

تأثیر روش ساخت و نحوه افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم به مذاب بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت ریختگی A356-1 wt.% SiC

علی دهقان همدان^{۱*}، محمد شامیری^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

* Dehghan_ali@iust.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۰۵، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۲/۰۲)

چکیده

در این تحقیق، به بررسی توانایی روش‌های ریخته‌گری گردابی، حباب‌زائی مافوق صوت و استفاده توأم دو روش مذکور برای ساخت نانو کامپوزیت A356-1wt.% SiC پرداخته شد. در تمامی این روش‌ها، تأثیر روش افزودن پودر آمیزان (مخلوط نانوذرات و آلومینیم) به جای افزودن نانوذرات خام به مذاب نیز بررسی شد. مطالعات ریزساختاری با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی نشان داد که ساخت نانو کامپوزیت با استفاده دو روش آخر و روش اول در صورت استفاده از پودر آمیزان (ریخته‌گری گردابی اصلاح شده) عملی است. توزیع بسیار یکنواخت نانوذرات برای نمونه ساخته شده با روش آخر به دست آمد. نانو کامپوزیت‌های مختلف از ساختار ریختگی ریزتری نسبت به آلیاژ برخوردارند. آزمون سختی سنجی نشان داد که سختی نانو کامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ پایه بیشتر بوده و بیشترین سختی مربوط به نمونه‌ای است که با روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده ساخته شده است.

واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری گردابی، حباب‌زائی مافوق صوت، نانو کامپوزیت ریختگی، توزیع نانوذرات، پودر آمیزان، نانوذرات کاربید سیلیسیم، سختی

۱- مقدمه

عملکرد و در نتیجه عمر اجزای ساخته شده از نانو کامپوزیت خواهد شد. با وجود خواص ویژه نانو کامپوزیت‌های یاد شده، روش‌های ساخت موجود برای تولید انبوه قطعات پیچیده با خواص و ساختارهای با قابلیت تولید مجدد و شکل‌های نزدیک به شکل نهائی به اندازه کافی مقرون به صرفه و مطمئن نیستند [۱-۷]. طبق اظهارات بیان شده در منابع [۱-۱۳]، از بین روش‌های موجود [۱۴]، فرآیندهای مبتنی بر انجماد از شانس

نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی پایه آلومینیم و منیزیم به دلیل چگالی کم، استحکام ویژه، داکتیلیتی، چقرمگی، مقاومت به سایش و مقاومت به خزش عالی امروزه به عنوان جایگزین مناسب برای قطعات مورد استفاده در صنایع هوا فضا، خودروسازی و نظامی مورد توجه و مطالعه گسترده قرار گرفته‌اند. چنین خواصی موجب کاهش مصرف سوخت و بنابراین کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و هم‌چنین بهبود

تاکنون نانو کامپوزیت‌های مختلف Al/Al_2O_3 [۱]، $A356/SiC$ [۲، ۷، ۸]، $A356/B4C$ [۲]، (نانولوله‌های کربنی) $A356/CNT$ [۲]، $Mg-4Zn/SiC$ [۳، ۵]، $Mg-6Zn/SiC$ [۳، ۶] و $Mg-(2,4)Al-1Si/SiC$ [۴] با استفاده از روش فوق ساخته شده‌اند. بررسی خواص مکانیکی این نانو کامپوزیت‌ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی نانو کامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [۱-۸]. انعطاف‌پذیری نانو کامپوزیت‌های پایه آلومینیم یا آلیاژهای آلومینیم برابر [۷-۸] و یا کم‌تر از [۱-۲] انعطاف‌پذیری آلومینیم و آلیاژ مربوطه است. در حالی که انعطاف‌پذیری نانو کامپوزیت‌های پایه آلیاژهای منیزیم برابر [۴ و ۶] و یا بیشتر از [۳ و ۵] آلیاژ مربوطه است. بررسی ریزساختار نانو کامپوزیت‌های فوق نشان داده است که اندازه دانه [۳، ۱-۶] و بازوهای دندریتی [۲، ۷، ۸] فاز زمینه نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچک‌تر است. یکی از اثرات مهم حضور نانوذرات حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [۳]. مطالب یاد شده از مهم‌ترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف‌پذیری نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه محسوب می‌شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانو کامپوزیت نسبتاً مطلوب است و همواره تعدادی خوشه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرز دانه‌ها و یا در امتداد مرز دانه‌ها مشاهده شده است [۱-۸]. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات مجزا بیشتر در درون دانه‌ها یا بازوهای دندریتی فاز زمینه پراکنده شده‌اند [۲-۸]. یکی از ویژگی‌های مهم در خصوص خوشه‌های نانوذرات موجود در نانو کامپوزیت‌ها، وجود زمینه در فضای بین نانوذرات درون خوشه‌ها است [۳-۶]. بررسی فصل مشترک بین زمینه و نانوذره به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی با قدرت تفکیک بالا نشان داده است که بین زمینه و فصل مشترک هیچ فاز ثانویه‌ای بوجود نیامده و پیوند بین اتم‌های زمینه و نانوذرات در حد مطلوب است. هم‌چنین هیچ گونه گسیختگی در فصل مشترک دیده نشده است [۳-۶]. اگر چه این روش قابلیت فوق‌العاده‌ای در تولید نانو کامپوزیت‌های ریختگی پایه

بیشتری برای تولید مقرون به صرفه و انبوه قطعات مهندسی برخوردار هستند [۱-۱۳]. از جمله این روش‌ها به روش حباب‌سازی مافوق صوت^۱ [۱-۸]، روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده^۲ [۹-۱۳] می‌توان اشاره کرد.

در روش حباب‌سازی مافوق صوت، مخلوط مذاب-نانوذرات تحت تأثیر امواج مافوق صوت شدید قرار می‌گیرد. این عمل به دو صورت مستقیم [۲-۸] و غیر مستقیم [۱] انجام می‌شود: از جمله مهم‌ترین اثرات این امواج که به اثرات غیر خطی معروفند، حباب‌زائی گذرا^۳ و جریان صوتی^۴ است [۱۵-۱۶]. جریان صوتی که برای هم‌زدن بسیار با ارزش است، حرکت مذاب در اثر شیب فشار صوتی است. حباب‌زائی در برگیرنده تشکیل، بزرگ شدن و فروپاشی یا منفجر شدن حباب است. در ساخت نانو کامپوزیت‌ها به کمک امواج مافوق صوت در مرحله نخست خوشه‌های نانوذرات موجود در مذاب توسط اثر حباب‌زائی امواج از بین می‌رود و در مرحله بعد نانوذرات مجزا توسط پدیده جریان صوتی به طور یکنواخت در داخل مذاب پراکنده می‌شوند. از آنجائی که هوا در حفرات موجود در خوشه‌های نانوذرات حبس شده است، بنابراین هوای حبس شده به عنوان جوانه‌ای برای تشکیل حباب ایفای نقش می‌کند. در مراحل اولیه افزودن نانوذرات به مذاب تعداد خوشه‌ها بسیار زیاد است، بنابراین تعداد حباب‌های تشکیل شده نیز زیاد خواهد بود. حباب‌های بوجود آمده در حین سیکل فشاری منفی رشد می‌کنند و پس از بزرگ شدن تا اندازه مشخص در حین سیکل فشاری مثبت به طور ناگهانی از هم پاشیده می‌شوند. حباب‌های ریزی که در مدت زمانی کمتر از 10^{-6} ثانیه منفجر می‌شوند، نقاط گرم میکرونی گذرا را ایجاد می‌کنند. دما و فشار این نقاط به ترتیب $5000^\circ C$ و بالای 1000 atm است. هم‌چنین سرعت گرم شدن و سرد شدن این نقاط در حدود 10^{11} K/S است [۱۷]. حباب‌های گذرا ضربات انفجار گونه به خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات وارد می‌کنند و از این طریق خوشه‌های نانوذرات را می‌شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت‌های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می‌شود.

مربوطه کوچک تر است. در جدیدترین تحقیق صورت گرفته مشخص شده است که سرعت همزدن مذاب، دمای همزدن و نوع آمیزان از جمله مهم ترین پارامترهایی هستند که تأثیر شدیدی بر روی توزیع و پراکندگی نانوذرات و در نتیجه خواص مکانیکی نانو کامپوزیت دارند [۱۲]. همانند روش قبل، در این روش نیز حذف کامل خوشه های نانوذرات تا کنون مشاهده نشده است. بررسی خواص مکانیکی این نانو کامپوزیت ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی نانو کامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری افزایش یافته است [۹-۱۳]. انعطاف پذیری این نانو کامپوزیت ها به میزان ناچیزی کمتر از انعطاف پذیری آلیاژهای مربوطه است. بررسی ریزساختار نانو کامپوزیت های فوق نشان داده است که اندازه دانه [۹-۱۰] و بازوهای دندریتی [۱۱-۱۳] فاز زمینه نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچک تر است.

مطالب فوق نشان می دهد که رسیدن به توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه هنوز عملی نشده است. بنابراین موضوع ارائه راهکارها و روش های جدید برای ایجاد ساختارهایی با توزیع یکنواخت از نانوذرات همچنان به عنوان موضوعی ارزشمند به قوت خود باقی است. ارزش این موضوع بیشتر خواهد شد اگر روش جدید اقتصادی تر از روش های فعلی باشد.

در تحقیق حاضر سعی شده است تا با ارائه روشی جدید که مبتنی است بر استفاده غیر مستقیم از امواج مافوق صوت بر روی مخلوط های مذاب- نانوذرات تهیه شده به روش ریخته گری گردابی اصلاح شده، بتوان با صرف انرژی کمتر وضعیت مطلوب تری را برای توزیع نانوذرات در زمینه نانو کامپوزیت ایجاد کرد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، از آلیاژ A356 با ترکیب شیمیائی مشخص شده در جدول (۱) و نانوذرات SiC برای ساخت نانو کامپوزیت A356-1 wt.% SiC استفاده شد. از جمله ویژگی های نانوذرات می توان به متوسط اندازه بین ۲۵ تا ۵۰ نانومتر و خلوص بالای

آلومینیم و منیزیم دارد. بنابر آنچه بیان شد مشخص می شود که هنوز خوشه ها و کلوخه های نانوذرات در زمینه حضور دارند [۲-۸]. این مشکل در حالتی که امواج مافوق صوت شدید به صورت غیر مستقیم به مخلوط مذاب و نانوذرات اعمال می شود، حادث تر است [۱]. نکته قابل تأمل دیگر در این روش استفاده از امواج مافوق صوت دارای توان حداقل یک کیلو وات برای مدت زمان های طولانی (حداقل یک ساعت) برای مخلوط مذاب- نانوذرات است. این مسأله موجب گشته تا مصرف انرژی در این روش بالا باشد.

روش ریخته گری گردابی اصلاح شده همان روش مرسوم ریخته گری گردابی است که برای تولید کامپوزیت های با تقویت کننده های میکرونی استفاده می شود [۱۸] اما به دلیل عدم توانایی این روش در شکستن کلوخه ها و خوشه های نانوذرات [۱۹-۲۱]، در این روش به جای افزودن نانوذرات به مذابی که توسط یک پره در حال همزدن است و در سطح آن گرداب ایجاد شده است، از پودر آمیزان حاوی نانوذرات و آلومینیم [۱۱-۱۳] یا منیزیم [۹-۱۰] استفاده شده است. علت اصلی استفاده از پودر آمیزان حذف کلوخه ها و خوشه های نانوذرات از طریق گنجاندن نانوذرات مجزا در داخل یک زمینه فلزی قبل از افزودن آن ها به مذاب است. این مسأله باعث خواهد شد تا نیروی جاذبه بین نانوذرات کاهش یافته و در نتیجه نیروهای ناشی از همزن مکانیکی می تواند از خوشه ای شدن مجدد آن ها در مذاب جلوگیری کرده و به پخش نانوذرات و توزیع یکنواخت آن ها در مذاب کمک کند [۱۲-۱۳]. تاکنون ساخت نانو کامپوزیت های Mg/Al_2O_3 [۹-۱۰]، $AZ31/Al_2O_3$ [۹-۱۰]، $A356/Al_2O_3$ [۱۱] و $A356/SiC$ [۱۲-۱۳] با استفاده از این روش گزارش شده است. نسبت به آلیاژ پایه، این نانو کامپوزیت ها از سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی بسیار بیشتر و انعطاف پذیری نسبتاً کمتری در دمای محیط [۹-۱۳] و دمای بالا [۹-۱۰] برخوردارند. بررسی ریزساختار این نانو کامپوزیت ها نیز نشان داده است که اندازه دانه [۹-۱۰] و بازوهای دندریتی [۱۱-۱۳] فاز زمینه نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ

همراه مقداری پودر فلاکس (۰/۰۰۵ برابر وزن آلیاژ) در داخل بوتله گرافیتی قرار داده شد. مجموعه مذکور در داخل یک کوره مقاومتی با دمای 850°C قرار داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ مقداری فلاکس (۰/۰۰۵ برابر وزن آلیاژ) بر روی سطح مذاب ریخته شد. پس از تشکیل لایه پیوسته فلاکس بر روی سطح مذاب، عمل گاز زدایی با استفاده از هگزاکلرواتان در مقدار ۰/۰۲ درصد وزنی مذاب و طی دو مرحله صورت گرفت. پس از پایان عمل گاز زدایی و فلاکس زدایی از سطح مذاب، بوتله به کوره مقاومتی مجهز به همزن مکانیکی منتقل گردید. دمای این کوره در حدی تنظیم شد که دمای مذاب 800°C باشد. در این کوره پس از فرو بردن همزن در مذاب، عمل همزدن و افزودن پودر آمیزان یا نانوذرات به مذاب صورت گرفت. سرعت همزن در ۷۰۰ دور بر دقیقه تنظیم و مدت همزدن ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از پایان پذیرفتن عمل همزدن، بوتله از کوره خارج شده و بعد از کنار زدن لایه سرباره، نیمی از مخلوط مذاب حاصل به داخل قالبی مکعب مستطیل شکل دارای ابعاد $12 \times 5 \times 2/5$ cm که تا دمای 350°C پیشگرم شده بود، ریخته شد (نمونه مرجع). مابقی مذاب به منظور آلتراسونیک شدن در داخل قالب مخروطی شکل ریخته شده و تا پایان انجماد در معرض امواج مافوق صوت با شدت ۷۷۰ وات قرار گرفت. به منظور ایجاد امواج مافوق صوت در مذاب از دستگاه آلتراسونیک Wise clean مدل WUC-D10H استفاده شد.

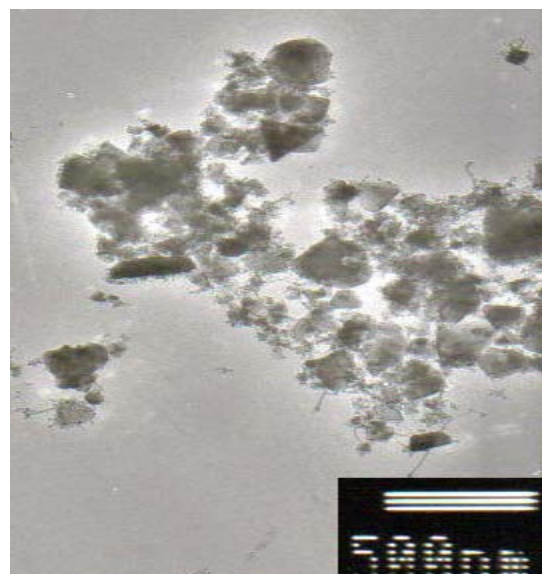
از قسمت بالای نمونه مرجع و قسمت پایین و مرکزی نمونه آلتراسونیک شده، قطعاتی به ابعاد $1 \times 1 \times 1$ cm توسط اهر دستی بریده شد. سطح این نمونه‌ها ابتدا با کاغذ سمباده‌های ضد آب ۱۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ تحت عمل سمباده‌زنی قرار گرفته و سپس با خمیر الماسه ۱ میکرونی پولیش شد. سطح نمونه‌های پولیش شده پس از اینکه توسط امواج مافوق صوت تمیز شد، در محلول یک درصد حجمی اسید هیدروفلوئوریک در آب برای مدت ۳۰ ثانیه اچ گردید. ریزساختار نمونه‌های مذکور ابتدا با استفاده از میکروسکوپ نوری (Olympus GX51) در بزرگنمایی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی

۹۸/۶ درصد وزنی اشاره داشت. ساختار بلوری آن‌ها از نوع آلفا است. در شکل (۱) تصویر TEM نانوذرات نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، اندازه و شکل نانوذرات متفاوت بوده و حتی ذرات با اندازه بیشتر از ۲۰۰ نانومتر نیز وجود دارند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلیاژ A356

Si	Mg	Fe	Cu	Al
۷/۰۲	۰/۳۹۶	۰/۱۸۲	< ۰/۱۵	Ballance

برای افزودن نانوذرات به مذاب از دو روش استفاده شد. در روش اول نانوذرات SiC بدون اینکه با ماده دیگری ترکیب شوند، به مذاب اضافه می‌شوند. در روش دوم ابتدا مخلوطی از نانوذرات SiC و یک پودر فلزی تهیه شده و سپس مخلوط حاصل به مذاب افزوده می‌شود. در اینجا از یک نوع مخلوط پودری یا آمیزان استفاده شد: آمیزان تشکیل شده از آلیاژ A356 و ۱۰ درصد وزنی کاربید سیلیسیم (A356-10 wt.% SiC). برای ساخت آمیزان از دستگاه آسیاب پر انرژی غلظتی^۵ استفاده شد.



شکل (۱): تصویر تهیه شده توسط TEM از نانوذرات SiC.

برای ساخت نمونه‌های مختلف ابتدا مقدار مناسب از آلیاژ به

شکل جبهه انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانوذرات، گرادیان دمایی و گرادیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [۲۲]. آنچه بدیهی است این است که اگر نانوذرات در مذاب از پراکندگی مناسبی برخوردار نباشند، نمی توان انتظار داشت که توزیع نانوذرات در نمونه حاصل شده از انجماد این مذاب مطلوب باشد.

(الف) تأثیر نحوه افزودن نانوذرات به مذاب

در شکل (۲) تأثیر نحوه افزودن نانوذرات به مذاب بر روی توزیع آن‌ها در زمینه کامپوزیت‌های آلتراسونیک نشده نشان داده شده است. در تهیه این تصاویر از آشکارساز الکترون‌های ثانویه استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات از طریق پودر آمیزان سبب ورود نانوذرات به مذاب و در نهایت حضور آن‌ها در زمینه نانو کامپوزیت ریختگی شده است. هم‌چنین توزیع نانوذرات در زمینه به صورت یکنواخت نبوده و علاوه بر نانوذرات مجزا، خوشه‌های نانوذرات که به صورت رشته‌ها و توده‌های با اندازه در حد یک میکرون است، نیز در زمینه حضور دارند.

نکته قابل تأمل عدم وجود مقدار قابل توجه نانوذرات در زمینه نمونه‌های مرجعی است که از طریق افزودن مستقیم نانوذرات به مذاب بدست آمده‌اند. این نتیجه، ناکارآمدی روش ریخته‌گری گردابی را در شکستن و از بین بردن کلوخه‌های نانوذرات تأیید می‌کند.

از این بررسی، پی بردن به نقش نانوذرات بر اندازه و شکل بازوهای دندریتی، فاز یوتکتیک و دیگر فازهای موجود در ریزساختار آلیاژ مورد نظر است. برای بررسی نحوه توزیع نانوذرات در زمینه نانو کامپوزیت، ریزساختار نمونه‌های مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (VEGA\TESCAN) مورد بررسی قرار گرفت. بر روی نمونه‌های پولیش و اچ شده، پوششی ۱۰ نانومتری از طلا به روش کند و پاش ایجاد شد تا نمونه‌ها تصاویر واضح‌تری از نانوذرات را ارائه کنند.

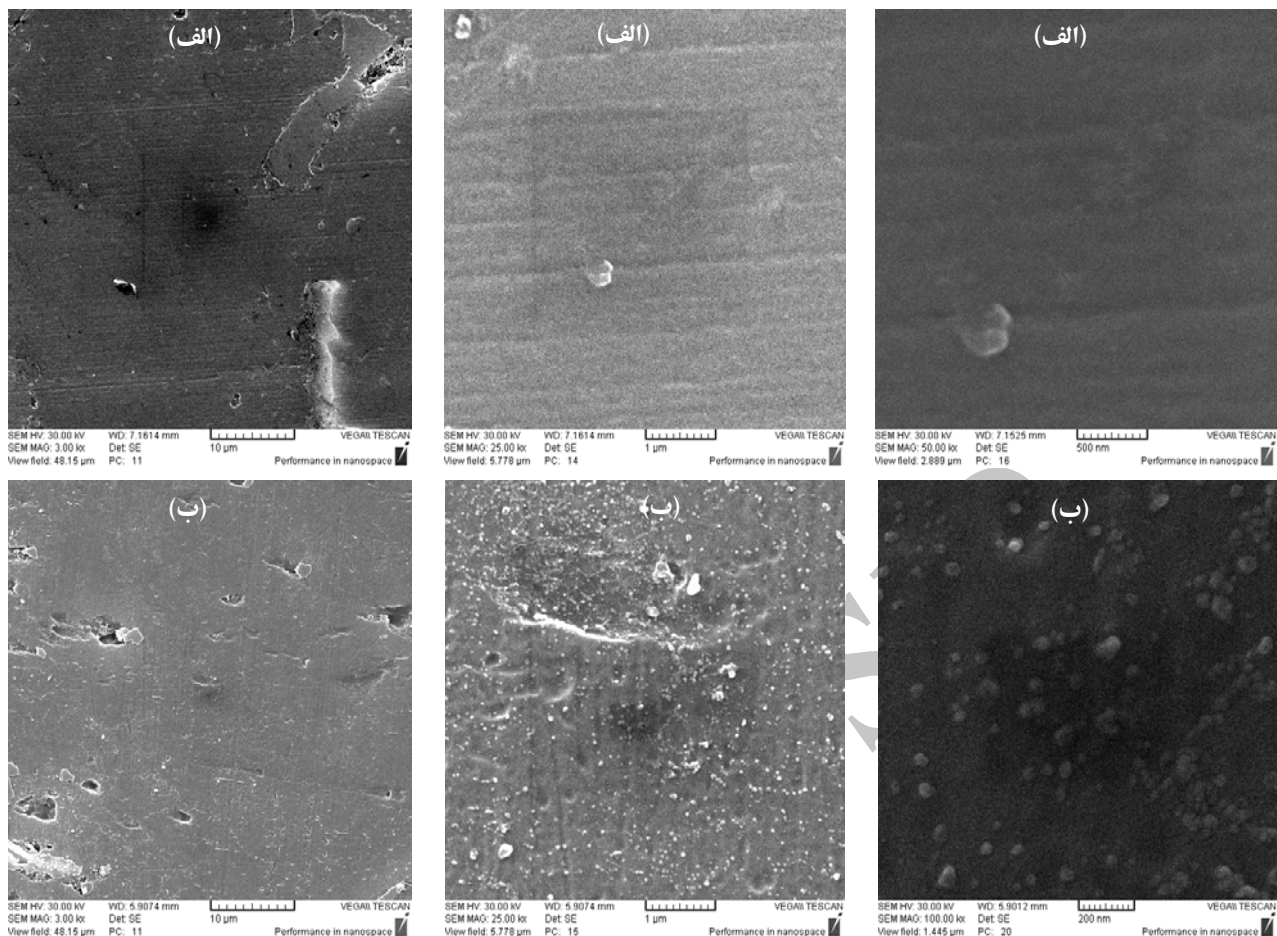
برای ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون ریز سختی سنجی ویکرز (QUALITEST) استفاده شد. موضع سختی سنجی ناحیه داخل بازوهای دندریتی در نظر گرفته شد. برای هر نمونه حداقل ۵ مرتبه سختی سنجی صورت گرفت. تمامی آزمون‌ها در نیروی ۰/۹۸ نیوتن و زمان اعمال نیروی ۱۵ ثانیه انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع نانوذرات در نانو کامپوزیت ریختگی

آنچه که مسلم است توزیع نانوذرات در زمینه تحت تأثیر اتفاقاتی که در مذاب در حین پراکنده ساختن نانوذرات و قبل از ریخته‌گری رخ می‌دهد و پدیده‌هایی که در حین انجماد رخ می‌دهد، می‌باشد.

در خصوص مورد اول می‌توان به ته نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه‌ای شدن اشاره کرد. در خصوص مورد دوم مهم‌ترین مسأله میان کنش بین جبهه انجماد و نانوذرات است که به فاکتورهای بسیاری وابسته است که از جمله آن‌ها می‌توان به



شکل (۲): تصاویر SEM از ریزساختار نمونه‌های مرجع تهیه شده از طریق افزودن: (الف) نانوذرات خام و (ب) پودر آمیژان به مذاب آلیاژ.

شد که این مسئله موجب آسانتر قرار گرفتن نانوذرات در درون مذاب می‌شود.

(ب) تأثیر امواج مافوق صوت

در شکل (۳) تأثیر امواج مافوق صوت بر ریزساختار نانوکامپوزیت‌های تولید شده با دو روش متفاوت افزودن نانوذرات به مذاب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) قسمت (ب) مشاهده می‌شود، ریزساختار نمونه‌های آلتراسونیک شده که از طریق افزودن نانوذرات خام به مذاب آلیاژ تهیه شده‌اند، بیانگر این است که امواج مافوق صوت به نحو موثری باعث پخش نانوذرات در مذاب خواهند گردید. امواج مافوق صوت دو تأثیر مهم بر روی مذاب حاوی نانوذرات دارند: یکی حباب‌زائی مافوق صوت که با تشکیل جوانه‌های حباب در مرز بین مذاب و نانوذرات یا در خوشه‌های نانوذرات، رشد و انفجار آن‌ها همراه است. نتیجه این انفجارها بوجود آمدن نواحی

علت اینکه با افزودن نانوذرات به صورت پودر آمیژان می‌توان به ساخت نانوکامپوزیت دست یافت را این‌گونه می‌توان بیان کرد که در تهیه پودر آمیژان از روش آسیاکاری پرانرژی استفاده شده است، بنابراین در اثر نیروهای ضربه‌ای و برشی شدید ناشی از گلوله‌های آسیاب، خوشه‌های نانوذرات از بین رفته و نانوذرات به صورت مجزا در زمینه پودر آمیژان توزیع خواهند شد [۲۳]. توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه پودر آمیژان سبب افزایش فاصله بین نانوذرات و در نتیجه کاهش نیروی جاذبه بین آن‌ها خواهد شد [۲۴]. این موضوع احتمال غلبه نیروی فراهم شده توسط همزن مکانیکی بر نیروی جاذبه بین نانوذرات را افزایش داده و در نتیجه مانع از تشکیل خوشه‌های نانوذرات در هنگام افزودن پودر آمیژان به مذاب و پس از ذوب شدن ذرات آمیژان می‌شود. هم‌چنین وجود عنصری مانند منیزیم در پودر آمیژان سبب افزایش ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب خواهد

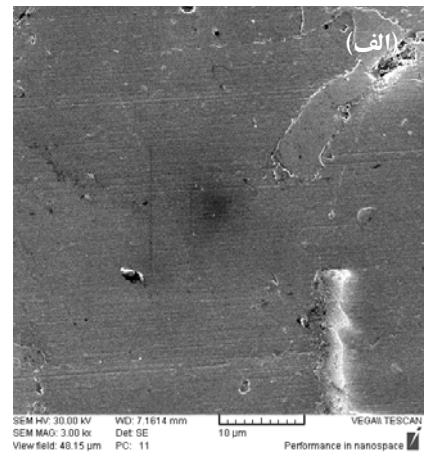
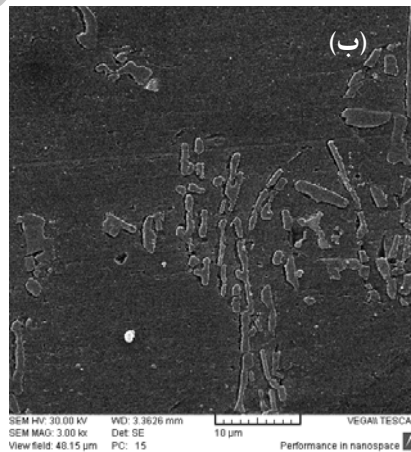
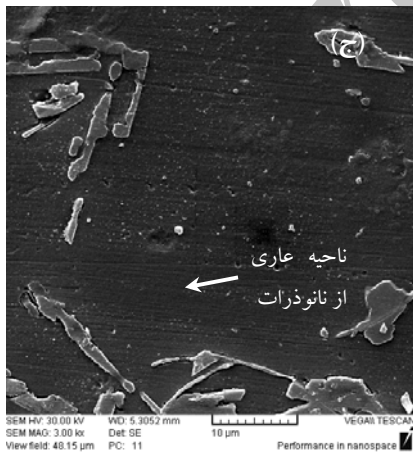
یکنواختی، ناشی از اثر هم‌افزایی انرژی آسیاکاری و اثرات امواج صوتی در شکستن و از بین بردن خوشه‌های نانوذرات است. طبق مطالعات صورت گرفته [۲۴-۲۵]، نشان داده شده است که در روش حباب‌سازی مافوق صوت، فشار حباب‌زائی مورد نیاز برای شکستن و از بین بردن خوشه‌های نانوذرات در مذاب با نیروی جاذبه و اندروالز بین نانوذرات رابطه مستقیم دارد.

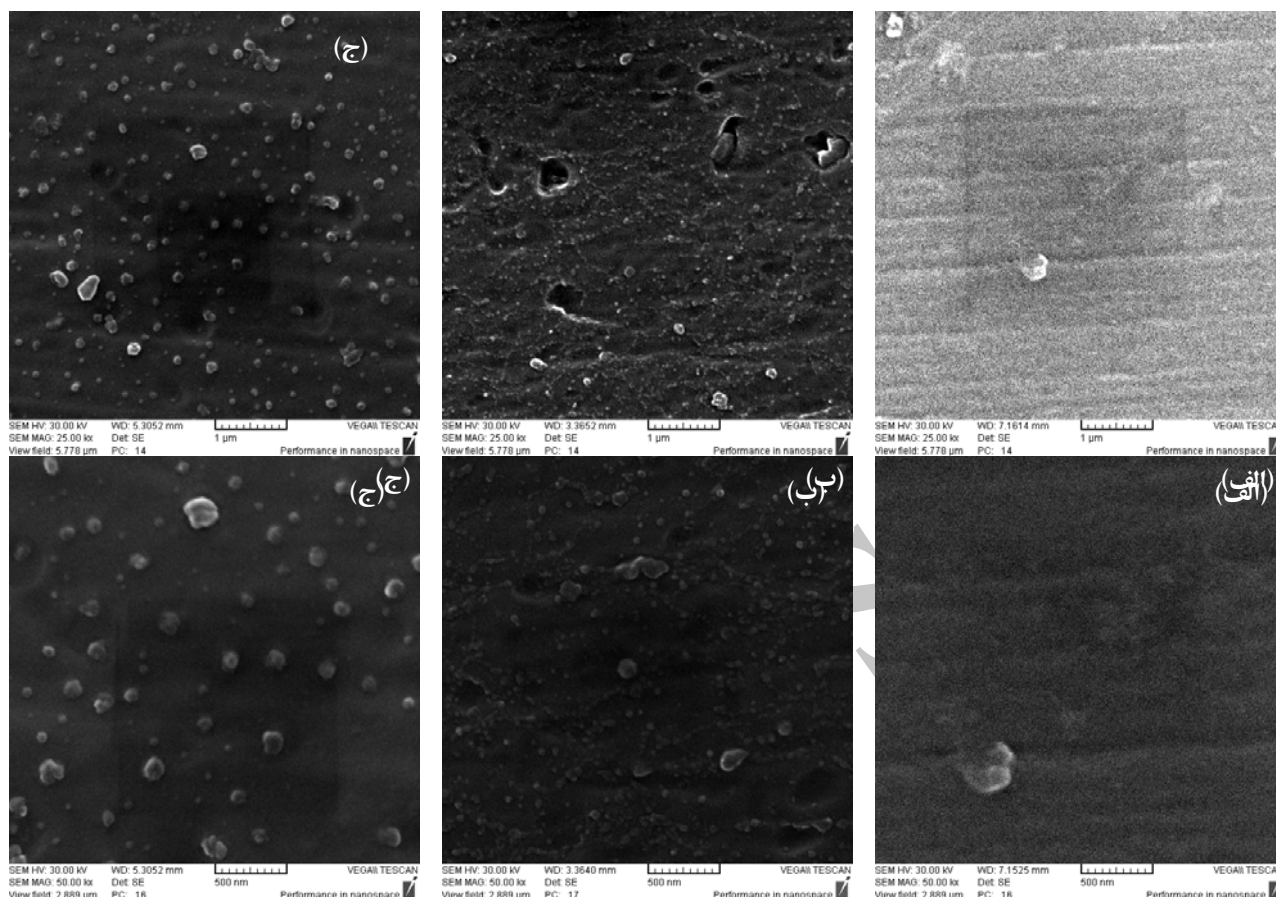
نیروی جاذبه و اندروالز با کوچکتر شدن اندازه نانوذرات و افزایش فاصله بین آن‌ها کمتر می‌شود. فشار ناشی از انفجار حباب‌ها (فشار حباب‌زائی) به اندازه آن‌ها بستگی داشته و با کوچک‌تر شدن حباب‌ها، فشار ناشی از انفجار آن‌ها بیشتر می‌شود.

با توجه به مطالب عنوان شده برای تشریح علت‌های مربوط به توزیع بسیار یکنواخت نانوذرات در ریزساختار نمونه مشاهده شده در شکل (۳) قسمت (ج) لازم است تا به تفاوت‌های مخلوط تهیه شده از طریق افزودن نانوذرات خام به مذاب با مخلوط تهیه شده از طریق افزودن پودر آمیزان به مذاب قبل از آلتراسونیک شدن توجه ویژه‌ای شود. مخلوط دوم نسبت به مخلوط اول از تعداد خوشه‌های کمتر، خوشه‌های با اندازه کوچک‌تر و خوشه‌های با تراکم کمتر یا فاصله بین ذره‌های بیشتر برخوردار است.

با فشار و دمای بسیار بالا به نام نقاط گرم است. دیگری جریان صوتی است که باعث هم‌زدن مذاب و یکنواختی نانوذرات در مذاب خواهد شد. انفجارها از یک طرف سبب منهدم کردن خوشه‌های نانوذرات و از طرف دیگر باعث افزایش ترشوندگی به دلیل بالا رفتن دما و فشار خواهند شد. با وجود چنین اثراتی مشاهده می‌شود که حتی در زمینه نمونه‌های آلتراسونیک شده، خوشه‌های نانوذرات حضور دارند. این مسأله در کارهای دیگر محققین که از زمان‌های آلتراسونیک بیشتر و امواج با شدت بالاتر استفاده کرده‌اند نیز وجود داشته است [۸-۱]. علت‌های احتمالی وجود خوشه‌ها را می‌توان بدین صورت بیان کرد: (۱) کافی نبودن مدت زمان آلتراسونیک مخلوط مذاب و نانوذرات به دلیل سریع سرد شدن قالب قرار گرفته در داخل آب، (۲) جریان صوتی درون مذاب و نیز انفجار حباب‌ها می‌تواند سبب نزدیک‌تر شدن نانوذرات به یکدیگر و تشکیل مجدد خوشه‌ها شود و (۳) در حین انجماد، حرکت‌های اتفاقی آن دسته از نانوذرات که در فواصل دورتر از جبهه انجماد هستند، می‌تواند باعث تشکیل مجدد خوشه‌ها شود.

در شکل (۳) قسمت (ج) تأثیر هم‌زمان امواج مافوق صوت و استفاده از پودر آمیزان بر روی ریزساختار نشان داده شده است. نتیجه بسیار جالب توجه حصول ریزساختاری با توزیع بسیار یکنواخت از نانوذرات SiC است. بوجود آمدن چنین ساختار





شکل (۳): تصاویر SEM از ریزساختار: (الف) نمونه تهیه شده از طریق افزودن مستقیم نانوذرات به مذاب آلیاژ، (ب) همان نمونه الف اما در حالت آلتراسونیک شده و (ج) نمونه تهیه شده از طریق آلتراسونیک کردن مخلوط مذاب - نانوذرات ساخته شده از طریق افزودن پودر آمیژان به مذاب.

۳-۲- تأثیر نانوذرات بر ساختار ریختگی نانو کامپوزیت

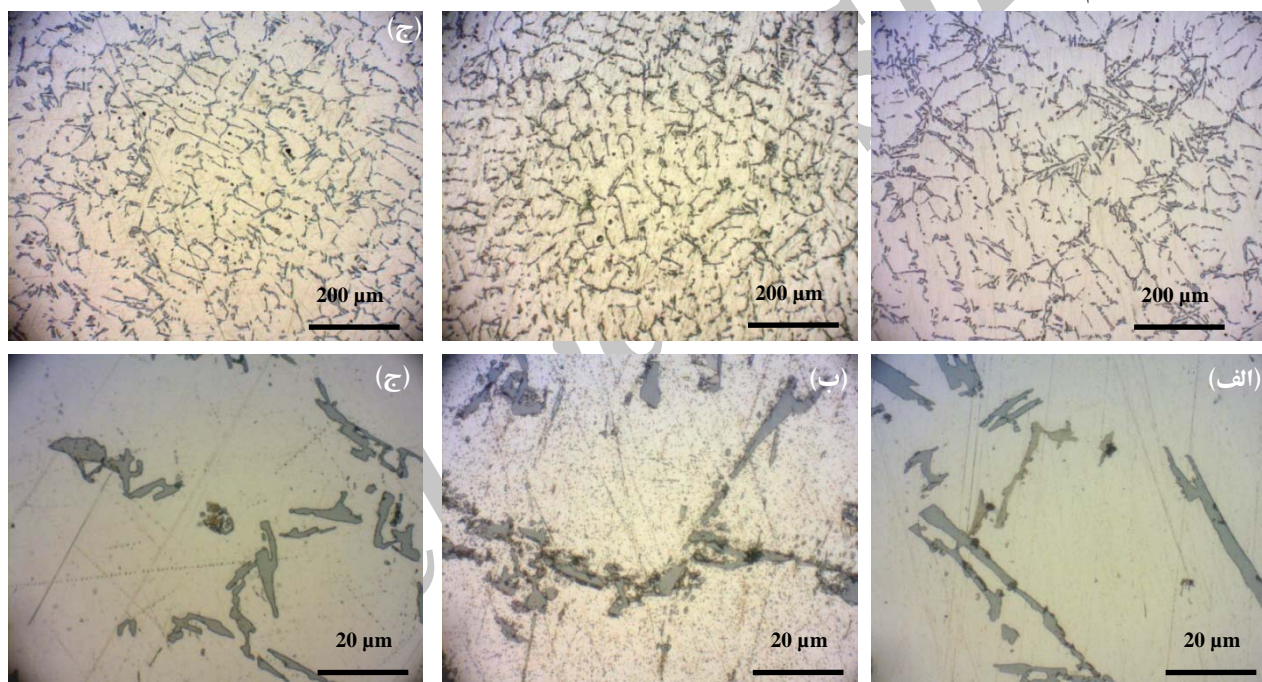
در شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار نمونه‌های مرجع آلیاژ و نانو کامپوزیت‌های ریختگی تولید شده به دو روش متفاوت افزودن پودر آمیژان و افزودن نانوذرات به مذاب آلیاژ نشان داده شده است. ریزساختار تمامی نمونه‌ها شامل دندریت‌های غنی از آلومینیم (نواحی سفید رنگ) و فاز یوتکتیک (نواحی تیره لایه لایه) است. نکته قابل توجه ریزتر بودن دندریت‌های موجود در ریزساختار نانو کامپوزیت‌های ریختگی نسبت به آلیاژ ریختگی است. هم‌چنین دندریت‌ها در ریزساختار نمونه تهیه شده از طریق افزودن پودر آمیژان ریزتر از نانو کامپوزیت مرجع ساخته شده به روش دیگر هستند. این نتایج

علت چنین تفاوت‌هایی به استفاده از آسیابکاری پر انرژی برای تهیه پودر آمیژان مربوط می‌شود. بنابر آنچه بیان شد، واضح است که برای از بین بردن خوشه‌های موجود در مخلوط دوم نسبت به مخلوط اول به فشار حباب‌زایی و مدت زمان آلتراسونیک کردن کم‌تر نیاز است. فشار کم‌تر می‌تواند توسط امواج مافوق صوت با شدت کم ایجاد شود. با دقیق‌تر شدن در ریزساختار نانو کامپوزیت آلتراسونیک شده (بزرگنمایی‌های پائین)، دیده می‌شود که در داخل بازوی دندریتی زمینه نواحی عاری از نانوذرات در کنار نواحی غنی از نانوذرات وجود دارد. این مسأله به احتمال زیاد به نحوه انجماد نانو کامپوزیت‌ها و تعامل دندریت‌های در حال رشد با نانوذرات مربوط می‌شود که نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد.

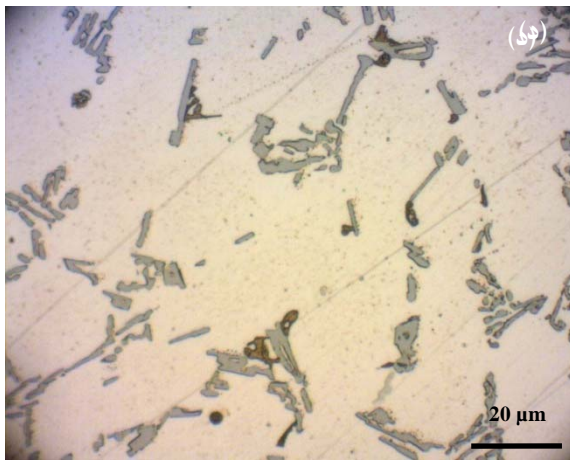
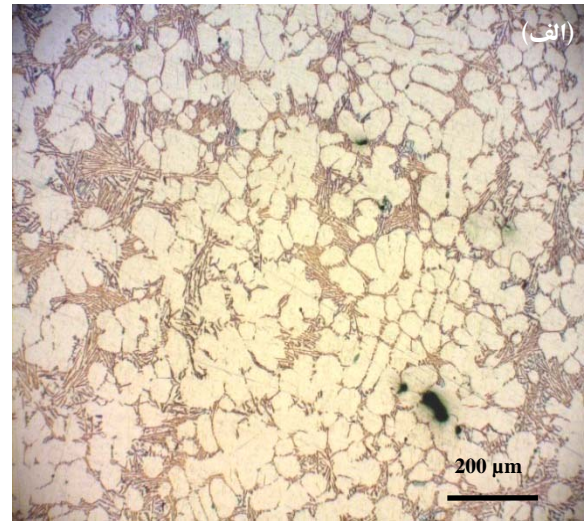
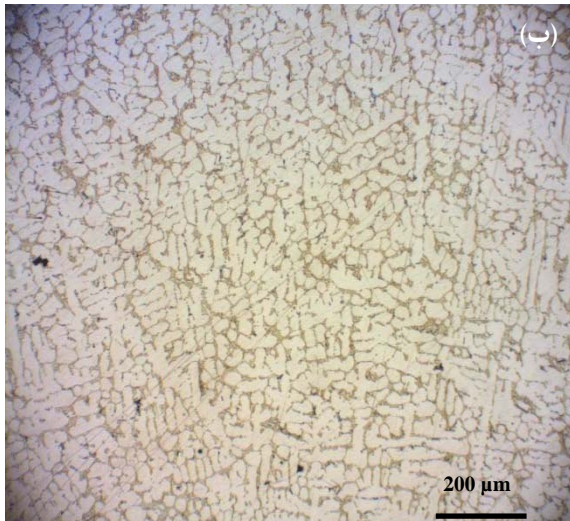
دندریتی در آلیاژ ریختگی نسبت به نانو کامپوزیت ریختگی بزرگ تر است. هم چنین دیده می شود که در کنار تیغه های درشت سیلیسیم ذرات سیلیسیم بسیار ریز در ریزساختار نانو کامپوزیت وجود دارد (شکل (۴) قسمت (ب)) که با دور شدن از تیغه های بزرگ، تعداد آن ها کاهش و فاصله بین آن ها افزایش می یابد.

نشان می دهد که نانو ذرات SiC با مکانیزمی نامشخص سبب ریزتر شدن دندریت ها می شوند. به نحوی که با افزایش آن ها در مذاب به صورت ذرات مجزا و به عبارت دیگر پخش یکنواخت تر آن ها اثر ریز شدن دندریت ها مشهودتر می شود. این نتیجه توسط محققین دیگر [۸-۱] که با روش حباب سازی مافوق صوت به تولید نانو کامپوزیت های پایه آلومینیم و منیزیم اقدام کرده اند نیز گزارش شده است.

نکته قابل تأمل دیگر تفاوت ساختار یوتکتیک در نانو کامپوزیت های ریختگی و آلیاژ ریختگی است. مشاهده می شود که حجم فاز یوتکتیک قرار گرفته در فضای بین



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار (دندریت ها و فاز یوتکتیک): (الف) آلیاژ ریختگی، (ب) نمونه مرجع تهیه شده به روش افزودن پودر آمیزان به مذاب آلیاژ و (ج) نمونه مرجع تهیه شده به روش افزودن نانو ذرات به مذاب آلیاژ.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار: (الف) آلیاژ ریختگی آلتراسونیک شده، (ب) نمونه آلتراسونیک شده ساخته شده به روش افزودن نانوذرات به مذاب آلیاژ، (ج) فاز یوتکتیک در آلیاژ ریختگی و (د) فاز یوتکتیک در نمونه آلتراسونیک شده تهیه شده به روش افزودن نانوذرات به مذاب آلیاژ.

علت اصلی این امر به سربتر سرد شدن مذاب (به دلیل قرار گرفتن در حمام آب) و تأثیر امواج آلتراسونیک [۲۶] در این نمونه‌ها است.

علت بروز چنین تغییری را به درستی نمی‌توان بیان کرد ولی احتمال داده می‌شود که نانوذرات از طریق تغییر در غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد می‌تواند باعث ریز شدن دندریت‌ها و تغییر ساختار فاز یوتکتیک شوند. این احتمال نیز وجود دارد که نانوذرات SiC همانند ذرات میکرونی SiC به عنوان مکان‌های ترجیحی برای جوانه‌زنی سیلیسیم یوتکتیک عمل کنند.

۳-۳-۳- سختی نانو کامپوزیت‌های ریختگی
در شکل (۶) سختی دندریت‌های موجود در ریزساختار آلیاژ ریختگی و نانو کامپوزیت‌های مختلف نشان داده شده است. دیده می‌شود که بیشترین سختی متعلق به نانو کامپوزیت مرجع تولید شده با استفاده از پودر آمیزان (a) 1 wt.% SiC (A356-1) است. علت سختی بالای این نمونه به طور قطع مربوط به حضور نانوذرات در درون بازوهای دندریتی زمینه نانو کامپوزیت است.

نتایجی که تا کنون درباره تغییر اندازه دندریت‌ها و فاز یوتکتیک بیان شد، در مورد نمونه‌های آلتراسونیک شده نیز صدق می‌کند (شکل (۵)). همان‌طور که ملاحظه می‌شود دندریت‌ها و سیلیسیم یوتکتیک در این نمونه‌ها بسیار ریزتر از نمونه‌های مرجع است.

پائین بودن سختی در نمونه آلتراسونیک شده دیگر که از توزیع یکنواختی برخوردار است را با توجه به ریزساختار آن بهتر می توان توضیح داد. یکی از تفاوت های چشمگیر در ریزساختار نمونه مرجع و نمونه آلتراسونیک شده، حضور کسر بسیار بیشتر نانوذرات در زمینه نمونه مرجع است. دلیل دیگر می تواند ناشی از حضور مناطق عاری از نانوذرات در نمونه آلتراسونیک شده باشد. بر مبنای مشاهدات شبیه سازی فیزیکی، فرآیند آلتراسونیک در مخلوط معلق نانوذرات در آب دیده شد که خوشه هایی از نانوذرات در سطح آب و دیواره های قالب تجمع می کنند که با گذشت زمان حجم آن ها بزرگ تر می شود. به احتمال زیاد چنین اتفاقی در مذاب آلیاژ نیز رخ می دهد. در حقیقت پس از شکسته شدن خوشه های متشکل از نانوذرات ریز در ته قالب یعنی محلی که حباب زائی شدید است، نانوذرات همراه با جریان صوتی بوجود آمده در مذاب به سطح آمده و با توجه به عدم وجود فرآیند حباب زائی در سطح مذاب و نبود نیروی مکش کافی برای فرو کشیدن نانوذرات ریزتر (به دلیل وزن کم تر) به عمق مذاب، خوشه های نانوذرات مجدداً تشکیل شده و بر روی سطح باقی خواهند ماند و از این طریق نانوذرات ریزتر از مذاب حذف خواهند شد. به احتمال زیاد همزدن مذاب در لحظه آلتراسونیک شدن می تواند به فرو رفتن این خوشه ها کمک کند و سبب افزایش حضور یکنواخت ذرات ریزتر در مذاب و ریزساختار نهایی گردد. این موضوع یعنی اثر همزدن مذاب در حین آلتراسونیک کردن آن در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

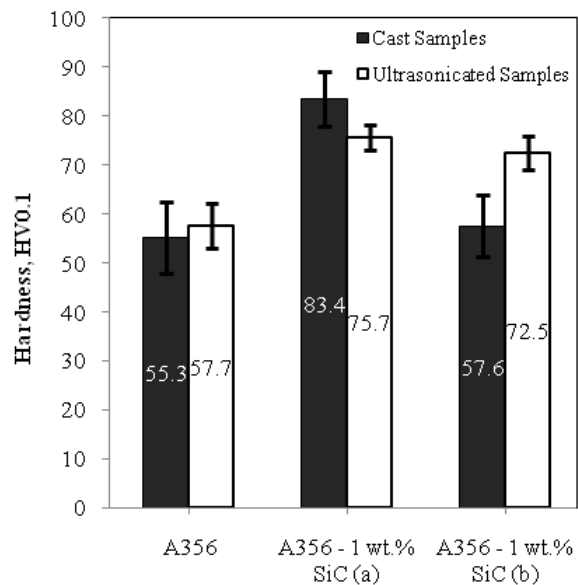
۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل شده از این تحقیق موارد زیر به عنوان مهم ترین دستاوردها ارائه می شود:

- (۱) بدون استفاده از امواج مافوق صوت و ریخته گری گردابی اصلاح شده، حصول نانوکامپوزیت ریختگی غیر ممکن است.

هم چنین در این شکل، سختی نمونه های آلتراسونیک شده نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، سختی نمونه آلیاژ ریختگی و نمونه آلتراسونیک شده به دست آمده از طریق افزودن نانوذرات بیشتر از نمونه های مرجع مربوطه است. اما سختی نمونه آلتراسونیک شده ساخته شده از طریق افزودن پودر آمیزان پائین تر از نمونه مرجع مربوطه است.

در خصوص علت افزایش سختی دندریته ها در آلیاژ ریختگی می توان به ریزتر شدن دندریته ها اشاره داشت. ریزتر بودن دندریته ها به معنای نزدیک تر بودن فازهای یوتکتیک اطراف دندریته ها به یکدیگر است. از آنجائی که ذرات سیلیسیم یوتکتیک از سختی بالا و شکل پذیری کمی برخوردار هستند، در نتیجه در هنگام وارد آمدن نیرو توسط نفوذ کننده الماسی، همانند دژ مستحکم مانع از تغییر شکل پلاستیکی زمینه در صفحه عمود بر راستای اعمال نیرو خواهند شد و بنابراین سختی بیشتری حاصل می شود. دلیل بیشتر بودن سختی در نمونه آلتراسونیک شده، بیشتر به حضور نانوذرات در زمینه و به اندازه ریزتر دندریته ها مربوط است.



شکل (۶): عدد سختی مربوط به بازوهای دندریته در نمونه های مرجع و نمونه های آلتراسونیک شده، منظور از (a) استفاده از روش افزودن پودر آمیزان و منظور از (b) استفاده از روش افزودن مستقیم نانوذرات به مذاب آلیاژ است.

رابطه‌ای $W_{SiC} = a W_{mp}$ است و حل همزمان روابط (۱) و (۲) رابطه‌ای

به صورت زیر برای محاسبه وزن پودر آمیزان حاصل خواهد شد:

$$W_{mp} = bW_{alloy} / (a-b) \quad (۳)$$

با توجه به روابط فوق واضح است که برای تولید ۴۵۰ گرم نانو کامپوزیت با زمینه A356 تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم ($b = 0.01$) به ۴۰۵ گرم آلیاژ A356 و ۴۵ گرم پودر آمیزان نیاز است.

برای محاسبه مقادیر شارژ مربوط به حالت دوم یعنی افزودن مستقیم نانو ذرات SiC به مذاب کافی است که در روابط فوق برای a عدد ۱ قرار داده شود و محاسبات مجدداً تکرار گردد. بنابراین در روش دوم، برای ساخت ۴۵۰ گرم نانو کامپوزیت با زمینه A356 تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم ($b = 0.01$) به ۴۴۵/۵ گرم آلیاژ A356 و ۴/۵ گرم نانو ذرات SiC نیاز است.

۷- مراجع

- [1] S. Mula et al., "On structure and mechanical properties of ultrasonically cast Al-2%Al₂O₃ nanocomposite", Materials Research Bulletin, Vol. 44, pp.1154-1160, 2009.
- [2] S. Donthamsetty et al., "Ultrasonic Cavitation Assisted Fabrication and Characterization of A356 Metal Matrix Nanocomposite Reinforced with SiC, B₄C, CNTs", AIJSTPME, Vol. 2, pp. 27-34, 2009.
- [3] P. D. Michael et al., "Strong, Ductile Magnesium-Zinc Nanocomposites", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 40, pp. 3038-3045, 2009.
- [4] G. Cao et al., "Recent developments on ultrasonic cavitation based solidification processing of bulk magnesium nanocomposites", International journal of metal casting, pp.57-65, 2008.
- [5] G. Cao et al., "Tensile properties and microstructure of SiC nanoparticle reinforced Mg-4Zn alloy fabricated by ultrasonic cavitation-based solidification processing", Metallurgical and MateriasTransactions A, vol. 39A, pp.880-886, 2008.
- [6] G. Cao et al., "Mg-6Zn/1.5%SiC nanocomposites fabricated by ultrasonic cavitation-based solidification processing", Journal of materials science, vol. 43, pp.5521-5526, 2008.
- [7] Y. Yang, X. Li, "Ultrasonic cavitation- based nanomanufacturing of bulk aluminium matrix nanocomposites", Journal of manufacturing science and engineering, vol.129, pp.252-255, 2007.
- [8] X. Li et al., "Ultrasonic-assisted fabrication of metal

(۲) از طریق تحت تأثیر قرار دادن مخلوط مذاب، نانو ذرات بدست آمده از طریق افزودن پودر آمیزان به مذاب آلیاژ می‌توان به توزیع یکنواخت تری از نانو ذرات در زمینه نانو کامپوزیت دست یافت. این مسأله با کاهش کسر حجمی نانو ذرات کوچک تر و حضور مناطق عاری از نانو ذرات در زمینه همراه است.

(۳) نانو ذرات در درون بازوهای دندریتی زمینه نانو کامپوزیت ریختگی توزیع می‌شوند که این مسأله به معنای در بر گرفته شدن نانو ذرات توسط جبهه انجماد است.

(۴) اندازه بازوهای دندریتی و ساختار فاز یوتکتیک در اثر حضور نانو ذرات تغییر می‌کند.

(۵) سختی نانو کامپوزیت ریختگی در حد قابل توجهی بیشتر از سختی آلیاژ ریختگی پایه است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از کارکنان زحمتکش دانشگاه حکیم سبزواری آقایان زرقي، قانعی، مالدار و مدرسی که صمیمانه در این پروژه همکاری داشته‌اند، مراتب تشکر و سپاس خود را بیان کنند.

۶- ضمائم

۶-۱- محاسبه مقدار نانو ذرات و پودر آمیزان برای ساخت نانو کامپوزیت 1 wt.% SiC - A356

ابتدا حالتی در نظر گرفته می‌شود که نانو ذرات به صورت پودر آمیزان به مذاب اضافه شوند. فرض کنید کسر وزنی نانو ذرات SiC در نانو کامپوزیت ریختگی b و در پودر آمیزان a باشد. بنابراین برای ساخت نانو کامپوزیت، دو رابطه زیر که مبتنی بر قانون بقای جرم است، باید برقرار باشد (با در نظر گرفتن عدم تلفات آلیاژ و نانو ذرات):

$$W_t = W_{mp} + W_{alloy} \quad (۱)$$

$$b = W_{SiC} / W_t \quad (۲)$$

در روابط فوق، W_{SiC} و W_{alloy} ، W_{mp} ، W_t به ترتیب وزن نانو کامپوزیت، وزن پودر آمیزان، وزن آلیاژ و وزن نانو ذرات SiC است. با استفاده از رابطه بین W_{SiC} و W_{mp} که به صورت

- [18] M. Rosso, "Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, pp. 364–375, 2006.
- [19] N. Hari Babu et al., "Fabrication of Metal Matrix Composites under Intensive Shearing", *Solid State Phenomena*, Vols. 141-143, pp. 373-378, 2008.
- [20] N. Barekar et al., "Processing of Aluminum-Graphite Particulate Metal matrix composite produced by advanced shear technology", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18(9), pp. 1230-1240, 2009.
- [21] S. Tzamtzis et al., "Processing of advanced Al/SiC particulate metal matrix composites under intensive shearing – A novel Rheo-process", *Composites, Part A*, Vol. 40, pp. 144–151, 2009.
- [22] DM. Stefanescu et al., "Behavior of ceramic particles at the solid/liquid metal interface in metal matrix composites", *Metallurgical Transaction*, Vol. 19A (11), pp. 2847–55, 1988.
- [23] A. Dehghan Hamedan and M. Shahmiri, "Synthesis and characterization of Al–SiC nanocomposite powders with high quantity of SiC prepared by high-energy ball milling", 2nd International congress of nanotechnology, Iran, Tabriz, 2008.
- [24] X. Li et al., "Theoretical and experimental study on ultrasonic dispersion of nanoparticles for strengthening cast Aluminum Alloy A356", *Metallurgical Science and Technology*, Vol. 26-2, pp. 12-20, 2008.
- [25] D. Suneel et al., "Estimation of Cavitation Pressure to Disperse Carbon Nanotubes in Aluminium Metal Matrix Nanocomposites", *AIJSTPME*, Vol. 1(1), pp. 53-62, 2008.
- [26] X. Jian et al., "Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration", *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 893–896, 2006.
- matrix nanocomposites", *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 3211-3212, 2004.
- [9] M. Habibnejad-Korayem et al., "Tribological behavior of pure Mg and AZ31 magnesium alloy strengthened by Al₂O₃ nano-particles", *Wear*, Vol. 268, pp.405–412, 2010.
- [10] M. Habibnejad-Korayem et al., "Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al₂O₃ nano-particles", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 519, pp.198–203, 2009.
- [11] A. Mazahery et al., "Development of high-performance A356/nano-Al₂O₃ composites", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 518, pp.61–64, 2009.
- [12] A. Dehghan Hamedan and M. Shahmiri, "Production of A356–1 wt% SiC nanocomposite by the modified stir casting method", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 556, pp.921-926, 2012.
- [۱۳] ع. دهقان همدان، فرآیند ساخت قطعات نانو کامپوزیت A356-SiC، اداره مالکیت صنعتی، شماره ثبت اختراع ۵۱۱۷۸، مرداد ۱۳۸۷.
- [14] V. Viswanathan, "Challenges and advances in nanocomposite processing techniques", *Materials Science and Engineering R*, Vol.54, issues 5-6, pp.121-285, 2006.
- [15] C. E. Brennan, *Cavitation and Bubble Dynamics*, p. 65, Oxford University, New York, 1995.
- [16] B. Kanegsberg, *Handbook for Critical Cleaning: Cleaning Agents and Systems*, Second Edition, p.250, CRC Press, 2011.
- [17] K. S. Suslick, "Acoustic cavitation and its chemical consequences", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, Vol. 357, pp.335-353, 1999.

۸- پی نوشت

- 1- Ultrasonic cavitation
- 2- Modified stir casting
- 3- Transient cavitation
- 4- Acoustic Streaming
- 5- High energy attritor mill
- 6- Cavitation pressure