



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



مطالعه ریزساختاری و بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص-گرافن با استفاده از روش آسیاب گلوله‌ای در فرآیند ریخته‌گری با همزنی مکانیکی - مغناطیسی

زهرا عزیزی¹، خسرو رحمانی^{2*}، فتح‌اله طاهری بهروز³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 1719-16765، Kh_rahmani@sbu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در پژوهش‌های اخیر، استفاده از گرافن به دلیل تأثیر مثبت بر خواص کامپوزیت‌ها از جمله خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، خواص ریزساختاری و مکانیکی نانوکامپوزیت ریخته‌گری آلومینیوم خالص تقویت شده با 0.5 درصد وزنی گرافن با همزنی مکانیکی - الکترومغناطیسی و سپس اکستروژن داغ و نهایتاً آنیل، در دو روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای و بدون استفاده از آسیاب گلوله‌ای بررسی شد. با بکار بردن روش‌های همزنی مکانیکی و الکترومغناطیسی، ترکیب دو نیروی برشی و حجمی، تلاطم بیشتری را در فلز مذاب ایجاد کرده که منجر به توزیع مناسب ذرات تقویت کننده، کاهش ساختارهای دندریتی و اصلاح اندازه دانه در طول انجماد می‌شود. مطالعات ریزساختاری نشان داد که در روش آسیاب گلوله‌ای توزیع نانوذرات گرافن در فاز زمینه و کاهش اندازه دانه، نسبت به روش بدون آسیاب گلوله‌ای مطلوب‌تر می‌باشد. در روش آسیاب گلوله‌ای، سختی، استحکام کششی و استحکام فشاری به ترتیب 19.7، 142.8 و 11.7 درصد و در روش بدون آسیاب به ترتیب 9، 85.2 و 13.5 درصد نسبت به آلومینیوم خالص افزایش یافته است. تغییر طول در روش آسیاب گلوله‌ای 6.8 و در روش بدون آسیاب گلوله‌ای 35.4 درصد کاهش نشان می‌دهد.

دریافت: 1400/04/14

پذیرش: 1400/08/15

کلیدواژه‌ها

نانوکامپوزیت ریخته‌گری، آلومینیوم، گرافن، آسیاب گلوله‌ای، همزنی مکانیکی-مغناطیسی

Study of microstructure and investigation of mechanical properties of pure aluminum-graphene nanocomposite using ball mill method in casting process with mechanical and electromagnetic stirring

Zahra Azizi¹, Khosrow Rahmani^{2*}, Fathollah Taheri-Behrooz³

1- Mechanical and Energy Systems Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Mechanical and Energy Systems Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16765-1719, Tehran, Iran, Kh_rahmani@sbu.ac.ir

Keywords

Casting Nanocomposite, Pure aluminum, Graphene, Ball Milling, Mechanical and Electromagnetic Stirring

Abstract

In recent scientific studies, the use of graphene has been considered due to its positive effect on the properties of composites, including mechanical, electrical and thermal properties. In this research, the microstructural and mechanical properties of pure aluminum nanocomposite cast reinforced with 0.5 wt% graphene with mechanical-electromagnetic stirrer and then hot extrusion and finally annealing, in two methods of using ball milling and without using ball milling process, was investigated. By applying both mechanical and electromagnetic stirring techniques, combining both shear and body forces can cause more turbulence in the molten metal that lead to as well as distribute reinforcing particles, decreasing the dendritic structures and refining the grains during solidification. The microstructural studies showed that in the ball mill method, the distribution of graphene nanoparticles and reduce grain size in the matrix phase is significantly better than the non-ball mill method. Also, in the method of ball mill, hardness, tensile strength and compressive strength increased by 19.7, 142.8 and 11.7%, respectively, and in the method without mill, 9, 85.2 and 13.5%, respectively, compared to pure aluminum. The elongation decreased by 6.8% in the ball mill method and 35.4% in the non-ball mill method.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Azizi, Z., Rahmani, K., Taheri-Behrooz, F., "Study of microstructure and investigation of mechanical properties of pure aluminum-graphene nanocomposite using ball mill method in casting process with mechanical and electromagnetic stirring", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1532-1542, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.533441.1735>

1- مقدمه

کاربرد کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به عنوان کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت بسیار مورد توجه می‌باشد [1-6]. این کامپوزیت‌ها دارای ویژگی‌های خاصی، از قبیل چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب هستند [7-10].

افزایش دادن مواد تقویت‌کننده به آلیاژهای آلومینیوم می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی، سایشی و همچنین خواص الکتریکی و حرارتی آن‌ها شود. در سال‌های اخیر نانو مواد کربنی مانند نانولوله‌های کربنی و گرافن به عنوان یک گروه مهم از مواد تقویت‌کننده جدید برای کاربردهای صنعتی مختلف با توجه به مدول یانگ بالا، استحکام مکانیکی و همچنین هدایت الکتریکی و حرارتی عالی معرفی شده‌اند. علاوه بر این، اکثر مطالعات نشان می‌دهد که گرافن به عنوان مؤثرترین ماده تقویت‌کننده برای ساخت مواد کامپوزیتی محسوب می‌شود [11-14]. به این دلیل که گرافن دارای ویژگی‌های خاصی از جمله خواص الکتریکی بسیار خوب [15]، هدایت حرارتی [16]، مدول یانگ [17] و استحکام کششی بالا [18] می‌باشد. چگالی گرافن به اندازه 1.08 g/cm^3 برآورد شده است [19]. این ویژگی‌ها، گرافن را به عنوان یک تقویت‌کننده کامل برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی معرفی می‌کند. تحقیقات زیادی برای ساخت کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده با نانو صفحات گرافن [20-22]، نانو ورق‌های گرافن [21-24]، گرافن چند لایه [25] یا مشتقات آن مانند اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش یافته [28-26] انجام شده است.

در میان روش‌های موجود برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته، ریخته‌گری یکی از پرکاربردترین روش‌ها، به دلیل هزینه‌های پایین فرآیند و روش تولید سریع می‌باشد [29]. 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 [30].

همزنی الکترومغناطیسی، یکی دیگر از روش‌های همزنی در طول فرآیند ریخته‌گری همزنی است که با توزیع نسبتاً خوب ذرات تقویت‌کننده و کاهش ساختارهای دندریتی و اصلاح اندازه دانه در طول انجماد می‌تواند برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی مفید باشد [31-32]. ساختارهای دندریتی و دانه‌های درشت می‌توانند ذرات تقویت‌کننده را در مرحله انجماد تحت فشار قرار دهند و باعث توزیع مجدد نامطلوب آن‌ها شوند و در نتیجه باعث تجمع توده‌ای ذرات می‌شود. به عنوان یک راه حل، استفاده از هم‌زدن الکترومغناطیسی تا مرحله انجماد می‌تواند اثرات مخرب این پدیده را کاهش دهد [33-34]. همزنی الکترومغناطیسی مانع از شناور شدن یا نشست ذرات توزیع شده، در هنگام انجماد می‌شود. علاوه بر این، همزنی الکترومغناطیسی می‌تواند به تولید کامپوزیت عاری از نقص، کاهش جدایش و ترک‌های داخلی کمک کند. همزنی الکترومغناطیسی نیروی حجمی را به فلز مذاب وارد می‌کند. با استفاده از این روش همزنی در مرحله سرمایش، حباب‌های گاز به دام افتاده و ذرات کلوخه شده به صورت قابل توجهی می‌توانند شناور یا ته‌نشین شوند. این امر منجر به تخلخل کمتر ناخواسته و توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده می‌شود. با این وجود، استفاده از همزن الکترومغناطیسی به صورت جداگانه نمی‌تواند به طور مؤثر تقویت‌کننده‌ها را توزیع کند، زیرا فقط یک نیروی حجمی را اعمال می‌کند. بنابراین، استفاده همزمان، از هر دو روش همزنی

مکانیکی و الکترومغناطیسی می‌تواند مفید باشد. در حقیقت، ترکیب دو نیروی برشی و حجمی می‌تواند تلاطم بیشتری را در فلز مذاب ایجاد کند و می‌توان از مزایای هر دو روش بهره‌مند شد.

پژوهش در زمینه کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن از سال 2011 شروع شد [35-38، 20]. فرآیند اصلی آماده‌سازی کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن شامل پیش پخش کردن، مخلوط و عملیات تغییر شکل می‌باشد. عملیات پیش پخش کردن و شکل دهی می‌تواند نقش مهمی در توزیع گرافن داشته باشد. در حال حاضر پژوهش‌ها روی توزیع گرافن در مراحل اولیه می‌باشد که عمدتاً بر پراکندگی پودر تمرکز دارد و پیشرفت خوبی در تحقیقات ایجاد شده است. با این وجود توزیع گرافن هنوز نیاز به بهبود دارد. در ادامه به بیان خلاصه چند مورد از پژوهش‌های انجام شده به منظور بهبود توزیع گرافن در زمینه آلومینیومی و افزایش خواص آلیاژ پایه، پرداخته می‌شود و سپس پژوهش حاضر تعریف می‌شود.

بستورس و همکاران [39]، به بررسی تأثیر زمان آسیاب کاری بر استحکام خمشی نانوکامپوزیت آلومینیوم 6061 و تقویت شده با 1 درصد وزنی گرافن و ساخته شده به روش نیمه پودری و سپس پرس داغ پرداختند. آن‌ها مدت آسیاب را 10، 30، 60 و 90 دقیقه انتخاب کردند و گزارش شد که با 1 ساعت آسیاب کاری گلوله‌ای، استحکام خمشی نانوکامپوزیت 47% افزایش می‌یابد. راشد و همکاران [24]، ابتدا پودر آلومینیوم و گرافن را به مدت 1 ساعت با همزن مکانیکی، با یکدیگر ترکیب کردند و سپس کامپوزیت زمینه آلومینیومی با خلوص 99% و تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانو صفحات گرافن را با استفاده از روش نیمه پودری و اکستروژن داغ تولید کردند. آن‌ها بیان کردند که در آزمون کشش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی نانوکامپوزیت در مقایسه با آلومینیوم خالص به ترتیب 14.7 و 11.1 درصد افزایش یافته است اما کرنش تا نقطه شکست 40.6 درصد کاهش یافته است. در آزمون فشار، استحکام فشاری و کرنش به ترتیب 7.8 و 20.2 درصد کاهش می‌یابد.

ژائو و همکاران [40]، کامپوزیت آلومینیوم - گرافن را با استفاده آسیاب کاری گلوله‌ای و سپس فرآیند پیچش فشار بالا ساختند. تصاویر میکروسکوپی آن‌ها توزیع یکنواخت گرافن در زمینه را نشان داد. استحکام کششی کامپوزیت نسبت به آلومینیوم خالص 25.5% درصد افزایش یافت.

علی‌پور و همکاران [41]، به بررسی ریزساختار و استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینیوم 7068 گرافن ساخته شده به روش آسیاب گلوله‌ای، ریخته‌گری گردابی با کمک حباب‌زایی مافوق صوت و سپس اکستروژن داغ پرداختند. آن‌ها از درصدهای وزنی گرافن 0.1، 0.3، 0.5، 0.7 و 1، ساعت‌ها و سرعت‌های مختلف آسیاب گلوله‌ای استفاده کردند در نتیجه پژوهش خود، مدت زمان 2 ساعت آسیاب گلوله‌ای با سرعت 250 rpm و 0.5 درصد وزنی، را اعلام و بیان کردند که برای این پارامترها بهترین توزیع گرافن مشاهده شده است. استحکام کششی کامپوزیت نیز در بیشترین مقدار خود برای نیم درصد وزنی گرافن، 76 درصد نسبت به آلیاژ پایه بهبود پیدا کرد.

بابازاده و همکاران [42]، به بررسی اثر نانوصفحات گرافن و نانوتیوب کربن بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی (A356) پرداختند. در این پژوهش از درصدهای وزنی 0.01، 0.05 و 0.1 تقویت‌کننده‌ها استفاده شد. آن‌ها بیان کردند که با افزودن 0.1 درصد وزنی گرافن، استحکام و کرنش به ترتیب 28% و 2.8% افزایش یافت و افزودن 0.1% نانو تیوب کربنی، 33% افزایش سختی را به دنبال داشت.

دهد [44,45]. کلوخه شدن گرافن و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام کششی یکی از مسائل بحث برانگیز می‌باشد. در پژوهش حاضر، برای توزیع بهتر نانو صفحات گرافن و همچنین اصلاح بیشتر ریزساختار روش ریخته‌گری با همزنی مکانیکی - مغناطیسی بکار گرفته شد. بر این اساس، به منظور شفاف‌سازی بررسی تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر نحوه توزیع و در نتیجه خواص مکانیکی نانوکامپوزیت و همچنین افزایش قابل توجه استحکام کششی و سختی با توجه به کاربرد این نانوکامپوزیت‌ها، دو روش ساخت، انجام شد. در روش اول نانو صفحات گرافن مستقیماً به آلومینیوم ریخته‌گری اضافه و کامپوزیت ساخته شد. در روش دوم، برای ساخت نانوکامپوزیت نانو صفحات گرافن بعد از آسیاب‌کاری گلوله‌ای و کامپوزیت شدن با پودر میکرونی آلومینیوم به شمش آلومینیومی اضافه شده و تحت فرآیند ریخته‌گری گردابی و الکترومغناطیس قرار گرفت، سپس برای هر دو روش، فرآیندهای اکستروژن داغ و انیل به ترتیب انجام شدند (شکل 1). سپس ریزساختار زمینه و استحکام کششی، استحکام فشاری و سختی، در هر دو نانوکامپوزیت و سپس آلومینیوم خالص ساخته شده به روش مشابه، بررسی و مقایسه شد. به دلیل اهمیت و کاربرد گسترده آلیاژهای سری 1xxx در صنایع عمومی و پیشرفته از آلومینیوم با خلوص 99% به عنوان ماده زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است. از آلیاژهای معروف این سری می‌توان به آلیاژ 1350 برای کاربردهای الکتریکی از جمله خطوط انتقال برق فشارقوی اشاره کرد. هدف از انجام تحقیق بر روی آلیاژ آلومینیوم 1350، افزایش هدایت الکتریکی رشته‌های آلومینیومی جهت استفاده در هادی‌های پرفریت انتقال برق با افزودن نانوغرافن و هم چنین بررسی خواص مکانیکی آن می‌باشد.

2- روش تحقیق

در این تحقیق از آلومینیوم خالص با درصد خلوص 99 درصد و چگالی 2.7 g/cm^3 ، 0.5 درصد وزنی نانو صفحات گرافن (شکل 2) با اندازه ذره $5 \mu\text{m}$ و ضخامت میانگین 15 nm و پودرهای میکرونی آلومینیوم با میانگین اندازه 20 میکرومتر (شکل 3) برای ساخت نانوکامپوزیت استفاده شد. از جمله ویژگی‌های نانو صفحات گرافن می‌توان به متوسط تعداد لایه بین 5 تا 10 لایه و خلوص بالای 95 درصد وزنی اشاره کرد.

عزت‌پور و همکاران [43]، استراتژی ساده‌ای برای بهبود توزیع تقویت کننده کربنی با حداقل آسیب ساختاری و پیوند فصل مشترکی مناسب، اتخاذ کردند. آن‌ها کامپوزیت GNP-CNT/AA7075 را از تلفیق فرآیند متالورژی پودر ورقه‌ای، روش انحلالی به همراه ریخته‌گری نیمه جامد و اکستروژن دمایی، تولید کردند. پس از تعیین نسبت بهینه $V_{\text{GNP}}/V_{\text{CNT}}$ در تقویت کننده هیبریدی کربنی (0.167)، اثر حضور آن بر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ AA7075 را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که فرآیند ریخته‌گری نیمه جامد علاوه بر تخریب ساختار شبکه‌ای فاز تقویت کننده، سبب به دام فتلان مکانیکی آن‌ها درون زمینه و جدایش عناصر آلیاژی بر سطح تقویت کننده کربنی شده است. همچنین گزارش کردند که در دمایی بهینه فرآیند اکستروژن 400°C ، توزیع یکنواخت GNP-CNT در درون زمینه و کاهش 39% اندازه دانه حاصل شده است و ریزسختی، و مقادیر استحکام تسلیم کششی و فشاری این کامپوزیت نسبت به آلیاژ AA7075 به ترتیب 17%، 51% و 28% بهبود یافته است.

اگرچه پژوهش‌هایی در زمینه تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر روی برخی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن انجام شده است، اما با توجه به این که یکی از کاربردهای آلومینیوم خالص، خطوط انتقال قدرت و صنایع الکترونیک می‌باشد، توزیع مطلوب گرافن در زمینه آلومینیوم خالص و خلأ شفاف‌سازی دقیق چگونگی تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص - گرافن از جمله: سختی، استحکام کششی و فشاری در فرآیند تولید به روش ریخته‌گری با همزنی مکانیکی - مغناطیسی بعنوان یکی از روش‌های کم هزینه، سریع و مناسب برای تولید انبوه، احساس می‌شود. از طرفی در مطالعات پیشین افزایش استحکام کششی، سختی و یا استحکام فشاری برای این نانوکامپوزیت چشمگیر نبوده است.

بر اساس مطالعات انجام شده بر روی پژوهش‌های پیشین [41]، 0.5 درصد وزنی گرافن به عنوان مقدار بهینه برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب از جمله استحکام کششی در نانوکامپوزیت آلومینیوم - گرافن معرفی شده است.

در استفاده از فرآیند ریخته‌گری برای تولید نانوکامپوزیت آلومینیوم - گرافن، به دلیل بزرگ بودن سطح مقطع مخصوص صفحات گرافن و وجود نیروی واندروالس بین صفحات در طول فرآیند آماده‌سازی و همچنین پایین بودن چگالی گرافن نسبت به آلومینیوم خالص کلوخه‌شدن گرافن رخ می‌-

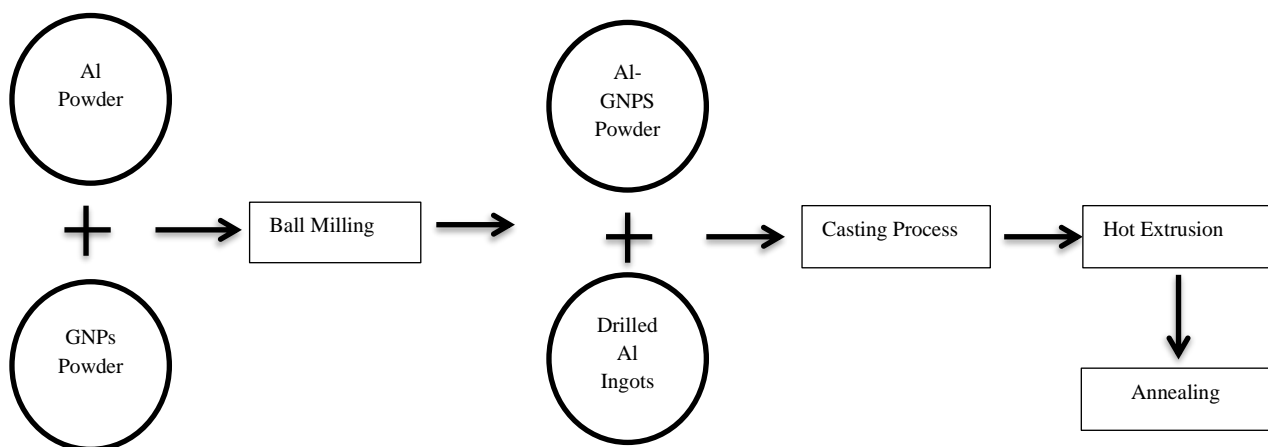


Fig. 1 Schematic of composite fabrication procedure.

شکل 1 شماتیک فرایند ساخت کامپوزیت.

شمش‌های آلومینیومی نیز با استون آزمایشگاهی شسته شدند تا آلودگی‌های سطحی پاک شوند. همان‌طور که بیان شد برای ساخت کامپوزیت از دو روش استفاده شد. در روش اول ابتدا در شمش‌های آلومینیومی، با مت 6 میلی‌متری، 16 سوراخ به عمق 50 میلی‌متر ایجاد شد که این سوراخ‌ها با پودر نانو صفحات گرافن پر شدند و این مواد خام در بوته SiC (شکل 4) قرار داده شدند. سپس بوته در کوره‌ای که تحت گاز آرگون کار می‌کند و به همزن مکانیکی از جنس فولاد زنگ‌نزن 316 که جوش آرگون خورده و سپس روکش (کوتینگ) اکسید آلومینیوم به روش پاشش حرارتی داده شده است، و همزنی مغناطیسی (امواج الکترومغناطیسی) مجهز است، قرار داده شد (شکل 5)؛ و در ادامه ریخته‌گری به صورت زیر انجام شد:

- قراردادن شمش و پر کردن محفظه خلأ دستگاه ریخته‌گری با گاز آرگون با خلوص بالا (99.9995).

- افزایش دمای محفظه تا 780°C .

- شروع همزن مکانیکی بعد از ذوب کامل بیلت، با سرعت 2000 rpm و به مدت 10 min، سپس شروع همزن مغناطیسی با فرکانس 30 Hz، توان 5800 W و سرعت 400 rpm با نرخ خنک کاری $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

- خارج کردن بوته و قرار دادن در دمای محیط مختلف.

در ادامه، ماشین‌کاری بالک نانوکامپوزیت و انجام دو پاس اکستروژن داغ در دمای 300°C با نسبت اکستروژن 20 به 1، با استفاده از پرس هیدرولیک 100 تن با سرعت 20 mm/s، به منظور کاهش و بستن تخلخل‌های ناشی از ریخته‌گری و بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری انجام شد تا نمونه‌هایی به قطر 1cm و طول 8cm تولید شود. در روش دوم، کامپوزیت پودری آلومینیوم - گرافن آماده شده، به سوراخ‌های ایجاد شده در شمش‌های آلومینیوم افزوده شد. ادامه فرآیند ساخت نانوکامپوزیت، همانند روش اول انجام شد. برای مقایسه کردن خواص، نمونه‌های آلومینیوم خالص بدون ذرات تقویت کننده نیز با همین روش آماده شدند. نمونه‌های بدست آمده از هر سه روش به مدت یک ساعت و در دمای 343°C آتیل شدند. به منظور بررسی ریزساختار و توزیع نانوصفحات گرافن در فاز زمینه، از نمونه‌های نانوکامپوزیت آلومینیوم - گرافن در دو روش با آسیاب گلوله‌ای و بدون آسیاب گلوله‌ای، نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع 1 سانتی‌متر با قطر 1 سانتی‌متر تهیه شد. سطح این نمونه‌ها ابتدا با کاغذ سمباده‌های ضد آب 240 تا 5000 تحت عمل سمباده‌زنی قرار گرفت. سپس با استفاده از خمیر الماسه 6 میکرونی پرداخت خشن سطح نمونه و نهایتاً با استفاده از محلول 0.03 میکرونی آلومینا، پولیش نهایی سطح نمونه‌ها انجام شد.

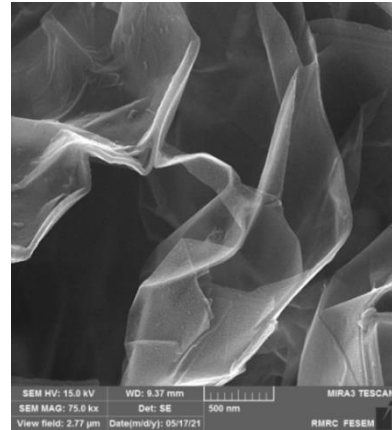


Fig. 2 Microscopy image of the graphene nanoplates.

شکل 2 تصویر میکروسکوپی از نانو صفحات گرافن.

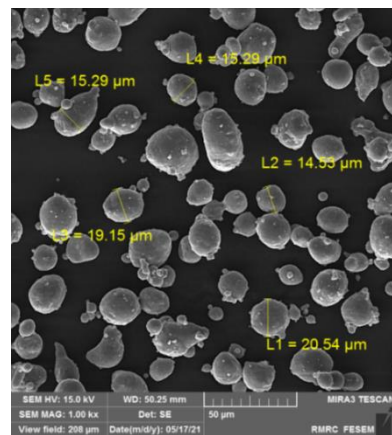


Fig. 3 Microscopy image of aluminum powder.

شکل 3 تصویر میکروسکوپی از پودر آلومینیوم.

با مطالعات انجام شده بر روی پژوهش‌های پیشین مشابه، می‌توان دریافت که به طور کلی آسیاب گلوله‌ای، نتایج مثبتی در توزیع بهتر پودر نانو در فاز زمینه و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن را به دنبال دارد. به همین دلیل، به منظور افزایش خاصیت ترشوندگی نانوصفحات گرافن و کاهش کلوخه‌های شدن و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی آن، از آسیاب‌کاری گلوله‌ای استفاده شد. در این روش با بررسی مطالعات پیشین [41]، با هدف صرفه‌جویی در زمان و هزینه، و همچنین تحلیل نتایج پژوهش انجام شده، آسیاب گلوله‌ای به مدت 2 ساعت به عنوان زمان بهینه آسیاب انتخاب شد. در ادامه، ابتدا گرافن با استون آزمایشگاهی شسته شد تا کلوخه‌های احتمالی از هم جدا شوند و به مدت 24 ساعت در دمای اتاق نگه داشته شد تا کاملاً خشک شود. سپس مخلوطی از نانو صفحات گرافن و پودر آلومینیومی با ابعاد 20 میکرومتر به مدت 2 ساعت، با نسبت گلوله به پودر 10:1 و سرعت 250 rpm، تحت عملیات آسیاب‌کاری قرار گرفتند تا پودر کامپوزیتی آلومینیوم با نانو صفحات گرافن حاوی 25 درصد نانو صفحات گرافن و 75 درصد پودر آلومینیوم بدست آید. آسیاب با مقدار 2 درصد وزنی اسید استتاریک به عنوان کنترل‌کننده فرآیند (PCA) انجام شد. برای جلوگیری از اکسید شدن احتمالی پودرها در تمام مراحل آسیاب‌کاری، گاز آرگون در داخل محفظه شارژ، و درب آسیاب کاملاً آب بندی شد. همچنین برای جلوگیری از بالا رفتن دما به ازای هر 1 ساعت آسیاب‌کاری، عملیات به مدت 30 دقیقه متوقف شد.



Fig. 4 Mold casting of SiC

شکل 4 قالب ریخته‌گری SiC

ریزساختار نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل Mira 3-XMU و مجهز به آشکارساز EDX در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی از این

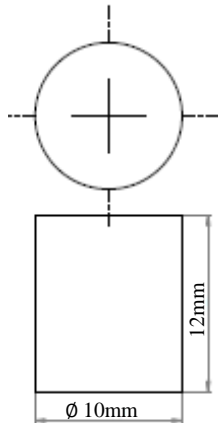
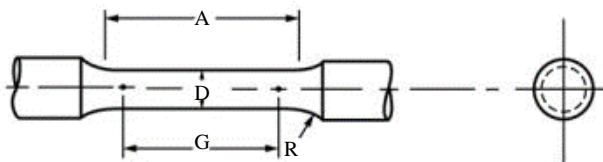


Fig. 6 Compression test sample dimensions

شکل 6 ابعاد نمونه آزمون فشار



G (mm)	D (mm)	R(mm)	A (mm)
30.00 ± 0.06	6.00 ± 0.10	6	48

Fig. 7 Tensile test sample dimensions.

شکل 7 ابعاد نمونه آزمون کشش.

a-الف



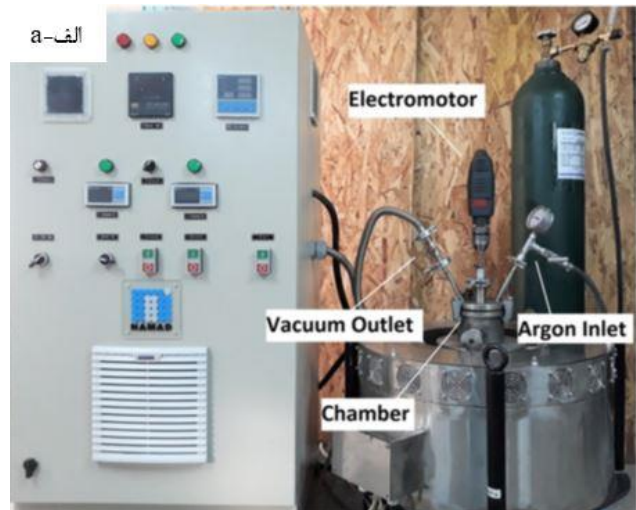
b-ب



Fig.8 A number of broken samples in the a) Compression test b) Tensile test.

شکل 8 تعدادی از نمونه‌های شکسته شده در الف) تست فشار، ب) تست کشش.

بررسی، پی بردن به تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر نحوه توزیع نانو صفحات گرافن در زمینه نانو کامپوزیت، شکل و اندازه نانو صفحات می‌باشد. برای ارزیابی خواص مکانیکی، از آزمون سختی، آزمون فشار و آزمون کشش استفاده شد. آزمون سختی، توسط دستگاه سختی سنج ساخت شرکت شاپ ساری مدل M5 و 300 گرم- نیرو و زمان اعمال بار 15 ثانیه انجام شد. آزمون فشار برای نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد شکل 6 و آزمون با سرعت 2.16 mm/min انجام شد (شکل 8a). آزمون کشش نیز برای نمونه‌های تراشکاری شده مطابق با استاندارد ASTM B557M-10 (شکل 7) و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ انجام شد (شکل 8b). آزمون کشش و آزمون فشار، توسط دستگاه کشش ساخت شرکت سنتام با ظرفیت 150 کیلو نیوتن انجام شدند. برای هر نمونه آزمون کشش و فشار، 3 مرتبه آزمون صورت گرفت و مقدار میانگین با انحراف معیار مربوطه گزارش شد. برای هر نمونه آزمون سختی، حداقل در 5 نقطه آزمون انجام شد و مقدار میانگین بدست آمده برای هر نمونه با انحراف معیار مربوطه، ثبت شد.



b-ب

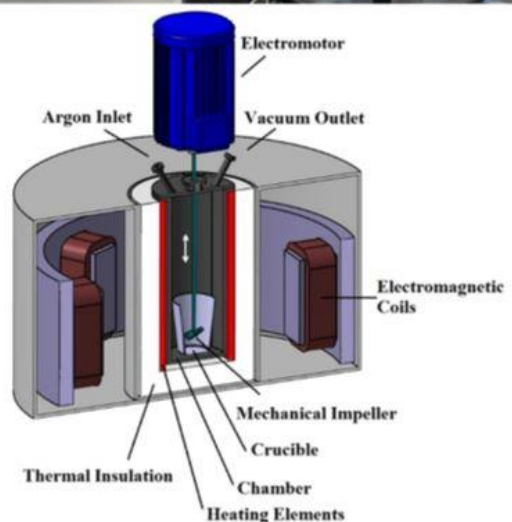


Fig. 5 Developed apparatus: a) different external parts and b) schematic view of the main parts.

شکل 5 دستگاه توسعه یافته الف) بخش‌های مختلف خارجی و ب) نمای شماتیک قطعات اصلی

3-نتایج و بحث

3-1- مطالعات ریزساختاری آلیاژ پایه و پودر نانوکامپوزیتی

همان طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، شکل پودر آلومینیوم به صورت کروی و با اندازه میانگین 20 میکرون می‌باشد. اما بعد از 2 ساعت آسیاب کاری گلوله‌ای، شکل پودرهای میکرونی از کروی به صفحه‌ای تبدیل شده و اندازه آن‌ها نیز کاهش پیدا کرده است (شکل 9). بعد از اضافه کردن نانو صفحات گرافن به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب کاری گلوله‌ای با افزایش خاصیت ترشوندگی گرافن، نانو صفحات گرافن بصورت یکنواخت در داخل پودرهای آلومینیومی پخش شده‌اند.

3-2- توزیع نانوذرات در زمینه

توزیع نانو صفحات گرافن در فاز زمینه به عوامل مختلفی از قبیل پراکنده کردن نانوذرات در پودر آلومینیوم، اتفاقاتی که در حین مذاب و انجماد برای نانوذرات رخ می‌دهد، وابسته است. در حین مذاب، ته‌نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه‌ای شدن مطرح می‌باشد. در زمان انجماد، موضوع مهم، اندرکنش بین جبهه انجماد و نانو صفحات گرافن است که به عوامل 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 [46].

در روش بدون استفاده از آسیاب گلوله‌ای، بدلیل اینکه نانوذرات در مذاب از پراکندگی مناسبی برخوردار نیستند، توزیع نانوذرات در نمونه‌ای که از انجماد این مذاب بدست می‌آید، مطلوب نمی‌باشد. به طوری که توزیع نانو به صورت کلوخه و یا خوشه‌ای بودن آن می‌باشد که این امر به وضوح در شکل 10a و 10b و 10c مشاهده می‌شود. گرافن، دارای سطح مقطع مخصوص بزرگی می‌باشد و به دلیل جذب قوی نیروی واندروالس بین صفحات در فرآیند آماده‌سازی، به راحتی خوشه‌ای می‌شود [44,45]. می‌توان تاثیر گرافن به عنوان تقویت کننده و راندمان افزایش یافته (R) کامپوزیت را با استفاده از معادله زیر بیان کرد.

$$R = \frac{S l}{V_4} - 1 \quad (1)$$

که S/V سطح مخصوص و l اندازه نانوصفحات گرافن می‌باشد [47]. کلوخه شدن گرافن منجر به کاهش سطح مخصوص گرافن می‌شود (شکل 10a) که مستقیماً بر تاثیر تقویت کنندگی آن اثر می‌گذارد و راندمان ماده کامپوزیتی را کاهش می‌دهد. کلوخه‌های گرافن (شکل 10b و 10c) به عنوان منشأ ترک عمل می‌کنند و باعث می‌شوند که کامپوزیت در نیروی پایینی شکسته شود [48-50]. تصویر EDX برای اثبات وجود گرافن در نانوکامپوزیت استفاده شد که وجود ترکیبات کربن دار این امر را نشان می‌دهد (شکل 10d).

در روش استفاده از آسیاب کاری گلوله‌ای، نیروهای ضربه‌ای و برشی شدید ناشی از گلوله‌ها و همچنین تاثیر اسید استتاریک به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند، باعث می‌شود که کلوخه‌های نانوذرات از بین رود و نانو صفحات گرافن به صورت مجزا در زمینه آلومینیوم توزیع شود و بازدهی آسیاب کاری بالا رود.

در نتیجه همان طور که در شکل 10e و 10f مشاهده می‌شود کامپوزیت بهتر ساخته می‌شود و کلوخه‌های گرافن تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. توزیع یکنواخت نانو صفحات گرافن در زمینه پودر آلومینیوم باعث می‌شود که

فاصله بین نانو صفحات گرافن افزایش و در نتیجه نیروی جاذبه بین آن‌ها کاهش یابد، این امر احتمال غلبه نیروی وارده توسط همزن مکانیکی بر نیروی

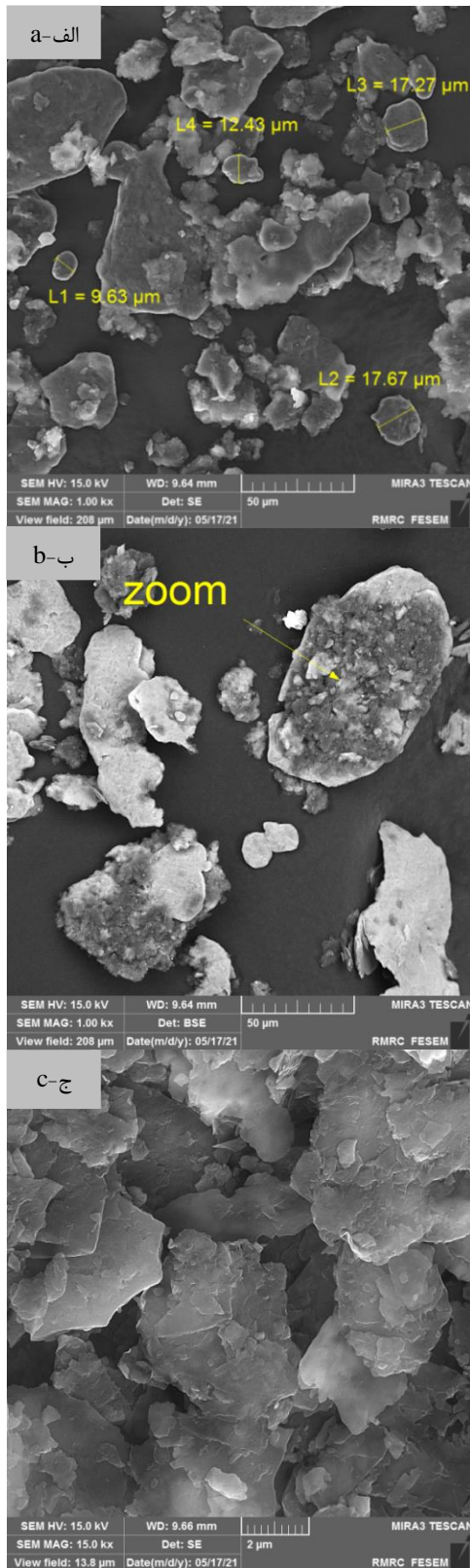


Fig. 9 Image of Al-0.5 wt% graphene composite powder after 2 hours of ball milling process a,b) low magnification, c) high magnification
 شکل 9 تصویر پودر کامپوزیتی آلومینیوم - گرافن نیم درصد وزنی بعد از دو ساعت فرایند آسیاب کاری گلوله‌ای، الف و ب) بزرگنمایی پایین، ج) بزرگنمایی بالا.

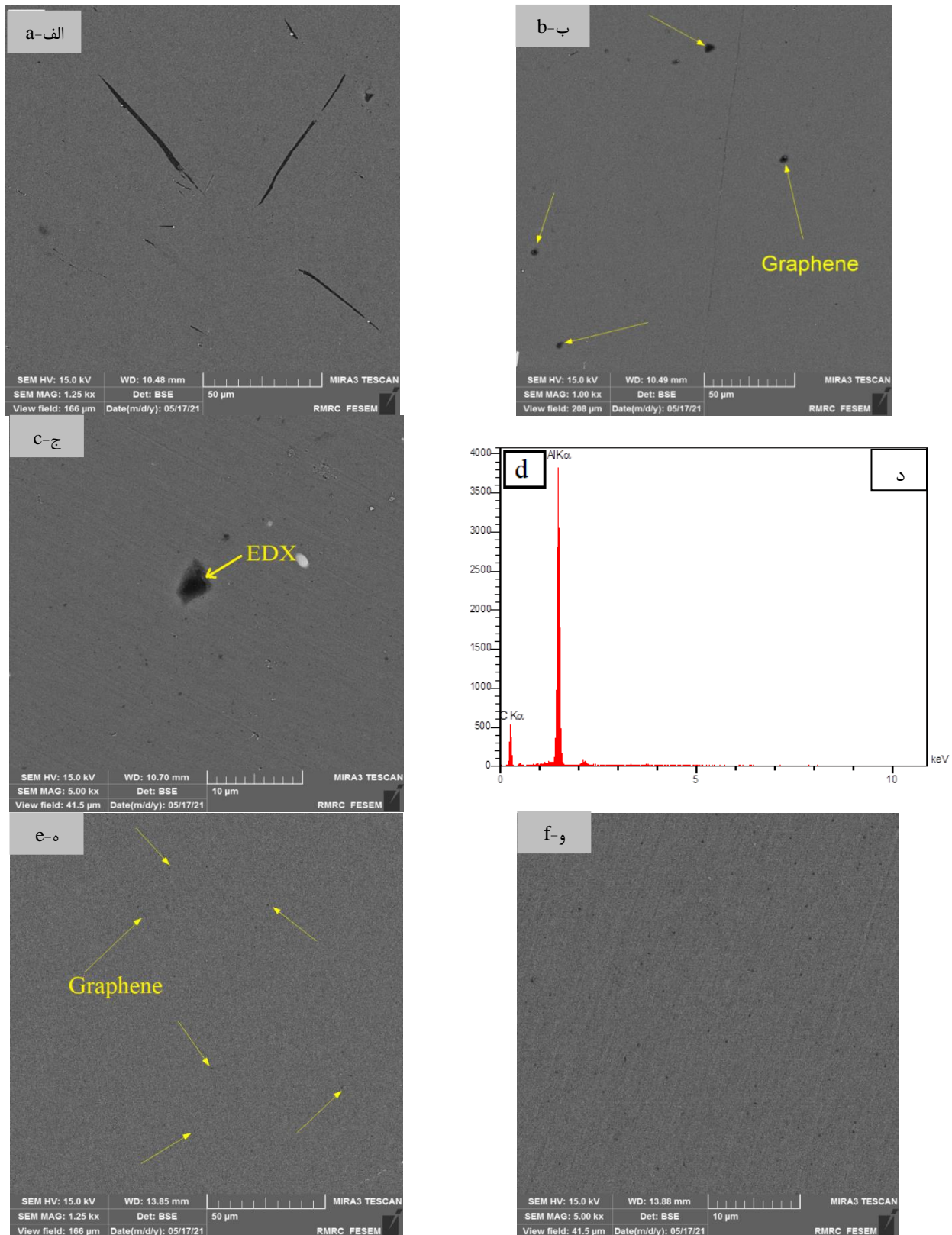


Fig. 10 FESEM images of pure Al – 0.5 wt% GNPs nanocomposite a) Surface area of graphene in nanocomposite without ball mill b) Low magnification of nanocomposite without ball mill c) High magnification of nanocomposite without ball mill (d) EDX image of nanocomposite without ball mill e) Low magnification of nanocomposite with ball mill f) High magnification of nanocomposite with ball mill.

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نانو کامپوزیت آلومینیوم خالص - نیم درصد وزنی نانوصفات گرافن، الف) سطح مقطع گرافن در نانو کامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، ب) بزرگنمایی پایین از نانو کامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، ج) بزرگنمایی بالا از نانو کامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، د) تصویر EDX از نانو کامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، ه) بزرگنمایی پایین از نانو کامپوزیت با آسیاب گلوله‌ای، و) بزرگنمایی بالا از نانو کامپوزیت با آسیاب گلوله‌ای .

فشاری، آسیاب نکردن پودر اثر بهتری دارد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، گرافن به علت ساختار دوبعدی آن، استحکام کششی بالایی دارد و بیشتر دچار کرنش می‌شوند اما در آزمون فشار به علت کمناش ورقه‌ای، گرافن نرم می‌باشد، بنابراین نمی‌تواند زیاد فشرده شود [53]. تأثیر مثبت افزودن گرافن و توزیع یکنواخت ناشی از آسیاب گلوله‌ای بر خواص کششی کامپوزیت به‌طور قابل توجهی بیشتر از استحکام فشاری می‌باشد. به عبارتی باز شدن کلوخه‌ها و توزیع یکنواخت گرافن می‌تواند باعث شود که صفحات دوبعدی گرافن با مکانیزم قفل کردن ترک‌ها و تغییر مسیر آن‌ها باعث افزایش استحکام کششی و تغییر طول بیشتری شوند. در حالی که در آزمون فشار، همان‌طور که بیان شد به علت نرم بودن گرافن، آسیاب گلوله‌ای و توزیع یکنواخت می‌تواند باعث اندکی کاهش در استحکام فشاری نانو کامپوزیت شود.

جدول 1 نتایج آزمون‌های سختی، استحکام کششی، استحکام فشاری و تغییر طول برای آلومینیوم، نانو کامپوزیت آلومینیوم - 0.5% وزنی گرافن با آسیاب گلوله‌ای و آلومینیوم 0.5% - گرافن بدون آسیاب گلوله‌ای.

Table. 1 Results of hardness, tensile and compression strength and elongation tests for Al, Al-0.5% GNP's nanocomposite with ball mill and Al-0.5% GNP's without ball mill.

نمونه	سختی ویکرز	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)	استحکام فشاری (MPa)
آلومینیوم خالص	34.3 ± 1.3	61 ± 3.28	55.6 ± 2.45	228.8 ± 14.8
کامپوزیت آلومینیوم - گرافن بدون آسیاب گلوله‌ای	37.4 ± 1.64	113.3 ± 5.16	35.9 ± 1.2	259.5 ± 17.4
کامپوزیت آلومینیوم - گرافن با آسیاب گلوله‌ای	41 ± 2.3	147.6 ± 8.32	51.8 ± 4.8	255.6 ± 15.52

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا نانو کامپوزیت آلومینیوم خالص - 0.5 wt% گرافن با استفاده از ریخته‌گری و با روش جدید همزنی مکانیکی - مغناطیسی ساخته شد. سپس توزیع نانو صفحات گرافن به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مطالعه و خواص مکانیکی بررسی شد. در روش اول نانو-صفحات گرافن مستقیم به داخل شمش‌های آلومینیومی اضافه شدند. اما در روش دوم ابتدا پودرهای آلومینیوم و گرافن به مدت 2 ساعت و با سرعت 250 rpm تحت عملیات آسیاب گلوله‌ای قرار گرفتند و سپس به شمش‌های آلومینیومی اضافه شدند و فرآیند ریخته‌گری انجام شد. در ادامه برای هر دو روش فرآیند اکستروژن داغ انجام شد. با هدف مقایسه، نمونه‌های آلومینیوم خالص نیز به روش مشابه آماده شد. همه نمونه‌های آماده شده در شرایط یکسان به مدت 1 ساعت و در دمای 343°C آیل شدند. در نهایت نمونه‌هایی برای بررسی ریزساختار، آزمون کشش، آزمون سختی و آزمون فشار آماده شدند که نتایج زیر حاصل گردید:

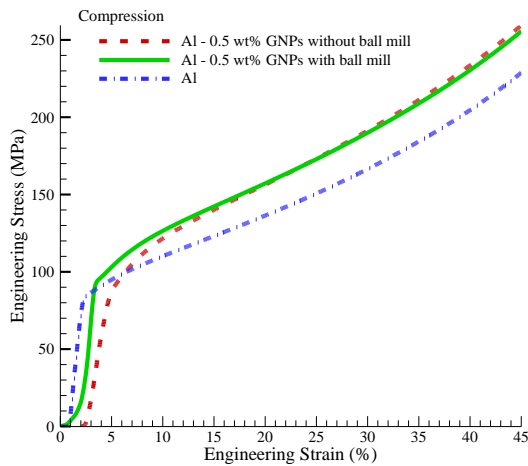
جاذبه بین نانو صفحات گرافن را افزایش می‌دهد و در نتیجه، تشکیل کلوخه-های نانو صفحات گرافن را به حداقل می‌رساند [41].

در حین فرآیند ریخته‌گری، در روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای، بعد از ذوب شدن شمش‌های آلومینیومی، انحلال و ذوب شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم شروع می‌شود. چون نانو صفحات گرافن در داخل پودرهای آلومینیوم با عملیات آسیاب کاری گلوله‌ای قرار گرفته‌اند و در واقع 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 رهاسازی می‌شوند. این رهاسازی نانو صفحات گرافن در مدت هم زدن مکانیکی مذاب اتفاق می‌افتد. در ادامه با اعمال امواج الکترومغناطیس به نانو کامپوزیت تا مرحله سرد شدن، کلوخه‌های نانو صفحات گرافن کاملاً از هم باز شده و نانو صفحات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می‌آورند (شکل 10e و 10f). از طرفی دیگر 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 تغییر طول نانو کامپوزیت خواهند شد [51]. بنابراین استفاده از آسیاب گلوله‌ای هم باعث توزیع یکنواخت، هم کاهش اندازه نانو ذرات می‌شود که نتیجه آن بهبود خواص مکانیکی می‌باشد. توزیع نامناسب نانو صفحات گرافن در فاز زمینه و کلوخه شدن آن‌ها باعث می‌شود که در مرزدهانه‌ها تجمع یابند و کاهش استحکام کششی را به دنبال داشته باشد.

3-3- خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های ریخته‌گری

نتایج آزمون سختی ویکرز، استحکام کششی، فشاری و تغییر طول در جدول 1 و شکل 11 نشان داده شده است. اثر مثبت آسیاب گلوله‌ای بر سختی نانو کامپوزیت 19.7 درصد و در روش بدون آسیاب گلوله‌ای 9 درصد می‌باشد که تاثیر مثبت روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای نسبت به بدون استفاده از آسیاب گلوله‌ای 10.7 درصد می‌باشد. استحکام کششی نمونه کامپوزیتی بدون آسیاب گلوله‌ای و نمونه کامپوزیتی با آسیاب گلوله‌ای نسبت به آلومینیوم خالص به ترتیب 142 و 85.2 درصد افزایش داشته است. در واقع با توزیع یکنواخت نانو صفحات گرافن، این ذرات در مرزدهانه‌های آلومینیوم به عنوان یک مانع عمل می‌کنند تا رشد دانه را حفظ کنند و نابجایی‌ها به دلیل محدودیت حرکتشان نمی‌توانند به راحتی حرکت کنند که باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. در صورتی که کلوخه‌های گرافن منجر به تخلخل بیشتر، کاهش چگالی و در نتیجه کاهش استحکام کششی و سختی ویکرز می‌شود [52]. ازدیاد طول تا نقطه شکست نیز در روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای 6.8 درصد و در روش بدون آسیاب 35.4 درصد کاهش یافته است. همان‌طور که مشخص است، به دلیل کاهش اندازه ذرات و همچنان توزیع یکنواخت نانو ذرات، در روش آسیاب گلوله‌ای، استحکام و تغییر طول کامپوزیت به ترتیب 56.8 و 44.3 درصد بیشتر بهبود بخشیده است که درصد قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. بنابراین توزیع نامناسب نانو صفحات گرافن در زمینه باعث افت استحکام و تغییر طول می‌شود. نتایج آزمون استحکام فشاری نشان می‌دهد که نانو صفحات گرافن در هر دو روش باعث افزایش استحکام فشاری می‌شود. به‌طوری که در روش بدون آسیاب گلوله‌ای، 13.5 درصد و روش آسیاب گلوله‌ای 11.7 درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد در استحکام

a-الف



b-ب

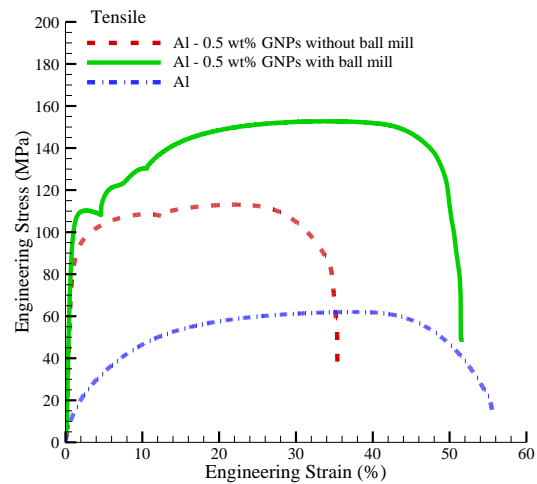


Fig. 11 a) Compression and b) tensile tests of pure Al and Al – 0.5 wt% GNPs composite with and without ball mill.

شکل 11 آزمون‌های الف) فشار و ب) کشش آلومینیوم و کامپوزیت آلومینیوم گرافن 0.5 درصد وزنی با آسیاب گلوله‌ای و بدون آسیاب گلوله‌ای.

[4] Polat S, Sun Y, Cevik E., "Investigation of Wear and Corrosion Behavior of Graphene Nanoplatelet-Coated B4C Reinforced Al-Si Matrix Semi-Ceramic Hybrid Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 53, No. 25, pp. 3549-3565, 2019.

[5] Rhee H, Whittington W.R, Oppedal A.L, Sherif A.R, King R.L, Kim H.J, Lee C., "Mechanical Properties of Novel Aluminum Metal Matrix Metal Composites: Application to Overhead Conductors", *Journal of Materials and Design*, Vol. 88, pp. 16-21, 2015.

[6] Sauvage X, Bobruk E.V, Murashkin M.Y, Nasedkina Y, Enikeev N.A, Valiev R.Z., "Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys", *Journal of Acta Materialia*, Vol. 98, pp. 355-366, 2015.

[7] Yibin, X, Yoshita. T., "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.

[8] Boronovo. C, Apelian. D., "Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A Critical Review", *Journal of Materials Science Forum*, Vol. 678, pp. 1-22, 2011.

[9] Yang. Y, Li. X, Lan. J., "Study on Bulk Aluminum Matrix Nano Composite Fabricated by Ultrasonic Dispersion of Nano-Sized SiC Particles in Molten Aluminum Alloy", *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 380, pp. 378-383, 2004.

[10] Miracle. D., "Metal Matrix Composites-From Science to Technological Significance", *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 2526-2540, 2005.

[11] Porwal. H, Grasso. S, Reece. M. J., "Review of Graphene-Ceramic Matrix Composites", *Journal of Advances in Applied Ceramics*, Vol. 112, No. 8, pp. 443-454, 2013.

[12] Tjong. S.C., "Recent Progress in The Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets", *Journal of Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 74, No. 10, pp. 281-350, 2013.

[13] Hu. Z, Tong. G, Lin. D, Chen. C, Guo. H, Xu. J, Zhou. L., "Graphene-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites - a Review", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 32, No. 9, pp. 930-953, 2016.

[14] Moghadam. A.D, Omrani. E, Menezes. P.L, Rohatgi. P.K., "Mechanical and Tribological Properties of Self-lubricating Metal Matrix Nanocomposites Reinforced by Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene - A Review", *Journal of Composites Part B: Engineering*, Vol. 77, pp. 402-420, 2015.

1- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان می‌دهد که آسیاب کاری گلوله‌ای باعث کاهش اندازه دانه ذرات میکرونی پودر آلومینیوم و تغییر شکل ذرات از کروی به صفحه‌ای می‌شود.

2- عدم وجود کلوخه‌ها و خوشه‌های گرافن در روش آسیاب گلوله‌ای، توزیع خوب نانو صفحات گرافن و اصلاح اندازه دانه در فاز زمینه با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌خوبی آشکار می‌باشد. در صورتی که تصاویر میکروسکوپی کلوخه‌ها و خوشه‌های گرافن در روش بدون آسیاب گلوله‌ای گرافن را نشان می‌دهند.

3- استفاده از روش آسیاب گلوله‌ای پودر کامپوزیتی آلومینیوم - گرافن قبل از ریخته‌گری، استحکام کششی، تغییر طول تا نقطه شکست و سختی را نسبت به روش بدون آسیاب به ترتیب 56.8، 44.3 و 10.7 را بیشتر بهبود می‌بخشد. دوبعدی بودن گرافن عامل استحکام کششی بالای آن می‌باشد. بنابراین توزیع یکنواخت گرافن و در نتیجه مکانیزم قفل ترک‌ها و تغییر مسیر آن‌ها خواص کششی و سختی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.

4- در آزمون فشار، آسیاب نکردن پودر اثر مثبت بیشتری (1.8%) بر استحکام فشاری داشت به طوری که در روش بدون آسیاب، استحکام فشاری 13.5 و در روش با آسیاب 11.7 درصد نسبت به آلومینیوم خالص افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به علت نرم بودن گرافن ناشی از کماتش صفحه‌ای آن در آزمون فشار باشد.

5- مراجع

[1] Kumar A, Gulati V, Kumar P., "Parametric Effects on Formability of AA2024-O Aluminum Alloy Sheets in Single Point Incremental Forming", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No.1, pp. 1461-1469, 2018.

[2] Thakur A., "Fatigue Behavior and Fracture Mechanism of a Hot Rolled AA7020 Aluminum Alloy", *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 401-404, 2019.

[3] Kumar GV, Rao CSP, Selvaraj N., "Mechanical and Tribological Behavior of Particulate Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites- a Review", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 59-91, 2011.

- [31] Dwivedi. S. P, Sharma. S, Mishra. R. K., "Electromagnetic Stir Casting and its Process Parameters for the Fabrication and Refined the Grain Structure of Metal Matrix Composites", *International Journal of Advanced Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 639-649, 2014.
- [32] Kumar. A, Lal. S, Kumar. S. J., "Fabrication and Characterization of A359/Al₂O₃ Metal Matrix Composite using Electromagnetic Stir Casting Method", *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 2, No. 3, pp. 250-254, 2013.
- [33] Hashim. J, Looney. L, Hashmi. M., "Metal Matrix Composites: Production by The Stir Casting Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 1-7, 1999.
- [34] Garcia-Hinojosa. J, Surrapa. M., "Effect of Grain Refinement Treatment on the Microstructure of Cast Al-7Si-SiCp Composites", *Journal of Materials Science and Engineering: A*, Vol. 386, No. 1-2, pp. 54-60, 2004.
- [35] Wang. R. G, Li. Z, Liu. W.B, Jiao. W.C, Hao. L.F, Yang. F., "Attapulgite-Graphene Oxide Hybrids as Thermal and Mechanical Reinforcements for Epoxy Composites", *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 87, pp. 29, 2013.
- [36] Han. Y.G, Wang. T.Q, Gao. X.X, Li. T.X and Zhang. Q., "Preparation of Thermally Reduced Graphene Oxide and the Influence of Its Reduction Temperature on the Thermal, Mechanical, Flame Retardant Performances of PS Nanocomposites", *Journal of Composite Part A*, Vol. 84, p. 336, 2016.
- [37] Ramirza. C, Miranzo. P, Belmonte. M, Osendi. M.I, Poza. P, Vega-Diaz. S.M, Terrones. M., "Extraordinary Toughening Enhancement and Flexural Strength in Si₃N₄ Composites using Graphene Sheets", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 34, No. 2, p. 161, 2014.
- [38] Vahdati, M., "Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1207-1216, 2021.
- [39] Bastwors. M, Kim. Y, Zhang. K, and Wang. S., "Fabrication of Graphene Reinforced Aluminum Composite by Semi-Solid Processing", *Journal of International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2013.
- [40] Zhao. L.Y, Lu. H.M, and Gao. Z.J., "Microstructure and Mechanical Properties of Al/Graphene Composite Produced by Highpressure Torsion", *Journal of Advanced Engineering Materials*, Vol. 17, No. 7, p. 976, 2013.
- [41] Alipour. M, Eslami Farsani. R., "Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast AA7068 Nanocomposite Reinforced with Graphene Nanoplates", In Persian, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 139-144, 2017.
- [42] Babazade, A., Hadad, M.J., Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.
- [43] Ezatpour. H, and Torabi Parizi. M., "Effect of Carbonaceous Hybrid Reinforcement and Extrusion Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Matrix Hybrid Composite Prepared by Semi-Solid Casting", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1339-1352, 2021.
- [44] Shin. S.E, Choi. H.J, Bea. D.H., "Strengthening Behavior of Few-Layered Graphene/Aluminum Composites", *Journal of Carbon*, Vol. 82, pp. 143, 2015.
- [45] Baig. Z, Mamat. O and Mustapha. M., "Recent Progress on the Dispersion and the Strengthening Effect of Carbon Nanotubes and Graphene-Reinforced Metal Nanocomposites: A Review", *Journal of Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-46, 2018.
- [46] Chung. D.D. L., "Carbon Composites", Second Edition, University at Buffalo, The State University of New York, United States, Published by Elsevier, pp. 532-562, 2017.
- [15] Novoselov. K.S, Geim. A.K, Morozov. S.V, Jiang. D, Zhang. Y, Dubonos. S.V, Grigorieva. I.V, Firsov. A. A., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Journal of Science*, Vol. 306, No. 5696, pp. 666-669, 2004.
- [16] Balandin. A.A, Ghosh. S, Bao. W, Calizo. I, Teweldebrhan. D, Miao. F, Lau. C.N., "Superior Thermal Conductivity of Single layer Graphene", *Journal of Nano Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 902-907, 2008.
- [17] Lee.C, Wei. X, Kysar. J. W, Hone. J., "Measurement of The Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene", *Journal of Science*, Vol. 321, No. 5887, pp. 385-388, 2008.
- [18] Lee.C, Wei. X, Li. Q, Kysar. J. W, Hone. J., "Elastic and Frictional Properties of Graphene", *Journal of Physica Status Solidi (B)*, Vol. 246, No. 11-12, pp. 2562-2567, 2009.
- [19] Rafiee. M. A, Rafiee. J, Wang. Z, Song. H, Yu. Z. Z, Koratkar. N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content", *Journal of ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- [20] Bartolucci. S.F, Paras. J, Rafiee. M. A, Rafiee. J, Lee. S, Kapoor. D., "Graphene-Aluminum Nanocomposites", *Journal of Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 27, pp. 7933-7937, 2011.
- [21] Yan. S. J, Cheng. Y, Hu. H. Q, Zhou. C. J, Bo. L. D, Long. D. S., "Research of Graphene-Reinforced Aluminum Matrix Nanocomposites", *Journal of Materials Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 1-6, 2014.
- [22] Boostani. A. F, Tahamtan. S, Jiang. Z, Wei. D, Yazdani. S, Khoshroshahi. R. A., "Enhanced Tensile Properties of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Graphene Encapsulated SiC Nanoparticles", *Journal of Composites Part A*, Vol. 68, No. 2, pp. 155-163, 2015.
- [23] Li. J. L, Xiong. Y. C, Wang. X. D, Yan. S. J, Yang. C, He. W. W, Chen. J. Z, Wang. S. Q, Zhang. X. Y, Dai. S. L., "Microstructure and Tensile Properties of Bulk Nanostructured Aluminum-Graphene Composites Prepared Via Cryomilling", *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 626, pp. 400-405, 2015.
- [24] Rashad. M, Pan. F, Tang. A, Asif. M., "Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on Mechanical Properties of Pure Aluminum Using a Semi-Powder Method", *Journal of Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 24, No. 2, pp. 101-108, 2014.
- [25] Shin. S. E, Choi. H. J, Shin. J. H, Bae. D. H., "Strengthening Behavior of Few-Layered Graphene/Aluminum Composites", *Journal of Carbon*, Vol. 82, No. 63, pp. 143-151, 2015.
- [26] Li. Z, Fan. G, Tan. Z, Guo. Q, Xiong. D, Su. Y, Li. Z. Q, Zhang. D., "Uniform Dispersion of Graphene Oxide in Aluminum Powder by Direct Electrostatic Adsorption for Fabrication of Graphene/Aluminum Composites", *Journal of Nanotechnology*, Vol. 25, No. 32, pp. 325-601, 2014.
- [27] Wang. J, Li. Z, Fan. G, Pan. H, Chen. Z, Zhang. D., "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix Composites", *Journal of Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 8, pp. 594-597, 2012.
- [27] Wang. J, Li. Z, Fan. G, Pan. H, Chen. Z, Zhang. D., "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix Composites", *Journal of Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 8, pp. 594-597, 2012.
- [28] Hedayatian, M. Vahedi, Kh. Nezamabadi, A.R. and Momeni, A., "Effect of Graphene Oxide Reinforcement on the Ballistic Properties of Al₆O₆1-GO Nanocomposites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No.3, pp. 401-410, 2019.
- [29] Wenzhen. L, Shiyang. L, Qiongyuan. Z, Xue. Z., "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Journal of Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 990-993, 2010.
- [30] Aybarc. U, Yavuz. H, Dispinar. D, et al., "The Use of Stirring Methods for the Production of SiC-Reinforced Aluminum Matrix Composite and Validation Via Simulation Studies", *International Journal of Metalcasting*, Vol. 13, pp. 190-200, 2019.

- [47] Y. Mei, P. Shao, M. Sun and et al., "Deformation Treatment and Microstructure of Graphene-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A review of Graphene Post-Dispersion", *Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 27, No. 7, pp. 888, 2020.
- [48] Jiang. Y.Y, Tan. Z.Q, Xu. R, Fan. G.L, Xiong. D.B, Guo. Q, Su. Y.S, Li. Z.Q, Zhang. D, "Tailoring the Structure and Mechanical Properties of Graphene Nanosheet/Aluminum Composites by Flake Powder Metallurgy Via Shift-Speed Ball Milling", *Journal of Composites Part A*, Vol. 111, pp. 73, 2018.
- [49] Shin. S.E, Bae. D.H., "Deformation Behavior of Aluminum Alloy Matrix Composites Reinforced with Few-Layer Graphene", *Journal of Composites Part A*, Vol. 78, p. 42, 2015.
- [50] Zhao. P.Z, Yang. W.S, Zhang. Q, Tan. X, Xiu. Z.Y, Qiao. J, Yu. Z.H and Wu. G.H, "Microstructure and Tensile Properties of 5083 Al Matrix Composites Reinforced with Graphene Oxide and Graphene Nanoplates Prepared by Pressure Infiltration Method", *Journal of Composites Part A*, Vol. 109, pp. 151, 2018.
- [51] Dieter. G.E., "Mechanical Metallurgy", Third Edition, Drexel Institute of Technology. Philadelphia, Publisher: McGraw-Hill Education, pp. 111-135, 1976.
- [52] Can Şenel. M, Gürbüz. M, Koç. E., "Effect of Graphene Content on Tensile Strength and Microstructure of Aluminum Matrix Composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 6, No. 3, pp. 79-84, 2018.
- [53] Tsoukleri. G, Parthenios. J, Papagelis. K, Jalil. R, Ferrari. A.C, Geim. A.K, Novoselov. K.S, Galiotis. C., "Subjecting a Graphene Monolayer to Tension and Compression", Vol. 5, No. 21, pp. 2397-2402, 2009.