



Effect of Friction Stir Processing On Microstructure and Mechanical Properties of the A390/SiC Composite: The Effect of Shoulder Diameter to Pin Diameter Ratio and Number of Passes

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohamadi Gangaraj J.¹ MSc,
Nourozi S. *¹ PhD,
Jamshidi Aval H. ¹ PhD

How to cite this article

Mohamadi Gangaraj J, Nourozi S, Jamshidi Aval H. Effect of Friction Stir Processing On Microstructure and Mechanical Properties of the A390/SiC Composite: The Effect of Shoulder Diameter to Pin Diameter Ratio and Number of Passes. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):35-44.

¹Materials Engineering Department, Materials & Industries Engineering Faculty, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Materials Engineering Department, Materials & Industries Engineering Faculty, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Phone: +98 (11) 35501800
Fax: +98 (11) 35501802
s-nourozi@nit.ac.ir

Article History

Received: January 2, 2019
Accepted: April 24, 2019
ePublished: January 1, 2020

ABSTRACT

In the conventional casting process, the presence of porosity in the structure is inevitable. Compcasting method is one of the processes for composite production. Performing friction stir processing as a complementary process will modify the microstructure and good distribution of reinforcing particles in the matrix. Therefore, in this study, friction stir processing was used to improve the composite properties of A390 / 10wt% SiC composites. The FSP process was performed at rotational and traveling speeds of 800rpm and 40 mm / min, respectively. Three ratios of shoulder diameter to pin diameter (D/d) of 2, 2.5 and 3 were used, each of them was processed in one to three passes. An optical microscope (OM) was used to examine the microstructure of the processed samples. Microstructural data and its association with the results of the hardness and tensile test yielded the desired parameter. The results showed that FSP modifies the microstructure including resizing and distribution of SiC particles, primary silicon as well as changes the grain size of aluminum. The uniform distribution of particles on one side and the reduction of the grain size of aluminum, on the other hand, is effective in determining the desired parameter. The highest strength and toughness in the D/d ratio was 2.5 and in the third pass were 260MPa and 10.8M J/m³, respectively. Also, the average particle size of SiC, silicon and aluminum grains in the optimum parameter were 2.98, 14.98 and 16.3 μm, respectively.

Keywords Friction Stir Processing; Composite; A390 Aluminum Alloy; SiC

CITATION LINKS

[1] Evaluation of the microstructure and mechanical properties of WC particle reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir ... [2] Fabrication of tungsten particles reinforced aluminum matrix composites using multi-pass friction stir processing: ... [3] Influence of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of a compocast ... [4] Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and ... [5] Surface modification of A390 hypereutectic Al-Si cast alloys using friction stir ... [6] Role of friction stir processing on copper and copper based particle reinforced ... [7] Friction stir processing-state of the ... [8] Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir ... [9] Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed ... [10] Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 ... [11] Influence of multi-pass friction stir processing on microstructure and mechanical properties ... [12] Effect of multi-pass friction stir processing on microstructure and mechanical ... [13] Fabrication of Al 2024-boron carbide surface nano composite by friction ... [14] Friction-stir processing of an AA8026-TiB₂-Al₂O₃ hybrid nanocomposite: Microstructural developments ... [15] Review of tools for friction stir welding ... [16] Determination of a homogeneity factor for composite materials by a microstructural ... [17] Experimental investigation on the effect of process environment on the mechanical properties of AA5083/Al₂O₃ ... [18] Surface modification of cast Al-17% Si alloys using friction stir ... [19] Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction ... [20] Effect of process parameter on mechanical properties and fracture behavior of AZ91C/SiO₂ composite fabricated ... [21] Prediction of mechanical and wear properties of copper surface composites fabricated using ... [22] Effect of pin profile volume ratio on microstructure and tensile properties of friction stir processed aluminum based metal ... [23] Influence of ceramic particulate type on microstructure and tensile strength of aluminum matrix composites produced using friction stir ...

تاثیر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت A390/SiC: اثر نسبت قطر شانه به پین و تعداد پاس

جواد محمدی گنگرچ MSc

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

سلمان نوروزی* PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

حامد جمشیدی اول PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

در فرآیند ریخته‌گری متداول حضور تخلخل در ساختار اجتناب‌ناپذیر است. روش ریخته‌گری نیمه‌جامد یکی از فرایندهای مناسب برای تولید کامپوزیت است. انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان فرآیند تکمیلی سبب اصلاح ریزساختار و توزیع مناسب ذرات تقویت‌کننده در زمینه می‌شود. لذا در این تحقیق از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود خواص کامپوزیت A390/10%wtSiC استفاده شد. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در سرعت دورانی و خطی به ترتیب ۸۰۰rpm و ۴۰mm/min انجام شد. از سه نسبت قطر شانه به قطر پین (D/d) برابر با ۲/۵، ۳ و استفاده شد که هرکدام از نسبت‌ها در یک تا سه پاس فرآوری شدند. از میکروسکوپ نوری و الکترونی برای بررسی ریزساختار مقطع نمونه‌های فرآوری شده استفاده شد. داده‌های ریزساختاری و ارتباط دادن آن به نتایج حاصل از آزمون سختی و کشش موجب دستیابی به پارامتر مطلوب شد. نتایج نشان داد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی موجب اصلاح ریزساختار شامل تغییر اندازه و توزیع ذرات SiC و سیلیسیم اولیه به همراه تغییر اندازه دانه آلومینیم می‌شود. توزیع یکنواخت ذرات از یک طرف و کاهش اندازه دانه آلومینیم از طرف دیگر برای تعیین پارامتر مطلوب موثر است. بالاترین استحکام و چقرمگی در در نسبت D/d برابر ۲/۵ و در پاس سوم به ترتیب برابر ۲۶۰MPa و ۱۰۸MJ/m³ به دست آمد. همچنین اندازه متوسط ذرات SiC، سیلیسیم و دانه‌های آلومینیم در پارامتر مطلوب به ترتیب برابر ۲/۹۸، ۱۴/۹۸ و ۱۶/۳۰ میکرومتر به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت، آلیاژ آلومینیم A390، SiC

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۴

*نویسنده مسئول: s-nourouzi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پایه آلومینیم با ذرات تقویت‌کننده سرامیکی، خواصی همچون استحکام به وزن، مدول الاستیک، صلبیت و مقاومت به ساییش بالا از خود نشان می‌دهند و کاربردهای فراوانی در صنایع اتومبیل و هوایی دارند^[1].

خواص ذکرشده به دلیل توزیع یک فاز سرامیکی سخت در میان فاز نرم آلومینیم به دست می‌آید که چگونگی توزیع این ذرات عاملی تاثیرگذار بر خواص نهایی آن‌هاست. از عمده‌ترین عیب‌های این

کامپوزیت‌ها کاهش انعطاف‌پذیری به خاطر وجود ذرات ترد و پیوند ضعیف در فصل مشترک ذره-زمینه به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آن‌هاست^[2]. روش‌های مختلفی برای تولید این کامپوزیت‌ها وجود دارد و درمیان روش‌های مختلف، روش ریخته‌گری از معمول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌هاست. استفاده از روش ریخته‌گری نیمه‌جامد دارای عیوب ریخته‌گری کمتری نسبت به دیگر روش‌های ریخته‌گری است اما عیوبی همچون تخلخل همچنان در زمینه حضور دارند. از این رو اصلاح ریزساختار این کامپوزیت اهمیت فراوانی دارد^[3,4].

در آلیاژهای هایپرپروتکتیک آلومینیم همچون A390 ذرات سیلیسیم اولیه درشت به همراه ذرات سوزنی سیلیسیم یوتکتیک علاوه بر تخلخل اثر منفی بر خواص مکانیکی آن‌ها دارند. ریزشدن این سیلیسیم‌ها به همراه کاهش اندازه دانه آلومینیم و حذف تخلخل می‌تواند تاثیر بسزایی بر بالارفتن خواص این آلیاژها و کامپوزیت حاصل از آن داشته باشد^[5]. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (Friction Stir Processing; FSP) به عنوان روشی مکمل برای اصلاح ریزساختار و بالارفتن خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولیدشده به روش ریخته‌گری نیمه‌جامد در حال توسعه است. در طی FSP، فلز در معرض ترکیبی از تغییر فرم پلاستیک شدید، اختلاط و دمای موضعی بالا قرار می‌گیرد که در نتیجه این عوامل دانه‌ها و ذرات، ریز و هم محور می‌شوند. مکانیزم تولید گرما در فرآیند FSP به پارامترهای فرآیند، هدایت حرارتی قطعه، هندسه ابزار، شکل پین و جنس صفحه پشتیبان بستگی دارد^[6]. در طی فرآیند FSP گرما نزدیک سطح تماس شانه و پین تولید می‌شود که بسته به پیچیدگی هندسه قطعه این میزان گرمای ورودی متفاوت است^[7]. با افزایش گرمای ورودی دانه‌ها درشت‌تر می‌شوند که موجب استحکام و سختی پایین می‌شود. از طرفی دیگر حرارت ورودی بالا موجب جریان اغتشاشی بالاتر می‌شود و نحوه توزیع ذرات استحکام‌دهنده متفاوت می‌شود. پس برای رسیدن به خواص مطلوب حالت بهینه‌ای از گرمای ورودی باید در نظر گرفته شود. نسبت قطر شانه به قطر پین تاثیر زیادی بر جریان یافتن مواد دارد و با افزایش D/d هم افزایش فشار هیدرواستاتیک زیر شانه و هم دما در منطقه هم‌زده شده بیشتر می‌شود^[8,9]. اثر نسبت قطر شانه به قطر پین ابزار بر ریزساختار کامپوزیت پایه آلومینیم توسط برخی از محققان گزارش شده است^[10].

هوزیفا و همکاران^[3] فرآیند FSP را برای همگن کردن ریزساختار و بهبود خواص کامپوزیت AA2024/Al₂O₃ تولیدشده به روش ریخته‌گری نیمه‌جامد به کار بردند. با استفاده از این فرآیند هم ذرات آلومینا به صورت یکنواخت پخش شده‌اند و هم متوسط اندازه دانه ذرات آلومینیم کاهش یافت. ویجا یاول و همکاران^[9] اثر نسبت D/d را بر خواص مکانیکی کامپوزیت LM25-AA5% SiCp بررسی کردند و استحکام و سختی بالاتر را در نسبت ۳ به دست آوردند.

مواد و شکسته شدن ذرات در این بین‌ها بهتر صورت می‌پذیرد. برای عملکرد مناسب همچون هم‌زدن بهتر و از بین رفتن عیوب، شیبی به اندازه ۳ درجه در سطح شانه ایجاد شد که با جابجا کردن مواد به سمت جلو، مواد جدید وارد می‌شوند و مواد پشت بین را به عقب پس می‌زنند [15]. از سه نسبت D/d، ۲، ۲/۵ و ۳ برای بررسی اثر هندسه ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده شد.

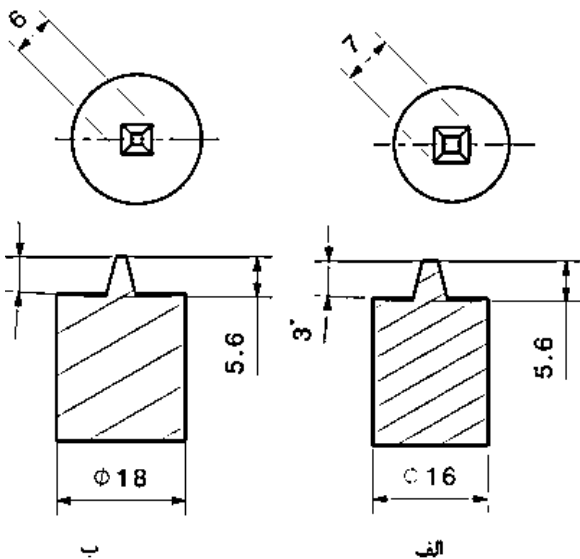
جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم A390

| عنصر | Zn | Mn | Fe | Mg | Cu | Si | Al |
|-----------|------|------|------|------|------|-------|------|
| درصد وزنی | ۰/۰۶ | ۰/۲۹ | ۰/۶۴ | ۰/۳۱ | ۴/۲۰ | ۱۸/۰۰ | پایه |

جدول ۲) خواص مکانیکی کامپوزیت A390/SiC

| سختی (HV10) | استحکام کششی (MPa) | چقرمگی (MJ/m ³) |
|-------------|--------------------|-----------------------------|
| ۱۲۱ | ۲۲۹ | ۵/۳ |

شکل ۱، شماتیک بین‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. عملیات FSP با سرعت دورانی و خطی به ترتیب ۸۰۰rpm و ۴۰mm/min در یک تا ۳ پاس با استفاده از دستگاه فرز انجام شدند. برای بررسی درشت‌ساختار و ریزساختار نمونه‌ها از مقطع عرضی، بریده شدند. نمونه‌ها برای بررسی ریزساختاری پس از مانت کردن با سمباده‌هایی با مش ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۲۵۰۰ و ۵۰۰۰ سنباده‌زنی شدند و سپس با دستگاه پولیش با ذرات آلومینا ۳ میکرومتری صیقل کاری شدند. از محلول اچ کلر برای حکاکی نمونه‌ها استفاده شد.



شکل ۱) شماتیک بین‌های مورد استفاده (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر)

برای چگونگی پخش شدن ذرات SiC در ریزساختار از فاکتور توزیع ذرات (DF) استفاده شده است که بر اساس فاصله ذرات در مسیره‌های عمودی و افقی محاسبه شده است. مقدار DF از تقسیم انحراف معیار داده‌های به‌دست‌آمده از فاصله ذرات بر میانگین

انجام فرآیند FSP در چند پاس به‌طوری که پاس‌ها روی هم قرار بگیرند، برای تولید قطعات حجیم (بالک) به کار می‌روند [11]. علاوه بر پارامترهای دیگر، ساختار اولیه در جریان مواد در فرآیند FSP موثر است. از طرفی در پاس‌های مختلف ساختار اولیه نسبت به پاس‌های قبلی متفاوت است. همچنین مقاومت مواد در مقابل سیلان در پاس‌های بعدی کمتر می‌شود [5].

یانگ و همکاران [12] اثر پاس‌های مختلف فرآیند FSP را در کامپوزیت A356/Al₃Ti بررسی کردند. در این کامپوزیت تخلخل‌ها از بین رفتند و در پاس چهارم خواص ریزساختاری و مکانیکی بهتری به‌دست آمد. /حمدی‌فرد و مؤمنی [13] اثر تعداد پاس را بر تولید کامپوزیت سطحی آلومینیم ۲۰۲۴ تقویت‌شده با ذرات کاربید بررسی کرد. مشاهده شد که اندازه ذرات تقویت‌کننده با انجام فرآوری کاهش می‌یابد و پس از ۴ پاس توزیع همگنی از ذرات به‌دست می‌آید.

هانگ و همکاران [2] اثر تعداد پاس را روی خواص مکانیکی کامپوزیت AA1060/W بررسی کردند. در اثر پاس‌های متعدد ذرات تنگستن ریزتر شد و توزیع ذرات تنگستن یکنواخت‌تر گردید. آن‌ها علت این یکنواختی و ریز شدن ذرات را به تغییر فرم پلاستیک بیشتر و تکرار شدن گرمادهی مواد در اثر پاس‌های متعدد دانستند.

/سکندری و همکاران [14] در تحقیقی اثر حرارت ورودی با استفاده از نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی و همچنین تعداد پاس را روی نانو کامپوزیت هیبریدی AA-8026 TiB₂-Al₂O₃ بررسی کردند. در این تحقیق استحکام تسلیم با افزایش حرارت ورودی و تعداد پاس تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت که علت آن توزیع یکنواخت‌تر ذرات و کاهش اندازه دانه زمینه آلومینیم ذکر شده است.

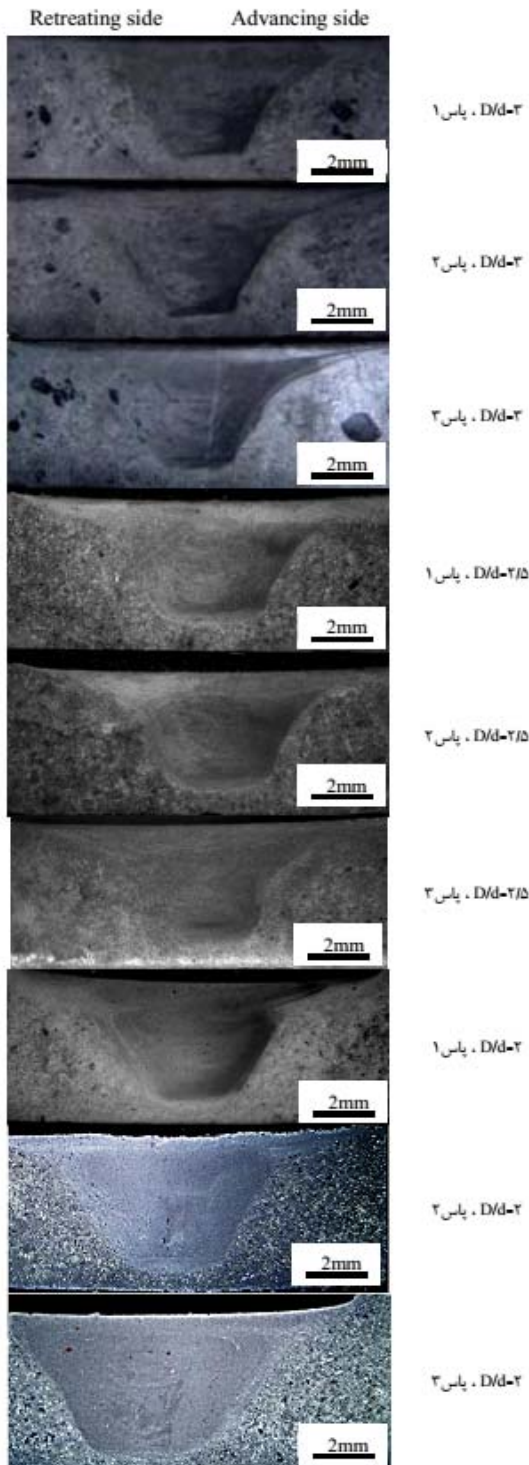
محققان زیادی اثر پارامترهای مختلف فرآوری اصطکاکی اغتشاشی را روی خواص متالورژیکی و توزیع ذرات در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی بررسی کردند اما اثر پارامترهای فرآیند فرآوری اصطکاکی بر کامپوزیت A390/SiC بررسی نشده است. هدف از این تحقیق بررسی اثر نسبت قطر شانه به قطر بین ابزار و تعداد پاس فرآیند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت A390/SiC می‌باشد.

۲- کار تجربی

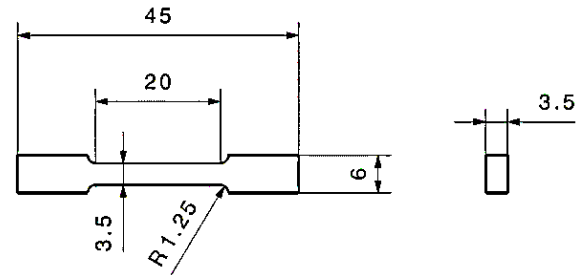
کامپوزیت A390/10wtSiC تولید شده به روش ریخته‌گری نیمه‌جامد با همزن مکانیکی به شکل صفحه‌ای به ابعاد ۱۴۰×۷۰×۷ میلی‌متر برای انجام فرآیند FSP تهیه شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ A390 مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۲ خواص مکانیکی این کامپوزیت گزارش شده است. ابزار مورد استفاده برای فرآیند FSP از جنس کاربید تنگستن می‌باشد که مقاومت به سایش بالاتری نسبت به بین‌های فولادی دارد. شکل بین به‌صورت هرم مربع‌القاعده ناقص است که مخلوط شدن

جدید و هم‌محور می‌شود. به علت کرنش پلاستیک ناشی از هم‌زدن و بالارفتن دما، ذرات سیلیسیم اولیه و یوتکتیک به ذرات ریزتر شکسته می‌شوند. در منطقه TMAZ که بین منطقه SZ و فلز پایه قرار دارد، برخی از دانه‌های آلومینیم به صورت هم‌محور درآمده‌اند؛ اما همانند ساختار در منطقه SZ به صورت یکپارچه نمی‌باشد. همچنین سیلیسیم‌های سوزنی‌شکل یوتکتیک به ذرات ریزتر شکسته شده‌اند؛ اما همانند ذرات در منطقه SZ به صورت یکنواخت نیستند و درشت‌تر می‌باشند.

فاصله‌ها به دست می‌آید. هر چه ذرات بهتر توزیع شوند مقدار DF کاهش می‌یابد به طوری که در مقدار DF برابر صفر، همگنی کامل وجود دارد و وقتی از ۴٪ بیشتر می‌شود توزیع ضعیفی از ذرات در ریزساختار به وجود می‌آید^[16]. سختی‌سنجی در منطقه هم‌زده شده (SZ) با معیار ماکرو ویکرز با بار ۱۰ کیلوگرم انجام شد. برای هر پارامتر مورد بررسی، سختی‌سنجی روی ۳ نمونه انجام شد و میانگین سختی ۳ نمونه گزارش شد. اندازه ذرات سیلیسیم، SiC و قطر متوسط دانه‌های آلومینیم با استفاده از نرم‌افزار آنالیزسیس (Analysis) اندازه‌گیری شد. برای تعیین استحکام کششی، نمونه‌های آزمون کشش در مقطع طولی منطقه FSP با هندسه‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده با دستگاه برش سیمی بریده شده است و سپس با دستگاه فرز به ضخامت مورد نظر رسید. از دستگاه کشش سنتام STM-600 برای آزمون کشش با سرعت ۵mm/min استفاده شد. برای هر پارامتر مورد بررسی، ۳ نمونه آزمون کشش تهیه شد.



شکل ۳) سطح مقطع نمونه‌ها با شرایط مختلف



شکل ۲) هندسه نمونه‌های آزمون کشش (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر)

۳- نتایج و بحث

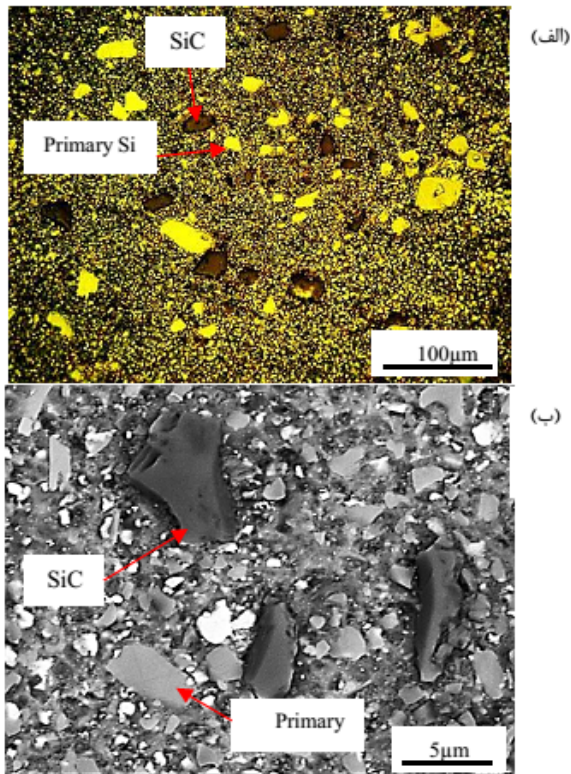
۳-۱- درشت‌ساختار و ریزساختار

در طی فرآیند FSP مواد از قسمت پیش‌رونده به سمت قسمت پس‌رونده می‌روند که اگر حرارت ورودی کافی نباشد، سیلان ماده به خوبی اتفاق نمی‌افتد و امکان تشکیل حفره در منطقه هم‌زده وجود دارد. شکل ۳، سطح مقطع نمونه‌ها با پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد که حاکی از آن است نمونه‌ها هیچ‌گونه عیبی مانند تونلی‌شدن، ترک و حفره‌های حاصل از پین را ندارند.

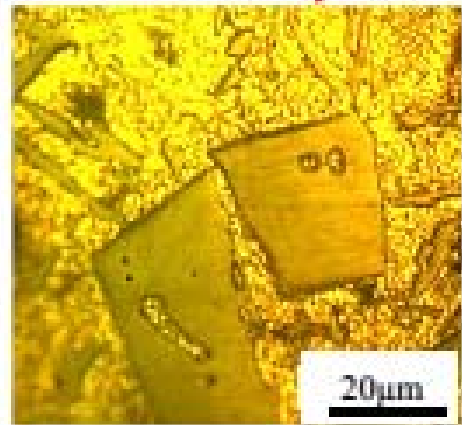
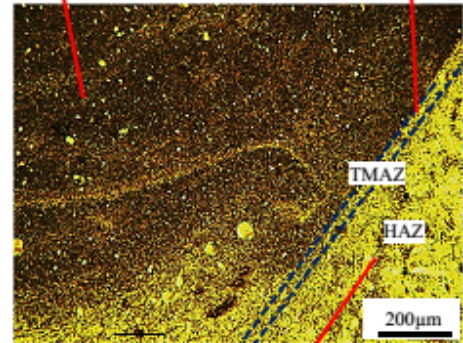
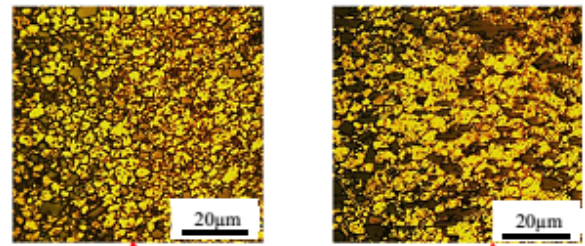
شکل ۴ مناطق به وجودآمده پس از فرآیند FSP را نشان می‌دهد. ناحیه SZ، منطقه ترمومکانیکال (TMAZ) و متاثر از حرارت (HAZ) در این شکل مشخص است.

شکل ۵، تصویر SEM از ریزساختار کامپوزیت استفاده‌شده برای انجام فرآیند FSP و فازهای موجود در آن را نشان می‌دهد که شامل ذرات سیلیسیم اولیه، سیلیسیم یوتکتیک، ترکیب بین فلزی Al₂Cu و ذرات SiC است که در زمینه آلومینیم توزیع شده‌اند. شکل ۶ ریزساختار کامپوزیت پس از فرآیند FSP را نشان می‌دهد.

پس از فرآیند FSP در منطقه SZ دندریته‌های آلومینیم باقی‌مانده بعد از ریخته‌گری نیمه‌جامد به دانه‌های ریزتر شکسته می‌شود. همچنین تبلور مجدد دینامیکی موجب به وجودآمدن دانه‌های

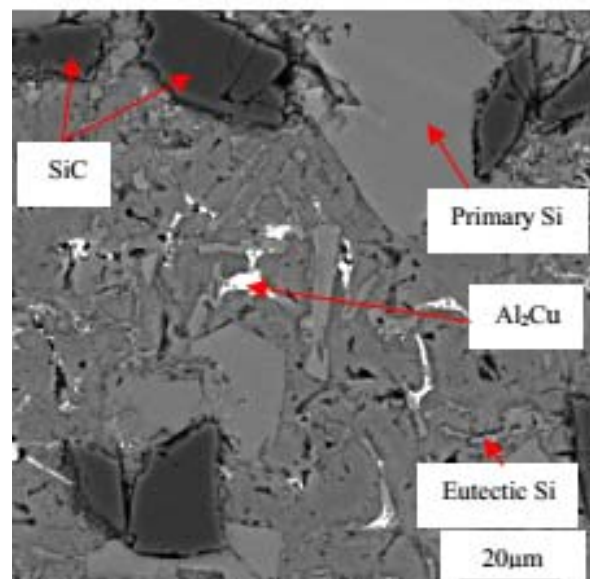


شکل ۶ ریزساختار کامپوزیت پس از فرآیند FSP (الف) میکروسکوپ نوری (ب) میکروسکوپ الکترونی FESEM

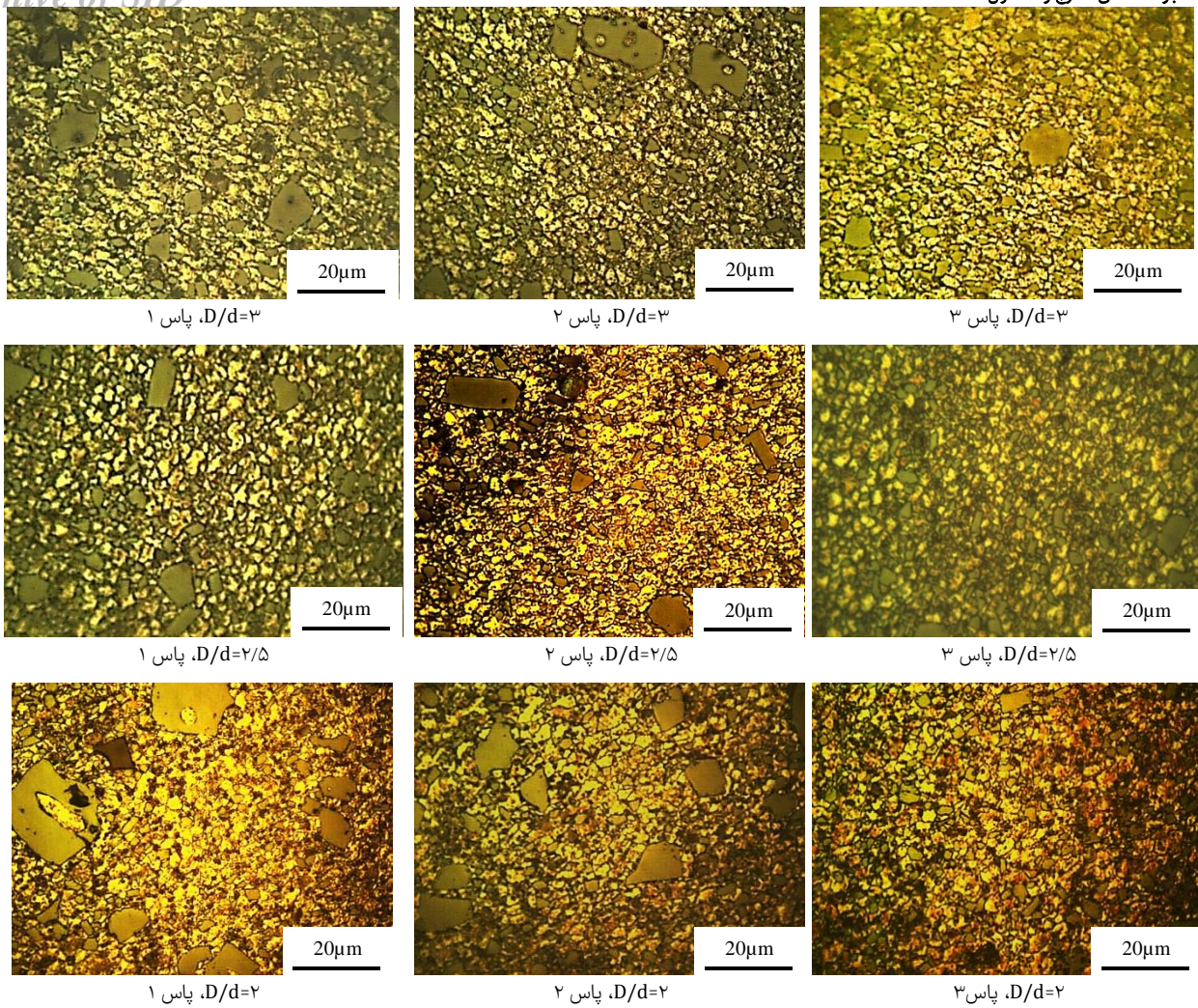


شکل ۴ مناطق مختلف کامپوزیت A390/SiC پس از فرآیند FSP

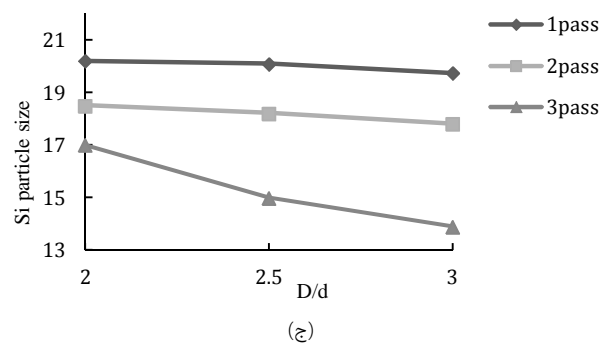
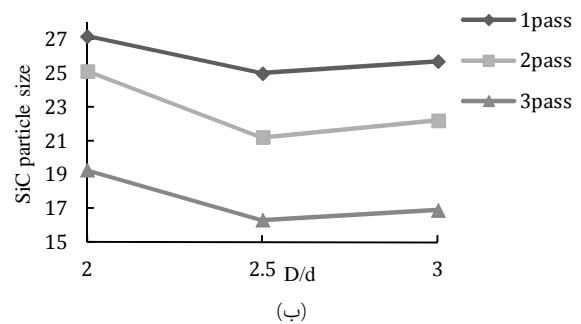
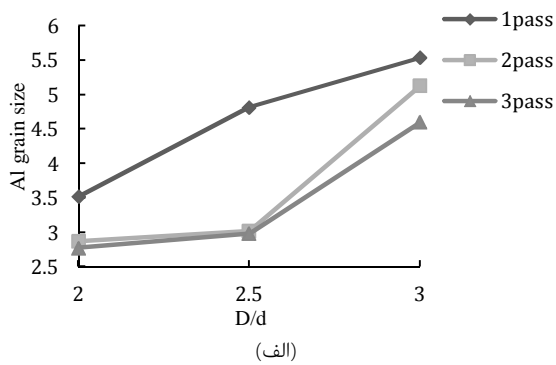
در شکل ۷ ریزساختار میکروسکوپ نوری تحت پارامترهای مختلف FSP و در نمودار ۱ داده‌های مربوط به متوسط قطر دانه‌های آلومینیم، ذرات سیلیسیم و ذرات SiC را در شرایط مختلف نشان داده شده است. با افزایش تعداد پاس، دانه‌های آلومینیم ریزتر هم می‌شوند. دو دلیل برای کاهش اندازه دانه با افزایش تعداد پاس وجود دارد. اول اینکه با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات تقویت‌کننده بهتر می‌شود و وجود ذرات در جاهای مختلف باعث ریز دانه‌تر شدن دانه‌های آلومینیم می‌شود. دوم اینکه تبلور مجدد در همه جای قطعه رخ می‌دهد و این موجب می‌شود متوسط اندازه دانه کاهش یابد^[17]. افزایش حرارت ورودی، دانه‌های حاصل از تبلور مجدد را رشد می‌دهد که دارای دانسیته نابجایی کمی هستند و کاهش حرارت ورودی دانه‌هایی ریز با دانسیته نابجایی بالا تولید می‌کند^[18]. همان‌طور که از نمودار ۱ مشخص است در هر ۳ نسبت D/d با افزایش تعداد پاس، دانه‌ها کوچکتر می‌شوند. پس از پاس اول به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده و همچنین ذرات سیلیسیم نابجایی‌های زیادی تولید می‌شود. این منابع نابجایی به همراه نابجایی‌های حاصل از ریز شدن ذرات در پاس‌های بالاتر، نیروی محرکه لازم برای تبلور مجدد دینامیکی و ریز شدن ذرات را افزایش می‌دهند^[12]. در پاس‌های بعدی آن‌ها به صورت ذرات خیلی ریز توزیع بهتری می‌یابند. چگونگی توزیع ذرات SiC با پارامتر DF، نشان داده می‌شود که قبلاً توضیح داده شد.



شکل ۵ تصویر SEM از ریزساختار کامپوزیت A390 با ۱۰ درصد وزنی SiC



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ نوری برای نشان دادن دانه‌های آلومینیم در SZ برای پارامترهای مختلف



نمودار ۱ اثر نسبت D/d بر الف) اندازه دانه آلومینیم ب) ذرات SiC و ج) ذرات سیلیسیم

آید که سختی بالا می‌رود. با افزایش D/d حرارت ورودی بالا می‌رود و اغتشاش ایجاد شده در منطقه هم‌زده بالا می‌رود. ذرات در اثر اغتشاش شکسته می‌شوند و به ذرات ریزتر تبدیل می‌شوند و توزیع بهتری از ذرات به دست می‌آید. این ذرات باعث قفل شدن نابجایی‌ها می‌شوند [19]. علاوه بر این، متوسط اندازه دانه آلومینیم نیز بر میزان سختی موثر است که با افزایش حرارت اندازه ذرات نیز درشت‌تر می‌شوند. به همین خاطر بالاترین میزان سختی در پارامتر بهینه‌ای رخ می‌دهد. بیشترین میزان سختی برابر ۱۳۳ ویکرز در پاس سوم و D/d برابر ۲/۵ به دست آمد که نسبت به کامپوزیت اولیه ۱۰ درصد افزایش یافته است. در این پارامتر توزیع یکنواخت ذرات رخ داد و دما موجب رشد دانه زیاد در منطقه SZ نمی‌شود.

جدول ۴ مقادیر سختی (HV₁₀) نمونه‌ها در پارامترهای مختلف به همراه انحراف معیار

| تعداد پاس | | ۳ | | ۲ | | ۱ | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| mean | S. D | mean | S. D | mean | S. D | mean | S. D |
| ۱۲۴ | ۲/۴۴ | ۱۲۶ | ۲/۳۳ | ۱۳۰ | ۱/۸۸ | | |
| ۱۲۸ | ۳/۵۰ | ۱۳۰ | ۲/۴۰ | ۱۳۳ | ۱/۹۲ | | |
| ۱۲۲ | ۳/۵۳ | ۱۲۳ | ۲/۵۳ | ۱۲۷ | ۲/۰۳ | | |

۳-۳- خواص کششی

استحکام کششی کامپوزیت‌های پایه آلومینیم در فرآیند FSP به‌طور کلی به حضور عیب‌های ماکرو در SZ، میزان جریان پلاستیک و هم‌خوردن مواد، اندازه دانه، توزیع و اندازه ذرات تقویت‌کننده بستگی دارد. مکانیزم‌های استحکام‌دهی مختلفی برای بهبود استحکام کششی وجود دارد. اولین مکانیزم شامل ریزش دانه‌ها طبق معادله هال-پچ که موجب استحکام بخشی می‌شود، است. در مکانیزم دوم توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده و افزایش تعداد آن‌ها در اثر ریزش موجب قفل شدن نابجایی‌ها و محدود کردن حرکت آن‌ها می‌شود. بنابراین تنش بالاتری برای حرکت نابجایی‌ها لازم است. پیوند فصل مشترک بین ذرات تقویت‌کننده و آلیاژ پایه به وسیله تنش برشی فصل مشترکی، نیروی کششی را به ذرات تقویت‌کننده منتقل می‌کند و موجب افزایش استحکام می‌شود که به‌عنوان مکانیزم سوم مطرح می‌شود. در نهایت در مکانیزم چهارم، اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی بین زمینه و ذرات SiC منجر به افزایش و تجمع نابجایی‌ها در نزدیکی فصل مشترک می‌شود که مانعی برای حرکت آزاد نابجایی‌ها می‌شود [22].

نمودار ۲ (الف تا ج) نمودار استحکام کششی و چقرمگی (سطح زیرین نمودار تنش- کرنش) برحسب تعداد پاس و نسبت D/d را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از این است که FSP خواص کششی را بهبود بخشیده است که اولین دلیل برای این بهبود خواص حذف تخلخل‌های ناشی از ریخته‌گری می‌باشد. در تعداد پاس‌های بالاتر استحکام و چقرمگی به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابند. به‌طوری که

جدول ۳ مقادیر DF را برای توزیع ذرات SiC در پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. این مقدار برای فلز پایه ۳۲٪ است. کم‌بودن این پارامتر به معنای توزیع بهتر ذرات است. مشخص است که با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات بهتر شده است یا به بیان دیگر مقدار DF کاهش یافته است. ذراتی که در پاس اول به‌صورت آگلومره وجود داشته‌اند و توزیع آن‌ها در پاس اول نسبت به فلز پایه کمتر شده بود در پاس‌های دوم و سوم در فاصله بیشتری از هم قرار گرفته‌اند و دارای توزیع بیشتری شدند.

جدول ۳ مقادیر DF ذرات SiC به همراه انحراف معیار برای پارامترهای مختلف

| تعداد پاس | | ۲ | | ۱ | | ۳ | |
|-----------|------|-------|------|-------|------|------|----|
| S. D | DF | S. D | DF | S. D | DF | S. D | DF |
| ۰/۰۱۸ | ۰/۲۷ | ۰/۰۲۹ | ۰/۲۸ | ۰/۰۳۸ | ۰/۳۱ | | |
| ۰/۰۲۳ | ۰/۲۲ | ۰/۰۲۸ | ۰/۲۷ | ۰/۰۳۵ | ۰/۳۰ | | |
| ۰/۰۲۴ | ۰/۲۹ | ۰/۰۴۱ | ۰/۳۱ | ۰/۰۴۶ | ۰/۳۲ | | |

ذرات سیلیسیم اولیه در نسبت D/d بالا و در اثر تلاطم زیاد مواد به دلیل پلاستیسیته بیشتر به ذرات ریزتر شکسته می‌شود. در نسبت D/d برابر ۲، کمترین اندازه دانه به دست آمد؛ به‌طوری که اندازه دانه به ۲/۷۷ میکرومتر رسید. کاهش در اندازه دانه با کاهش نسبت D/d به دلیل حرارت ورودی کمتر است و دانه‌ها فرصت رشد پیدا نمی‌کنند. تبلور مجدد دینامیکی مرز دانه‌های با زاویه کم را به مرزهای با زاویه بیشتر تبدیل می‌کند و دانه‌های جدید هم‌محور و کوچکتر به وجود می‌آیند [19]. با کاهش در اندازه دانه، جابجاشدن نابجایی‌ها به سختی صورت می‌پذیرد. وقتی ۲ دانه در کنار هم قرار می‌گیرند به علت متفاوت بودن جهت کریستالی نابجایی‌ها ناچار به تغییر مسیر هستند. همچنین اتم‌هایی که در مرز دانه قرار دارند دچار اعوجاج می‌شوند و پیوستگی بین صفحات لغزشی از بین می‌رود [20].

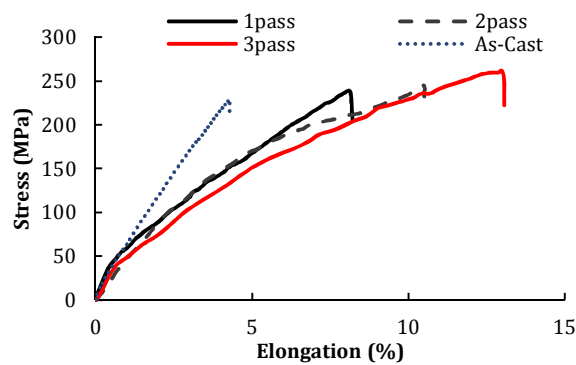
در پارامتر D/d برابر ۲/۵ و در پاس سوم، میزان DF برابر ۲۲٪ به دست آمد که نشان می‌دهد ذرات SiC به خوبی در زمینه آلومینیم پخش شده‌اند. این توزیع یکنواخت ذرات را می‌توان به جریان پلاستیک شدید ایجاد شده و هم‌خوردن مناسب مواد که از آگلومره شدن مواد جلوگیری می‌کند، نسبت داد [21].

۳-۲- سختی

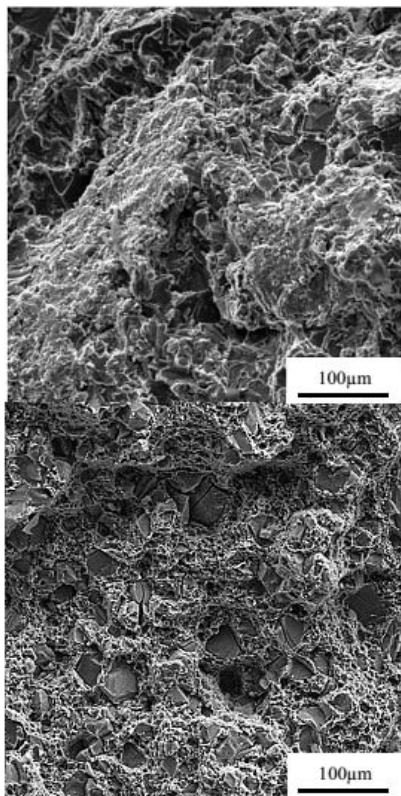
میزان سختی به نحوه توزیع و اندازه ذرات سیلیسیم و SiC و همچنین اندازه دانه آلومینیم مربوط می‌شود. در اثر اصطکاک ایجاد شده بین شانه ابزار و قطعه کار، گرما ایجاد می‌شود و این گرمای ایجاد شده تاثیر مستقیمی بر جریان ایجاد شده در SZ دارد. جدول ۴ میزان سختی را در تعداد پاس و نسبت D/d مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که از داده‌ها مشخص است در هر سه نسبت D/d با افزایش تعداد پاس، سختی افزایش پیدا کرده است. همچنین انحراف معیار داده‌ها کاهش یافته است. افزایش تعداد پاس موجب می‌شود ذرات ریزتر شوند و توزیع بهتری از آن‌ها به وجود

فرآیند FSP مشهود است. این افزایش به علت کاهش اندازه دانه و ذرات به همراه حذف تخلخل از ساختار می‌باشد. شکل ۸ سطح مقطع شکست نمونه کامپوزیت As-Cast و نمونه FSP شده با پارامتر $D/d=2/5$ پس از ۳ پاس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشخص است توزیع ذرات سیلیسیم اولیه و SiC به صورت یکنواخت نیست و قسمت عمده شکست به صورت شکست ترد اتفاق افتاده است. اما در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود که توزیع ذرات همگن‌تر است و این دلیلی بر استحکام بالاتر نمونه FSP شده است. همچنین وجود ترک در ذرات نشانگر استحکام پیوند خوب بین ذرات و زمینه است. حضور دیمل‌ها در سطح مقطع شکست این نمونه حاکی از تغییر مکانیزم شکست از ترد به نرم می‌باشد.

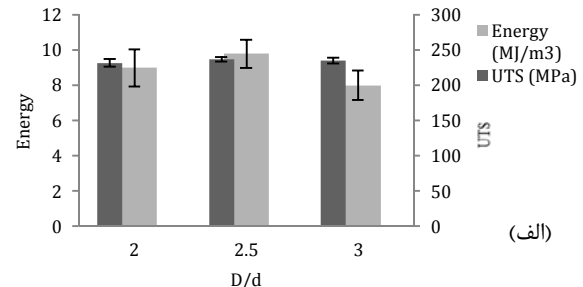


نمودار ۳) کرنش تنش-کرنش برای نمونه‌های As-Cast و پاس‌های مختلف پارامتر $D/d=2/5$

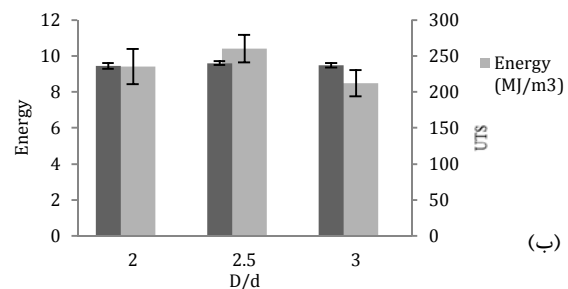


شکل ۸) تصویر SEM سطح مقطع شکست؛ الف) نمونه As Cast ب) نمونه FSP شده با پارامتر $D/d=2/5$

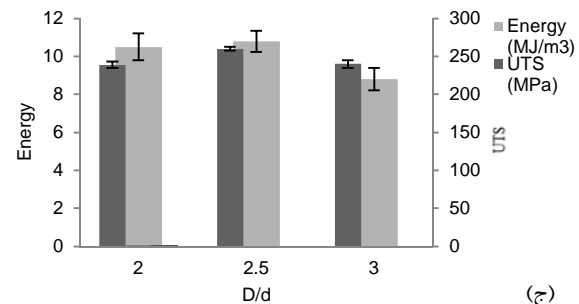
در پاس سوم نسبت D/d برابر با $2/5$ و میزان استحکام و چقرمگی به ترتیب ۹ و ۶۶ درصد نسبت به کامپوزیت اولیه افزایش پیدا کرده است. این افزایش به علت ریزش دانه‌های آلومینیم، ذرات سیلیسیم و کاربید سیلیسیم و همچنین توزیع یکنواخت‌تر این ذرات است. با افزایش پاس‌های فرآیند، کوهرسی پیوند بین ذره و زمینه بهبود می‌یابد و جدایش فصل مشترکی از بین می‌رود.



الف)



ب)



ج)

نمودار ۲) استحکام کششی و چقرمگی در نسبت D/d مختلف در الف) پاس اول ب) پاس دوم ج) پاس سوم

همچنین با ریزش دانه آلومینیم طبق رابطه هال-پچ استحکام کامپوزیت افزایش می‌یابد. ریزش دانه‌ها موجب می‌شود مرزدانه‌های بیشتری وجود داشته باشند که به عنوان موافقی برای تغییر فرم پلاستیک شدید عمل می‌کنند [23]. با افزایش نسبت D/d حرارت ورودی افزایش می‌یابد که موجب ریزش ذرات بیشتر موجود در کامپوزیت می‌شود. با افزایش بیشتر حرارت، سیالیت زیاد فلز پایه موجب می‌شود ذرات کمتر خرد شوند. اثر دیگر افزایش حرارت رشد کردن دانه‌های آلومینیم تبلور مجدد یافته است که موجب کاهش استحکام می‌شود.

نمودار ۳) نمودار تنش-کرنش را برای نمونه‌های FSP شده با نسبت $D/d=2/5$ در پاس‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین نمودار تنش-کرنش کامپوزیت استفاده شده بدون فرآیند FSP آورده شده است. افزایش هم‌زمان استحکام و درصد ازدیاد طول با انجام

- 1- Huang G, Hou W, Shen Y. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of WC particle reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing. *Materials Characterization*. 2018;138:26-37.
- 2- Huang G, Shen Y, Guo R, Guan W. Fabrication of tungsten particles reinforced aluminum matrix composites using multi-pass friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and electrical behavior. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;674:504-513.
- 3- Hoziefa W, Toschi S, Ahmed MM, Morri A, Mahdy AA, Seleman ME, et al. Influence of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of a compocast AA2024-Al₂O₃ nanocomposite. *Materials & Design*. 2016;106:273-284.
- 4- Sajjadi SA, Ezatpour HR, Torabi Parizi M. Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Materials & Design*. 2012;34:106-111.
- 5- Mahmoud TS. Surface modification of A390 hypereutectic Al-Si cast alloys using friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*. 2013;228:209-220.
- 6- Cartigueyen S, Mahadevan K. Role of friction stir processing on copper and copper based particle reinforced composites-a review. *Journal of Materials Science & Surface Engineering*. 2015;2(2):133-145.
- 7- Węglowski MS. Friction stir processing-state of the art. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;18(1):114-129.
- 8- Akramifard HR, Shamanian M, Sabbaghian M, Esmailzadeh M. Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing. *Materials & Design* (1980-2015). 2014;54:838-844.
- 9- Vijayavel P, Balasubramanian V, Sundaram S. Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed LM25AA-5% SiCp metal matrix composites. *Materials & Design*. 2014;57:1-9.
- 10- Khan NZ, Khan ZA, Siddiquee AN. Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(4-5):1450-1457.
- 11- Chen Y, Ding H, Malopheyev S, Kaibyshev R, Cai ZH, Yang WJ. Influence of multi-pass friction stir processing on microstructure and mechanical properties of 7B04-O Al alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(4):789-796.
- 12- Yang R, Zhang Z, Zhao Y, Chen G, Guo Y, Liu M, et al. Effect of multi-pass friction stir processing on microstructure and mechanical properties of Al₃Ti/A356 composites. *Materials Characterization*. 2015;106:62-69.
- 13- Ahmadifard S, Momeni A. Fabrication of Al 2024-boron carbide surface nano composite by friction stir processing. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(8):343-350. [Persian]
- 14- Eskandari H, Taheri R, Khodabakhshi F. Friction-stir processing of an AA8026-TiB₂-Al₂O₃ hybrid nanocomposite: Microstructural developments and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;660:84-96.

در این تحقیق، فرآیند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به منظور بهبود خواص کامپوزیت A390/SiC با تغییر نسبت D/d و تعداد پاس بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- با افزایش تعداد پاس در هر ۳ نسبت D/d، دانه‌های آلومینیم ریزتر و توزیع ذرات SiC در زمینه یکنواخت‌تر شده است. کمترین اندازه دانه در پاس سوم نسبت D/d=۲/۵، برابر ۲/۷۷ میکرومتر به‌دست آمد.
- ۲- با افزایش نسبت D/d توزیع ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینیم بهتر شد ولی اندازه دانه آلومینیم افزایش یافت. بهترین ضریب توزیع (DF) در نسبت D/d=۲/۵ و در ۳ پاس برابر با ۰/۲۲ به‌دست آمد که به‌عنوان پارامتر مطلوب شناخته شد.
- ۳- بالاترین میزان سختی در نسبت D/d=۲/۵ و پس از ۳ پاس برابر با ۱۳۳ ویکرز به‌دست آمد که ۱۰ درصد نسبت به کامپوزیت اولیه افزایش یافت.
- ۴- بالاترین استحکام و چقرمگی به ترتیب برابر ۲۶۰ MPa و ۱۰/۸ MJ/m³ به‌دست آمد. این نشان می‌دهد که در نسبت D/d=۲/۵ و پس از ۳ پاس، توزیع ذرات و اندازه دانه آلومینیم در شرایط بهینه قرار گرفتند.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: جواد محمدی گنگرچ (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ سلمان نوروزی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ حامد جمشیدی اول (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

۵- پی‌نوشت

| | |
|------------|-------------------------|
| علایم | |
| D | قطر شانه (μm) |
| d | قطر پین (μm) |
| DF | فاکتور توزیع |
| HV | سختی ویکرز (MPa) |
| UTS | استحکام نهایی کشش (MPa) |
| Stress | تنش (MPa) |
| Elongation | ازدیاد طول |

- friction stir processing. *Materials & Design*. 2012;37:458-464.
- 20- Dadashpour M, Mostafapour A, Yeşildal R, Rouhi S. Effect of process parameter on mechanical properties and fracture behavior of AZ91C/SiO₂ composite fabricated by FSP. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;655:379-387.
- 21- Sathiskumar R, Murugan N, Dinaharan I, Vijay SJ. Prediction of mechanical and wear properties of copper surface composites fabricated using friction stir processing. *Materials & Design*. 2014;55:224-234.
- 22- Vijayavel P, Balasubramanian V. Effect of pin profile volume ratio on microstructure and tensile properties of friction stir processed aluminum based metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;729:828-842.
- 23- 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*. 2016;4(2):209-218.
- 15- Zhang YN, Cao X, Larose S, Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012;51(3):250-261.
- 16- Yakaboylu GA, Sabolsky EM. Determination of a homogeneity factor for composite materials by a microstructural image analysis method. *Journal of Microscopy*. 2017;266(3):263-272.
- 17- Ashjari M, Mostafapour Asl A, Rouhi S. Experimental investigation on the effect of process environment on the mechanical properties of AA5083/Al₂O₃ nanocomposite fabricated via friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;645:40-46.
- 18- Saini N, Dwivedi DK, Jain PK, Singh H. Surface modification of cast Al-17% Si alloys using friction stir processing. *Procedia Engineering*. 2015;100:1522-1531.
- 19- Dolatkah A, Golbabaei P, Besharati Givi M, Molaiekiya F. Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via