



Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al-8Zn-3Mg-2.5Cu Nanocomposite Reinforced with SiC Nanoparticles after Age Hardening Heat-Treatment

Research Article

Mohammad Alipour¹

DOI: [10.22067/jmme.2022.79507.1084](https://doi.org/10.22067/jmme.2022.79507.1084)

1- Introduction

The demand for cost reduction in the area of transportation like automotive or aerospace applications calls for decrease in fuel consumption which in turn can be achieved by weight reduction. In this regards aluminium and its alloys have been the primary candidate for the structural parts owing to their low density, high strength and ductility. In particular the newly designed and developed AA 7000 alloy series are mainly used for high strength applications due to their important properties like age treatable, high formability, good welding properties and energy absorption. Examples of this series include bumper beams, chassis parts, crash boxes for light weight cars, and fuselage and upper wing structure for commercial aircrafts. The properties of these alloys can be further improved by adopting new processing techniques, usage of grain refiners, proper heat treatment and inclusion of micron or nano-sized reinforcements. Super high strength aluminum alloys have been extensively studied after mechanical deformation for several decades, but little attention has been made on the alloy in as-cast condition and semi-solid state. As-cast structures of the mentioned alloys have a significant influence on their mechanical properties and the quality of finished products. The structure of such materials can be controlled by some important factors such as: changing the composition, adding grain refining agents, minimizing inclusions and applying thermomechanical treatments. In this paper we report the development of GNPs reinforced Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix nanocomposites. Here the Al-8Zn-3Mg-2.5Cu alloy is chosen as a matrix material because of its high hardness and ultimate tensile strength. In addition, it is a heat treatable alloy and light weight material compared to that of brass, copper and steel. The Al-8Zn-3Mg-2.5Cu-SiCnp nanocomposites were synthesized by a combination of powder metallurgy and stir casting with ultrasonic waves. The Al-8Zn-3Mg-2.5Cu with and without SiC nano-particles were subjected to mechanical and wear testing to evaluate the hardness and wear resistance.

2- Experimental

The chemical composition of the Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy used as matrix material in this. The Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminium alloy ingots cut into various small pieces and then placed into a graphite crucible. The graphite crucible was placed in an electrical resistance. Melting of aluminum alloy was done by heating it to a temperature of $\sim 750^{\circ}\text{C}$. Then, stirring of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu alloy melt was accomplished for 10-15 min with the help of a mechanical stirrer (500 rpm) and applying ultrasonic waves (2000w) for 60 s to homogenize the uniform temperature throughout the melt followed by addition of pre-heated aluminum powder and SiC np with different wt.% in the metal melt. Nanocomposite specimens have been prepared with the addition of 1, 2, 3 and 5 wt.% SiC np. After successful addition of SiC np and uniform mixing, the composite melt was poured into a permanent mold designed and fabricated according to ASTM B557M-10 standard. For microstructural studies, optical microscope and SEM equipped with an energy dispersive X-ray analysis (EDX) have been used. The cut nanocomposite sections were polished using SiC based abrasive papers and then etched by Keller's reagent. Hardness test was carried out according to ASTM E10 standard to check resistance of nanocomposite towards the plastic deformation. Dry sliding wear tests were conducted in accordance with ASTM G99 standard using a pin-on-disc set up at room temperature.

3- Results and Discussion

The initial preform of Al-SiC np nanocomposite was prepared by mechanical alloying and powder metallurgy technique. After 2 h of milling, the particle size of aluminum powder decreased by milling process, which will have better dissolution and lower agglomeration during stir casting. Fig. 1 shows the SEM micrographs of morphology and size of flake shaped Al-SiC nanocomposite powders after 2 h of milling. From Fig. 2, it is noticeable that addition of SiC np and ultrasonication processes assisted stir casting increases the

*Manuscript received: Tuesday, November 8, 2022, Revised, November 26, 2022, Accepted, December 28, 2022.

¹ Assistance Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Iran.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

number of grain boundaries and therefore promotes a more homogeneous distribution of intermetallic precipitates. The optimum content of SiC np that can be used to reinforce Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix is 3 wt.%.

The wear results for Al-8Zn-3Mg-2.5Cu alloy and nanocomposite with and without T6 heat treatment is shown in Fig. 3 and 4. The amounts of weight loss against sliding distance for all the samples are plotted. This plot was obtained at constant normal loads (20 N) with a constant rotation speed of the counter disk of 250 rpm. Adding of SiC np, T6 heat treatment make decreases in weight loss compared to that of unreinforced aluminum alloy. It observed that the amount of weight loss has increased by increase in sliding distance showing a linear trend. Comparison between unreinforced and nanocomposite samples before and after T6 heat treatment shows that the addition of SiC np to Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix has reduced the weight loss in comparison with unreinforced Al-8Zn-3Mg-2.5Cu alloy. The decrease in weight loss is mainly attributed to uniform distribution and strong interfacial bonding of SiCnp with Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix.

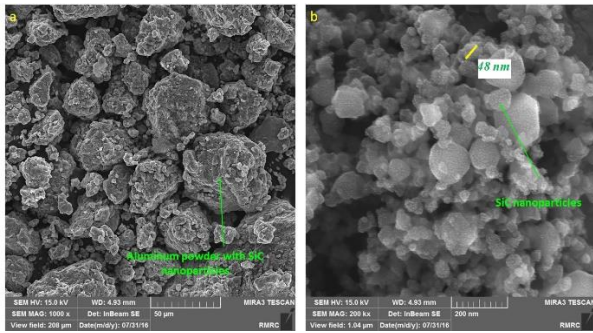


Fig. 1. Image of Al-30SiCnp composite powder after 2 hours of high energy milling.

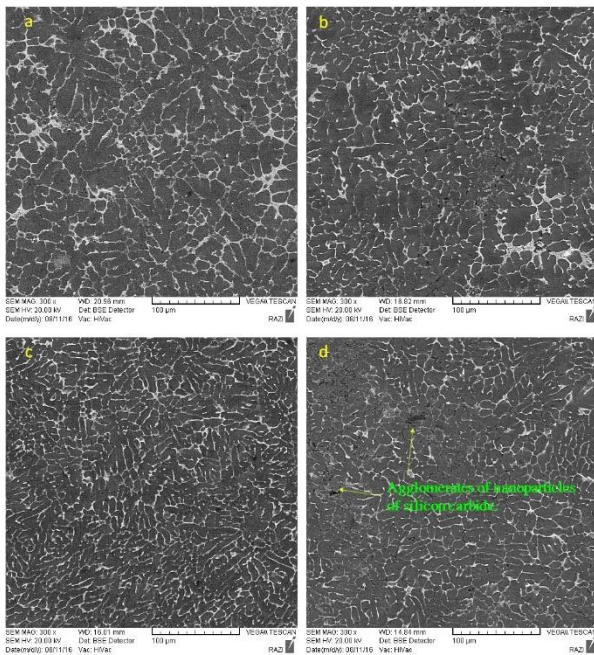


Fig. 2. SEM back-scattered images, showing the microstructures of the AlAl-8Zn-3Mg-2.5Cu alloy with: (a) As cast, (b) 1 wt.%, (c) 3 wt.% and (d) 5 wt.% SiC nanoparticles.

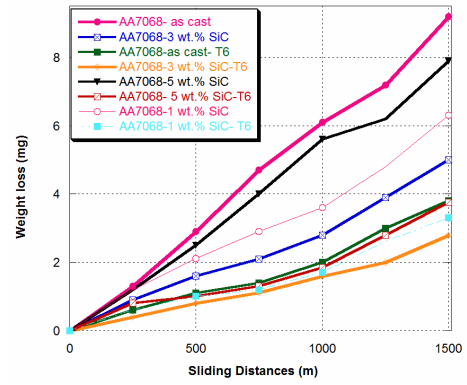


Fig. 3- The amount of weight loss of nanocomposite samples containing different percentages of SiC nanoparticles before and after applying T6 under 20 N.

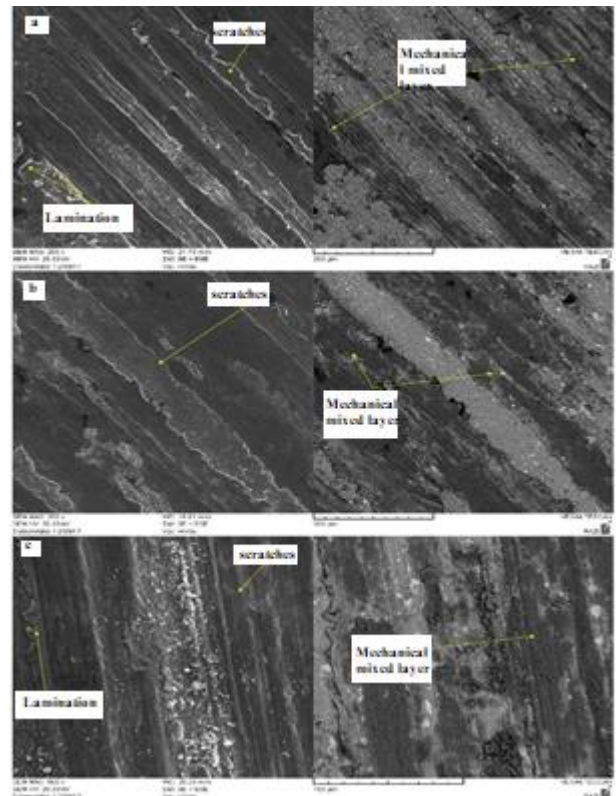


Fig. 4- SEM images of wear surfaces of nanocomposite reinforced with 3% by weight of SiC nanoparticles under a force of 20 N, a) before T6 heat treatment, b and c) after T6 heat treatment.

4- Conclusions

- 1- Stir casting method with ultrasonic waves is very effective for improvement of the mechanical properties of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy matrix SiC np reinforced composites and achieves uniform distribution of SiC np in the aluminum matrix.
- 2- The optimum amount of nanoparticles is 3 wt.% SiC.
- 3- When the wt.% of SiC np reaches more than 3 wt.%; agglomeration of SiC np at the grain boundaries causes embrittlement, porosities, less interfacial bonding and so decrease in mechanical properties.
- 4- The SEM investigation of the worn surfaces had shown that abrasive wear was the main wear mechanism in these composites.



بررسی ریزساختار و خواص سایشی نانوکامپوزیت آلومینیوم $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ تقویت شده با نانوذرات SiC بعد از

عملیات حرارتی پیرسختی*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور^(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2022.79507.1084

چکیده در این تحقیق، خواص سایشی و ریزساختار نانوکامپوزیت آلومینیوم $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ تقویت شده با ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم (SiC) تولید شده به روش ریخته گری گردابی با کمک حباب زائی مافوق صوت بررسی شد. جهت اختلاط مناسب آلیاژ و نانوذرات از دستگاه مافوق صوت مجهز به سیستم خنک کننده با توان ۲۰۰۰ وات استفاده شد. همچنین برای مطالعات ریزساختاری، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار گرفته شد. مطالعات ریزساختاری نانوکامپوزیت نشان داد که حضور نانوذرات پراکنده SiC باعث کاهش اندازه دانه شده، اما در درصدهای بالای این نانوذرات (۵٪ وزنی)، کاهش محسوسی در اندازه دانه ایجاد نمی‌شود. همچنین حضور نانوذرات و کاهش اندازه دانه، افزایش چشمگیر سختی و مقاومت به سایش نانوکامپوزیت را به همراه دارند. البته در درصدهای بالای نانوذرات SiC (۵٪ وزنی)، این ذرات در مرز دانه ها کلونچه ای شده و باعث کاهش سختی و مقاومت به سایش کامپوزیت شدند. نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳٪ وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم قبل و بعد از عملیات حرارتی بهترین مقاومت به سایش را نشان داد که بهینه ترین درصد نانو ذرات کاربید سیلیسیم می باشد.

واژه های کلیدی نانوکامپوزیت ریخته گری، نانوذرات کاربید سیلیسیم، ریخته گری گردابی، فرآوری مافوق صوت.

Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ Nanocomposite Reinforced with SiC Nanoparticles after age Hardening Heat Treatment

Mohammad Alipour

Abstract In this study, microstructure and wear properties of $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ nanocomposite reinforced with 1, 2, 3 and 5 wt.% SiC nanoparticles (SiCnp) produced by stir casting and ultrasonic treatment have been investigated. Ultrasound device equipped with a cooling system with 2000 W powers was used for mixing alloy and nanoparticles. Also scanning electron microscopy was used for microstructure studies. The microstructure of nanocomposite was investigated by scanning electron microscope. The microstructural studies of the nanocomposite revealed that SiCnp addition reduces the grain size, but adding higher SiCnp content (5 wt.%) does not change the grain size considerably. Further investigations on hardness revealed that the addition of SiCnp increases hardness and wear resistance. At higher SiCnp contents (5 wt.%), the presence of SiCnp agglomerate on grain boundaries was found that causes decrease the hardness and wear resistance. The optimum amount of nanoparticles before and after heat treatment is 3 wt.% SiCnp that nanocomposite exhibits best wear resistance.

Keywords Casting nanocomposite, SiC nanoparticles, Stir casting, Ultrasonic treatment.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۰/۷ می باشد.

مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی از جمله مهمترین انواع مواد پیشرفته می باشند که قدمتی بیش از ۵۰ سال دارند. این نوع کامپوزیت ها در صنایع زیادی همانند صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت مورد استفاده می باشند [1-3]. از جمله کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی هستند، که به دلیل مزایایی از قبیل دانسیته پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی، مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، امروزه در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا و خودرو دارای کاربرد گسترده ای هستند [3-6].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب همزمان، آلیاژسازی مکانیکی و روش های گوناگون ریخته گری نظیر ریخته گری کوبشی، ریخته گری نیمه جامد، ریخته گری گردابی و دیگر روش ها تولید می شوند [3,7]. روش ریخته گری شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می شود، سپس با روش های متداول، ریخته گری انجام می گیرد [7].

لازم بذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلومینیم نرم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت‌های تهیه شده از روش ریخته گری گردابی به دلایل مختلف از جمله کشیده شدن هوا به داخل مذاب در حین هم زدن دوغاب کامپوزیتی و ممانعت از خروج گازها از دوغاب پس از ریخته گری به دلیل گرانروی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ریخته گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره-ای، عموماً توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می شود [7].

در روش حباب سازی مافوق صوت، مخلوط مذاب-نانوذرات تحت تأثیر امواج مافوق صوت شدید قرار می گیرند. این عمل به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می شود. از

جمله مهمترین اثرات این امواج که به اثرات غیرخطی معروفند، حباب زائی گذرا و جریان صوتی است [8,9]. جریان صوتی که برای هم زدن بسیار با ارزش است، حرکت مذاب در اثر شیب فشار صوتی است. حباب زائی در بر گیرنده تشکیل، بزرگ شدن و فروپاشی یا منفجر شدن حباب است. در ساخت نانوکامپوزیت ها به کمک امواج مافوق صوت در مرحله نخست خوشه های نانوذرات موجود در مذاب توسط اثر حباب زائی امواج از بین می روند و در مرحله بعد نانوذرات مجزا توسط پدیده جریان صوتی به طور یکنواخت در داخل مذاب پراکنده می شوند (شکل ۱) [10].

از آنجائی که هوا در حفرات موجود در خوشه های نانوذرات حبس شده است، بنابراین هوای حبس شده به عنوان جوانه ای برای تشکیل حباب ایفای نقش می کند. در مراحل اولیه افزودن نانوذرات به مذاب تعداد خوشه ها بسیار زیاد است، بنابراین تعداد حباب های تشکیل شده نیز زیاد خواهد بود. حباب های بوجود آمده در حین سیکل فشاری منفی رشد می کنند و پس از بزرگ شدن تا اندازه مشخص در حین سیکل فشاری مثبت به طور ناگهانی از هم پاشیده می شوند. حباب های ریزی که در مدت زمانی کمتر از ۱۰-۶ ثانیه منفجر می شوند، نقاط گرم میکرونی گذرا را ایجاد می کنند. دما و فشار این نقاط به ترتیب 5000°C و بالای 1000 اتمسفر است. هم چنین سرعت گرم شدن و سرد شدن این نقاط در حدود 10^{10} K/S است [9].

حباب های گذرا ضربات انفجار گونه به خوشه ها و کلوخه های نانوذرات وارد می کنند و از این طریق خوشه های نانوذرات را می شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می شود. بررسی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی نانوکامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [8]. بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت های فوق نشان داده است که اندازه دانه و بازوهای دندردیتی فاز زمینه نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچک تر است. یکی از اثرات مهم حضور نانوذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [9].

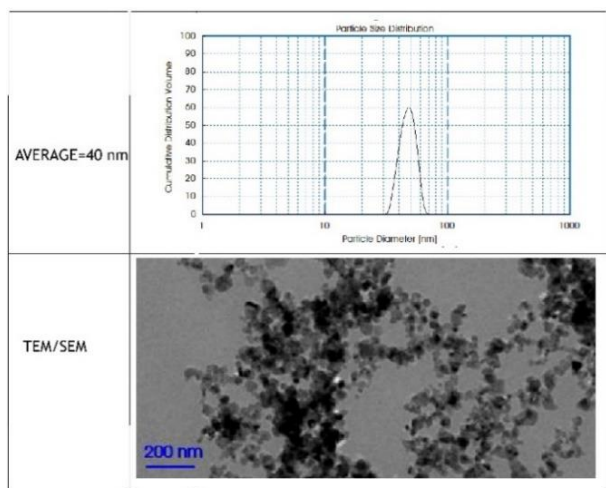
رفتار سایشی آلیاژ Al-8Zn-3Mg-2.5Cu

روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu با ترکیب مشخص شده در جدول (۱) و نانوذرات SiC و پودرهای میکرونی آلومینیوم با ابعاد ۴۰ میکرومتر برای ساخت نانوکامپوزیت AlAl-8Zn-3Mg-2.5Cu-SiC استفاده شد. از جمله ویژگی های نانوذرات می توان به متوسط اندازه بین ۳۵ تا ۵۰ نانومتر و خلوص بالای ۹۹ درصد وزنی اشاره کرد. در شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) با مدل EM 208 ساخت شرکت Philips و آنالیز اندازه برای نانوذرات SiC نشان داده شده است. در این تحقیق نانوذرات SiC در درصدهای وزنی ۱ تا ۵ درصد به مذاب آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu اضافه شدند تا حالت بهینه بدست آید.

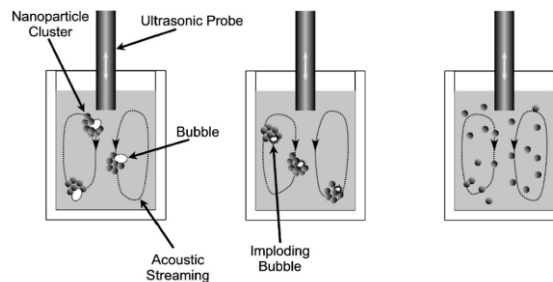
جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu (درصد وزنی).

Mn	Si	Fe	Zr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al	element
۰,۱	۰,۱۲	۰,۱	۰,۱۵	۰,۱۰	۲,۴	۳	۸,۲	تعداد	%



شکل ۲ آنالیز اندازه و تصویر TEM از نانوذرات SiC.

برای افزودن نانوذرات به مذاب از روش ساخت پودر کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری پرانرژی مدل NARYA-MPM 2*250 H استفاده شد. در این روش ابتدا مخلوطی از نانوذرات SiC و پودر آلومینیومی با ابعاد ۴۰ میکرومتر در داخل آسیاب پرانرژی به مدت ۲ ساعت تحت



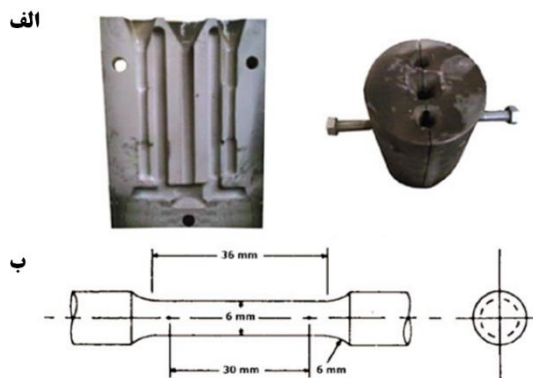
شکل ۱ شماتیک تاثیر کاویتاسیون و جریان گردابی ناشی از امواج مافوق صوت برای پخش یکنواخت نانوذرات در داخل مذاب [10].

مطالب یاد شده از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف پذیری نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه محسوب می شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت نسبتاً مطلوب است و همواره تعدادی خوشه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرزدانه ها و یا در امتداد مرزدانه ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات مجزا بیشتر در درون دانه ها یا بازوهای دندردیتی فاز زمینه پراکنده شده اند [8].

در پژوهش حاضر روش جدیدی برای توزیع بهتر نانوذرات و همچنین اصلاح بیشتر ریزساختار بر مبنای فرآیند ذوبی به کمک فراوری مافوق صوت در نظر گرفته شده است. بر این مبنای نانوذرات کاربید سیلسیم (SiC_{np}) بعد از آسیاب کاری پرانرژی و کامپوزیت شدن با پودر میکرونی آلومینیوم به مذاب اضافه شده و تحت فراوری ریخته گری گردابی و مافوق صوت قرار می گیرند. سپس ریزساختار زمینه و خواص نانوکامپوزیت بررسی می شود. به دلیل اهمیت آلیاژهای سری Vxxx در صنایع پیشرفته، آلیاژ Al-8Zn-3Mg-2.5Cu به عنوان آلیاژ زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است. در رابطه با نوآوری پژوهش حاضری می توان به این نکات اشاره کرد:

- ۱- ساخت نمونه نانوکامپوزیت در دو مرحله که مرحله اول که شامل استفاده از متالورژی پودر می باشد باعث پخش بهتر و یکنواخت تر نانوذرات داخل مذاب آلومینیوم خواهد شد که در مقالات به ندرت از این روش استفاده شده است و نبود کار تحقیقاتی در رابطه با آلیاژهای سری V۰۰۰
- ۲- تاثیر درصدهای مختلف نانوذرات کاربید سیلسیم بر روی

بازوهای دندردیتی، فاز یونکتیک، نحوه توزیع نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت، ریزساختار نمونه های مختلف و دیگر فازهای موجود در ریزساختار آلیاژ مورد نظر بود. برای ارزیابی رفتار سایشی طبق استاندارد ASTM-G99 از آزمون سایش پین بر روی دیسک استفاده شد. آزمون سایش در دمای محیط و تحت نیروی ۲۰ نیوتن انجام شد. برای بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تولیدی و تاثیر عملیات حرارتی بر روی خواص سایشی نانوکامپوزیت، عملیات حرارتی T6 بر روی نمونه ها انجام شد. شرایط عملیات حرارتی به قرار زیر می باشد: همگن کردن ساختار در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ ساعت، کوئچ به دمای محیط، نگهداری در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت. برای انجام سختی از روش سختی سنجی برینل استفاده شد.

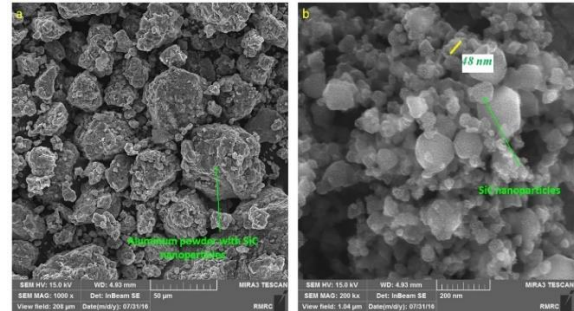


شکل ۴ تصویر الف) قالب ریخته گری، ب) ابعاد نمونه تست کشش.

نتایج و بحث

مطالعات ریزساختاری آلیاژ پایه و پودر نانوکامپوزیتی. نکته مهمی که باید بدان اشاره شود اندازه و شکل پودرهای میکرونی آلومینیوم می باشد. اندازه اولیه این پودرها ۴۵ میکرون بود، اما بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پراثری، اندازه و شکل پودرها تغییر کرد. عملیات انجام شده سبب شد که شکل پودرهای میکرونی از کروی به صفحه ای و اندازه آنها نیز کاهش یابد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شد، بعد از اضافه کردن نانو پودرهای SiC به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب کاری پراثری، نانو پودرهای SiC به صورت یکنواخت در داخل پودرهای آلومینیومی پخش شده اند.

عملیات آسیاب قرار گرفتند تا پودر کامپوزیتی آلومینیوم با نانوذرات SiC حاوی ۳۰ درصد نانوذرات و ۷۰ درصد پودر آلومینیوم بدست آید. سپس کامپوزیت پودری حاصل به مذاب افزوده شد. در شکل (۳)، تصویر پودر کامپوزیتی Al-30SiC_{np} نشان داده شده است.



شکل ۳ تصویر پودر کامپوزیتی Al-30SiC_{np} بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پراثری.

برای ساخت نمونه های مختلف ابتدا مقدار مناسب از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu در داخل بوته گرافیتی قرار داده شد. مجموعه مذکور در داخل یک کوره مقاومتی با دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ و پس از فرو بردن هم زن در مذاب، عمل هم زدن و افزودن نانو پودر کامپوزیتی به مذاب صورت گرفت. سرعت هم زن ۵۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و مدت زمان اعمال هم زن مکانیکی ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از پایان پذیرفتن عمل هم زدن، بوته از کوره خارج شده و بعد از کنار زدن لایه سرباره، مذاب به مدت ۳۰ ثانیه تحت عملیات مافوق صوت با توان ۲۰۰۰ وات قرار گرفت. سپس مذاب حاصل در داخل قالب فلزی (شکل ۴) ریخته شد. از قسمت وسط نمونه های حاصل از این قالب نمونه های استوانه ای به ارتفاع ۱ سانتی متر با قطر ۱ سانتی متر تهیه گردید. سطح این نمونه ها ابتدا با کاغذ سمباده های ضدآب ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ تحت عمل سمباده زنی قرار گرفت. سپس سطح نمونه ها پولیش شد و در محلول یک درصد حجمی اسید هیدروفلوئوریک در آب برای مدت ۳۰ ثانیه اچ گردید.

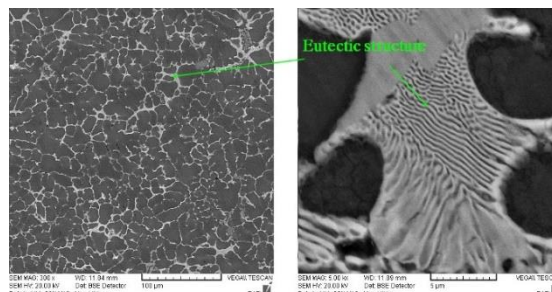
ریزساختار نمونه های مذکور ابتدا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با مدل VEGA\TESCAN-LMU در بزرگنمایی های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی از این بررسی، پی بردن به نقش نانوذرات بر اندازه و شکل

شده توسط هم‌زن مکانیکی بر نیروی جاذبه بین نانوذرات را افزایش داده و در نتیجه مانع از تشکیل خوشه های نانوذرات در هنگام افزودن پودر آمیزان به مذاب و پس از ذوب شدن ذرات آمیزان می شود.

کاملاً مشخص است که هرچه اندازه ذرات در داخل مذاب کوچکتر باشد به نسبت ذرات کلوخه ای شده بزرگتر، این ذرات راحت تر در داخل مذاب حل می شوند. در مجموع پخش شدن نانوذرات در داخل مذاب توسط دو پدیده مهم اتفاق می افتد. در هنگام تزریق پودرهای کامپوزیتی آلومینیوم-SiC به داخل مذاب، انحلال و ذوب شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم اتفاق می افتد، در این هنگام چون نانوذرات SiC با عملیات آسیاب کاری پراثری در داخل پودرهای آلومینیوم قرار گرفته اند و پودرهای آلومینیوم حامل نانوذرات SiC هستند، این پودرها از نانوذرات SiC در مقابل مذاب محافظت کرده و از تماس مستقیم نانوذرات با مذاب جلوگیری خواهند کرد. هنگامی که پودرهای میکرونی آلومینیوم در داخل مذاب حل و ذوب شدند، نانوذرات SiC در داخل زمینه آلومینیوم مذاب رها سازی می شوند. این رها سازی نانو پودرهای SiC در مدت هم زدن مکانیکی مذاب اتفاق می افتد. در ادامه با اعمال امواج مافوق صوت به نانوکامپوزیت تا مرحله ریختن در قالب، کلوخه های نانوذرات SiC کاملاً از هم باز شده و نانوذرات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می آورند.

ریزساختار آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu بعد از اضافه کردن ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی نانوذرات SiC، در شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۶)، با افزودن نانوذرات SiC، تغییرات ساختاری در داخل زمینه اتفاق افتاده و شاخه های دندریتی شکسته شده و شکل نهایی ریزساختار به جای ساختار دندریتی با شاخه های کشیده به ساختاری با دانه هایی به شکل گل رز در آمده اند. در ضمن با افزودن نانوذرات SiC، ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در مرز دانه ها که درشت و ضخیم بودند، به صورت یکنواخت در داخل زمینه پخش شده اند. در مجموع ریزساختار حاصل از اضافه کردن نانوذرات SiC تا ۳ درصد، باعث ریزتر شدن دانه ها شده و طبق رابطه هال پیچ (رابطه ۱)، با ریزتر شدن دانه ها خواص استحکامی بهتر خواهد شد. با افزایش خواص استحکامی در نتیجه سختی نمونه ها نیز افزایش خواهد یافت که باعث بهبود مقاومت به سایش نمونه های نانوکامپوزیت خواهد شد.

آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu دارای عناصر آلیاژی اصلی روی، منیزیم و مس می باشد. تصویر SEM ارائه شده در شکل (۵) نشان می دهد که این آلیاژ دارای ساختار یوتکتیکی در مرز دانه ها می باشد.



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار و یوتکتیک مرز دانه ای آلیاژ پایه آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu

توزیع نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی. توزیع نانوذرات در زمینه، تحت تأثیر اتفاقاتی است که در مذاب در حین پراکنده ساختن نانوذرات و قبل از ریخته گری روی می دهد. همچنین متاثر از پدیده هایی است که در حین انجماد ایجاد می شود. در خصوص مورد اول می توان به ته نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه ای 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 می توان به شکل جبهه انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانوذرات، گرادیان دمایی و گرادیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [11]. بدیهی 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.

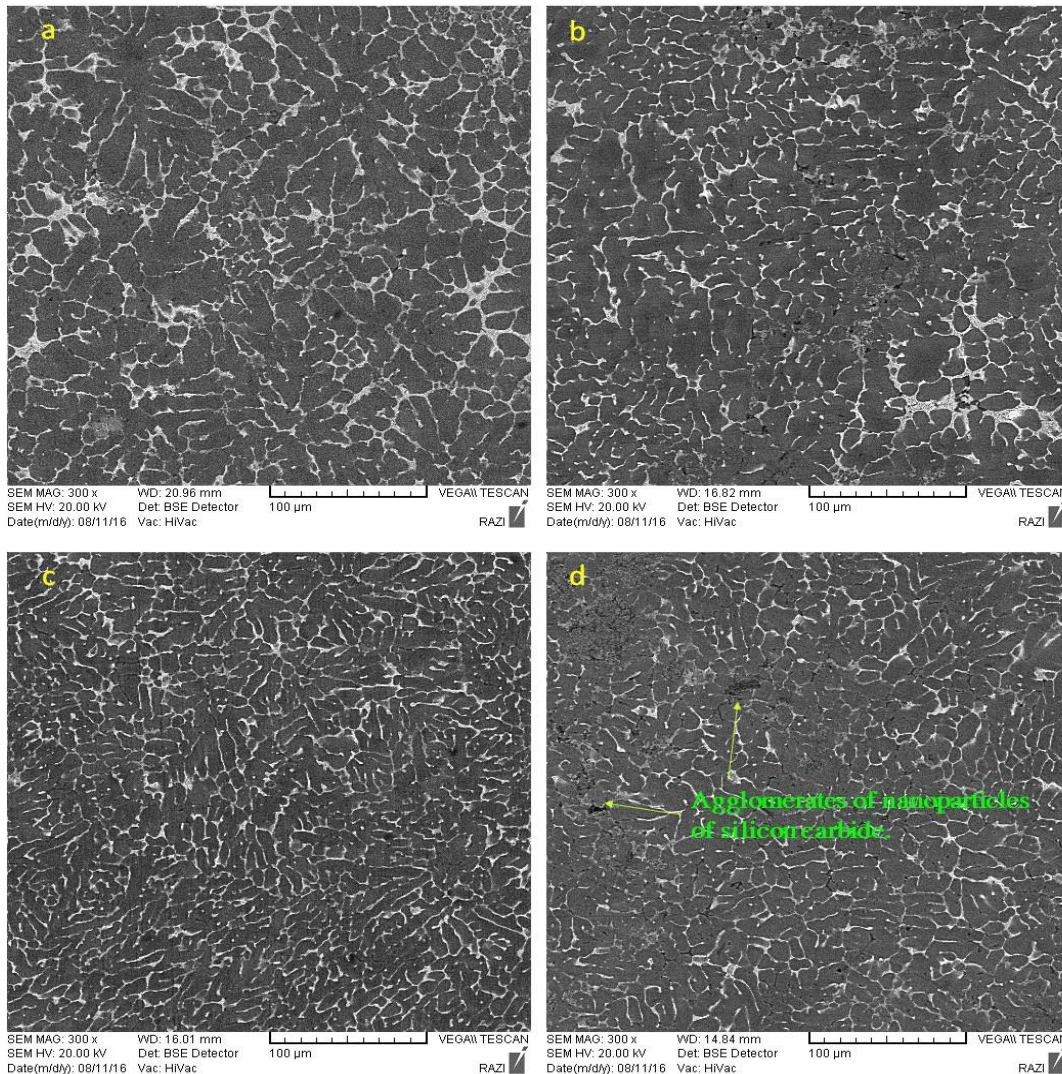
علت این که با افزودن نانوذرات به صورت پودر آمیزان می توان به ساخت نانوکامپوزیت دست یافت را اینگونه می توان بیان کرد که در تهیه پودر آمیزان از روش آسیابکاری پراثری استفاده شده است، بنابراین در اثر نیروهای ضربه ای و برشی شدید ناشی از گلوله های آسیاب، خوشه های نانوذرات از بین رفته و نانوذرات به صورت مجزا در زمینه پودر آمیزان توزیع خواهند شد (شکل ۳). توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه پودر آمیزان سبب افزایش فاصله بین نانوذرات و در نتیجه کاهش نیروی جاذبه بین آنها خواهد شد. این موضوع احتمال غلبه نیروی فراهم

ها در داخل زمینه هنگام اشاعه ترک باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانو کامپوزیت شده اند. پس در مجموع دو مکانیزم و پدیده مهم در داخل نانوکامپوزیت اتفاق می افتد. اول این که با اضافه کردن نانوذرات، اندازه دانه های آلیاژ زمینه کاهش می یابد که طبق رابطه هال پیچ باعث بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می شود. دوم این که با افزودن نانوذرات و پخش یکنواخت این ذرات در داخل زمینه با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک در داخل زمینه باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت می شود. اما در درصد های بالاتر نانوذرات SiC (۵ درصد)، چون مقدار آن زیاد می باشد، نانوذرات به خوبی در زمینه توزیع نشده و کلوخه می شوند و بیشتر در مرز دانه ها تجمع می کنند که این کلوخه ای شدن نانوذرات باعث کاهش خواص مکانیکی نانو کامپوزیت می شود.

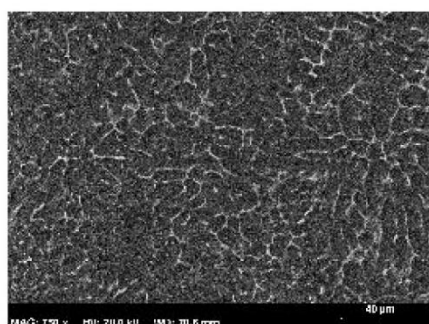
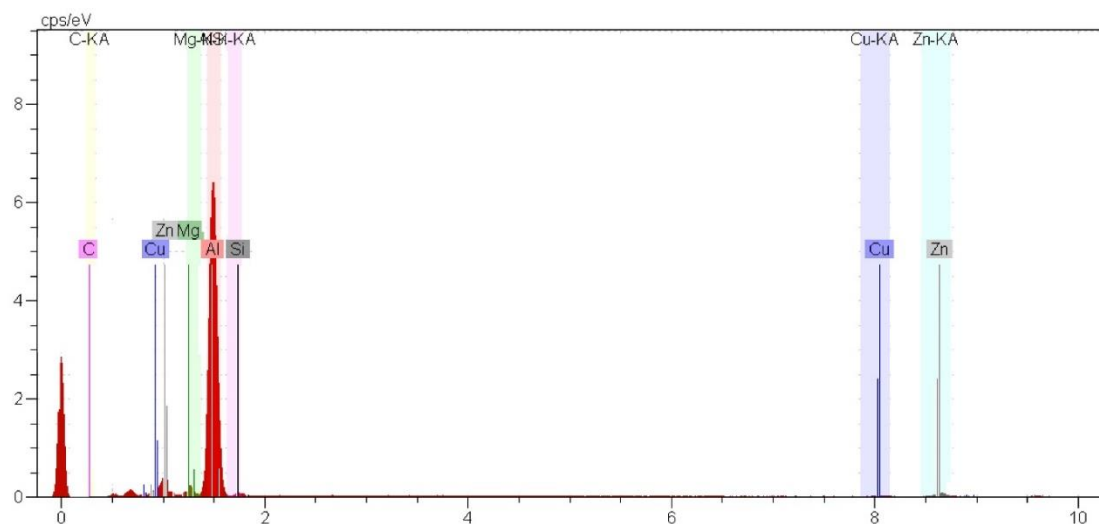
$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، σ_y تنش تسلیم، σ_0 تنش اصطکاکی، k پارامتر قفل شدن و d قطر متوسط دانه هاست. اثر هال پیچ بر اساس پدیده انباشتگی نابجایی ها در مرز دانه ها توضیح داده می شود. این انباشتگی ها موجب ایجاد نواحی تمرکز تنش در مرز دانه ها می شوند که در فعال سازی چشمه های نابجایی در دانه های مجاور و انتقال آنها بین دانه ها نقش اساسی دارند. بر این اساس، کوچک تر شدن اندازه دانه موجب محدود شدن این انباشتگی ها و در نتیجه محدودیت پخش نابجایی ها در حجم اجسام می شود. اما در درصد های بیشتر، نانوذرات کلوخه ای شده و باعث کاهش خواص استحکامی شده اند.

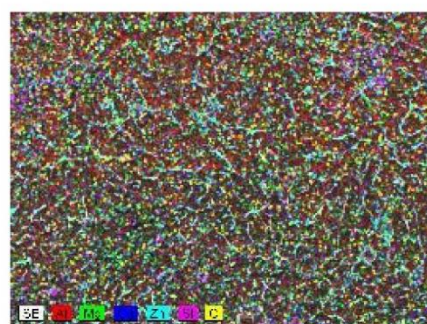
در ارتباط با توزیع یکنواخت نانوذرات در داخل زمینه نیز می توان گفت که این ذرات با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک



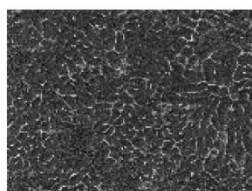
شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار، الف) آلیاژ پایه آلومینیوم (Al-8Zn-3Mg-2.5Cu، ب) ۱٪، ج) ۳٪، د) ۵٪ نانوذرات SiC



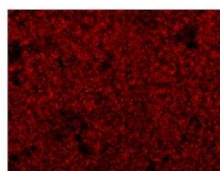
SEM image



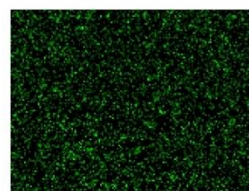
Map data



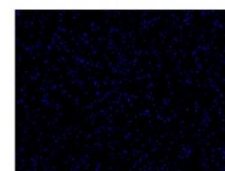
SE



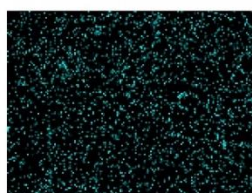
Al-K



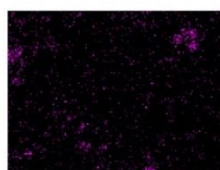
Mg-K



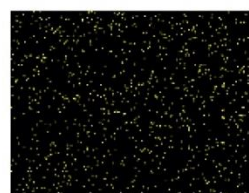
Cu-KA



Zn-KA



Si-KA

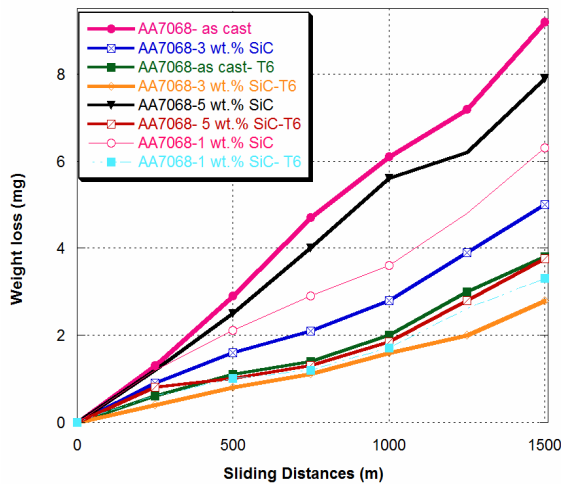


C-KA

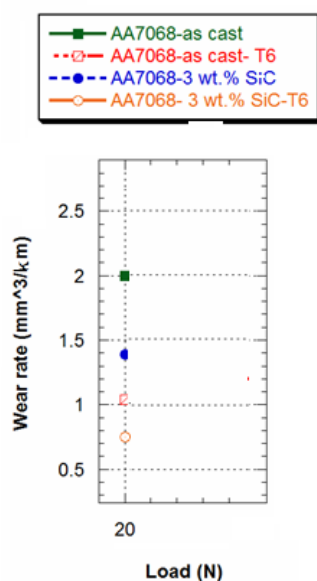
شکل ۷ آنالیز EDX و نحوه توزیع عناصر سطح نمونه نانوکامپوزیت با ۵ درصد نانوذرات تقویت کننده SiC.

در شکل (۷)، عناصر اصلی روی، مس و منیزیم در داخل دانه و همچنین مرز دانه ها توزیع شده اند. به علت تشکیل فاز یوتکتیک $MgZn_2$ در آلیاژ آلومینیوم $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ و حضور فاز یوتکتیک

در شکل (۷)، آنالیز EDX از سطح نمونه کامپوزیت زمینه آلومینیوم $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ با ۵ درصد نانوذرات SiC و نحوه توزیع عناصر مختلف نشان داده شده است. مطابق با شکل



شکل ۸ میزان کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی درصد‌های مختلف نانوذرات کاربیدسیلیسیم قبل و بعد از اعمال عملیات T6 تحت نیروی ۲۰ نیوتن.



شکل ۹ نرخ سایش آلیاژ پایه و نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۳ درصد وزنی کاربیدسیلیسیم قبل و بعد از عملیات T6.

مقاومت به سایش با افزایش درصد نانوذرات کاربیدسیلیسیم و نانو صفحات گرافن افزایش یافته است. بررسی سطوح سایش اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با مکانیزم‌های سایش ارائه می‌دهد. تصاویر SEM از سطوح سایش یافته برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانوذرات کاربیدسیلیسیم در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با

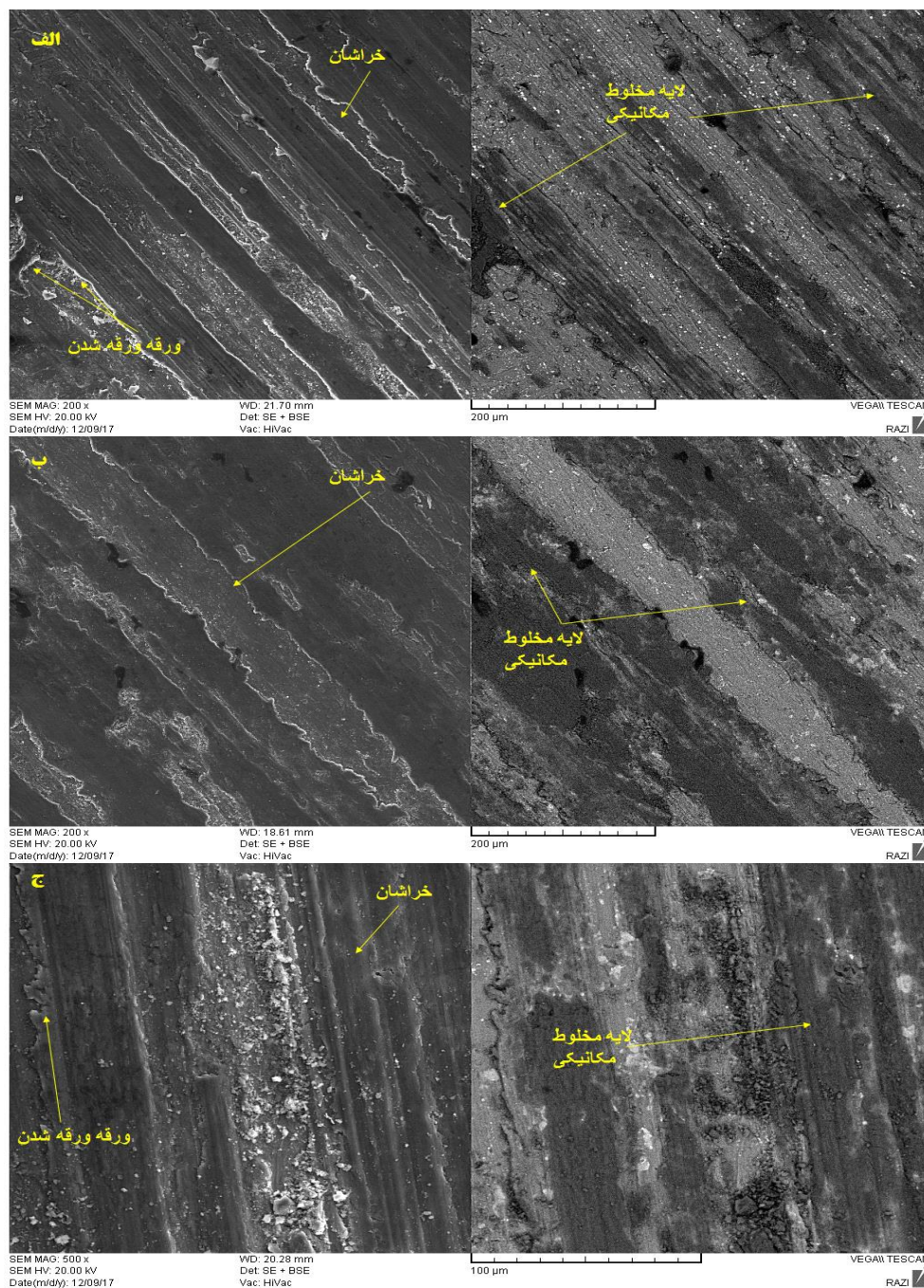
در مرزدانه‌ها، حضور عناصر منیزیم و روی بیشتر در مرزدانه‌ها و همچنین در داخل دانه‌ها نیز مشهود است. نانوذرات SiC با توجه به شکل (۷) دارای توزیع و پراکندگی مناسبی هستند، اما در بعضی از مناطق نمونه، این ذرات کلوخه‌ای شده و تجمع کرده‌اند که باعث کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می‌شود. در درصد‌های پایین نانوذرات SiC، به علت درصد پایین فاز تقویت‌کننده، توزیع بهتری بدست می‌آید، اما در درصد‌های بالاتر به علت کلوخه‌ای شدن، نانوذرات در حین انجماد از جبهه انجماد پس زده شده و در مرزدانه‌ها تجمع می‌کنند که باعث کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می‌شود.

بررسی رفتار سایش. نرخ سایش بیانگر حجم از دست رفته ماده به وسیله سایش (به میلی‌متر مکعب) به ازای واحد مسافت لغزشی (به متر) است. اندازه‌گیری سایش به وسیله این کمیت برای مقایسه نرخ سایش در دسته‌های مختلف مواد بسیار مفید است. برای محاسبه نرخ سایش در نمونه‌های مختلف، میزان کاهش وزن در نمونه‌های نانوکامپوزیت از اهمیت بسزایی برخوردار است. در شکل (۸)، کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصد‌های مختلف فاز تقویت‌کننده، قبل و بعد از عملیات حرارتی به ازای اعمال نیروی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است.

در شکل (۹)، نرخ سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت با فاز تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم برحسب نیروی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است. نرخ سایش برای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم بعد از عملیات حرارتی T6 در ۲۰ نیوتن نسبت به آلیاژ پایه به ترتیب ۲/۶۷ برابر کاهش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از اضافه کردن نانوذرات و تاثیر آنها بر روی اندازه دانه، کاهش اندازه دانه باعث کاهش نرخ سایش نسبت به نمونه آلیاژ پایه شده است. علت افزایش مقاومت به سایش با کاهش اندازه دانه، افزایش سختی نمونه‌ها می‌باشد. بررسی تاثیر ریز شدن دانه‌های زمینه بر سختی آنها نشان داد که با کاهش اندازه دانه‌ها، سختی نانوکامپوزیت افزایش یافته و این افزایش سختی از رابطه تجربی هال-پیچ تبعیت می‌کند. افزایش سختی، مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک را به همراه دارد و براساس رابطه آرچارد موجب کاهش نرخ سایش می‌شود.

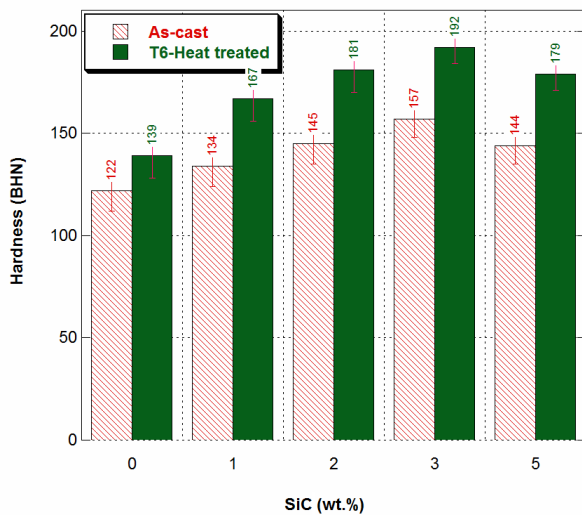
و ورقه ای غالب می شود اما با افزایش بیشتر درصد نانوذرات کاربیدسیلیسیم، این ذرات در داخل زمینه کلوخه شده و به صورت یکنواخت در داخل زمینه پخش نمی شوند و لذا باعث کاهش استحکام و سختی و افزایش نرخ سایش می شوند. در این حالت، در سطوح سایش کندگی های زیادی دیده می شود که دلیل آن کلوخه های نانوذرات کاربیدسیلیسیم می باشد.

افزودن نانوذرات کاربیدسیلیسیم به علت افزایش استحکام و سختی، نرخ سایش کم می شود. هم چنین مکانیزم سایش چسبان و خراشان در نانوکامپوزیت های حاوی درصد های پایین (۱ درصد وزنی) نانوذرات کاربیدسیلیسیم حاکم است. اما با افزایش درصد نانوذرات کاربیدسیلیسیم تا ۳ درصد وزنی، استحکام و سختی بیشتر شده و نرخ سایش کاهش می یابد و مکانیزم سایش خراشان



شکل ۱۰ تصاویر SEM از سطوح سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم تحت نیروی ۲۰ نیوتن، (الف) قبل از عملیات حرارتی T6، ب و پ) بعد از عملیات حرارتی T6.

بیشتر از میکروکامپوزیت Al/10 vol.%SiC است. الربیع و همکارانش [15] نشان دادند که با افزودن ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC با اندازه ۴۳ میکرومتر به زمینه آلومینیم مقدار سختی از ۲۹/۶ به ۳۷/۲ ویکرز افزایش می‌یابد. همین محققین گزارش کردند که با کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده نیز مقدار سختی افزایش می‌یابد. برای کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده با ۲ درصد وزنی نانوذرات Al₂O₃ افزایش سختی به میزان ۹۲٪ توسط ملا و همکارانش [16] گزارش شده است. به طور کلی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که با افزودن ذرات تقویت‌کننده در مقیاس کوچکتر از میکرومتر (نانومتری) به زمینه‌های فلزی نسبت به ذرات میکرومتری سطوح بالاتری از سختی قابل دستیابی است.



شکل ۱۱ نتایج آزمون سختی سنجی برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانوذرات کاربیدسیلیسیم.

نتیجه گیری

در این تحقیق، نانوکامپوزیت‌های AlAl-8Zn-3Mg-2.5Cu/SiC به روش ریخته‌گری گردابی با کمک امواج مافوق صوت ساخته شدند و خواص مکانیکی و ریز ساختار آنها بررسی شد. نتایج نهایی حاصل از این مطالعه به شرح زیر هستند:

- ۱- در اثر اعمال فرآوری مافوق صوت بر مذاب، در ناحیه‌هایی از مذاب بر اثر افزایش فشار موضعی، جوانه‌های جامدی تشکیل می‌شوند. این جوانه‌ها باعث ایجاد ساختاری بسیار ریزتر در زمینه پس از انجماد می‌شوند که طبق رابطه هال پیچ، افزایش خواص استحکامی زمینه را به همراه دارد.
- ۲- فرآوری مافوق صوت باعث شکسته شدن و پراکندگی

هم‌چنین در نمونه‌هایی که تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفته‌اند، نرخ سایش خیلی پایین‌تر از نمونه‌های بدون عملیات حرارتی می‌باشد. در مجموع عملیات حرارتی پیرسازی باعث تغییراتی در داخل ساختار آلیاژ می‌شود. بعد از عملیات حرارتی به علت تشکیل رسوبات ریزتر و یکنواخت‌تر در زمینه و از بین رفتن رسوبات بزرگ در حین فرآیند عملیات حرارتی، سختی و استحکام افزایش می‌یابد. در آلیاژهای سری 7xxx آلومینیم حاوی نانوذرات، زمان پیرسازی کمتر است و دلیل این امر حضور نانوذرات (که محل‌های مناسبی برای جوانه‌زنی رسوبات در حین پیرسازی هستند)، می‌باشد. تشکیل این رسوبات باعث افزایش استحکام و سختی نانوکامپوزیت پیرسازی شده خواهد شد و در ادامه، باعث کاهش نرخ سایش و کاهش ضریب اصطکاک می‌شود.

سختی سنجی. در شکل (۱۱) نتایج سختی سنجی

نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با درصد‌های مختلف نانوذرات کاربیدسیلیسیم نشان داده شده است. در مجموع با افزودن نانوذرات، سختی تمامی نمونه‌های نانوکامپوزیت افزایش یافته است. سختی نمونه نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم بعد از عملیات حرارتی نسبت به نمونه پایه ۶۷ درصد افزایش سختی مشاهده می‌شود. مظاهری و همکارانش [12] گزارش کردند که افزودن نانوذرات Al₂O₃ به آلیاژ آلومینیم ۳۵۶A تا میزان ۳ درصد حجمی به روش ریخته‌گری گردابی با افزایش سختی همراه است و افزودن مقادیر بیشتر از ذرات تقویت‌کننده به دلیل تشکیل کلوخه موجب کاهش سختی می‌شود. علت افزایش سختی با افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده، حضور ذرات سرامیکی و سخت در فاز زمینه و ایجاد قیدهای بیشتر برای تغییر شکل پلاستیک موضعی در مقابل فرورونده در آزمون سختی است. شن و همکارانش [13] دریافتند که سختی کامپوزیت‌های زمینه فلزی از زمینه بیشتر است. علت این امر افزایش موضعی مقدار ذرات تقویت‌کننده در زیر فرورونده به دلیل سیلان پلاستیک زمینه در حین آزمون سختی ذکر شده است. هم‌چنین با کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده قید ایجاد شده برای حرکت نابجایی‌ها بیشتر می‌شود و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد. به طور مشابهی هم‌زائوی و همکارانش [14] نشان دادند که سختی نانوکامپوزیت Al/2 vol.%Al₂O₃

سایش افزایش پیدا میکند. اما با افزایش نانو نانوذرات SiC تا ۵ درصد وزنی به علت کلوخه ای شدن نانوذرات SiC، ایجاد تمرکز تنش و تضعیف فصل مشترک نانوذرات SiC و زمینه، نرخ سایش بیشتر شده و مقاومت به سایش کاهش مییابد.

۶- نتایج سختی نشان داد که نمونه نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم بعد از عملیات حرارتی نسبت به نمونه پایه ۶۷ درصد افزایش سختی نشان می دهد.

تقدیر و تشکر

دندریت ها و رسوبات در داخل فاز زمینه می شوند که از این طریق نیز افزایش خواص مکانیکی را بدنبال دارد.

۳- فرآوری آسیاب کاری پراثرژی و تولید تقویت کننده به صورت کامپوزیتی باعث توزیع و پخش یکنواخت تر نانوذرات در زمینه آلیاژ در حین ذوب و انجماد می شود.

۴- درصد بهینه برای فاز تقویت کننده نانوذرات SiC در این تحقیق با توجه به مطالعات ریزساختاری و سختی نمونه ها، ۳ درصد وزنی انتخاب شد.

۵- نتایج آزمون سایش نشان داد که با کاهش اندازه دانه، نرخ سایش کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانوذرات SiC نرخ سایش در نمونه های نانوکامپوزیت کاهش مییابد. با افزایش نانوذرات SiC تا ۳ درصد وزنی، به علت افزایش خواص مکانیکی در حین سایش، مقاومت به

مراجع

- [1] P. SenthilKumar, Padmalaya G, N. Elavarasan, B.S.Sreeja, "GO/ZnO nanocomposite - as transducer platform for electrochemical sensing towards environmental applications", *Chemosphere*, Vol. 313, pp 137345, 2023
- [2] Balakrishnan Somasekaran, Alwarsamy Thirunarayanaswamy, Ilamathi Palanivel " Synthesis of Graphene and fabrication of Aluminium-Grp nanocomposites: A review ", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, pp 2436-2442, 2022.
- [3] Mamta Dahiya, Virat Khann, Suneev Anil Bansal " Aluminium-graphene metal matrix nanocomposites: Modelling, analysis, and simulation approach to estimate mechanical properties" *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [4] Reza Abedinzadeh, Ehsan Norouzi, Davood Toghraie " Study on machining characteristics of SiC–Al₂O₃ reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning ", *Ceramics International*, Vol. 48, pp 29205-29216, 2022.
- [5] Shijina S.Sainudeen, Antony Joseph, Mathew Joseph, V.Sajith, " Heat transfer phenomena of copper-graphene nanocomposite coated aluminium heat spreaders", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 212, pp 118545, 2022.
- [6] Miracle, D., "Metal matrix composites—from science to technological significance", *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 2526-2540, 2005.
- [7] Wenzhen, L., Shiyang, L., Qiongyuan, Z., Xue, Z., "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 990-993, 2010.
- [8] Hihn, JY., Doche, ML., Mandroyan, A., Hallez, L. and Pollet, BG., "Respective Contribution of Cavitation and Convective Flow to Local Stirring in Sonoreactors", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 18, pp. 881-887, 2011.
- [9] AmirKhanlou, S., Ji, S., Zhang, Y., Watson, D., Fan, Z., "High modulus Alsingl bondSisingle bondMgsingle bondCu/Mg₂Sisingle bondTiB₂ hybrid nanocomposite: Microstructural characteristics and micromechanics-based

- analysis" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 694, pp. 313–324, 2017.
- [10] Yan, J., Xu, Z., Shi, L., Ma, X., Yang, S., "Ultrasonic assisted fabrication of particle reinforced bonds joining aluminum metal matrix composites" *Mater & Design*, Vol. 32, pp. 343-347, 2011.
- [11] Shabana, S., Sonawane, SH., Ranganathan, V., Pujjalwar, PH., Pinjari, DV., Bhanvase, BA., Gogate, PR., Ashokkumare, M., "Improved synthesis of aluminium nanoparticles using ultrasound assisted approach and subsequent dispersion studies in di-octyl adipate", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 36, pp. 59–69, 2017.
- [12] Mazahery, H. Abdizadeh, H.R. Baharvandi, "Development of high-performance A356/nano-Al₂O₃ composites", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 518, pp. 61-64, 2009.
- [13] Y.L Shen, J.J Williams, G Piotrowski, N Chawla, Y.L Guo, "Correlation between tensile and indentation behavior of particle-reinforced metal matrix composites: an experimental and numerical study", *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 3219-3229, 2001.
- [14] R. Hamzaoui, O. Elkedim, E. Gaffet, "Milling conditions effect on structure and magnetic properties of mechanically alloyed Fe–10% Ni and Fe–20% Ni alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 381, pp. 363-371, 2004.
- [15] K.S. Al-Rubaie, H.N. Yoshimura, J.D. Biasoli de Mello, "Two-body abrasive wear of Al–SiC composites", *Wear*, Vol. 233, pp. 444-454, 1999.
- [16] S. Mula, P. Padhi, S.C. Panigrahi, S.K. Pabi, S. Ghosh, "On structure and mechanical properties of ultrasonically cast Al–2% Al₂O₃ nanocomposite", *Materials Research Bulletin*, Vol. 44, pp. 1154-1160, 2009.