

Research Paper

Investigation of the structure and mechanical properties of aluminum 6061-graphene nanocomposite fabricated by the friction stir processing

Gholamreza Ghafari¹, Mina Safa¹, Farzad Soleymani², Gholamreza Khalaj^{*}

1-Department of Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran

2 -Department of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2023/02/08

Revised: 2023/03/10

Accepted: 2023/03/10

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2023.31565.1986](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.31565.1986)

Keywords:

Aluminium, nanocomposite, friction stir process, graphene, mechanical properties

Abstract

Introduction: In this research, the structure and mechanical properties of aluminum 6061 composite with graphene reinforcing nanoparticles produced by friction stir method (FSP) were investigated. The rotation speed of the tool was set from 112 to 280 rpm, the speed of the tool movement in the range of 31.5 to 20 mm/min and the slope of the conical tool was set at 2, 2.5 and 3 degrees.

Methods: Characterization was done by tensile tests, microhardness, field emission scanning electron microscope (FESEM) along with X-ray energy spectroscopy (EDS) and optical microscope (OM). The results show that in the presence of graphene as a reinforcement, the mechanical properties are improved.

Findings: By increasing the ratio of rotation speed to tool movement speed (advance per revolution) from 0.07 to 0.28 and increasing the tool angle from 2 to 3 degrees, tensile strength enhanced from 338 to 396 MPa, yield strength from 319 to 383 MPa and the elongation increase has increased from 10.9 to 12.3 percent. Also, the micro-hardness in the nugget area increased from 273 to 400 Vickers.

Citation: Gholamreza Ghafari, Mina Safa, Farzad Soleymani, Gholamreza Khalaj, Investigation of the structure and mechanical properties of aluminum 6061-graphene nanocomposite fabricated by the friction stir processing, Quarterly Journal of New Materials. 2022; 13 (48): 73-90.

***Corresponding authors:** Gholamreza Khalaj

Address: Department of Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran

Tell: +989126176472

Email: gh.khalaj@srbiau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

6000 series aluminum alloy is known for its good formability, corrosion resistance, weldability and high strength-to-weight ratio. The most important alloy elements of this series are silicon and magnesium, which are used in precipitation strengthening through solubility and artificial aging [1]. Although aluminum alloys have excellent properties, they also have weaknesses, such as low yield strength and modulus of elasticity and low creep resistance, which has reduced the limitation of its use in the industry [2]. Among the processes that are used to improve the structure of aluminum, we can mention composite making by graphene nanoparticles, which can obtain very suitable properties [3]. The methods of making aluminum composite are complex and expensive, and in some cases it does not give suitable properties; On the other hand, the friction stir process (FSP) method has produced attractive results in joining metals, and among other solid state processes, it has low cost and suitable product properties[4,5,6].

Materials and Methods

In this research, an attempt is made to use the FSP method to manufacture aluminum composites with graphene reinforcement and to investigate the effect of process variables on the microstructure and mechanical properties of the manufactured composites. According to the issues raised above; In this study, the influence of the shape of the probe tip angle (2, 2.5 and 3 degrees), tool rotation speed (112, 180 and 280 rpm) and tool movement speed (20, 25 and 31.5 mm/min) for making aluminum nanocomposite with grade 6061-T6 and graphene was investigated on the structure, strength and hardness of the nanocomposite.

Results and Discussion

As the angle of the probe tip increases, the dispersion and distribution of graphene nanoparticles increases. Mechanical properties are affected by the nature of dispersion. To achieve higher properties, homogeneous dispersion is essential. In this research, the FSP process has led to a favorable dispersion. The concentration gradient resulted in improper dispersion, since the aluminum substrate does not melt during FSP, the concentration gradient does not cause free movement of the nanoparticles, and this resulted in proper dispersion. The distribution of nanoparticles depends on the FSP process parameters such as rotation speed and movement speed. A good and uniform distribution in the FESEM micrograph proves that the appropriate process parameters have been chosen.

The reason for the increase in mechanical properties is the uniform distribution of reinforcing particles in the matrix. This factor has a direct effect on the increase in length, and the smaller the size of the particles, the finer the structure and according to the Hall-Patch relationship, the strength will increase. In order to prevent the accumulation or agglomeration of particles, it is necessary to choose the right diameter for the pin because the pin is responsible for producing friction and cutting force[7].

Conclusion

After the FSP operation, the size of the grains has decreased and the effect of the presence of the graphene reinforcement phase in the aluminum alloy is evident, which has led to the improvement of the mechanical properties of the composite. Increasing the probe angle has led to a decrease in the size of the microstructure, also the tensile strength has increased from 338 to 396 MPa,

the yield strength from 319 to 383 MPa. And the percentage of length increase has increased from 10.9 to 12.3 percent. Also, the microhardness in the nugget area increased from 273 to 400 Vickers.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Conducting experiments: Farzad Soleymani, Gholamreza Ghafari;

Methodology and data analysis: Gholamreza Ghafari, Mina Safa, Gholamreza Khalaj;

Initial writing: Gholamreza Ghafari;

Final writing: Gholamreza Khalaj.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی ساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت آلومینیم ۶۰۶۱- گرافن ساخته شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

غلامرضا غفاری^۱، مینا صفا^۲، فرزاد سلیمانی^{۲*}، غلامرضا خلیج^{۱*}
 ۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران
 ۲. گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: در این پژوهش، ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم ۶۰۶۱ با نانو ذرات تقویت کننده گرافن تولید شده با روش اصطکاکی اغتشاشی (FSP) بررسی شد. سرعت چرخش ابزار از ۱۱۲ الی ۲۸۰ دور بر دقیقه، سرعت حرکت ابزار در بازه ۳۱/۵ الی ۲۰ میلی متر بر دقیقه و شیب ابزار مخروطی در ۲، ۲/۵ و ۳ درجه تنظیم گردید.

روش: مشخصه یابی با آزمایش های کشش، میکروسختی، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) همراه با طیف سنجی انرژی اشعه ایکس (EDS) و میکروسکوپ نوری (OM) صورت گرفت.

یافته ها: با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت حرکت ابزار (پیشروی بر دور) از ۰/۰۷ تا ۰/۲۸ و افزایش زاویه ابزار از ۲ تا ۳ درجه، استحکام کششی از ۳۳۸ تا ۳۹۶ مگاپاسکال، استحکام تسلیم از ۳۱۹ تا ۳۸۳ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول ۱۰/۹ تا ۱۲/۳ درصد افزایش داشته است. همچنین میکروسختی در ناحیه فرآیند شده از ۲۷۳ تا ۴۰۰ ویکرز افزایش یافت.

نتیجه گیری: در نهایت نمونه با زاویه نوک ابزار ۳ درجه، سرعت چرخش ابزار ۱۱۲ دور بر دقیقه و سرعت حرکت ابزار ۳۱/۵ میلیمتر بر دقیقه به عنوان حالت بهینه خواص استحکام و انعطاف پذیری انتخاب شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2023.31565.1986](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.31565.1986)

واژه های کلیدی:

آلومینیم، نانو کامپوزیت، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، گرافن، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول: غلامرضا خلیج

نشانی: گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۶۱۷۶۴۷۲

پست الکترونیکی: gh.khalaj@srbiau.ac.ir

مقدمه

آلیاژ آلومینیم سری ۶۰۰۰ به شکل پذیری خوب، مقاومت به خوردگی، جوش پذیری و نسبت استحکام به وزن بالا معروف است. مهمترین عناصر آلیاژی این سری، سیلیسیم و منیزیم است که در استحکام بخشی رسوبی از طریق حلالیت و پیرسازی مصنوعی به کار می‌روند [۱]. آلیاژهای آلومینیم با وجود خواص بسیار عالی دارای ضعف‌هایی نیز می‌باشد که می‌توان به استحکام تسلیم و مدول الاستیسیته پائین و مقاومت به خزش کم آن اشاره کرد که باعث کاهش محدودیت کاربرد آن در صنعت شده است [۲]. از جمله فرآیندهایی که برای بهبود ساختار آلومینیم استفاده می‌شود می‌توان به کامپوزیت سازی اشاره کرد که می‌تواند خواص بسیار مناسبی را ایجاد کند. روش‌های ساخت کامپوزیت آلومینیم، پیچیده و گران قیمت است و در برخی موارد خواص مناسبی نمی‌دهد؛ در مقابل روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در اتصال فلزات نتایج جذابی ایجاد نموده است و در بین فرآیندهای دیگر حالت جامد، هزینه کم و خواص مناسب محصولات را دارا می‌باشد [۳].

فرآیند اتصال اصطکاکی اغتشاشی (FSP/FSW) یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید است که شامل کرنش بالا با عدم ذوب بخش عمده‌ای از مواد است؛ در این فرآیند، یک ابزار گردنده‌ی مصرف نشدنی با شانه و یک پین با طراحی ویژه وارد می‌شود و در طول خط اتصال حرکت می‌کند. گرم کردن توسط اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک ماده انجام می‌شود. گرمایش متمرکز، ماده‌ی اطراف پین را نرم می‌کند و ترکیب گردش ابزار و حرکت آن باعث حرکت ماده از جلوی پین به عقب آن می‌شود. در نتیجه‌ی این فرآیند، اتصالی در حالت جامد پدید می‌آید. در فرآیند اغتشاشی اصطکاکی استحکام با ریز شدن دانه بیشتر افزایش می‌یابد بنابراین می‌توان آن را برای اصلاح ریزساختار قطعات ساخته شده به روش‌های مختلف مانند متالورژی پودر و ریخته گری استفاده نمود.

گرافن ماده‌ای تخت و تک لایه متشکل از اتم‌های کربن است که این اتم‌ها در یک شبکه دوجبری و کندو مانند به هم متصل شده‌اند. خواص آن نظیر سختی و استحکام مکانیکی بسیار بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا مورد توجه خاص محققان قرار گرفته است. اثرات کلیدی و مهم نانو صفحات گرافن در کامپوزیت زمینه فلزی بدین شرح است: اصلاح دانه‌ها، تشدید نابجایی و انتقال تنش، در ابتدا؛ نانو صفحات گرافن مانع مهاجرت مرزدانه می‌شود، رشد دانه در نانو کامپوزیت آلومینیم-گرافن به تاخیر می‌افتد که این امر منجر به کاهش اندازه دانه نسبت به آلومینیم خالص می‌شود. طبق رابطه هال-پیچ^۲ استحکام مواد با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد. دوم؛ جلوگیری از لغزش نابجایی در شبکه‌های نانو صفحات گرافن به طور قابل توجهی به تقویت نانو کامپوزیت آلومینیم - گرافن کمک می‌کند. سوم؛ مکانیزم انتقال تنش

است که سوم بطور موثر به تقویت چشمگیر نانو کامپوزیت آلومینیم - گرافن کمک می‌کند [۴].

نانو کامپوزیت آلومینیم-گرافن توسط آسیاب گلوله‌ای^۵، پرس ایزواستاتیک گرم^۶ و عملیات اکستروژن^۵ ساخته شده است. برای تولید نانو کامپوزیت آلومینیم-گرافن ابتدا پودرهای آلومینیم و گرافن در یک مخلوط کن، آمیخته شدند، سپس مخلوط پودرها در یک آسیاب پرانرژی، آسیاب شده؛ به روش پرس ایزواستاتیک گرم، پرس و اکستروژن شدند [۵ و ۶]. صفحات نانو گرافن بعنوان تقویت کننده در زمینه آلومینیم با روش آلیاژ سازی مکانیکی استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از افزایش استحکام تسلیم نهایی بعد از تشکیل کامپوزیت است [۷ و ۸]. افزایش چشمگیر خواص در نانو کامپوزیت آلیاژ آلومینیم با ۰/۳ درصد وزنی گرافن به روش متالورژی پودر نشان داده شده است [۹ و ۱۰]. در مقایسه با آلومینیم خالص حدود ۶۲ درصد افزایش استحکام و حدود ۲ برابر کاهش درصد ازدیاد طول ایجاد شد. یان^۶ و همکاران اقدام به ساخت نانو کامپوزیت آلومینیم - گرافن به روش متالورژی پودر کردند. میزان درصد وزنی نانو گرافن صفر تا ۵ درصد وزنی انتخاب شد. بعد از انجام آزمایش کشش بر روی نانو کامپوزیت حاصل، پی بردند که میزان استحکام کششی و تسلیم به ترتیب ۴۵۴ مگاپاسکال و ۳۲۲ مگاپاسکال شده است که نسبت به آلیاژ آلومینیم اولیه به ترتیب ۲۵ و ۵۸ درصد افزایش یافته و مقدار کمی نیز شکل پذیری بیشتر شده است [۱۱]. در سالهای اخیر، پژوهشگران زیادی اثر افزودن ذرات تقویت کننده حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی و سایشی آلیاژهای آلومینیوم را بررسی نموده اند. ژون^۷ و همکاران ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۵۰۵۲ با تقویت کننده گرافن به روش اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بدون تقویت کننده سبب افزایش انعطاف پذیری و کاهش استحکام کششی آلیاژ پایه می‌شود که علت آن تغییر فرم برشی شدید حین تبلور مجدد دینامیکی است. در حالی که تقویت کننده گرافن به زمینه آلومینیوم انعطاف پذیری افزایش یافت اما کاهش جزیی در استحکام کششی نسبت به نمونه فرآوری شده بدون تقویت کننده دیده شد [۲]. مائوریا^۸ و همکاران، اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با تقویت کننده های کربنی (گرافیت، نانولوله های کربنی و گرافن) بر خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را بررسی نمودند. فاز تقویت کننده به صورت خمیر همگنی از روغن سیلیکون و ذرات کربن به شیار اضافه شد. پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، قطعات بلافاصله در آب یخ آبدهی شدند. بر اساس نتایج، بیشترین سختی و کمترین ضریب سایش مربوط به نمونه تقویت شده با گرافن بود که علت آن کاهش شدید اندازه دانه ها و ایجاد تنش فشاری در ساختار بود [۱۲].

⁵-Extrusion

⁶-Yan

⁷ Jeon

⁸ Maurya

¹ Friction stir welding/processing

²-Hall-Petch

³-Bullet Mill

⁴-Hot isostatic press

در این پژوهش از ورق آلیاژ آلومینیم AA6061-T6 به ضخامت ۶ میلی‌متر به‌عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ مذکور به‌ترتیب در جداول ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

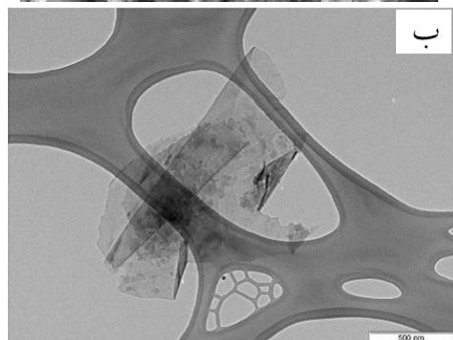
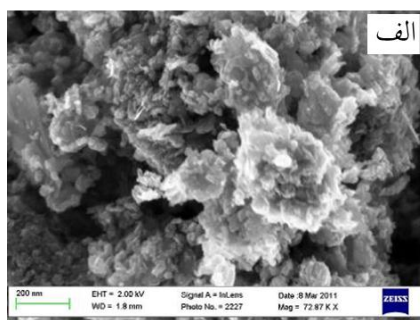
جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیم AA6061-T6 مورد استفاده در مقایسه با استاندارد ASTM B308,209

نوع	Si	Fe	Cu	Mn
استاندارد	0.40-0.80	0.70	0.15-0.40	0.15
نمونه	0.60	0.35	0.19	0.05
نوع	Mg	Zn	Cr	Al
استاندارد	0.80-1.20	0.25	0.04-0.35	Bal.
نمونه	0.98	0.03	0.10	Bal.

جدول ۲- خواص مکانیکی AA6061-T6 مورد استفاده در مقایسه با استاندارد ASTM B308,209

نوع	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول %	سختی (HB)
استاندارد	>300	>270	>12%	>95
نمونه	336.9	310	13.3%	100

نانوگرافن مورد استفاده در این پژوهش با علامت اختصاری XGnP ساخت شرکت XG Sciences خریداری شد. گرید گرافن، C750 بود. تعداد لایه حداکثر سه لایه و میانگین مساحت سطح گرافن ۷۵۰ m²/g بود. دمای کاری این گرید از طرف سازنده ۳۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد اعلام شد. درصد وزنی گرافن در زمینه آلومینیم ۳ درصد وزنی در نظر گرفته شد. تصاویر میکروسکوپی و مشخصات گرافن در شکل ۱ نشان داده شده است.



پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به طور همزمان استحکام و انعطافپذیری ماده افزایش یافته و در نتیجه چقرمگی بیشتر شده است که به علت ریزدانه شدن ماده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی است. همان طور که در بررسی های ریزساختار مربوط به نمونه فرآوری شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی دیده شد، ساختار اولیه پس از فرآیند به ساختاری ریزدانه تبدیل می شود که می تواند همزمان سبب افزایش استحکام (طبق رابطه هال-پچ) و به تاخیر افتادن پدیده گلوئی شدن و در نتیجه افزایش انعطاف پذیری شود. همچنین در برخی از پژوهش‌ها، اثر افزودن همزمان بیش از یک نوع پودر تقویت کننده بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینوم بررسی شده است. برای مثال نظری و همکاران [۱۳]، ایجاد نانو کامپوزیت زمینه آلومینوم با تقویت کننده های هیبریدی دی بوراید تیتانیم و گرافن، مصطفی و همکاران [۱۴]، اثر تقویت کننده های هیبریدی نیتريد بور و گرافن به روش اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند. بررسی ریزساختار نشان داد که پودر های تقویت کننده به خوبی در زمینه آلومینومی توزیع شده اند و افزایش تعداد پاس و سرعت چرخشی و کاهش سرعت انتقالی سبب توزیع بهتر ذرات می شود. با افزودن گرافن، استحکام به طور پیوسته افزایش و انعطاف پذیری کاهش می یابد. حضور ذرات تقویت کننده منجر به قفل شدن حرکت نابجایی ها شده و در نتیجه استحکام کششی و تسلیم ماده را افزایش می دهد. همچنین این ذرات می توانند با قفل کردن مرزدانه ها، سبب ریزدانه تر شدن ساختار و در نتیجه افزایش بیشتر استحکام شوند [۱۶ و ۱۵].

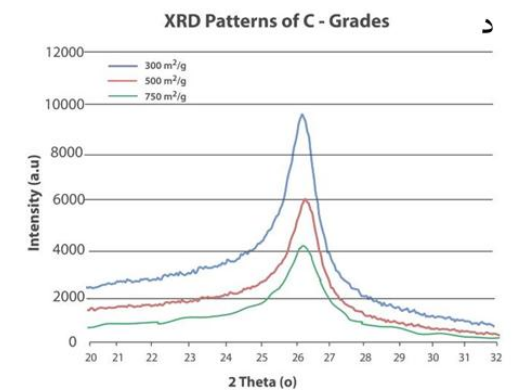
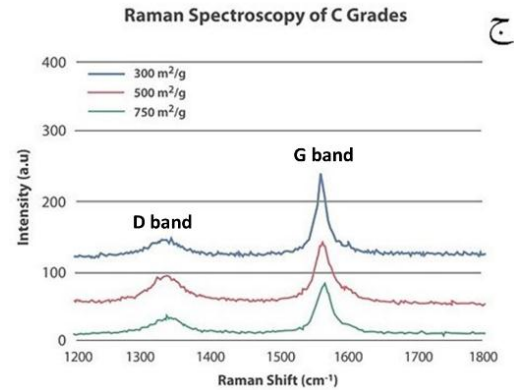
در حین فرایند FSP، قطعه کار تحت تغییر شکل پلاستیک شدید و دمای بالا قرار می گیرد و در آن ناحیه، تبلور مجدد دینامیکی دانه ها رخ می دهد. تغییر شکل پلاستیک شدید و قرار گرفتن در معرض تنش حرارتی مواد، منجر به تغییرات قابل توجهی در ریزساختار سطح می شود. در نتیجه، دو ناحیه اصلی تشکیل می شوند: ناحیه اغتشاشی (SZ) و منطقه متاثر حرارتی - مکانیکی (TMAZ). با اثرات ترکیبی تغییر شکل پلاستیک شدید و تبلور مجدد دینامیکی، یک ریزساختار با دانه های پالایش شده و هم محور ایجاد می شود. به دلیل شکلهای مختلف ابزار، حرکت ماده در اطراف پین می تواند بسیار متفاوت و پیچیده باشد. حین فراین FSW، ماده تغییر فرم خمیری شدیدی را در دمای بالا تحمل می کند که باعث تولید دانه های تبلور مجدد ریز و هم محور می شود. در این پژوهش سعی بر آن است که از روش FSP جهت ساخت کامپوزیت های آلومینیم با تقویت کننده گرافن استفاده شده و تاثیر متغیرهای فرآیند بر میکروساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت های تولیدی بررسی شود. با توجه به موارد مطرح شده در بالا؛ در این پژوهش تاثیر شیب نوک ابزار (۲، ۳/۵ و ۳ درجه)، سرعت های چرخش و حرکت ابزار متفاوت برای ساخت نانو کامپوزیت آلومینیم با گرید 6061-T6 و گرافن بر ساختار، استحکام و سختی نانو کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

در فاز اول پژوهش، جهت بررسی تاثیر عملیات اصطکاکی اغتشاشی بر زمینه آلومینیم با و بدون ذرات تقویت کننده گرافن، ابزار با سرعت‌های چرخش ۷۱۰، ۱۱۲۰ و ۱۴۰۰ (rpm)، سرعت‌های پیشروی ۸۰، ۱۲۵ و ۱۶۰ (mm/min) مورد استفاده قرار گرفت. شیارهایی بر روی ورق آلومینیم به عمق ۱ و عرض ۱ به طول ۱۰۰ میلی‌متر توسط دستگاه فرز ایجاد شد (شکل ۳ب). قطعه کار بر روی میز کار فرز توسط روپند محکم شد. شیار روی قطعه با گرافن به میزان مساوی پر گردید، سپس با استفاده از ابزار بدون پین، دهانه شیار بسته شد. در ادامه با استفاده از ابزار با پین مخروطی، فرایند اصطکاکی اغتشاشی انجام پذیرفت. سرعت چرخش و پیشروی دستگاه و زاویه ابزار مطابق جدول ۳ (الف) تنظیم شد. نمونه‌های آزمون کشش در راستای خط فرآیند شده انتخاب شد و تست کشش در دمای محیط با سرعت ۰.۰۰۱ (برثانیه) انجام گرفت (شکل ۳ج، د، ه).



شکل ۳- (الف) دستگاه فرز عمودی مورد استفاده، (ب) ورق آلومینیم شیاردار بسته شده بر روی میز کار دستگاه فرز، (ج) دستگاه آزمون کشش، (د) محل انتخاب نمونه کشش (ه) نمونه های کشش بعد از آزمون



شکل ۴- (الف) تصویر SEM، ذرات کوچک انباشته شده در ذرات بزرگ و فرم آگلومره، (ب) تصویر TEM دانه‌های جدا شده، (ج) طیف رامان (Raman)، (د) داده‌های XRD مربوط به گرافن‌گرفته‌های مختلف [۱۷]C

ابزار- شانه ابزار از میلگردی با جنس HS 6-5-2 (M2-۱/۳۳۴۳) استفاده گردید. ابزارهای مخروطی شکل در سه زاویه ۲، ۲/۵ و ۳ درجه انتخاب، طراحی و ساخته شدند (شکل ۲). دستگاه فرز عمودی مدل FU450R APUG، ساخت شرکت ماشین سازی تبریز برای تولید نمونه استفاده شد (شکل ۳الف).



شکل ۲- طرح ابزار- شانه ابزارهای ساخته شده

ابزار، استحکام کششی کاهش یافته و در اغلب موارد درصد ازدیاد طول، افزایش یافته است. افزودن گرافن در شرایط خاص ورق (رسوب سختی حالت T6) تاثیر مثبتی بر استحکام کامپوزیت ندارد.

در نتیجه برای فاز دوم پژوهش، مجموعه‌ای جدید از نمونه‌ها با سرعت چرخش و پیشروی ابزار کمتر در مقایسه با جدول ۳ (ب) اما با نسبت پیشروی بر دور بسیار متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با سرعت‌های چرخش ۱۱۲، ۱۸۰ و ۲۸۰ (rpm)، سرعت‌های پیشروی ۳۱،۵، ۲۵ و ۲۰ (mm/min)، نسبت پیشروی بر دور تقریبی ۰،۰۷، ۰،۱۴ و ۰،۲۸ (mm/rev) به دست می‌آید که بسیار متفاوت از نسبت ۰،۱۱۲ تا ۰،۱۱۴ فاز اول است.

کدگذاری نمونه به ترتیب از چپ به راست شامل زاویه ابزار، سرعت چرخش و سرعت حرکت ابزار است. حرف G برای نمونه‌های با افزودنی گرافن استفاده می‌شود. نتایج بازرسی چشمی از نظر کیفیت و خواص مکانیکی محل فرایند در جدول ۳ (الف) آورده شده است. مشاهده می‌شود که در زاویه ابزار ۲ درجه، در همه حالات سرعت چرخش و پیشروی ابزار، نمونه‌های فرایند شده با/ بدون گرافن، از نظر ساختاری دارای عیب و مردود هستند. در بقیه موارد هم، نمونه‌های فرایند شده بدون گرافن و کامپوزیت آلومینیم-گرافن سختی و استحکام کمتری از نمونه آلومینیم اولیه دارند. در شکل ۴، نتایج آزمون کشش فاز اول در مقایسه با آلومینیم ۶۰۶۱-T6 برای نمونه‌های با و بدون تقویت کننده گرافن آمده است. مشاهده می‌شود که به علت انحلال/درشت شدن رسوبات زمینه و نیز تبلور مجدد دینامیکی در اثر حرارت ورودی ناشی از حرکت

جدول ۳ (الف) - مشخصات متغیرهای سرعت چرخش و پیشروی و زاویه ابزار در فاز اول

نتایج خواص مکانیکی				بازرسی چشمی	پیشروی بر دور (mm/rev)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت چرخش (rpm)	زاویه ابزار °	زمینه/تقویت کننده	کد نمونه
Hardness (HV)	Elongation (%)	YS (MPa)	Tensile (MPa)							
128	13.3	310.1	336.9	6061-T6	6061-T6
102	30.5	123.3	220.3	قبول	0.113	80	710	3	بدون گرافن	3-710-80
88	23	123.1	230	قبول	0.112	125	1120			3-1120-125
96	33	115	176.7	قبول	0.114	160	1400			3-1400-160
84	27.7	149.4	211.9	قبول	0.113	80	710	2.5		2.5-710-80
87	27	139.7	262	قبول	0.112	125	1120			2.5-1120-125
103	20	135.6	226.2	قبول	0.114	160	1400			2.5-1400-160
..	22	120	218	مردود	0.113	80	710	2		2-710-80
..	26.2	115	210	مردود	0.112	125	1120			2-1120-125
..	30	105	198	مردود	0.114	160	1400			2-1400-160
93	28.4	119.1	209.6	قبول	0.113	80	710	3	با گرافن	3-710-80-G
91	23.3	158.5	247.4	قبول	0.112	125	1120			3-1120-125-G
84	24	133.1	214.7	قبول	0.114	160	1400			3-1400-160-G
85	25.8	111.4	168.7	قبول	0.113	80	710	2.5		2.5-710-80-G
96	22.6	108.5	194.4	قبول	0.112	125	1120			2.5-1120-125-G
88	23	130.4	231.7	قبول	0.114	160	1400			2.5-1400-160-G
..	26	112	150	مردود	0.113	80	710	2		2-710-80-G
..	23	120	163	مردود	0.112	125	1120			2-1120-125-G
..	21.9	128	170	مردود	0.114	160	1400			2-1400-160-G

جدول ۳ (ب)- مشخصات متغیرهای سرعت چرخش و پیشروی و زاویه ابزار در فاز دوم

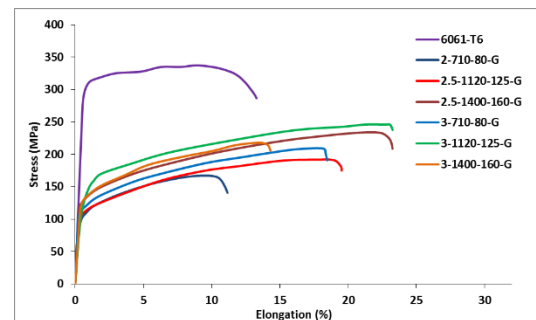
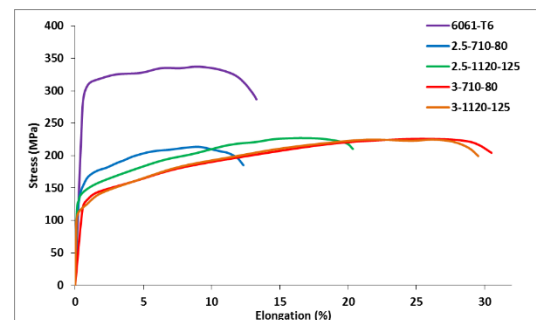
کد نمونه	تقویت کننده	زاویه پراب °	سرعت چرخش (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	پیشروی بر دور (mm/rev)
3-112-31.5-G	گرافن	3	112	31.5	0.281
3-180-25-G			180	25	0.139
3-280-20-G			280	20	0.071
2.5-112-31.5-G		2.5	112	31.5	0.281
2.5-180-25-G			180	25	0.139
2.5-280-20-G			280	20	0.071
2-112-31.5-G		2	112	31.5	0.281
2-180-25-G			180	25	0.139
2-280-20-G			280	20	0.071

میکروسکوپ نوری (OM) OLYMPUS مدل BX60 صورت پذیرفت. میکروسختی با معیار ویکرز و با دستگاه Anton Paar مدل MHT-10، مورد بررسی قرار گرفت. جهت آنالیز ترکیب شیمیایی مواد از دستگاه کوانتومتری FOUNDRY-MASTER مدل 01J0091 استفاده شد. نمونه تست کشش با استفاده از برش سیم^۹ و در راستای خط فرآیند شده تهیه شد. تست کشش مطابق استاندارد ASTM E08 با دستگاه SANTAM ۵ تن انجام شد.

نتایج

بررسی ریزساختار

شکل ۵ تصویر کلی منطقه فرایند شده را نشان می‌دهد. ساختار منطقه اغتشاشی در شکل مشخص است. در خصوص تاثیر شکل هندسی ابزار بدون در نظر گرفتن پارامترهای دیگر فرآیند FSP بر ریز ساختار نانو کامپوزیت آلیاژ منیزیم با تقویت کننده اکسید آلومینیم نشان داده شد که ابزار با شکل هندسی مخروط اندازه دانه را بین ۱ تا ۵ میکرون کاهش داد [۱۸]. در تصاویر شکل ۶ ریز ساختار منطقه اغتشاشی نانو کامپوزیت شامل نانو ذرات گرافن در زمینه آلومینیم مشاهده می‌شود. در شکل ۶(الف) توزیع یکنواخت ذرات مشاهده می‌شود و با کاهش زاویه نوک بین این توزیع غیریکنواخت تر می‌شود. در شکل ۶(ج) آگلومره ذرات گرافن در زمینه مشاهده می‌شود. شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مورفولوژی و توزیع نانو ذرات گرافن در زمینه آلومینیم را نشان می‌دهد. وجود خلل و فرج به علت اچ کردن نمونه ها است. نتیجه آنالیز EDS نشان دهنده وجود کربن در ناحیه مورد بررسی است. به علت کوچک بودن اندازه نانوذرات گرافن و تاثیر زمینه آلومینیم در

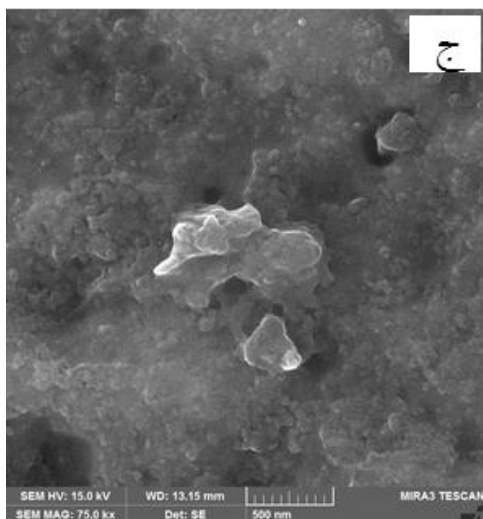


شکل ۴- نتایج آزمون کشش نمونه های با و بدون تقویت کننده گرافن در مقایسه با آلومینیم ۶۰۶۱-T6

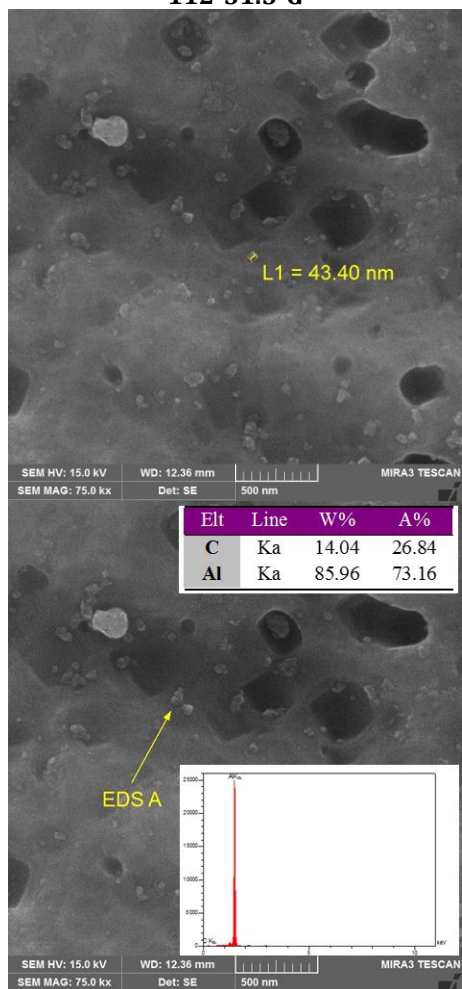
جهت آماده سازی نمونه‌ها، سنباده با زبری ۲۰۰ و ۴۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. محلول کلر جهت اچ نمونه‌ها (5 ml H₂O, 3 ml HNO₃, 2 ml HF) استفاده شد. تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM) با دستگاه TE-SCAN مدل MIRA3 انجام شد. بررسی ساختار با

⁹ Wire-cut



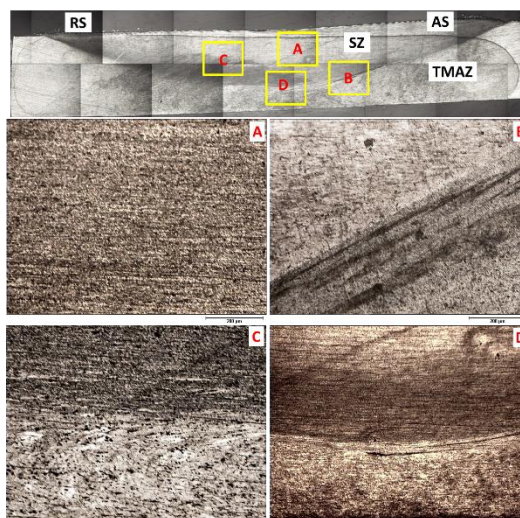


شکل ۶- ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه اغتشاشی نانو کامپوزیت آلومینیم- گرافن (الف) نمونه 3- 280-20-G، (ب) نمونه 2.5-280-20-G، (ج) نمونه 2-112-31.5-G

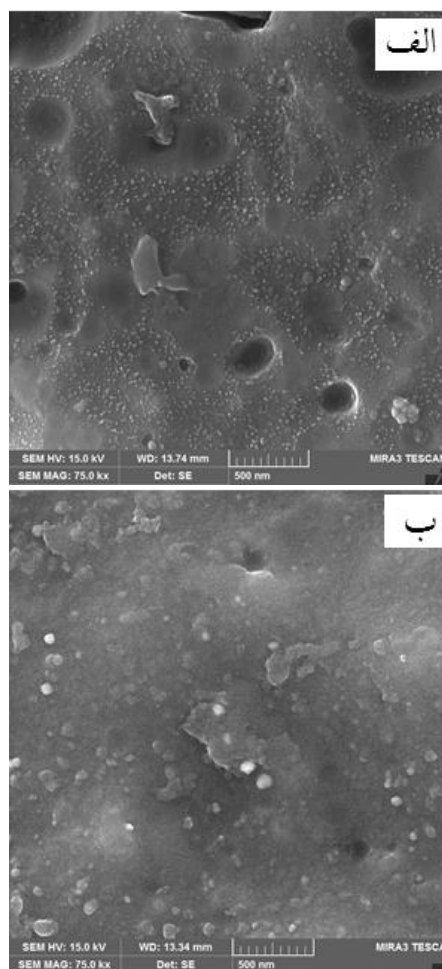


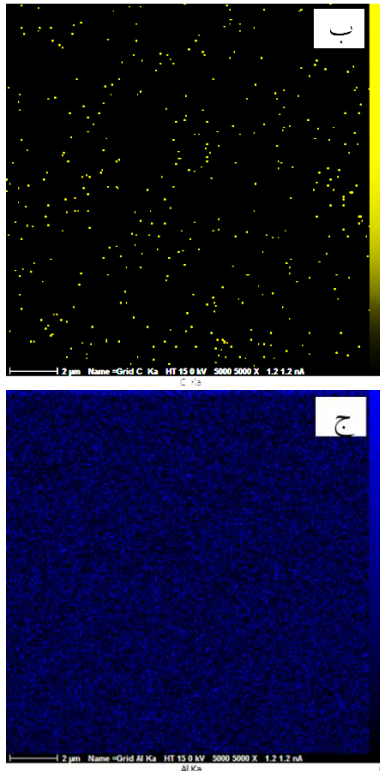
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از توزیع نانو ذرات گرافن در زمینه آلومینیم و نتیجه آنالیز EDS در نمونه 3-180-25-G

آنالیز و همچنین محدودیت آنالیز EDS در تعیین عناصر سبک، درصد کربن و آلومینیم در آنالیزهای مختلف متفاوت است.



شکل ۵- تصویر کلی منطقه فرایند شده

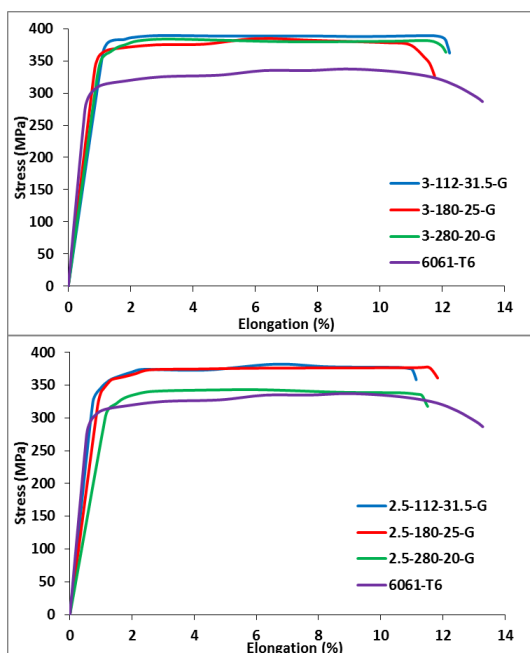




شکل ۸- تصویر آنالیز MAP توزیع گرافن در زمینه آلومینیم مربوط به نمونه 3-112-31.5-G (الف) ساختار نمونه، (ب) توزیع کربن و (ج) توزیع آلومینیم

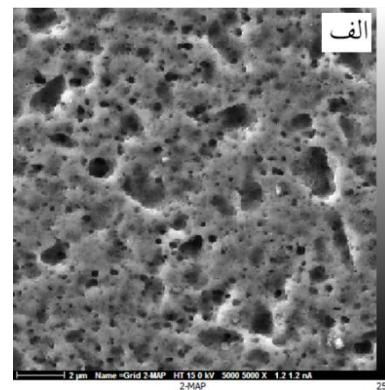
بررسی خواص مکانیکی

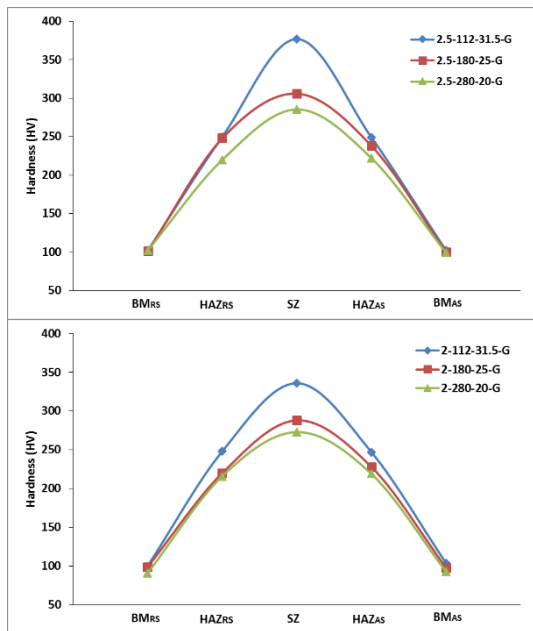
در شکل ۹ نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها و در شکل ۱۰ میانگین سختی در مناطق مختلف (ناحیه اغتشاشی، منطقه متاثر حرارتی- مکانیکی و فلز پایه) آورده شده است. در جدول ۴ نتایج خواص مکانیکی نمونه‌های فرایند شده، ارایه شده است.



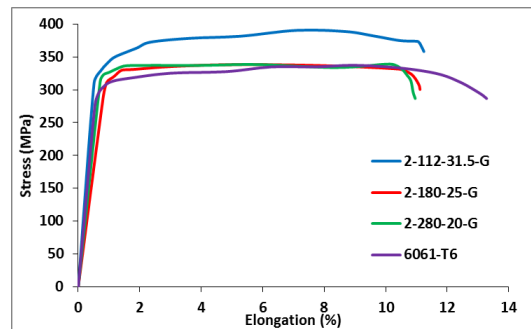
همان طور که مشاهده می‌شود؛ با افزایش زاویه نوک ابزار، پراکندگی و توزیع نانو ذرات گرافن بیشتر می‌شود. خواص مکانیکی تحت تاثیر ماهیت پراکندگی قرار می‌گیرد. برای رسیدن به خواص بالاتر، پراکندگی همگن ضروری است. در مقالات موجود، شواهدی از ذوب موضعی آلومینیم در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی به دست آمده و گزارش شده است [۱۹ و ۲۰]. در واقع یکی از عوامل توزیع ناهمگن ذرات تقویت کننده، ذوب موضعی آلومینیم اعلام شده است. در فاز دوم تحقیق به علت کاهش سرعت حرکت ابزار و کاهش حرارت ورودی اصطکاک، ذوب موضعی در ناحیه فرایند شده مشاهده نشد. توزیع نانو ذرات تابع پارامترهای فرایند FSP مانند سرعت چرخش و سرعت حرکت است (جدول ۳ (ب)). یک توزیع خوب و یکنواخت در میکروگرافی FESEM ثابت می‌کند که پارامترهای فرایند مناسب انتخاب شده است [۲۱]. فرایند FSP باعث ایجاد تغییر در اندازه و مورفولوژی نانو ذرات می‌شود و تغییر شکل پلاستیک شدید همراه با عمل چرخش ابزار می‌تواند آگلومراسیون نانو ذرات را بشکند. نرخ تکه تکه شدن آگلومره به اندازه اولیه و شکل آگلومره نانو ذرات بستگی دارد. دمای فرایند متاثر از استحکام زمینه و تقویت کننده است و دمای بالا باعث ایجاد واکنش بین زمینه و نانو ذرات می‌شود [۲۲].

در ادامه، نتایج بررسی ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش EDS برای مشخص شدن توزیع گرافن در زمینه آلومینیم پس از تولید نانو کامپوزیت نشان داده است. براساس نتایج، مشخص شد که با افزایش زاویه ابزار میزان توزیع یکنواخت گرافن در زمینه آلومینیم افزایش می‌یابد. در شکل ۸ نتایج بررسی آنالیز MAP نانو کامپوزیت آلومینیم - گرافن در نمونه‌ی 3-112-31.5-G نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که توزیع ذرات گرافن به طور یکنواخت در زمینه آلومینیم صورت گرفته است. باید توجه داشت به علت کوچک بودن اندازه نانوذرات گرافن و همچنین محدودیت آنالیز EDS در تعیین عناصر سبک، شدت کربن کمتر از مقدار واقعی است.

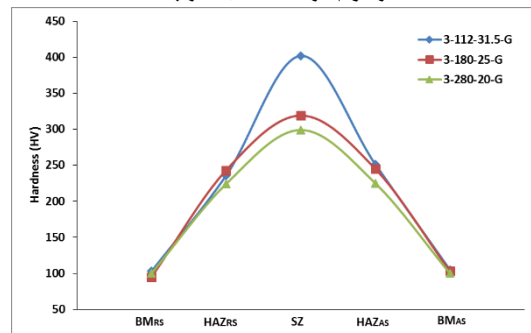




شکل ۱۰- میانگین سختی در مناطق مختلف نمونه های فرایند شده در فاز دوم (ناحیه اغنشاشی، منطقه متاثر حرارتی- مکانیکی و فلز پایه)



شکل ۹- نمودار تنش- کرنش نمونه های فرایند شده در فاز دوم در مقایسه با فلز پایه



جدول ۴- نتایج آزمون کشش و سختی نمونه های فرایند شده در فاز دوم نسبت به تغییرات زاویه نوک ابزار

آزمون سختی (HV)					آزمون کشش			پیشروی بر دور (mm/rev)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت چرخش (rpm)	زاویه پراب °	کد نمونه
BRS	HAZRS	Nuget	HAZAS	BAS	Elongation (%)	YS (MPa)	Tensile (MPa)					
105	251.4	401.8	235.6	103	12	383	396	0.281	31.5	112	3	3-112-31.5-G
102	249	377	250	102	11.8	364	385	0.139	25	180		3-180-25-G
104	247	336	248	100	12.3	355	380	0.071	20	280		3-280-20-G
103	245	319	243	95	11.2	345	368	0.281	31.5	112	2.5	2.5-112-31.5-G
100	248	326	248	101	11.9	349	368	0.139	25	180		2.5-180-25-G
98	228	288.1	220	99	11.5	329	345	0.071	20	280		2.5-280-20-G
100	225	299	224	100	11.4	338	360	0.281	31.5	112	2	2-112-31.5-G
99	222	285.5	220	102	11	328	345	0.139	25	180		2-180-25-G
93	219	273	216	91	10.9	319	338	0.071	20	280		2-280-20-G

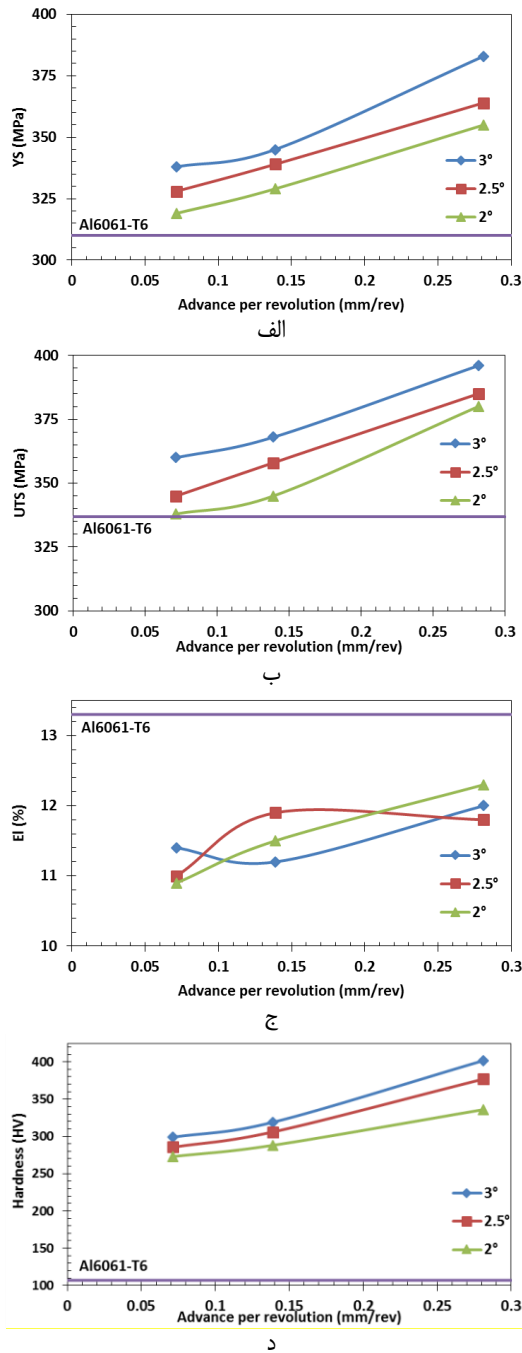
شدن نانو ذرات می شود. اگر نیروی فشاری یا نیروی محرکه چرخشی برای مقابله با فشارهای جریان تولید شده کافی نباشد، ممکن است قادر به برداشتن مواد نباشد. این عامل باعث می شود، مواد از طرف پیشرو به عقب نشینی منتقل نشده که نتیجتاً در پیشرو آگلومره مواد بوجود می آید [۲۳].

شماره نشان داد که افزایش زاویه ابزار از ۰ تا ۳ درجه باعث افزایش استحکام کششی ۹۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال و افزایش ازدیاد طول ۱۸/۳ تا

مشاهده می شود در فاز دوم تحقیق در همه حالات فرایند، استحکام تسلیم، استحکام کششی و سختی کامپوزیت آلومینیم-گرافن بیشتر از زمینه آلومینیم (رسوب سختی شده) است. از سوی دیگر، درصد ازدیاد طول رفتار معکوسی را نشان می دهد. توزیع سختی در طرف پیشرو^{۱۰} (AS) و طرف عقب نشینی^{۱۱} (RS) متفاوت است. با توجه به ترکیب چرخش ابزار و حرکات خطی ابزار، مواد از طرف پیشرو به طرف عقب نشینی بوسیله بار اعمال شده توسط شانه ابزار هدایت می شود. طرف پیشرو دارای سطح بالاتری از تجمع مواد است که منجر به مخلوط

¹¹ Retreating Side

¹⁰ Advancing Side



شکل ۱۱- نتایج استحکام تسلیم (الف)، استحکام

کششی (ب)، ازدیاد طول (ج)، سختی (د) براساس نسبت

سرعت چرخش به سرعت حرکت ابزار (پیشروی بر دور)

مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت حرکت ابزار (پیشروی بر دور)، استحکام تسلیم، استحکام کششی و سختی کامپوزیت آلومینیم-گرافن، در هر سه زاویه نوک ابزار، افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه نوک ابزار از ۲/۵ به ۳ و ۳ درجه، این افزایش خواص محسوس است. از سوی دیگر، درصد ازدیاد طول رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد و در زاویه ابزار ۲/۵ درجه در نسبت ۰/۱۴ بیشینه‌ای را نشان

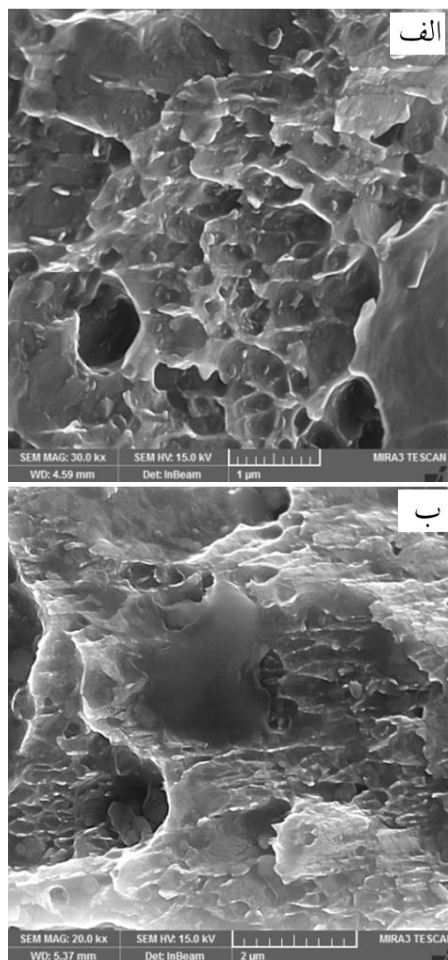
۱۲/۴ درصد شد [۲۰]. در این پژوهش مطابق جدول ۴، با زاویه ۳ درجه استحکام کششی بین ۳۸۳-۳۹۶ مگاپاسکال و استحکام تسلیم بین ۳۵۵-۳۸۳ مگاپاسکال افزایش یافت. با زاویه ۲/۵ درجه استحکام کششی بین ۳۶۸-۳۴۵ مگاپاسکال و استحکام تسلیم بین ۳۲۹-۳۴۵ مگاپاسکال افزایش یافت. با زاویه ۲ درجه استحکام کششی بین ۳۶۰-۳۳۸ مگاپاسکال و استحکام تسلیم بین ۳۱۹-۳۳۸ مگاپاسکال افزایش یافت. افزایش زاویه ابزار باعث افزایش استحکام و ازدیاد طول می‌شود این افزایش استحکام به علت نیروی رو به پایین شانه است که منجر به افزایش حرارت ورودی و خارج کردن عیوب خارجی مانند حفره می‌شود [۲۰]. بررسی‌ها نشان می‌دهد، استحکام کششی فلز جوش با ابزار با نوک مربعی بیشتر از ابزار با نوک مخروطی است و استحکام کششی ابزار با نوک مخروطی بیشتر از ابزار با نوک استوانه‌ای است [۲۱]. علت افزایش خواص مکانیکی، توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه است، این عامل بر روی ازدیاد طول تاثیر مستقیم دارد و هر چه اندازه ذرات کوچکتر باشد، ساختار ریزدانه‌تر و طبق رابطه هال-پچ، استحکام افزایش خواهد یافت. برای جلوگیری از انباشت یا آگلومره شدن ذرات می‌بایست قطر مناسب برای شانه انتخاب نمود زیرا شانه مسئول تولید نیروی اصطکاک و برش می‌باشد [۲۲ و ۲۳].

تغییرات میکروسختی در نواحی مختلف با تغییر زاویه نوک ابزار در جدول ۴ نشان داده شده است. شارما^{۱۲} و همکاران نشان دادند که افزایش زاویه ابزار از ۰ تا ۳ درجه باعث افزایش میانگین سختی ۲۵ تا ۲۹ ویکرز شد [۲۰]. نتایج نشان می‌دهد که میکروسختی به دلیل ورود نانو ذرات گرافن در زمینه آلومینیم افزایش می‌یابد و میکروساختار منطقه جوش ریز و یکنواخت شده است [۵]. علت افزایش سختی توزیع یکنواخت ذرات و تصحیح اندازه دانه آلومینیم توسط نانو ذرات گرافن اعلام شده است [۲۴]. هرچه زاویه ابزار بیشتر شود به دلیل افزایش زاویه مخروط نوک ابزار، توزیع یکنواخت ذرات گرافن در ناحیه اغتشاش افزایش یافت.

تاثیر سرعت چرخش و سرعت حرکت ابزار بر خواص

نتایج استحکام تسلیم، استحکام کششی، ازدیاد طول و سختی کامپوزیت‌های آلومینیم-گرافن فرایند شده براساس نسبت سرعت چرخش به سرعت حرکت ابزار (پیشروی بر دور) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

مقدار میکرو سختی کاهش می‌یابد [۲۲ و ۲۳]. از طرفی کاهش پالایش دانه‌ها منجر به تشکیل دانه‌های بزرگ در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) شده که این خود عامل کاهش سختی به شمار می‌رود [۳۱]. عامل افزایش سختی در تحقیق حاضر، تقویت دانه (پالایش دانه) و پراکندگی خوب نانو ذرات است. سرعت حرکت ابزار تاثیر زیادی بر پراکندگی ذرات در ناحیه فرآیند شده دارد. افزایش سرعت حرکت منجر به کاهش پراکندگی مواد تقویت کننده در زمینه می‌شود. تصویر FESEM سطوح شکست کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات گرافن در زمینه آلومینیم در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تصویر FESEM سطوح شکست کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات گرافن در زمینه آلومینیم؛ (الف) نمونه 3-112-31.5-G و (ب) نمونه 2-280-20-G

سطح شکست زمینه آلومینیم با پراکندگی یکنواخت جاهای خالی بزرگ پوشیده شده است که این مقدار زیاد جریان مواد قبل از شکست را نشان می‌دهد. حالت شکست مشاهده شده، شکست نرم است. سطح شکست کامپوزیت، پراکندگی وسیعی از گودی‌های با اندازه بزرگ و کوچک را نشان می‌دهد. این سطح شکست نشان می‌دهد که نانو ذرات تقویت کننده به خوبی با زمینه آمیخته شده اند. گودیهای کوچک برآمده به علت شکست نرم زمینه آلومینیم است [۳۲].

می‌دهد در حالی که زاویه ابزار ۳ درجه در همین نسبت، کمینه‌ای را نشان می‌دهد.

توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه بسیار مهم است هر چه اندازه ذرات کوچکتر باشد ساختار ریزدانه‌تر و افزایش میکروسختی و استحکام کششی را به همراه خواهد داشت [۲۲ و ۲۳]. با افزایش سرعت چرخش ابزار، حرارت بالا رفته و عرض HAZ افزایش و نرخ خنک سازی کاهش یافته و موجب افزایش اندازه دانه یا ساختار درشت دانه می‌شود [۲۵]. همچنین در شرایط خاص، احتمال واکنش زمینه یا فاز تقویت کننده با محیط وجود دارد؛ در فاز اول تحقیق و در سرعت‌های بالای چرخش ابزار، پدیده آتش گرفتن گرافن مشاهده شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش سرعت چرخش ابزار از ۱۹۵۰ به ۳۰۸۰ دور بر دقیقه (به شرط ثابت بودن سرعت حرکت و هندسه ابزار) استحکام کششی از ۱۲۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول از ۱۲/۵ تا ۱۰/۶ درصد کاهش یافت [۲۶]. افزایش سرعت چرخش ابزار بیشتر از ۲۸۰ دور بر دقیقه باعث نرمی و تبلور مجدد ناحیه جوش می‌شود؛ همچنین افزایش اندازه دانه باعث کاهش استحکام می‌شود. از طرفی، سرعت چرخش خیلی پایین باعث ایجاد تداخل ناکافی و تولید عیوب می‌شود [۲۶]. با کاهش سرعت چرخش، نقص‌هایی چون تخلخل، سوراخ کرمی و غیره در نمونه ایجاد می‌شود. در سرعت چرخش پایین‌تر، گرمای تولید شده کمتر بوده و بنابراین ساختار دانه پالایش نشده باقی می‌ماند؛ از طرفی در سرعت چرخش بالاتر، گرمای تولید شده بیشتر بوده و در نتیجه تبلور مجدد ساختار دانه صورت می‌گیرد [۲۷]. سرعت چرخش بالاتر ابزار به دلیل زیادتر بودن گرمای اصطکاک، دمای بیشتری تولید می‌کند و باعث هم‌زدن و مخلوط شدن متمرکزتری می‌شود [۲۸ و ۲۹].

با ثابت نگه داشتن زاویه نوک ابزار، با افزایش سرعت چرخش ابزار، کاهش استحکام و سختی مشاهده می‌شود. این به سبب افزایش حرارت ورودی است زیرا که اصطکاک بین شانه ابزار و قطعه افزایش یافته باعث افزایش عرض HAZ و کاهش نرخ خنک‌سازی در نمونه و در نهایت افزایش اندازه دانه می‌شود. هرچقدر سرعت چرخش ابزار بیشتر شود پیک حرارت بیشتر، در نتیجه کاهش سختی در منطقه اغتشاش ملومس‌تر می‌شود. در تحقیق مشابهی با تغییر سرعت چرخش از ۱۰۷۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه میانگین سختی از ۱۴۹ تا ۱۳۰ ویکرز کاهش یافت [۳۰].

با افزایش سرعت حرکت ابزار، گرمای ورودی به نمونه کاهش یافته و نرخ خنک سازی افزایش و باعث ریز دانه شدن ریز ساختار می‌شود [۲۵]. با انجام FSP دانه‌های زمینه به طرز چشمگیری پالایش شده و نانو ذرات گرافن، بصورت یکنواخت توزیع می‌شوند. تغییر شکل شدید و گرمای اصطکاک در طی FSP منجر به تبلور مجدد در دانه‌های میکروساختار شده است. با افزایش سرعت حرکت، توزیع پودر کاهش می‌یابد [۲۶].

هر چه سرعت حرکت بالاتر رود، زمان اغتشاش در یک محل خاص کاهش یافته و پراکندگی ذرات تقویت کننده ضعیف می‌شود در نتیجه

نتیجه گیری

پس از انجام عملیات FSP توزیع یکنواختی از فاز تقویتی گرافن در زمینه آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ مشاهده شد. با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت حرکت ابزار (پیشروی بر دور) از ۰/۰۷ تا ۰/۲۸ و افزایش زاویه ابزار از ۲ تا ۳ درجه، استحکام کششی از ۳۳۸ تا ۳۹۶ مگا پاسکال، استحکام تسلیم از ۳۱۹ تا ۳۸۳ مگا پاسکال و درصد ازدیاد طول ۱۰/۹ تا ۱۲/۳ درصد افزایش داشته است. همچنین میکرو سختی در ناحیه فرآیندشده از ۲۷۳ تا ۴۰۰ ویکرز افزایش یافت که به علت کاهش اندازه دانه در ساختار و گسترش مرزهای دانه است. انتخاب سرعت بهینه حرکت و چرخش ابزار و توزیع مناسب نانو ذرات؛ افزایش استحکام کامپوزیت را به همراه دارد. در نهایت نمونه با زاویه نوک ابزار ۳ درجه، سرعت چرخش ابزار ۱۱۲ دور بر دقیقه و سرعت حرکت ابزار ۳۱/۵ میلیمتر بر دقیقه به عنوان حالت بهینه خواص استحکام و انعطاف پذیری انتخاب شد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایشها: فرزاد سلیمانی، غلامرضا غفاری؛
تحلیل داده‌ها و نتایج: غلامرضا غفاری، مینا صفا، غلامرضا خلج؛
نگارش اولیه: غلامرضا غفاری، نگارش نهایی: غلامرضا خلج.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

- Dhayalan, R., K. Kalaiselvan, and R. Sathiskumar. "Characterization of AA6063/SiC-Gr surface composites produced by FSP technique." *Procedia Engineering* 97 (2014): 625-631. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.291>
- Jeon, Chi-Hoon, Yong-Ha Jeong, Jeong-Jin Seo, Huynh Ngoc Tien, Sung-Tae Hong, Young-Jin Yum, Seung-Hyun Hur, and Kwang-Jin Lee. "Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing." *International journal of precision engineering and manufacturing* 15, no. 6 (2014): 1235-1239. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-014-0462-2>.
- Murali, V. V., G. Krishna, and K. Satyanarayana. "Microstructure and mechanical properties of multipass friction stir processed aluminum silicon carbide metal matrix." *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 4, no. 2 (2015): 88-90. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijset1&volume=4&issue=2&article=012>
- Sharma, Abhishek, Vyas Mani Sharma, and Jinu Paul. "Fabrication of bulk aluminum-graphene nanocomposite through friction stir alloying." *Journal of Composite Materials* 54, no. 1 (2020): 45-60. <https://doi.org/10.1177/0021998319859427>
- Bartolucci, Stephen F., Joseph Paras, Mohammad A. Rafiee, Javad Rafiee, Sabrina Lee, Deepak Kapoor, and Nikhil Koratkar. "Graphene-aluminum nanocomposites." *Materials Science and Engineering: A* 528, no. 27 (2011): 7933-7937. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.043>
- Daneshmand, S. H., Zakeri, M. Shojaee, T., Mohammaadbeygi, A. and Nazari, A.. "The effect of graphene percent on mechanical properties of Cu/graphene nanocomposites." (2014): 37-43. <https://doi.org/10.30501/jamt.2635.70250>
- Ovid'Ko, I. A. "Metal-graphene nanocomposites with enhanced mechanical properties: a review." *Reviews on Advanced Materials Science* 38, no. 2 (2014). https://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_23814/09_23814_ovidko.pdf

8. Muley, Aniruddha V., S. Aravindan, and I. P. Singh. "Nano and hybrid aluminum based metal matrix composites: an overview." *Manufacturing Review* 2 (2015): 15. <http://dx.doi.org/10.1051/mfreview/2015018>
9. Kumar, HG Prashantha, and M. Anthony Xavier. "Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review." *Procedia Engineering* 97 (2014): 1033-1040. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.381>
10. Aswin, S., and S. Varghese. "Tribology study of graphene-aluminium nanocomposites." *Int. J. Mech. Prod. Eng.(IJMPE)* 2 (2014): 29-33. https://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/2-100-141760527529-33.pdf
11. Yan, Shao-jiu, Cheng Yang, Qi-hu Hong, Jun-zhou Chen, Da-bo Liu, and Sheng-long Dai. "Research of graphene-reinforced aluminum matrix nanocomposites." *Journal of Materials Engineering* 1, no. 4 (2011): 1-6. <https://www.ingentaconnect.com/content/jme/jme/2014/00000001/00000004/art00001?crawler=true>
12. Maurya, Rita, Binit Kumar, S. Ariharan, J. Ramkumar, and Kantesh Balani. "Effect of carbonaceous reinforcements on the mechanical and tribological properties of friction stir processed Al6061 alloy." *Materials & Design* 98 (2016): 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.021>
۱۳. نظری مهدی، اسکندری حسین و گلپهارجقی محمدرضا. "ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱-دی‌بوراید تیتانیوم-گرافن تولیدشده با فرآیند اصطکاکی-اغتاششی." *مهندسی مکانیک مدرس* ۲۰، ۳ (۱۳۹۸): ۶۱۱-۶۲۱. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-29876-fa.html>
۱۴. Moustafa, Essam B., A. Melaibari, Ghazi AlSORUJI, Asmaa M. Khalil, and Ahmed O. Mosleh. "Al 5251-based hybrid nanocomposite by FSP reinforced with graphene nanoplates and boron nitride nanoparticles: Microstructure, wear, and mechanical characterization." *Nanotechnology Reviews* 10, no. 1 (2021): 1752-1765. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0108>
۱۵. ربیعی زاده امین، افسری احمد و محمدی مهرداد. "تولید و بررسی خواص نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم/نانولوله کربنی (Al-CNT) تولید شده با فرآیند اصطکاکی-اغتاششی." *فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین* ۳، ۱۰ (۱۳۹۱): ۱۳-۲۴. https://jnm.marvdasht.iau.ir/article_1406.html
16. Zhang, Z. W., Z. Y. Liu, B. L. Xiao, D. R. Ni, and Z. Y. Ma. "High efficiency dispersal and strengthening of graphene reinforced aluminum alloy composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing." *Carbon* 135 (2018): 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.029>
17. <https://www.graphene-info.com/xg-sciences>.
18. Boostani, A. Fadavi, S. Tahamtan, Z. Y. Jiang, Dongbin Wei, Siamak Yazdani, R. Azari Khosroshahi, R. Taherzadeh Mousavian, Jianzhong Xu, X. Zhang, and Dianyao Gong. "Enhanced tensile properties of aluminium matrix composites reinforced with graphene encapsulated SiC nanoparticles." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 68 (2015): 155-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.10.010>
19. Dinaharan, I. "Influence of ceramic particulate type on microstructure and tensile strength of aluminum matrix composites produced using friction stir processing." *Journal of Asian Ceramic Societies* 4, no. 2 (2016): 209-218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2016.04.002>
20. Sharma P., Bhati D." Effects of tool rotation speed and tilt angle on friction stir

- welding of Al- 6075." International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering, 2(8), (2015) 60-62. <https://www.ijrmee.org/index.php/ijrmee/article/view/293>
21. Sharma, Abhishek, Vyas Mani Sharma, Baidehish Sahoo, Surjya Kanta Pal, and Jinu Paul. "Effect of multiple micro channel reinforcement filling strategy on Al6061-graphene nanocomposite fabricated through friction stir processing." Journal of Manufacturing Processes 37 (2019): 53-70. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.009>
22. Bauri, Ranjit, and Devinder Yadav. Metal matrix composites by friction stir processing. Butterworth-Heinemann, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813729-1.00002-4>
23. Sahraeinejad, S., H. Izadi, M. Haghshenas, and A. P. Gerlich. "Fabrication of metal matrix composites by friction stir processing with different particles and processing parameters." Materials Science and Engineering: A 626 (2015): 505-513. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.077>
24. Pouraliakbar H., Beygi R., Fallah V., Monazzah A.H., Jandaghi M.R., Khalaj G., da Silva L.F., Pavese M., Processing of Al-Cu-Mg alloy by FSSP: Parametric analysis and the effect of cooling environment on microstructure evolution. Materials Letters, 2021, 131157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131157>
25. Rathee, Sandeep, Sachin Maheshwari, Arshad Noor Siddiquee, and Manu Srivastava. "Fabrication of AA 6063/SiC surface composites via friction stir processing." India International Science Festival: Young Scientists' Meet Department of Science and Technology, Government of India (2015). https://www.researchgate.net/profile/Ars-had-Siddiquee/publication/308416018_Fabrication_of_AA_6063SiC_Surface_Composites_via_a_Friction_Stir_Processing/links/57e3c1bb08ae054b20be1828/Fabrication-of-AA-6063-SiC-Surface-Composites-via-Friction-Stir-Processing.pdf
26. Kumar, N., I. Monga, and M. Kumar. "An Experimental Investigation to Find Out the Effect of Different Pin Profile Tools on AA 6061 T6 and AA 2014 T4 with Friction Stir Welding." International Journal for Technological Research in Engineering 2 (2015):1622-1625. <http://www.ijtre.com/images/scripts/2015020866.pdf>
27. Rana, H. G., V. J. Badheka, and A. Kumar. "Fabrication of Al7075/B4C surface composite by novel friction stir processing (FSP) and investigation on wear properties." Procedia Technology 23 (2016): 519-528. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.058>
28. Zhao, Yong, Xiaolu Huang, Qiming Li, Jian Huang, and Keng Yan. "Effect of friction stir processing with B4C particles on the microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy." The international journal of advanced manufacturing technology 78, no. 9 (2015): 1437-1443. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6748-9>
29. M. Nourani, A. Milani and S. Yannacopoulos, "Taguchi Optimization of Process Parameters in Friction Stir Welding of 6061 Aluminum Alloy: A Review and Case Study," Engineering, Vol. 3 No. 2, 2011, pp. 144-155. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2011.32017>
30. Rohilla, Puneet, and Narinder Kumar. "Experimental investigation of tool geometry on mechanical properties of friction stir welding of AA6061." International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering 3, no. 3 (2013): 56-61. <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v3i3/C10910833>

13.pdf

31. Dinaharan, I., N. Murugan, and A. Thangarasu. "Development of empirical relationships for prediction of mechanical and wear properties of AA6082 aluminum matrix composites produced using friction stir processing." *Engineering science and technology, an international journal* 19, no. 3 (2016): 1132-1144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.02.004>

32. Patel, Vivek V., Vishvesh J. Badheka, and Abhishek Kumar. "Effect of velocity index on grain size of friction stir processed Al-Zn-Mg-Cu alloy." *Procedia Technology* 23 (2016): 537-542. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.060>