

بررسی تأثیر دما و زمان بار ریزی بر خواص و ریزساختار نانو کامپوزیت A1-B₄C به روش ریخته‌گری گردابی

مقداد خادمیان^۱، مینا سعیدی حیدری^{۲*}، علی علیزاده^۳، حمیدرضا بهاروندی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استادیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- دانشیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

*MinaSaedi85@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۰۸، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۱۶)

چکیده

در این مقاله تأثیر دما و زمان بار ریزی بر خواص و ریزساختار نانو کامپوزیت A1-B₄C مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور سه درصد حجمی ذرات B₄C با میانگین اندازه ذرات ۳۰۰nm به مذاب آلیاژ A1-356 افزوده شد. مخلوط حاصل در دماهای ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه در قالب فلزی ریخته‌گری شد. نتایج نشان دهنده افزایش استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به زمینه است. بیشترین میزان استحکام کششی پس از ۱۵ دقیقه اختلاط در دمای ۸۵۰°C و به میزان ۱۷۸MPa حاصل شده که نسبت به فلز زمینه ۷۲ درصد افزایش داشته است. همچنین اثر دما و زمان اختلاط بر نوع شکست نشان دهنده این است که در تمامی قطعات نانو کامپوزیتی نوع شکست به صورت ترد بوده و نرم‌ترین سطح شکست مربوط به نمونه‌های تولید شده در زمان اختلاط ۱۵ دقیقه و دمای ۸۵۰°C می‌باشد که دارای بیشترین میزان استحکام کششی است.

واژه‌های کلیدی:

کاربید بور، کامپوزیت زمینه آلومینیومی، ریخته‌گری گردابی، استحکام کششی.

۱- مقدمه

جامد و رسوب دهی تقسیم می‌شوند. کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده به وسیله ذرات را می‌توان به سادگی از طریق یکی از روش‌های حالت مایع که ریخته‌گری گردابی می‌باشد تهیه نمود [۱].

ریخته‌گری گردابی عموماً به عنوان روش شناخته شده‌ای مطرح است که امروزه به صورت اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خواص کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به عوامل متعددی نظیر روش تولید، نوع زمینه و نوع فاز تقویت کننده بستگی دارد. در این بین روش تولید اهمیت ویژه‌ای دارد، به این علت که توزیع فاز سرامیکی در زمینه و استحکام فصل مشترک سرامیک-زمینه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به سه دسته فرایندهای حالت مایع (مذاب)، حالت

قرار گرفته‌اند. در میان این تقویت کننده‌ها، B_4C خواص بهتری دارد. این ماده سومین ماده سخت بعد از الماس و نیتريد بور مکعبی است. علاوه بر این دانسیته آن بسیار نزدیک به دانسیته آلیاژ آلومینیوم زمینه است (2.52 g/cm^3). به علت سختی بالا انتخاب مناسبی برای پوشش‌های مقاوم به ضربه می‌باشد. نقطه ذوب کاربرد بور ۲۴۴۵ درجه سانتی‌گراد است که برای بهبود خواص حرارتی کامپوزیت سودمند است [۱۱].

کامپوزیت‌های $A356-B_4C$ موادی سبک هستند که سختی و سفتی بالای کاربرد بور و انعطاف پذیری آلومینیوم را دارند. B_4C به شدت با آلومینیوم واکنش داده و انواع ترکیب‌های دوتایی و سه تایی مانند Al_3BC ، $AlB_{24}C_4$ ، AlB_2 ، $AlB_{12}C_2$ ، $AlB_{48}C_2$ ، Al_4C_3 و $\alpha-AlB_{12}$ را تشکیل می‌دهد [۱۲].

کامپوزیت‌های $A356-B_4C$ کاربردهای بسیاری دارند که برای مثال می‌توان به جاذب نوترون در صنایع هسته‌ای، زره پوش‌های نظامی، وسایل حمل و نقل زمینی، دریایی و هوایی، زیر لایه در ساخت دیسک‌های سخت کامپیوتر و ... اشاره کرد [۱۳].

در مورد کامپوزیت‌های $A356-B_4C$ ، کفیل زاده و همکارانش [۱۴] نشان داده‌اند که اکسیداسیون ذرات تقویت کننده کاربرد بور منجر به افزایش ترشوندگی و استحکام این کامپوزیت‌ها می‌شود. باقری جبلی و همکارانش [۱۵] نیز تأثیر پوشش TiO_2 را بر قابلیت ترشوندگی کاربرد بور بررسی کرده‌اند و گزارش کرده‌اند که این پوشش در صورت افزایش دمای ریخته‌گری منجر به افزایش قابلیت ترشوندگی ذرات کاربرد بور در زمینه $A356$ خواهد شد. شعبانی و همکارش [۱۶] نیز رفتار سایش این کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. با این حال بر اساس مطالعات نویسندگان، تاکنون تأثیر روش ریخته‌گری گردابی در افزودن کاربرد بور در دماها و زمان‌های مختلف بار ریزی بر خواص $A356$ مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین علت در این مقاله پس از تعیین مقادیر بهینه درصد حجمی ذرات، زمان هم‌زدن، تعداد دور همزن، شکل و زاویه همزن و دیگر پارامترهای موثر سعی شده است تا تأثیر دما و زمان بار ریزی بر خواص و ریزساختار نانو کامپوزیت‌های $A356-B_4C$ مورد بررسی قرار گیرد.

مزیت این روش سهولت، قیمت ارزان، انعطاف پذیری و قابلیت بکارگیری آن برای تولیدات انبوه می‌باشد. همچنین دلیل دیگر این است که در عمل، فلزات معمولی را نیز به این روش می‌توان مورد استفاده قرار داد و در نتیجه قیمت نهایی محصول را کاهش داد. این روش مقرون به صرفه‌ترین روش موجود برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است و امکان ساخت قطعات بسیار بزرگ را نیز می‌دهد [۲]. هزینه تولید این کامپوزیت‌ها با روش ریخته‌گری حدود یک سوم تا نصف روش‌های دیگر است و همچنین برای تولید انبوه، این هزینه تا یک دهم کاهش می‌یابد [۳]. جدول ۱ مقایسه‌ای را بین دو روش حالت جامد و مذاب برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی با تقویت کننده‌های ناپیوسته نشان می‌دهد [۲].

جدول (۱): مقایسه دو روش حالت جامد و مذاب برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی با تقویت کننده‌های ناپیوسته [۲].

قیمت	آسیب ذرات تقویت کننده	محدوده شکل و اندازه	روش تولید
ارزان	بدون آسیب	محدوده وسیعی از اشکال، ابعاد بزرگ‌تر تا ۵۰kg	ریخته‌گری گردابی
گران	شکست ذرات	محدوده وسیعی از اشکال، ابعاد محدود	متالورژی پودر

نقش اساسی تقویت کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، تحمل قسمت بیشتر بار اعمالی در محل اتصال زمینه و تقویت کننده است تا جایی که بارهای خارجی به ذرات تقویت کننده انتقال داده شده و میان آن‌ها توزیع شوند [۴]. ترشوندگی خوب، شرط اساسی برای ایجاد پیوند مناسب بین ذرات و زمینه آلومینیومی در حین ریخته‌گری کامپوزیت می‌باشد تا انتقال و توزیع بار از زمینه به ذرات بدون هیچ گونه شکستی صورت گیرد. پیوندهای محکم در فصل مشترک برای ترشوندگی خوب لازم است که این پیوندها به وسیله انحلال متقابل یا واکنش ذرات و زمینه فلزی به وجود می‌آیند [۵]. تاکنون تقویت کننده‌های بسیاری مانند Al_2O_3 [۶]، SiC [۷]، AlN [۸]، TiB_2 [۹]، گرافیت [۱۰] و ... مورد بررسی

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور افزایش میزان ترشوندگی ذرات سرامیکی به وسیله مذاب آلومینیوم، ذرات کاربید بور به وسیله پودر آلومینیوم خالص با اندازه دانه متوسط $100\ \mu\text{m}$ و نسبت وزنی پودر آلومینیوم به پودر کاربید بور ۲، آسیاب مکانیکی شدند. محیط آسیاب اتانول و میزان دور آسیاب $300\ \text{rpm}$ در مدت زمان ۲۰ دقیقه بود.

پس از این مرحله ۳ درصد حجمی از پودر B_4C (با در نظر گرفتن مقدار آلومینیوم روکش داده شده بر پودر) در فویل بسیار نازک آلومینیومی قرار گرفته و به آرامی در دماهای ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی گراد به مذاب اضافه شد و در زمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه هم زدن مذاب صورت گرفت. فاصله همزن گرافیتی تا کف بوته، $1/3$ ارتفاع کل بوته در نظر گرفته شد. سرعت همزن در همه مراحل ثابت و برابر با $300\ \text{rpm}$ بود [۱۷]. دقت کنترل دما در کوره $5^\circ\text{C} \pm$ بود.

چگالی نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس و برای ۳ نمونه از هر یک از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. حجم کلی نمونه‌ها (V) با تفریق وزن غوطه‌وری (M) از وزن اشباع (S) و طبق رابطه ۱ به دست آمد و چگالی واقعی (T) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$V=M-S \quad (1)$$

$$T=D/V=D/(M-S) \quad (2)$$

S)

چگالی تئوری نیز با استفاده از چگالی آلایز آلومینیوم A356 و چگالی ذرات کاربید بور که به ترتیب برابر با $2/68\ \text{gr/cm}^3$ و $2/5\ \text{gr/cm}^3$ بود محاسبه شد. درصد تخلخل در نمونه‌ها بر اساس اختلاف بین چگالی تئوری و واقعی به دست آمد.

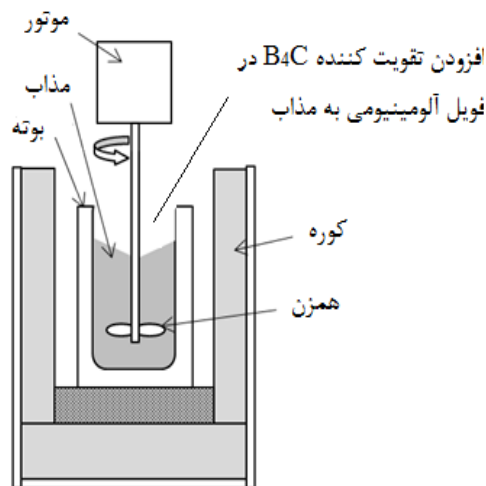
برای تعیین استحکام کششی قطعات کامپوزیتی، سه نمونه بر اساس استاندارد ASTM-E8 [۷] بار ریزی شدند. این آزمایش با استفاده از دستگاه آزمایش کشش ساخت شرکت زویک آلمان با حداکثر خطای اندازه گیری استحکام کششی معادل ۰/۰۵ انجام شد که این میزان خطا اثر چندانی در نتایج نخواهد داشت. در

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش، آلایز A356 و پودر کاربید بور با میانگین اندازه ذرات $300\ \text{nm}$ می‌باشد. ترکیب شمش آلایز A356 در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی آلایز A356

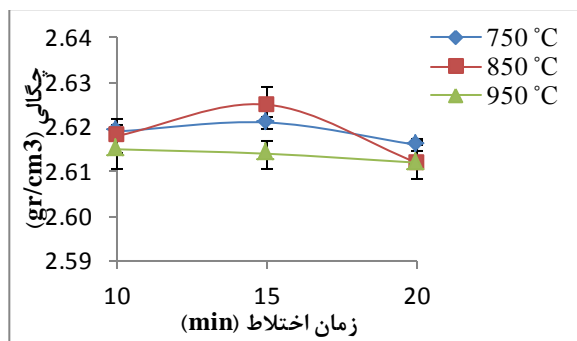
عنصر	درصد وزنی
Al	۹۱/۷۷
Si	۷
Fe	۰/۲۰
Cu	۰/۲۰
Mg	۰/۳۸
Mn	۰/۱۰
Zn	۰/۱۰
Ti	۰/۲۰
Ni	۰/۰۵

سیستم ریخته‌گری از سه بخش اصلی کوره، همزن و قالب تشکیل شده است. شماتیک فرایند ریخته‌گری گردابی در شکل ۱ نشان داده شده است. پروانه همزن از جنس گرافیتی با زاویه پره‌های 45° ساخته شده است. قالب ریخته‌گری فولادی نیز به شکل مکعب مستطیل و برای تهیه چهار نمونه استوانه‌ای به ابعاد $15\ \text{cm}$ و قطر $3\ \text{cm}$ در هر ذوب‌ریزی طراحی شده است.



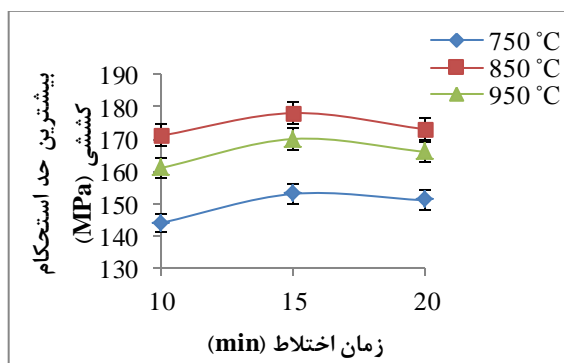
شکل (۱): شماتیک فرایند ریخته‌گری گردابی

با افزایش دمای ساخت کامپوزیت، سیالیت مذاب افزایش یافته و بنابراین امکان محبوس شدن هوا در حین انجماد کاهش می‌یابد و پس از دمای 850°C حلالیت و مکش هوا و تمایل به انحلال هوا در مذاب افزایش می‌یابد. ضمناً همان‌طور که افزایش زمان اختلاط باعث افزایش ترشوندگی ذرات به وسیله مذاب می‌شود، هم‌زدن بیش از ۱۵ دقیقه نیز باعث بلع و انحلال بیشتر هوا و در نتیجه ایجاد تخلخل بیشتر می‌شود [۲].



شکل (۳): اثر دما و زمان اختلاط بر مقدار چگالی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده بوسیله ریخته‌گری گردابی

در شکل ۴ اثر دما و زمان اختلاط بر بیشترین حد استحکام کششی نمونه‌ها بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین استحکام کششی مربوط به اختلاط در دمای 850°C در مدت زمان اختلاط ۱۵ دقیقه است که بیانگر افزایش ۷۲ درصدی در بیشینه استحکام کششی قطعه کامپوزیتی نسبت به زمینه آلیاژ A356 می‌باشد.



شکل (۴): اثر دما و زمان اختلاط بر بیشترین حد استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی در دماها و زمان‌های متفاوت اختلاط

شکل ۲ تصویر سه نمونه که برای آزمایش کشش آماده شده‌اند نشان داده شده است.



شکل (۲): قطعات آماده شده جهت انجام آزمایش استحکام کششی

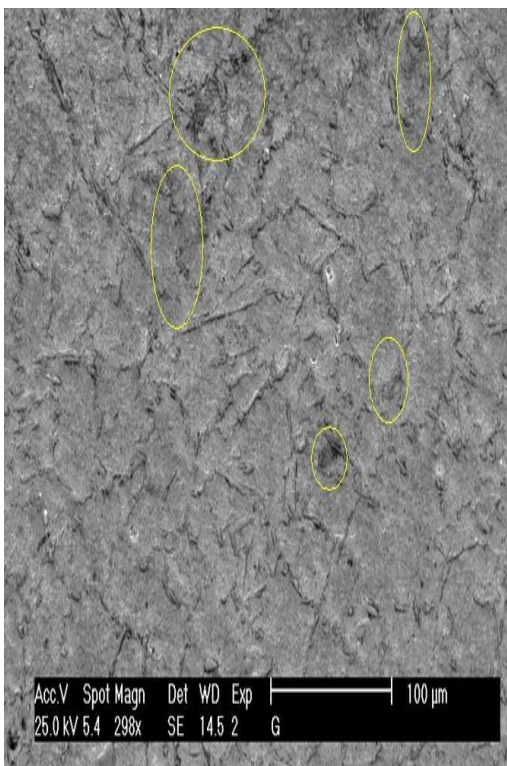
برای آماده سازی نمونه‌ها پس از سمباده‌زنی و پولیش قطعات، عملیات اچ کردن به وسیله محلول ۵ درصد حجمی اسید Hf انجام شد. تصاویر سطوح شکست قطعات با انتخاب نمونه‌ای با ارتفاع حدود ۱۰mm پس از آزمایش کشش و به وسیله دستگاه SEM ساخت شرکت فیلیپس هلند مدل XL30 مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

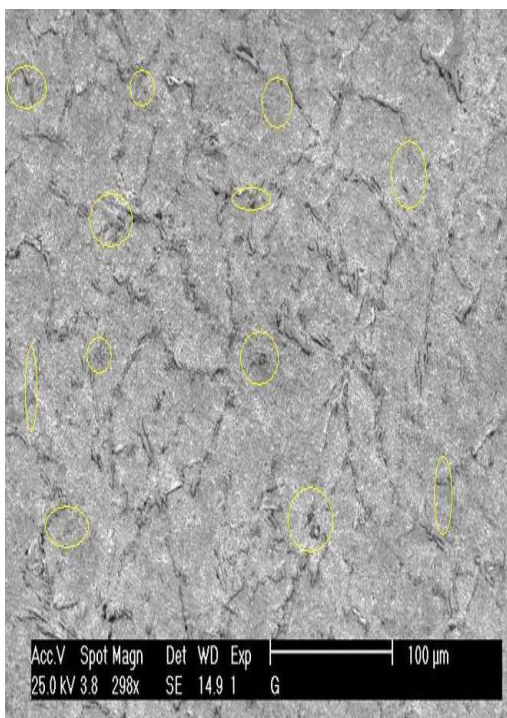
در این بخش ابتدا به بررسی خواص فیزیکی مانند میزان چگالی و تخلخل و خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی و سختی پرداخته شده و در ادامه سطوح شکست نانوکامپوزیت حاصل مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی

در شکل ۳، چگالی قطعات ریخته‌گری شده در دماها و زمان‌های مختلف اختلاط آورده شده است. میزان تخلخل در قطعات آلومینیومی بدون ذرات تقویت کننده کاربرد بور برابر با ۱/۱۴ درصد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی مربوط به نمونه‌های نانوکامپوزیتی در دماها و زمان‌های مختلف بار ریزی در محدوده $2.61-2.63\text{ gr/cm}^3$ می‌باشد که به چگالی تئوری نانوکامپوزیت که با استفاده از قانون مخلوط‌ها محاسبه شده است، بسیار نزدیک است (2.68 gr/cm^3). در نمونه ریخته‌گری شده در دمای 850°C به مدت ۱۵ دقیقه، ۲/۰۵ درصد تخلخل وجود دارد.



(الف)



(ب)

شکل (۵): تصویر ریزساختاری نمونه ریخته گری شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد، (الف): پس از اختلاط به مدت ۱۰ دقیقه و (ب): پس از اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه

افزایش استحکام در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای اساساً به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله می‌توان به نحوه توزیع ذرات ثانویه، افزایش چگالی نابجایی‌ها به دلیل عدم تطابق مدول یانگ و ضرایب انبساط حرارتی ذره و زمینه، نحوه انتقال بار از زمینه به ذره، بازیابی دانه‌ها و مکانیزم‌های استحکام‌دهی هال-پیچ و اوروان اشاره کرد [۱۸].

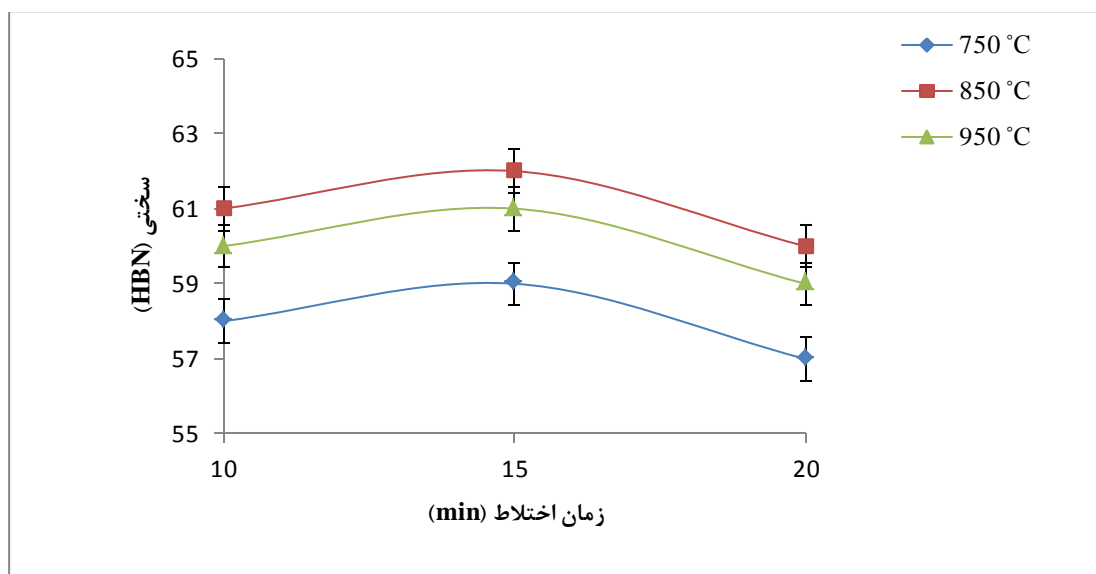
در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان اختلاط ذرات کاربرد بور و مذاب آلومینیوم از ۱۰ به ۱۵ دقیقه، میزان ترشوندگی ذرات افزایش یافته و پخش بهتر و یکنواخت‌تر ذرات (شکل ۵-ب) منجر به کاهش آگلومراسیون و افزایش خواص مکانیکی قطعه شده است. با این حال افزایش زمان اختلاط از ۱۵ دقیقه به ۲۰ دقیقه باعث افزایش حل شدن هوا در مذاب و اکسیداسیون بیشتر و نیز شکسته شدن پوسته‌های اکسیدی محافظ سطح مذاب می‌شود که این عوامل منجر به کاهش خواص کامپوزیت می‌شود [۱۹].

با افزایش دما از ۷۵۰ به ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، سیالیت مذاب افزایش یافته و امکان محبوس شدن هوا در حین انجماد کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش میزان تخلخل قطعه تولیدی و در نتیجه افزایش استحکام و سختی می‌شود. با این حال افزایش دما از ۸۵۰ به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش خواص مکانیکی قطعات شده است که همان‌طور که ذکر شد به علت حلالیت و مکش بیشتر هوا و افزایش تمایل اکسیداسیون آلومینیوم مذاب و ایجاد واکنش‌های مخرب بر اثر افزایش دما می‌باشد. هم‌زدن مذاب در دمای بالاتر منجر به تمایل مذاب به بلع و انحلال و واکنش با هوا می‌شود که این امر باعث افزایش میزان تخلخل در قطعات کامپوزیتی می‌شود [۲].

همچنین بر اساس قانون استوک، افزایش دما و به تبع آن افزایش سیالیت مذاب سبب افزایش سرعت فرار ذرات شده و در نتیجه ذرات بیشتری به صورت سرباره از مخلوط مذاب خارج خواهند شد [۱۹].

می‌باشد. سختی این قطعه برابر با ۶۲ HBN ارزیابی شد که نسبت به سختی زمینه آلیاژ A356 که برابر با ۵۶ HBN می‌باشد ارتقاء قابل قبولی یافته است. علت این افزایش این است که ذرات کاربید بور تقویت کننده باعث کاهش فاصله لغزش حرکت نابجایی‌ها و در نتیجه افزایش کارسختی می‌شوند. همچنین ذرات کاربید بور از حرکت مرزهای دانه نیز جلوگیری می‌کنند.

اثر دما و زمان اختلاط بر سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به اینکه سختی کاربید بور خیلی بیشتر از سختی آلومینیوم است، افزایش سختی کامپوزیت با افزودن کاربید بور دور از انتظار نیست. این مورد با توجه به قانون مخلوط‌ها نیز به راحتی قابل تحلیل است. بیشترین سختی مربوط به نمونه حاصل از اختلاط مذاب به میزان ۱۵ دقیقه در دمای بار ریزی 850°C است.



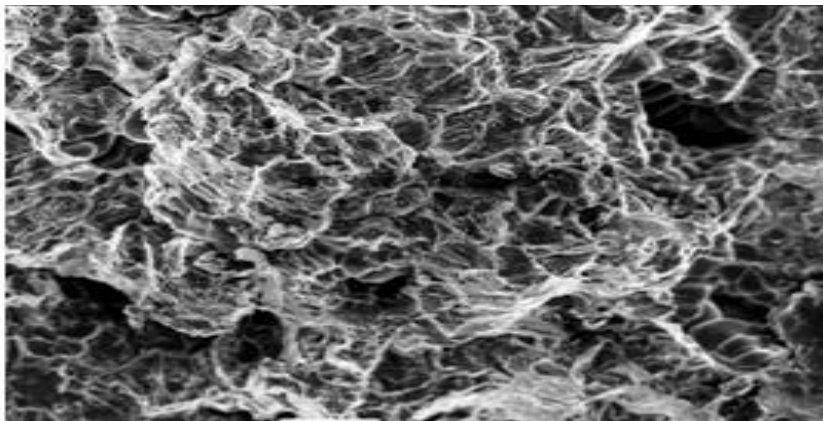
شکل (۶): اثر دما و زمان اختلاط بر سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی

شکست نمونه‌ها مشاهده شد که سطوح شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی مختلف تفاوت چندانی نداشتند. در شکل ۷ تصویر توپوگرافی شکست نمونه شاهد (آلیاژ A356 بدون ذرات تقویت کننده) و نمونه ریخته‌گری شده در دمای 850°C درجه سانتی‌گراد پس از اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه در دو بزرگنمایی متفاوت آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح شکست نمونه شاهد به علت وجود دیمپل‌های بسیار به صورت کاملاً نرم است. در نمونه ریخته‌گری شده در دمای 850°C درجه سانتی‌گراد پس از اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه به علت وجود ذرات تقویت کننده که به عنوان مراکز جوانه زنی برای حباب‌های گازی عمل کرده و درصد این حباب‌ها را افزایش می‌دهند [۲۱]، سطح شکست در

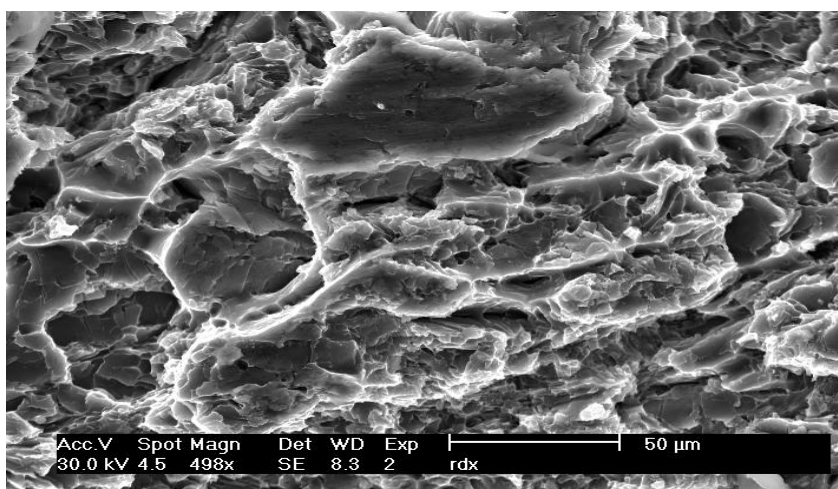
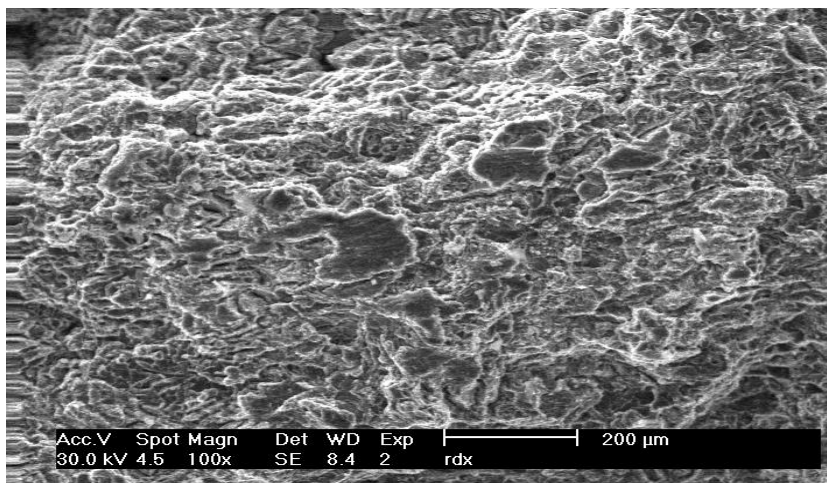
۳-۲- بررسی سطوح شکست نانوکامپوزیت‌ها

در تصاویر سطوح شکست، نواحی مربوط به شکست نرم زمینه به صورت حفره (دیمپل) مشخص می‌شود، بنابراین هرچه اندازه حفرات بزرگ‌تر و عمق آن‌ها بیشتر باشد، داکتیلیته نمونه بیشتر بوده و شکست به صورت نرم اتفاق می‌افتد. اما در شکست ترد، شکست به صورت ناگهانی و عدم وجود پدیده گلویی شدن رخ می‌دهد و سطح شکست نسبتاً صاف و داری تورق است که معمولاً در این نوع شکست، ترک از محل تخلخل‌ها و یا ذرات آگلومره شده رشد می‌کند. چراکه این مناطق به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و بنابراین تنش کششی اعمال شده در حین آزمون کشش در آن‌ها متمرکز می‌شود [۲۰]. در بررسی سطوح

عین نرم بودن مقداری تردتر از آلیاژ A356 است. در سطح مشاهده می‌شود و در حالت کلی می‌توان گفت که نوع شکست شکست این نمونه علاوه بر دیمپل، مقدار کمی صفحه تورق هم در این قطعه به صورت نرم است.



(الف)



(ب)

شکل (۷): تصویر توپوگرافی شکست: (الف): نمونه شاهد و (ب): نمونه ریخته‌گری شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد پس از اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه در دو بزرگنمایی متفاوت

Vol. 205, No. 1, pp. 111-118, 2008.

۴- نتیجه گیری

- [7] Mazahery & M. Ostad Shabani. "Nano-sized silicon carbide reinforced commercial casting aluminum alloy matrix: experimental and novel modeling evaluation", Powder Technology, Vol. 217, pp. 558-565, 2012.
- [8] H. Abdoli, H. Asgharzadeh & E. Salahi, "Sintering behavior of Al-AlN-nanostructured composite powder synthesized by high-energy ball milling", Alloys and Compounds, Vol. 473, No. 1, pp. 116-122, 2009.
- [9] Z. Sadeghian, M. H. Enayati, & P. Beiss, "In situ production of Al-TiB₂ nanocomposite by double-step mechanical alloying", materials science, Vol. 44, No. 10, pp. 2566-2572, 2009.
- [10] H. T. Son, T. S. Kim, C. Suryanarayana & B. S. Chun, "Homogeneous dispersion of graphite in a 6061 aluminum alloy by ball milling", Materials Science and Engineering, Vol. 348A, No. 1, pp. 163-169, 2003.

روش ریخته‌گری گردابی یا ورتکس، روشی موفقیت‌آمیز در تولید کامپوزیت‌های Al-B₄C جهت افزایش استحکام زمینه آلومینیومی است. بیشترین خواص که شامل بیشترین استحکام کششی و کمترین میزان تخلخل باشد در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۱۵ دقیقه حاصل شد. همچنین بیشینه استحکام کششی این نمونه نسبت به نمونه خالص آلومینیوم به میزان ۷۲ درصد افزایش یافته است. نوع شکست مشاهده شده در همه نمونه‌های نانوکامپوزیتی از نوع ترد است و نرم‌ترین سطح شکست مربوط به نمونه تولید شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۱۵ دقیقه می‌باشد.

۵- مراجع

[۱۱] م. سعیدی حیدری و ح. ر. بهاروندی، "مروری بر تأثیر افزودنی‌های مختلف بر سینتر فاز مایع کامپوزیت‌های کاربید بور"، فصلنامه سرامیک ایران، شماره ۳۱، ۶۸-۵۷، پاییز، ۱۳۹۱.

- [12] M. Shabani & A. Mazahery, "Prediction of wear properties in A356 matrix composite reinforced with B₄C particulates", Synthetic Metals, Vol. 161, No. 13, pp. 1226-1231, 2011.
- [13] X. G. Chen & R. Hark, "Development of Al-30% B₄C metal matrix composites for neutron absorber material", The Minerals, Metals, and Materials Society, pp. 3-9, 2008.

[۱۴] آ. کفیل زاده، ح. آشوری، ن. وره‌رام، ف. باقری جبلی و ع. فروغی، "بررسی اثر اکسیداسیون ذرات تقویت کننده بر ترشوندگی و استحکام در ساخت کامپوزیت Al-B₄C به روش ریخته‌گری گردابی"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و جامعه ریخته‌گران ایران، ۱۳۸۷.

[۱۵] ف. باقری جبلی، ح. عبدی زاده، ع. م. هادیان و ح. ر. بهاروندی، "بررسی تأثیر پوشش TiO₂ بر قابلیت ترشوندگی ذرات B₄C به وسیله مذاب آلومینیوم و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های Al-B₄C"، هشتمین کنگره سرامیک ایران، ۱۳۸۶.

- [1] Evans, S.M. Christopher & M. Andreas, "Metal matrix composites in industry: an introduction and a survey", Kluwer Academic Pub, America, 2003.
- [2] J. Hashim & L. Looney, "Metal matrix composites: production by the stir casting method", Material Processing Technology, Vol. 92, pp. 1-7, 1999.
- [3] D. M. Skibo, D. M. Schuster & L. Jolla, "Process for preparation of composite materials containing non-metallic particles in a metallic matrix and composite materials", US Patent No. 4786467A, 1988.
- [4] T. P. D. Rajan, R. M. Pillai & B. C. Pai, "Review: reinforcement coatings and interfaces in aluminum metal matrix composites", Materials Science, Vol. 33, pp. 3491-3503, 1998.
- [5] F. Delannay, L. Froyen & A. Deruyttere, "Review: the wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of metal-matrix composites", Materials Science, Vol. 22, pp. 1-16, 1987.
- [6] Ozdemir, A. Sascha, M. Silke & W. Bernhard, "Nanocrystalline Al-Al₂O₃P and SiC_p composites produced by high-energy ball milling", Materials Processing Technology,

- [16] Shabani, M. Ostad, & A. Mazahery. "Modeling of the wear behavior in A356-B4C composites", materials science, Vol. 46, No. 20, pp. 6700-6708, 2011.
- [17] S. A. Sajjadi, H. R. Ezatpour, & H. Beygi. "Microstructure and mechanical properties of Al-Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting", Materials Science and Engineering, Vol. 528A, pp. 8765-8771, 2011.
- [18] S. A. Sajjadi, H. R. Ezatpour & M. Torabi Parizi, "Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes", Materials and Design, Vol. 34, pp. 106-111, 2012.
- [19] M. Samuel, A. Gotmare & F. H. Samuel, "Effect of solidification rate and metal feedability on porosity and SiC/Al₂O₃ particle distribution in an Al-Si-Mg (359) alloy", Composites Science and Technology, Vol. 53, No. 3, 1995.
- [20] L. Yulong & K. T. Ramesha, "The infiltration of B-SiC in porous Alumina compacts in a microwave field", Materials Science and Engineering, Vol. 33, pp. 5-12, 2004.

[۲۱] ر. امینی، م. اعطائی، م. ت. نجفی و م. رنجبران، "بررسی تجربی مکانیک شکست در مواد مرکب زمینه آلومینیومی حاوی پانزده درصد ذرات کاربید سیلیسیم"، مهندسی مکانیک جامدات، شماره ۲، ۲، زمستان، ۱۳۸۸.