



The Effect of Age Hardening Heat Treatment (T6) on the Microstructure and Wear Behavior of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu Nanocomposite Reinforced with Graphene Nano Plates

Research Article

Mohammad Alipour¹

DOI: [10.22067/jmme.2022.78198.1070](https://doi.org/10.22067/jmme.2022.78198.1070)

1- Introduction

The demand for cost reduction in the area of transportation like automotive or aerospace applications calls for decrease in the fuel consumption which in turn can be achieved by weight reduction of the final products. In this regard aluminum and its alloys have been the primary candidate for the manufacturing of 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 treatability, high formability, good welding properties and energy absorption. Examples of this series include bumper beams, chassis parts and crash boxes for light weight cars, and extrusion of 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. Mechanically deformed super high strength aluminum alloys have been extensively studied for several decades, but little attention has been made on the alloy in as-cast condition and semi-solid state. As-cast structures of these alloys have a significant influence on the 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 the current research, we report the development of GNPs reinforced Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix nanocomposites. 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 and lightweight alloy compared to that of brass, copper and steel. The Al-8Zn-3Mg-2.5Cu-GNPs nanocomposites were synthesized by a combination of powder metallurgy and stir casting with ultrasonic waves. The Al-8Zn-3Mg-2.5Cu with and without GNPs 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. The Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminum 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 aluminium alloy was done by heating it to a temperature of ~ 750 ° 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 60 s with 2000w ultrasonic waves to homogenise the uniform temperature followed by addition of pre-heated aluminum powder and different wt.% of GNPs in the metal melt. Nanocomposites specimens have been prepared with 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 1 wt.% GNPs. After successful addition of GNPs 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 microscopy 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 of Al-GNPs 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-GNPs nanocomposite powders after 2 h of milling.

From Fig. 2, it is noticeable that GNPs and ultrasonication assisted stir casting increases the number of grain boundaries and therefore promotes a more homogeneous distribution of intermetallic precipitates. The optimum content of GNPs that can be used to reinforce Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix is 0.5 wt.%.

*Manuscript received: August 14, 2022, Revised. September 18, 2022, Accepted, December 7, 2022.

¹ Corresponding author: Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran. **Email:** alipourmo@tabrizu.ac.ir.

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 GNPs, T6 heat treatment decreases in weight loss compared to that of unreinforced aluminum alloy. It was observed that the amount of weight loss has increased by an increase in sliding distance in a linear trend.

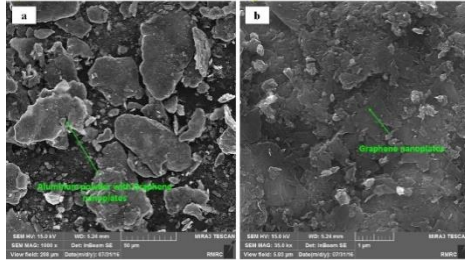


Fig. 1. Image of Al-25 Graphene composite powder after 2 hours of high energy milling, a) low magnification of aluminum powder, b) high magnification of graphene on aluminum powder.

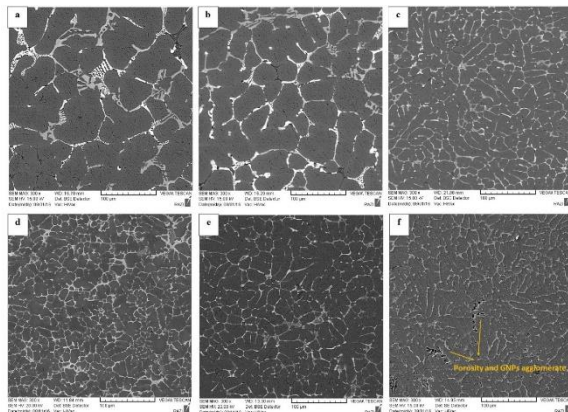


Fig. 2. SEM images of microstructures of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu, with (a) 0.0 wt.% GNPs, (b) 0.1 wt.% GNPs, (c) 0.3 wt.% GNPs, (d) 0.5 wt.% GNPs, (e) 0.7 wt.% GNPs and (f) 1 wt.% GNPs.

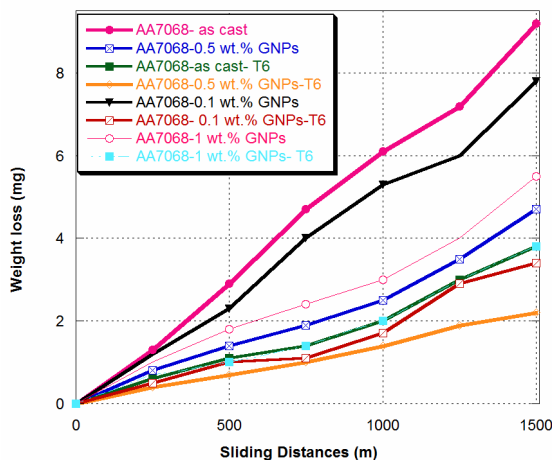


Fig. 3. The amount of weight loss of nanocomposite samples containing different percentages of graphene nanosheets before and after T6 treatment under 20N force.

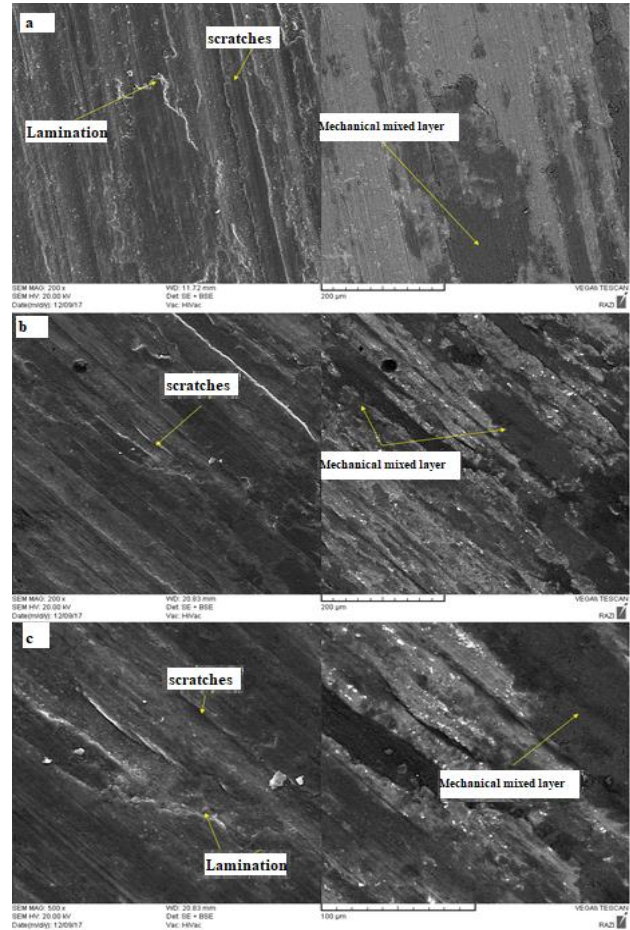


Fig. 4. SEM images of wear surfaces of nanocomposite reinforced with 0.5% by weight of graphene nanosheets under 20N force, a) before T6 heat treatment, b and c) after T6 heat treatment.

Comparison between unreinforced and nanocomposite samples before and after T6 heat treatment shows that the addition of GNPs 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 GNPs with Al-8Zn-3Mg-2.5Cu matrix.

4- Conclusions

- 1- Stir casting method with ultrasonic waves was very effective for improvement of the mechanical properties of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy matrix GNPs reinforced composites and achieving the uniform distribution of GNPs in the aluminum matrix.
- 2- The optimum amount of nanoparticles was 0.5 wt.% GNPs
- 3- When the wt.% of GNPs reaches more than 0.5 wt.%; agglomeration of GNPs at the grain boundaries causes embrittlement, porosities, less interfacial bonding and decline of the mechanical properties.
- 4- The SEM investigation of the worn surfaces had shown that abrasive wear was the main wear mechanism in these composites.



تأثیر عملیات حرارتی پیر سختی (T6) بر ریزساختار و خواص سایشی نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم
Al-8Zn-3Mg-2.5Cu تقویت شده با نانو صفحات گرافن*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور^(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2022.78198.1070

چکیده در این تحقیق، خواص سایشی و ریزساختار نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu تقویت شده با ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷ و ۱ درصد نانو صفحات گرافن تولید شده به روش ریخته گری گردابی با کمک حباب زائی مافوق صوت بررسی شد. همچنین برای مطالعات ریزساختاری و سطوح سایش، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار گرفته شد. مطالعات ریزساختاری نانوکامپوزیت نشان داد که حضور نانو صفحات گرافن پراکنده باعث کاهش اندازه دانه شد، اما در درصدهای بالای این نانوذرات (۱ درصد وزنی)، کاهش محسوسی در اندازه دانه ایجاد نمی‌شود. همچنین حضور نانوذرات و کاهش اندازه دانه، افزایش چشمگیر مقاومت به سایش نانوکامپوزیت را به همراه دارند. البته در درصدهای بالای نانو صفحات گرافن (۱ درصد وزنی)، این نانو مواد در مرز دانه ها کلوخه ای شده و باعث کاهش مقاومت به سایش کامپوزیت شدند. نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰٫۵٪ وزنی نانو صفحات گرافن قبل و بعد از عملیات حرارتی بهترین مقاومت به سایش را نشان داد که بهینه ترین درصد نانو صفحات گرافن می باشد.

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت ریختگی، نانو صفحات گرافن، ریخته گری گردابی، فرآوری مافوق صوت.

The Effect of Age Hardening Heat Treatment (T6) on the Microstructure and Wear Behavior of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu Nanocomposite Reinforced with Graphene Nano Plates

Mohammad Alipour

Abstract In this study, microstructure and wear behavior of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy matrix nanocomposite reinforced with 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 1 wt.% graphene nano plates (GNPs) produced by stir casting and ultrasonic treatment have been investigated. Ultrasound device equipped with a cooling system with high powers was used for mixing alloy and nanoparticles. Also the microstructure and wear surfaces of nanocomposite was investigated by scanning electron microscope equipped with EDS analysis. The microstructural studies of the nanocomposite revealed that GNPs addition reduces the grain size, but adding high GNPs content (1 wt.%) does not change the grain size considerably. Further investigations on wear revealed that the addition of GNPs increases wear resistance. At high GNPs contents (1 wt.%), the presence of GNPs agglomerate on grain boundaries was found that causes decrease the wear resistance. The optimum amount of nanoparticles is 0.5 wt.% GNPs that nanocomposite exhibits best wear resistance.

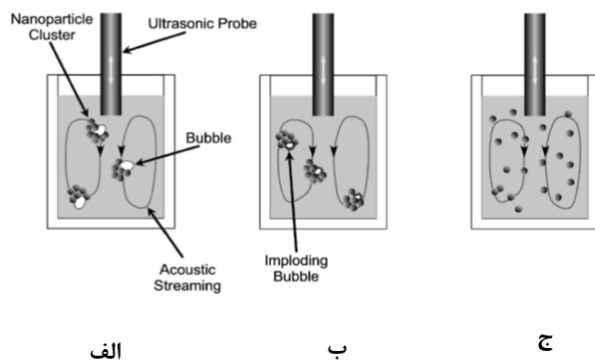
Key Words Casting nanocomposite, Graphene nano plates, Stir casting, Ultrasonic treatment.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۵/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۱۹ می باشد.

مقدمه

باشند. در مورد کامپوزیت های 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. مطابق با شکل (۱) در ساخت نانوکامپوزیت ها به کمک امواج مافوق صوت، همزمان خوشه های نانوذرات موجود در مذاب توسط اثر حباب زائی امواج از بین می روند و توسط پدیده جریان صوتی به طور یکنواخت در داخل مذاب پراکنده می شوند [10].



الف

ب

ج

شکل ۱ شماتیک تأثیر حباب زایی و جریان صوتی ناشی از امواج مافوق صوت برای پخش یکنواخت نانوذرات در داخل مذاب، (الف) کلوخه ای شدن نانو ذرات، (ب) جریان های گردابی و انفجار حباب ها، (ج) پخش یکنواخت نانو ذرات [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

کامپوزیت های 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 کامپوزیت های زمینه فلزی، کامپوزیت های زمینه آلومینیومی هستند که به دلیل مزایایی از قبیل دانسیته پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، امروزه در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا و خودرو دارای کاربرد گسترده ای هستند [3-6].

اضافه کردن عوامل تقویت کننده سرامیکی به آلیاژهای آلومینیوم موجب افزایش خواص مکانیکی و سایشی آنها می شود. عمده ذرات تقویت کننده که به آلیاژهای پودری آلومینیوم اضافه می شوند، کاربیدها، بوریدها، اکسیدها و نیتريد ها می باشند. کاربید سیلیسیم با دمای ذوب بالا، چگالی پایین، استحکام بالا، سختی بالا، مقاومت به شوک حرارتی عالی، انبساط حرارتی پایین، هدایت حرارتی بالا و مدول الاستیک زیاد، یک تقویت کننده مناسب برای کاربردهای دمای بالا بشمار می رود [4-6].

کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپوسته 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 آلومینیوم نرم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت های 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 کامپوزیت های ریخته گری شده اثر معکوس داشته

کاری پراثری و کامپوزیت شدن با پودر میکرونی آلومینیوم به مذاب اضافه شده و تحت فرآوری ریخته گری گردابی و مافوق صوت قرار می‌گیرند. سپس ریزساختار زمینه و رفتار سایشی نانوکامپوزیت بررسی می‌شود. به دلیل اهمیت آلیاژهای سری Vxxx در صنایع پیشرفته، آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu به عنوان آلیاژ زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است.

روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu با ترکیب مشخص شده در جدول (۱) و نانو صفحات گرافن و پودرهای میکرونی آلومینیوم با ابعاد ۴۰ میکرومتر برای ساخت نانوکامپوزیت Al-8Zn-3Mg-2.5Cu-GNPs استفاده شد. از جمله ویژگی‌های نانو صفحات گرافن می‌توان به متوسط تعداد لایه بین ۵ تا ۱۰ لایه و خلوص بالای ۹۹ درصد وزنی اشاره کرد. در شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو صفحات گرافن نشان داده شده است. در این تحقیق نانو صفحات گرافن در درصدهای وزنی ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷ و ۱ درصد وزنی به مذاب آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu اضافه شدند تا حالت بهینه بدست آید.

برای افزودن نانو ذرات به مذاب از روش ساخت پودر کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری پراثری مدل NARYA- MPM 2-250 H استفاده شد. در این روش ابتدا مخلوطی از نانو صفحات گرافن و پودر آلومینیومی با ابعاد ۴۰ میکرومتر در داخل آسیاب پراثری به مدت ۲ ساعت تحت عملیات آسیاب قرار گرفتند تا پودر کامپوزیتی آلومینیوم با نانو صفحات گرافن حاوی ۲۵ درصد نانو صفحات گرافن و ۷۵ درصد پودر آلومینیوم بدست آید. سپس کامپوزیت پودری حاصل به مذاب افزوده شد. در شکل (۳)، تصویر پودر کامپوزیتی Al-25GNPs نشان داده شده است.

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

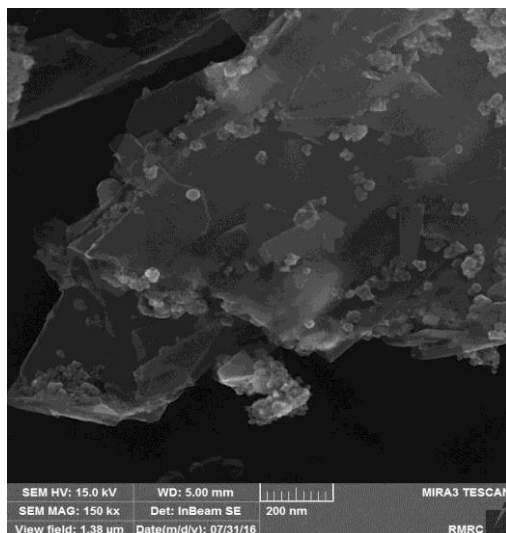
element	Al	Zn	Mg	Cu	Ti	Zr	Fe	Si	Mn
%	تعداد	۸	۳	۲٫۵	۰٫۱	۰٫۱۵	۰٫۱	۰٫۱۲	۰٫۱

می‌کنند و پس از بزرگ شدن تا اندازه مشخص در حین سیکل فشاری مثبت به طور ناگهانی از هم پاشیده می‌شوند. حباب‌های ریزی که در مدت زمانی کمتر از ۱۰-۶ ثانیه منفجر می‌شوند، نقاط گرم میکرونی گذرا را ایجاد می‌کنند. 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].

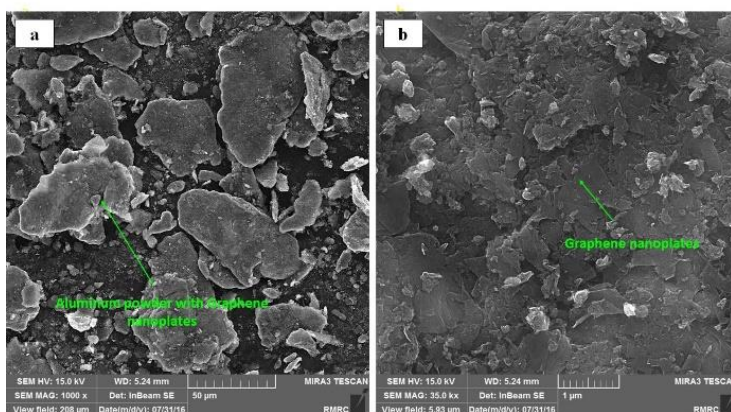
حباب‌های گذرا، ضربات انفجار گونه به خوشه‌ها و کلوخه‌های نانو ذرات وارد می‌کنند و از این طریق خوشه‌های نانو ذرات را می‌شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت‌های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می‌شود. بررسی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی نانوکامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [8]. بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت‌های فوق نشان داده است که اندازه دانه و بازوهای دندریتی فاز زمینه نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچک‌تر است. یکی از اثرات مهم حضور نانو ذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [9].

مطالب یاد شده از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف پذیری نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه محسوب می‌شوند. توزیع و پراکندگی نانو ذرات در زمینه نانوکامپوزیت نسبتاً مطلوب است و همواره تعدادی خوشه و کلوخه نانو ذرات در نواحی مجاور مرز دانه‌ها و یا در امتداد مرز دانه‌ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانو ذرات مجزا بیشتر در درون دانه‌ها یا بازوهای دندریتی فاز زمینه پراکنده شده‌اند [8].

در پژوهش حاضر روش جدیدی برای توزیع بهتر نانو صفحات گرافن و همچنین اصلاح بیشتر ریز ساختار بر مبنای فرآیند ذوبی به کمک فرآوری مافوق صوت در نظر گرفته شده است. بر این مبنای نانو صفحات گرافن (GNPs) بعد از آسیاب



شکل ۲ تصویر FESEM از نانو صفحات گرافن



شکل ۳ تصویر پودر کامپوزیتی Al-25 Graphene بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پراثری، (الف) بزرگنمایی پایین پودر آلومینیوم، (ب) بزرگنمایی بالا از گرافن روی پودر آلومینیوم

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 و FESEM) با مدل VEGA\TESCAN-LM مجهز به آشکارساز EDX در بزرگنمایی های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی از این بررسی، پی بردن به نقش نانو صفحات گرافن بر اندازه و شکل بازوهای دندریتی، فاز یوتکتیک، نحوه توزیع نانو صفحات در زمینه نانوکامپوزیت، ریزساختار نمونه های مختلف و دیگر

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 هم‌زن در مذاب، عمل هم‌زدن و افزودن نانو پودر کامپوزیتی به مذاب صورت گرفت. سرعت هم‌زن ۵۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و مدت زمان اعمال هم‌زن مکانیکی ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از پایان پذیرفتن عمل هم‌زدن، 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،

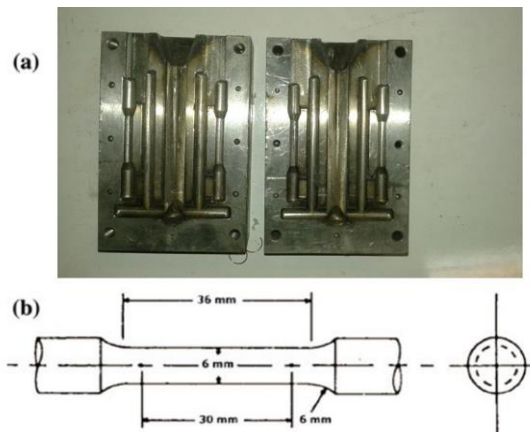
انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانو صفحات گرافن، گرا دیان دمایی و گرا دیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [11].

آنچه بدیهی است این است که اگر نانو ذرات در مذاب از پراکنندگی مناسبی برخوردار نباشند، نمی توان انتظار داشت که توزیع نانو ذرات در نمونه حاصل شده از انجماد این مذاب مطلوب باشد. علت این که با افزودن نانو صفحات گرافن به صورت پودر کامپوزیتی می توان به ساخت نانو کامپوزیت دست یافت را اینگونه می توان بیان کرد که در تهیه پودر کامپوزیتی از روش آسیابکاری پرانرژی استفاده شده است، بنابراین در اثر نیروهای ضربه ای و برشی شدید ناشی از گلوله های آسیاب، خوشه های نانو ذرات از بین رفته و نانو صفحات گرافن به صورت مجزا در زمینه پودر آلومینیوم توزیع خواهند شد (شکل ۳). توزیع یکنواخت نانو صفحات گرافن در زمینه پودر آلومینیوم سبب افزایش فاصله بین نانو صفحات گرافن و در نتیجه کاهش نیروی جاذبه بین آنها خواهد شد. این موضوع احتمال غلبه نیروی فراهم شده توسط همزن مکانیکی بر نیروی جاذبه بین نانو صفحات گرافن را افزایش داده و در نتیجه مانع از تشکیل خوشه های نانو صفحات گرافن در هنگام افزودن پودر کامپوزیتی به مذاب و پس از ذوب شدن ذرات پودری می شود.

کاملاً مشخص است که هر چه اندازه ذرات در داخل مذاب کوچکتر باشد به نسبت ذرات کلوخه ای شده بزرگتر، راحت تر در داخل مذاب حل می شوند. پخش شدن نانو ذرات در داخل مذاب توسط دو پدیده مهم اتفاق می افتد. در هنگام تزریق پودرهای کامپوزیتی آلومینیوم- نانو صفحات گرافن به داخل مذاب، انحلال و ذوب شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم اتفاق می افتد، در این هنگام چون نانو صفحات گرافن در داخل پودرهای آلومینیوم با عملیات آسیاب کاری پرانرژی قرار گرفته اند. هنگامی که پودرهای میکرونی آلومینیوم در داخل مذاب حل و ذوب شدند، نانو صفحات گرافن در داخل زمینه آلومینیوم مذاب رها سازی می شوند. این رها سازی نانو صفحات گرافن در مدت همزدن مکانیکی مذاب اتفاق می افتد. در ادامه با اعمال امواج مافوق صوت به نانو کامپوزیت تا مرحله ریختن در قالب، کلوخه های نانو صفحات گرافن کاملاً از هم باز شده و نانو صفحات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می آورند.

ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu بعد از اضافه

فازهای موجود در ریز ساختار آلیاژ مورد نظر بود. برای ارزیابی رفتار سایشی نیز از آزمون سایش پین بر روی دیسک استفاده شد.



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

نتایج و بحث

مطالعات ریز ساختاری آلیاژ پایه و پودر نانو کامپوزیتی

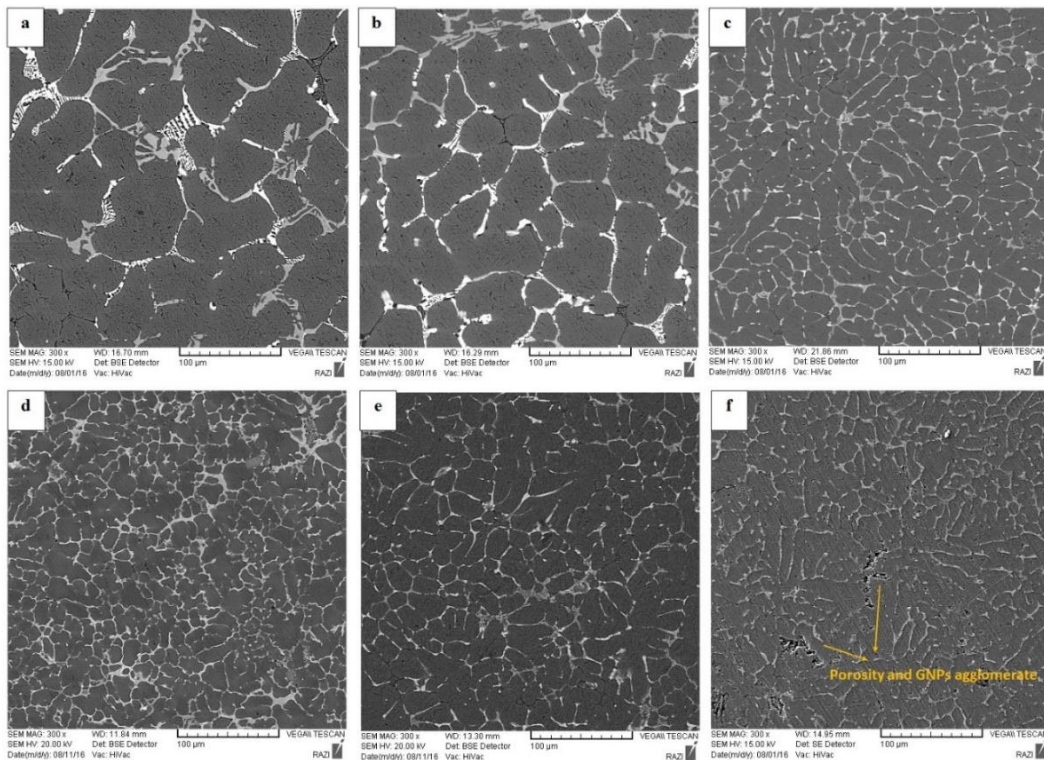
نکته مهمی که باید بدان اشاره شود اندازه و شکل پودرهای میکرونی آلومینیوم می باشد. اندازه اولیه این پودرها ۴۰ میکرون می باشد. اما بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پرانرژی، اندازه و شکل پودرها تغییر می کند و بخاطر عملیات انجام شده شکل پودرهای میکرونی از کروی بصورت صفحه ای در آمده است و اندازه آنها نیز کاهش پیدا کرده است. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است بعد از اضافه کردن نانو صفحات گرافن به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب کاری پرانرژی، نانو صفحات گرافن بصورت یکنواخت در داخل پودرهای آلومینیومی پخش شده اند.

توزیع نانو ذرات در نانو کامپوزیت ریخته گری

آنچه که مسلم است توزیع نانو صفحات گرافن در زمینه تحت تأثیر اتفاقاتی که در مذاب در حین پراکنده ساختن نانو صفحات گرافن و قبل از ریخته گری رخ می دهد و پدیده هایی که در حین انجماد رخ می دهد، می باشد. 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 نانو صفحات گرافن است که به فاکتورهای بسیاری وابسته است که از جمله آنها می توان به شکل جبهه

است، اما در درصدهای بیشتر، نانو ذرات کلوخه ای شده و باعث کاهش خواص استحکامی می شود. اما در رابطه با توزیع یکنواخت نانو صفحات در داخل زمینه نیز می توان گفت که این ذرات با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک ها و تغییر مسیر آنها (crack deflection) در داخل زمینه هنگام اشاعه ترک باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانو کامپوزیت خواهند شد. بنابراین دو مکانیزم و پدیده مهم در داخل نانوکامپوزیت اتفاق می افتد. اول این که با اضافه کردن نانو ذرات، اندازه دانه های آلیاژ زمینه کاهش پیدا خواهد کرد که بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت را به همراه خواهد داشت. دوم این که با افزودن نانو ذرات و پخش یکنواخت این ذرات در داخل زمینه با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک و تغییر مسیر ترک در داخل زمینه، باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت خواهند شد. اما در درصدهای بالاتر نانو صفحات گرافن (بیشتر از ۰٫۵ درصد) چون مقدار آن زیاد می باشد، نانو صفحات، خوب در زمینه توزیع نشده و کلوخه خواهند شد و بیشتر در مرزدانه ها تجمع خواهند کرد که این کلوخه ای شدن نانو صفحات گرافن باعث کاهش خواص استحکامی نانو کامپوزیت خواهد شد.

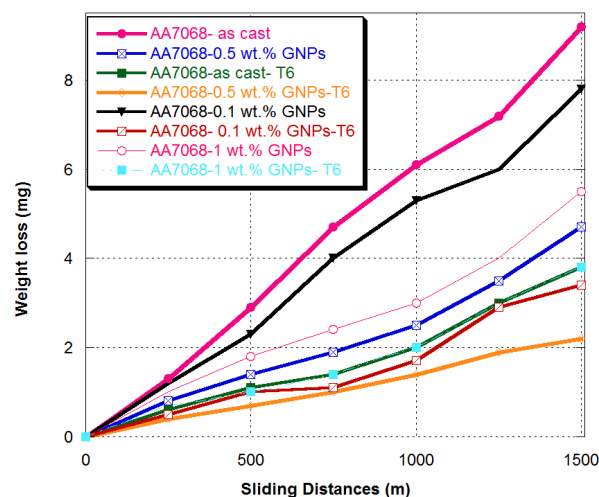
کردن درصدهای وزنی ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷ و ۱ گرافن در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، با افزودن نانو صفحات گرافن، تغییرات ساختاری در داخل زمینه اتفاق افتاده و شاخه های دندریتی در اثر افزودن نانو ذرات و همچنین بخاطر اعمال امواج آلتراسونیک (شکل ۵-الف) شکسته شده و شکل نهایی ریزساختار به جای ساختار دندریتی با شاخه های کشیده به ساختاری با دانه هایی به شکل گل رز (شکل ۵-د) در آمده اند. در ضمن با افزودن نانو صفحات گرافن ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در مرزدانه ها که درشت و ضخیم بود، بصورت یکنواخت در داخل زمینه پخش شده اند. دلیل این امر می تواند مربوط به نانو ذرات و امواج آلتراسونیک باشد. نانو ذرات در حین انجماد محل های جوانه زنی بوده و باعث پخش شدن ترکیبات در داخل زمینه می شوند و در نهایت باعث ریزدانه گی نانوکامپوزیت خواهند شد. امواج آلتراسونیک هم با شکستن دندریت ها و فازهای ثانویه تشکیل شده باعث ریز شدن و پخش شدن فازهای ثانویه در داخل زمینه نانوکامپوزیت خواهند شد. در کل ریزساختار حاصل از اضافه کردن نانو صفحات گرافن تا ۰٫۵ درصد وزنی بهتر شده و دانه ها ریزتر شده اند و با ریزتر شدن دانه ها خواص استحکامی بهتر شده



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ با الف- صفر درصد گرافن ب- ۰٫۱ درصد گرافن، ج- ۰٫۳ درصد گرافن، د- ۰٫۵ درصد گرافن، ه- ۰٫۷ درصد گرافن، و- ۱ درصد گرافن

بررسی رفتار سایش

بررسی نرخ سایش نانوکامپوزیت‌های $Al-8Zn-3Mg-2.5Cu$ /GNPs. 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 [12]. برای محاسبه نرخ سایش در نمونه‌های مختلف، میزان کاهش وزن در نمونه‌های نانوکامپوزیت از اهمیت بسزایی برخوردار است. در شکل (۶)، 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.



شکل ۶ میزان کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی درصد‌های مختلف نانو صفحات گرافن قبل و بعد از اعمال عملیات T6 تحت نیروی ۲۰ نیوتن

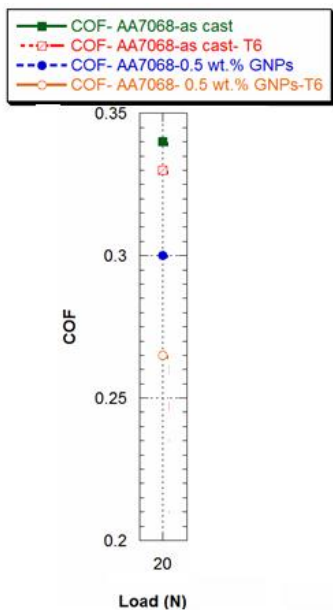
در شکل (۷)، نرخ سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت با فاز تقویت‌کننده گرافن برحسب نیروی اعمالی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است. نرخ سایش برای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن بعد از عملیات حرارتی T6 در ۲۰ نیوتن نسبت به آلیاژ پایه ۳/۳ برابر کاهش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از اضافه کردن نانوذرات و تأثیر 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 تأثیر 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. با ترکیب دو رابطه آرچارد و هال-پیچ (رابطه ۱) نرخ سایش براساس اندازه دانه برابر است با:

$$W = KP/H \quad (1)$$

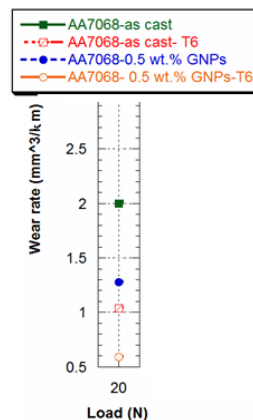
در این رابطه، W ، نرخ سایش (mm^3/km)، P ، نیروی اعمالی (N)، H ، سختی (برینل) و K ، ضریب ثابت می‌باشند. با توجه به رابطه (۱) با کاهش اندازه دانه‌ها، چگالی مرزها که به عنوان موانع در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند، افزایش یافته و سختی و مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. محققین دیگر نتایج مشابهی از اثر اندازه دانه بر سایش بدست آورده‌اند [13-15]. پراسادا و همکارانش [14] تحقیقی بر روی اثر اندازه دانه بر رفتار سایش فلز آلومینیم و آلیاژ $Al-7Si$ انجام دادند. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه دانه در این ترکیبات، در شرایط سایش خشک و بار اعمالی ۵۰ نیوتن، مسافت سایش، ۱۸۰۰ متر و سرعت سایش، ۱ m/s نرخ سایش کاهش می‌یابد.

گوان و همکارانش [15] نشان دادند که با نانو ساختار کردن سطح آلومینیم خالص، سختی و مقاومت به سایش افزایش چشمگیری یافته است. در تحقیق حاضر با توجه به شکل (۷) افزودن در صد حجمی نانو صفحات گرافن در نمونه کامپوزیتی آلومینیم موجب کاهش نرخ سایش نسبت به نمونه پایه شده است. مقاومت به سایش با افزایش در صد نانو صفحات گرافن افزایش یافته است. علیزاده و همکارانش [13] گزارش کردند که ایجاد ساختار نانو و استفاده از نانوذرات B4C مقاومت سایشی آلیاژهای آلومینیم را بهبود می‌بخشد. این محققین ورقه ای شدن را به عنوان مکانیزم اصلی سایش نانوکامپوزیت $Al/B4C$ معرفی کردند. شفیعی زرقانی و همکارانش [16] نشان دادند بعد از چهار پاس فرآیند همزن اصطکاکی و ایجاد نانوکامپوزیت‌های Al/Al_2O_3 ، سختی و مقاومت به سایش به علت حضور ذرات سخت نانو Al_2O_3 و ریز شدن دانه‌ها افزایش یافت. تأثیر هم‌زمان کاهش اندازه دانه و حضور ذرات نانومتری سرامیک بر افزایش سختی و مقاومت به سایش توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است [17-19]. چسبیدن مناطق صاف به یکدیگر در سطوح لغزش (سطح واقعی تماس)، شخم زده شدن سطوح به وسیله ذرات سایشی و دندانه‌های سخت، تغییر فرم زبری‌های سطحی، میزان تغییر شکل پلاستیک، جدایش عناصر به سطح و وجود فیلم‌های سطحی از عواملی هستند که روی ضریب

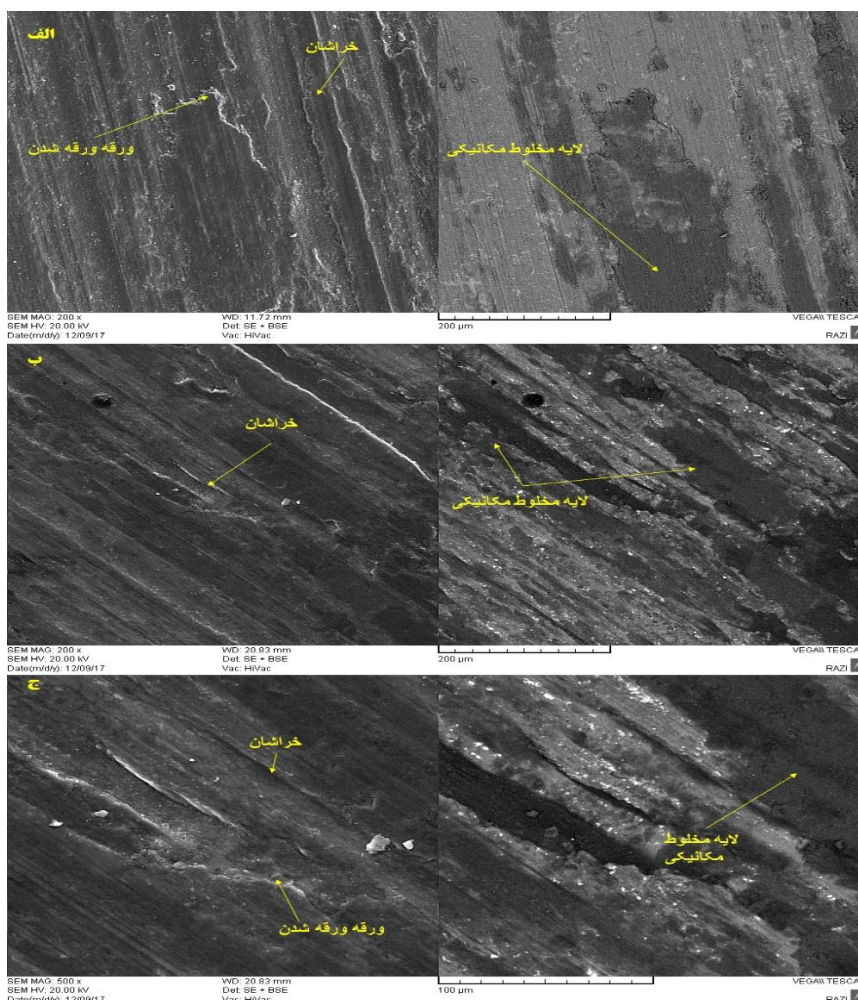


شکل ۸ ضریب اصطکاک آلیاژ پایه و نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن قبل و بعد از عملیات T6

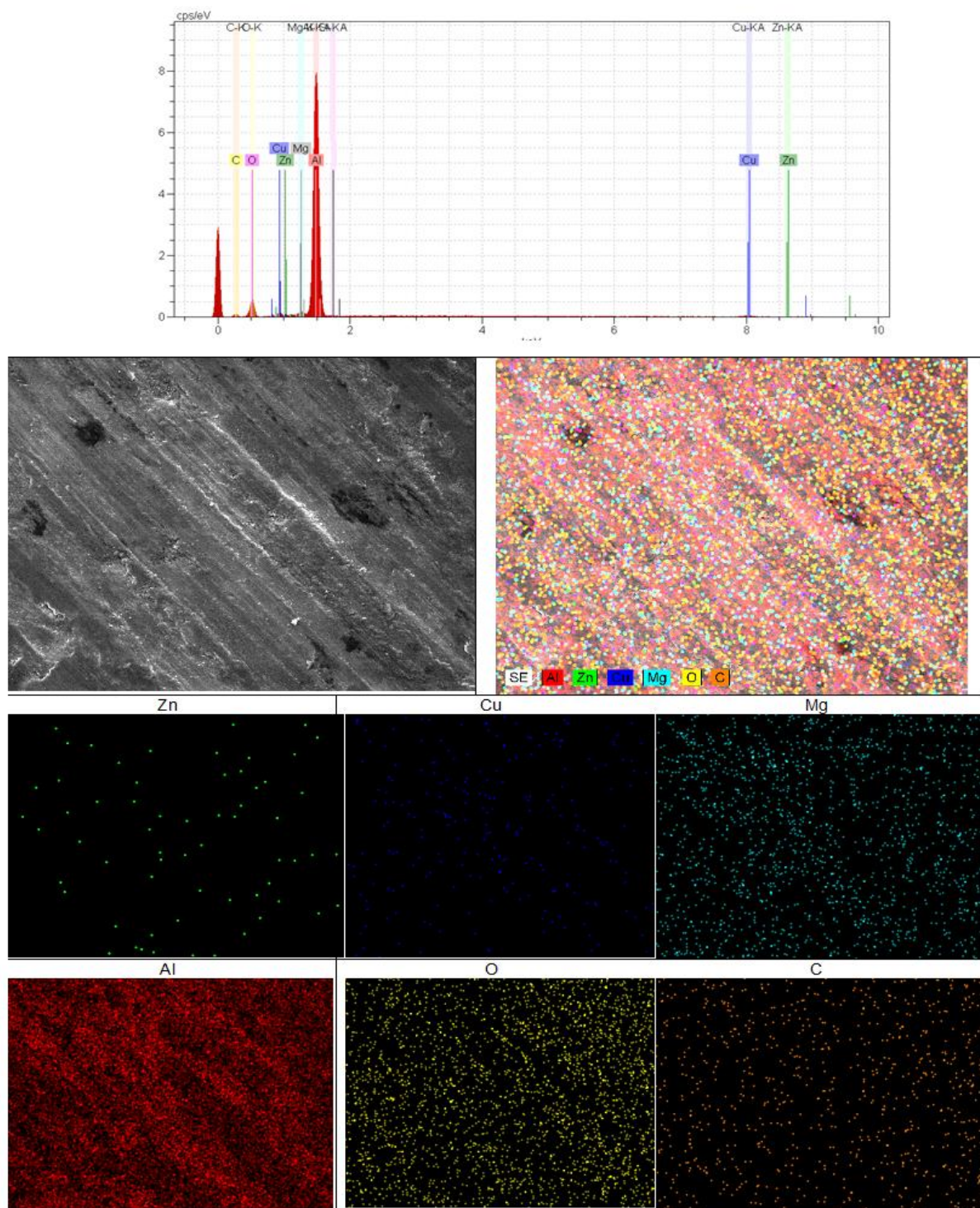
اصطکاک تأثیر می‌گذارند [13,20,21] تغییرات ضریب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌های با فاز تقویت‌کننده نانو صفحات گرافن در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷ نرخ سایش آلیاژ پایه و نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن قبل و بعد از عملیات T6



شکل ۹ تصاویر SEM از سطوح سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن تحت نیروی ۲۰ نیوتن، الف) قبل از عملیات حرارتی T6، ب و پ) بعد از عملیات حرارتی T6



شکل ۱۰ تصویر SEM و آنالیز EDS از سطوح سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن تحت نیروی ۲۰ نیوتن بعد از عملیات حرارتی T6

شکل (۱۰) آنالیز عنصری از سطح سطوح سایش و نحوه پخش عناصر تشکیل دهنده و ترکیبات آورده شده است. بر طبق مکانیزم سایش خراشان، نانوذرات تقویت کننده سختی و مقاومت به سایش بیشتری نسبت به زمینه نرم آلومینیم دارند.

سطوح سایش. بررسی سطوح سایش اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با مکانیزم‌های سایش ارائه می‌دهد. تصاویر SEM از سطوح سایش یافته برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو صفحات گرافن در شکل (۹) نشان داده شده است. هم‌چنین در

دندریت ها و رسوبات در داخل فاز زمینه می شود که از این طریق نیز افزایش خواص استحکامی را به همراه دارد.

۳. استفاده فرآوری آسیاب کاری پرانرژی و تولید تقویت کننده به صورت کامپوزیتی، باعث توزیع و پخش یکنواخت تر در زمینه آلیاژ می شود.

۴. وجود فاز تقویت کننده گرافن در زمینه فلزی با مکانیزم های اوراوان، هال پیچ و انتقال بار باعث افزایش استحکام نانوکامپوزیت می شود.

۵. نتایج آزمون سایش نشان داد که با کاهش اندازه دانه، نرخ سایش و ضریب اصطکاک کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانو صفحات گرافن نرخ سایش و ضریب اصطکاک در نمونه های نانوکامپوزیت کاهش می یابد. با افزایش نانو صفحات گرافن تا ۰/۵ درصد وزنی، به علت خاصیت خودروانکاری گرافن در حین سایش، مقاومت به سایش افزایش پیدا میکند. اما با افزایش نانو صفحات گرافن تا ۱ درصد وزنی به علت کلوخه ای شدن نانو صفحات گرافن، ایجاد تمرکز تنش و تضعیف فصل مشترک نانو صفحات گرافن و زمینه، نرخ سایش بیشتر شده و مقاومت به سایش کاهش می یابد.

طی فرآیند سایش، زمینه به سرعت ساییده شده و در نتیجه نانو ذرات تقویت کننده از سطح نمونه جلو زده می شوند. سپس، نانو صفحات گرافن کل نیروی سایش وارده را باید تحمل کنند. در نتیجه مقاومت به سایش نمونه های تقویت شده با نانو ذرات نسبت به آلیاژ پایه بهبود می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بر اساس خصوصیات نانو ذرات تقویت کننده و زمینه متصل به آن، خواص سایشی تغییر می کند.

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش ساخت و بررسی ریزساختار و خواص سایشی نانوکامپوزیت Al-8Zn-3Mg-0.5Cu/GNPs تولید شده به روش ریخته گری گردابی با کمک امواج مافوق صوت می باشد که نتایج حاصل به شرح زیر می باشد.

۱. در اثر اعمال فرآوری مافوق صوت بر مذاب در ناحیه هایی از مذاب بر اثر افزایش فشار موضعی، جوانه های جامدی ایجاد می شود. این جوانه ها باعث ایجاد ساختاری بسیار ریزتر در زمینه پس از انجماد می شوند که طبق رابطه هال-پیچ باعث افزایش خواص استحکامی زمینه می گردد.

۲. فرآوری مافوق صوت باعث شکسته شدن و پراکندگی

مراجع

- [1] S. Rawal, "Metal-matrix composites for Space Applications", *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 53, pp 14-17, (2001).
- [2] X. Li, Y. Yang, X. Chen, " Ultrasonic-Assisted Fabrication of Metal Matrix Nanocomposites", *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp 3211-3212, (2004).
- [3] X. Yibin, T. Yoshita, "Thermal Conductivity of SiC Fine Particles Reinforced Al Alloy Matrix Composite With Dispersed Particle Size", *Journal of Applied Physics*, vol. 95, pp 722-726, (2004).
- [4] C. Borgonovo, D. Apelian, "Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A Critical Review", *Materials Science Forum*, vol. 678, pp 1-22, (2011).
- [5] Y. Yang, X. Li, J. Lan, " 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*, vol. 380, pp 378-383, (2004).
- [6] D. Miracle, "Metal matrix composites—from science to technological significance", *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp 2526-2540, (2005).
- [7] L. Wenzhen, L. Shiyang, Z. Qiongyuan, Z. Xue, "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Materials Science Forum*, vol. 654-656, pp 990-993, (2010).

- [8] J.Y. Hihn, M.L. Doche, A. Mandroyan, L. Hallez and B.G. Pollet, "Respective Contribution of Cavitation and Convective Flow to Local Stirring in Sonoreactors", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 18, p. 881-887, (2011).
- [9] Y. Chen, S. Tekumalla, Y.B. Guo, R. Shabadi, M. Gupta, "The dynamic compressive response of a high-strength magnesium alloy and its nanocomposite", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 702, , pp. 65-72, (2017).
- [10] Santanu Sardar, Santanu Kumar Karmakar, Debdulal Das, "Ultrasonic Assisted Fabrication of Magnesium Matrix Composites: AReview", *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, Issue 2, Part A, pp. 3280-3289, (2017).
- [11] Deborah D. L. Chung, " Metal-Matrix Composites", Carbon Composites (Second Edition), pp. 532-562, (2017).
- [12] G.E. Dieter, "*Mechanical Metallurgy*", Third Edition , McGraw-Hill , (1976).
- [12] L.M. Hutchings, Tribology: Friction and wear of engineering materials: Edward Arnold, (1992).
- [13] A. Alizadeh, "Mechanical properties and wear behavior of Al-2 wt.% Cu alloy composites reinforced by B₄C nanoparticles and fabricated by mechanical milling and hot extrusion Materials characterization", vol. 67, pp.119-128, (2012).
- [14] A.K. Prasada Rao, Karabi Das, B.S. Murty, M. Chakraborty, Effect of grain refinement on wear properties of Al and Al-7Si alloy, *Wear*, vol. 257, pp. 148-153.(2004).
- [15] X.S. Guan, Z.F. Dong and D.Y. Li, "Surface nanocrystallization by sandblasting and annealing for improved mechanical and tribological properties", *Nanotechnology*, vol. 16, pp. 2963-2971.(2005).
- [16] A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg, A. Zarei- Hanzaki, "Wear assessment of Al/Al₂O₃ nano-composite surface layer produced using friction stir processing", *Wear*, vol. 270, pp. 403-412.(2011).
- [17] T. Ma, H. Yamaura, D.A. Koss, R.C. Voigt, Dry sliding wear behaviour of cast SiC reinforced Al MMCs, *Mater. Sci. Eng. A*. vol. 360, pp. 116-125.(2003).
- [18] D. Poirier, R.A.L. Drew, M.L. Trudeau, R. Gauvin, "Fabrication and properties of mechanically milled alumina/aluminum nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, pp. 7605-7614, (2010).
- [19] A.H. Yaghtin, E. Salahinejad, A. Khosravifard, "Processing of nanostructured metallic matrix composites by a modified accumulative roll bonding method with structural and mechanical considerations", *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 19, pp. 951-956.(2012).
- [20] A. Zolriasatein, R.A. Khosroshahi, M. Emamy, N. Nematie, "Mechanical and wear properties of Al-Al₃Mg₂ nanocomposites prepared by mechanical milling and hot pressing", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, pp. 290-297.(2013).
- [21] M. Walczak, D. Pieniak, M. Zwierzchowski, "The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 116-123.(2015).

