

Research Paper

Investigation of Microstructure and mechanical properties of A356/SiC nanocomposites produced via a modified vortex method

Kimiya Enayatmanesh¹,* Hasan saghafian²

1- M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Associate Professors, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Citation: Enayatmanesh K, saghafian H. Investigation of Microstructure and mechanical properties of A356/SiC nanocomposites produced via a modified vortex method. Metallurgical Engineering 2018; 21(3): 207-215 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.64536.1137>

 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.64536.1137>

ABSTRACT

In this research, the influence of various weight percentages of reinforcing particles on the microstructure and mechanical properties of composites was investigated. Aluminum alloy (A356) matrix composites reinforced with 0.5, 1 and 1.5 wt. % nano-particle SiC (about 80nm) were fabricated via stir casting method. Fabrication was performed at 610 °C by the injection of reinforcing particles into molten alloy. The composites were characterized by field emission scanning electron microscope (FESEM) equipped with image analyzer and energy dispersive spectroscopy (EDS) and, Optical microscope (OM). Microstructure evaluation revealed a uniform distribution of nano particles with reduced in weight percentages and the average size of dendritic arms has decreased at least 50 percent. Brinell hardness measurement showed that addition of reinforcing particles gives rise to hardness compared to matrix alloy and the highest increase was for the sample contain 0.5% SiC with 40 percent increase. The porosity percentage in the materials was calculated according to the difference between the theoretical and measured density and revealed that porosity increased about 3% by increasing in amount of SiC particles.

Keywords: Stir casting, Nano-composite, Nano SiC, Microstructure, Hardness

■.....■
* *Corresponding Author:*

Hasan saghafian, PhD

Address: School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (9122179297)

E-mail: saghafian@iust.ac.ir

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت A356/SiC تولید شده به روش گردابی اصلاح شده

کیما عنایت منش^۱، *حسن ثقفیان^۲

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۲-دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

در این تحقیق، تاثیر درصد وزنی نانوذرات سرامیکی بر نحوه توزیع و خواص مکانیکی کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از نانوذرات SiC با متوسط اندازه ذره ۸۰ نانومتر استفاده شد که با درصدهای وزنی ۱/۵ و ۱ و ۱/۵ به مذاب در دمای ۶۱۰°C و به روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده به همراه فشار گاز خنثی تزریق شد. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نشان داد که نانوکامپوزیت‌ها از ریزساختار ظریف‌تری نسبت به آلیاژ تقویت نشده برخوردارند به طوری که میانگین اندازه بازوهای دندریتی تا ۵۰ درصد کاهش یافته است و توزیع ذرات در زمینه با کاهش درصد وزنی بهبود می‌یابد. بررسی سختی نمونه‌ها توسط سختی سنجی برینل نشان داد که وجود ذرات مقاوم‌ساز موجب افزایش سختی نمونه‌های کامپوزیتی شده و بیشترین سختی مربوط به نمونه با ۰/۵٪ وزنی از نانوذرات SiC با افزایش ۴۰ درصدی در سختی است. درصد تخلخل نمونه‌های ریخته‌گری با استفاده از روش ارشمیدس و محاسبه اختلاف چگالی واقعی و ظاهری اندازه‌گیری شد و مشخص شد با افزایش درصد وزنی ذرات SiC از ۱/۵ به ۰/۵، حدوداً ۳٪ به میزان تخلخل موجود در نمونه‌ها افزوده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ریخته‌گری گردابی، نانوکامپوزیت ریخته‌گری، نانوذرات SiC، ریزساختار، سختی

۱. مقدمه

با میکروکامپوزیت آن به ترتیب تا ۴۰ و ۵۰ درصد افزایش داشته است. همچنین حضور ذرات نانو SiC بر خلاف ذرات میکرونی که موجب کاهش استحکام فشاری آلومینیم می‌شود، بهبود ۳۰ درصدی این خاصیت را رقم می‌زند. در این بین نانو ذرات به تدریج جایگزین سایر انواع مقاوم‌سازهای نانو مثل نانو فیبرها، نانو لوله‌ها یا نانو پلیت‌ها شدند. مقاوم‌سازهایی چون SiC, TiC, WC, TaC, AlN و ... جزو پرکاربردترین انواع نانو ذرات هستند [۲]. در بین این مقاوم‌سازها ذرات SiC به علت خواص مکانیکی مانند سختی و استحکام بالا و مقاومت به سایش بسیار مطلوب جذابیت بسیاری دارند [۳، ۴].

استفاده از آلیاژهای آلومینیم در صنایع اتوموبیل و هوا فضا در دهه‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است که علت اصلی آن نسبت استحکام به وزن بالای آن‌ها و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و آلودگی‌های زیست محیطی است. متأسفانه استحکام آلیاژهای آلومینیم در حدود دمای ۲۵۰ درجه افت می‌کند در نتیجه برای کاربری در بسیاری از فعالیت‌های دما بالا غیرقابل استفاده می‌شوند. آلیاژهای

کامپوزیت‌های زمینه فلزی که با ذرات سرامیکی تقویت شده‌اند دارای مدول الاستیک و استحکام بالا، مقاومت خزشی مناسب و خواص همسانگرد هستند. با این وجود ذرات تقویت کننده سرامیکی در زمینه آلومینیم را معمولاً ذرات درشت با ابعاد چند ده میکرون تشکیل می‌دهند. ذرات سرامیکی درشت، به ترک خوردن در حین بارگذاری حساس بوده و می‌توانند موجب انهدام زودرس و کاهش انعطاف پذیری قطعه شوند. کاهش ابعاد ذرات تقویت کننده تا حد نانومتری (زیر ۱۰۰ نانومتر) می‌تواند از خسارات ذکر شده جلوگیری کند [۱]. به طور مشخص، نتایج قابل توجهی در سختی، استحکام، مقاومت به سایش، رفتار خزشی، چقرمگی شکست، مقاومت در برابر شوک حرارتی، افزایش پایداری ابعادی در دمای بالا، تغییر نوع شکست از درون دانه‌ای به بین دانه‌ای و خواص مربوط به تعدیل نیرو به دست آمده است. به عنوان مثال تحقیقات نشان می‌دهد [۲] که استحکام تسلیم و استحکام کششی نانوکامپوزیت Al/SiC در مقایسه

* نویسنده مسئول:

دکتر حسن ثقفیان

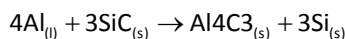
نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: (۹۱۲۲۱۷۹۲۹۷) ۹۸+

پست الکترونیکی: saghfian@iust.ac.ir

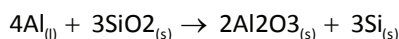
۱. عملیات حرارتی ذرات سپس تزریق پودر [۷].
 ۲. اضافه کردن پودر حاصل از آسیاکاری هم‌زمان ذرات تقویت کننده و زمینه به مذاب حین همزدن [۸].
 ۳. استفاده از افزودنی هایی همچون K_2TiF_6 برای نانو ذرات کاربرد بور و منیزیم برای نانو ذرات آلومینا و کاربرد سیلیسیم و همزدن مکانیکی مذاب، توانایی کاهش کلوخه شدن ذرات را دارد. تحقیقات انجام شده [۹] نشان داده‌اند که اضافه کردن این مواد باعث کاهش کشش سطحی فاز مذاب و یا کاهش انرژی فصل مشترک جامد-مایع و افزایش ترشوندگی ذرات نانو می‌شود. در مورد منیزیم گزارش شده است که بر اساس میزان این ماده واکنش‌های متفاوتی رخ می‌دهد. یکی از این واکنش‌ها، واکنش منیزیم با اکسیژن موجود بر سطح ذرات و در نتیجه از بین رفتن لایه گازی موجود بین ذره و زمینه است که باعث افزایش ترشوندگی ذرات نانو می‌شود [۹]. از طرفی به علت تمایل ذرات SiC به واکنش با Al در حین فرآیند که منجر به تولید Al_4C_3 در فصل مشترک می‌شود، از عناصری همچون منیزیم برای ایجاد مانعی در مقابل تشکیل این فاز در فصل مشترک ذره و زمینه استفاده [۱۱-۱۴].

معادله ۱.

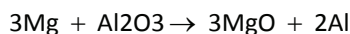


عملیات حرارتی پودر SiC موجب تشکیل یک لایه اکسید سیلیسیم در سطح ذرات شده که همراه با افزودن Mg منجر به واکنش‌های زیر و جلوگیری از تشکیل Al_4O_3 می‌شود.

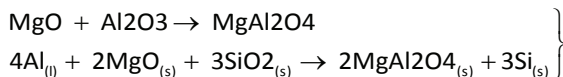
معادله ۲.



معادله ۳.



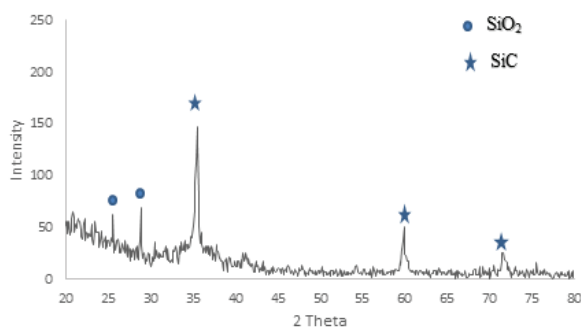
معادله ۴.



در تحقیقات پیشین برای غلبه بر مشکلات عنوان شده از عملیات مکانیکی مانند آسیاکاری مکانیکی بر نانو پودر خام و یا استفاده از امواج اولتراسونیک برای پخش ذرات نانو در مذاب استفاده شده است. مواد آسیاکاری شده مستعد آلوده شدن توسط ابزار و اتمسفر هستند [۱۵]. از محدودیت‌های روش اولتراسونیک احتمال حل شدن پروب داخل مذاب در دمای فرآیند است. برای حل این مشکل روش‌های غیر تماسی که در آن پروب به صورت مستقیم با مذاب فلزی در تماس نیست

آلومینیمی مقاوم شده با نانو ذرات می‌توانند استحکام خود را در دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حفظ کنند به همین دلیل به سرعت کاربردها و روش‌های ساخت جدیدی پیدا می‌کنند [۱]. روش‌های تولید نانو کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی در حال توسعه است. در سال‌های اخیر از چند روش متداول برای تولید این مواد در مقیاس صنعتی استفاده شده است. روش‌های متالورژی پودر، ریخته‌گری و آسیاکاری مکانیکی جزو این دسته از روش‌ها هستند. اما به طور کلی روش‌های تولید نانو کامپوزیت تفاوت چندانی با روش‌های تولید کامپوزیت‌های میکرونی نداشته، هرچند چالش پیش رو در تمامی روش‌های سنتز نانو کامپوزیت‌ها کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده است که موجب کاهش خواص ماده تولید شده می‌شود. بنابراین آنچه که در حال حاضر توجه محققین حوزه‌ی نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی را به خود معطوف کرده است، بهینه سازی روش‌ها به منظور ایجاد یک توزیع یکنواخت از نانو تقویت کننده‌ها درون فاز زمینه است [۵]. در میان روش‌های ارائه شده جهت تولید نانو کامپوزیت‌ها، روش ریخته‌گری از جمله مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها است. روش گردابی که به صورت گسترده‌ای برای تولید کامپوزیت‌هایی با مقاومت میکرومتری مورد استفاده قرار می‌گیرد به تازگی برای پخش مناسب مقادیر کمی از نانو ذرات در مذاب فلزی نیز سازگار شده است [۶]. در روش گردابی یک گرداب در سطح مذاب ایجاد می‌شود و ذرات مقاوم‌ساز از کنار این گرداب چند دقیقه قبل از اینکه مذاب به داخل قالب ریخته شود به آن اضافه می‌شود. در حین همزدن برای تولید کامپوزیت، هم‌زن به دو طریق تاثیرگذار است. ۱: انتقال ذرات به داخل مذاب فلزی. ۲: حفظ ذرات به حالت معلق در مذاب [۶]. اما در نانو کامپوزیت‌ها ذراتی که باید در مذاب شناور بمانند به روی سطح می‌آیند حتی اگر چگالی آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای از مذاب بیشتر باشد. پس چگالی ذرات نانو نقشی در فرآیند تولید نانو کامپوزیت‌ها ایفا نمی‌کنند. این موضوع در کامپوزیت‌هایی با ذرات میکرومتری هم مطرح است اما به علت تنش سطحی بالا در نانو ذرات اهمیت آن در نانو کامپوزیت‌ها بسیار بالاتر خواهد بود [۵]. ایجاد گرداب در حین همزدن از جهت انتقال ذرات به علت اختلاف فشار در سطح مذاب و داخل آن مفید است. هرچند حباب هوا و ناخالصی‌های موجود در سطح نیز طی همان مکانیزم به مذاب داخل می‌شوند که در نتیجه آن خواص کاهش می‌یابد. تهمتن و همکارانش [۶] نشان دادند که حفرات گازی با افزایش سرعت همزدن و دمای مذاب به علت افزایش جذب گاز و حبس آن افزایش می‌یابد.

به دلیل وجود مشکلات عنوان شده افزودن ذرات مقاوم‌ساز نانو به صورت مستقیم به مذاب امکانپذیر نیست و باید در کنار هم‌زن از تکنیک‌های دیگری برای غلبه بر مشکلات استفاده شود [۲]. از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



شکل ۱. آنالیز XRD پودر SiC بعد از عملیات حرارتی

برای جلوگیری از واکنش مذاب با ذرات SiC همچنین افزایش ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب آلومینیم، پودر SiC تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. در این تحقیق پودر نانو در دمای 800°C به مدت ۱/۵ ساعت در اتمسفر اکسیدی حرارت داده شد (شکل ۱).

برای انجام عملیات ذوب شمش اولیه درون کوره‌ای که شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است با دمای 610°C قرار گرفت تا مخلوطی از فاز جامد و مایع به دست آید در این حالت مقدار ۱ درصد وزنی مذاب، منیزیم خالص جهت افزایش ترشوندگی به مذاب اضافه و سپس هم‌زده شد. سپس پودر SiC با اندازه نانومتری به همراه دمش گاز خنثی آرگون از کناره گرداب به مذاب اضافه شد و مذاب با سرعت ۴۰۰ rpm به مدت ۸ دقیقه هم‌زده شد. سپس دمای مذاب تا رسیدن به ذوب افزایش یافت و در نهایت مذاب در حین هم‌زدن و به صورت کفریز درون قالب استوانه‌ای از جنس فولاد که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است، ریخته شد.

سطح نمونه‌های تهیه شده از قطعات ریختگی، توسط سمباده ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ مش پرداخت شد و سپس با استفاده از محلول حاوی آلومینا با اندازه $0.3\ \mu\text{m}$ صیقلی شد. برای بررسی تاثیر ذرات نانو بر اندازه دانه و ریزساختار کامپوزیت نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۲۰ برابر مورد مطالعه قرار گرفت و تصاویر حاصل شده توسط نرم افزار MIP آنالیز شد.

از آنجایی که در این پروژه از نانوذرات SiC با اندازه میانگین ۸۰ نانو استفاده شده است، میکروسکوپ الکترونی روبشی توانایی شناسایی و نمایش آن‌ها را با وضوح تصویری کافی نداشت به این جهت برای بررسی توزیع ذرات مقاوم‌ساز، شناسایی خوشه‌ها و همچنین بررسی ذرات SiC اولیه از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل TESCAN//MIRA (با قدرت تفکیک بسیار بالاتر نسبت به میکروسکوپ‌های معمولی) مجهز به آشکارساز الکترون بازگشتی (BES) و الکترون ثانویه (SE) استفاده شد. در این تحقیق برای سنجی سنجی نمونه‌های ریخته شده از روش برینل با ساچمه فولادی قطر ۲/۵ میلیمتر و نیروی ۳۱/۲

استفاده می‌شود اما محدودیت این روش توانایی تولید پایین آن است زیرا مقدار انرژی صوتی مورد نیاز برای پخش کامل ذرات متناسب است با مقدار ماده در حال تولید. بنابراین، برای تولید صنعتی نیاز به منابع قدرت بزرگ است [۱۶،۴]. اما در هیچ یک از تحقیقات پیشین نتوانسته‌اند به پخش مناسبی از ذرات نانو با اضافه کردن مستقیم آن‌ها به مذاب دست یابند. در تحقیق پیش رو نانوکامپوزیت A356/SiC استفاده از روش گردابی اصلاح شده (استفاده از دو دمای متفاوت برای افزودن و ریخته‌گری مذاب) و افزودن مستقیم ذرات نانو به مذاب با هدف رسیدن به توزیع یکنواختی از ذرات در قطعه و بدون استفاده از روش‌های هزینه بر مکانیکی و اولتراسونیک تولید شد. به این صورت که ذرات به مذاب در حالت نیمه جامد با استفاده از جریان گاز خنثی تزریق شدند. به علاوه، ذرات پیش از وارد شدن به مذاب تحت عملیات حرارتی اولیه قرار گرفتند تا مشکل ترشوندگی آن‌ها تا حدودی برطرف شود. در نهایت نانوکامپوزیت‌هایی با درصدهای وزنی مختلف از تقویت کننده تولید شدند و ریزساختار و خواص مکانیکی آن‌ها جهت مقایسه با خواص زمینه و همچنین بررسی تاثیر درصد تقویت کننده بر این خواص مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل شمش A۳۵۶ آلومینیم که ترکیب آن در جدول ۱ آورده شده است، نانو پودر SiC و منیزیم است. پودر مقاوم‌ساز نانو SiC از شرکت نوترینو با مشخصات موجود در جدول ۲ تهیه شد. برای ایجاد گرداب در مذاب از هم‌زنی تیتانیومی با زاویه پره ۴۵ درجه استفاده شد. جهت جلوگیری از خوردگی احتمالی هم‌زن، قبل از شروع فرآیند، سطح آن با پوششی سرامیکی پوشانده شد. هم‌زن در موقعیتی که ۱/۳ مذاب در زیر آن و ۲/۳ باقی در بالای آن باشد مستقر شد.

جدول ۱. آنالیز ترکیب شمش A356

نوع	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
۳۵۶	۷/۶۳	۰/۲۲	۰/۰۴	-	۰/۳۷
	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb
	-	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۰۲۵

جدول ۲. مشخصات پودر نانو SiC

میکروسختی (kg/mm ²)	چگالی واقعی (g/cm ³)	رنگ	چگالی واقعی	خلوص
۲۸۴۰ ~ ۳۳۲۰	۳/۲۱۶	خاکستری	<۸۰nm	۹۹ %

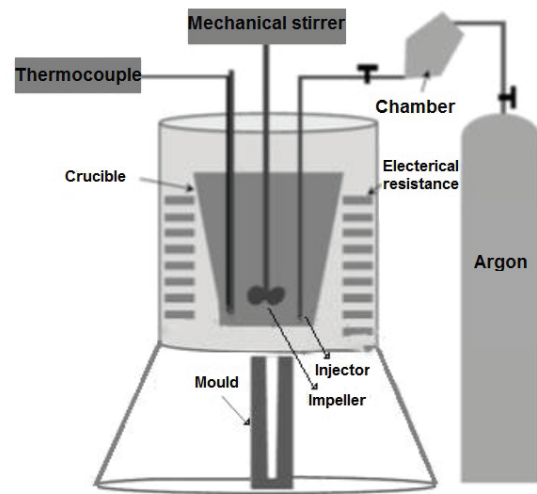
کننده خواص نهایی است، ابتدا به بررسی این پارامتر پرداخته می‌شود. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی FESEM نمونه‌های حاوی ۰/۵ تا ۱/۵ درصد وزنی SiC را نمایش می‌دهد. در این تصاویر مناطق سیاه رنگ زمینه آلومینیمی و قسمت‌های روشن ذرات SiC است. همانطور که در این تصاویر مشاهده می‌شود ذرات نانومتری SiC پخش یکنواختی در زمینه A۳۵۶ دارند. توزیع نانو ذرات در زمینه تحت تاثیر عواملی مختلفی چون دمای ذوب و ریخته‌گری و کسر جرمی ذرات اضافه شده، سرعت همزدن و ... است. فراهم آوردن شرایط برای پخش یکنواخت ذرات جهت رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب بسیار حائز اهمیت است [۱۷]. انتخاب دما در محدوده نیمه جامد در این تحقیق باعث درگیری ذرات جامد اولیه و ذرات سرامیکی شده و وجود نیروی مکانیکی مضاعف خارجی اعمال شده از جانب همزن خود موجب شکسته شدن ذرات سرامیکی آگلومره شده و به پخش یکنواخت‌تر آن‌ها در زمینه کمک کرده و مانع جدایش آن‌ها شده است.

البته با افزایش درصد وزنی مقاوم‌ساز آگلومره‌هایی در کامپوزیت مشاهده می‌شود که این آگلومره‌ها رو به افزایش‌اند. این امر می‌تواند به دو علت رخ دهد.

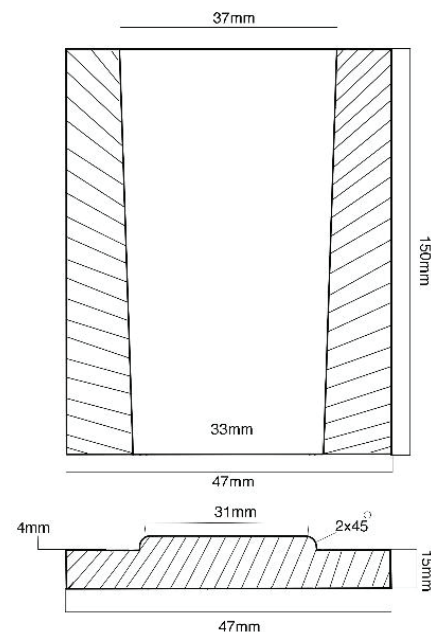
✓ مقاوم‌ساز قبل از ورود به مذاب دارای آگلومره‌هایی است که نمی‌توان از وجود آن‌ها جلوگیری کرد. با افزایش مقدار مقاوم‌ساز مقدار این آگلومره‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه نیروی مکانیکی حاصل از همزدن مکانیکی توانایی از بین بردن و شکستن تمامی این آگلومره‌ها را ندارد [۱۸، ۱۹].

✓ به علت نانومتری بودن ذرات مقاوم‌ساز مصرفی با افزایش درصد وزنی مساحت سطح در نتیجه انرژی سطح افزایش چشمگیری می‌یابد در نتیجه ذرات تمایل دارند با اتصال بهم این انرژی را کاهش دهند که این خود سبب افزایش مقدار آگلومره با افزایش درصد وزنی مقاوم‌ساز می‌شود [۷، ۹، ۲۰].

تصاویر میکروسکوپی نوری و نتایج اندازه‌گیری دندریت کامپوزیت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی SiC در شکل ۵ نشان داده شده است. حضور ذرات نانو موجب ظریف‌تر شدن ساختار می‌شود. ذرات به عنوان مانعی در مسیر رشد دندریت‌ها قرار گرفته و از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کنند. به این صورت که ذرات گرم‌تر نانو (به علت کمتر بودن ضریب انتقال حرارت) زمینه خنک‌تر اطراف خود را به صورت مذاب نگه داشته و مانع رشد آن‌ها با خنک شدن مذاب می‌شوند. [۲۱-۲۳]. با افزایش مقدار ذرات مقاوم‌ساز مقدار آگلومره در کامپوزیت افزایش یافته که در نتیجه از بازدهی ذرات برای کاهش فاصله بازوهای دندریتی کاسته می‌شود که این مطلب با نتایج حاصل از آنالیز تصویری و نتایجی که از بررسی‌های توزیع ذرات در زمینه به دست آمده هم‌خوانی دارد. در جدول ۳ میانگین فاصله بین بازوهای دندریتی برای نمونه‌های ۰-۱/۵ درصد وزنی SiC آورده شده است.



شکل ۲. شماتیک کوره و سیستم هم‌زن مورد استفاده در تحقیق



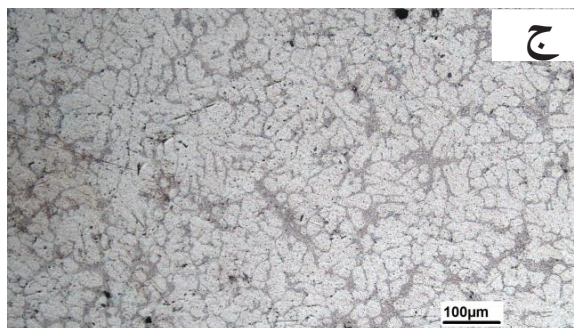
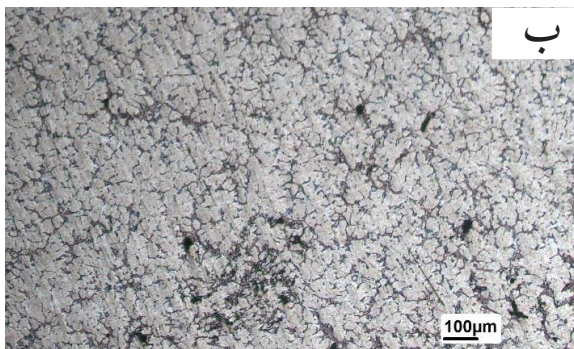
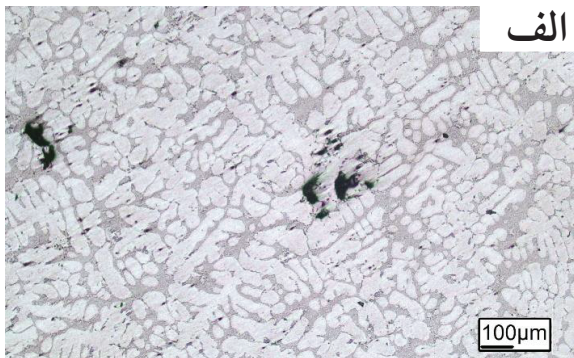
شکل ۳. شماتیک قالب مورد استفاده در این تحقیق

کیلوگرم استفاده شد. با توجه به احتمال وجود ناهمگونی در ساختار نمونه‌ها حداقل ۵ نقطه سختی سنجی شد و میانگین این نتایج ثبت شد. این نقاط به صورت پراکنده از نواحی مرکزی و نزدیک به لبه انتخاب شد تا به صورت یکسان تمامی سطح نمونه مطالعه شود.

۳. نتایج و بحث

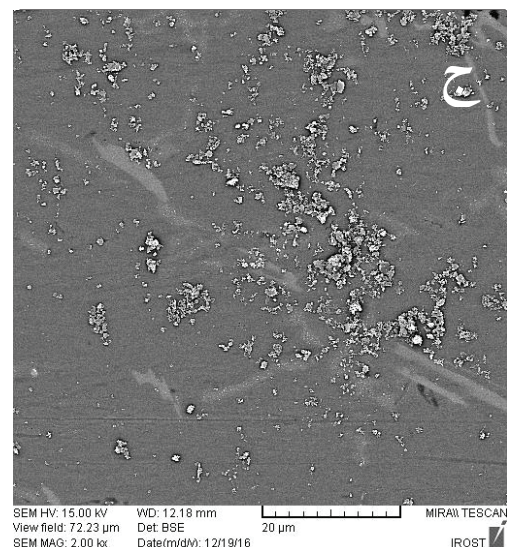
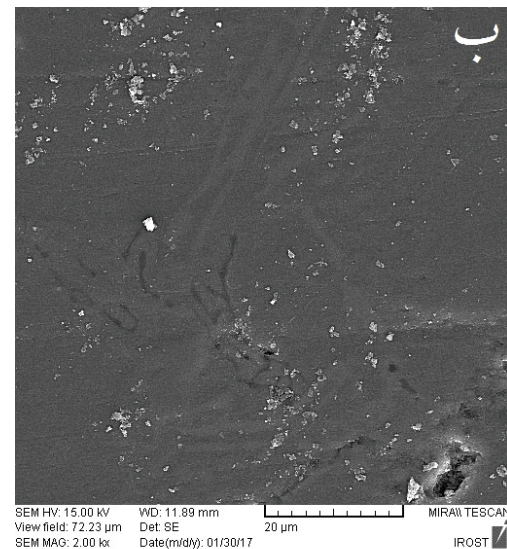
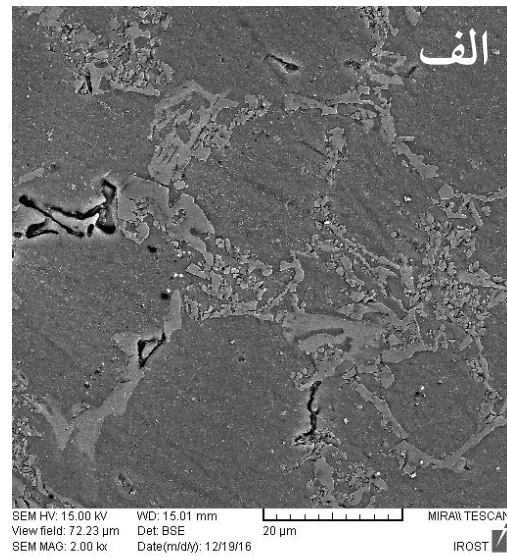
مطالعه ریزساختار

از آنجایی که نحوه توزیع ذرات مقاوم‌ساز در زمینه تعیین

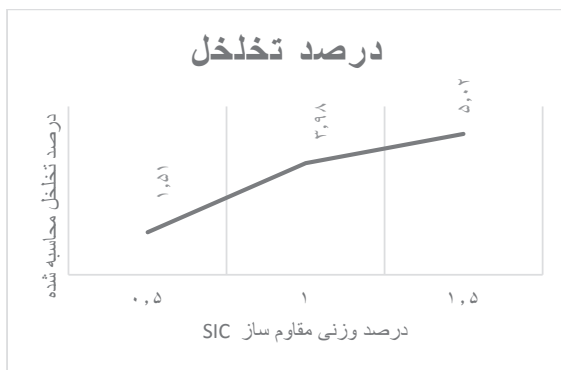


شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری الف: زمینه A356 ب: ۰/۵٪ ج: ۱٪ د: ۱/۵٪ در بزرگنمایی ۲۰ برابر

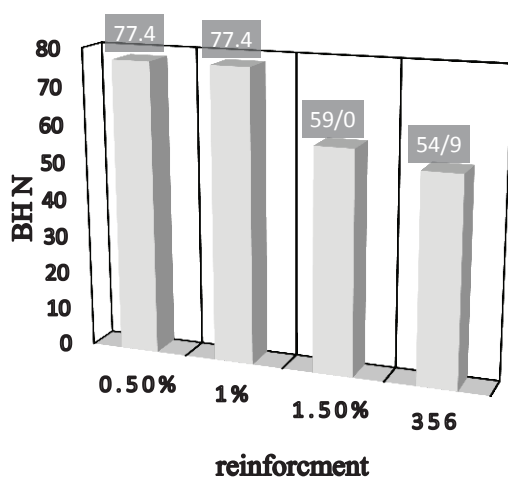
همچنین تحقیقات نشان می‌دهد بر خلاف ذرات میکرونی، نمی‌توان مکان مقاوم‌سازهای نانومتری را در ساختار به صورت دقیق مشخص کرد. زیرا در ذرات میکرونی، نیروی براونی بر توزیع ذرات تاثیر چندانی ندارد اما با کاهش اندازه ذرات تا حد نانو این نیرو (نیروی براونی) تاثیر فراوانی بر مسیر حرکت



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی FESEM از نمونه‌های الف: ۰/۵٪ ب: ۱٪ ج: ۱/۵٪ وزنی نانوکامپوزیت A356-SiC در بزرگنمایی ۲ هزار برابر.



نمودار ۶. درصد تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی با درصد وزنی متفاوت مقاوم‌ساز.



نمودار ۷. سختی نمونه‌های کامپوزیتی اندازه‌گیری شده به روش برینل.

با توجه به نتایج مشخص شد با افزایش درصد مقاوم‌ساز SiC بیش از ۱٪ سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علت این امر افزایش آگلومره در نمونه‌ها است. زیرا تحقیقات نشان می‌دهد نحوه پراکندگی ذرات تأثیر بسیاری بر سختی مواد کامپوزیتی می‌گذارد. از طرفی نشان داده شد که افزایش آگلومره باعث افزایش اندازه دانه در نمونه‌ها شده که طبق روابط هال-پیچ تأثیر مستقیمی بر سختی دارد [۲۷]. در این تحقیق نتایج سختی و اندازه دانه تطابق خوبی نشان می‌دهند.

۴. نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق افزودن مستقیم ذرات به مذاب و بررسی تاثیر درصد مقاوم ساز با انجام فرآیند ریخته‌گری گردابی در دو دمای متفاوت بر نحوه توزیع نانوذرات در زمینه آلومینیمی بدون بهره‌گیری از فرآیندهای معمول و انجام شده برای تولید نانو کامپوزیت‌ها بود، از این رو می‌توان نتایج را به شرح زیر بیان کرد:

جدول ۳. میانگین فاصله بین بازوهای دندرتی در حضور درصدهای مختلف از ذرات SiC

میانگین فاصله بین بازوهای دندرتی (μm)	درصد وزنی SiC
۴۰/۱۰۲	۰% (A356)
۱۹/۶۸	۰/۵ %
۱۹/۷۶	۱ %
۲۱/۸۹	۱/۵ %

ذرات گذاشته و مسیر حرکت آن‌ها را از حالت قابل پیش‌بینی خارج می‌کند. بسته به اندازه ذرات، دمای جبهه انجماد و ... ذرات درون جبهه وارد می‌شوند یا از آن پس زده می‌شوند [۹].

اندازه‌گیری مقدار تخلخل در نمونه‌های کامپوزیتی

وجود تخلخل در قطعات ریخته‌گری امری اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از هم‌زن برای ترکیب کردن و پخش بهتر ذرات مقاوم‌ساز الزامی است اما این خود باعث مکش گاز به درون مذاب می‌شود [۶]. نمودار ۶ درصد تخلخل نمونه‌های ریخته شده در این تحقیق را با توجه به درصد وزنی مقاوم‌ساز نشان می‌دهد. تخلخل در نمونه‌ها می‌تواند ناشی از هوای جذب شده در مذاب در حین هم‌زدن باشد و یا به علت رطوبت همراه با ذرات افزوده شده به مذاب [۲۴]. رطوبت جذب شده در سطح ذرات با عملیات حرارتی قبل از ریخته‌گری تا حد زیادی از بین می‌رود [۲۵]. همانطور که در نمودار مشخص است با افزایش درصد وزنی مقاوم‌ساز درصد تخلخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود درصد تخلخل بستگی بیشتری به مقدار فاز ثانویه دارد تا به هیدروژن محلول در مذاب و با افزایش مقدار مقاوم‌ساز به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. این نتیجه می‌تواند به علت افزایش سطوح در تماس با مذاب باشد.

سختی سنجی

نتایج حاصل از سختی سنجی برینل در نمودار ۷ آورده شده است. به علت وجود ذرات نانومتری و احتمال ناهمگونی در سختی نمونه‌ها روش برینل به دلیل داشتن نفوذکننده‌ای با سطح وسیع‌تر کاربرد بیشتری دارد. وجود ذرات سخت SiC سبب افزایش سختی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به نمونه تقویت نشده می‌شود. این فاز سخت مانع از حرکت نابه‌جایی‌ها شده و باعث سختی نمونه‌ها می‌شود [۲۶]. از طرفی وجود این ذرات سخت به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی با زمینه موجب افزایش تعداد نابه‌جایی‌ها در هنگام انجماد درون نمونه‌های کامپوزیتی شده که این خود موجب افزایش سختی است [۲۵].

۱. نمونه‌های حاوی نانوذرات SiC خواص بهتری را نسبت به زمینه تقویت نشده از خود نشان می‌دهند.

۳. افزودن ذرات مقاوم‌ساز نانومتری باعث ایجاد ریزساختار ظریف‌تری نسبت به نمونه تقویت نشده می‌شود. اما با افزایش درصد وزنی ذرات SiC به علت افزایش آگلومره تاثیر ذرات کاهش می‌یابد.

۴. وجود ذرات سخت SiC سبب افزایش سختی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به نمونه تقویت نشده می‌شود که علت آن کاهش اندازه دانه و جلوگیری از حرکت نابه‌جایی‌ها است.

۱. افزودن ذرات در حالت نیمه جامد و استفاده از هم‌زن مکانیکی جهت ایجاد گرداب و کشش ذرات نانو به داخل مذاب یک راه موثر در تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با توزیع مناسبی از نانوذرات است به صورتی که نیازی به انجام فرآیندهای مکانیکی بر روی پودر خام و یا قطعه تولیدی جهت رسیدن به توزیع یکنواختی از ذرات نانو در زمینه نیست.

۲. با افزایش درصد مقاوم‌ساز نانو، میزان خوشه‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی افزایش یافته و از یکنواختی پخش ذرات در زمینه کاسته می‌شود با این وجود تمامی

References

- [1] F.H.E., "Ceramic Nanoparticles in Metal Matrix Composites", Purdue University, USA, Woodhead Publishing Limited, 2013, Ch 6.
 - [2] C. Borgonovo, D. Apelian, «Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A Critical Review», Materials Science Forum, 2011, Vol 678, pp 1-22.
 - [3] S. Donthamsetty, R.D.Nageswara, "Investigation on Mechanical Properties of A356 Nanocomposites Fabricated by Ultrasonic Assisted Cavitation", Daffodil International University Journal of Science and Technology, 2010, Vol 5(2), pp 48-55.
 - [4] Yong Yang, J.Lan, Xiaochun Li, "Study on Bulk Aluminum Matrix Nano-Composite Fabricated by Ultrasonic Dispersion of Nano-Sized SiC Particles in Molten Aluminum Alloy", Materials Science and Engineering A, 2004, Vol 380, pp 378-383.
 - [5] R. Casati, M. Vedani, "Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles – A Review", Metals, 2014, Vol 4, pp 65-83.
 - [6] Daniel R. Kongshaug, J.B.Ferguson, B.F. Schultz, P.K. Rohatgi, "Reactive Stir Mixing of Al-Mg/Al₂O₃np Metal Matrix Nanocomposites: Effects of Mg and Reinforcement Concentration and Method of Reinforcement Incorporation", Journal of Materials Science, 2014, Vol 49, pp 2106-2116.
 - [7] 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 A, 2011, Vol 528, pp 8765-8771.
 - [8] S. Tahamtan, A.Halvaei, M. Emamy, M.S. Zabihi, «Fabrication of Al/A₂O₆-Al₂O₃ Nano/micro Composite by Combining Ball Milling and Stir Casting Technology" Materials and Design, 2013, Vol 49, pp 347-359.
 - [9] B.F. Schultz, J.B.Ferguson, P.K. Rohatgi, "Microstructure and Hardness of Al₂O₃ Nanoparticle Reinforced Al-Mg Composites Fabricated by Reactive Wetting and Stir Mixing", Materials Science and Engineering A, 2011, Vol 530, pp 87-97.
 - [10] K.Kalaiselvan, N.Murugan, S. Parameswaran, "Production and Characterization of AA6061-B4C Stir Cast Composite" Materials and Design, 2011, Vol 32, pp 4004-4009.
 - [11] K.M. Shorowordi, T.Laoui, A.S.M.A. Haseeb, J.P. Celis, L. Froyen "Microstructure and Interface Characteristics of B4C, SiC and Al₂O₃ Reinforced Al Matrix Composites: a Comparative Study", Journal of Materials Processing Technology, 2003, Vol 142, pp 738-743.
 - [12] R. Mitra, V.S.Chalapathi, R. Maiti, M. Chakraborty "Stability and Response to Rolling of the Interfaces in Cast Al-SiCp and Al-Mg Alloy-SiCp Composites", Materials Science and Engineering A, 2004, Vol 379, pp 391-400.
 - [13] Ali Mazahery, M.O.S, "Plasticity and microstructure of A356 matrix nano composites" Journal of King Saud University, Engineering Sciences, 2013, Vol 25, pp 41-48.
 - [14] C.C. Koch, "Nanostructured Materials: Processing, Properties, and Applications", 2006, Norwich, NY, US, William Andrew.
 - [15] S. Indris, D. Bork, P. Heitjans, "Nanocrystalline Oxide Ceramics Prepared by High-Energy Ball Milling" Journal of Materials Synthesis and Processing, Vol. 8, No. 3-4, 2000, PP 245-250
 - [16] Hao Yu, "Processing Routes for Aluminum based Nano-Composites" Degree of Master of Science, Worcester Polytechnic Institute, Material Science & Engineering, 2012.
 - [17] Omya El-Kady, A.Fathy, "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites", Materials and Design, 2014, Vol 54, pp 348-353.
 - [18] Hai Su, Wenli Gao, Zhaohui Feng, Zheng Lu, "Processing, Microstructure and Tensile Properties of Nano-sized Al₂O₃ Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites", Materials and Design, 2012, Vol 36, pp 590-596.
- [۱۹] صالح تهمتن. "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی Al/A₂O₆-5%Al₂O₃ تهیه شده به روش ریخته‌گری کوبشی". دانشکده مهندسی متالورژی و مواد ۱۳۹۲. دانشگاه تهران.
- [20] P. Padhi, S.Kar, «A Novel Route for Development of Bulk Al/SiC Metal Matrix Nanocomposites», Journal of Nanotechnology, 2011, pp 1-5.
 - [21] J.B. Ferguson, I.Aguirre, H. Lopez, B.F. Schultz, Kyu Cho, P.K. Rohatgi «Tensile Properties of Reactive Stir-Mixed and Squeeze Cast Al/CuO_np-Based Metal Matrix Nanocomposites», Materials Science & Engineering A, 2014, Vol 611, pp 326-332.
 - [22] H.R. Ezatpour, S.A.Sajjadi, M.H. Sabzevar, Y. Huang «Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Al6061-Nanocomposite Fabricated by Stir Casting», Materials and Design, 2014, Vol 55, pp 921-928.
 - [23] A. Lekatou, A.E.Karantzalis, A. Evangelou, V. Gousia, G. Kaptay, Z. Gácsi, P. Baumli, A. Simon, «Aluminium Rein-

- forced by WC and TiC Nanoparticles (ex-situ) and Aluminide Particles (in-situ): Microstructure, Wear and Corrosion Behaviour», *Materials & Design*, 2015, Vol 65, pp 1121-1135.
- [24] J. Hashim, L.Looney, M.S.J. Hashmi, "Metal Matrix Composites: Production by the Stir Casting Method", *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, Vol 92-93, pp 1-7.
- [25] N. Valibeygloo, R.A.Khosroshahi, R.T. Mousavian, "Microstructural and Mechanical Properties of Al-4.5wt% Cu Reinforced with Alumina Nanoparticles by Stir Casting Method", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, Vol 20(10), pp 978-985.
- [26] M.O. Shabani, A.Mazahery, "Application of Finite Element Model and Artificial Neural Network in Characterization of Al Matrix Nanocomposites Using Various Training Algorithms», *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, Vol 43, pp 2158-2165.
- [27] Sukesha V, R.Ranjan, G. Nagesh, K. Sekar, «Fabrication and Study on Mechanical and Tribological Properties of Nano Al₂O₃ and Micro B₄C Particles-Reinforced A356 Hybridcomposites», *India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, 2014, pp 1-6.