مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 139-144

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ریختگی آلومینیوم 7068 تقویت شده با نانو صفحات گرافن

محمد علی پور[1]، رضا اسلامی فارسانی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19395-1999، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 مرداد 1396

پذیرش: 14 شهریور 1396

ارائه در سایت: 13 مهر 1396

کلید واژگان:

نانوکامپوزیت ریختگی

نانو صفحات گرافن

ریخته‌گری گردابی

فرآوری مافوق صوت

چکیده

در این تحقیق، خواص مکانیکی و ریزساختار نانوکامپوزیت آلومینیوم 7068 تقویت شده با 0.1، 0.3، 0.5، 0.7 و 1 درصد وزنی نانو صفحات گرافن تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی با کمک حباب‌زایی مافوق صوت بررسی شد. برای اختلاط مناسب آلیاژ و نانو صفحات گرافن، از دستگاه مافوق صوت با توان بالا مجهز به سیستم خنک کننده استفاده شد. همچنین برای مطالعات ریزساختاری، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار گرفته شد. مطالعات ریزساختاری نانوکامپوزیت نشان داد که حضور نانو صفحات گرافن پراکنده باعث کاهش اندازه دانه شده، اما در درصدهای بالای این نانوذرات (1 درصد وزنی)، کاهش محسوسی در اندازه دانه ایجاد نمی‌شود. همچنین حضور نانوذرات و کاهش اندازه دانه، افزایش چشمگیر استحکام کششی نانوکامپوزیت را به همراه دارند. البته در درصدهای بالای نانو صفحات گرافن (1 درصد وزنی)، این نانو مواد در مرز دانه‌ها کلوخه‌ای شده و باعث کاهش استحکام کامپوزیت شدند. استحکام کششی نانوکامپوزیت قبل و بعد از فرایند اکستروژن از 212 مگاپاسکال به 374 مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با افزودن 0.5 درصد وزنی گرافن و اعمال فرایند اکستروژن، 76 درصد بهبود خواص استحکامی نسبت به آلیاژ پایه بدون فاز تقویت کننده بدست آمد.

Investigation of the microstructure and mechanical properties of cast AA7068 nanocomposite reinforced with graphene nano plates

Mohammad Alipour, Reza Eslami Farsani*

Faculty of Materials Science and Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1999-19395 , Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 August 2017
Accepted 05 September 2017
Available Online 05 October 2017

Keywords:
Casting nanocomposite
Graphene nano plates
Stir casting
Ultrasonic treatment

ABSTRACT

In this study, microstructure and mechanical properties of 7068 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 power was used for mixing alloy and nanoparticles. Also the microstructure was investigated by scanning electron microscope. The microstructural studies revealed that addition of GNPs reduces the grain size, but adding high GNPs content (1 wt.%) does not change the grain size considerably. Further investigations revealed that the addition of GNPs increases tensile strength. At high GNPs contents (1 wt.%), the presence of GNPs agglomerates on grain boundaries was found, which causes decrease in the tensile strength. The optimum amount of nanoparticles is 0.5 wt.% GNPs. The average ultimate tensile strength (UTS) of the specimens before and after extrusion processes increases from 212 MPa to 374 MPa. Addition of 0.5 wt.% GNPs and extrusion process generate about 76% enhancement in tensile strength compared to that of unreinforced aluminum alloy.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی از جمله مهمترین انواع مواد پیشرفته می‌باشند که قدمتی بیش از 50 سال دارند. این نوع کامپوزیت‌ها در صنایع زیادی همانند صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت مورد استفاده می‌باشند [1-3]. از جمله کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی 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 گسترده‌ای هستند [3-6].

اضافه کردن عوامل تقویت کننده سرامیکی به آلیاژهای آلومینیوم موجب افزایش خواص مکانیکی و سایشی آنها می‌شود. عمده ذرات تقویت کننده که به آلیاژهای پودری آلومینیوم اضافه می‌شوند، کاربیدها، بوریدها، اکسیدها و نیتریدها می‌باشند. کاربید سیلیسیم با دمای ذوب بالا، چگالی پایین، استحکام بالا، سختی بالا، مقاومت به شوک حرارتی عالی، انبساط حرارتی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Alipour, R. Eslami Farsani, Investigation of the microstructure and mechanical properties of cast AA7068 nanocomposite reinforced with graphene nano plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 139-144, 2017 (in Persian)

پایین، هدایت حرارتی بالا و مدول الاستیک زیاد، یک تقویت کننده مناسب برای کاربردهای دمای بالا بشمار می‌رود. [4-6].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه‌های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب هم‌زمان، آلیاژسازی مکانیکی و روش‌های گوناگون ریخته‌گری نظیر ریخته‌گری کوبشی، ریخته‌گری نیمه جامد، ریخته‌گری گردابی و دیگر روش‌ها تولید می‌شوند [3-7]. روش ریخته‌گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می‌باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می‌شود، سپس با روش‌های متداول، ریخته‌گری انجام می‌گیرد [7].

لازم بذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلومینیم نرم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم‌های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت‌های تهیه شده از روش ریخته‌گری 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 ریخته‌گری به دلیل گرانروی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می‌تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای، عموماً توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم‌های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می‌شود [7].

در روش حباب سازی مافوق صوت، مخلوط مذاب- نانوذرات تحت تأثیر امواج مافوق صوت شدید قرار می‌گیرند. این عمل به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. از جمله مهمترین اثرات این امواج که به اثرات غیرخطی معروفند، حباب‌زایی گذرا و جریان صوتی است [9,8]. حباب‌زایی در بر گیرنده تشکیل، بزرگ شدن و فروپاشی یا منفجر شدن حباب است. جریان صوتی (که برای هم زدن بسیار با ارزش است)، حرکت مذاب در اثر شیب فشار صوتی است. مطابق با شکل 1، در ساخت نانوکامپوزیت‌ها به کمک امواج مافوق صوت، هم‌زمان خوشه‌های نانوذرات موجود در مذاب توسط اثر حباب‌زایی امواج از بین می‌روند و توسط پدیده جریان صوتی به طور یکنواخت در داخل مذاب پراکنده می‌شوند [10].

از آنجا که هوا در حفرات موجود در خوشه‌های نانوذرات حبس شده است، بنابراین هوای حبس شده به عنوان جوانه ای برای تشکیل حباب ایفای نقش می‌کند. در مراحل اولیه افزودن نانوذرات به مذاب تعداد خوشه‌ها بسیار زیاد است، بنابراین تعداد حباب‌های تشکیل شده نیز زیاد خواهد بود. حباب‌های بوجود آمده در حین سیکل فشاری منفی رشد می‌کنند و پس از بزرگ شدن تا اندازه مشخص در حین سیکل فشاری مثبت به طور ناگهانی از هم پاشیده می‌شوند. حباب‌های ریزی که در مدت زمانی کمتر از 10-6 ثانیه منفجر می‌شوند، نقاط گرم میکرونی گذرا را ایجاد می‌کنند. دما و فشار این نقاط به ترتیب 5000 °C و بالای 1000 اتمسفر است. هم چنین سرعت گرم شدن و سرد شدن این نقاط در حدود 1010 K/s است [9].

حباب‌های گذرا، ضربات انفجار گونه به خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات وارد می‌کنند و از این طریق خوشه‌های نانوذرات را می‌شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت‌های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می‌شود. 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 نانوذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [9].

مطالب یاد شده از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف‌پذیری نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه محسوب می‌شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت نسبتاً مطلوب است و همواره تعدادی خوشه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرزدانه‌ها و یا در امتداد مرزدانه‌ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات 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 ریزساختار بر مبنای فرایند ذوبی به کمک فرآوری مافوق صوت در نظر گرفته شده است. بر این مبنا نانو صفحات گرافن (GNPs) بعد از آسیاب کاری گلوله‌ای و کامپوزیت شدن با پودر میکرونی آلومینیوم به مذاب اضافه شده و تحت فرآوری ریخته‌گری گردابی و مافوق صوت قرار می‌گیرند. سپس ریزساختار زمینه و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بررسی می‌شود. به دلیل اهمیت آلیاژهای سری 7xxx در صنایع پیشرفته، آلیاژ آلومینیوم 7068 به عنوان آلیاژ زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است.

2- روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم 7068 با ترکیب مشخص شده در جدول 1 و نانو صفحات گرافن و پودرهای میکرونی آلومینیوم با ابعاد 40 میکرومتر برای ساخت نانوکامپوزیت AA7068-GNPs استفاده شد. از جمله ویژگی‌های نانو صفحات گرافن می‌توان به متوسط تعداد لایه بین 5 تا 10 لایه و خلوص بالای 99 درصد وزنی اشاره کرد. در شکل 2، تصویر میکروسکوپی نانو صفحات گرافن نشان داده شده است. در این تحقیق نانو صفحات گرافن در درصدهای وزنی 0.1، 0.3، 0.5، 0.7 و 1 درصد وزنی به مذاب آلومینیوم 7068 اضافه شدند تا حالت بهینه بدست آید.

برای افزودن نانوذرات به مذاب از روش ساخت پودر کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری گلوله‌ای استفاده شد. در این روش ابتدا مخلوطی از نانو صفحات گرافن و پودر آلومینیومی با ابعاد 40 میکرومتر در داخل آسیاب گلوله‌ای به مدت 2 ساعت تحت عملیات آسیاب کاری قرار گرفتند تا پودر

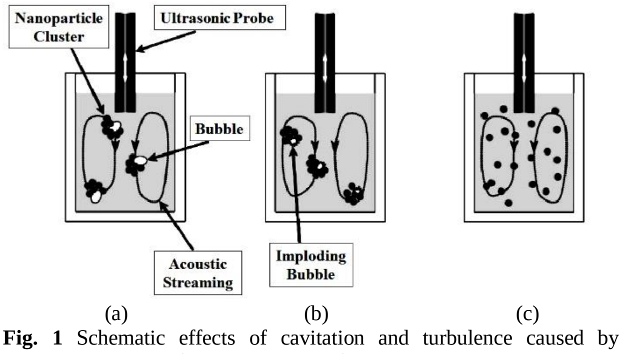

Fig. 1 Schematic effects of cavitation and turbulence caused by ultrasonic waves for dispersion of nanoparticles in molte, a) aglomarated nanoparticles, b) acoustic streaming and imploding bubble, c) dispersion of nanoparticles [10]

شکل 1 شماتیک تاثیر حباب زایی و جریان صوتی ناشی از امواج مافوق صوت برای پخش یکنواخت نانوذرات در داخل مذاب، الف) کلوخه‌ای شدن نانو ذرات، ب) جریان‌های گردابی و انفجار حباب‌ها، ج) پخش یکنواخت نانو ذرات [10]

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 7068 (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of the Al7068 primary ingots (wt%)

Mn	Si	Fe	Zr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al	Element
0.1	0.12	0.1	0.15	0.1	2.4	3	8.2	balance	%

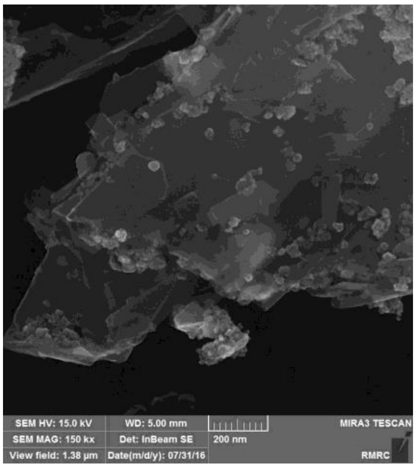

Fig. 2 Microscopy image of the graphene nanoplates.

شکل 2 تصویر میکروسوکوپی از نانو صفحات گرافن

کامپوزیتی آلومینیم با نانو صفحات گرافن حاوی 25 درصد نانو صفحات گرافن و 75 درصد پودر آلومینیوم بدست آید. سپس کامپوزیت پودری حاصل به مذاب افزوده شد.

برای ساخت نمونه‌های مختلف ابتدا مقدار مناسب از آلیاژ آلومینیوم 7068 در داخل بوته گرافیتی قرار داده شد. مجموعه مذکور در داخل یک کوره مقاومتی با دمای 750 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ و پس از فرو بردن هم‌زن در مذاب، عمل هم زدن و افزودن نانو پودر کامپوزیتی به مذاب صورت گرفت. سرعت هم‌زن 500 دور بر دقیقه تنظیم گردید و مدت زمان اعمال هم‌زن مکانیکی 10 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 30 ثانیه تحت عملیات مافوق صوت با توان 2000 وات قرار گرفت. سپس مذاب حاصل در داخل قالب ریخته‌گری شد. شکل قالب در شکل 3- الف و ابعاد نمونه تست کشش استفاده شده در این تحقیق در شکل 3- ب نشان داده شده است. از قسمت وسط نمونه‌های حاصل از این قالب، نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع 1 سانتی متر با قطر 1 سانتی متر تهیه گردید. سطح این نمونه‌ها ابتدا با کاغذ سمباده‌های ضد آب 200 تا 5000 تحت عمل سمباده‌زنی قرار گرفت. سپس سطح نمونه‌ها پولیش شد و در محلول یک درصد حجمی اسید هیدروفلوئوریک در آب برای مدت 30 ثانیه اچ گردید.

ریزساختار نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آشکارساز EDX در بزرگنمائی‌های 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 نمونه‌های مختلف و دیگر فازهای موجود در ریزساختار آلیاژ مورد نظر بود. برای ارزیابی خواص مکانیکی نیز از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM B557M-10 استفاده شد. بدین منظور، دستگاه کشش ساخت شرکت کوپا با نیروی کششی 15 تن و سرعت 1 میلی متر بر دقیقه بکار رفت. برای هر نمونه نیز حداقل 3 مرتبه تست کشش صورت گرفت.

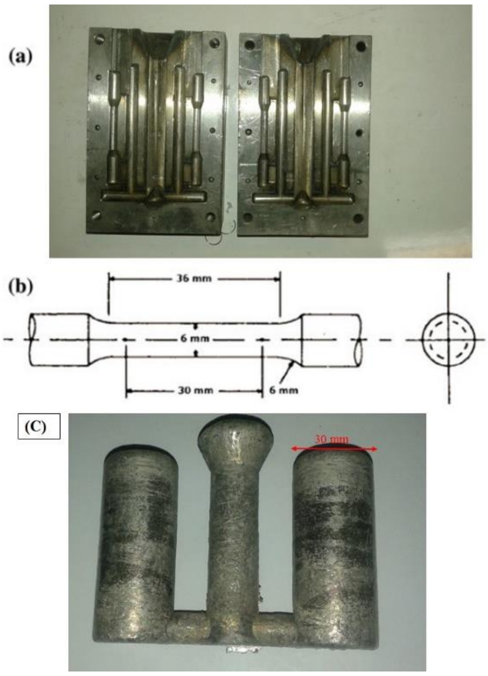

Fig. 3 a) Cast iron mold, b) tensile sample dimensions, (C) Cast iron mold for extrusion

شکل 3 الف) قالب ریخته‌گری، ب) ابعاد نمونه تست کشش، قالب ریخته‌گری برای فرایند اکستروژن

به دلیل استفاده از روش ریخته‌گری گردابی، تخلخل‌های متعددی در داخل نمونه‌های نانوکامپوزیت وجود داشت که باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شد. بنابراین نمونه‌های نانوکامپوزیت قبل از آزمون کشش، تحت فرایند اکستروژن قرار گرفتند تا هم تخلخل‌ها بسته شده و خواص مکانیکی نمونه‌ها بهبود یابد. برای این منظور از اکستروژن با نسبت 6 به 1 در دمای 320 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. برای آزمون کشش نمونه‌های قبل از فرایند اکستروژن، از قالب شکل 3- الف استفاده شد. برای نمونه‌هایی که باید فرایند اکستروژن بروی آنها انجام می‌شد، ابتدا در داخل قالب شکل 3- ج ریخته‌گری شد و سپس فرایند اکستروژن بر روی نمونه‌ها انجام شد و در ادامه با تراشکاری نمونه‌های کشش ساخته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- مطالعات ریزساختاری آلیاژ پایه و پودرنانوکامپوزیتی

نکته مهمی که باید بدان اشاره شود اندازه و شکل پودرهای میکرونی آلومینیوم می‌باشد. اندازه اولیه این پودرها 40 میکرون می‌باشد. اما بعد از 2 ساعت آسیاب کاری گلوله‌ای، اندازه و شکل پودرها تغییر می‌کند و بخاطر عملیات انجام شده، شکل پودرهای میکرونی از کروی به صفحه‌ای تبدیل شده و اندازه آنها نیز کاهش پیدا کرده است. همان طور که در شکل 4 نشان داده شده است بعد از اضافه کردن نانو صفحات گرافن به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب کاری گلوله‌ای، نانو صفحات گرافن بصورت یکنواخت در داخل پودرهای آلومینیومی پخش شده‌اند.

3-2- توزیع نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی

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 ریخته‌گری رخ می‌دهد و پدیده‌هایی که در حین انجماد رخ می‌دهد، می‌باشد. در

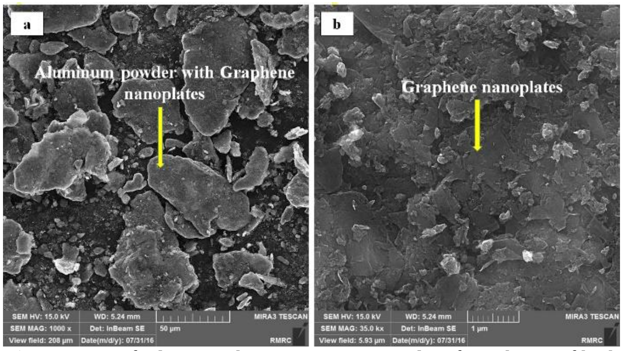

Fig. 4 Image of Al-25 graphene composite powder after 2 hours of high energy milling, a) low magnification of aluminum powder, b) high magnification of graphene on aluminum powder

شکل 4 تصویر پودر کامپوزیتی Al-25 graphene بعد از 2 ساعت آسیاب کاری گلوله‌ای، الف) بزرگنمایی پایین پودر آلومینیوم، ب) بزرگنمایی بالا از گرافن روی پودر آلومینیوم

خصوص مورد اول می‌توان به ته‌نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه‌ای 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 می‌توان به شکل جبهه انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانو صفحات گرافن، گرادیان دمایی و گرادیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [11].

آنچه بدیهی است این است که اگر نانوذرات در مذاب از پراکندگی مناسبی برخوردار نباشند، نمی‌توان انتظار داشت که توزیع نانوذرات در نمونه حاصل شده از انجماد این مذاب مطلوب باشد. علت این که با افزودن نانو صفحات گرافن به صورت پودر کامپوزیتی می‌توان به ساخت نانوکامپوزیت دست یافت را این‌گونه می‌توان بیان کرد که در تهیه پودر کامپوزیتی از روش آسیاب‌کاری پرانرژی استفاده شده است، بنابراین در اثر نیروهای ضربه‌ای و برشی شدید ناشی از گلوله‌ها، خوشه‌های نانوذرات از بین رفته و نانو صفحات گرافن به صورت مجزا در زمینه پودر آلومینیوم توزیع خواهند شد (شکل 4). 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 خوشه‌های نانو صفحات گرافن در هنگام افزودن پودر کامپوزیتی به مذاب و پس از ذوب شدن ذرات پودری می‌شود.

کاملاً مشخص است که هر چه اندازه ذرات در داخل مذاب کوچکتر باشد به نسبت ذرات کلوخه‌ای شده بزرگتر، راحتر در داخل مذاب حل می‌شوند. پخش شدن نانو ذرات در داخل مذاب توسط دو پدیده مهم اتفاق می‌افتد. در هنگام تزریق پودرهای کامپوزیتی آلومینیوم- نانو صفحات گرافن به داخل مذاب، انحلال و ذوب شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم اتفاق می‌افتد، در این هنگام چون نانو صفحات گرافن در داخل پودرهای آلومینیوم با عملیات آسیاب کاری گلوله‌ای قرار گرفته‌اند و پودرهای آلومینیوم حامل نانو صفحات گرافن هستند، این پودرها از نانو صفحات گرافن در مقابل مذاب محافظت کرده و از تماس مستقیم نانو ذرات با مذاب جلوگیری خواهند کرد. هنگامی که پودرهای میکرونی آلومینیوم در داخل مذاب حل و ذوب شدند، نانو صفحات گرافن در داخل زمینه آلومینیوم مذاب رها سازی می‌شوند. این رها سازی نانو صفحات گرافن در مدت هم‌زدن مکانیکی مذاب اتفاق می‌افتد. در ادامه با اعمال امواج مافوق صوت به نانوکامپوزیت تا مرحله ریختن در قالب، کلوخه‌های نانو صفحات گرافن کاملاً از هم باز شده و نانو صفحات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می‌آورند.

ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 7068 بعد از اضافه کردن درصدهای وزنی 0.1، 0.3، 0.5، 0.7 و 1 گرافن در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است، با افزودن نانو صفحات گرافن، تغییرات ساختاری در داخل زمینه اتفاق افتاده و شاخه‌های دندریتی (شکل 5- الف)، شکسته شده و شکل نهایی ریزساختار به جای ساختار دندریتی با شاخه‌های کشیده به ساختاری با دانه‌هایی به شکل گل رز (شکل 5- د)، در آمده‌اند. در ضمن با افزودن نانو صفحات گرافن ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در مرز دانه‌ها که درشت و ضخیم بود، بصورت یکنواخت در داخل زمینه پخش شده‌اند. در مجموع، ریزساختار حاصل از اضافه کردن نانو صفحات گرافن تا 0.5 درصد وزنی بهتر شده و دانه‌ها ریزتر شده‌اند و با ریزتر شدن دانه‌ها خواص استحکامی بهتر شده است، اما در درصدهای بیشتر، نانو ذرات کلوخه‌ای شده و باعث کاهش خواص استحکامی می‌شود. اما در رابطه با توزیع یکنواخت نانو صفحات در داخل زمینه نیز می‌توان گفت که این ذرات با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک‌ها و تغییر مسیر آنها 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 می‌افتد. اول این که با اضافه کردن نانو ذرات، اندازه دانه‌های 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 تغییر مسیر ترک در داخل زمینه، باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت خواهند شد. اما در درصدهای بالاتر نانو صفحات گرافن (بیشتر از 0.5 درصد) چون مقدار آن زیاد می‌باشد، نانو صفحات، خوب در زمینه توزیع نشده و کلوخه خواهند شد و بیشتر در مرزدانه‌ها تجمع خواهند کرد که این کلوخه‌ای شدن نانو صفحات گرافن باعث کاهش خواص استحکامی نانو کامپوزیت خواهد شد.

3-3- استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های ریختگی

نتایج به دست آمده از آزمون کشش در شکل 6 نشان داده شده است. کاملاً واضح است که بیشترین استحکام مربوط به نمونه با 0.5 درصد وزنی گرافن می‌باشد. نانوکامپوزیت تقویت شده با 0.5 درصد وزنی گرافن، استحکام 374 مگاپاسکال را نشان می‌دهد که بهینه‌ترین درصد نانو صفحات گرافن می‌باشد. با توجه به نتایج استحکام نمونه اولیه و نانوکامپوزیت با 0.5 درصد گرافن، 41 درصد افزایش استحکام مشاهده می‌شود. در نمونه‌هایی با درصدهای بیشتر نانو صفحات گرافن، عمدتاً نانو صفحات گرافن به صورت آگلومره‌های درشت در مرزدانه‌های آلومینیوم زمینه تجمع می‌کنند. بنابراین یکی از دلایل افت استحکام این نانوکامپوزیت‌ها توزیع نامناسب نانو صفحات گرافن در زمینه می‌باشد. تحت این شرایط مکانیزم استحکام بخشی اوروان برای نمونه‌هایی که توزیع مناسبتری از نانو صفحات گرافن در زمینه را دارند، بیشتر می‌باشد (رابطه 1):

$$\tau = \frac{Gb}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن λ فاصله بین ذرات ثانویه، G، مدول برشی، b، بردار برگرز نابجایی و τ، تنش لازم برای عبور نابجایی از بین ذرات ثانویه است، چون در نمونه‌های با 0.5 درصد گرافن فاصله بین ذرات (λ) در مقایسه با نمونه‌های دیگر به علت پخش یکنواخت نانو صفحات گرافن کمتر است، تنش لازم (τ) برای عبور نابجایی‌ها از بین ذرات تقویت کننده نیز بیشتر بوده و بنابراین

استحکام آنها نیز بیشتر است [12].

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر استحکام کامپوزیت‌های تولیدی، اتصال قوی بین تقویت کننده و زمینه است که به انتقال بار مؤثرتر کمک می‌کند. از طرف دیگر، اندازه ریزتر دانه‌های زمینه در کامپوزیت‌های تولیدی بر اساس مکانیزم‌هال- پچ (رابطه 2) باعث افزایش تنش تسلیم در این کامپوزیت‌ها می‌شود.

$$\sigma_0 = \sigma_i + KD^{-\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

که در آن σ_o تنش تسلیم، σ_i تنش اصطکاکی (تنش مقاوم در برابر حرکت نابجایی‌ها)، D قطر دانه‌ها و K، یک عدد ثابت است، چون تنش تسلیم با اندازه دانه‌ها رابطه معکوس دارد، بنابراین هرچه اندازه دانه‌ها کوچکتر باشد، تنش تسلیم بیشتر است [12]. بنابراین طبق رابطه (2)، چون اندازه دانه‌های زمینه در کامپوزیت با 0.5 درصد نانو صفحات گرافن از دیگر نمونه‌ها کوچکتر است، بنابراین تنش تسلیم نیز بیشتر خواهد بود.

علاوه بر سه نوع مکانیزم اشاره شده بالا، مکانیزم غالب در کامپوزیت‌هایی که با نانو صفحات تقویت می‌شوند، مکانیزم قفل کردن و تغییر مسیر ترک می‌باشد که باعث افزایش استحکام نانوکامپوزیت می‌شود. این مکانیزم در شکل 7- الف نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، ترک بعد از رسیدن به صفحات گرافن از مسیر خود منحرف شده که این انحراف ترک باعث جذب انرژی بیشتری شده و افزایش چقرمگی و استحکام را به همراه دارد. شکل 7- ب آنالیز EDX از گرافن موجود در سطح شکست

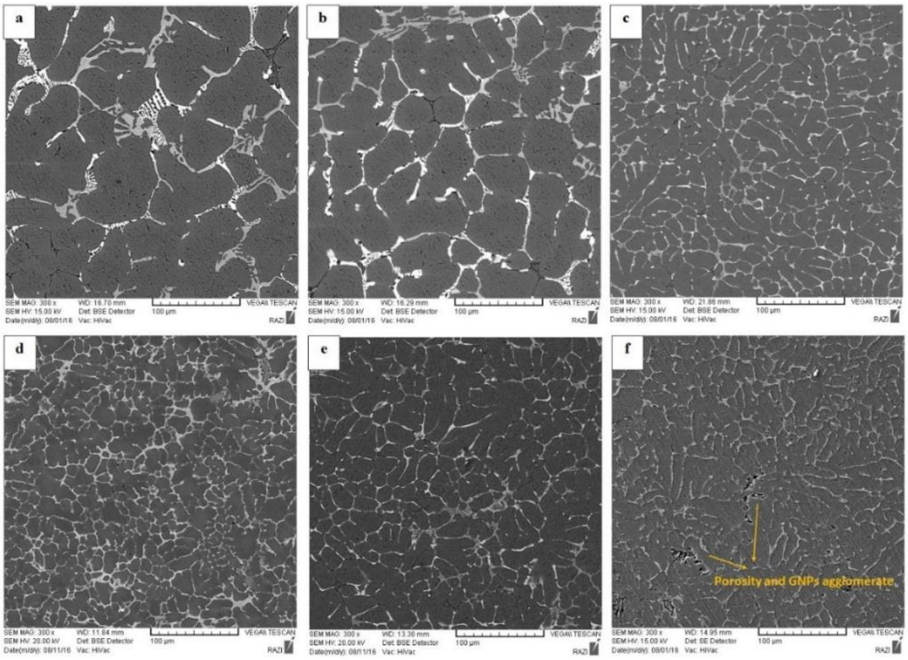

Fig. 5 SEM images of microstructures of AA7068, with a) 0.0 wt.% GNPs, b) 0.1 wt.% GNPs, c) 0.3 wt.% GNPs, d) 0.5 wt.% GNPs, e) 0.7 wt.% GNPs, f) 1 wt.% GNPs

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 7068 با الف) صفر درصد گرافن ب) 0.1 درصد گرافن، ج) 0.3 درصد گرافن، د) 0.5 درصد گرافن، ه) 0.7 درصد گرافن، و) 1 درصد گرافن

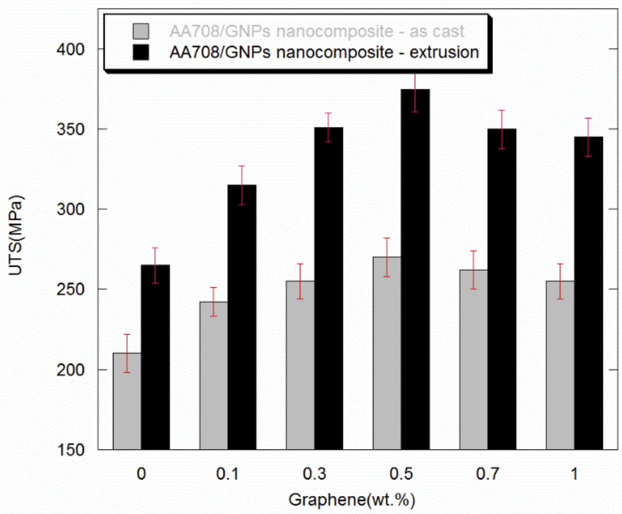

Fig. 6 Curve related to UTS of AA7068 nanocomposite at the different conditions

شکل 6 نمودار مربوط به استحکام نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم 7068 تحت شرایط مختلف

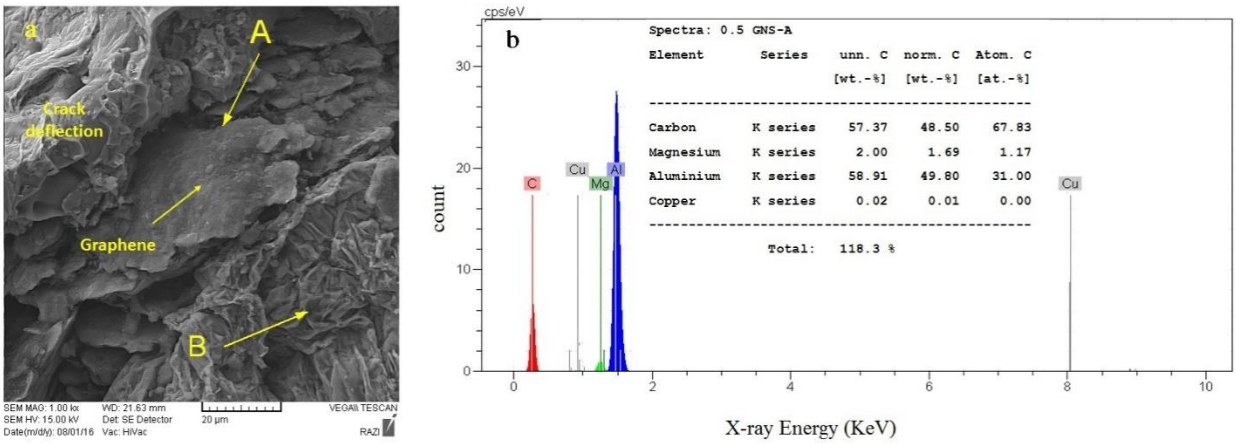

Fig. 7 SEM micrograph of a) the fractured AA7068-0.5%GNPs specimen, b) EDX of GNPs in fracture surface

شکل 7 تصویر SEM، الف) سطح شکست نمونه آلومینیوم 7068 تقویت شده با 0.5 درصد گرافن، ب) آنالیز EDX از گرافن روی سطح شکست

(منطقه نشان داده شده با A در شکل 7- الف) را نشان می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم 7068 تقویت شده با درصدهای مختلف نانو صفحات گرافن (0.1، 0.3، 0.5، 0.7 و 1 درصد وزنی)، به روش ریخته‌گری گردابی با کمک امواج مافوق صوت ساخته شده و ریزساختار و خواص مکانیکی آنها بررسی شد. نتایج نهایی حاصل به شرح زیر می‌باشد.

- در اثر اعمال فرآوری مافوق صوت بر مذاب در ناحیه‌هایی از مذاب بر اثر افزایش فشار موضعی، جوانه‌های جامدی ایجاد می‌شود. این جوانه‌ها باعث ایجاد ساختاری بسیار ریزتر در زمینه پس از انجماد می‌شوند که طبق رابطه‌هال-پچ باعث افزایش خواص استحکامی زمینه می‌گردد.
- فرآوری مافوق صوت باعث شکسته شدن و پراکندگی دندریت‌ها و رسوبات در داخل فاز زمینه می‌شود که از این طریق نیز افزایش خواص استحکامی نانوکامپوزیت را به همراه دارد.
- استفاده فرآوری آسیاب کاری گلوله‌ای و تولید تقویت کننده به صورت کامپوزیتی، باعث توزیع و پخش یکنواخت تر در زمینه آلیاژ می‌شود.
- وجود فاز تقویت کننده گرافن در زمینه فلزی با مکانیزم‌های اوراوان،هال-پچ و انتقال بار باعث افزایش استحکام نانوکامپوزیت می‌شود.
- مکانیزم اصلی در افزایش استحکام نانوکامپوزیت مورد مطالعه، مکانیزم تغییر مسیر ترک می‌باشد که نانو صفحات گرافن از حرکت ترک داخل نمونه نانوکامپوزیتی جلوگیری کرده و مسیر حرکت ترک را تغییر می‌دهند و باعث افزایش خواص مکانیکی خواهند شد.
- اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی گرافن و آلیاژ پایه در حین انجماد نیز از عوامل تقویت خواص مکانیکی نانوکامپوزیت است.
- بهینه ترین درصد نانو صفحات گرافن به عنوان تقویت کننده در نانوکامپوزیت مورد مطالعه، 0.5 درصد وزنی است که با استحکام 374 مگاپاسکال، افزایش 76 درصدی در استحکام را نسبت به نمونه اولیه (آلومینیوم 7068) نشان می‌دهد.

5- 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. Shiying, 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, B. G. Pollet, Respective contribution of cavitation and convective flow to local stirring in sonoreactors, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 18, pp. 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] S. Sardar, S. K. Karmakar, D. Das, Ultrasonic assisted fabrication of magnesium matrix composites: areview, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 3280-3289, 2017.
[11] D. D. L. Chung, *Carbon Composites*, Second Edition, pp. 532-562, University at Buffalo, The State University of New York, United States, Published by Elsevier, 2017.
[12] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, Third Edition, pp. 111-135, Drexel Institute of Technologij. Philadelphia, Publisher: McGraw-Hill Education, 1976.