



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iut.ac.ir



## ساخت و مشخصه‌یابی کامپوزیت سطحی آلومینیم ۵۰۸۳ با میکروذرات کاربید سیلیسیم توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

سعید احمدی فرد<sup>۱</sup>، نصیر شاهین<sup>۱</sup>، شهاب کاظمی<sup>۲</sup>، اکبر حیدرپور<sup>۳\*</sup>، علی شیرازی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان  
\*heidarpour@hut.ac.ir، ۶۵۱۵۵۵۷۹

### چکیده

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، یک فرآیند جدید برای اصلاح ریزساختار، خواص مکانیکی مواد و تولید کامپوزیت سطحی محسوب می‌شود. در این پژوهش، از این فرآیند برای تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی آلومینیم ۵۰۸۳ با ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم با اندازه میانگین ۵ میکرون استفاده شد. ابتدا ترکیبی از سرعت پیشروی و دورانی بر روی نمونه‌ها اعمال شد. سپس نمونه بهینه با در نظر گرفتن نتایج ریز ساختاری و با توجه به بیشترین استحکام کششی انتخاب شد. نمونه بهینه دارای سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۸ میلیمتر بر دقیقه است. پس از آن بر روی نمونه بهینه اثر تعداد پاس مورد بررسی قرار گرفت. کامپوزیت سطحی تولید شده به منظور بررسی ریز ساختار با میکروسکوپ نوری و الکترونی بررسی شد. همچنین خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده از قبیل میکروسختی و استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت تا نسبت به فلز پایه مقایسه شود. نتایج تست‌های مکانیکی نشان دهنده آن است که میکروسختی و استحکام کششی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. میکروسختی و استحکام کششی فلز پایه و نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش به ترتیب ۸۵ ویکرز و ۲۸۵ مگاپاسکال، ۱۱۸ ویکرز و ۳۱۶ مگاپاسکال رسید.

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۵/۴

پذیرش: ۹۴/۶/۱۸

### کلیدواژگان:

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

آلومینیم ۵۰۸۳

خواص مکانیکی

ریزساختار

## Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization

Saeed Ahmadifard<sup>1</sup>, Nasir Shahin<sup>1</sup>, Shahab Kazemi<sup>1</sup>, Akbar Heidarpour<sup>2\*</sup>, Ali Shirazi<sup>3</sup>

1-Department of Material Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2-Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

3-Department of Mechanical Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\* P.O.B. 65155579, Hamedan, Iran, heidarpour@hut.ac.ir

### Keywords

Friction stir processing

A15083

Mechanical properties

Microstructure

### Abstract

Friction stir processing (FSP) is a novel process for refinement of microstructure, improvement of material's mechanical properties and production of surface layer composites. In this investigation via friction stir processing, metal matrix composite (MMC) was fabricated on surface of 5083 aluminum sheets by means of 5 μm SiC particles. First combination of rotational speed and travelling speeds were performed. Optimum condition was selected due to highest tensile strength. It was seen that sample which fabricated by 1000rpm and 28mm/min had improvement in tensile strength in comparison to other conditions. After that the effect of multipass on the optimum sample were investigated. The friction processed surface composite layer was analyzed through optical and scanning electron microscopical studies. Mechanical properties of the friction stir processed surface composites were evaluated through microhardness and universal tensile tests. The results were compared with the properties of the base metal. The surface composite layer resulted in that change of tool rotational direction between FSP four passes exhibited better properties in hardness, tensile behavior and wear resistance compared to the behavior of the base metal. The microhardness and tensile strength of the as-received alloy, and surface composite after that change of tool rotational direction between four passes specimens were about 85Hv and 285 MPa, 118Hv and 316 MPa, respectively.

Please cite this article using:

Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, S. Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

را مورد بررسی قرار دادند. میسرا و همکاران [۹] لایه کامپوزیتی آلومینیم ۷۰۷۵ با ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم را با استفاده از این فرآیند تولید کردند و نشان دادند که ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم به خوبی در زمینه آلومینیم توزیع شده‌اند. مظاهری و همکارانش [۱۰] با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث توزیع یکنواخت ذرات آلومینا در زمینه آلومینیم A356 شدند که باعث بهبود و افزایش خواص مکانیکی شد. بشارتی و همکاران [۱۱] به بررسی اثر تعداد پاس بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی مس با ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم پرداختند و نتایج آنها حاکی از آن بود که با افزایش تعداد پاس خواص مکانیکی از قبیل میکروسختی و استحکام کششی بهبود یافته است.

در این پژوهش از پودر میکرونی کاربرد سیلیسیم برای تولید کامپوزیت سطحی به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق آلومینیم ۵۰۸۳ استفاده گردید. هدف این پژوهش بررسی تاثیر افزایش تعداد پاس بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از آلومینیم ۵۰۸۳ به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ ترکیبات وزنی عناصر تشکیل دهنده ورق خام ۵۰۸۳ (درصد وزنی)

| Al    | Ti   | Zn   | Mg   | Mn   | Cu   | Fe  | Si   | ماده |
|-------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| ۰/۰۲۶ | ۰/۰۲ | ۴/۲۷ | ۰/۶۱ | ۰/۰۴ | ۰/۳۱ | ۰/۱ | درصد | پایه |
|       |      |      |      |      |      |     |      | وزنی |

ورق‌ها به طول ۱۵۰ میلی‌متر و به عرض ۵۰ میلی‌متر بریده شدند. از پودر کاربرد سیلیسیم دارای خلوص ۹۹/۹۹٪ و با اندازه میانگین ۵ میکرون به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده گردید. جهت اعمال پودر شیارهای به عمق ۱/۵ میلی‌متر و عرض ۱ میلی‌متر در وسط ورق‌ها اعمال گردید. از دو ابزار برای انجام فرآیند FSP استفاده شد که ابزار اول فاقد پین بود و برای بستن سطح شیار استفاده شد تا در هنگام انجام مرحله اصلی پودرها به بیرون شیار ریخته نشود. ابزار دوم که دارای پین بوده کار اصلی که همان تولید کامپوزیت سطحی است را انجام می‌دهد. جنس ابزار در این فرآیند بسیار مهم است زیرا انتخاب جنس مناسب برای ابزار موجب کاهش ساییدگی و افزایش عمر ابزار می‌شود، ضمناً اساساً ساختار کامپوزیتی مناسب زمانی حاصل می‌گردد که سایش ابزار ایجاد نگردد. بنابراین ابزار مورد استفاده از جنس فولاد گرمکار (H13) انتخاب شد که میزان سختی آن HRC ۵۲ بود. ابعاد ابزار شامل قطر پین ۶ میلی‌متر، قطر شانه ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع پین نیز ۳ میلی‌متر بود و به منظور تسهیل جریان مواد تعقر شانه ۶ درجه در نظر گرفته شد و زاویه انحراف ابزار نسبت به سطح نمونه ۳ درجه انتخاب گردید. شکل ۱ فرآیند کلی FSP و ابزار مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

فرآیند FSP با سرعت‌های دورانی ۳۵۰، ۷۱۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در سرعت پیشروی ۲۸ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد تا در سرعت دورانی که در آن نمونه بی‌عیب تولید می‌شود به دست آید. سپس از این سه نمونه، تست کشش گرفته شد و نمونه‌ای که بیشترین استحکام کششی را داشت به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد. نتایج نشان داد که، نمونه‌ای با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نسبت به سایر نمونه‌ها از استحکام کششی بالاتری برخوردار بود و بنابراین به عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید و در این سرعت دورانی

آلیاژ ۵۰۸۳ جزو آلیاژهای سری ۵XXX محسوب می‌شود و چگالی آن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد ۲/۶۶ گرم بر سانتیمتر مکعب است. وجود منیزیم به عنوان عنصر اصلی آلیاژی در این آلیاژ علاوه بر این که استحکام محلول جامد را بالا می‌برد، باعث افزایش خصوصیات کار سختی نیز می‌شود [۱].

از ویژگی‌های این آلیاژ می‌توان به قابلیت سخت شدن با کار مکانیکی، مقاومت به خوردگی عالی، چقرمگی بالا و جوش پذیری مناسب اشاره کرد. از این آلیاژ برای ساخت قایق‌های تندرو به صورت ورق ماشینکاری شده برای بدنه، تقویت‌سازی عرشه و بدنه استفاده می‌شود. همچنین در ساخت تانک-های کروی بزرگ مخصوص حمل‌ونقل گازهای طبیعی مایع شده با کشتی اشاره کرد. از دیگر کاربردهای این آلیاژ می‌توان در صنایع دریایی، آلات حفاری در دکل‌های دریل کاری، برج‌های تلویزیونی، وسایل و قطعات مرتبط به موشک را نام برد [۱].

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی اخیراً توسط میسرا<sup>۱</sup> و همکاران [۲،۳] به عنوان فرآیندی برای اصلاح ریزساختار فلزات ابداع شده که بر پایه اصول اولیه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بنا شده است. اساس و پارامترهای این دو فرآیند مشابه هم هستند و تفاوت‌های اندکی بین آنها وجود دارد، همچنین از نظر تغییرات ریزساختاری و خواص ماده تفاوتی بین دو روش وجود ندارد. هدف فرآیند FSP اتصال دو قطعه به هم نیست، بلکه اصلاح ساختار، تغییر اندازه دانه‌ها، بالا بردن استحکام، یکنواخت کردن ساختار از نظر اندازه دانه، توزیع رسوبات و ایجاد کامپوزیت‌های سطحی به عنوان دستاوردهای این فرآیند مطرح هستند. در فرآوری اصطکاکی اغتشاشی پین ابزار در حال دوران داخل قطعه کار یکپارچه نفوذ می‌کند، تا به منظور تقویت خواص مورد نظر در فلز، اصلاحات ریزساختاری موضعی ایجاد کند. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند موفق در اصلاح خواص گوناگون مانند شکل‌پذیری، سختی، استحکام کششی، سایش و مقاومت به خوردگی محسوب می‌شود [۵،۴].

دلایل زیادی برای تمایل طراحان و مهندسان به استفاده از قطعات از جنس کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد که جدای از نیاز به افزایش استحکام و سفتی است. کامپوزیت‌ها قابلیت فراهم‌آوری قطعات دارای خواص انتخابی برای کاربردهای بسیار تخصصی را دارند که در آنها، محدوده‌ای از خواص فیزیکی و مکانیکی را می‌توان از مجموعه سرامیک و فلز (یا آلیاژ) بدست آورد. بعضی از عوامل مهم مورد توجه عبارتند از: بهبود استحکام در دماهای بالا، بهبود مدول، امکان کاهش وزن با بالا بردن نسبت استحکام به وزن، بهبود مقاومت سایشی، بهبود مقاومت در برابر خزش و کاهش ضریب انبساط حرارتی [۶].

همانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی نیز اولین بار بر روی آلومینیم انجام گرفت. هسو<sup>۲</sup> و همکاران [۷] مدول یانگ و استحکام کششی آلومینیم را با تولید نانو کامپوزیت Al/Al<sub>3</sub>Ti به روش اصطکاکی اغتشاشی افزایش دادند. آنها نشان دادند که مدول یانگ لایه کامپوزیتی تولید شده، با افزایش درصد Al<sub>3</sub>Ti به شدت افزایش می‌یابد. با افزودن ۱۵٪ تیتانیوم مدول یانگ به ۱۱۴GPa می‌رسد که ۶۳٪ بیشتر از مدول یانگ آلومینیم است. شفییعی و همکاران [۸] نانو کامپوزیت آلومینیم با نانو ذرات آلومینا را با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در پاس‌های مختلف این فرآیند تولید کردند و ریزساختار و خواص سایشی لایه کامپوزیتی حاصل

1. Mishra  
2. Hsu

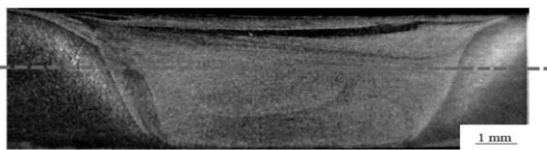
تست کشش در دمای محیط و با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام گرفت. نمونه بهینه تحت تعداد پاس‌های ۱، ۲ و ۴ و ۴ پاسه با تغییر جهت چرخش قرار گرفت تا این نمونه‌ها با فلز پایه و نمونه بدون پودر که با همان سرعت دورانی و پیشروی انجام شده بود مقایسه شوند.

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده، نمونه‌هایی عمود بر سطح مقطع فرآوری شده طبق استاندارد ASTM E3-01 برای انجام فرآیند متالوگرافی تهیه گردید تا با میکروسکوپ نوری (مدل Metallux3) و الکترونی (مدل JEOL) مورد بررسی قرار گیرند. به منظور بررسی موضعی کامپوزیت تولید شده آنالیز تفرق اشعه ایکس نیز گرفته شد. برای آشکارسازی ساختار نمونه‌ها از محلول زیر که ترکیب آن در جدول ۳ آورده شده است استفاده گردید.

سختی سطحی نمونه‌های فرآوری شده در فاصله ۱/۵ میلی‌متری از سطح در نقاط متفاوت از سطح مقطع (شکل ۳) با استفاده از استاندارد ASTM E384 به روش میکرو ویکرز توسط دستگاه Buehler با نیروی ۲۰۰ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه انجام شد.

**جدول ۳ ترکیب شیمیایی محلول اچ مورد استفاده**

| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | HNO <sub>3</sub> | HF    | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|-------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|
| ۸۴ml                          | ۱۵/۵ml           | ۰/۵ml | ۳gr                            |



شکل ۳ محل انجام تست میکروسختی

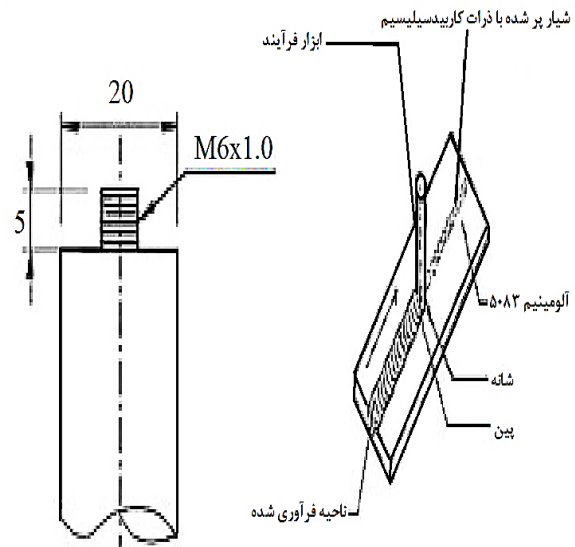
### ۲- نتایج و بررسی

#### ۱-۲- ریزساختار

تغییر شکل پلاستیک و افزایش دما در منطقه فرآوری شده منجر به تبلور مجدد دینامیکی و تغییر در ریزساختارها در ناحیه اغتشاشی و تجزیه رسوبات و درشت شدن در اطراف این ناحیه می‌شود. بر این اساس سه ناحیه مختلف با نام‌های ناحیه اغتشاشی<sup>۱</sup>، ناحیه متأثر از فرآیند ترمومکانیکی<sup>۲</sup> و ناحیه متأثر از حرارت<sup>۳</sup> قابل تشخیص است. تفاوت این سه ناحیه در شکل ۴ نشان داده شده است. در طی فرآوری اصطکاکی اغتشاشی افزایش دما و نیز تغییر شکل پلاستیک شدید باعث تشکیل دانه‌بندی ریز در ناحیه اغتشاش یافته می‌شود [۱۲-۱۵]. بازیابی دینامیکی<sup>۴</sup>، تبلور مجدد دینامیکی هندسی<sup>۵</sup> و تبلور مجدد ناپیوسته پویایی<sup>۶</sup> به عنوان مکانیسم‌هایی ذکر شده‌اند که می‌توانند سبب اصلاح دانه شوند [۱۶-۱۸]. به عنوان یک نتیجه اینکه، در اثر تغییر شکل پلاستیک در طول ناحیه اغتشاش ایجاد شده، دانه‌ها شکسته شده و جهت-گیری جدیدی بوجود می‌آورند که باعث تشکیل مرزدانه‌هایی با زاویه کم می‌شوند و نقاط مناسب برای هندسه تبلور مجدد تولید خواهد شد [۱۷-۱۹].

1. Stir zone (SZ)
2. Thermo Mechanical Effect Zone (TMAZ)
3. Heat Effect Zone (HAZ)
4. Dynamic recovery (DRV)
5. geometric dynamic recrystallization (GDRX)
6. Discontinuous dynamic recrystallization (DDRX)

فرآیند در تعداد پاس‌های ۱، ۲، ۴ و ۴ پاسه با تغییر در جهت چرخش انجام گرفت تا با نمونه بدون پودر که با همان سرعت پیشروی و دورانی انجام شده بود مقایسه شوند. شماره نمونه‌ها و عملیات بهره‌وری آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

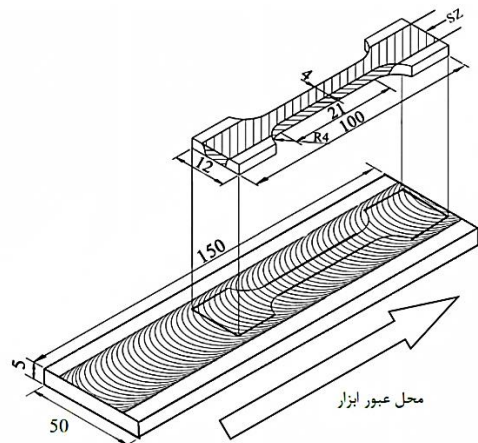


شکل ۱ شماتیک فرآیند و ابزار مورد استفاده (بر حسب میلی‌متر)

#### جدول ۲ عملیات فرآوری اصطکاکی اغتشاشی هر نمونه

| شماره نمونه | عملیات فرآوری اغتشاشی اصطکاکی  |
|-------------|--------------------------------|
| ۱           | نمونه بدون پودر تقویتی         |
| ۲           | تک پاسه                        |
| ۳           | دو پاسه                        |
| ۴           | چهار پاسه                      |
| ۵           | چهار پاسه با تغییر در جهت چرخش |

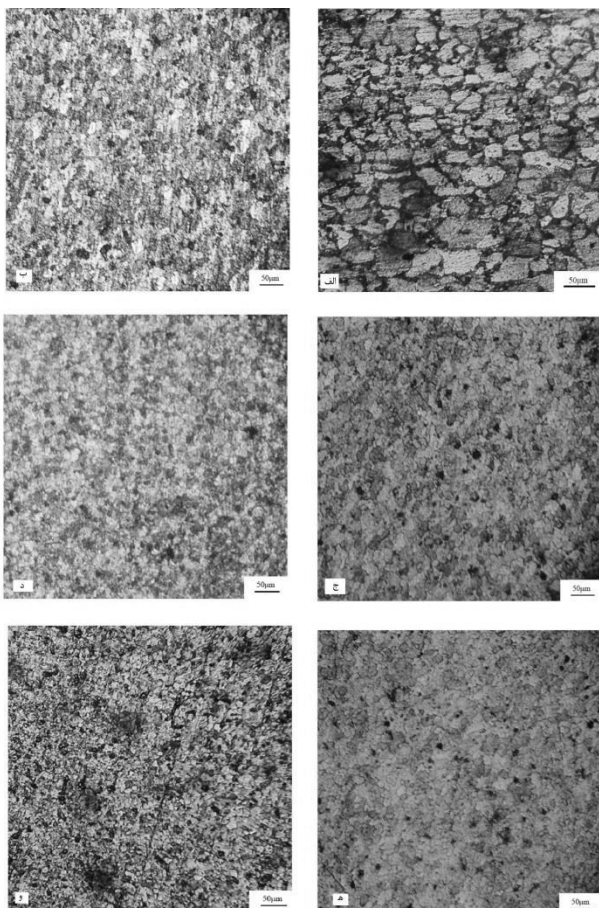
شکل ۲ نحوه برش و ابعاد نمونه‌ها تهیه شده برای تست کشش را نشان می‌دهد که طبق استاندارد ASTM E8/E8M-011 از مسیر فرآوری تهیه شد.



شکل ۲ نحوه برش و ابعاد نمونه‌های تست کشش (بر حسب میلی‌متر)

پاس‌ها توزیع ذرات تقویت‌کننده یکنواخت‌تر شده و هر گونه آگلومره شده ذرات را از بین می‌برد تا تعداد بیشتری از فصل مشترک زمینه و ذرات کاربید سیلیسیم ایجاد گردد [۲۰].

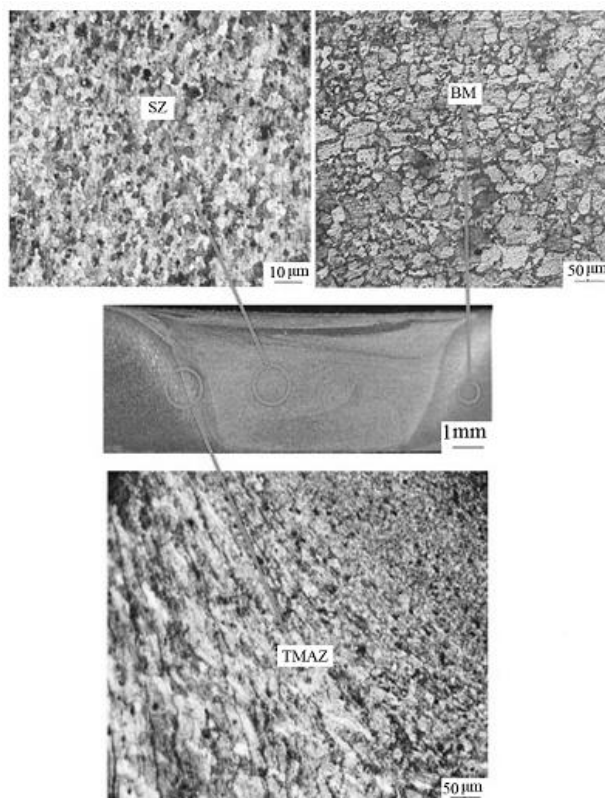
وجود ذرات کاربید سیلیسیم در ساختار مانند یک مانع در برابر رشد دانه‌ها عمل کرده و باعث ریز شدن دانه می‌شود، به این عمل، پینینگ گفته می‌شود ولی این امکان وجود دارد که با افزایش دما در طی فرآیند میزان انرژی ذخیره شده در مرزدانه‌ها بالا رفته و باعث رشد دانه‌ها شود. از سوی دیگر ذرات کاربید سیلیسیم به عنوان محلی برای جوانه‌زنی همگن در طی تبلور مجدد عمل کرده و باعث کاهش اندازه دانه در ساختار می‌گردد [۱۹].



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه اغتشاشی. (الف) فلز پایه، (ب) نمونه بدون پودر، (ج) نمونه تک پاسه، (د) نمونه دو پاسه، (ه) نمونه چهار پاسه، (و) نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی از توزیع ذرات در ناحیه اغتشاشی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج آنالیز عنصری<sup>۱</sup> نیز از نقطه مشخص شده نشان دهنده ذرات کاربید سیلیسیم است.

سه عامل مهم به عنوان مانع در برابر حرکت نابجایی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی سطحی وجود دارد: (۱) مرزدانه‌ها (۲) برابر نبودن ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه فلزی (۳) رفتار تغییر شکل غیر مشابه بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه فلزی [۲۰]. در جدول ۴ میانگین اندازه دانه در ناحیه اغتشاش یافته آورده شده است.



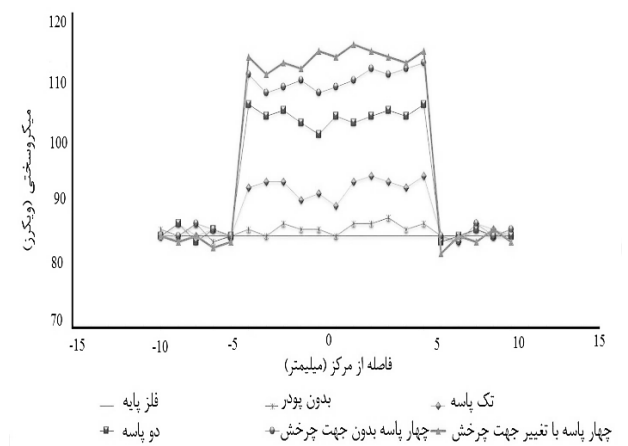
شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه فرآوری شده

در مقایسه شکل ۵ الف با ب متوجه خواهیم شد که در فرآیند FSP بر روی نمونه بدون پودر، میانگین اندازه دانه‌ها از ۴۵ به ۳۲ میکرون رسیده است که نسبت به فلز پایه کاهش یافته و که علت آن تغییر شکل پلاستیک است. در مقایسه شکل ۵ ب مربوط به نمونه بدون پودر با شکل ۵ ج که از ذرات کاربید سیلیسیم استفاده شده است میزان اندازه دانه در نمونه با پودر کاهش یافته است. در مقایسه شکل‌ها با یکدیگر می‌توان دریافت که با افزایش تعداد پاس‌ها اندازه دانه بیشتر کاهش می‌یابد و نکته قابل توجه این است که در نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس اندازه دانه نسبت به نمونه دیگر چهار پاسه که بدون تغییر جهت چرخش در هر پاس است کاهش یافته است که علت آن توزیع بهتر ذرات در زمینه است. دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی به دلیل وقوع تبلور مجدد پویا در اثر بالا بودن کرنش و گرمای اصطکاکی حین فرآیند اغتشاشی، محوری و به طور کامل تبلور مجدد می‌شوند. به طور کلی گرمای حاصل از اصطکاک بین شانه، پین و قطعه کار می‌تواند انرژی کافی را برای رساندن دمای ناحیه اغتشاشی به  $0.16 - 0.18 T_m$  دمای نقطه ذوب ماده تامین کند، که این دما از دمای مربوط به تبلور مجدد (حدود  $0.5 T_m$ ) بیشتر است. آلومینیم و آلیاژهای آن معمولاً تبلور مجدد پویای ناپیوسته را به دلیل نرخ بالای بازبایی ناشی از انرژی نقص در چیده شدن، تحمل نمی‌کنند، مکانیزم تبلور مجدد پویای ناپیوسته توسط جوانه‌زنی دانه‌های جدید در مرزهای بزرگ زاویه قدیمی و مهاجرت مرزدانه مشخص می‌شود، چندین مکانیزم برای تبلور مجدد پویای پیوسته مطرح شده است که به موجب آن‌ها زیردانه‌ها چرخیده و یک اختلاف زاویه جهت‌گیری بالا با مهاجرت کوچک مرز به دست می‌آید و در نتیجه آن اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد. در واقع پاس اول فرآیند FSP منجر به اصلاح ریزساختار و باعث تشکیل دانه‌های ریز در ناحیه اغتشاش یافته می‌شود. با افزایش بیشتر تعداد

1. Energy dispersive spectroscopy (EDS)

FSP شده میزان سختی به ۹۰ رسید که نسبت به فلز پایه به میزان ۵ Hv افزایش یافته است. طبق رابطه هال-پچ اندازه دانه با سختی رابطه عکس دارند بطوری که با کاهش اندازه دانه میزان سختی افزایش می‌یابد و به علت اینکه اندازه دانه‌ها در نمونه بدون پودر کمتر از فلز پایه است سختی افزایش یافته است [۲۱]. از سوی دیگر افزایش گرمای ورودی به فلز پایه، موجب آنیل شدن نمونه شده و چگالی نابجایی‌ها و میزان تنش پسماند کمتر شده و در نتیجه میزان سختی نیز کاهش می‌یابد. در نمونه FSP شده با پودر سه عامل باعث افزایش سختی می‌گردد: (۱) کاهش اندازه دانه (۲) حضور ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم در زمینه آلومینیم و (۳) اثر کرنش سختی به علت متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم و زمینه آلومینیم [۲۲].

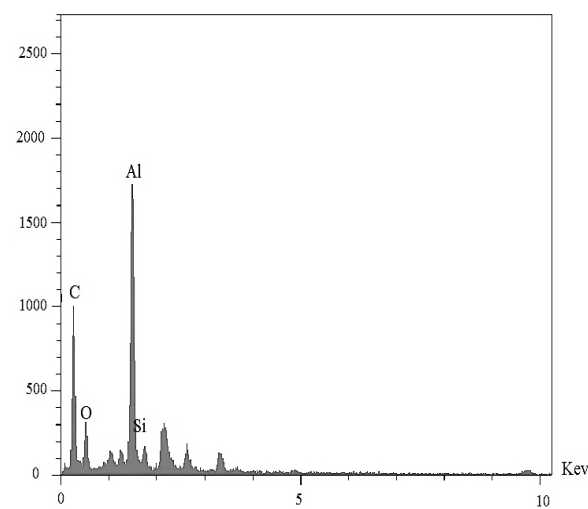
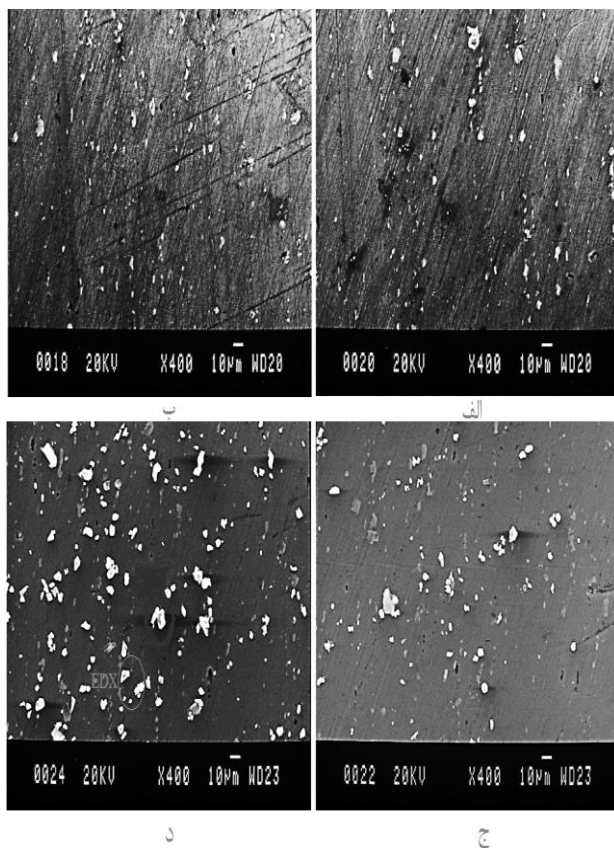
شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس میزان سختی افزایش یافته است و ماکزیمم سختی مربوط به نمونه چهار پاس با تغییر جهت چرخش در هر پاس است که میزان سختی به ۱۱۸ رسیده است و حدود ۳۸ درصد نسبت به فلز پایه افزایش یافته است و علت آن می‌تواند کاهش ۶ برابری اندازه دانه نسبت به فلز پایه باشد.



شکل ۷ پروفیل سختی ناحیه اغتشاش یافته

### ۳-۳- تست کشش

شکل ۸ و ۹ نتایج تست کشش برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است میزان استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به فلز پایه افزایش یافته است ولی ازدیاد طول نمونه‌های بدون پودر و تک پاسه کاهش پیدا کرده است و همچنین با افزایش تعداد پاس‌ها میزان ازدیاد طول نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است. در واقع تنها راه افزایش همزمان انعطاف‌پذیری و استحکام ریزدانه کردن ساختار می‌باشد. بیشترین استحکام تسلیم و استحکام کششی مربوط به نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس است، بطوری که استحکام تسلیم و استحکام کششی به ترتیب ۳۰ و ۳۵ مگاپاسکال نسبت به فلز پایه افزایش یافته است. در واقع سه عمل باعث افزایش استحکام کششی می‌شود (۱) نابجایی‌ها (۲) اندازه دانه (۳) مکانیزم اوروان: به علت نزدیک بودن فاصله ذرات سخت به یکدیگر، مهاجرت نابجایی‌ها قطع می‌شود بنابراین برای تغییر شکل پلاستیک باید تنش بیشتری را اعمال کرد که این خود باعث افزایش استحکام ماده مورد نظر می‌شود [۲۳].



شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اغتشاشی (الف) تک پاسه (ب) دو پاسه (ج) چهار پاسه (د) چهار پاسه با تغییر جهت چرخش (ه) نتیجه آنالیز عنصری

جدول ۴ میانگین اندازه دانه‌ها

| نمونه            | فلز پایه | ۱  | ۲    | ۳    | ۴   | ۵   |
|------------------|----------|----|------|------|-----|-----|
| اندازه دانه (μm) | ۴۵       | ۳۲ | ۱۲٫۷ | ۱۰٫۲ | ۸٫۷ | ۷٫۹ |

### ۲-۲- میکروسختی

میانگین سختی آلومینیم ۵۰۸۳ اندازه‌گیری شده ۸۵ Hv به دست آمد. شکل ۷ نمودار سختی نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. در نمونه بدون پودر

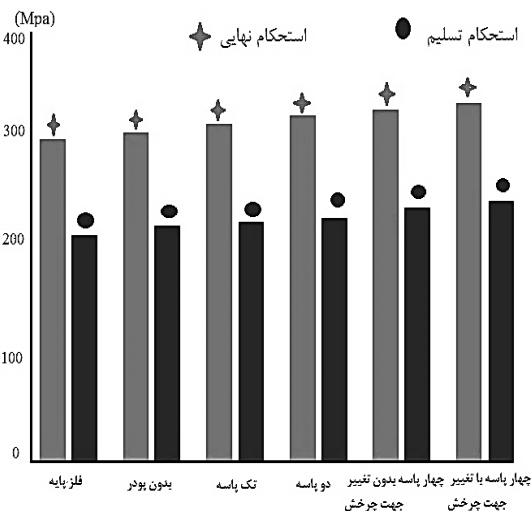
دانه در نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش، حدود ۶ برابر نسبت به فلز پایه کاهش پیدا کرده است.

### ۵- تقدیر و تشکر

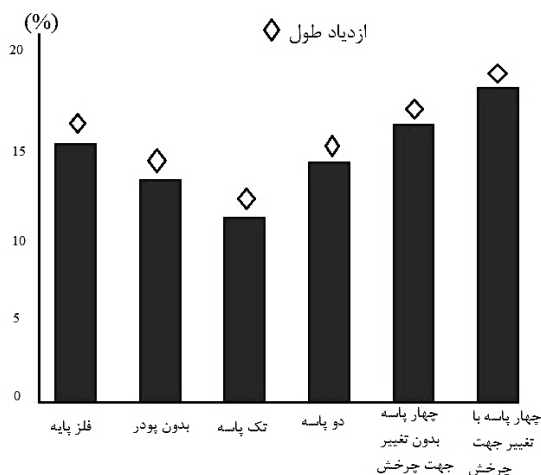
نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از مسئولین محترم آزمایشگاه‌های خواص مکانیکی، ماشین ابزار، SEM و متالوگرافی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا به دلیل همکاری‌شان تقدیر و تشکر نمایند.

### ۶- مراجع

- [1] CHEN, S. R. and HWU, y., "An Investigation into Hot Deformation Resistance of an AA5083 Alloy," China Steel Technical Report, Vol. 25, pp. 60-65, 2012.
- [2] Mishra, R. S. Mahoney, M. W. McFadden, S. X. Mara, N. A. and Mukherjee, A. K., "High Strain Rate Superplasticity in a Friction Stir Processed 7075 Al alloy," Scripta Materiala, Vol. 42, pp. 163-168, 2000.
- [3] Mishra, R. S. and Mahoney, M. W., "Friction Stir Processing: a New Grain Refinement Technique to Achieve High Strain Rate Superplasticity in Commercial Alloys," Materials Science Forum, Vol. 507, pp. 357-359, 2001.
- [4] Mishra, R. S. Ma, Z. Y. and Charit, I., "Friction Stir Processing: a Novel Technique for Fabrication of Surface Composite," Materials Science and Engineering A, Vol. 341, pp. 307-310, 2003.
- [5] Abdi, R. Behnagh, M. Besharati Givi, M. K. and Akbari, M., "Mechanical Properties, Corrosion Resistance, and Microstructural Changes During Friction Stir Processing of 5083 Aluminum Rolled Plates," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 27, pp. 636-640, 2012.
- [6] Degischer, H. p., "Innovative Light Metals: Metal Matrix Composites and Foamed Aluminium," Materials & Design, Vol. 18, pp. 221-226, 1997.
- [7] Hooker, J. A. and Doorbar, P. J., "Metal Matrix Composites for Aeroengines," Materials Science and Technology, Vol. 16, pp. 725-730, 2000.
- [8] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Zarei- Hanzaki, A., "Wear Assessment of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-composite Surface Layer Produced Using Friction Stir Processing," Wear, Vol. 270, pp. 403-412, 2011.
- [9] Mishra, R. S. Ma, Z.Y. and Charit, I., "Friction Stir welding and Processing," Materials Science and Engineering, Vol. 50, pp. 1-78, 2005
- [10] Mazaheri, Y. Karimzadeh, F. and Enayati, M. H., "A Novel Technique for Development of A356/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Surface Nanocomposite by Friction Stir Processing," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 1614-1619, 2011.
- [11] Besharati Givi, M. K. and Barmouz, M., "Fabrication of in Situ Cu/SiC Composites Using Multi-pass Friction Stir Processing: Evaluation of Microstructural, Porosity, Mechanical and Electrical Behavior," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 42, pp. 1445-53, 2011.
- [12] Ma, Z. Y. Mishra, R. S. and Mahoney, M. W., "Superplastic Deformation Behaviour of Friction Stir Processed 7075Al Alloy," Acta Materiala, Vol. 50, pp. 4419-30, 2002.
- [13] Li, Y., "Flow Visualization and Residual Microstructures Associated with the Friction-stir Welding of 2024 Aluminum to 6061 Aluminum," Material Science and Engineering A, Vol. 271, pp. 213-220, 1999.
- [14] Murr, L. E., "Intercalation Vortices and Related Microstructural Features in the Friction-stir Welding of Dissimilar Metals," Material Research Innovations, Vol. 2, pp. 150-163, 1998.
- [15] Kwon, Y. J. Shigematsu, I. and Saito, Y., "Mechanical Properties of Fine-Grained Aluminum Alloy Produced by Friction Stir Process," Scripta Materiala, Vol. 49, pp. 785-9, 2003.
- [16] Humphreys, F. J. and Hatherly, M., "Recrystallization and Related Annealing Phenomena," Oxford, Elsevier, 2004.
- [17] Feng, A. H. and Ma, Z. Y., "Microstructural Evolution of Cast Mg-Al-Zn During Friction Stir Processing and Subsequent Aging," Acta Materiala, Vol. 57, pp. 4248-4260, 2009.
- [18] McNelley, T. R. Swaminathan, S. and Su, J. Q., "Recrystallization Mechanisms During Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys," Scripta Materiala, Vol. 58, pp. 349-54, 2008.
- [19] Humphreys, F. J., "Fine-grained Alloys by Thermomechanical Processing," Solid State Material Science, Vol. 5, pp. 15-21, 2001.
- [20] auri, R. Yadav, D. and Suhas, G., "Effect of Friction Stir Processing (FSP) on Microstructure and Properties of Al-TiC in Situ Composite," Material Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 4732-9, 2011.
- [21] Ma, Z. Y., "Friction Stir Processing Technology: a Review," Metal Material Transaction A, Vol. 39, pp. 642-58, 2008.
- [22] Mishra, R.S. and Ma, Z. Y., "Friction Stir Welding and Processing," Material Science and Engineering R, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [23] Shahraki, S. Khorasani, S. Abdi, R. Fotouhi, Y. and Bisadi, H., "Producing of AA5083/ZrO<sub>2</sub> Nanocomposite by Friction Stir Processing (FSP)," Metallurgical And Materials Transactions B. Vol. 44. pp. 1546-1554, 2013.



شکل ۸ خواص مکانیکی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده



شکل ۹ داکتیلیته فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرآیند FSP با موفقیت بر روی ورق آلومینیم ۵۰۸۳ با ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- ✓ عملیات FSP با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۸ میلیمتر بر دقیقه منجر به بالاترین استحکام کششی شد.
- ✓ با افزایش تعداد پاس‌ها، خواص مکانیکی از قبیل سختی و استحکام کششی نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرد، بطوری که میزان سختی و استحکام کششی به ترتیب ۳۸ و ۱۱ درصد نسبت به فلز پایه افزایش یافت.
- ✓ با افزایش تعداد پاس‌ها، احتمال آگلومره شدن کاهش و توزیع ذرات در زمینه بهبود پیدا کرد و این خود باعث افزایش انعطاف‌پذیری شده است.
- ✓ در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و تبلور مجدد دینامیکی، یک ساختار ریزدانه در ناحیه اغتشاشی بوجود آمد. بطوری که اندازه