

بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری نانوکامپوزیت ریختگی Al-5Cu-1Mg تقویت شده با نانوصفحات گرافن

چکیده

ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم Al-5Cu-1Mg تقویت شده با نانوصفحه گرافن (GNPs) تولید شده توسط آسیاب گلوله ای و ریخته گری بررسی شده است. ابتدا برای بهبود ترشوندگی نانوصفحات گرافن با مذاب یک مرحله متالورژی پودر انجام شد. بروی پودر آلومینیوم با گرافن به مدت ۲ ساعت آسیابکاری مکانیکی انجام شد. سپس این پیش سازه به مذاب اضافه شد. وجود GNP های پراکنده با سطح ویژه بالا به طور قابل توجهی استحکام کامپوزیت را افزایش می دهد. مطالعات ریزساختاری آلیاژ نشان داد که افزودن GNPs اندازه دانه را کاهش می دهد، اما افزودن محتوای GNP بیشتر (۱ درصد وزنی GNPs) اندازه دانه را به طور قابل توجهی تغییر نمی دهد. بررسی های بیشتر روی آزمایش های کششی نشان داد که افزودن GNP باعث افزایش استحکام کششی نهایی (UTS) می شود. در مقادیر بالاتر GNP، وجود آگلومره گرافن در مرزهای دانه ها مسیر مطلوبی برای رشد ترک است. کامپوزیت حاوی GNP ۰.۵ wt.% استحکام کششی ۳۱۰ را نشان می دهد.

کلیدواژگان

کامپوزیت های زمینه فلزی (MMCs)؛ خواص مکانیکی، ریزساختارها؛ فرآوری پودر

Examining the mechanical characteristics and microstructure of a cast Al-5Cu-1Mg nanocomposite reinforced with graphene nanoplates

Abstract

Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy Al-5Cu-1Mg /graphene nanoplate (GNPs) composites produced by ball milling and stir casting have been investigated. First, to improve the wettability of graphene nanosheets with melt, a powder metallurgy step was performed. Mechanical grinding was done on aluminum powder with graphene for 2 hours. Then this precursor was added to the melt. The presence of dispersed GNPs with high specific surface area significantly increases the strength of the composites. The microstructural studies of the alloy revealed that GNPs addition reduces the grain size, but adding higher GNPs content (1 wt% GNPs) does not change the grain size considerably. Further investigations on tensile tests revealed that the addition of GNPs increases ultimate tensile strength (UTS). At higher GNPs contents, the presence of graphene agglomerate on grain boundaries was found to be the favored path for crack growth. The composite containing 0.5 vol.% GNPs exhibits tensile strength of 310 MPa.

Keywords: Metal matrix composites (MMCs); Mechanical properties, Microstructures; Powder processing.

۱- مقدمه

در این تحقیق، بر روی آلیاژ آلومینیوم سری 2xxx با استحکام بالا تمرکز شده است. معمولاً در قطعات ساختاری هواپیما و سایر کاربردهای با تنش زیاد که در آن به استحکام بسیار بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی نیاز است استفاده می‌شود [۳-۱]. آلیاژهای آلومینیوم با استحکام فوق العاده بالا برای دهه‌ها به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴-۶].

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) در صنایعی مانند هوانوردی، نظامی و خودرو موضوع بسیاری از مطالعات در دو دهه گذشته بوده است [۷-۱۰]. نتایج نشان داده است که در مقایسه با آلیاژهای یکپارچه، MMCها دارای مزایای بسیاری از جمله مقاومت بهتر در برابر خزش و سایش و همچنین استحکام ویژه بالاتر هستند [۱۳-۱۰]. آلیاژهای نانوکریستالی (NC) و نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMNCs) بر پایه فلزات سبک وزن مانند Al و Mg در حال حاضر به شدت مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۷-۱۴]. شکل پذیری کم MMCها عموماً به دلیل وجود درصد بالایی از فاز تقویت کننده درشت و شکننده در ماتریس است. نشان داده شده است که خواص نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان با ادغام حتی مقادیر کمی از نانوذرات تا حد زیادی بهبود بخشید. وجود نانوتقویت‌کننده‌های سرامیکی مانند نانوذرات SiC (SiC) (npدر ماتریس همچنین خواص مکانیکی دمای بالا کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد [۲۲-۱۸]. در میان تقویت‌کننده‌های مختلف، مواد تازه در حال ظهور، مواد کربنی، دارای ویژگی‌های مطلوب بسیاری مانند هدایت حرارتی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، ظرفیت میرایی بالا و خاصیت خود روان‌کنندگی خوب هستند [۲۳]. با این حال، گرافن به دلیل خواص برتر با سطح ویژه بالا، یک کاندید امیدوار کننده ظاهر شده است. در همین حال، ادبیات مربوط به ترکیب گرافن در کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) به دلیل مشکلات بیشتر در پراکندگی گرافن در ماتریس کمیاب است [۲۸-۲۴]. روش‌های مختلفی برای ترکیب نانوذرات در آلومینیوم مذاب به منظور تولید MMNC با پراکندگی مناسب نانوذرات و عدم تجمع، پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل آسیاب نانوذرات با پودرهای فلزی مانند آلومینیوم، اختلاط مکانیکی و ریخته‌گری به کمک اولتراسونیک است.

این مطالعه به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم/گرافن Al-5Cu-1Mg با استفاده از آسیاب گرافن با پودرهای آلومینیوم و روش‌های اختلاط و ریخته‌گری مکانیکی می‌پردازد. در این پژوهش برای پخش یکنواخت نانوذره در داخل زمینه از روش متالورژی پودر استفاده شده است. یعنی ابتدا نانوصفحات گرافن با پودر آلومینیم خالص آسیاب شده اند و در ادامه پودر به داخل مذاب اضافه شده و توسط همزن مکانیکی بهم زده شده تا نانوصفحات کاملاً در داخل زمینه پخش شوند. برای آلیاژ مذکور این روش از تولید نانوکامپوزیت انجام نشده است. در ادامه به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌ها پرداخته خواهد شد.

۲- روش تحقیق

مواد مورد استفاده در این تحقیق پودر آلومینیوم خالص ۹۹ درصد با اندازه متوسط ذرات ۴۵ میکرومتر و نانوصفحات گرافن با ضخامت متوسط تقریباً ۵ لایه و قطر متوسط ۳-۲۵ میکرومتر بودند. شکل ۱ میکروگراف‌های SEM پودر Al و نانوصفحات گرافن را نشان می‌دهد. برای تولید نانوبلورهای MMNC، تقویت‌کننده‌ها (نانوصفحات گرافن با ۰.۱، ۰.۳، ۰.۵، ۰.۷ و ۱ درصد وزنی درصد) در اتانول ۹۹.۵ درصد توسط فراصوت پراکنده شدند. پودر

آلومینیوم و دوغاب تقویت‌کننده به مدت ۲ ساعت با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه با استفاده از نسبت گلوله به پودر ۱ به ۱۰ در آسیاب گلوله‌ای اضافه شد. ذکر این نکته ضروری است که اندازه ذرات اولیه پودر آلومینیوم ۴۵ میکرون است. اما پس از ۲ ساعت آسیاب، اندازه ذرات پودرها با فرآیند آسیاب کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مورفولوژی پودرهای آلومینیوم پس از آسیاب به شکل پوسته پوسته تغییر می‌کند. نانوصفحات گرافن به طور یکنواخت بین پودرهای آلومینیومی پوسته‌دار توزیع می‌شوند. مورفولوژی و اندازه پودرها پس از ۲ ساعت آسیاب توسط SEM بررسی شد

شمش‌های آلیاژ آلومینیوم Al-5Cu-1Mg به قطعات کوچک بریده شده و سپس در یک بوته گرافیتی قرار داده می‌شود. بوته گرافیتی در یک کوره مقاومت الکتریکی قرار داده شد. ذوب آلیاژ آلومینیوم با حرارت دادن آن تا دمای ۷۵۰ °C درجه سانتیگراد انجام شد. سپس با همزن مکانیکی به مدت ۱۵-۱۰ دقیقه مذاب آلیاژ بهم زده شده تا دمای یکنواخت در سراسر آن ایجاد شود سپس پودر آلومینیوم گرم شده و نانوصفحات گرافن با درصد وزنی متفاوت در مذاب فلز اضافه می‌شوند. در ادامه نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصد وزنی مختلف نانوصفحات گرافن ۰.۱، ۰.۳، ۰.۵، ۰.۷ و ۱ تهیه شده‌اند.

پس از افزودن موفقیت آمیز ذرات تقویت‌کننده نانو و اختلاط یکنواخت در مذاب، مذاب کامپوزیت در قالب دائمی تهیه شده بر اساس استاندارد [29] ASTM B557M-10، شکل ۲ ریخته شد. مزیت اصلی این قالب استفاده از طراحی مناسب جهت کاهش گاز گیر افتاده در داخل نمونه می‌باشد.

برای مطالعات ساختاری، یک میکروسکوپ نوری مجهز به سیستم آنالیز تصویر (Clemex Vision Pro. Ver.3.5.025) و میکروسکوپ الکترونی روبشی در یک میکروسکوپ الکترونی روبشی Cam Scan MV2300، مجهز به تجزیه و تحلیل پرتو ایکس پراکنده انرژی (EDX) انجام شد. بخش‌هایی از نمونه بریده شده پولیش شده و سپس توسط محلول اچ کلر (۲ میلی لیتر HF، ۳ میلی لیتر هیدروکلراید، ۵ میلی لیتر HNO₃ و ۱۹۰ میلی لیتر H₂O) اچ شده تا ساختار نمایان شود. میانگین دانه بندی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM:E112 اندازه گیری شد. تست کشش در دمای محیط توسط یک ماشین کششی SANTAM 150 با نرخ کرنش s-10.003 انجام شد. ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8-04 بود و شکل ۲ اندازه و پیکربندی نمونه کششی را نشان می‌دهد. برای هر درصد ۴ نمونه آزمون کشش انجام شده و میانگین این ۴ نمونه گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات ریزساختاری

ذکر این نکته ضروری است که اندازه ذرات اولیه پودر آلومینیوم ۴۵ میکرون است. با این حال، پس از ۲ ساعت آسیاب، اندازه ذرات پودرها با فرآیند آسیاب کاهش می‌یابد، که می‌تواند انحلال بهتر و تجمع کمتری را در طی ریخته‌گری بعدی داشته باشد. علاوه بر این، مورفولوژی پودرهای آلومینیوم پس از آسیاب به شکل پوسته پوسته تغییر می‌کند. نانوصفحات گرافن به طور یکنواخت بین پودرهای آلومینیومی پوسته‌دار توزیع می‌شوند. مورفولوژی و اندازه پودرها پس از ۲ ساعت آسیاب توسط SEM بررسی شد. شکل ۱ میکروگراف‌های SEM پودرهای Al-GNP با اشکال پوسته پوسته را پس از ۲ ساعت آسیاب نشان می‌دهد.

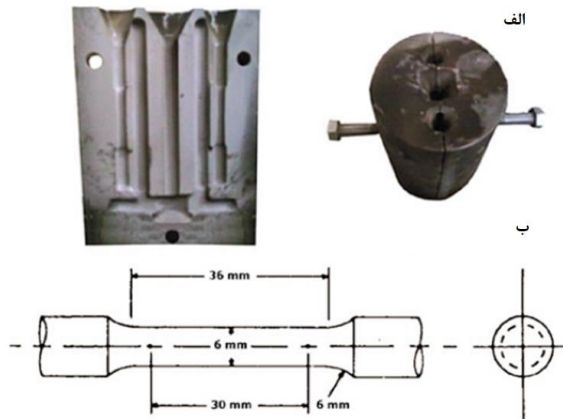


Fig. 2. (a) Cast iron mold and (b) tensile sample dimensions .

شکل ۲. الف) قالب چدن و ب) ابعاد نمونه کششی.

بدیهی است که انحلال پودرهای کوچک در مذاب نسبت به پودرهای بزرگتر آگلومره آسانتر است. علاوه بر این، تشکیل پراکندگی نانوصفحات عمدتاً توسط دو پدیده ایجاد می شود. در هنگام تزریق پودرها به مذاب، پودرهای آلومینیوم انحلال می یابند که به عنوان حامل ذرات گرافن به مذاب عمل می کنند و همچنین از آن ها در برابر هرگونه تماس با سطح مذاب و لایه آلومینا محافظت می کنند. در حالی که پس از انحلال، نانوذرات در ماتریس آزاد خواهند شد. همچنین ارتعاش امواج آلتراسونیک از زینتر شدن ذرات آگلومره شده جلوگیری می کند. پیشنهاد شده است که پودرهای آلومینیومی که در قسمت داخلی نانوذرات آگلومره شده قرار دارند در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به عنوان چسبنده عمل می کنند و از جداسازی و آزادسازی نانوذرات جلوگیری می کنند، که تنها با استفاده از ارتعاش امواج آلتراسونیک در حین هم زدن قابل پراکندگی هستند.

بر اساس شکل ۱، ذرات آگلومره شده و همچنین توزیع یکنواخت ورقه های گرافن روی پودر آلومینیوم مشاهده می شود که ناشی از تشکیل ورقه های گرافن در اطراف پودر آلومینیوم در داخل آسیاب است. اعتقاد بر این است که تشکیل صفحات گرافن راه خوبی برای کاهش تمایل نانوذرات به آگلومره است. ریزساختارهای آلیاژ Al-5Cu-1Mg برش داده شده از نمونه های ریخته گری پس از افزودن گرافن با درصد های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ تغییر مورفولوژی دندریت آلیاژ Al-5Cu-1Mg را پس از افزودن گرافن نشان می دهد. ریزساختارهای آلیاژ ریزساختار رز شکل مانند از محلول جامد دانه های آلفا اولیه را نشان می دهد که توسط فازهای ثانویه بین دندریتی احاطه شده است. در مقایسه با نمونه های اضافه شده با گرافن، نمونه های اصلاح نشده مورفولوژی درشت تری را نشان دادند، همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود. از شکل ۳، قابل توجه است که گرافن و ریخته گری به همراه همزدن تعداد مرزهای دانه را افزایش می دهد و بنابراین توزیع همگن تری از رسوبات بین فلزی را به همراه دارد. رایج ترین فاز مشاهده شده در ریزساختار ریختگی در آلیاژهای Al-5Cu-1Mg فاز θ (Al₂Cu) است، همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود. مقدار بهینه نانوصفحه های گرافن بر اساس اندازه دانه و خواص مکانیکی، ۰.۵ درصد وزنی است.

آنالیز EDX از ریزساختار آلیاژ در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ توزیع عناصر اصلی را با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می دهد. نتایج EDX نشان می دهد که مقدار مس و آلومینیوم بالاتر از سطح متوسط ترکیب

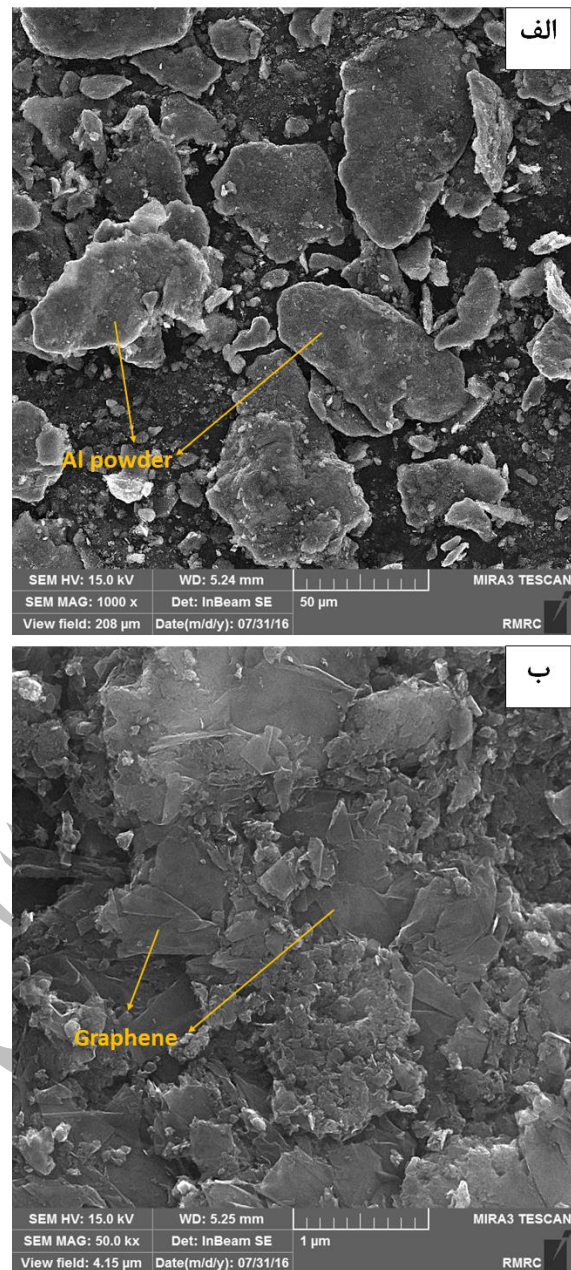


Fig. 1. SEM micrographs of (a) and (b) powder morphology of Al-25 wt% graphene nanoplatelets after 2 hours of milling.

شکل ۱. تصاویر SEM از الف) و ب) مورفولوژی پودر نانوصفحات گرافن Al-25 wt% پس از ۲ ساعت آسیاب.

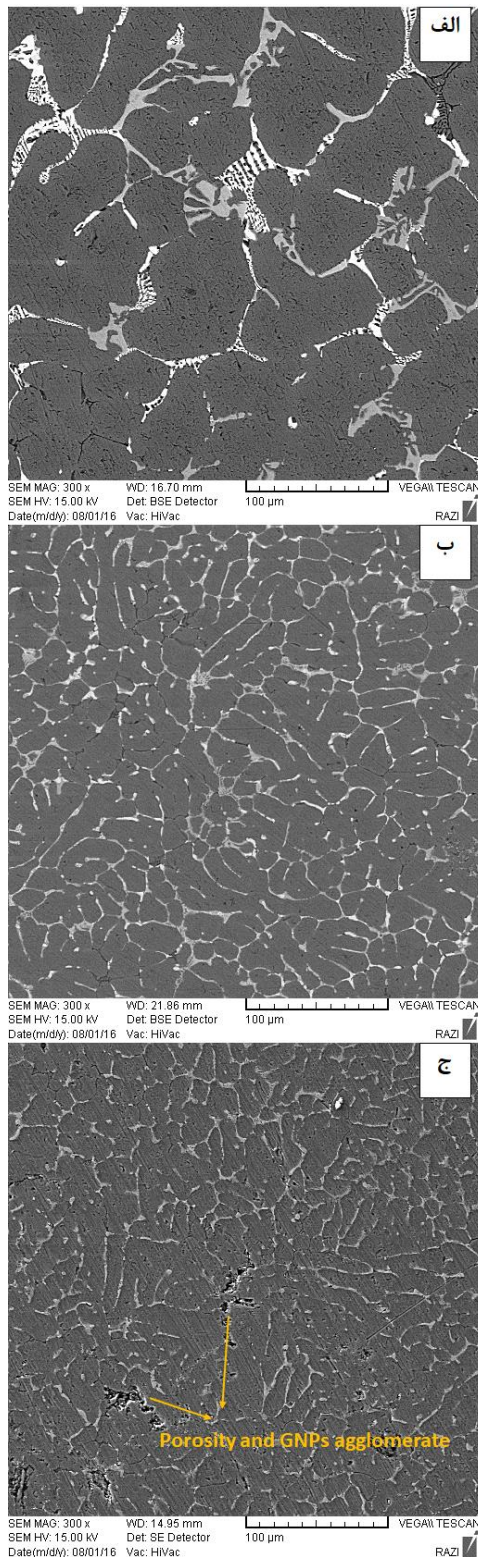


Fig. 3. Microstructures of refined specimens, with (a) 0.0% GNPs, (b) 0.5% GNPs, (c) 1% GNPs.

شکل ۳. ریزساختارهای نمونه های اصلاح شده، با (الف) ۰.۰٪ GNP، (ب) ۰.۵٪ GNP، (ج) ۱٪ GNP.

شیمیایی در آلیاژ است. علیرغم سهم بیشتر آلومینیوم، ماتریس ممکن است در سیگنال EDX به دلیل اندازه کوچک آن درگیر شود. بدیهی است که Al_2Cu عناصر Al و Cu را حل کرده است که با مقدار موجود مطابقت دارد. جداسازی عناصر آلیاژی که در طی ریخته‌گری رخ داد منجر به غلظت بالای مس در مناطق بین دندریتی شد.

شکل ۵ توزیع نانوصفحات گرافن را در زمینه آلیاژ آلومینیوم- $Al-5Cu$ در قالب ریخته‌گری و ۰.۵ درصد وزنی گرافن نشان می‌دهد، ذرات تقویت‌کننده تقریباً به طور یکنواخت در زمینه Al توزیع شده‌اند و مقدار نانوصفحات گرافن کمتر از ۱ درصد وزنی دارند. با افزایش بیشتر با افزایش مقدار نانوصفحات گرافن، تجمع نانوصفحات گرافن رخ می‌دهد (شکل ۳-ج). خوشه‌بندی نانوصفحات گرافن با ۱ درصد وزنی نانوصفحات گرافن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. تقویت این مواد به دلیل انسداد حرکت نایجایی توسط نانوصفحات گرافن است. با افزایش محتوای نانوصفحات گرافن - این نانوصفحات مرزهای دانه را سنجاق می‌کنند و باعث کاهش اندازه دانه می‌شوند، همچنین نانوصفحات ترک‌ها را منحرف می‌کنند و باعث افزایش استحکام در نانوکامپوزیت می‌شوند. هنگامی که درصد وزن نانوصفحات گرافن بیش از ۰.۵ باشد، مرزهای دانه به اشباع رسیده و اثر کاهش اندازه دانه کاهش می‌یابد. تجمع نانوصفحات گرافن بر روی مرز دانه‌ها باعث شکنندگی مرز دانه، تخلخل و در نتیجه استحکام ضعیف‌تر می‌شود. از شکل ۳ مشخص است که با ۱ درصد وزنی نانوصفحات گرافن، نانوصفحات خوشه‌هایی را تشکیل می‌دهند، شکنندگی مرز دانه‌ای که تخلخل ایجاد می‌کند، ترشوندگی نانوصفحات گرافن را در مواد زمینه کاهش می‌دهد و استحکام و سایر خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد.

می شود. بر اساس شکل ۶ و مطابق با تصویر شماتیک، رسانایی حرارتی بالای نانوصفحات گرافن در نمونه‌های اولیه منجر به ادغام بیشتر نانوصفحات گرافن در داخل دانه‌ها به جای مرزهای دانه می‌شود. تصویر FESEM با بزرگنمایی بالا از نمونه اولیه حاوی نانوصفحات گرافن موجود در زمینه در شکل ۶ نشان داده شده است.

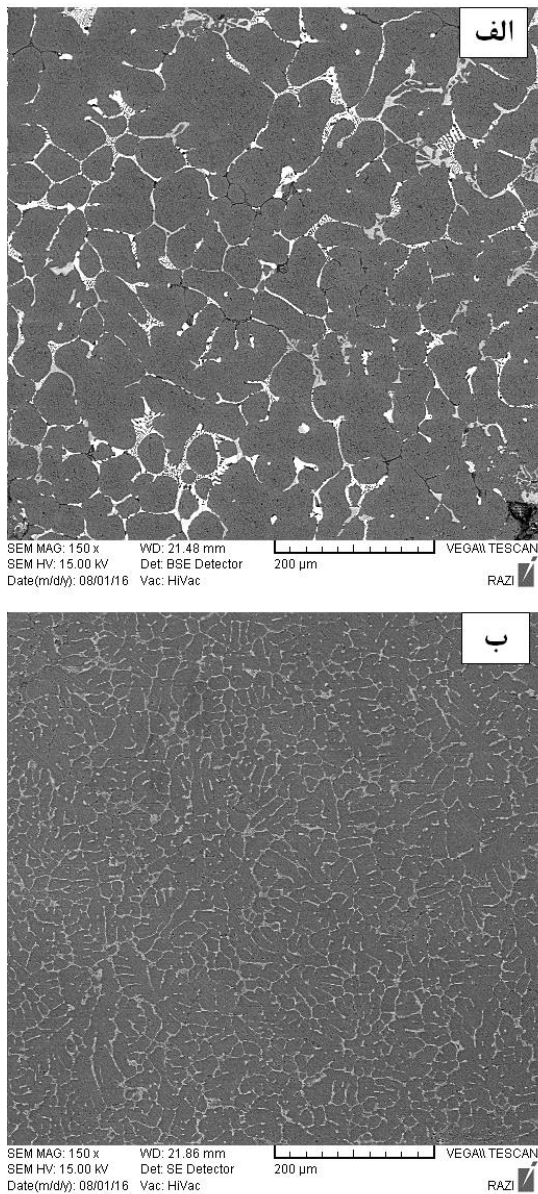


Fig. 5. SEM back-scattered images, showing the microstructures of the Al-5Cu-1Mg alloy with: (a) 0.0 and (b) 0.5 wt% GNPs.

شکل ۵. تصاویر الکترون برگشتی SEM از ریزساختار آلیاژ Al-5Cu-1Mg اصلاح شده با: (الف) ۰.۰ و (ب) ۰.۵ درصد وزنی GNP.

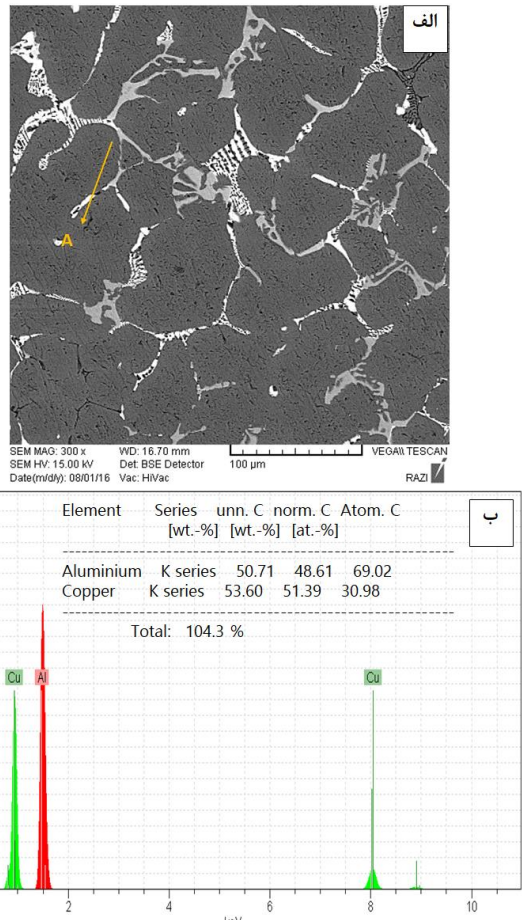


Fig. 4. Microstructures and EDX analysis of Al₂Cu (θ phase) in unrefined specimens.

شکل ۴. ریزساختارها و آنالیز EDX فاز Al₂Cu (θ) در نمونه های اصلاح نشده.

۳-۲- مکانیسم های انجماد

سه دسته از مدل‌ها در رابطه با ادغام ذرات در یک زمینه انجماد توسعه داده شده‌اند، (i) مدل‌های جنبشی پیش‌بینی سرعت فصل مشترک جامد/مایع، (ii) مدل‌های ترمودینامیکی [۳۰] مربوط به نظریه هسته زایی ناهمگن کلاسیک، (iii) مدل‌هایی بر اساس نسبت خواص ترموفیزیکی ذرات و مذاب [۳۱، ۳۲]. عامل دوم توانایی ادغام را به طور کلی پیش‌بینی می‌کند. این دو مدل نشان می‌دهند که رسانایی حرارتی ذرات وارد شده در زمینه مایع مستقیماً با امکان غرق شدن ذرات از طریق دانه‌های زمینه انجماد به دلیل تغییر شکل فصل مشترک از محدب به مقعر مرتبط است [۳۰، ۳۱، ۳۳، ۳۴]. در واقع، گرادیان دما جلوتر از جبهه انجماد تحت تأثیر هدایت حرارتی ذرات قرار می‌گیرد. بنابراین، کاهش رسانایی حرارتی ذرات به عنوان مانعی در برابر حذف گرمای لازم برای انجماد بیشتر عمل می‌کند و در نتیجه از غرق شدن ذرات جلوگیری می‌کند.

در مطالعه حاضر، انتظار می‌رود که رسانایی حرارتی نانوصفحات گرافنی بسیار زیاد باشد که به رسانایی حرارتی بالای نانوصفحات گرافنی مربوط می‌شود [۳۵-۳۷]. این را می‌توان با رسانایی حرارتی نانوصفحات گرافنی توضیح داد که در GNPs های دولایه و سه لایه نسبت به نمونه های تک لایه بهتر حفظ

فلزی) و انحراف ترک در زمینه نانوکامپوزیت در آلیاژ Al-5Cu-1Mg می‌شود. به خوبی شناخته شده است که بر اساس تئوری هال پیچ، هر چه دانه‌ها ریزتر باشند، استحکام بالاتری دارند. در کل دو مکانیزم اصلی برای افزایش استحکام نانوکامپوزیت می‌توان گفت. مکانیزم اول: دانه ریز شدن ساختار بدلیل وجود نانوذرات گرافن که با استناد به رابطه هال-پیچ با کاهش اندازه دانه استحکام بیشتر می‌شود. دلیل این امر را هم می‌توان به افزایش مراکز جوانه زنی با افزودن نانوصفحات گرافن اشاره کرد. مکانیزم دوم: انحراف ترک و افزایش طول ترک توسط گرافن. همانطور که در شکل ۸-ج و ۹ نشان داده شده است، وقتی ترک به نانوصفحات گرافن می‌رسد نمی‌تواند از گرافن عبور کند و مجبور به دور زدن گرافن می‌شود که این امر باعث افزایش طول ترک و افزایش استحکام نانوکامپوزیت خواهد شد. آقای تابنده خورشید و همکاران [۳۸]، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با دو اندازه ذرات آلومینا (۳۵ نانومتر و ۰.۳ میکرومتر) با آسیاب سایشی مرطوب و فرآیندهای اکستروژن گرم تهیه کردند. مشخص شده است که با افزایش مقدار نانو ذرات، سختی و استحکام کامپوزیت‌ها ابتدا افزایش می‌یابد و زمانی که مقدار نانوذرات از ۴.۰ درصد وزنی فراتر می‌رود، کاهش می‌یابد. مظاهری و همکاران [۳۹] روی توسعه کامپوزیت‌های A356/nano-Al₂O₃ با کارایی بالا کار کردند. مشخص شد که وجود آرماتور نانو-Al₂O₃ منجر به بهبود قابل توجهی در سختی، استحکام تسلیم، UTS و شکل‌پذیری شد. اس. مولا و همکاران [۴۰] بررسی ساختار یک نانو کامپوزیت ریخته‌گری شده با کمک امواج آلتراسونیک با ۲ درصد وزنی نانوذرات Al₂O₃ (اندازه متوسط ۱۰ نانومتر)، نشان داد که نانوکامپوزیت متشکل از مناطق پراکنده نانو آلومینا (NDZs) تقریباً پیوسته است. مجاورت مرزهای دانه که مناطق تخلیه شده (ADZs) Al₂O₃ را در بر می‌گیرد. ذرات پخش شده در اندازه نانو باعث افزایش جزئی در مدول الاستیک و افزایش قابل توجهی در سختی (۹۲٪) و استحکام کششی (۴۸٪) شدند. کی دو وو و همکاران [۴۱] از پوشش بر روی ذرات آلومینا در زمینه آلومینیوم کامپوزیت تقویت شده استفاده کرد و متوجه شد که مقاومت خمشی نمونه تف جوشی شده افزایش می‌یابد. در شکل ۹ آنالیز فاز زمینه و نانوصفحات گرافن نشان داده شده است.

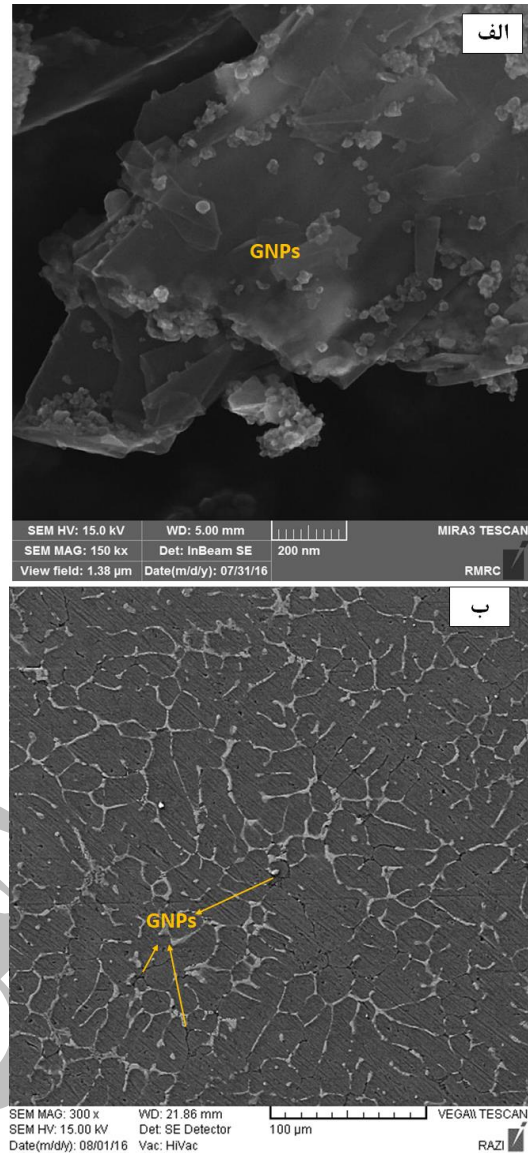


Fig. 6. SEM images of (a) Exfoliated GNPs, (b) Al-5Cu-1Mg-0.5%GNP nanocomposite.

شکل ۶ تصاویر SEM (الف) نانوصفحات گرافن، (ب) نانوکامپوزیت Al-5Cu-1Mg-0.5%GNP

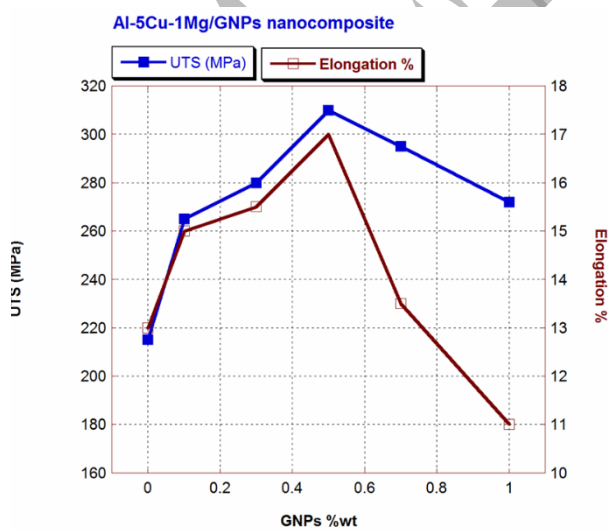


Fig. 7. UTS and elongation values of the nanocomposite as a function of GNPs amount.

شکل ۷. مقادیر UTS و ازدیاد طول نانوکامپوزیت به عنوان تابعی از مقدار GNP.

۳-۳- آزمایش کشش و شکست نگاری

شکل ۷ تغییر در استحکام کششی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. استحکام کششی با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده‌های نانوصفحات گرافن افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، میانگین مقاومت کششی نهایی (UTS) نمونه‌ها از 217 ± 16 تا 310 ± 14 مگاپاسکال به حدود 310 ± 14 مگاپاسکال پس از افزودن GNP افزایش می‌یابد. خواص مکانیکی (کششی و ازدیاد طول) آلیاژ Al-5Cu-1Mg عمدتاً به شکل، اندازه و توزیع اندازه دانه‌های α -Al، ساختار یونکتیک و توزیع بین‌فلزات در بین دندریتی یا دانه‌ها بستگی دارد. شکل‌های ۸ و ۹ سطوح شکست نمونه‌های اصلاح شده با ۰.۵ درصد وزنی نانوصفحات گرافن را در بزرگنمایی‌های بالاتر در شرایط مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۹ نانوصفحات گرافن در سطوح شکست نشان داده شده‌اند. دلیل اصلی این بهبود احتمالاً به دلیل کاهش اندازه دانه‌های نمونه‌ها بعد از ریخته‌گری است که منجر به توزیع ظریف‌تر فازهای دوم (فازهای بین

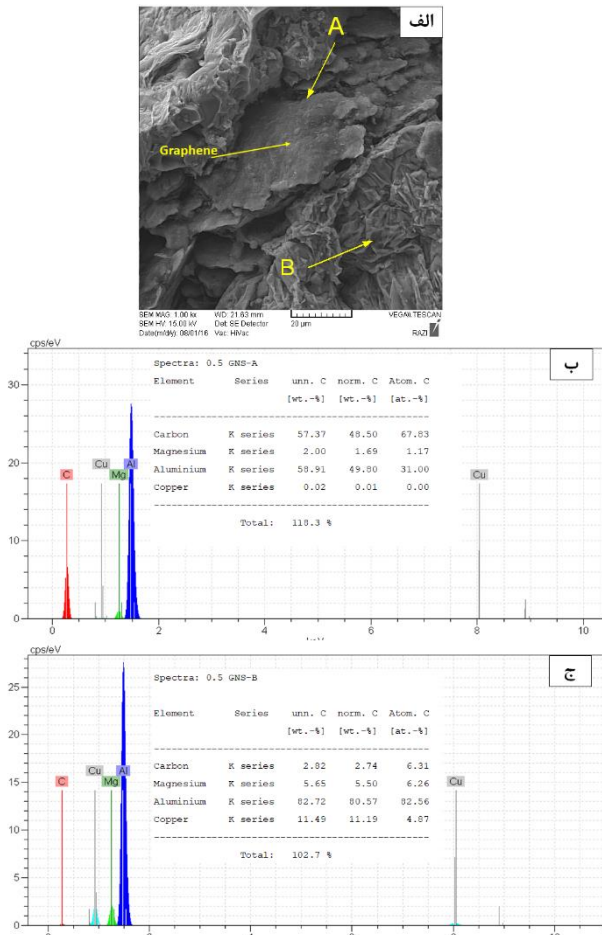


Fig. 9. (a) SEM micrograph of the fractured Al-5Cu-1Mg-0.5%GNP specimen and EDX of (b) GNPs and (c) Al-5Cu-1Mg in fracture surface.

شکل ۹. الف) تصاویر SEM سطح شکست Al-5Cu-1Mg-0.5% GNP و آنالیز EDX از (ب) نانصفحات گرافن، (ج) سطح شکست آلیاژ Al-5Cu-1Mg

۴- نتیجه گیری

نتایج زیر از این مطالعه قابل استخراج است:

- ۱- خواص مکانیکی آلیاژهای Al-5Cu-1Mg عمدتاً به شکل، اندازه رسوبات و اندازه دانه ی α -Al و توزیع فازهای ثانویه بستگی دارد.
- ۲- افزودن نانوصفحات گرافن مؤثر در کاهش اندازه دانه، تغییر مورفولوژی دندریتی و ایجاد ریزساختار ریز و یکنواخت است.
- ۳- افزایش خواص کششی با افزودن نانوصفحات گرافن به دلیل ریزش دانه های α -Al اولیه و تشکیل دانه های α -Al با توزیع یکنواخت تر و توزیع باریک تر فازهای ثانویه است.
- ۴- درصد بهینه نانوصفحات گرافن در این پژوهش ۵، درصد وزنی انتخاب شد که در این درصد وزنی، بیشترین خواص کششی بدست آمد.
- ۵- استحکام کششی نهایی آلیاژهای ریخته گری شده با افزودن نانوصفحات گرافن به طرز قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. این عمدتاً به دلیل ریزش و پخش یکنواخت فاز یوتکتیک و دندریت

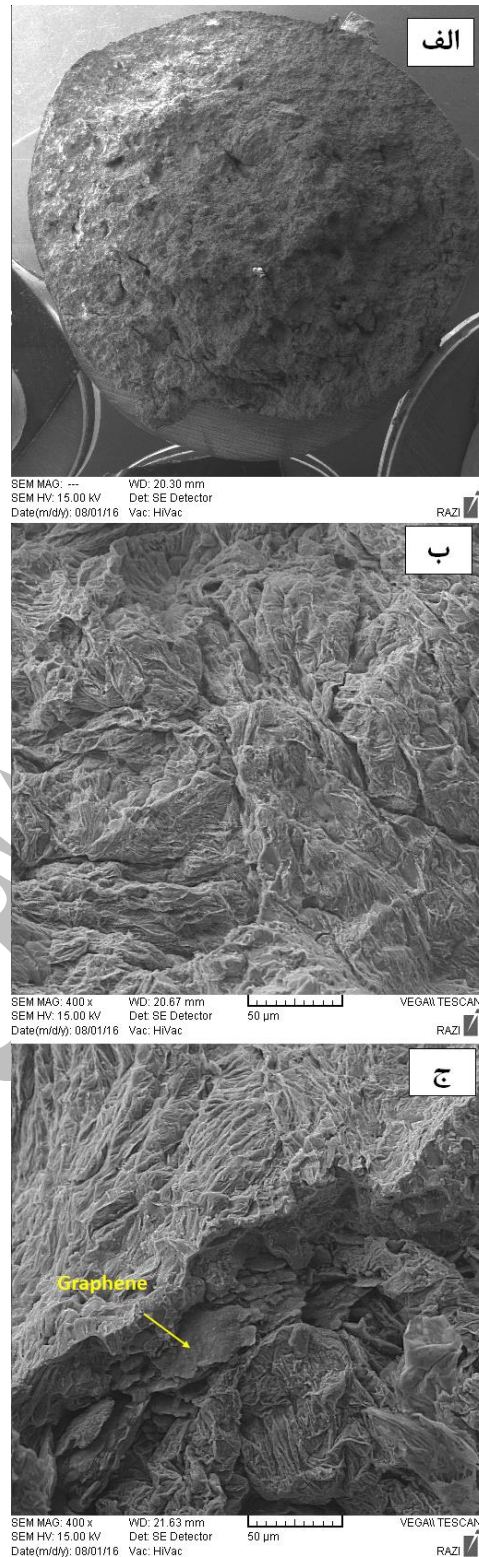


Fig. 8. (a) SEM micrograph of the fractured Al-5Cu-1Mg-0.5%GNP specimen.

شکل ۸. الف) تصاویر SEM از سطح شکست Al-5Cu-1Mg-0.5% GNP

particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion, " *Mater Des*, vol. 31, pp. 3880-4, (2010)..

[15] R. Derakhshandeh Haghghi, S. A. Jenabali Jahromi, A. Moresedgh, "Tabandeh Khorshid M. A Comparison Between ECAP and Conventional Extrusion for Consolidation of Aluminum Metal Matrix Composite, " *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 21, pp. 1885-92, (2012).

[16] J. Schiotz, F. D. Di Tolla, K. W. Jacobsen. "Softening of nanocrystalline metals at very small grain sizes," *Nature*, vol. 391, pp. 561-3, (1998).

[17] T. Varo, A. Canakci, "Synthesis and characterization of nanocrystalline Al 2024-B4C composite powders with mechanical alloying, " *Philosophical Magazine Letters*, vol. 93, pp. 339-45, (2013).

[18] K.U. Kainer, "Basics of Metal Matrix Composites," *Wiley-Vch Verlag GmbH*, (2006).

[19] I.A. Ibrahim, F.A. Mohamed, E.J. Lavernia, "Particulate reinforced metal matrix composites—a review," *J. Mater. Sci*, vol. 26, pp. 1137–1156, (1991).

[20] J.C. Lee, J.P. Ahn, "Control of the interface in SiC/Al composites," *Scr. Mater*, vol. 41, pp. 895–900, (1999).

[21] Y. Yang, J. Lan, X. Li, "Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 380, pp. 378–383, (2004).

[22] X. Li, Y. Yang, "Theoretical and experimental study on ultrasonic dispersion of nanoparticles for strengthening cast Aluminum Alloy A356 " *Metall. Sci. Technol*, vol. 26, pp. 12–20, (2008).

[23] A. Dorri-Moghadam, B. F. Schultz, J. Ferguson, E. Omrani, P.K. Rohatgi, N. Gupta, "Functional Metal Matrix Composites: Self-lubricating, Self-healing, and Nanocomposites-An Outlook," *JOM*, vol. 66, pp. 872-81, (2014).

[24] J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, D. Zhang, "Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites," *Scripta Mater*, vol. 66, pp. 594–597, (2012).

[25] S.F. Bartolucci, J. Paras, M.A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar, "Graphene/aluminum nanocomposites," *Mater Sci Eng A*, vol. 528 (27), pp. 7933–7937, (2011).

[26] F.H. Latief, E.M. Sherif, "Effects of sintering temperature and graphite addition on the mechanical properties of aluminum," *J Ind Eng Chem*, vol. 18 (6), pp. 2129–2134, (2012).

[27] F.H. Latief, E.M. Sherifa, A.A. Almajid, H. Junaedi, "Fabrication of exfoliated graphite nanoplatelets-reinforced aluminum composites and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior," *J Anal Appl Pyrol*, vol. 92, pp. 485–492, (2011).

[28] MD Stoller, SJ Park, YW Zhu, JH An, RS Ruoff, "Graphene-based ultracapacitors," *Nano Lett*, vol. 8 (10), pp. 3498–3502, (2008).

[29] ASTM B108-03a. "Standard specification for aluminum-alloy permanent mold castings," *Annual book of ASTM standards 02.02*; (2003).

[30] SN Omenyi, AW Neumann, "Thermodynamic aspects of particle engulfment by solidifying melts," *Journal of Applied Physics*, vol. 47(9), pp. 3956-62, (1976).

[31] MK Surappa, PK Rohatgi, "Heat diffusivity criterion for the entrapment of particles by a moving solid-liquid interface," *J Mater Sci*, vol. 16(2), pp. 562-4, (1981).

[32] GF Bolling, J Cisse, "A theory for the interaction of particles with a solidifying front," *Journal of Crystal Growth*, vol. 10(1), pp. 56-66, (1971).

[33] EM Agaliotis, MR Rosenberger, AE Ares, CE Schvezov, "Influence of the Shape of the Particles in the Solidification of Composite Materials," *Procedia Materials Science*, vol. 1(0), pp. 58-63, (2012).

a-Al و مقاوم سازی از طریق نانوصفحات گرافن با استفاده از مکانیسم اوراوان و انحراف ترک می باشد.

۶- با این حال، زمانی که میزان نانوصفحات گرافن به بیش از ۵۰ درصد وزنی برسد. تجمع نانوصفحات گرافن در مرزهای دانه باعث شکنندگی، تخلخل، پیوند سطحی کمتر و بنابراین کاهش خواص مکانیکی می شود.

۵- مراجع

[1] M. Alipour, M. Emamy, "Effects of Al-5Ti-1B on the structure and hardness of a super high strength aluminum alloy produced by strain-induced melt activation process," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 4485-4492, (2011).

[2] M. Alipour, B. G. Aghdam, H. E. Rahnama, M. Emamy, "Investigation of the effect of Al-5Ti-1B grain refiner on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy formed by strain-induced melt activation," *Materials & Design*, vol. 46, pp. 766-775, (2013).

[3] M. Alipour, M. Azarbarmas, F. Heydari, M. Alidoost, M. Emamy, "The effect of Al-8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy," *Materials & Design*, vol. 38, pp. 64-73, (2012).

[4] A. Haghparast, M. Nourimotlagh, M. Alipour, "Effect of the strain-induced melt activation (SIMA) process on the tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy modified by Al5Ti1B grain refiner," *Materials Characterization*, vol. 71, pp. 6-18, (2012).

[5] S. S. Mirjavadi, M. Alipour, A.M.S. Hamouda, M. K. Besharati Givi, M. Emamy, "Investigation of the effect of Al-8B master alloy and strain-induced melt activation process on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 308-316, (2014).

[6] M. Alipour, M. Emamy, S.H. Seyed Ebrahimi, M. Azarbarmas, M. Karamouz, J. Rassizadehghani " Effects of pre-deformation and heat treatment conditions in the SIMA process on properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy modified by Al-8B grain refiner " *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, pp. 4482-4490, (2011).

[7] C.A. Smith, A.B. Pandey, "Metals Handbook: Composite Materials", *ASM, Ohio*, vol. 21 (2001).

[8] S. Rawal, "Metal-matrix composites for space applications," *JOM*, vol. 53, pp. 14–17, (2001).

[9] S. Suresh, A. Mortensen, A. Needleman, "Fundamentals of Metal Matrix Composites, " *Butterworth-Heinemann, Oxford*, (1993).

[10] N. Chawla, K.K. Chawla, "Metal Matrix Composites," *Springer Science, Berlin*, (2006).

[11] 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).

[12] C. Borgonovo, D. Apelian, "Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A Critical Review", *Materials Science Forum*, Vol. 678, pp. 1-22, (2011).

[13] L.M. Tham, M. Gupta, L. Cheng, "Effect of limited matrix-reinforcement interfacial reaction on enhancing the mechanical properties of aluminium-silicon carbide composites " *Acta Mater*, vol. 49, pp. 3243–3253, (2001).

[14] M. Tabandeh Khorshid, S. A. Jenabali Jahromi, M. M. Moshksar, "Mechanical properties of tri-modal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al₂O₃

- [34] MA Khan, PK Rohatgi, "A numerical study of thermal interaction of solidification fronts with spherical particles during solidification of metal-matrix composite materials," *Composites Engineering*, vol. 3(10), pp. 995-1006, (1993).
- [35] MK Surappa, PK Rohatgi, "Preparation and properties of cast aluminium-ceramic particle composites," *J Mater Sci*. 1981;16(4):983-93, (1993).
- [36] C Faugeras, B Faugeras, M Orlita, M Potemski, RR Nair, AK Geim, "Thermal Conductivity of Graphene in Corbino Membrane Geometry," *ACS Nano*, vol. 4(4), pp. 1889-92, (2010).
- [37] RP Joshi, PG Neudeck, C Fazi, "Analysis of the temperature dependent thermal conductivity of silicon carbide for high temperature applications," *Journal of Applied Physics*, vol.88(1), pp. 265-9, (2000).
- [38] S Tabandeh Khorshid, A. Jenabali Jahromi, M.M. Moshksar, "Mechanical properties of tri-Modal Al matrix composites reinforced by nano and submicron-sized Al₂O₃ particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion," *Shiraz, Iran*, pp. 1-16, (2010).
- [39] A. Mazahery, H. Adbizadeha, H.R. Baharvandi, "Development of high-performance A356/ nano- Al₂O₃ composites," *Materials Science and Engineering A*, vol. 518, pp. 61-64, (2009).
- [40] S. Mula, P. Padhi, S.C. Panigrahi, S.K. Pabi, S. Ghosh, "On structure and mechanical properties of ultrasonically cast Al-2% Al₂O₃ Nanocomposites," *Materials Research Bulletin*, vol. 44, pp. 1154-1160, (2009).
- [41] K. Do Woo, H. Bom Lee, "Fabrication of Al alloy matrix composite reinforced with submicron-sized Al₂O₃ particles by the in situ displacement reaction using high-energy ball-milled powder," *Materials Science and Engineering A*, vol. 449-451, pp. 829-832, (2007).