ ویکرز است. در حین فرآیند اتصال نوردی تجمعی وجود ناسازگاری کرنش در فصل مشترک آلومینیوم-ذرات تقویت کننده باعث ایجاد نابه جایی در آن فصل مشترک می شود که این نابه جایی ها باعث افزایش استحکام و

- ۱- هیچ اثری از فازهای بین فلزی در کامپوزیت تولید شده پس از ۹ سیکل دیده نشد.
- ۲- ریز ساختار کامپوزیت تولید شده شامل زمینه با اندازه دانه های فرا ریز و ذرات تقویت کننده نانو بود.
- ۳- استحکام کامپوزیت تقویت شده پس از ۹ سیکل نورد ۲۶۹ مگاپاسگال بدست آمد که ۱/۵ برابر استحکام Al خالص نورد شده پس از ۹ سیکل بود.
- ۴- با افزایش تعداد سیکل های نورد سختی هر دو نمونه کامپوزیتی و آلومینیوم خالص ARB شده افزایش یافت.
- ۵- سختی نمونه کامپوزیتی از آلومینیوم خالص ARB شده بیش تر بود به گونه ای که در سیکل نهایی سختی کامپوزیت ۱/۳ برابر آلومینیوم خالص ARB شده بود.

References

- 1- M. R. Rezaei, M. R. Toroghinejad, and F. Ashrafizadeh, "Effects of ARB and Ageing Processes on Mechanical Properties and Microstructure of 6061 Aluminum Alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 1184-1190, 2011.
- 2- C. W. Schmidt, C. Knieke, V. Maier, H. W. Höppel, W. Peukert, and M. Goken, "Accelerated Grain Refinement During Accumulative Roll Bonding by Nanoparticle Reinforcement," *Scripta Materialia*, Vol. 64, pp. 245-248, 2011.
- 3- Y.-y. Peng, Z.-m. Yin, B. Nie, and L. Zhong, "Effect of Minor Sc and Zr on Superplasticity of Al-Mg-Mn Alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 17, pp. 744-750, 2007.
- 4- C. Liu, Q. Wang, Y. Jia, B. Zhang, R. Jing, and M. Ma, "Effect of W Particles on the Properties of Accumulatively Roll-Bonded Al/W Composites," *Materials Science and Engineering: A*, 2012.
- 5- R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, and A. Najafizadeh, "Application of Anodizing and CAR Processes for Manufacturing Al/Al₂O₃ Composite," *Materials Science*

شدید ناشی از ایجاد دانسیته زیاد نابه جایی ها می باشد. در ادامه، در سیکل های میانی شدت افزایش سختی کم می شود و در سیکل های نهایی به یک حالت تقریباً ثابت می رسد که دلیل آن به ترتیب کاهش کار سختی و کاهش دانسیته نابه جایی ها به علت واکنش آن ها با هم در اثر بازیابی دینامیکی می باشد [۱۶].

نتیجه گیری

کامپوزیت زمینه آلومینیومی با ذرات تقویت کننده Al₂O₃ و B₄C با کاربرد فرآیند اتصال جمعی نوردی با موفقیت تولید شد و ساختار و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

- and Engineering: A, Vol. 527, pp. 3857-3863, 2010.
- 6- M. Alizadeh, "Processing of Al/B₄C Composites by Cross-Roll Accumulative Roll Bonding," *Materials Letters*, Vol. 64, pp. 2641-2643, 2010.
- 7- T. Srivatsan, I. Ibrahim, F. Mohamed, and E. Lavernia, "Processing techniques for Particulate-Reinforced Metal Aluminium Matrix Composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 5965-5978, 1991.
- 8- H. S. Lee, J. S. Yeo, S. H. Hong, D. J. Yoon, and K. H. Na, "The Fabrication Process and Mechanical Properties of SiC_p/Al-Si Metal Matrix Composites for Automobile Air-Conditioner Compressor Pistons," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 202-208, 2001.
- 9- G. Ganesan, K. Raghukandan, R. Karthikeyan, and B. Pai, "Development of Processing Maps for 6061 Al/15% SiC_p Composite Material," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 369, pp. 230-235, 2004.
- 10- N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, and S. Tanigawa, "Ultra-fine Grained Bulk Steel Produced by Accumulative Roll-

Bonding (ARB) Process," Scripta Materialia, Vol. 40, pp. 795-800, 1999.

11- Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, "Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials—Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process ",Acta Materialia, Vol. 47, pp. 579-583, 1999.

12- Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, and R. G. Hong, "Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process," Scripta Materialia, Vol. 39, pp. 1221-1227, 1998.

13- R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, J. Dutkiewicz, and J. A. Szpunar, "Investigation of Nanostructured Al/Al_2O_3 Composite Produced by Accumulative Roll Bonding Process," Materials & Design, Vol. 35, pp. 37-42, 2012.

14- Z. Zhang and D. Chen, "Consideration of Orowan Strengthening Effect in Particulate-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A Model for Predicting Their Yield Strength," Scripta Materialia, Vol. 54, pp. 1321-1326, 2006.

15- Z. Zhang and D. Chen, "Contribution of Orowan Strengthening Effect in Particulate-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites," Materials Science and Engineering: A, Vol. 483, pp. 148-152, 2008.

16- M. Alizadeh, M. H. Paydar, and F. Sharifian Jazi, "Structural Evaluation and Mechanical Properties of Nanostructured Al/B_4C Composite Fabricated by ARB Process," Composites Part B: Engineering, Vol. 44, pp. 339-343, 2013.