

مطالعه اثر نانوذرات اکسید منیزیم بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی اصلاح‌شده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

رضا رشیدی میبدی^۱، علی دهقان همدان^۲، محمدرضا بابائی زارچ^۳، مسعود مهدی زاده رخی^۴

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران، rashidi@meybod.ac.ir

۲- دکتری، شرکت تعاونی نانوآلیاژ کویر یزد، یزد، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در این تحقیق نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم "A357" تقویت شده با نانو ذرات اکسید منیزیم با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در شرایط مختلف نظیر سرعت های متفاوت سرد شدن مذاب و حالت آلیاژ با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی اصلاح‌شده، ساخته شده اند. با انجام آزمایشات متعدد خواص مکانیکی آنها نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، سختی، تغییر طول در هنگام تسلیم، تغییر طول در هنگام شکست، چقرمگی شکست و کارسختی تعیین و مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که با افزودن نانو ذرات اکسید منیزیم به آلومینیوم A357، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت به وجود آمده به مراتب بهتر از آلیاژ پایه است. همچنین مشخص شد که بین ۰/۵ تا ۱ درصد، برای افزایش مدول یانگ در حدود ۱ درصد، برای افزایش چقرمگی و درصد تغییر طول به طول اولیه در حدود ۰/۵ درصد است.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم، نانوذرات اکسید منیزیم، خواص مکانیکی، روش ریخته‌گری گردابی اصلاح‌شده

Study of the effect of magnesium oxide nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of aluminum-based nanocomposites produced by modified stir casting method

Reza Rashidi Meybodi¹, Ali Dehghan Hamadan², Mohammad Reza Babaei Zarch³, Masoud Mahdizadeh Rokhi⁴

1- Associate Professor, Mech. Eng. Dep., Meybod Univ., Meybod, Iran.

2- Ph. D., Yazd Desert Nanoalloy Cooperative Company, Yazd, Iran.

3- MSc Student, Mech. Eng. Dep., Payame Noor Univ., Tehran, Iran..

4- Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

In this research, "A357" aluminum base nanocomposites reinforced with magnesium oxide nanoparticles with weight percentages of 0.5, 1 and 1.5 in different conditions such as different cooling rates of the melt and alloy state made using stir casting method. Numerous tests have determined and evaluated their mechanical properties such as Young's modulus, yield strength, ultimate tensile strength, stiffness, change in length during yield, change in length during failure, fracture toughness and hardness. According to the results, it was found that by adding magnesium oxide nanoparticles to A357 aluminum, the mechanical properties of the resulting nanocomposite are far better than the base alloy. It was also found that the optimal percentage range of magnesium oxide additive to increase the yield and ultimate tensile strength is between 0.5 and 1%, to increase the Young's modulus by about 1%, to increase the the toughness and the elongation is about 0.5%.

Keywords: Aluminum-based nanocomposites, Magnesium oxide nanoparticles, Mechanical properties, Modified Stir casting method.

۶۳

سال ۱۳ - شماره ۱

پیاور و تابستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا





۱. مقدمه

نانوکامپوزیت‌ها از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل خواص عالی مانند استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی توجه دانشمندان را به خود جلب کرده‌اند. بهینه‌سازی فرآیند ساخت و استفاده دقیق از نانوذرات تقویت‌کننده برخی از رویکردهای بهبود خواص مکانیکی است.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی که با نانوذرات تقویت شده‌اند را نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌گویند. هنگامی که ذرات بسیار ریز می‌شوند، اثر متقابل نانوذرات و نایجایی‌ها مهم‌تر شده و تاثیر زیادی روی مکانیزم‌های استحکام‌بخشی در کامپوزیت‌ها می‌گذارند و خواص مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشند [۱]. مشکل اصلی که در ساختن نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد، کم بودن ترشوندگی نانوذرات سرامیکی با مذاب زمینه فلزی است که باعث می‌شود ریخته‌گری به روش‌های متداول قابل انجام نباشد. ذرات ریز تمایل دارند تا خوشه‌ای شده و در یک جا جمع شوند که این امر باعث از بین رفتن یکنواختی توزیع در زمینه و عدم بهره‌برداری بهینه از پتانسیل تقویت‌کنندگی نانوذرات شود [۲]. عواملی نظیر اندازه نانوذرات، نوع ذرات و دمیدن گاز خنثی در هنگام ریخته‌گری می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در فرآیند تولید داشته باشد [۱].

نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی به دلیل ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فردشان نسبت به مواد سنتی، برای کاربردهای مختلف در صنایع هوا و فضا قابل استفاده هستند. در زیر تعدادی از کاربردهای آنها در این صنایع آورده شده است:

۱. **سازه‌های سبک:** نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی نسبت مقاومت به وزن بالا دارند که آنها را برای سازه‌های سبک در کاربردهای هوا و فضا مناسب می‌سازد. با اضافه کردن نانوذرات به ماتریس آلومینیوم،

ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت و سختی به طرز چشمگیری بهبود یافته و همچنین وزن کم حفظ می‌شود. این امر می‌تواند منجر به صرفه جویی در سوخت و افزایش ظرفیت باربری برای هواپیماها شود.

۲. **مدیریت حرارتی:** مدیریت حرارتی در کاربردهای هوا و فضا برای پراکنده کردن گرمای تولید شده توسط قطعات الکترونیکی، موتورها یا سیستم‌های پیشران‌ها بسیار مهم است. نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی می‌توانند ویژگی هدایت حرارتی عالی داشته باشند و توانایی انتقال و تفریق مؤثر گرما را فراهم کنند. این مواد در سیستم‌های خنک‌کننده، مواد واسطه حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده استفاده می‌شوند تا مدیریت حرارتی را بهبود بخشند و از افزایش دما جلوگیری کنند.

۳. **لایه‌های محافظ الکترومغناطیسی:** وسایل هوا و فضا باید از تداخل‌های الکترومغناطیسی که می‌توانند سیستم‌های الکترونیکی حساس را اختلال دهند، محافظت شوند. نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی می‌توانند ویژگی‌های عالی در حوزه محافظت الکترومغناطیسی داشته باشند و موج‌های الکترومغناطیسی را به خوبی تضعیف کنند و محافظت الکترومغناطیسی را فراهم کنند. این مواد در ماهواره‌ها، فضاپیماها و وسایل ابزار دقیق هوافضا استفاده می‌شوند.

۴. **مقاومت در برابر خوردگی:** نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی می‌توانند مقاومت بهتری در برابر خوردگی نسبت به آلومینیوم خالص داشته باشند. این مزیت به خصوص در کاربردهای هوا و فضا که تماس با شرایط محیطی سخت مانند رطوبت، آب شور یا مواد شیمیایی خورنده رخ می‌دهد، مفید است. با اضافه کردن نانوذرات یا

پوشش‌های مقاوم به خوردگی، نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی می‌توانند مقاومت و عمر مفید را بهبود بخشند.

۵. **تقویت ساختاری:** نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی قابل استفاده برای تقویت سازه‌های حساس در هوا و فضا هستند، مانند بال‌ها، بدنه‌ها یا پره‌های پیچشی. اضافه کردن نانوذرات مانند نانو لوله‌های کربنی یا نانوذرات سرامیکی می‌تواند مقاومت، سختی و مقاومت در برابر شکست را در ماده بهبود بخشد. این امر منجر به ساخت قطعات قوی‌تر و مقاوم‌تر می‌شود و عملکرد کلی و ایمنی سیستم‌های هوا و فضا را بهبود می‌بخشد.

همانطور که اشاره شد امروزه از نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم ساخته شده به واسطه بهبود خواص سختی و استحکام کششی، در صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودرو استفاده می‌شود ولی بدلیل قیمت بالای آلومینیوم و خواص مکانیکی نامناسب آلیاژهای ریختگی آلومینیوم در دماهای بالا استفاده از آن را محدود می‌کند. از این‌رو محققین با توسعه کامپوزیت‌های مختلف زمینه آلومینیوم سعی در رفع عیب مذکور داشتند اما در این کامپوزیت‌ها اگر چه استحکام بالاتر از آلیاژ زمینه است ولی افزایش شکل پذیری دیده شده است. با بروز فناوری نانو و ساخت نانوکامپوزیت‌های مختلف مشخص شد که نانوکامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ پایه از استحکام ویژه بالاتر، شکل پذیری حداقل برابر با آلیاژ زمینه، چقرمگی بهتر، مقاومت به سایش و مقاومت به خزش عالی برخوردار می‌باشند. میزان افزایش استحکام در این نانوکامپوزیت‌ها بسیار بیشتر از کامپوزیت‌های مرسوم تقویت شده با ذرات میکرونی است و در درصدهای وزنی یا حجمی بسیار کم (کمتر از ۳٪) تقویت‌کننده بدست می‌آید [۳]-[۹]. با توجه به خواص جالب

توجه نانوکامپوزیت‌ها تلاش‌های بسیاری صورت گرفت تا فرآیند تولید نانوکامپوزیت‌ها تجاری شود. حاصل این کوشش‌ها به وجود آمدن روش‌های مختلف برای تولید نانوکامپوزیت‌های حجیم است.

با وجود حجم بسیار زیاد تحقیقات صورت گرفته در رابطه با ساخت نانوکامپوزیت‌های حجیم، تعداد روش‌های موجود برای تولید قطعات مهندسی پیچیده، بسیار اندک و انگشت‌شمار است. بسیاری از روش‌های کنونی تنها قابلیت تولید شکل‌های ساده را دارند و افزایش مقیاس برخی دیگر نیز بسیار مشکل است. در میان عوامل مختلف، مهمترین عوامل تجاری نشدن ساخت نانوکامپوزیت‌ها، فقدان یک روش اقتصادی برای تولید این مواد و قیمت بالای نانومواد است. از بین روش‌های موجود، فرآیندهای مبتنی بر انجماد از شانس بیشتری برای تولید مقرون به صرفه و انبوه قطعات مهندسی برخوردار می‌باشند [۴]-[۹]. تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با استفاده از فرآیندهای مبتنی بر انجماد در برگرفته دو مرحله مهم است. مرحله اول، تهیه مخلوط مذاب - نانوذرات، به نحوی که نانوذرات به صورت ذرات مجزا و یکنواخت در مذاب معلق شده باشند و مرحله دوم، کنترل شرایط انجماد به نحوی که نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت نهائی به صورت یکنواخت پراکنده شده باشند؛ یا به عبارت دیگر فراهم کردن شرایط انجماد برای دربرگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد، است. با بررسی منابع موجود مربوط به ساخت نانوکامپوزیت‌های مختلف با استفاده از روش‌های مبتنی بر انجماد مشخص می‌شود که مهم‌ترین و مشکل‌ترین مرحله برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها، مرحله اول می‌باشد که علت آن، ترشوندگی ضعیف نانوذرات توسط مذاب فلزات و کافی نبودن نیروهای موجود برای شکستن خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات مربوط است. با توجه به





تحقیقات صورت گرفته، مرحله دوم یعنی در برگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد، مشکلی برای ساخت محسوب نمی‌شود. در حقیقت یکی از موضوعات حل نشده در خصوص تولید نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از روش‌های مذکور، مکانیزم در برگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد در سرعت‌های انجماد بسیار کمتر از سرعت‌های انجماد مورد نیاز برای دربرگرفته شدن ذرات میکرونی توسط جبهه انجماد است. بنابراین می‌توان گفت که بیشتر فعالیت‌های صورت گرفته در رابطه با ساخت نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی با کمک این نوع روش‌ها بر روی مرحله اول متمرکز شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش حباب‌سازی مافوق صوت و روش ریخته‌گری گردابی اشاره کرد. روش حباب‌سازی مافوق صوت قابلیت فوق‌العاده‌ای در تولید نانو کامپوزیت‌های ریختگی زمینه آلومینیوم و منیزیم دارد، اما با بررسی ریزساختار این نانو کامپوزیت‌ها مشاهده شده است که هنوز خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات در زمینه حضور دارند. استفاده از توان‌های بالا و زمان‌های طولانی بر روی مخلوط مذاب - نانوذرات که موجب آلوده شدن مذاب توسط ماده به کار رفته در ساخت پروب، کاهش عمر پروب و مصرف انرژی بالا در این روش شده و همچنین کاهش اثرات غیرخطی امواج مافوق صوت در مذاب با دور شدن از نوک پروب که باعث مشکلات بسیاری در افزایش مقیاس شده را می‌توان از معایب این روش بیان کرد [۴]-[۶].

در روش ریخته‌گری گردابی، با توجه به عدم توانایی این روش در شکستن کلوخه‌ها و خوشه‌های موجود در پودر خام نانوذرات، محققین برای ساخت مخلوط مناسب مذاب - نانوذرات، از روش‌ها و راهکارهایی نظیر بهبود ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب از طریق افزودن عناصر فعال به مذاب، ایجاد پوشش مناسب بر روی

سطح نانوذرات [۱۰]، شکستن کلوخه‌ها از طریق افزودن نانوذرات به مذاب خمیری [۱۱] و اختلاط تحت فشار پودر نانوذرات خام با پودر یک فلز نرم [۳]، [۸] و [۹] استفاده کرده‌اند.

در خصوص ریخته‌گری گردابی اصلاح شده که کارایی آن برای ساخت نانو کامپوزیت‌های پایه منیزیم و آلومینیوم به اثبات رسیده، به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر ریخته‌گری گردابی از اهمیت بالا برخوردار است. در این روش می‌توان در مخلوط پودر از عناصر فعال استفاده کرد و از این طریق ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب را بهبود بخشید و با افزودن مخلوط پودر به مذاب کامل و با استفاده از عمل همزدن می‌توان به ماده نانو کامپوزیت دست یافت. مانند بقیه روش‌ها، در این روش نیز حذف کامل خوشه‌های نانوذرات تاکنون گزارش نشده است [۳]، [۸] و [۹].

تحقیقات انجام شده در این زمینه محدود است. در ادامه چند نمونه از آخرین تحقیقاتی که در این موضوع انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. هریستا و همکاران اثر افزودن Al_2O_3 بر ویژگی‌های کامپوزیت‌های تقویت شده A356 را بررسی کردند [۱۲]. آنها سعی داشتند با افزودن Al_2O_3 به عنوان تقویت کننده با کسر حجمی‌های متفاوت از ۲ تا ۱۵ درصد و با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی، مقدار بهینه افزودنی Al_2O_3 جهت تقویت و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت را تعیین کنند. آنها در نهایت نتوانستند مقدار افزودنی مناسب برای افزایش سختی کامپوزیت را بدست آورند.

حداد و همکاران [۱۳] با توجه به ویژگی‌های ذرات کربنی، از نانوصفحه‌های گرافن و نانولوله‌های کربنی به عنوان ذرات تقویت کننده با درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ در آلیاژ اولیه A356 استفاده کردند. آنها از همزن گرافیتی با سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه، در حالت

پیوسته در دمای ۷۴۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ دقیقه استفاده کردند. آنها گزارش کردند که استحکام کششی و فشاری در نتیجه افزایش مقادیر تقویت کننده افزایش می یابد. حداکثر افزایش ۲۸ و ۵۵ درصد به ترتیب برای مقاومت کششی و فشاری با استفاده از ۰/۱ درصد وزنی گرافن گزارش شد. همچنین نانولوله کربنی با ۰/۱ درصد وزنی منجر به افزایش سختی نانوکامپوزیت به میزان ۳۳ درصد نسبت به آلیاژ بدون تقویت کننده شد.

پراکاش و مانیماران [۱۴] به بررسی اثرات افزودن کاربید سیلیکون (SiC) به آلیاژ Al6061 پرداختند. کامپوزیت ها با فرآیند ریخته گری گردابی و با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی SiC ساخته شدند. کامپوزیت های ساخته شده با آزمایش های مورفولوژیکی و مکانیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از نتایج بدست آمده مشخص شد که افزودن SiC به میزان ۷ درصد وزنی باعث بهبود خواص می شود.

لاکشمناان و آمیث [۱۵] خواص سایشی نانوکامپوزیت های زمینه فلزی آلیاژی Al-Mg-Si تقویت شده با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد حجمی نانو ذرات SiC_p ساخته شده با روش ریخته گری به کمک اولتراسونیک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها رفتار سایشی لغزشی خشک نانوکامپوزیت ها با تغییر بار نرمال، فاصله لغزش، سرعت لغزش و کسر حجمی نانو SiC_p را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نرخ سایش نانوکامپوزیت ها به شدت کمتر از آلیاژ تقویت نشده بود و نرخ سایش با افزایش محتوای تقویت کننده در زمینه فلزی کاهش می یابد. همچنین مشاهده شد که افزایش بار اعمال شده، سرعت لغزش و فاصله لغزش، نرخ سایش نانوکامپوزیت ها و آلیاژ یکپارچه را افزایش می دهد.

کاندمیر [۱۶] ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های A357/SiC ساخته شده با

پراکندگی مبتنی بر کاویتاسیون اولتراسونیک نانوذرات آسیاب شده را مورد بررسی قرار داد.

زنگ و همکاران [۱۷] از نانوذرات SiC برای تقویت آلیاژ آلومینیوم با روش متالورژی پودر استفاده کردند. نتایج تحلیل های آنها نشان داد که با افزودن ۱، ۲، ۳ درصد وزنی نانوذرات SiC، سختی به ترتیب حدود ۲۶، ۳۴ و ۴۰ درصد و استحکام کششی ۲۲/۳ درصد، ۲۸/۶ درصد و ۲۹/۳ درصد افزایش می یابد.

قاسمی و همکاران [۱۸] خواص مکانیکی کامپوزیت های آلومینیوم/نانو سیلیس را از طریق انجام آزمایش ها و شبیه سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها نمونه های کامپوزیت آلومینیوم/نانو سیلیس با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات سیلیس را از طریق متالورژی پودر تهیه کردند. آزمایش کشش تک محوری نمونه های نانوکامپوزیت نشان داد که افزودن یک درصد نانو سیلیس باعث افزایش قابل توجه خواص مکانیکی نانوکامپوزیت نسبت به آلومینیوم خالص می شود.

آزگیری و همکاران [۱۹] از الیاف کربن خرد شده (CFs) همراه با کسرهای وزنی مختلف از نانورس (۱-۰/۵٪) در ماتریس آلومینیوم AA6026 برای ساخت نانوکامپوزیت های هیبریدی مبتنی بر آلومینیوم (AHNC) استفاده کردند. آنها نمونه های AHNC را با آنالیز ریزساختاری، خصوصیات مکانیکی، خستگی و مقاومت خوردگی مطابق با دستورالعمل های ASTM مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که استحکام کششی با افزودن ۳ درصد نانورس تا حداکثر ۲۱۲/۴۶ مگاپاسکال افزایش می یابد و با افزایش درصد نانو رس به دلیل عدم همگنی در توزیع، تجمع و عدم اتصال نانوذرات کاهش می یابد. به طور مشابه، میکروسختی با افزودن ۳ درصد نانورس افزایش می یابد و پس از آن کاهش می یابد. جذب انرژی بالاتر با ترکیب ۳٪ نانورس تقویت شده به دست آمد و استحکام



خمشی بهبود قابل توجهی یافت. با افزودن CFs و نانورس، استحکام خستگی کامپوزیت هیبریدی به دلیل CF های انعطاف پذیر و نانورس های سطح بالا افزایش یافت.

الشماری و همکاران [۲۰] اثر منیزیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Al-4Cu-xMg-0.3Ag (که در آن $x = 0/4$ و $1/4$) را بررسی کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که تغییر در غلظت منیزیم از $0/4$ به $1/4$ درصد وزنی تأثیر قابل توجهی در افزایش سختی، تنش کششی نهایی و ازدیاد طول آلیاژ دارد. بر اساس تجزیه و تحلیل ریزساختاری، افزایش خواص مکانیکی با در نظر گرفتن نقش دوگانه محتوای Mg در آلیاژ پایه توضیح داده شد. از یک طرف، اندازه بزرگ اتم منیزیم اثر سخت شدن مخلوط جامد را ایجاد می کند، در حالی که از طرف دیگر، محتوای بالای منیزیم باعث تشکیل رسوب فاز دوم نوع S (Al_2CuMg) با مورفولوژی های مختلف می شود. این فازهای هم رسوبی درون ماتریس مانعی برای سر خوردن نابجایی ایجاد می کنند و در نتیجه استحکام مکانیکی و کرنش سختی را افزایش می دهند.

جوسح [۲۱] از فناوری فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) برای بهبود خصوصیات مکانیکی آلیاژهای منیزیم با نانوذرات تقویت کننده آلومینا استفاده کرد. او با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) تلاش برای بهینه سازی پاسخ هایی مانند مقاومت کششی نهایی (UTS)، درصد کشیدگی (E) و سختی (MH) در ناحیه جوش اتصالات FSPed را انجام داد. هنگامی که اتصالات جوشی فلز پایه بدون تقویت با اتصالات FSPed مقایسه شدند، مقادیر UTS، E و MH بیشترین بهبود را نشان دادند.

ونکاتش و همکاران [۲۲] کامپوزیت‌های آلومینیومی حاوی نانو ذرات تقویت کننده SiC با درصدهای وزنی $0/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 را با استفاده از

روش ریخته‌گری گردابی و به کمک اولتراسونیک ساخته و آنها را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی کامپوزیت های آلومینیومی تقویت شده با SiC به طور قابل توجهی افزایش می یابد و حداکثر سختی و استحکام کششی نهایی برای کامپوزیت تقویت شده با $1/5$ درصد وزنی SiC به دست آمد.

مرور مقالات منتشر شده در این زمینه که به مرتبط ترین آنها در این بخش اشاره شد، نشان می دهد که مطالعه آزمایشگاهی جامعی در خصوص اثر نانوذرات اکسید منیزیم بر روی خواص مکانیکی آلومینیوم A357 که با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده تهیه شده، انجام نشده است. همچنین اثر متغیرهای روش ساخت آلیاژ (روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده) نظیر سرعت های متفاوت سرد شدن مذاب و حالت آلیاژ بر روی خواص مکانیکی آلیاژ بدست آمده تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته است و بررسی آن ضرورت دارد. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا تأثیر نانوذرات اکسید منیزیم با درصدهای وزنی مختلف بر روی خواص نانوکامپوزیت‌های ریختگی زمینه آلومینیوم "A357" به صورت جامع و کامل بررسی شود. به همین منظور نانوذرات اکسید منیزیم با درصد وزنی های $0/5$ ، 1 و $1/5$ درصد تحت شرایط مختلف نظیر سرعت های متفاوت سرد شدن مذاب و حالات مختلف آلیاژ، ساخته شده و خواص سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم، تغییر طول در هنگام تسلیم، تغییر طول در هنگام شکست، مدول یانگ، چقرمگی شکست و کارسختی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. پارامترهای روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده

در فرآیند ریخته‌گری گردابی پارامترهای بسیاری وجود دارند که بر روی توزیع و پخش ذرات تقویت‌کننده در مذاب آلیاژ تأثیرگذارند. گرچه توزیع نهائی ذرات تقویت‌کننده علاوه بر توزیع ذرات در مذاب به شرایط انجماد بستگی دارد ولی توزیع نامناسب ذرات در مذاب سبب بدتر شدن توزیع در قطعه پس از انجماد خواهد شد حتی اگر شرایط انجمادی در بهترین وضعیت باشد. بنابراین قبل از هر چیز باید به موضوع بهینه کردن پارامترهای این فرآیند پرداخته شود. به طور کلی این پارامترها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول، پارامترهای مربوط به همزن بوده که مورد توجه بسیاری از محققین است و به روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۳]. این پارامترها شامل نوع همزن، ویژگی‌های هندسی همزن نظیر تعداد تیغه‌های پره همزن، قطر پره، عرض پره، زاویه تیغه پره نسبت به محور همزن، سرعت همزدن، جهت چرخش همزن، موقعیت قرارگیری پره همزن نسبت به کف ظرف یا بوته، زمان همزدن و حضور موج‌گیر در ظرف می‌باشند. گروه دوم، پارامترهای مربوط به مواد که شامل ترکیب آلیاژ، دمای مذاب، حالت مذاب، نوع، اندازه، شکل و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، عملیات گرمائی انجام شده بر روی تقویت‌کننده قبل از افزودن آن‌ها به مذاب، جنس قالب و عملیات گرمائی انجام شده بر روی قالب و اتمسفر کوره است. این پارامترها بر روی گرانیروی مخلوط مذاب و ذرات، ترشوندگی ذرات توسط مذاب، نحوه انجماد کامپوزیت، واکنش شیمیائی ذرات با مذاب و ... تأثیر گذار می‌باشند [۲۴].

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تأثیر نانوذرات بر خواص نانوکامپوزیت‌های ریخته‌گی زمینه آلومینیوم است، بنابراین قبل از هر چیز بایستی از عوامل تأثیرگذار بر نحوه توزیع نانوذرات در این روش اطلاع داشت.

از مهمترین پارامترهای این روش سرعت همزدن، سرعت سرد شدن، درصد نانوذره، دمای مذاب و نحوه افزودن نانوذرات به مذاب است. در این تحقیق سرعت هم زدن یک مقدار ثابت، ۷۵۰ دور بر دقیقه، انتخاب شده است. برای تغییر سرعت سرد شدن به این صورت عمل شده که دو قالب گرافیتی مجزا تهیه گردیده که یکی تا دمای ۲۰۰ درجه گرم شده و دیگری در دمای محیط می‌ماند و سپس مذاب در هر دو قالب ریخته می‌شود. همچنین از نانوذرات با سه درصد مختلف، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد، استفاده شده است. دمای مذاب روی ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌باشد. برای اضافه کردن نانوذرات ابتدا آمیزانی از نانوذرات و منیزیم تهیه شده و نانوذرات از طریق پودرهای آمیزان به مذاب افزوده شده‌اند. برای بررسی موثر بودن روش مذکور در تلقیح نانوذرات به مذاب و همچنین بررسی میزان بهبود خواص، از آزمون‌های سختی‌سنجی و کشش استفاده می‌شود. این بررسی‌ها برای نانوکامپوزیت‌های مختلف و آلیاژ زمینه در حالت ریخته‌گی صورت گرفته است.

۳. ترکیب و نحوه ساخت نانوکامپوزیت

در این تحقیق، آلیاژ "A357" با ترکیب عنصری مشخص شده در جدول ۱ به عنوان زمینه نانوکامپوزیت انتخاب شده است. این ماده از جمله آلیاژهای ریخته‌گی Al-Si است که در صنایع نظامی، هوافضا و خودروسازی کاربرد فراوان دارد. همچنین در این پژوهش از نانوذره اکسید منیزیم (MgO) با خلوص بالای ۹۹ درصد و اندازه متوسط ۲۰ نانومتر با سه درصد وزنی مختلف استفاده شده است.

جدول ۱ - ترکیب عنصری آلیاژ زمینه، A357

Mg	Si	Ti	Be	Al
۰/۶۰	۷/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۹۲/۲۵



همانطور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، برای تزریق ابتدا مخلوطی از نانوذرات و یک پودر فلزی تهیه و سپس مخلوط حاصل به مذاب افزوده می‌شود. در اینجا از یک نوع مخلوط پودری یا آمیزان استفاده می‌شود. آمیزان از پودر منیزیم و ۲۰ درصد وزنی نانوذره تشکیل شده است. برای ساخت آمیزان ابتدا پودرهای نانوذرات به میزان موردنظر به ۲۵۰ سی‌سی الکل اتانول ۹۶ درصد اضافه شده و مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه اولتراسونیک می‌گردد. سپس پودر منیزیم به اندازه موردنظر کم‌کم به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه اولتراسونیک می‌گردد. در نهایت مخلوط بدست آمده به مدت ۱ ساعت اولتراسونیک می‌شود. برای تهیه آمیزان از دستگاه آسیاب پر انرژی Attritor استفاده شده است (شکل ۱). آسیابکاری در سرعت ۴۴۸ دور بر دقیقه با فرکانس ۱۶ هرتز، در دمای ۷- درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۹۰ دقیقه انجام گرفته است. نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر ۲۰ و وزن پودر ۵۰ گرم در نظر گرفته شده است. آسیابکاری در حالی که محفظه آسیاب توسط جریان مداوم آب خنک می‌شود، صورت گرفته است.



شکل ۱ - آسیاب پر انرژی Attritor مورد استفاده در تهیه پودرهای آمیزان

پس از اتمام این مرحله، مخلوط حاصل در آون و در دمای ۶۵ درجه به مدت ۵ روز قرار گرفته تا تمام الکل موجود در آن خشک شده و سپس پودر آمیزان تهیه گردد. برای ساخت نمونه نانوکامپوزیت ۵/۰ درصد وزنی ابتدا محاسبات مربوطه صورت گرفته است. فرض کنید کسر وزنی نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی b و در پودر آمیزان a باشد. بنابراین برای ساخت نانوکامپوزیت، دو رابطه زیر که مبتنی بر قانون بقای جرم است با در نظر گرفتن عدم تلفات آلیاژ و نانوذرات باید تأمین گردد:

$$W_t = W_{mp} + W_{alloy} \quad (1)$$

$$b = W_{MgO} / W_t \quad (2)$$

در روابط فوق، W_t ، W_{mp} ، W_{alloy} و W_{MgO} به ترتیب وزن کل نانوکامپوزیت، وزن پودر آمیزان، وزن آلیاژ و وزن نانوذرات MgO است. با استفاده از رابطه بین W_{mp} و W_{MgO} که به صورت $W_{MgO} = a W_{mp}$ است و حل همزمان روابط (۱) و (۲) رابطه‌ای به صورت زیر برای محاسبه وزن پودر آمیزان حاصل خواهد شد:

$$W_{alloy} = b W_{mp} / (a - b) \quad (3)$$

برای هر مرحله ساخت نانوکامپوزیت شامل نانو ذره اکسید منیزیم و یک درصد معین ۲۵۰ گرم شمش آلومینیوم A357 انتخاب کرده و در بوتله گرافیتی قرار داده تا در کوره ذوب شود. این تحقیق از کوره مقاومتی که از بالا و به صورت عمودی بارگذاری می‌شود، برای ذوب شمش ریختگی و تهیه مخلوط نانوذرات و مذاب استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از کوره مقاومتی استفاده شده نشان داده شده است.

ابتدا آلومینیوم تا دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود تا ذوب کامل شود و همه نقاط مذاب به یک ساختار مولکولی واحد برسند و

۴- آماده‌سازی و نام‌گذاری نمونه‌ها

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش سختی سنجی از انتهای استوانه‌های کوچک شکل گرفته در کنار نمونه اصلی با ارتفاع ۱ سانتی‌متر بریده شد و پس از طی مراحل متالوگرافی استاندارد سطح آنها در چندین مرحله پولیش شده و سختی سنجی برینل مطابق با استاندارد ASTM E10 روی آنها انجام گرفت. در این روش، سختی برینل با فشار دادن یک ساچمه از جنس فولاد سخت شده یا کاربید با قطر معلوم تحت یک بار مشخص به یک سطح و اندازه‌گیری قطر فرورفتگی با میکروسکوپ تعیین می‌شود.

برای بررسی خواص کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و مقایسه آنها با خواص آلیاژ ریختگی از آزمایش کشش که توسط دستگاه Zwick/Roell Z250 انجام پذیرفت، استفاده گردید. در تمامی آزمایشات، سرعت حرکت فک متحرک ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM E8M-01 تهیه شدند (شکل ۳). برای هر نمونه ۵ مرتبه آزمایش کشش انجام گرفت. همچنین به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های پولیش شده با محلول ۰/۵ درصد HF به مدت ۳۰ ثانیه اچ و در نهایت در الکل اتانول ۹۶٪ شسته شده‌اند.

برای سهولت در ارائه نتایج از یک سیستم نام‌گذاری با حروف لاتین و مطابق با شکل ۳ استفاده شده است. سلول اول از سمت چپ می‌تواند یکی از ۴ حالت، a، b، c، یا n را اتخاذ کند که هر کدام از آنها نشان دهنده درصد نانوذره اضافه شده و درصد منیزیم موجود در آلیاژ بوده و مطابق با جدول ۲ است. حرف M در سلول دوم برای آلیاژ شامل نانوذره اکسید منیزیم که به آلیاژ پایه اضافه شده است استفاده می‌شود و



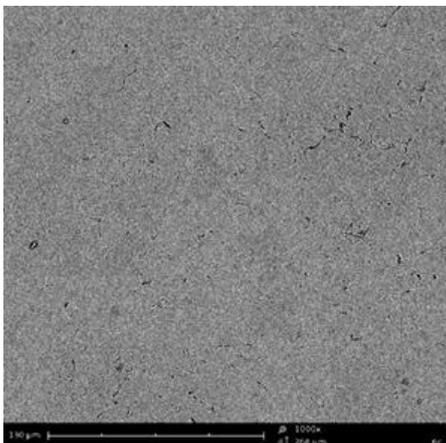
شکل ۲ - کوره مقاومت الکتریکی مورد استفاده

سپس تا دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد با گذشت زمان و کاهش حرارت کوره سرد می‌شود تا آلومینیوم به صورت نیمه‌جامد یا خمیری درآید.

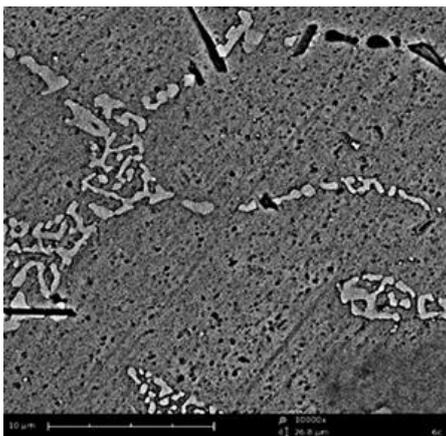
سپس آمیزان از طریق قیف تزریق و تحت گاز آرگون به مذاب اضافه شده و با هم‌زن، دریل دیجیتالی با پره گرافیتی ۴ پره با زاویه ۴۵ درجه پادساعت‌گرد، به هم زده می‌شود. این فرآیند بسته به درصد نانوذره تزریقی از ۲۰ دقیقه تا ۱ ساعت متغیر است. پس از اتمام تزریق پودر آمیزان، دما تا ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد که دمای ذوب آلومینیوم است بالا می‌آید و دوباره به هم زده می‌شود. پس از آن دما را دوباره بالا برده و یک بار در ۷۵۰ درجه و یک بار در ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد آن را به هم زده و سپس مذاب در دو قالب گرافیتی مجزا، که یکی تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده و دیگری هم‌دما با محیط است، ریخته می‌شود. چند دقیقه پس از انجماد، قالب با دمای پایین را باز کرده و نمونه‌های ریخته‌گری شده در هوای محیط قرار می‌گیرد تا سرعت سرد شدن آن تقریباً ثابت بماند و به قالب پیش‌گرم شده اجازه داده می‌شود تا با نرخ سرد شدن طبیعی خود سرد شود و پس از آن نمونه خارج شده و از این طریق دو نمونه با سرعت‌های سرد شدن متفاوت ایجاد می‌گردد.



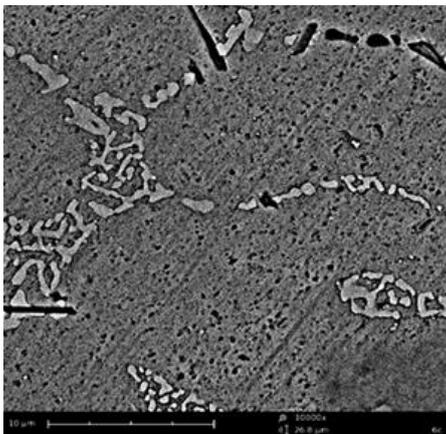
این تصاویر نشان‌دهنده فاز یوتکتیک لایه‌ای با لایه‌های سیلیسیم درشت است که می‌تواند یکی از دلایل ضعیف‌تر بودن استحکام کششی آلیاژ خالص در مقایسه با نانو کامپوزیت‌ها باشد.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۴- تصویر SEM آلیاژ خالص A357 با بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰۰، (ب) ۱۰۰۰۰، (پ) ۳۰۰۰۰ برابر

حرف P برای آلیاژ بدون نانوذره مورد استفاده قرار می‌گیرد. سلول سوم می‌تواند یکی از دو حالت S و یا L را داشته و همچنین سلول چهارم می‌تواند یکی از دو حالت H و یا L را اتخاذ کند که در جدول ۲ مشخصه آن بیان شده است.

سرعت سرد شدن	حالت مذاب در لحظه افزودن آمیزان	M یا P	درصد
--------------	---------------------------------	--------	------

شکل ۳- نحوه نام گذاری نمونه‌ها

جدول ۲: معرفی سلول‌های شکل ۳

a	۰/۵ درصد وزنی نانوذره و ۲/۴۹۹۹ درصد وزنی منیزیم
b	۱ درصد وزنی نانوذره و ۴/۵۲۰۸ درصد وزنی منیزیم
c	۱/۵ درصد وزنی نانوذره و ۶/۵۶۰۸ درصد وزنی منیزیم
n	صفر درصد وزنی نانوذره و صفر درصد وزنی منیزیم
P	آلیاژ بدون نانوذره
M	نانوذره اکسید منیزیم
S	حالت نیمه‌جامد برای آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان
L	حالت مذاب برای آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان
H	سرعت سرد شدن بالا برای مذاب
L	سرعت سرد شدن پایین برای مذاب

۵- تحلیل نتایج تجربی

شکل ۴ تصاویر SEM گرفته شده از آلیاژ خالص آلومینیوم A357 می‌باشد که در بزرگنمایی‌های ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برابر گرفته شده‌اند. تصاویر شکل ۴ از نمونه‌ای تهیه شده است که تحت شرایط سرعت سرد شدن پایین ریخته‌گری، ارایه شده است.

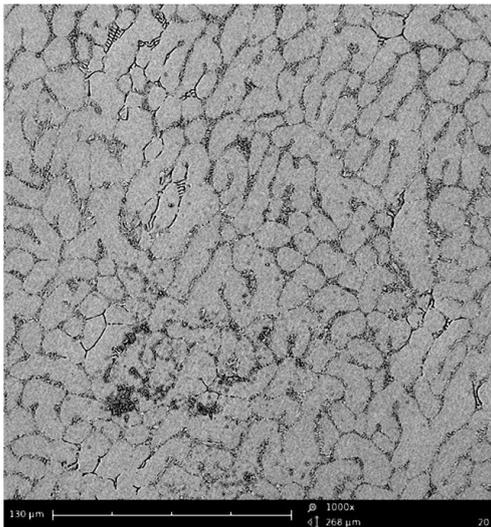


شکل ۵ تصاویر SEM از آلیاژ A357 تقویت شده با ۱ درصد وزنی اکسید منیزیم است که از طریق افزودن آمیزان به آلیاژ مذاب در حالت نیمه جامد و با سرعت سرد شدن پایین ریخته-گری شده است.

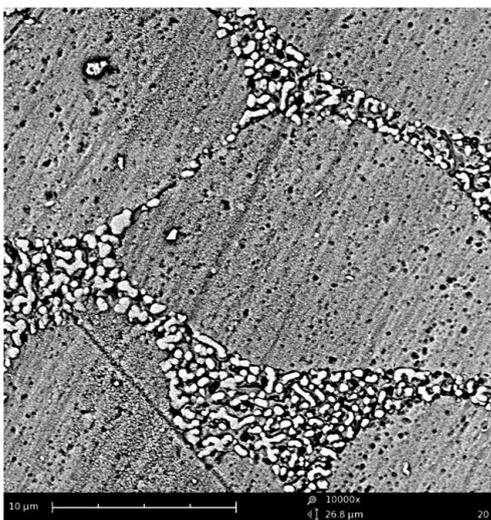
در تصاویر ریزتر شدن فاز یوتکتیک، ترکیبات بین فلزی و همچنین حضور نانوذرات در دندریتها و فاز یوتکتیک مشهود است.

شکل ۶ نمودار سختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بهترین سختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بهترین سختی متعلق به نمونه دارای ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم است.

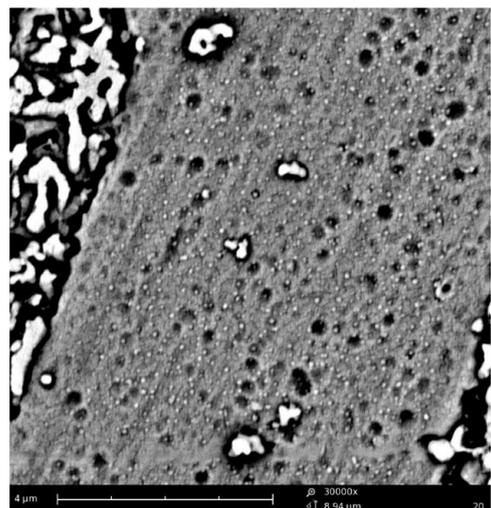
نمودار تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه جامد و ریخته-گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین استحکام تسلیم متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی اکسید منیزیم است. با توجه به شکل (۷) محدوده ی بهینه درصد افزودنی اکسید منیزیم برای استحکام تسلیم بین ۰/۵ تا ۱ درصد است.



(الف)



(ب)

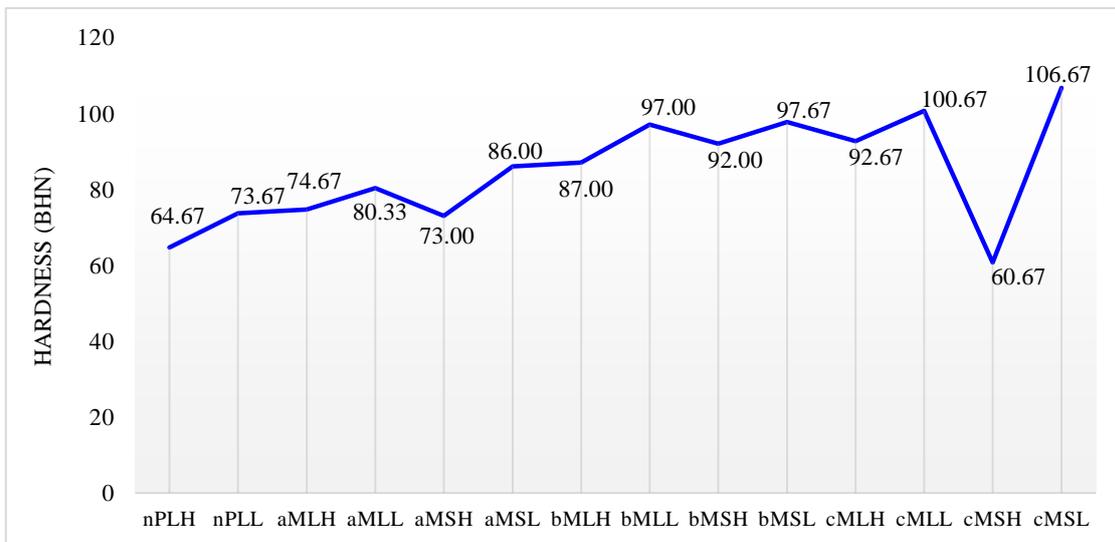


(پ)

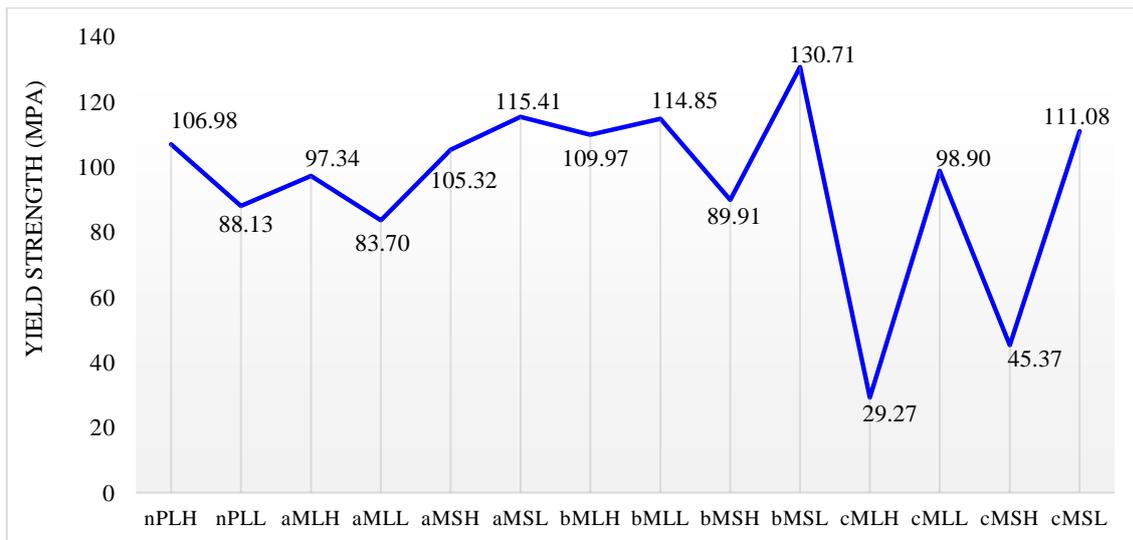
شکل ۵- تصویر SEM از نانوکامپوزیت ۱ درصد اکسید منیزیم با بزرگنمایی‌های (الف) ۰/۱۰۰۰، (ب) ۰/۱۰۰۰۰، (پ) ۰/۱۰۰۰۰۰ برابر

استحکام کششی نهایی نمونه‌ها در شکل ۸ ارائه شده است. باتوجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود برای حالت‌های ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و برای ۱ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام کششی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین می‌باشد. همچنین بیشترین استحکام کششی نهایی متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی اکسید منیزیم است. با توجه به شکل (۸) محدوده ی بهینه درصد افزودنی اکسید منیزیم برای استحکام کششی بین ۰/۵ تا ۱ درصد است.

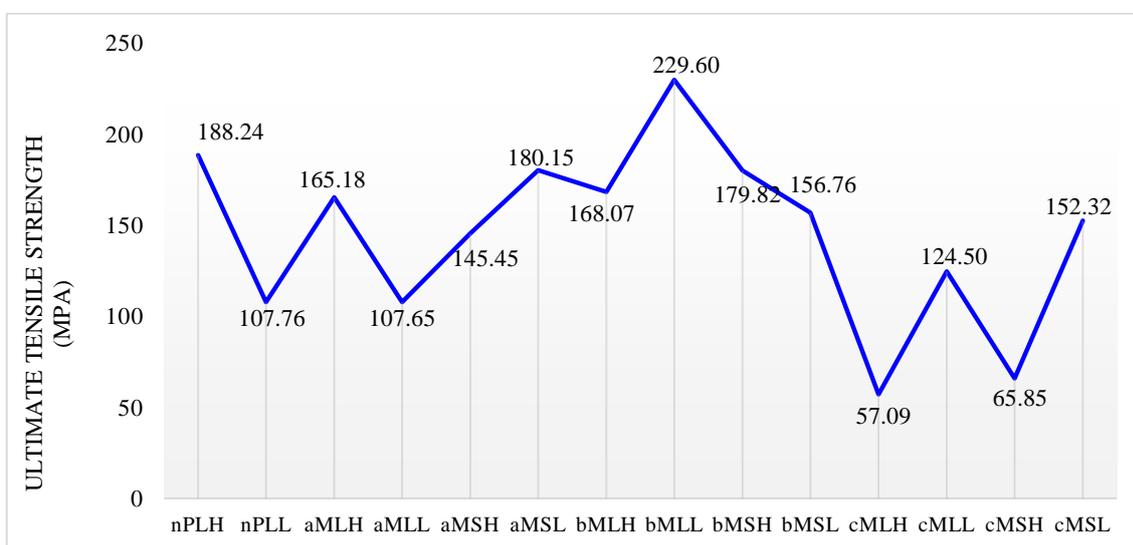
شکل ۹ مدول یانگ بدست آمده برای نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. از شکل ۹ نتیجه می‌شود برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین مدول یانگ متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین مدول یانگ متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی اکسید منیزیم است. با توجه به شکل (۹) محدوده ی بهینه درصد افزودنی اکسید منیزیم برای مدول یانگ در حدود ۱ درصد است.



شکل ۶- نمودار سختی نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم



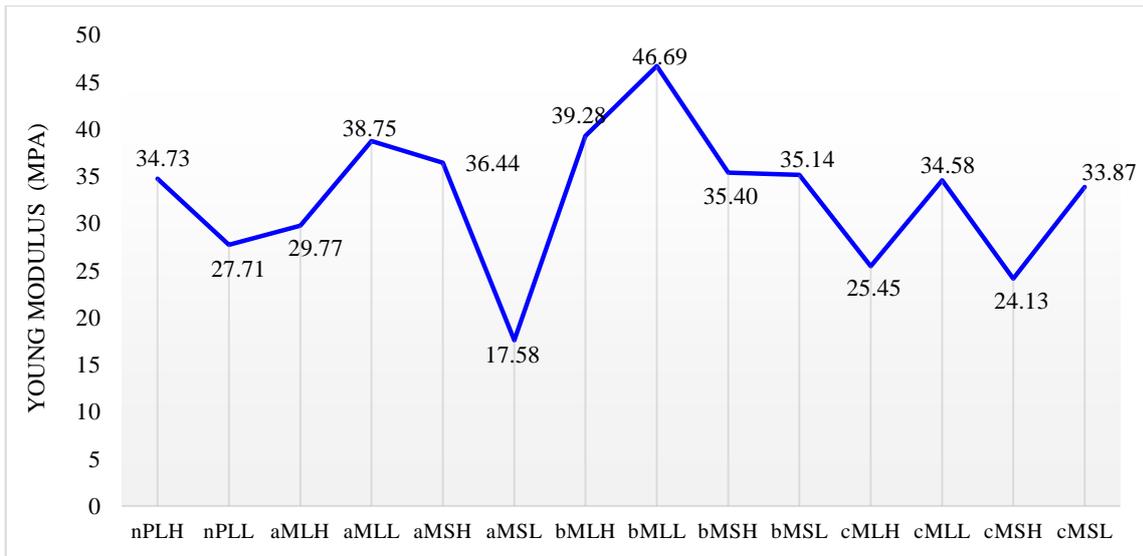
شکل ۷- نمودار تنش تسلیم نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم



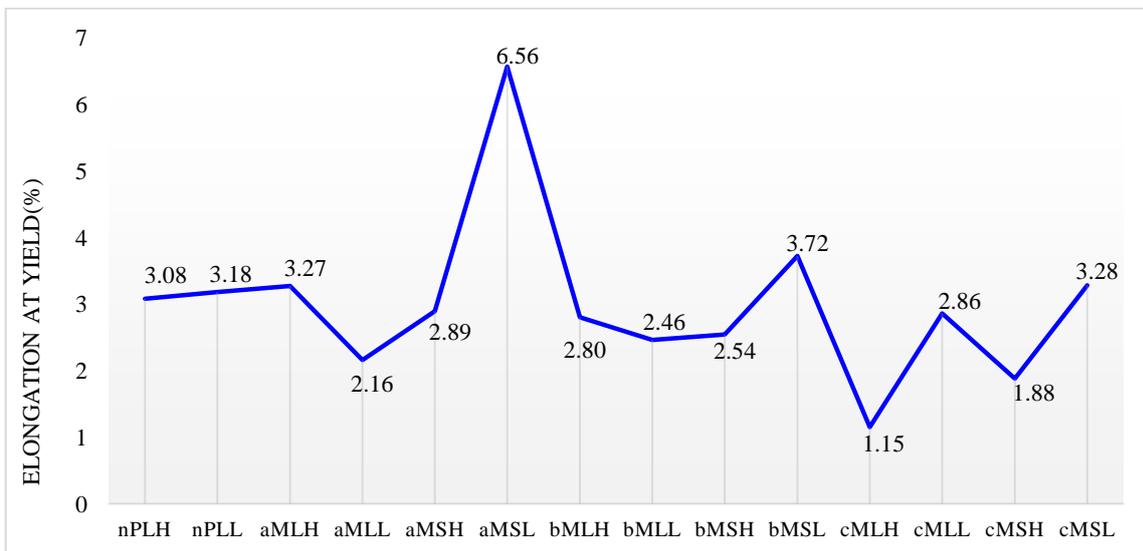
شکل ۸- نمودار استحکام کششی نهایی نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم

شکل ۱۰ نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش تسلیم نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه جامد و

ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین تغییر طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم است. با توجه به شکل (۱۰) محدوده ی بهینه درصد افزودنی اکسید منیزیم برای درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش تسلیم در حدود ۰/۵ درصد است.



شکل ۹- نمودار مدول یانگ نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم



شکل ۱۰- نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش تسلیم نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم

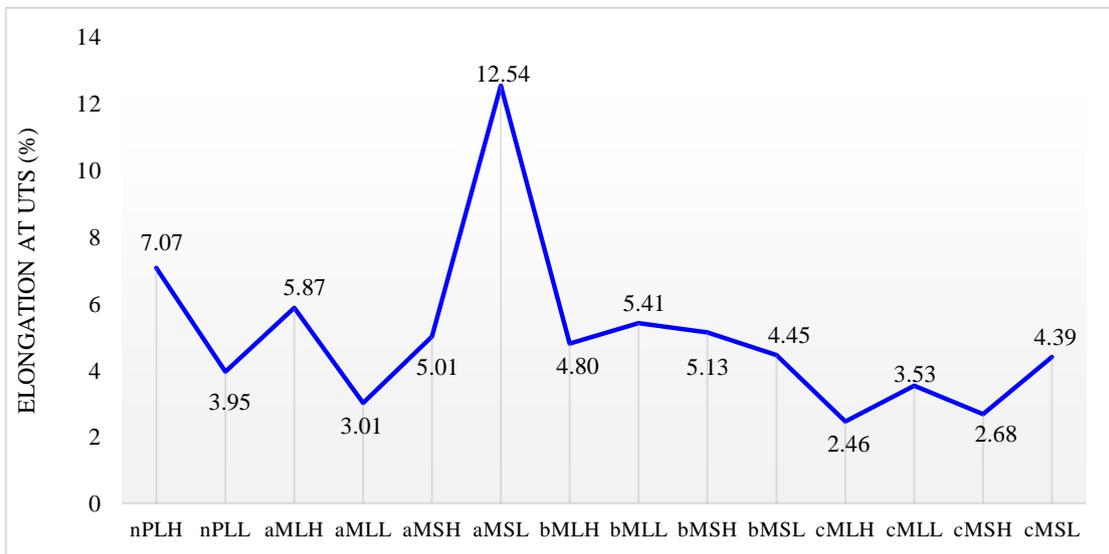
نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم است. با توجه به شکل (۱۱) محدوده ی بهینه درصد افزودنی اکسید منیزیم برای درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش نهایی در بازه اطراف ۰/۵ درصد است.

نمودار کارسختی نمونه ها در شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می شود برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی

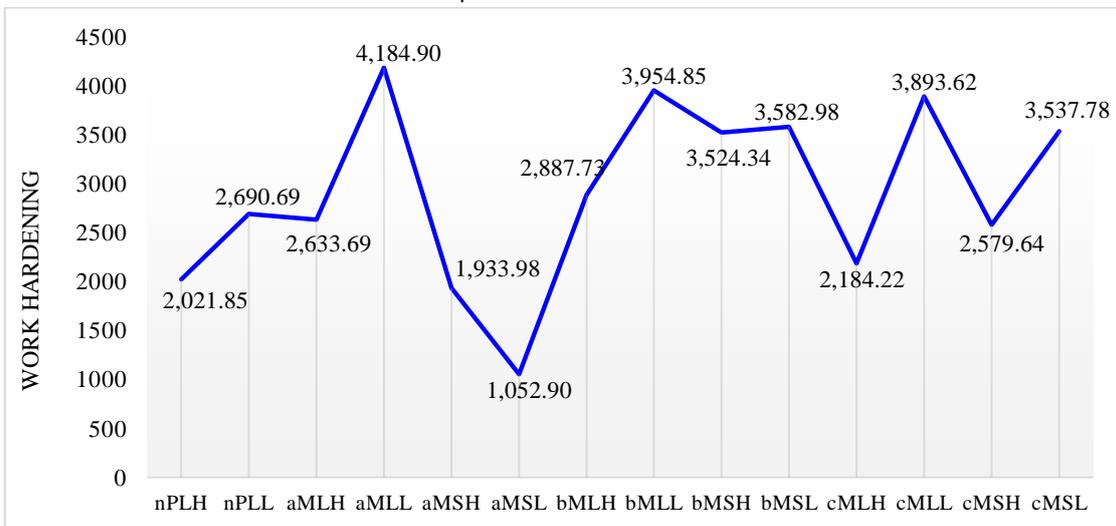
شکل ۱۱ نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش نهایی نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم را نشان می دهد. مشاهده می شود بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت مذاب کامل و ریخته گری با سرعت سرد شدن پایین است. همچنین بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به

اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین کارسختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم می باشد. شکل ۱۳ نمودار چقرمگی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود برای حالت‌های ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین چقرمگی متعلق به

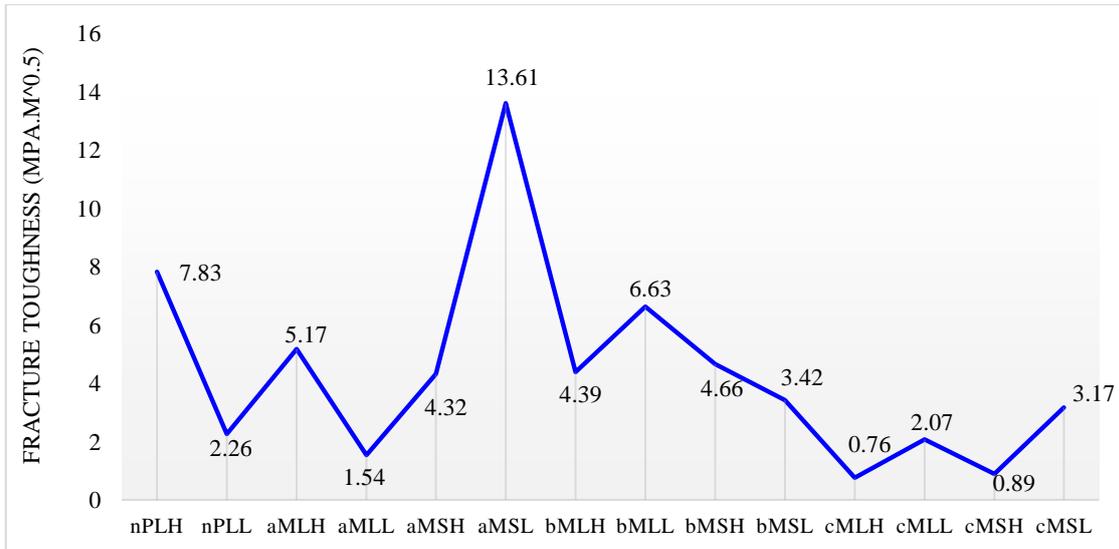
افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و در حالت ۱ درصد وزنی اکسید منیزیم اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت مذاب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است. همچنین بیشترین چقرمگی متعلق به نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی اکسید منیزیم است. با توجه به شکل (۱۳) محدوده ی بهینه درصد افزودنی اکسید منیزیم برای چقرمگی در یک بازه اطراف ۰/۵ درصد است.



شکل ۱۱- نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسید منیزیم



شکل ۱۲- نمودار کارسختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسیدمنیزیم



شکل ۱۳- نمودار چقرمگی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات اکسیدمنیزیم

افزایش تخلخل های گازی و انقباضی در ساختار نانوکامپوزیت خواهد شد.

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که نانوکامپوزیت های زمینه آلومینیوم در خواص مکانیکی به مراتب بهتر از آلیاژ پایه هستند. همچنین با بررسی نتایج بدست آمده از آزمون های مکانیکی مشخص شد هرچه درصد وزنی نانوذره افزوده شده به آلیاژ بیشتر باشد، اثر سختی زایی آن بر روی آلیاژ بیشتر بوده و موجب افزایش سختی می گردد که می تواند به دلیل اثر استحکام بخشی نانوذرات اکسید منیزیم باشد.

افزودن نانوذرات اکسید منیزیم به آلیاژ مذاب در حالت نیمه جامد بطور کلی موجب بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی می گردد. همچنین ریخته گری این گونه از نانوکامپوزیت ها با سرعت سرد شدن پایین خواص بهتری را نسبت به ریخته گری با سرعت سرد شدن بالا بدست می دهد که هم می تواند به دلیل زمان بیشتر انجماد و در نتیجه خروج مقداری از گازها و فیلم های اکسیدی حبس شده در نانوکامپوزیت باشد و هم معلول

۵. نتایج

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های زمینه فلزی به نوع نانوذرات، اندازه و نحوه توزیع آنها در ریزساختار زمینه فلزی، تأثیر نانوذرات روی اصلاح و ریزکردن فازهای مختلف و ریزکردن دانه ها و فاصله بین بازوهای دندریتی ثانویه و همچنین تأثیر نانوذرات بر مقدار عیوب مختلف بستگی دارد. با افزایش غلظت نانوذرات در مخلوط مذاب - نانوذرات فاصله بین نانوذرات کاهش یافته و در نتیجه احتمال تشکیل خوشه های با اندازه و شکل های مختلف در مخلوط مذاب - نانوذرات و همچنین نانوکامپوزیت ریختگی افزایش می یابد. خوشه ای شدن نانوذرات سهم مکانیزم های استحکام بخشی اصلی (مکانیزم اورووان، مکانیزم افزایش چگالی نابجایی ها، مکانیزم انباشت نابجایی ها و مکانیزم اثر تحمل بار) در بهبود استحکام نانوکامپوزیت را به شدت کاهش می دهد. از طرفی افزایش غلظت نانوذرات سبب افزایش لزجت مخلوط می شود که پیامد آن خروج سخت تر گازهای حل شده در مذاب آلیاژ و



جانشینی بهتر نانوذرات. همچنین با بررسی نتایج مشخص شده که در نمونه های دارای ۱ درصد وزنی نانوذره اکسید منیزیم، بهترین بهبود خواص ایجاد شده و در ۱/۵ درصد وزنی، کاهش استحکام تسلیم و کاهش استحکام نهایی نسبت به ۱ درصد وزنی رخ می دهد که می تواند به دلیل خوشه ای شدن نانوذرات اکسید منیزیم و مقاومت کم خوشه ها در مقابل تنش های مکانیکی باشد.

از بررسی نتایج تصویربرداری SEM مشخص می شود که حضور ذرات اکسید منیزیم در ترکیب نانوکامپوزیت موجب می شود فاز یوتکتیک آلیاژ ریزتر شود و این خود می تواند یکی از دلایل بهبود خواص توسط ذرات اکسید منیزیم باشد. عوامل دیگری که می تواند در این نتیجه موثر باشد شامل بهبود توزیع و پراکندگی نانوذرات در ساختار نانوکامپوزیت و کاهش پدیده خوشه های شدن و کوچکتر شدن بازوهای دندردیتی است. همچنین بهتر بودن خواص نانوکامپوزیت های تقویت شده با ذرات اکسید منیزیم می تواند به دلیل خواص ذاتی این ذرات مانند اختلاف ضریب انبساط بیشتر با آلیاژ پایه، ابعاد ذرات و ... باشد. لازم به ذکر است عوامل بیرونی غیرقابل کنترل مانند زمان ریخته گری ذوب در قالب، نرخ دمش گاز آرگون و ... نیز بر روی نتایج موثر بوده است.

۶. تقدیر و تشکر

برخود لازم می دانیم از همکاران گرامی در پژوهشکده پوشش های نانو ساختار دانشگاه پیام نور یزد که با فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی کمک بزرگی به انجام این پژوهش نمودند، قدردانی نماییم.

۷. مأخذ

- [1] R. Casati, M. Vedani, Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review. *Metals (Basel)*, Vol. 4, No. 1, pp. 65–83, 2014.

- [2] S. R. Bakshi, D. Lahiri, A. Agarwal, Carbon nanotube reinforced metal matrix composites - a review. *International Materials Reviews*, Vol. 55, No. 1, pp. 41–64, 2010.
- [3] O. I. Sekunowo, S. I. Durowaye, G. I. Lawal, An Overview of Nano-Particles Effect on Mechanical Properties of Composites. *International Journal of Animal and Veterinary Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 1–7, 2015.
- [4] M. Rajabi, M. M. Khodai, N. Askari, Microwave-Assisted Sintering of Al – ZrO₂ Nano-Composites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 25, pp. 4577–4584, 2014.
- [5] M. De Cicco, H. Konishi, G. Cao, H. S. Choi, L.-S. Turng, J. H. Perepezko, S. Kou, R. Lakes and X. Li, Strong, Ductile Magnesium-Zinc Nanocomposites. *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 40, No. 12, pp. 3038–3045, 2009.
- [6] G. Cao, H. Konishi, X. Li, Recent developments on ultrasonic cavitation based solidification processing of bulk magnesium nanocomposites. *Int. J. Met.* Vol. 2, No. 1, pp. 57–65, 2008.
- [7] A. Mazahery, H. Abdizadeh, H. R. Baharvandi, Development of high-performance A356/nano-Al₂O₃ composites. *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 518, No. (1–2), pp. 61–64, 2009.
- [8] M. Habibnejad-Korayem, R. Mahmudi, H. M. Ghasemi, W. J. Poole, Tribological behavior of pure Mg and AZ31 magnesium alloy strengthened by Al₂O₃ nano-particles. *Wear*, Vol. 268, No. (2–3), pp. 405–412, 2010.
- [9] M. Habibnejad-Korayem, R. Mahmudi, W. J. Poole, Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al₂O₃ nano-particles. *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 519, No. (1–2), pp. 198–203, 2009.
- [10] C. Borgonovo, D. Apelian, M. M. Makhoulf, Aluminum nanocomposites for elevated temperature applications. *Jom*. Vol. 63, No. 2, pp. 57–64, 2011.
- [11] R. Lee-Desautels, Theory of van der Waals Forces as Applied to Particulate Materials. *Mater. Eng.* Vol. 27, No. 1–8, 2005.
- [12] H. Haritsa, M. W. Akira, A. Zulfia, The Role of Al₂O₃ Particles on Mechanical Properties and Microstructure of Aluminum A356 Composites Produced by Stir Casting Method. *Materials Science Forum*. Vol. 1000, pp. 185–192, 2020.
- [13] M. j. Hadad, A. Babazade, M. Safarabadi, Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplates and carbon nanotubes on the improvement of



- model for predicting their yield strength. *Scr. Mater.* Vol. 54, No. 7, pp. 1321–1326, 2006.
- [24] J. A. Sánchez Pérez, E. M. Rodríguez Porcel, J. L. Casas López, J. M. Fernández Sevilla, Y. Chisti, Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactors. *Chem. Eng. J.* Vol. 124, No. (1–3), pp. 1–5, 2006.
- mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* Vol. 109, pp. 2535–2547, 2020.
- [14] B. Prakash, M. Manimaran, Investigations on mechanical properties of Al6061-SiC nanocomposites fabricated via stir casting process, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 39, pp. 22–25, 2021.
- [15] P. Lakshmanan, S.C. Amith, Investigation of tribological properties of Al-Mg-Si/SiCp nanocomposites prepared by ultrasonic assisted casting method, *Materials Today: Proceedings*, article in press.
- [16] S. Kandemir, Microstructure and mechanical properties of A357/SiC nanocomposites fabricated by ultrasonic cavitation-based dispersion of ball-milled nanoparticles. *Journal of Composite Materials.* Vol. 51(3): pp. 395-404, 2017.
- [17] Zeng X, Liu W, Xu B, Shu G, Li Q. Microstructure and mechanical properties of Al-SiC nanocomposites synthesized by surface-modified aluminium powder. *Metals.* Vol. 8(4):253, 2018.
- [18] M. J. Ghasemi, M. Silani, A. Maleki, M. Jamshidian, Micromechanical simulation and experimental investigation of aluminum-based nanocomposites. *Defence technology.* Vol. 17, No (1), pp.196-201, 2021.
- [19] P. Azhagiri, N. Senthilkumar, K. Palanikumar, B. Deepanraj, Mechanical properties evaluation on hybrid AA6026 composites added with nanoclay and carbon fibers. *Carbon Letters.* Vol. 23, pp.1-4, 2023.
- [20] T.T. Alshammari, H.F. Alharbi, M.S. Soliman, M.F. Ijaz, Effects of Mg Content on the Microstructural and Mechanical Properties of Al-4Cu-x Mg-0.3 Ag Alloys. *Crystals*, 10(10), p.895., 2020.
- [21] I. Jusoh, Optimization of control factors on mechanical properties of friction stir processed AZ91B/Al₂O₃ nanocomposites. *Journal of Engineering Research*, p.100089, 2023.
- [22] Venkatesh, V.S.S., Rao, G.P., Patnaik, L., Gupta, N., Kumar, S., Saxena, K.K., Sunil, B.D.Y., Eldin, S.M. and Al-kafaji, F.H.K., 2023. Processing and evaluation of nano SiC reinforced aluminium composite synthesized through ultrasonically assisted stir casting process. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, pp.7394-7408.
- [23] Z. Zhang, D. Chen, Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A

