

تأثیر اندازه ذرات تقویت کننده و دمای بارریزی بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه فلزی Al-Al₂O₃ تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی

حمیدرضا بهاروندی^۱، زینب نصیری^{۲*}، مینا سعیدی حیدری^۳ و حسن ماهری^۲

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

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

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

*zeynabnasiri@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۶/۱۳)

چکیده

در این مقاله کامپوزیت زمینه فلزی Al-Al₂O₃ با استفاده از فرآیند ریخته‌گری گردابی تولید گردید. با استفاده از این روش پودر آلومینا با اندازه ذرات ۳۰۰ μm، ۵۰ μm و ۵۰ nm به آلیاژ مذاب A356 اضافه و سپس مخلوط حاصل در دو دمای ۷۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در قالب فلزی ریخته‌گری شد. تأثیر اندازه ذرات تقویت کننده و دمای بارریزی بر سختی، استحکام کششی و ریزساختار کامپوزیت در شش حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. جهت ارزیابی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای بررسی خواص مکانیکی از آزمون کشش و سختی در هر شش حالت استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که افزایش دمای بارریزی تأثیر چندانی بر سختی ندارد اما باعث افت استحکام کششی نمونه‌ها می‌شود. علاوه بر این، کاهش سایز ذرات تقویت کننده در هر دو دما باعث افزایش سختی و استحکام کششی گردید.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت Al-Al₂O₃، آلیاژ A356، آلومینا، زمینه، تقویت کننده

۱- مقدمه

عالی، استحکام خستگی بالا و مقاومت خزشی زیاد از خود نشان می‌دهند. در واقع در این کامپوزیت‌ها زمینه داکتیل آلومینیمی با ذرات آلومینا تقویت می‌شود که ترکیبی از خواص فلزی (داکتیلیتی و تافنس) و خواص سرامیکی (استحکام و مدول بالا) را به وجود می‌آورد [۱-۲]. از بین ذرات سرامیکی، آلومینا به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مثل

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات سرامیکی به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند صنایع نظامی، خودروسازی و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کامپوزیت‌ها خواص ویژه‌ای نظیر: نسبت استحکام به وزن بالا، استحکام و مدول زیاد، ضریب انبساط حرارتی کم، مقاومت به سایش و خوردگی

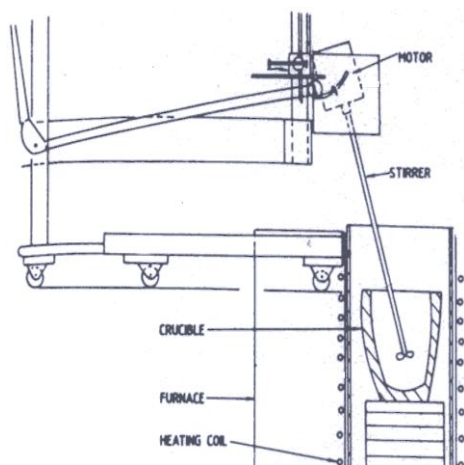
۲- مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی آلیاژ A356 مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ A356

عنصر	درصد وزنی
Al	۹۱/۷۳
Si	۷/۲۳
Fe	۰/۳۲
Cu	۰/۱۸
Mg	۰/۳۸
Mn	۰/۰۲
Zn	۰/۰۵
Ti	۰/۰۱
Ni	۰/۰۵

سیستم ریخته‌گری شامل کوره مقاومتی، همزن گرافیتی و قالب فولادی برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل (۱): تصویر شماتیک فرآیند ریخته‌گری گردابی

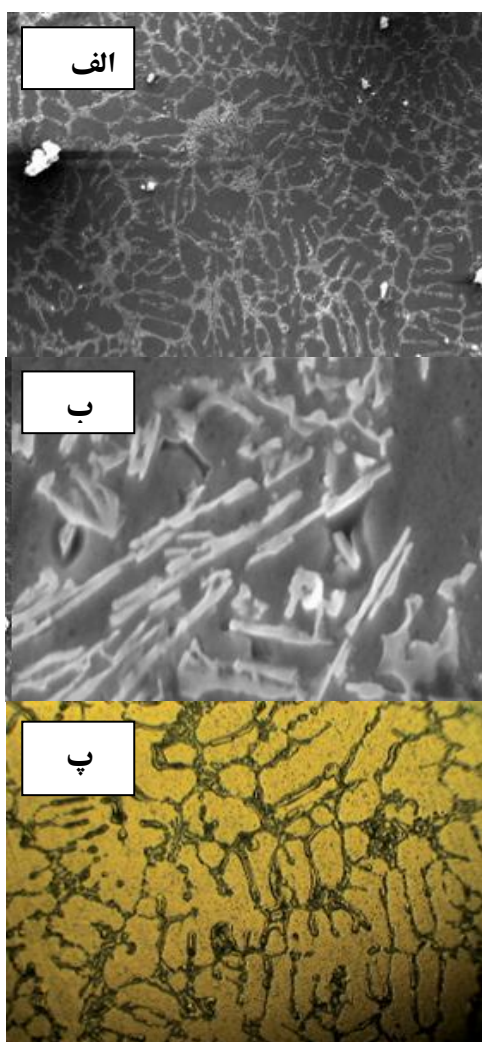
پودر آلومینا نیز با اندازه ذرات $300\ \mu\text{m}$ ، $50\ \mu\text{m}$ و $50\ \text{nm}$ ($0/05\ \mu\text{m}$) به میزان ۲ درصد وزنی برای افزودن به مذاب آلیاژ A356 استفاده شد. فرآیند آماده‌سازی ذرات تقویت‌کننده شامل آسیاب کردن پودر آلومینا به همراه پودر آلومینیوم،

مقاومت سایشی عالی، سختی و مقاومت بالا در برابر خوردگی و پایداری حرارتی زیاد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر ذرات آلومینا در دماهای بالا با زمینه آلومینیومی واکنش نداده و فازهای ترد که منجر به کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شوند تولید نمی‌کند [۳].

سه روش عمده برای ساخت این کامپوزیت‌ها وجود دارد که شامل روش‌های حالت جامد (مانند متالورژی پودر و آلیاژسازی مکانیکی [۳-۷])، روش‌های نیمه‌جامد [۸-۹] و روش‌های حالت مایع (مانند ریخته‌گری گردابی و ریخته‌گری کوبشی [۱۰-۱۲]) می‌باشد.

از بین این روش‌ها، فرآیندهای حالت مایع اقتصادی‌ترین روش برای ساخت این کامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند. فرآیند ریخته‌گری گردابی که یکی از انواع روش‌های حالت مایع است دارای مزایایی مانند اتصال خوب ذره/زمینه، امکان کنترل ریزساختار، سادگی و کم هزینه بودن، انعطاف‌پذیری و قابلیت استفاده برای رنج وسیعی از مواد می‌باشد. با این وجود این روش مشکلاتی نیز دارد، مانند ترشوندگی کم و توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه. روش‌های مختلفی برای افزایش قابلیت ترشوندگی ذرات سرامیکی وجود دارد که یکی از آن‌ها پوشش‌دهی ذرات با یک فلز (معمولاً فلز زمینه) و یا عملیات حرارتی ذرات به منظور حذف گازها و رطوبت از سطح آن‌ها می‌باشد. از طرف دیگر توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده با کاهش سایز ذرات تقویت‌کننده از میکرو به نانو شدیدتر می‌شود. دلیل این مسئله افزایش سطح ذرات و در نتیجه افزایش انرژی سطحی می‌باشد که باعث تشدید تمایل ذرات به آگلومره شدن می‌شود [۱، ۱۳-۱۴]. در این مقاله برای بهبود خاصیت ترشوندگی و توزیع ذرات از یک فرآیند سه مرحله‌ای استفاده شده است. این مراحل عبارتند از: مخلوط کردن ذرات آلومینا و پودر آلومینیوم با استفاده از آسیاب ماهواره‌ای، عملیات حرارتی ذرات و در نهایت ذوب و ریخته‌گری.

انجماد پس زده شده و در مرزدانه‌ها محبوس می‌شوند. بنابراین در ریزساختار هر سه نمونه، ذرات تقویت کننده در مرزدانه‌های زمینه دیده می‌شوند. با توجه به ریزساختار نمونه‌ها می‌توان گفت اگرچه در هر سه حالت توزیع یکنواختی از ذرات سرامیکی در زمینه فلزی مشاهده می‌شود، اما باید توجه داشت که با کاهش اندازه ذرات، پدیده آگلومره شدن نیز تشدید می‌شود، بطوریکه این مسئله در مورد ذرات نانوسایز بسیار شدیدتر رخ می‌دهد.



شکل (۲): ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای 750°C با اندازه ذرات $300\ \mu\text{m}$: (الف) تصویر SEM با بزرگنمایی $200\times$ ، (ب) تصویر SEM با بزرگنمایی $2000\times$ و (پ) تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی $400\times$

اتانول و گلوله‌های کاربید تنگستن (با نسبت گلوله به پودر $1:10$) در آسیاب ماهواره‌ای به مدت یک ساعت و سپس عملیات حرارتی ذرات آلومینا در دمای 250°C به مدت 30 دقیقه (به منظور حذف رطوبت و ناخالصی از سطح ذرات پودر و بهبود خاصیت ترشوندگی) قبل از افزودن ذرات به مذاب انجام شد. سپس نمونه‌های کامپوزیتی در دو سری سه تایی (۶ حالت مختلف) تولید و خواص آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. به عبارت بهتر در مرحله اول، با افزودن پودر آلومینا با سه اندازه $300\ \mu\text{m}$ ، $50\ \mu\text{m}$ و $50\ \text{nm}$ (با $0.5\ \mu\text{m}$) بطور جداگانه به آلیاژ مذاب در دمای 750°C سه نمونه کامپوزیتی تولید و در مرحله دوم همین فرآیند اما در دمای 850°C تکرار شد. لازم به ذکر است که مدت زمان همزدن مذاب کامپوزیتی 12 دقیقه بوده است.

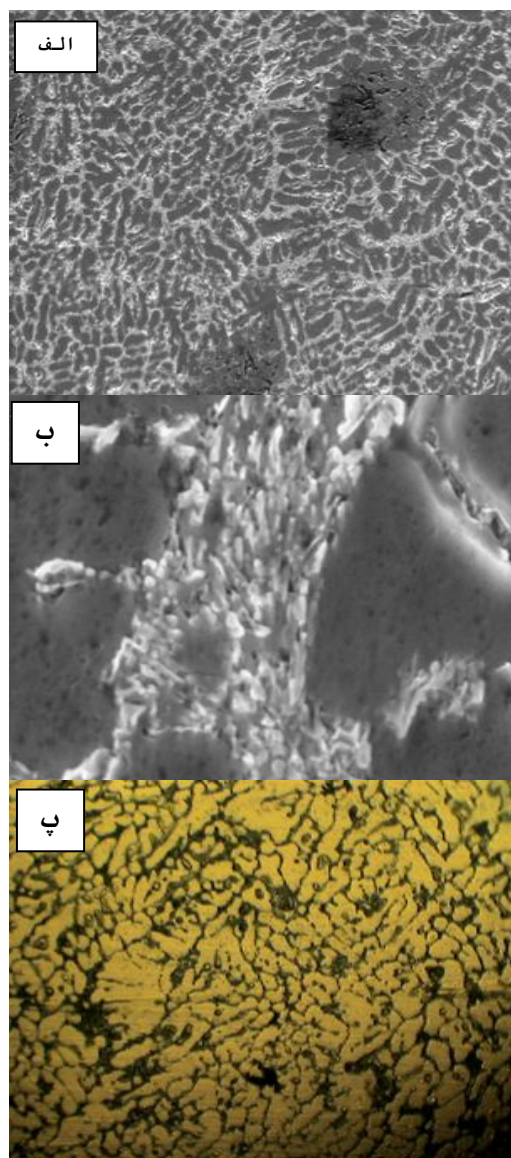
در پایان، در هر ۶ حالت، آزمون کشش و سختی روی نمونه‌ها انجام شده و ریزساختار آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمونه آزمون کشش طبق استاندارد ASTM B557 تهیه گردید. برای مشاهده ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای این منظور میله‌های ریخته‌گری شده ابتدا از وسط برشکاری و پولیش و سپس در محلول $5\% \text{HF}$ به مدت 20 ثانیه اچ شدند. آزمون سختی برینل نیز با قطر ساچمه $2/5$ میلی‌متر و نیروی $62/5$ کیلوگرم بر روی همین نمونه‌ها انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

شکل‌های (۲)، (۳)، و (۴) به ترتیب تصویر ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای 750°C را با اندازه ذرات $300\ \mu\text{m}$ ، $50\ \mu\text{m}$ و $50\ \text{nm}$ نشان می‌دهند.

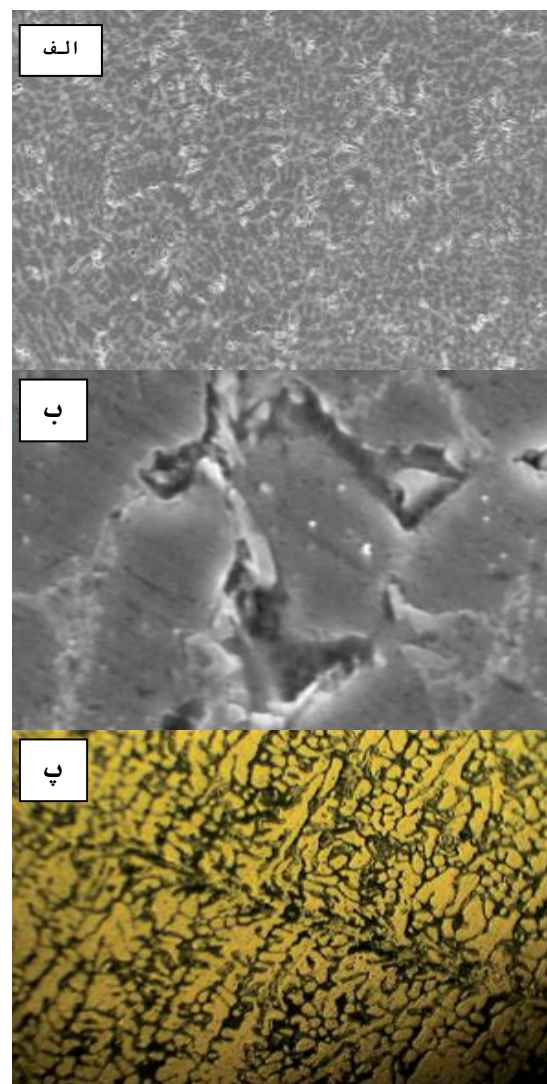
همانطور که دیده می‌شود به دلیل نزدیک بودن دانسیته پودر آلومینا به آلیاژ زمینه، مشکل جدایش در ساختار تا حدودی برطرف شده است [۱۵]. اما با این حال در حین انجماد مذاب کامپوزیتی، ذرات تقویت کننده در هر سه حالت توسط جبهه



شکل (۴): ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای 750°C با اندازه ذرات 50nm : (الف) تصویر SEM با بزرگنمایی $200\times$ ، (ب) تصویر SEM با بزرگنمایی $2000\times$ و (پ) تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی $400\times$

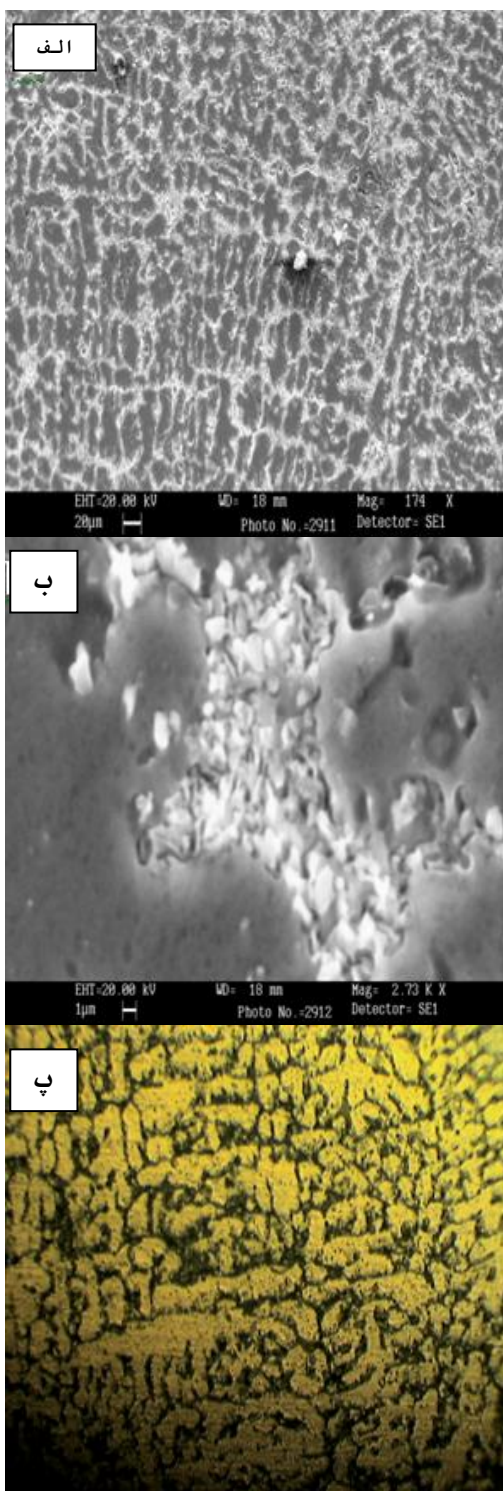
علاوه بر این بررسی بیشتر تصاویر نشان می‌دهد که ذرات نانو آلومینا تمایل به جدایش در مناطق بین دندریتی دارند. البته لازم به ذکر است که به جز آلومینیوم و آلومینا فازهای دیگری مانند Mg_2Si ، Al_4C_3 و تیغه‌های سیلیکون نیز در ساختار وجود دارند [۲].

دلیل این مسئله افزایش افزایش سطح و در نتیجه افزایش انرژی سطحی ذرات نانو سائز می‌باشد [۱-۲]. از طرف دیگر، قابلیت ترشوندگی ذرات با کاهش سائز آن‌ها کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش یکنواختی توزیع ذرات و نیز ایجاد تخلخل در فصل مشترک ذره/زمینه می‌شود [۲].

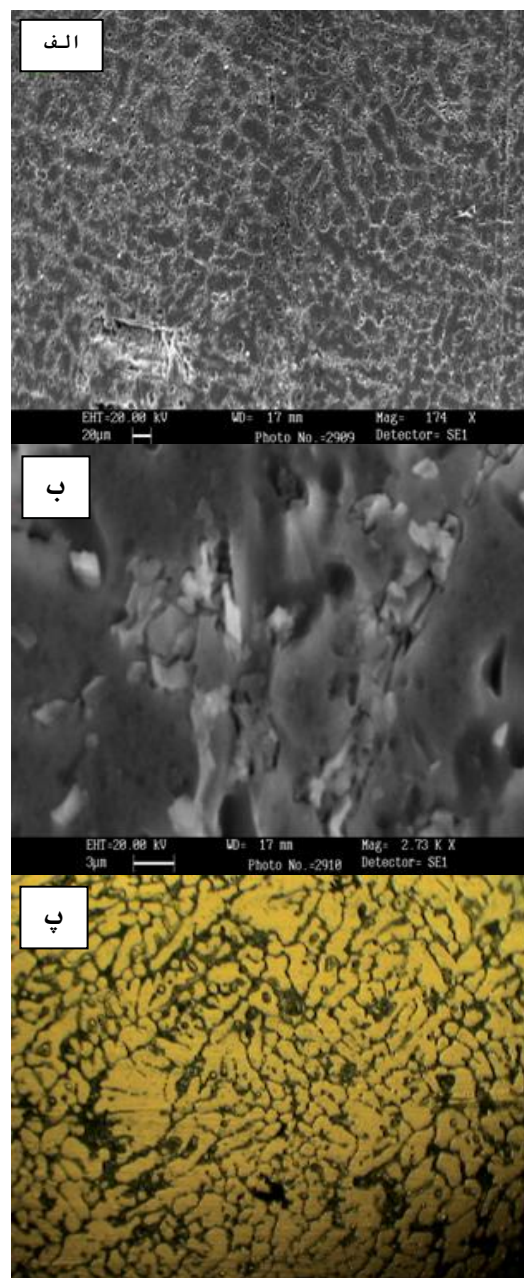


شکل (۳): ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای 750°C با اندازه ذرات $50\mu\text{m}$: (الف) تصویر SEM با بزرگنمایی $200\times$ ، (ب) تصویر SEM با بزرگنمایی $2000\times$ و (پ) تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی $400\times$

شکل های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب تصویر ریزساختار نمونه های ریخته گری شده در دمای 85°C را با اندازه ذرات $300\mu\text{m}$ ، $50\mu\text{m}$ و 50nm نشان می دهند.



شکل (۶): ریزساختار نمونه های ریخته گری شده در دمای 85°C با اندازه ذرات $50\mu\text{m}$: (الف) تصویر SEM با بزرگنمایی $200\times$ ، (ب) تصویر SEM با بزرگنمایی $2000\times$ و (پ) تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی $400\times$

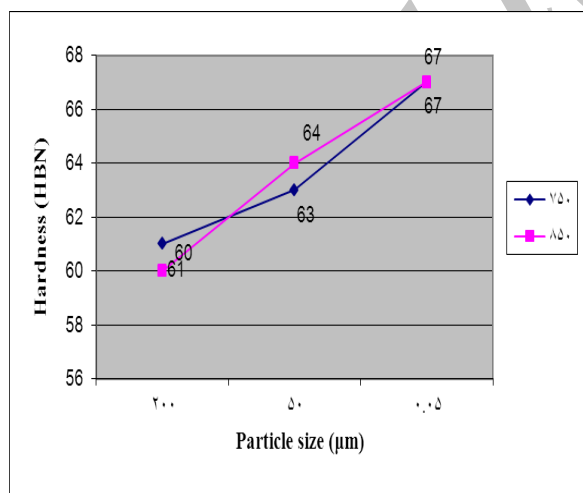


شکل (۵): ریزساختار نمونه های ریخته گری شده در دمای 85°C با اندازه ذرات $300\mu\text{m}$: (الف) تصویر SEM با بزرگنمایی $200\times$ ، (ب) تصویر SEM با بزرگنمایی $2000\times$ و (پ) تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی $400\times$

در انجام ذوب ریزی می گردد. در این تصاویر نیز مانند نمونه- های سری قبل، توزیع یکنواخت و همگن از ذرات آلومینا داخل زمینه و هم چنین پدیده آگلومره شدن مشاهده می شود، با این تفاوت که در دمای 850°C آگلومره ها دارای ابعاد کوچک تری هستند و توزیع آن ها نیز یکنواخت تر است. اگرچه، افزایش دمای مذاب به عمل ترشوندگی کمک می کند ولی باعث افزایش تخلخل، تلاطم مذاب، جذب گاز و در برخی موارد واکنش های مخرب و ناخواسته خواهد شد که مضر است [۱۶ و ۱۳]. علاوه بر این، دمای بارریزی پایین باعث کاهش زمان انجماد شده که از جدایش و تجمع ذرات و نیز تشکیل ریزمک ها جلوگیری می کند [۱۵].

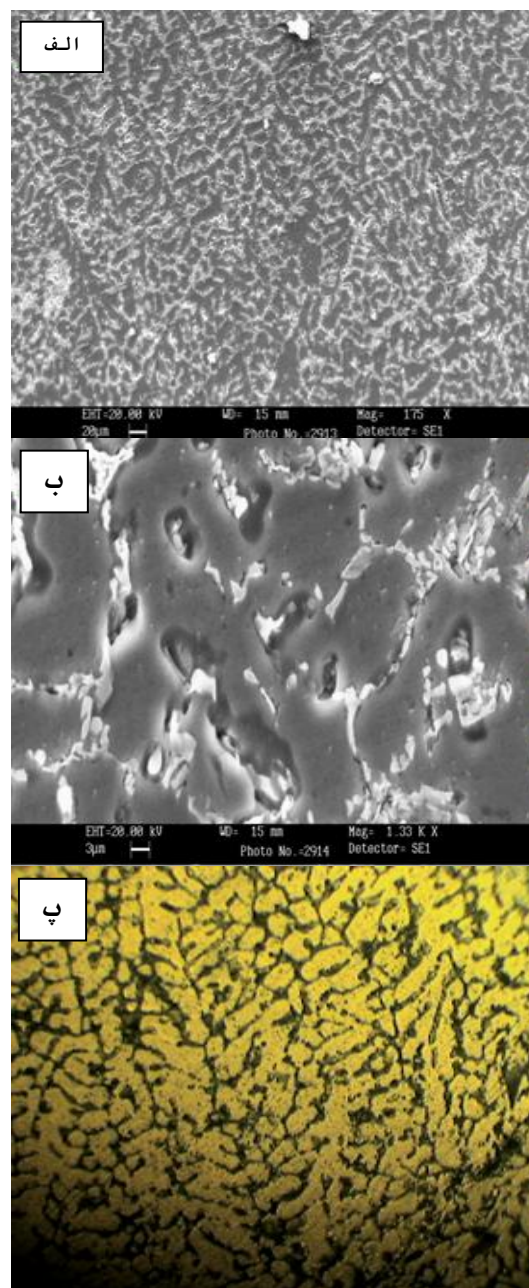
۳-۲- آزمون سختی برینل

در شکل (۸) تغییرات سختی نمونه ها بر حسب اندازه ذرات آلومینا در دماهای 750°C و 850°C نشان داده شده است. با توجه به اینکه سختی آلومینا خیلی بیشتر از سختی آلومینیوم است، افزایش سختی کامپوزیت با افزودن آلومینا دور از انتظار نیست. این مورد با توجه به قانون مخلوط ها نیز به راحتی قابل تحلیل است [۴].



شکل (۸). تغییرات سختی نمونه ها بر حسب اندازه ذرات تقویت کننده در دو دمای 750°C و 850°C

همانطور که در شکل (۸) دیده می شود، سختی نمونه ها با کاهش سایز ذرات تقویت کننده در هر دو حالت افزایش پیدا



شکل (۷): ریزساختار نمونه های ریخته گری شده در دمای 850°C با اندازه ذرات 50 nm : (الف) تصویر SEM با بزرگنمایی $200\times$ ، (ب) تصویر SEM با بزرگنمایی $400\times$ و (پ) تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی $200\times$

با افزایش دمای بارریزی از 750°C به 850°C سیالیت مذاب کامپوزیتی افزایش می یابد که این خود موجب توزیع بهتر ذرات سرامیکی (به دلیل بهبود خاصیت ترشوندگی) و تسهیل

نکته دیگری که باید در شکل (۹) به آن توجه کرد، کاهش استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش دمای بارریزی است. این می‌تواند به دلیل بالا رفتن میزان جذب گاز و در نتیجه افزایش تخلخل‌ها به دلیل افزایش دما باشد. البته لازم به ذکر است که با افزایش دمای بارریزی، به دلیل تشکیل فازهای واکنشی بیشتر، ترشوندگی بهبود می‌یابد اما احتمال انجام واکنش‌های مخرب نیز زیاد می‌شود. محصولات واکنش‌های مخرب معمولاً ترکیبات بین فلزی بسیار ترد هستند که به عنوان مراکز تمرکز تنش و ایجاد ترک عمل کرده و استحکام کششی را کاهش می‌دهند [۱۳].

۴- نتیجه گیری

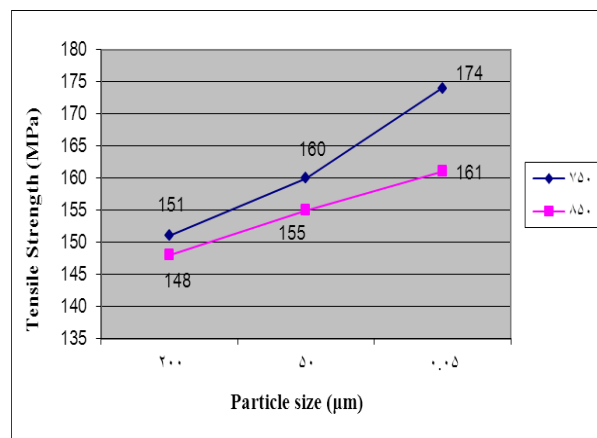
- ۱- با افزایش اندازه ذرات، توزیع آن‌ها در زمینه یکنواخت‌تر می‌شود. زیرا با ریزتر شدن ذرات، پدیده آگلومره شدن نیز تشدید می‌شود، بطوریکه این مسئله در مورد ذرات نانوسایز بسیار شدیدتر رخ می‌دهد. دلیل این مسئله افزایش سطح و در نتیجه افزایش انرژی سطحی ذرات نانوسایز می‌باشد.
- ۲- قابلیت ترشوندگی ذرات با کاهش اندازه آن‌ها کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش یکنواختی توزیع ذرات و نیز ایجاد تخلخل در فصل مشترک ذره/زمینه می‌شود.
- ۳- با افزایش دمای بارریزی از 750°C به 850°C سیالیت مذاب کامپوزیتی افزایش یافت که این خود موجب توزیع بهتر ذرات سرامیکی (به دلیل بهبود خاصیت ترشوندگی) شد. در دمای 850°C درجه ساتی گراد آگلومره‌ها دارای ابعاد کوچک‌تری هستند و توزیع آن‌ها نیز یکنواخت‌تر است.
- ۴- سختی نمونه‌ها با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده افزایش پیدا می‌کند. اما دمای بارریزی تأثیر چندانی بر سختی نمونه‌ها ندارد.
- ۵- با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده، استحکام کششی افزایش پیدا می‌کند.

می‌کند. این افزایش سختی به دو دلیل عمده رخ می‌دهد: ۱- به تأخیر افتادن حرکت نابجایی‌ها در اثر کاهش اندازه ذرات تقویت کننده و ۲- کاهش اندازه دانه‌های زمینه آلومینیومی به دلیل کاهش اندازه ذرات تقویت کننده [۱۵و۲]. علاوه بر این، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود دمای بارریزی تأثیر چندانی بر سختی نمونه‌ها ندارد (به ویژه در مورد نانو کامپوزیت $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$).

۳-۳- آزمون کشش

شکل (۹) تغییرات استحکام کششی نمونه‌ها را بر حسب اندازه ذرات تقویت کننده در دو دمای 750°C و 850°C نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در هر دو حالت با کاهش سایز ذرات تقویت کننده، استحکام کششی افزایش یافته است. به طور کلی ذرات تقویت کننده ریزتر، استحکام‌دهی بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر ایجاد می‌کنند. اما میزان بزرگی این استحکام‌دهی به نوع مواد اولیه و فرآیند تولید کامپوزیت بستگی دارد [۱۴].

افزایش استحکام در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای اساساً به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله: 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-پچ و اوروان [۱۵و۹و۲].



شکل (۹): تغییرات استحکام کششی نمونه‌ها بر حسب اندازه ذرات تقویت کننده در دو دمای 750°C و 850°C

[8] S.A. Sajjadi, M. Torabi Parizi, H.R. Ezatpour & A. Sedghic, "Fabrication of A356 composite reinforced with micro and nano Al_2O_3 particles by a developed compocasting method and study of its properties", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 511, pp 226–231, 2012.

[9] S.A. Sajjadi, H.R. Ezatpour & M. Torabi Parizi, "Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/ Al_2O_3 composites fabricated by stir and compo-casting processes", *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 106–111, 2012.

[10] A. Daoud, M.T. Abou El-Khair & A.N. Abdel-Azim, "Effect of Al_2O_3 Particles on the Microstructure and Sliding Wear of 7075 Al Alloy Manufactured by Squeeze Casting Method", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 13, pp. 135-143, 2004.

[11] S.M. Suresh, D. Mishra, A. Srinivasan, R.M. Arunachalam & R. Sasikumar, "Production and characterization of micro and nano Al_2O_3 particle-reinforced Im25 aluminium alloy composites", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, pp. 94-98, 2011.

[12] Z. Mišković, I. Bobić, S. Tripković, A. Rac & A. Vencl, "The Structure and Mechanical Properties of an Aluminium A356 Alloy Base Composite With Al_2O_3 Particle Additions", *Tribology in industry*, Vol. 28, pp. 23-27, 2006.

[۱۳] م. کلاتر، ع. مشرقی و س. م. ی. سلیمانی، "بررسی و مطالعه تأثیر ماهیت ذرات استحکام دهنده و پارامترهای فرآیند ساخت بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت های ذره ای بر پایه آلومینیم"، نشریه مهندسی متالورژی و مواد، سال بیست و یکم، شماره دو، ص ۸۴-۷۱، ۱۳۸۹.

[۱۴] ج. عباس پور، ح. چاقروند، م. ح. خزاعی و م. ا. بحر العلوم، "بررسی تأثیر افزودن نانو ذرات سرامیکی بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه آلومینیومی ساخته شده به روش ریخته گری گردابی"، اولین کنفرانس علوم و فناوری نانو، دانشگاه پیام نور استان یزد، ۱۳۸۹.

[۱۵] سید ح. میرحسینی، و. اسدی، "ساخت و بررسی عملیات حرارتی کامپوزیت ریختگی $Al_356-Al_2O_3$ "، پنجمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۰.

۶- استحکام کششی نمونه ها با افزایش دمای بارریزی کاهش می یابد. این می تواند به دلیل بالا رفتن میزان جذب گاز و در نتیجه افزایش تخلخل ها به دلیل افزایش دما باشد.

۵- مراجع

[1] S.A. Sajjadi, H.R. Ezatpour & H. Beygi, "Microstructure and mechanical properties of Al- Al_2O_3 micro and nano composites fabricated by stir casting", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 8765–8771, 2011.

[2] H.R. Ezatpour, H. Beygi, S.A. Sajjadi & M. Torabi parizi, "Microstructure and mechanical properties of Al- Al_2O_3 micro and nano composites fabricated by a novel stire casting route", 2nd Conferences on Application of nanotechnology in Science, Engineering and Medicine, 2011.

[3] M. Rahimian, Nader Parvin & Naser Ehsani, "The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al- Al_2O_3 composite", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1031–1038, 2011.

[۴] م. رحیمیان، ن. احسانی، ح. ر. بهاروندی و ن. پروین، "بررسی اثر مقدار ذرات Al_2O_3 بر خواص کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ ساخته شده به روش متالورژی پودر"، یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران.

[5] S.S. Razavi Tousi, R. Yazdani Rad, E. Salahi, I. Mobasherpour & M. Razavi, " Production of Al-20wt.% Al_2O_3 composite powder using high energy milling", *Powder Technology*, Vol. 192, pp. 346–351, 2009.

[6] H. Mahboob, S. A. Sajjadi & S. M. Zebarjad, "Synthesis of Al- Al_2O_3 Nano-Composite 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*, pp. 240-245, 2008.

[7] Y. Mazaheri, F. Karimzadeh & M. H. Enayati, " Nanoindentation Study of $Al_356-Al_2O_3$ Nanocomposite Prepared by Ball Milling", *Materials Sciences and Applications*, Vol. 1, pp. 217-222, 2010.

[۱۶] م. ا. باغچه سرا، ح. عبدی زاده و ح. ر. بهاروندی، "تولید کامپوزیت زمینه آلومینیوم با فاز دوم ZrO_2 توسط روش اختلاط مستقیم و بررسی ریزساختار آن"، نشریه جامعه ریختگران ایران، ۱۳۸۷.

Archive of SID