



## اثر پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت سطحی Al5052/SiC

محمد گیوی<sup>1</sup>، امیر حسین قاسمی<sup>1</sup>، محمود عباسی<sup>2\*</sup>

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه کاشان، کاشان

2- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه کاشان، کاشان

\* کاشان، صندوق پستی 8731753153، m.abbasi@kashanu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 تیر 1397

پذیرش: 5 مهر 1397

ارائه در سایت: اسفند 1397

### کلیدواژگان:

پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی

ذرات نانوپودر SiC

کامپوزیت سطحی

ریزساختار

خواص مکانیکی

فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی روش پردازش سطحی است که برای بهسازی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی سطح فلز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، قطعه کار عمود بر جهت پردازش در حین پردازش اصطکاکی اغتشاشی، ارتعاش مکانیکی می‌یابد. پیشروی طولی و حرکت چرخشی شانه ابزار با حرکت ارتعاشی قطعه‌کار همراه است. این فرایند، تحت عنوان "پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی" نام‌گذاری شد. اثرات فرایندهای پردازش اصطکاکی اغتشاشی و پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 5052 شامل نانوذرات SiC بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که حضور ارتعاش در حین پردازش اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش اندازه دانه در منطقه اغتشاش و افزایش همگنی توزیع ذرات می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استحکام و درصد افزایش طول نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده کمتر از این مقادیر برای نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده هستند. این خواص به افزایش یافتن کرنش ماده در منطقه اغتشاش با اعمال ارتعاش نسبت داده می‌شود که سبب می‌شود تبلور مجدد در حین پردازش اصطکاکی اغتشاشی افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهد که خواص حاصل از پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی با افزایش فرکانس ارتعاش بهبود می‌یابد.

## The effect of friction stir vibration processing on microstructure and mechanical properties of Al5052/SiC surface nano composite

Mohammad Givi, Amir Hossein Ghasemi, Mahmoud Abbasi\*

Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* P.O.B. 8731753153 Kashan, Iran, m.abbasi@kashanu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 11 July 2018  
Accepted 27 September 2018  
Available Online March 2019

### Keywords:

Friction stir vibration processing  
SiC nano particles  
Surface composite  
Microstructure  
Mechanical properties

### Abstract

Friction stir processing (FSP) is a surface processing method to modify the microstructure and enhance the mechanical properties of metal surface. In the current research, the work specimen is vibrated normal to processing line during FSP. Transverse and rotation movements of shoulder are accompanied with vibration motion of specimen. This new process is entitled FSVP (friction stir vibration processing). The effects of FSP and FSVP processes on microstructure and mechanical properties of Al5052 alloy matrix composite incorporated SiC nanoparticles are analyzed. The results show that the presence of vibration during FSP leads to the grain size decrease in the stir zone and it enhances the homogeneity of particles distribution. The results indicate that strength and ductility of FS processed specimens are lower than those processed by FSVP. These are related to increased deformation and strain of soft material in the stir zone as vibration is applied which promotes the dynamic recrystallization during FSP. The results also imply that the characteristics of FSVP processed specimens improve as vibration frequency enhances.

### 1- مقدمه

مماس شود. سپس ابزار با سرعت خطی و دورانی مشخصی در طول خط پردازش قطعه حرکت می‌کند. حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک در این فرایند، سبب نرم شدن و تغییر حالت ماده اطراف پین شده و باعث جریان ماده از سمت جلو به عقب ابزار در اطراف پین می‌شود. فرایند پردازش اغتشاشی اصطکاکی سبب کاهش اندازه دانه، انحلال فازهای تقویتی و حذف

فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی (FSP)، به دلیل اعمال چرخه گرمایی خاص در منطقه پردازش سطح فلز، در زمره فرایندهای گرمایی-مکانیکی قرار می‌گیرد. در این فرایند ابزار چرخان شامل پین و شانه به داخل قطعه نفوذ می‌نماید. این نفوذ تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شانه ابزار به سطح بالایی قطعه

Please cite this article using:

M. Givi, A. H. Ghasemi, M. Abbasi, The effect of friction stir vibration processing on microstructure and mechanical properties of Al5052/SiC surface nano composite, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-11, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی هستند [8-12]. قنبری و همکاران [13] تأثیر تعداد پاس فرایند را بر ریزساختار و رفتار سایشی کامپوزیت زمینه فلزی Al<sub>2024</sub>/SiC بررسی نمودند. آن‌ها از نانو ذرات SiC استفاده نموده و دریافتند که با افزایش تعداد پاس توزیع ذرات در منطقه اغتشاش همگن‌تر می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند که با افزایش تعداد پاس، سختی کاهش و مقاومت خوردگی افزایش می‌یابد.

قنبری و همکاران [14] تأثیر عملیات حرارتی را بر روی ریزساختار و مقاومت به سایش کامپوزیت زمینه فلزی Al<sub>2024</sub>/SiC ایجاد شده با روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند و مشاهده نمودند که عملیات آنیل انحلالی و پیرسازی مصنوعی پس از فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی سبب افزایش سختی و بهبود مقاومت به سایش گردید. دلیل افزایش سختی حل شدن ذرات بزرگ S شکل Al<sub>2</sub>CuMg حین عملیات آنیل انحلالی و تشکیل دوباره این ذرات رسوب با اندازه ریز در حین عملیات پیرسازی مصنوعی بیان شد.

شفیعی و همکاران [15] کامپوزیت Al<sub>6082</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> را به روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی تولید نمودند و دریافتند که افزایش سختی در کامپوزیت تولید شده، به دلیل کاهش اندازه دانه و حضور ذرات فاز تقویتی تحت مکانیزم اوروان است. احمدی فرد و همکاران [16] کامپوزیت سطحی Al<sub>5083</sub>/SiC را با انجام فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی تولید نمودند و اثر تعداد پاس را بر مشخصات قطعه تولید شده مورد ارزیابی قرار دادند. ورق 5 میلی‌متری Al<sub>5083</sub> به عنوان فاز زمینه و پودر SiC با اندازه میکرونی به عنوان ذرات استحکام دهنده استفاده شدند. آن‌ها دریافتند که میکروسختی و استحکام کششی نهایی با افزایش تعداد پاس بهبود می‌یابد چرا که افزایش تعداد پاس‌ها سبب کاهش توده‌ای شدن ذرات فاز ثانویه می‌گردد.

خدابخشی و همکاران [17] نیز به کمک روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی به تولید کامپوزیت سطحی متشکل از ذرات صفحه‌ای گرافن با اندازه نانو در بستر آلیاژ آلومینیوم Al<sub>5052</sub> پرداختند. آن‌ها ساختاری با دانه‌های ریز هم‌محور با متوسط اندازه دانه 2/1 میکرومتر را منطقه‌ی اغتشاش مشاهده نمودند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که سختی و استحکام تسلیم نسبت به ماده اولیه به ترتیب به میزان 53 و 300 درصد افزایش یافت.

دادایی و همکاران [18] تأثیر دو نوع ذرات SiC و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با اندازه نانو را در زمینه آلیاژ منیزیم AZ91 در حین پردازش اصطکاکی اغتشاشی بررسی کردند و نتیجه‌گیری کردند که استحکام و

تخلخل‌های ناشی از ریخته‌گری در مواردی که بر سطح قطعات ریخته‌گری شده اعمال شود، می‌گردد [1]. ریز ساختار منطقه پردازش شده، شامل دانه‌های هم‌محور شکل گرفته طی عملیات تبلور مجدد دینامیکی با کسر بالایی از مرز دانه‌های با زاویه زیاد می‌باشد [2،3]. پردازش اصطکاکی اغتشاشی همچنین بر اندازه، توزیع و نوع ذرات استحکام بخش در ریز ساختار تأثیر می‌گذارد. آرورا و همکاران [4] دریافتند که ذرات رسوب Al<sub>2</sub>Cu موجود در زمینه آلیاژ آلومینیوم سری 2xxx، در اثر حرارت ایجاد شده در منطقه اغتشاش حین فرایند پردازش حل می‌شوند. فو و همکاران [5] دریافتند که این ذرات استحکام‌دهنده در حین فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی حل شده و پس از سرد شدن، دوباره در داخل ریز ساختار تشکیل رسوب می‌دهند.

هانارد و همکاران [6] گزارش نمودند که فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی ریزساختار را همگن‌تر ساخته و کرنش شکست آلیاژ آلومینیوم 6056 را افزایش می‌دهد. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی اثرات زیادی بر روی شکل، اندازه و نوع ذرات بین‌فلزی و همچنین جزء حجمی و اندازه حفرات ناشی از تخلخل که عوامل کاهش دهنده درصد افزایش طول هستند، دارد. این فرایند سبب شکسته شدن ذرات بین‌فلزی بزرگ و تبدیل آنها به ذراتی ریزتر و مستحکم‌تر می‌شود، تخلخل‌های موجود در ساختار را حذف می‌نماید و توزیع ذرات بین‌فلزی غنی از آهن را همگن‌تر می‌سازد. هانارد و همکاران [6] دریافتند که ذرات بین‌فلزی بزرگ به راحتی طی تغییر شکل شکسته و افزایش تعداد پاس-های فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی نسبت ذرات با ضریب نسبت اندازه نزدیک به یک را افزایش می‌دهد و لذا این ذرات هر چه بیشتر کروی می‌شوند. لیل و همکاران [7] فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی را به منظور بهسازی ریز ساختار و هدایت الکتریکی آلیاژ مس C12200 استفاده نمودند. آن‌ها تأثیر چرخش ابزار، سرعت حرکت و هندسه ابزار را بر خواص و مشخصات آلیاژ پردازش شده بررسی نمودند و دریافتند که هندسه ابزار تأثیر بسزایی بر ریز ساختار و خواص مختلف نمونه پردازش شده دارد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که هدایت الکتریکی مس پردازش شده با چگالی نابجایی‌های درون دانه‌ها کنترل می‌گردد و با کاهش چگالی نابجایی‌ها، هدایت الکتریکی ماده پردازش شده افزایش می‌یابد.

تولید مواد کامپوزیتی فوق ریزدانه با داخل نمودن ذرات تقویت کننده شامل SiO<sub>2</sub>، SiC، TiO<sub>2</sub>، NiTi در زمینه ورق‌های فلزی از قبیل آلومینیوم، منیزیم و مس بعضی از کاربردهای استفاده از

برای پردازش اصطکاکی اغتشاشی، نگهدارنده روی ماشین فرز محکم شد در حالی که برای فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، نگهدارنده روی ماشین ارتعاش دهنده که خود روی ماشین فرزکاری مهار می‌شود، محکم شد. ماشین ارتعاش دهنده توسط مکانیزم بادامکی حرکت چرخشی محور موتور را به حرکت خطی و رفت و برگشتی صفحه ارتعاش کننده تبدیل می‌نماید. دامنه حرکت صفحه ارتعاش کننده 0/5 میلی‌متر بود. طرح شماتیک ماشینی که برای فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی استفاده شد در شکل 1 ارائه شده است. فرکانس ارتعاش صفحه ارتعاش کننده توسط درایور قابل کنترل بود.

ابزار دو تکه شامل شانه از جنس فولاد M2 عملیات حرارتی شده و پین از جنس کاربید تنگستن به منظور انجام فرایندهای پردازش استفاده شد. مقادیر سرعت‌های مختلف چرخش (شامل 720، 950، 1150 و 1400 دور بر دقیقه) و انتقالی (شامل 20، 25، 31/5 و 45 میلی‌متر بر دقیقه) به منظور یافتن مقادیر بهینه این متغیرها آزمایش شدند. نتایج بررسی‌های ماکروسکوپی، میکروسکوپی و آزمون کشش نشان داد که بهترین نتایج با سرعت چرخش 1150 دور بر دقیقه و سرعت حرکت خطی 31/5 میلی‌متر بر دقیقه حاصل می‌شود که در این حالت سطوح قطعات پردازش شده، شکل ظاهری مناسب داشته و خواص مکانیکی این قطعات شامل استحکام تسلیم، استحکام نهایی کشش و درصد افزایش طول بالاتر از مقادیر نمونه فلز پایه می‌باشد. مقادیر بهینه سرعت چرخش و پیشروی طولی ابزار همچنین برای عملیات پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی نیز مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی اثر فرکانس بر روی خواص قطعه پردازش شده، مقادیر مختلف فرکانس حرکت صفحه ارتعاش کننده شامل 20، 35 و 50 هرتز مورد بررسی قرار گرفت.

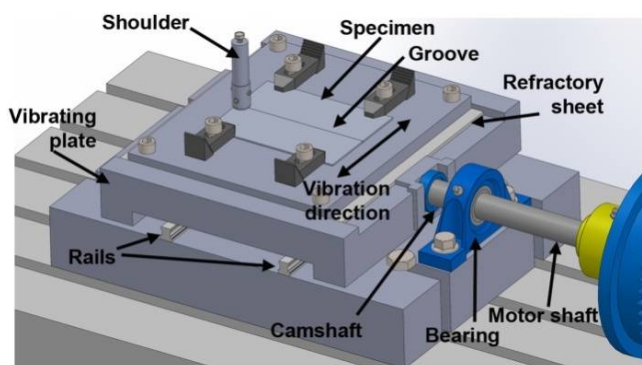


Fig. 1 Schematic design of machine used for FSVP

شکل 1 طرح شماتیک ماشینی استفاده شده برای انجام پردازش اصطکاکی اغتشاشی

سختی با افزایش ذرات تقویت کننده افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که ذرات SiC نسبت به ذرات  $Al_2O_3$  اثرات بهتری در افزایش استحکام و سختی دارند. در تحقیق حاضر، روشی نوین برای اصلاح ریز ساختار و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی Al5052/SiC ایجاد می‌شود. وسیله روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارائه شده است. در روش استفاده شده در این تحقیق، قطعه کار در جهت عمود بر مسیر پردازش و حین عملیات پردازش اصطکاکی اغتشاشی، ارتعاش دارد. ایده استفاده از ارتعاش مکانیکی اول بار در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی بکار گرفته شد [19، 20]. روش بکار گرفته شده در این تحقیق، تحت عنوان پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی (FSVP) معرفی شده است. ریز ساختار و خواص مکانیکی قطعات پردازش شده توسط دو روش اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی با هم مقایسه شده‌اند.

## 2- مواد و روش‌ها

ورق آلومینیوم آلیاژ 5052 با ضخامت 3 میلی‌متر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی ورق مورد مطالعه در جدول 1 ارائه شده است. ورق در قطعاتی به ابعاد  $200 \times 100$  میلی‌متر بریده شد.

شیاری به شکل V با عرض 2 میلی‌متر و عمق 1/5 میلی‌متر در راستای طولی و در وسط هر یک از قطعات ماشین‌کاری شد. قطعات بوسیله متانول به منظور پاک کردن هر گونه روغن و آلودگی سطوح تمیزکاری شدند. شیار روی قطعات با ذرات نانوپودر SiC پر شد. قطر ذرات نانو پودر تهیه شده 20 نانومتر بود. وزن یکسانی برای همه قطعات به میزان 0/06 گرم استفاده شد. نمونه‌ها روی نگهدارنده مهار شدند. قبل از انجام فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی، سطح قطعات ابتدا توسط ابزار بدون پین پردازش شد تا سطح شیار بسته شده و ذرات در داخل شیار محبوس شوند. با انجام این عمل از فرار ذرات در حین پردازش اصطکاکی اغتشاشی جلوگیری می‌شود. فرایندهای پردازش اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی توسط ماشین فرزکاری صورت گرفت.

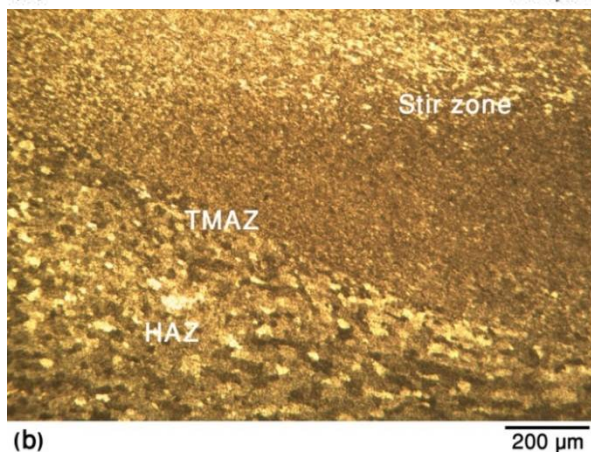
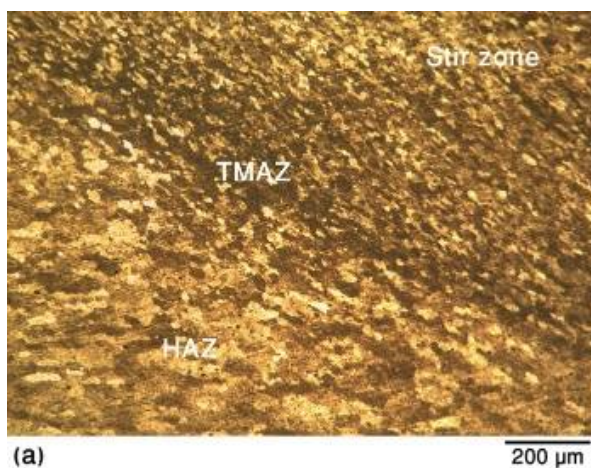
جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم استفاده شده (درصد وزنی)

Table 1 Al sheet chemical composition

	Al	Mg	Cr	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Other
درصد		2/5	0/3	0/25	0/1	0/1	0/1	0/35	0/15
وزنی									

منطقه پردازش شده برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده بزرگتر از این منطقه برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده است که این موضوع به دلیل ارتعاش قطعه کار در حین فرایند است که منجر به منطقه پردازش بزرگتر می‌شود.

میکروساختار مربوط به مناطق پردازش نمونه‌های پردازش شده در شکل 3 نمایش داده شده است. در شکل 3 برای هر دو نمونه پردازش شده سه ناحیه منطقه اغتشاش، منطقه متأثر از حرارت-مکانیک (TMAZ<sup>1</sup>) و منطقه متأثر از گرما (HAZ) دیده می‌شوند. دانه‌ها در منطقه HAZ تنها تحت تأثیر حرارت قرار گرفته و تغییر شکل نمی‌یابند و لذا در این منطقه بزرگ هستند. دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت-مکانیک تحت تأثیر حرارت گرفته و مقدار کمی نیز تغییر شکل مکانیکی می‌یابند.



**Fig. 3** Microstructures of processed specimens, a) FS and b) FSV processed specimens

شکل 3 میکروساختار نمونه‌های پردازش شده الف) پردازش اصطکاکی اغتشاشی، ب) پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی.

ریزترین دانه‌ها در منطقه اغتشاش مشاهده می‌شوند که دانه‌ها

این مقادیر بر اساس گزارشات صورت گرفته در مراجع در ارتباط با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی انتخاب شدند [۱۹،۲۰]. زاویه ابزار برای همه فرایندهای پردازش یکسان و برابر 2 درجه در نظر گرفته شد.

میکروساختار بوسیله متالوگرافی بر اساس استاندارد ASTM-E3 [21] بررسی شد. محلول اچ شامل 2/58% حجمی اسید پیکریک، 10/82% حجمی اسید استیک، 10/82% حجمی آب و 75/78% حجمی اتانول بود که برای مدت 5 ثانیه بر روی قطعات اعمال شد. میکروساختار با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترون روبشی مطالعه شد. برای تعیین منحنی‌های تنش-کرنش از آزمون کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM-E8 [22] استفاده شد.

نمونه‌های آزمون کشش از قطعات پردازش شده با استفاده از روش وایرکات تهیه شد. نمونه‌ها در جهت عمود بر جهت پردازش از قطعات تهیه شدند. نمونه‌ها به گونه‌ای تهیه شدند که ناحیه پردازش شده در وسط منطقه سنج قرار گیرند. سرعت حرکت فک دستگاه کشش در آزمون کشش 0/5 میلی‌متر بر دقیقه بود. برای هر حالت پردازش، سه نمونه آزمون کشش انجام شد.

سختی‌سنجی مناطق مختلف قطعات پردازش شده با استفاده از روش میکروسختی سنجی ویکرز بر اساس استاندارد ASTM-E92 [23] صورت گرفت. نیرو 100 گرم نیرو و زمان اعمال نیرو 10 ثانیه انتخاب شد. برای هر منطقه از نمونه‌های پردازش شده، 5 داده تهیه شد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- اثر ارتعاش

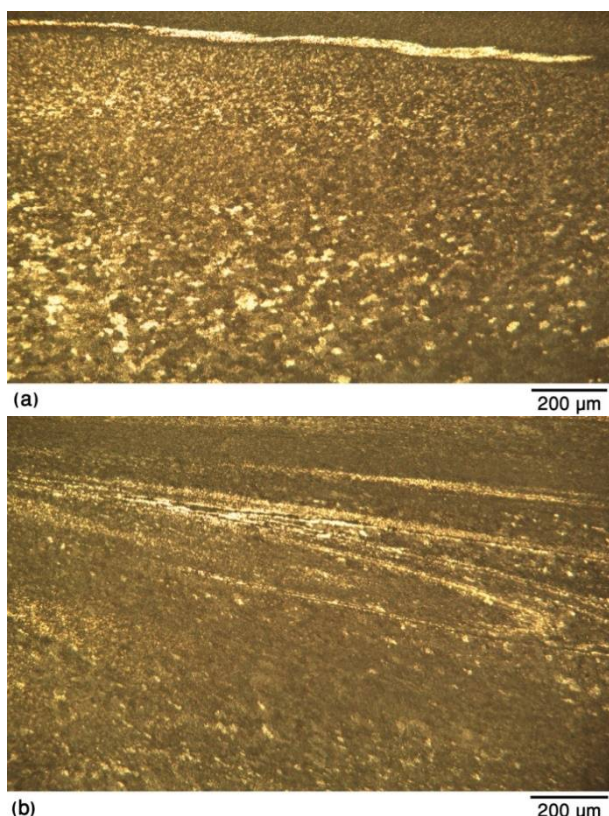
مقطع عرضی قطعات پردازش شده در شکل 2 نمایش داده شده است. هر دو نمونه، منطقه پردازش بدون نقص از خود نشان می‌دهند.



**Fig. 2** Cross section macrostructure of processed specimens, a) FS and b) FSV processed specimens

شکل 2 تصویر ماکروسکوپی سطح مقطع نمونه‌های پردازش شده الف) اصطکاکی اغتشاشی، ب) اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی

<sup>1</sup> Thermo-mechanically affected zone



**Fig. 4** SiC distribution within a) FS and b) FSV processed specimens  
**شکل 4** توزیع ذرات SiC برای الف) نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده،  
 ب) نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده

منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های پردازش شده اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی همچنین نمونه فلز پایه در شکل 5 مشاهده می‌شوند. مشاهده می‌شود که استحکام کششی نمونه‌های پردازش شده بیشتر از فلز پایه هستند، اگر چه درصد افزایش طول آن‌ها کمتر از فلز پایه می‌باشد. استحکام بیشتر قطعات پردازش شده را می‌توان به اثر حضور ذرات فاز ثانوی در زمینه فلز نسبت داد که سبب افزایش استحکام می‌شوند.

همچنین در شکل 5 مشاهده می‌شود که استحکام و درصد افزایش طول نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده بیشتر از نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده است. در شکل‌های 3 و 4 مشاهده شد که اندازه دانه در منطقه اغتشاش برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده کمتر از اندازه دانه در نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده بود و ذرات فاز ثانوی توزیع همگن‌تری در نمونه اولی نسبت به نمونه دوم داشتند. مرزدانه‌ها و ذرات فاز ثانوی هر دو از عوامل افزایش استحکام هستند [31،32]. بر طبق معادله هال-پیچ (رابطه 1) [33]، استحکام با کاهش اندازه دانه، افزایش می‌یابد.

در این منطقه به شدت تحت تأثیر کار مکانیکی قرار می‌گیرند و لذا دانه‌های ریز و هم محور شکل می‌گیرد.

همچنین در شکل 3 مشاهده می‌شود که اندازه دانه در منطقه اغتشاش برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده کمتر از اندازه دانه در نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده است. این نکته مشخص شده است که حین فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی آنچه سبب کاهش اندازه دانه می‌شود، تبلور مجدد دینامیکی است [25،24]. در واقع فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند گرمایی-مکانیکی است که سبب تغییر شکل شدید ماده در منطقه اغتشاش می‌شود [25].

این اتفاق سبب تولید تعداد زیادی نابجایی می‌شود که می‌توانند با جایگیری مجدد در حین بازیابی دینامیکی تشکیل مرز دانه‌های با زاویه کم در درون دانه‌های اصلی دهند. با انجام تغییر شکل بیشتر، فرایند تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد و مرز دانه‌های با زاویه کم به مرزهای با زاویه زیاد تبدیل می‌شوند و بنابراین دانه‌های کوچک در ساختار تشکیل می‌شود [26،27].

در حین فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، علاوه بر حرکت چرخشی و پیشروی طولی ابزار، حرکت ارتعاشی قطعه کار نیز وجود دارد. بنابراین، تغییر شکل و کرنش بیشتری بر روی ماده در منطقه اغتشاش اعمال می‌شود. بر اساس یافته‌های محققان [29،28]، چگالی نابجایی‌ها با افزایش کرنش، افزایش می‌یابد. تعداد زیاد نابجایی‌ها منجر به افزایش یافتن فرایندهای بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی شده و در نتیجه، دانه‌های کوچکتری در ناحیه اغتشاش شکل می‌گیرند [30،19].

علاوه بر اثر ارتعاش در فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی بر روی اندازه دانه، ارتعاش همچنین بر روی توزیع ذرات فاز ثانوی اثرگذار است. در شکل 4، تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی قطعات پردازش شده برای هر دو حالت قطعات پردازش شده با روش‌های اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت عدم حضور ارتعاش، ذرات SiC به درستی توزیع نمی‌شوند و توده‌ای شدن ذرات به صورت زیادی مشاهده می‌شود (شکل 4الف). در حالی که برای قطعات پردازش شده با روش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، توده‌ای شدن کمتر ذرات مشاهده می‌شود (شکل 4ب). این موضوع را می‌توان به اثر ارتعاش بر روی فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی نسبت داد که سبب افزایش اغتشاش و توده‌ای شدن کمتر ذرات و در نتیجه توزیع بهتر آنها می‌شود.

پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده است. این موضوع را می‌توان به اندازه دانه کمتر و توزیع بهتر ذرات فاز ثانوی در نمونه اول نسبت به نمونه دوم نسبت داد. سطوح شکست هر دو نمونه در شکل 6 نمایش داده شده است. هر دو نمونه یک سطح شکست همراه با گودی‌های گسترده از خود نشان می‌دهند که مشخصه شکست فلزات نرم است [37]، اگرچه، تعداد این حفرات برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده بیشتر است. نتیجه تحقیقات محققان نشان داده است که در فرایند شکل‌دهی فلزات نرم، شروع شکست با تشکیل حفراتی است که ابتدا هسته گذاری شده‌اند و با انجام تغییر شکل بیشتر این هسته‌های اولیه حفرات، رشد کرده و به یکدیگر چسبیده‌اند [38]. به هم پیوستن حفرات، منجر به تشکیل یک سطح شکست شامل گودی‌ها و حفرات می‌شود. هسته اولیه حفرات در مکان‌های مختلفی تشکیل می‌شود. مکان‌های اولیه برای تشکیل حفرات، ذرات فاز ثانوی و رسوبات هستند. همچنین حفرات می‌توانند در موضع جاگ‌ها یا قفل‌های نابجایی‌ها تشکیل شوند [39].

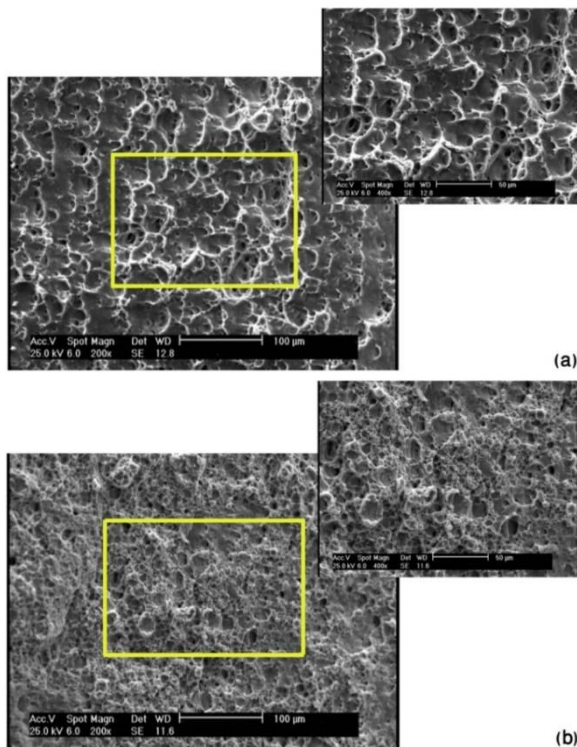


Fig. 6 Fracture surfaces of a) FS and b) FSV processed specimens

شکل 6 سطح شکست نمونه های الف) پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده، ب) پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده.

تحقیقات نشان داده است که حفرات نوع اول بزرگ‌تر از حفرات نوع دوم هستند [38]. حضور ذرات توده شده در ریزساختار

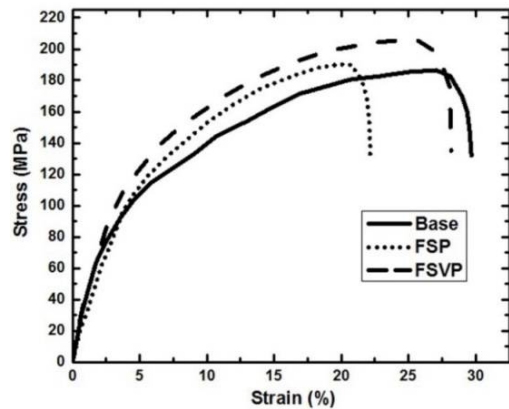


Fig. 5 Stress-strain curves of processed specimens as well as base material

شکل 5 منحنی تنش-کرنش نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی و پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده و همچنین فلز پایه

زمانی که اندازه دانه کاهش می‌یابد، جزء حجمی مرز دانه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت به حرکت نابجایی‌ها افزایش می‌یابد و استحکام افزایش می‌یابد. توزیع ذرات فاز ثانوی در زمینه فاز نرم نیز یک منبع استحکام دهی به شمار می‌رود [34].

$$\sigma = \sigma_i + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

میزان استحکام دهی ناشی از ذرات فاز ثانوی بستگی به عوامل مختلفی از قبیل شکل، جزء حجمی، متوسط قطر ذرات و فاصله بین ذرات دارد. این عوامل همگی به یکدیگر وابسته هستند و بنابراین تغییر یک عامل سبب تغییر عوامل دیگر می‌شود [35]. برای جزء حجمی مشخص از ذرات فاز ثانوی، فاصله میان ذرات با کاهش اندازه ذرات کاهش می‌یابد. بر اساس تئوری اورووان [36]، استحکام ایجاد شده توسط ذرات فاز ثانوی را می‌توان توسط رابطه (2) محاسبه کرد:

$$\Delta\sigma = \frac{\alpha Gb}{\lambda} \ln\left(\frac{r}{b}\right) \quad (2)$$

که:

$$\lambda = \frac{4(1-f)r}{3f} \quad (3)$$

برای قطعات پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده به دلیل حضور ارتعاش، اندازه دانه ( $d$ ) در منطقه اغتشاش کمتر از مقدار آن در نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده (شکل 3) است و ذرات فاز ثانوی توزیع همگن‌تری داشته و کمتر توده‌ای هستند ( $r$  کوچکتر و  $\lambda$  کمتر) (شکل 4). لذا، بر طبق روابط (1) و (2)، استحکام بیشتر نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده نسبت به نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده قابل توجیه است.

شکل 5 نشان می‌دهد که درصد افزایش طول برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده بیشتر از نمونه

در فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، منجر به اندازه کوچکتر ذرات توده شده می‌شود و در نتیجه بر طبق مکانیزم اوروان [36]، استحکام بیشتر می‌شود.

منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش در شکل 9 نمایش داده شده‌اند. اثر فرکانس ارتعاش بر روی سختی منطقه اغتشاش نیز در جدول 2 نمایش داده شده است. افزایش سختی و استحکام نهایی کشش را می‌توان به اندازه دانه کوچکتر (شکل 7) و اندازه کوچکتر ذرات توده شده (شکل 8) به دلیل افزایش فرکانس ارتعاش نسبت داد.

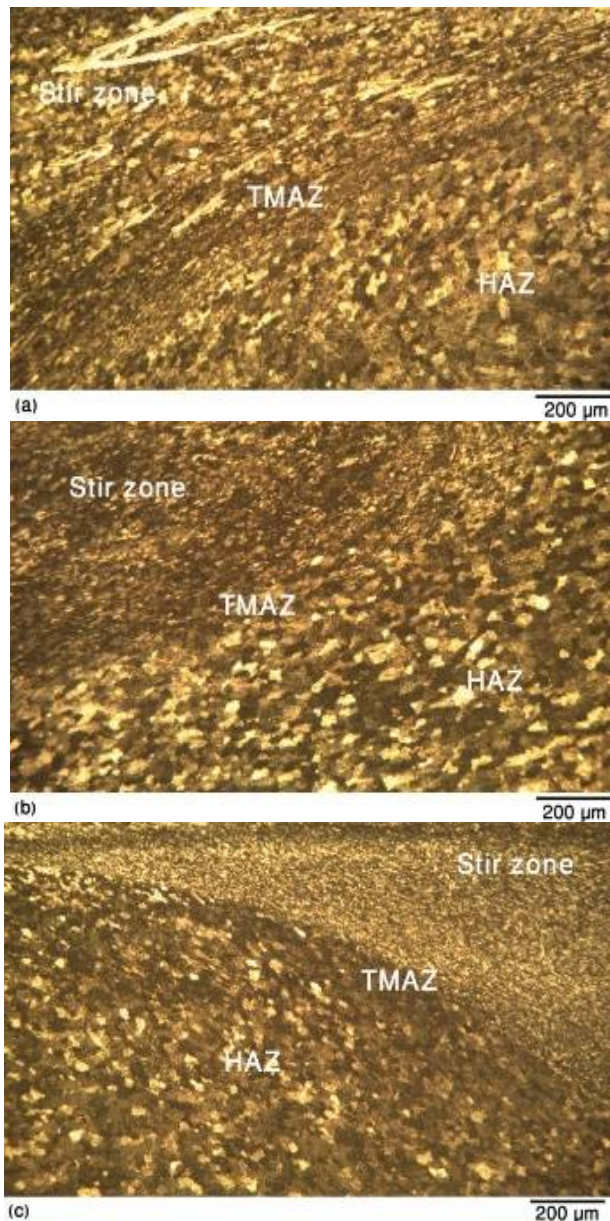


Fig.7 Microstructures of FSV processed specimens with different vibration frequencies, a) 20Hz, b) 35Hz, and c) 50Hz

شکل 7 میکروساختار نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده در مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش (الف) 20 هرتز، (ب) 35 هرتز و (ج) 50 هرتز

نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده (شکل 4) منجر به تشکیل حفرات بزرگ و تشکیل زودرس ترک در حین شکل‌دهی می‌شود. شکل 6، نشان می‌دهد که حفرات برای نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده کوچکتر از حفرات در نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده هستند. لذا همان‌گونه که مشاهده شد درصد افزایش طول نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده کمتر از نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده بود.

آنالیز سختی نشان داد که نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده سختی بیشتری در منطقه اغتشاش (61/52±2/00 ویکرز) نسبت به نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده (57/41±2/00 ویکرز) دارد، در حالی که سختی برای نمونه فلز پایه به میزان (48/50±1/00 ویکرز) است.

### 3-2- اثر فرکانس

میکروساختار نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در حالت‌های مختلف فرکانس ارتعاش شامل 20، 35 و 50 هرتز در شکل 7 نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس، اندازه دانه در ناحیه اغتشاش کاهش یافته است. با افزایش فرکانس در حین فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، به دلیل همراهی حرکت ارتعاشی قطعه کار با حرکت چرخشی و طولی ابزار، تغییر شکل ماده در منطقه اغتشاش بیشتر شده و کرنش بیشتری به فلز اعمال می‌شود.

بر اساس مطالعات صورت گرفته [28، 29]، نابیجایی‌ها در حین تغییر شکل تولید می‌شوند و چگالی آن‌ها وابسته به مقدار کرنش است. کرنش بیشتر در حین فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی منجر به تولید بیشتر نابیجایی می‌شود. از سوی دیگر، مکانیزم اصلی برای ریزدانه‌گی در حین پردازش اصطکاکی اغتشاشی، تبلور مجدد دینامیکی است که منجر به نظم‌بندی مجدد و تشکیل ذرات ریز می‌شود [26-27]. چگالی بیشتر نابیجایی‌ها منجر به تبلور مجدد بیشتر و در نتیجه دانه‌های ریزتر می‌شود [19].

نقش افزایش فرکانس ارتعاش بر روی توزیع ذرات فاز ثانوی نیز بسیار مهم است. اثر فرکانس ارتعاش روی توزیع ذرات فاز ثانوی در شکل 8 نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همگنی توزیع ذرات با افزایش فرکانس ارتعاش، بیشتر شده و توده‌ای شدن ذرات کاهش می‌یابد.

زمانی که فرکانس افزایش می‌یابد، ماده در منطقه اغتشاش بیشتر تغییر شکل می‌یابد و ذرات فاز ثانوی موجود در زمینه به صورت یکنواخت‌تری توزیع می‌شوند. توده‌ای شدن کمتر ذرات،

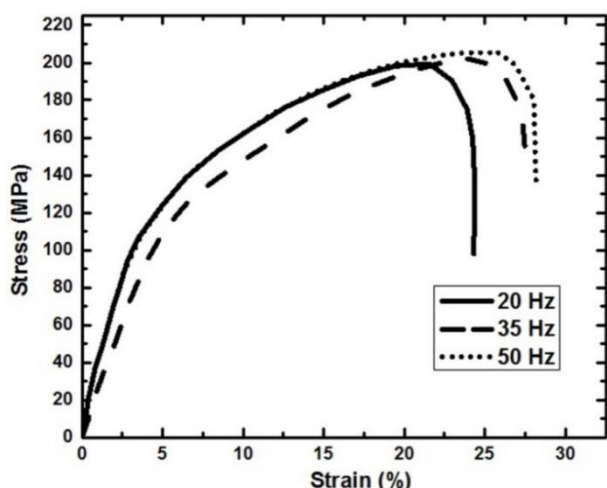


Fig. 9 Stress-strain curves of FSV processed specimens with different vibration frequencies

شکل 9 منحنی تنش-کرنش نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش

بر طبق رابطه هال-پیچ [33] با کاهش اندازه دانه، استحکام و سختی افزایش می‌یابد و بر طبق معادله اوروان [36]، با کاهش اندازه ذرات توده شده و کاهش فاصله بین ذرات، استحکام و سختی افزایش می‌یابد.

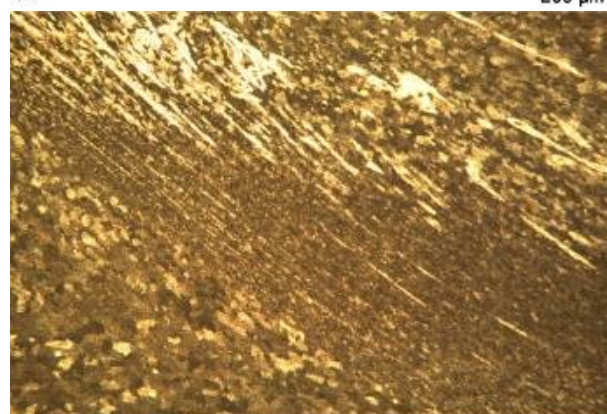
افزایش درصد افزایش طول در نتیجه افزایش فرکانس ارتعاش را نیز می‌توان به کاهش اندازه دانه و کاهش توده‌ای شدن ذرات در منطقه اغتشاش نسبت داد. بررسی‌های با استفاده از میکروسکوپ الکترون عبوری [41،40] نشان داده است که مرز دانه‌ها، چگالی نابجایی را از طریق تولید نابجایی‌هایی که نابجایی‌های ضروری از لحاظ هندسی (GND) نامیده می‌شوند، افزایش می‌دهند. نابجایی‌های ضروری از لحاظ هندسی تطابق جابجایی میان دانه‌ها را ایجاد می‌نمایند و در نتیجه درصد افزایش طول با کاهش اندازه دانه، افزایش می‌یابد [41].

درصد افزایش طول بیشتر در نمونه با اندازه دانه کوچکتر را همچنین می‌توان به مقاومت بیشتر این دانه‌ها به رشد ترک نسبت داد [42]. دانه‌های کوچک به دلیل توزیع کرنش میان مرز دانه‌های بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک از خود نشان می‌دهند. ذرات توده شده کوچک (در نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده) در مقایسه با ذرات بزرگتر، نیز همچنین تشکیل حفرات را به تعویق انداخته و در نتیجه افزایش درصد افزایش طول را به همراه دارند.

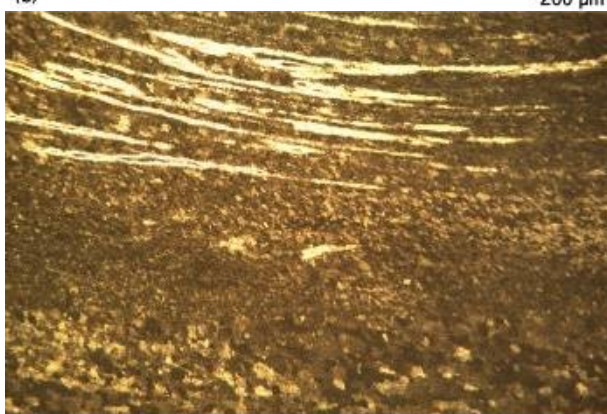
سطوح شکست نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده برای مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش در شکل 10 ارائه شده است. بر طبق شکل 10، در نمونه پردازش شده با کمترین مقدار فرکانس، سطح شکست حاوی حفرات بزرگ می‌باشد و با افزایش



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Particles distribution in FSV processed specimens with different vibration frequencies, a) 20Hz, b) 35Hz, and c) 50Hz.

شکل 8 توزیع ذرات برای نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش (الف) 20 هرتز، (ب) 35 هرتز و (ج) 50 هرتز

جدول 2 مقادیر سختی برای منطقه اغتشاش نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش

Table 2 Hardness values of stir zone for FSV processed specimens with different vibration frequencies

Vibration frequency (Hz)	Stir zone hardness (HV)
20	61/5±2
35	64/1±2
50	66/8±2



اصطکاکی اغتشاشی و پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده نشان داد که اندازه دانه منطقه اغتشاش با اعمال ارتعاش کاهش و توزیع ذرات پودر همگن تر شد. نتایج نشان داد که قطعات پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده استحکام و درصد افزایش طول بیشتری نسبت به نمونه پردازش اصطکاکی اغتشاشی شده دارند. همچنین مشاهده شد که استحکام و درصد افزایش طول نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده با افزایش فرکانس ارتعاش افزایش یافت. نتیجه‌گیری شد که حضور ارتعاش سبب افزایش تغییر شکل و کرنش ماده در منطقه اغتشاش شده و در نتیجه به دلیل بازیابی و تبلور مجدد افزایش یافته، دانه‌های ریزتری در منطقه اغتشاش شکل می‌گیرد. به علاوه، تغییر شکل بیشتر و حرکت بیشتر مواد در منطقه اغتشاش در حضور ارتعاش منجر به توده‌ای شدن کمتر ذرات تقویت‌کننده می‌شود.

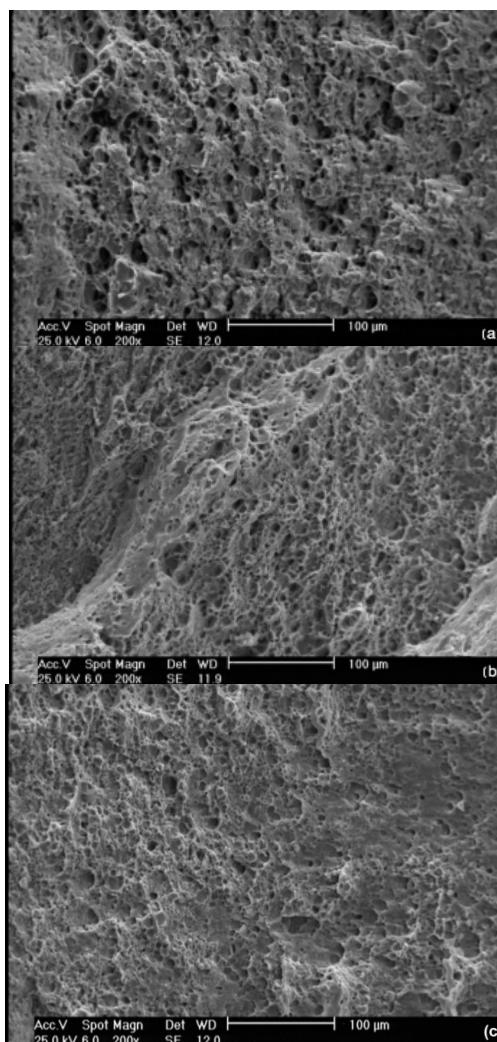
#### 5- فهرست علائم

$b$	بردار برگرز
$d$	اندازه دانه
$f$	جزء حجمی ذرات فاز ثانوی
$G$	مدول برشی
$k$	ضریب استحکام
$r$	شعاع ذرات فاز ثانوی
$\alpha$	ثابت
$\lambda$	فاصله بین ذرات
$\sigma$	استحکام
$\sigma_i$	تنش اصطکاکی

#### 6- مراجع

- [1] T. Mahmoud, Surface modification of A390 hypereutectic Al-Si cast alloys using friction stir processing, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 228, pp. 209-220, 2013 .
- [2] C. Chang, X. Du, J. Huang, Achieving ultrafine grain size in Mg-Al-Zn alloy by friction stir processing, *Scripta Materialia*, Vol. 57, No. 3, pp. 209-212, 2007 .
- [3] N. Kumar, R. S. Mishra, C. Huskamp, K. K. Sankaran, Microstructure and mechanical behavior of friction stir processed ultrafine grained Al-Mg-Sc alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 18, pp. 5883-5887, 2011 .
- [4] K. Arora, S. Pandey, M. Schaper, R. Kumar, Microstructure evolution during friction stir welding of aluminum alloy AA2219, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 26, No. 8, pp. 747-753, 2010 .

میزان فرکانس، اندازه حفرات کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به توزیع همگن‌تر و کمتر توده شده ذرات فاز ثانوی در نمونه پردازش شده با فرکانس بالاتر نسبت داد. ذرات بزرگ مکان‌های مرجع برای تشکیل حفرات بزرگ و ترک‌ها هستند که شکست زود هنگام قطعه را سبب می‌شوند [43].



**Fig. 10** Fracture surfaces of FSV processed specimens with different vibration frequencies, a) 20Hz, b) 35Hz and c) 50Hz

شکل 10 سطح شکست نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در مقادیر مختلف فرکانس ارتعاش (الف) 20 هرتز، (ب) 35 هرتز و (ج) 50 هرتز

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی به عنوان روشی ارتقا یافته برای فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی معرفی شد. اثر فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی تشکیل شده روی آلیاژ آلومینیوم 5052 مورد بررسی قرار گرفت. ذرات نانوپودر SiC به عنوان ذرات استحکام‌دهی بکار گرفته شدند. مقایسه بین ریزساختار مناطق اغتشاش نمونه‌های پردازش

- Hanzaki, Microstructures and mechanical properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface nano-composite layer produced by friction stir processing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 500, No. 1-2, pp. 84-91, 2009 .
- [16] S. Ahmadifard, N. Shahin, S. Kazemi, A. Heidarpour, A. Shirazi, Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization, 2016 .
- [17] F. Khodabakhshi, S. Arab, P. Švec, A. Gerlich, Fabrication of a new Al-Mg/graphene nanocomposite by multi-pass friction-stir processing: Dispersion, microstructure, stability, and strengthening, *Materials Characterization*, Vol. 132, pp. 92-107, 2017 .
- [18] M. Dadaei, H. Omidvar, B. Bagheri, M. Jahazi, M. Abbasi, The effect of SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles used during FSP on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy, *International Journal of Materials Research*, Vol. 105, No. 4, pp. 369-374, 2014 .
- [19] M. Rahmi, M. Abbasi, Friction stir vibration welding process: modified version of friction stir welding process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, No. 1-4, pp. 141-151, 2017.
- [20] S. Fouladi, M. Abbasi, The effect of friction stir vibration welding process on characteristics of SiO<sub>2</sub> incorporated joint, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 243, pp. 23-30, 2017.
- [21] A. Standard, E3-11, 2011, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/E0003-11 .
- [22] A. Standard, ASTM E8/E8M-16a, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016 .
- [23] A. Standard, ASTM E92-17, "Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [24] Y. Huang, Y. Wang, X. Meng, L. Wan, J. Cao, L. Zhou, J. Feng, Dynamic recrystallization and mechanical properties of friction stir processed Mg-Zn-Y-Zr alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 249, pp. 331-338, 2017.
- [25] A. Rao, K. Ravi, B. Ramakrishnarao, V. Deshmukh, A. Sharma, N. Prabhu, B. Kashyap, Recrystallization phenomena during friction stir processing of hypereutectic aluminum-silicon alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44, No. 3, pp. 1519-1529, 2013 .
- [26] J.-Q. Su, T. Nelson, C. Sterling, Grain refinement of aluminum alloys by friction stir processing, *Philosophical Magazine*, Vol. 86, No. 1, pp. 1-24, 2012 .
- [5] R. Fu, H. Xu, G. Luan, C. Dong, F. Zhang, G. Li, Top surface microstructure of friction-stir welded AA2524-T3 aluminum alloy joints, *Materials Characterization*, Vol. 65, pp. 48-54, 2012 .
- [6] F. Hannard, S. Castin, E. Maire, R. Mokso, T. Pardoen, A. Simar, Ductilization of aluminium alloy 6056 by friction stir processing, *Acta Materialia*, Vol. 130, pp. 121-136, 2017 .
- [7] R. Leal, I. Galvão, A. Loureiro, D. Rodrigues, Effect of friction stir processing parameters on the microstructural and electrical properties of copper, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 9-12, pp. 1655-1663, 2015 .
- [8] N. Yuvaraj, S. Aravindan, Fabrication of Al5083/B<sub>4</sub>C surface composite by friction stir processing and its tribological characterization, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 398-410, 2015 .
- [9] M. Abbasi, B. Bagheri, M. Dadaei, H. Omidvar, M. Rezaei, The effect of FSP on mechanical, tribological, and corrosion behavior of composite layer developed on magnesium AZ91 alloy surface, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 77, No. 9-12, pp. 2051-2058, 2015 .
- [10] T. Thankachan, K. S. Prakash, V. Kavimani, Investigations on the effect of friction stir processing on Cu-BN surface composites, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 3, pp. 299-307, 2018 .
- [11] G. Hussain, R. Hashemi, H. Hashemi, K. A. Al-Ghamdi, An experimental study on multi-pass friction stir processing of Al/TiN composite: some microstructural, mechanical, and wear characteristics, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, No. 1-4, pp. 533-546, 2016 .
- [12] Q. Zhang, B. Xiao, W. Wang, Z. Ma, Reactive mechanism and mechanical properties of in situ composites fabricated from an Al-TiO<sub>2</sub> system by friction stir processing, *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 20, pp. 7090-7103, 2012 .
- [13] D. Ghanbari, M. Kasiri Asgharani, K. Amini, Investigating the effect of passes number on microstructural and mechanical properties of the Al<sub>2024</sub>/SiC composite produced by friction stir processing, *Mechanics*, Vol. 21, No. 6, pp. 430-436, 2015 .
- [14] D. Ghanbari, M. K. Asgharani, K. Amini, F. Gharavi, Influence of heat treatment on mechanical properties and microstructure of the Al<sub>2024</sub>/SiC composite produced by multi-pass friction stir processing, *Measurement*, Vol. 104, pp. 151-158, 2017 .
- [15] A. Shafiei-Zarghani, S. Kashani-Bozorg, A. Zarei-

- Manufacturing*, Vol. 15, No. 6, pp. 1235-1239, 2014 .
- [35] G. E. Dieter, D. J. Bacon, *Mechanical metallurgy*: McGraw-hill New York, 1986 .
- [36] A. J. Kulkarni, K. Krishnamurthy, S. P. Deshmukh, R. S. Mishra, Effect of particle size distribution on strength of precipitation-hardened alloys, *Journal of materials research*, Vol. 19, No. 9, pp. 2765-2773, 2004 .
- [37] M. Abbasi, M. A. Shafaat, M. Ketabchi, D. F. Haghshenas, M. Abbasi, Application of the GTN model to predict the forming limit diagram of IF-Steel, *Journal of Mechanical science and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 345-352, 2012 .
- [38] V. Uthaisangasuk, W. Bleck, *Microstructure based formability modelling of multiphase steels*: Shaker Verlag, 2009 .
- [39] R. W. Hertzberg, Deformation and fracture mechanics of engineering materials, *Journal of Materials Education*, Vol. 19, pp. 227-232, 1997 .
- [40] P. Schempp, C. Cross, R. Häcker, A. Pittner, M. Rethmeier, Influence of grain size on mechanical properties of aluminium GTA weld metal, *Welding in the World*, Vol. 57, No. 3, pp. 293-304, 2013 .
- [41] N. Hansen, The effect of grain size and strain on the tensile flow stress of aluminium at room temperature, *Acta Metallurgica*, Vol. 25, No. 8, pp. 863-869, 1977 .
- [42] J. Spittle, A. Cushway, Influences of superheat and grain structure on hot-tearing susceptibilities of Al-Cu alloy castings, *Metals Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 6-13, 1983 .
- [43] H. Yu, K. Tieu, C. Lu, Y. Lou, X. Liu, A. Godbole, C. Kong, Tensile fracture of ultrafine grained aluminum 6061 sheets by asymmetric cryorolling for microforming, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 23, No. 8, pp. 1077-1095, 2014 .
- 2006 .
- [27] R. A. Behnagh, N. Shen, M. Abdollahi, H. Ding, Ultrafine-Grained Surface Layer Formation of Aluminum Alloy 5083 by Friction Stir Processing, *Procedia CIRP*, Vol. 45, pp. 243-246, 2016 .
- [28] D. Hull, D. J. Bacon, *Introduction to dislocations*: Butterworth-Heinemann, 2001 .
- [29] O. Barooni, M. Abbasi, M. Givi, B. Bagheri, New method to improve the microstructure and mechanical properties of joint obtained using FSW, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 9-12, pp. 4371-4378, 2017 .
- [30] S. Fouladi, A. H. Ghasemi, M. Abbasi, M. Abedini, A. M. Khorasani, I. Gibson, The effect of vibration during friction stir welding on corrosion behavior, mechanical properties, and machining characteristics of stir zone, *Metals*, Vol. 7, No. 10, pp. 421, 2017 .
- [31] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*: Wiley New York, 1991 .
- [32] M. Naderi, M. Abbasi, A. Saeed-Akbari, Enhanced mechanical properties of a hot-stamped advanced high-strength steel via tempering treatment, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44, No. 4, pp. 1852-1861, 2013 .
- [33] D. Du, R. Fu, Y. Li, L. Jing, J. Wang, Y. Ren, K. Yang, Modification of the Hall-Petch equation for friction-stir-processing microstructures of high-nitrogen steel, *Materials Science and Engineering: i*, Vol. 640, pp. 190-194, 2015 .
- [34] C.-H. Jeon, Y.-H. Jeong, J.-J. Seo, H. N. Tien, S.-T. Hong, Y.-J. Yum, S.-H. Hur, K.-J. Lee, Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing, *International Journal of Precision Engineering and*