



بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار نانوکامپوزیت زمینه مسی تقویت شده با ذرات اکسید سیلیسیوم تولید شده به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

الهه خدابخش¹، شهاب کاظمی^{2*}، سعید احمدی فرد³

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

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

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* همدان، صندوق پستی 65178-38695، shahab.kazemi@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/08/12

پذیرش: 95/11/27

کلیدواژگان:

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

خواص مکانیکی

میکروسختی

مس

سایش

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک روش بهسازی سطح است. این فرآیند برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی و همچنین تولید کامپوزیت سطحی توسعه یافته است. هدف از انجام این پژوهش تولید نانو کامپوزیت سطحی زمینه مس با ذرات تقویت کننده SiO_2 به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود خواص مکانیکی است. در این مقاله از سرعت پیشروی ثابت 56 میلیمتر بر دقیقه و سرعت های دورانی 500، 710 و 1000 دور بر دقیقه بهره گرفته شد. نمونه بهینه با در نظر گرفتن نتایج ریزساختاری و بالاترین خواص مکانیکی انتخاب شد. ریزساختار نمونه ها به وسیله میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه بهینه دارای سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 56 میلیمتر بر دقیقه است. خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی تولید شده از قبیل میکروسختی و استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت و نسبت به فلز پایه مقایسه شد. نتایج تست های 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 بهینه به ترتیب به 84 ویکرز و 218 مگاپاسکال و 121 ویکرز و 227 مگاپاسکال رسید. در نهایت خواص سایشی کامپوزیت سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون سایش، بهبود رفتار سایشی و کاهش 28 درصدی ضریب اصطکاک کامپوزیت تولید شده را در مقایسه با فلز پایه نشان می دهد.

Investigation the mechanical and microstructural properties of copper surface composite Cu/SiO₂ fabricated by friction stir processing

Elaheh khodabakhshi¹, Shahab Kazemi^{1*}, Saeed Ahmadifard¹

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

*P.O.B. 65178-38695, Hamedan, Iran, shahab.kazemi@basu.ac.ir

Keywords

Friction stir
Mechanical properties
Microhardness
Copper
Wear

Abstract

Friction stir processing (FSP) is a surface improvement method. This process has been developed for facilitating the refinement of microstructure, improving the mechanical properties and producing the surface composite. The aim of this study is producing the surface copper-based nanocomposite with reinforcing SiO_2 particles by friction stir processing for improving the mechanical properties. Therefore, 56 mm/min fixed traverse speed and 500, 710, 1000 rpm rotational speeds were used. Microstructures of samples were studied by optical and scanning electron microscopes. Optimum sample had a rotational and traverse speed of 500 rpm and 56 mm/min, respectively. The mechanical properties of the produced surface composite such as microhardness and tensile strength were evaluated and then compared with the base metal. The results of the mechanical tests showed that the microhardness and tensile strength were improved in comparison with base metal. The microhardness of the base metal and optimum sample were about 84Hv and 121 Hv, and tensile strength of them were 218 MPa, and 227 MPa, respectively. Finally, wear properties of surface composite were investigated. The results exhibited better wear behavior and also 28 percent decrease in friction coefficient of produced composite compared with the base metal.

Please cite this article using:

Khodabakhshi, E. Kazemi, Sh. and Ahmadifard, S, "Investigation the mechanical and microstructural properties of copper surface composite Cu/SiO₂ fabricated by friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 426-433, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

به علت پیشرفت صنایع الکترونیکی تقاضا برای موادی با استحکام و هدایت الکتریکی بالا بیشتر شده است. امروزه در این صنایع بیشتر از آلیاژهای مس استفاده می‌کنند اما عناصر آلیاژی موجود در این مواد نقش ناخالصی را دارند و هدایت الکتریکی این آلیاژها را نسبت به مس خالص کاهش می‌دهند. برای حل این مشکل می‌توان از مس خالص با دانه بندی بسیار ریز استفاده کرد [1].

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی توسط میسرا و همکاران [2, 3] به عنوان فرآیندی برای اصلاح ریز ساختار فلزات به عنوان مثال اصلاح دانه‌های تقویت کننده موضعی و همگن شدن ذرات رسوبی بر پایه اصول اولیه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بنا شده است. به علت اینکه محدوده وسیعی از خواص مکانیکی و فیزیکی را می‌توان از مجموعه سرامیک و فلز (آلیاژ) بدست آورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد علاقه طراحان و مهندسان قرار دارند. از جمله این عوامل مهم می‌توان به، بهبود استحکام در دمای بالا، بهبود مدول، امکان کاهش وزن با بالا بردن نسبت استحکام به وزن، کاهش ضریب انبساط حرارتی، بهبود مقاومت در برابر خزش و بهبود مقاومت سایشی اشاره کرد [4]. در مقایسه با سایر روش‌های فرآوری مواد، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی دارای مزایای ویژه‌ای همچون، ساده و کم هزینه بودن، کوتاه بودن زمان عملیات، استفاده از ماشین‌های آماده فرز، قابلیت خودکار سازی فرآیند و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. در مقابل این فرآیند دارای محدودیت‌هایی از جمله مهار کردن نمونه، نیاز به تکیه‌گاه و ایجاد سوراخ در انتهای فرآیند است. توانایی‌های بیان شده این فرآیند را گزینه مناسبی برای کاربرد فلزات نرم همانند آلومینیوم، منیزیم و مس قرار داده است [5]. در شکل 1 نمایی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است.

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ابزاری که متشکل از پین و شولدر¹ است با سرعت دورانی مشخصی به صورت زاویه‌دار نسبت به خط عمود بر سطح قطعه وارد می‌گردد. حرکت پین به درون قطعه تا زمان تماس شولدر با سطح ادامه می‌یابد. به منظور فراهم کردن حرارت مورد نیاز برای ایجاد حالت خمیری شکل در سطح قطعه علاوه بر اصطکاک به نیرو نیازمندیم که این نیرو با نفوذ سطح شولدر به قطعه ایجاد می‌شود. پس از رسیدن قطعه به حرارت معین و ایجاد حالت خمیری در قطعه ابزار کار با حرکت خطی شروع به حرکت

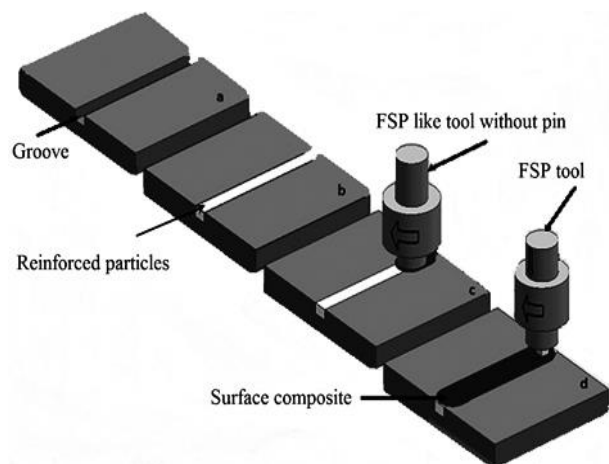


Fig. 1 Friction stir Processing (FSP) method [6]

شکل 1 روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی [6]

می‌کند. در اثر این حرکت دو عملیات اکستروژن و فورجینگ² روی قطعه اتفاق می‌افتد. به طرفی که سرعت خطی و سرعت محیطی هم جهت‌اند طرف پیشرو و به طرف دیگر که هر دو سرعت خلاف جهت همدیگرند طرف پسرو می‌گویند. تفاوت در جهت سرعت‌ها در هر دو طرف پین باعث ایجاد عدم تقارن در توزیع دما و کرنش پلاستیک در سطح قطعه می‌شود [7].

شای و همکاران [8] در تحقیقی به بررسی ریزساختارهای ایجاد شده در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند با کاهش سرعت دورانی اندازه دانه در ناحیه اغتشاش کاهش می‌یابد که علت آن کاهش حرارت ورودی است. اکرمی‌فرد و همکاران [9] در تحقیق خود نشان دادند که استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در تولید کامپوزیت سطحی مس تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم منجر به افزایش میکروسختی تا دو برابر نسبت به فلز پایه می‌شود. برموز و همکاران [10] در تحقیقاتشان مشاهده کردند که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در نمونه‌های مسی تقویت شده با سیلیسیم کاربید از دید طول کمی دارند و همچنین نتایج آزمون کشش برای هر دو نمونه با تقویت کننده و بدون تقویت کننده کاهش در استحکام تسلیم را نشان می‌دهد. همچنین نتایج دیگر مقالات حاکی از آن است که فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی نمونه‌های مسی تقویت شده با کاربید سیلیسیم شده است [11].

به علت خواص ویژه‌ای، همانند هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و کاربردهای فراوان، از مس به عنوان زمینه کامپوزیت سطحی استفاده شد. همچنین برای بررسی اثر نوع تقویت کننده، مقایسه نتایج آن با سایر تقویت کننده‌های استفاده شده و بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر استحکام کامپوزیت سطحی از اکسید سیلیسیم به عنوان تقویت کننده و فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روش ساخت استفاده شد. در این پژوهش هدف تولید نانو کامپوزیت سطحی زمینه مسی به همراه ذرات تقویت کننده اکسید سیلیسیموم به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است و نتایج آزمون‌های مکانیکی و میکروسختی نانو کامپوزیت تولید شده، با فلز پایه و دیگر موارد مشابه در سایر مقالات مقایسه شده است.

2- مواد و روش‌ها

به منظور ایجاد و تولید نانو کامپوزیت سطحی از 2 ابزار که یکی فاقد پین و دیگری کار دارای پین بود، استفاده شد و از جنس ابزارها از فولاد گرم‌کار (H13) انتخاب گردید. شکل پین مربعی و به ضلع 6 میلیمتر و ارتفاع 3 میلیمتر است. که قطر شولدر 20 میلیمتر است. زاویه انحراف ابزار نسبت به سطح نمونه 3 درجه انتخاب گردید. در شکل 2 نمایی از ابزار مورد استفاده آورده شده است.

فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش مس انتخاب شد که دارای خلوص 99.99٪ می‌باشد که از آن قطعاتی به ابعاد 140×50×5 میلیمتر بریده شد. برای اعمال ذرات تقویت کننده روی ورق‌های مسی شیاری به عرض 1 میلی متر و عمق 2 میلیمتر توسط وایر کات ایجاد گردید. ذرات سرامیکی تقویت کننده در این پژوهش SiO₂ با میانگین اندازه 120 نانومتر است. نانو ذرات SiO₂ سفید رنگ، بسته به نوع ساختار به دو نوع P (متخلخل) و نوع S (کروی) تقسیم می‌شوند. بنابراین نوع P دارای سطح بیشتری نسبت به نوع کروی آن است. در شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از این ذرات

² Forging

¹ Shoulder

جدول 1 کد نمونه‌های فرآوری شده

کد نمونه	عملیات فرآوری شده نمونه
1	فلز پایه
2	نمونه بدون پودر فرآوری شده با سرعت دورانی 500 rpm
3	نمونه با پودر فرآوری شده با سرعت دورانی 500 rpm
4	نمونه با پودر فرآوری شده با سرعت دورانی 710 rpm
5	نمونه با پودر فرآوری شده با سرعت دورانی 1000 rpm

ریزساختار فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده از محلول حکاکی با ترکیب 100 میلی‌لیتر آب مقطر، 2.5 گرم $FeCl_3$ و 15 میلی‌لیتر HCl استفاده شد [13].

آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8-04 در دمای محیط و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه و نرخ کرنش 0.003 با دستگاه سنناتم 150 انجام گرفت تا نتایج مربوط به نمونه بهینه با فلز پایه و نمونه بدون پودر مقایسه شوند. در شکل 4 نمایی از محل تهیه نمونه کشش به همراه ابعاد آن نشان داده شده است.

آزمون میکروسختی (میکرو ویکرز) نیز طبق استاندارد ASTM E384 از سطح مقطع نمونه‌های فرآوری شده به روش میکروسختی با دستگاه بوهرلر و با نیروی 100 گرم و مدت زمان 25 ثانیه و در فاصله 2 میلی‌متری از سطح و در نقاط متفاوت از سطح مقطع انجام شد. شکل 5 محل انجام آزمون میکروسختی از فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد.

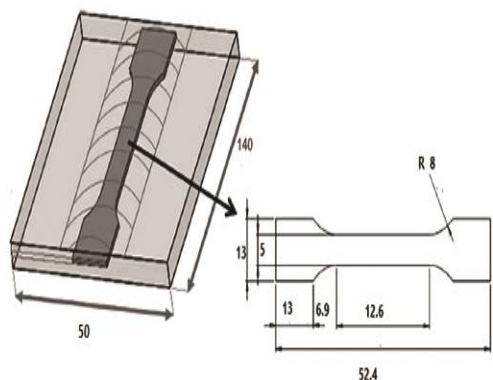


Fig. 4 Dimensions of tensile test specimen (mm)

شکل 4 ابعاد نمونه آزمون کشش (بر حسب میلی‌متر)

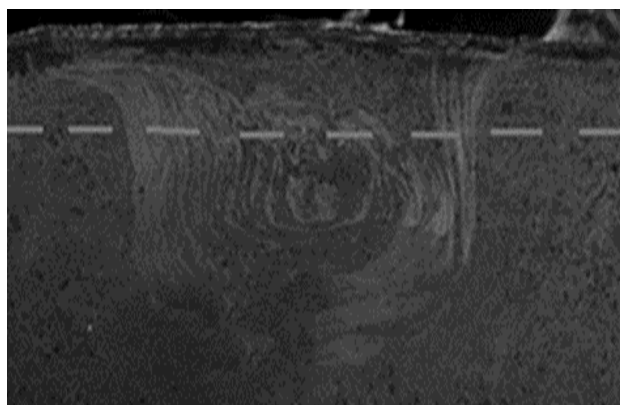


Fig. 5 Position of the microhardness test

شکل 5 محل انجام آزمون میکروسختی

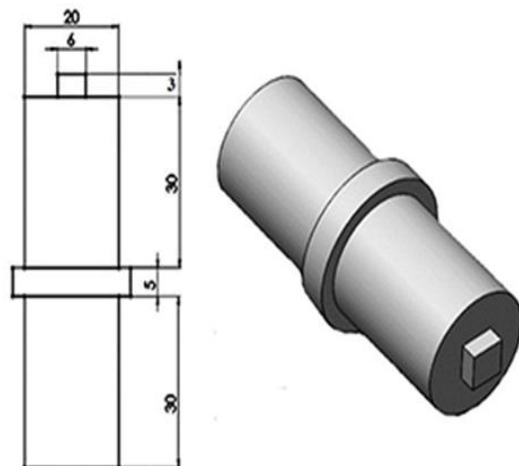


Fig. 2 Schematic of using tool (mm)

شکل 2 نمایی از ابزار مورد استفاده (بر حسب میلی‌متر)

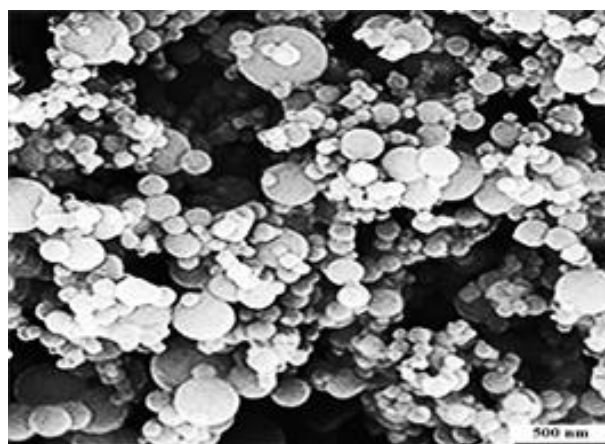


Fig. 3 SEM micrographs of as-received SiO_2 nano particles

شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانو ذرات اکسید سیلیسیوم آورده شده است. با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی این نانو ذرات از نوع، نانو ذرات اکسید سیلیسیوم کروی هستند.

بدین ترتیب ذرات تقویت کننده درون شیار قرار گرفته و سپس به منظور جلوگیری از خارج شدن ذرات سطح شیار توسط ابزار پوشاننده (بدون پین) بسته می‌شود. سپس ابزار دارای پین در حالی که با سرعت مشخصی درون می‌کند به صورت خطی روی شیار بسته شده به حرکت در می‌آید و مواد را مخلوط می‌کند. سرعت دورانی و پیشروی ابزار از جمله پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی و ریز ساختاری، در فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است. نسبت سرعت دورانی به پیشروی مناسب طی بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی زمینه مسی، مابین 8-17 بدست آمد [12،10،8]. بنابراین در این پژوهش، فرآیند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با سرعت‌های 500، 710 و 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 56 میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه‌ها انجام گرفت و نتایج با فلز پایه مقایسه شد. کد نمونه‌ها و عملیات انجام شده روی آن‌ها در جدول 1 آورده شده است.

برای بررسی‌های ریزساختاری از میکروسکوپ نوری (مدل UNION) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل JEOL) استفاده شد. نمونه‌ها از سطح مقطع فرآوری شده تهیه شدند و قبل از بررسی‌های ریزساختاری به منظور آماده‌سازی تا سنباده نمره 2500 سنباده‌زنی و پولیش شدند. برای بررسی

در جدول 2 میانگین اندازه دانه ها در ناحیه اغتشاش یافته برای نمونه ها با سرعت های دورانی متغیر و سرعت پیشروی ثابت که با استفاده از نرم افزار image J محاسبه شده است، آورده شده است. با استفاده از نتایج جدول می توان گفت با افزایش سرعت دورانی در فرآیند FSP اندازه دانه ها افزایش یافته است. با مقایسه ی نتایج زیر متوجه خواهیم شد که در اثر فرآیند FSP بر روی نمونه ها، میانگین اندازه دانه از $32 \pm 0.9 \mu\text{m}$ به $10 \pm 0.1 \mu\text{m}$ کاهش یافته است.

می توان گفت 2 دلیل مهم برای تغییر اندازه دانه در این ناحیه وجود دارد [10]:

- گرمای درونی، با افزایش گرمای درونی اندازه دانه های این ناحیه افزایش می یابد.
- تبلور مجدد دینامیکی پیوسته، تغییر شکل پلاستیک متوالی و تنش های دینامیکی در این ناحیه باعث هسته گذاری جدید و کاهش سایز دانه ها در این ناحیه می شود.

در اثر گرمای بالا در حین فرآیند و تغییر فرم پلاستیک شدید بوجود آمده، ساختارهای تبلور مجدد یافته ریزدانه در منطقه ی اغتشاش یافته ایجاد می شود. نواحی هسته در نمونه های FSP شده یا ساختارهای ریزدانه که در نتیجه ی تبلور مجدد و تغییر فرم پلاستیک شدید در اثر گرمای بالا ایجاد شده اند در فرآیند FSP مشخص می شوند [14].

محققان براین باورند که ریز شدن دانه ها در منطقه SZ ناشی از تبلور مجدد دینامیکی است [15-19]. بنابر این فاکتور های مؤثر بر جوانه زنی و رشد همانند، دمای قطعه، فشار عمودی، هندسه ابزار، ترکیب شیمیایی ماده در حین تبلور مجدد دینامیکی ساختار نهایی را در این ناحیه مشخص می کنند.

دانه ها در ناحیه ی اغتشاشی به علت تبلور مجدد پویا و بالا بودن کرنش و گرمای حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، محوری شده و به طور کامل تبلور مجدد می شوند. گرمای حاصل از اصطکاک بین پین و قطعه کار می تواند انرژی کافی را برای رساندن دمای ناحیه اغتشاشی 0.6 - 0.8 دمای نقطه ذوب ماده تامین کند، که این دما از دمای مربوط به تبلور مجدد (0.5 T_m) بیشتر است [6].

شکل 7 (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اغتشاشی و (ب) نتیجه آنالیز عنصری را نشان می دهد. برخی محققین ناحیه ی هسته را به صورت حلقه های پیاز گزارش کرده اند [20]. همچنین برخی منابع گزارش هایی از حضور دانه های کوچکتر، با دانسیته ی بالاتر مرزهای فرعی و نابجایی ها ارائه کرده اند [21، 22].

3-2- میکروسختی

نمودار میکروسختی نمونه های مختلف در شکل 8 آورده شده است. میانگین سختی اندازه گیری شده برای فلز مس خالص 84HV است. در شکل 8 سختی نمونه های FSP شده نشان داده شده است. مقدار سختی اندازه گیری

جدول 2 میانگین اندازه دانه ها

شماره نمونه	1	2	3	4	5
اندازه دانه (μm)	32 ± 0.9	10 ± 0.1	13 ± 0.9	19 ± 0.8	20 ± 0.5

آزمون سایش توسط دستگاه پین بر روی دیسک¹ طبق استاندارد ASTM G99 انجام شد. این آزمون در دمای محیط با میزان رطوبت (40%-30) صورت گرفت. جنس دیسک از نوع AISID3 و سختی 58 HRC بود. سرعت آزمون 0.1 متر بر ثانیه و نیروی 10 نیوتون و مسافت 500 متر و با فاصله زمانی 100 متر در نظر گرفته شد. کاهش وزن نیز توسط ترازو با حساسیت 0.001 گرم بعد از هر فاصله زمانی اندازه گیری شد و نیروی اصطکاک به صورت خودکار ثبت و در نهایت سطح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

در اثر تغییر فرم پلاستیک شدید مواد در دمای بالا در داخل و اطراف منطقه اغتشاش یافته در طی فرآیند FSP تغییرات مهمی در ریزساختار ماده به وجود می آید. این تغییرات شامل تغییر در اندازه دانه، و مرزدانه و حل شدن و از بین رفتن و یا توزیع دوباره رسوبات در زمینه است. بنابراین در طول فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث تغییر فرم پلاستیک شدید در ماده می شود. بر پایه ی این تغییر فرم ایجاد شده سه منطقه ی متفاوت از نظر ریزساختار دانه ها به نام های: منطقه ی اغتشاش یافته $(SZ)^2$ ، منطقه ی تحت تاثیر حرارت- مکانیکی $(TAMZ)^3$ ، منطقه ی تحت تاثیر حرارت $(HAZ)^4$ در قطعه مشخص می شود. تفاوت این سه ناحیه در شکل 6 نشان داده شده است.

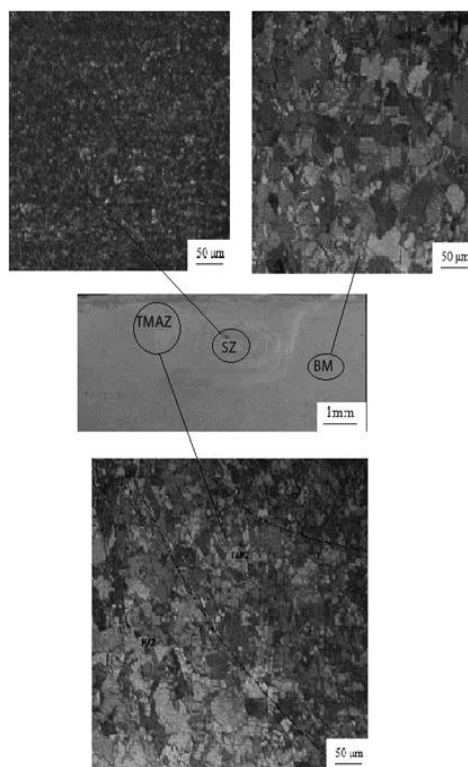


Fig. 6 Optical micrographs of transverse cross-sectional of the FSP specimens

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه های FSP شده

¹ Pin on disk
² Stirred zone
³ thermo – mechanically affected Zone
⁴ Heated affected Zone

که در رابطه ی (1)، H_0 تنش اصطکاکی، D قطر دانه، k عددی ثابت است که به جنس ماده ی مورد نظر نیز بستگی دارد.

ساتیسکومار و همکاران [24] در تحقیقات خود مشاهده کردند که با افزایش سرعت دورانی ابزار ناحیه کامپوزیت سطحی بزرگتر و دانه ها در این ناحیه درشت تر می شوند که این مطلب خود دلیل کاهش میکروسختی کامپوزیت سطحی است.

بهترین نتیجه مربوط به نمونه ی با پودر و سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 56 میلی متر بر دقیقه است. میزان سختی اندازه گیری شده برای این نمونه 121 HV است که این مقدار در مقایسه با فلز پایه 37 HV افزایش یافته است. این در حالی است که در نمونه های بدون پودر سختی به طور قابل ملاحظه ای افزایش نیافته است.

3-3- آزمون کشش

آزمون کشش برای نمونه های FSP شده به منظور بررسی خواص کششی، شامل استحکام شکست، استحکام تسلیم و ازدیاد طول در دمای اتاق انجام گرفت. نتایج آزمون کشش برای فلز پایه و نمونه های FSP شده در شکل 9 آورده شده است. نتایج نشان می دهد که میزان استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به فلز پایه افزایش یافته است. این مقدار برای نمونه بهینه و فلز پایه به ترتیب برابر 227 و 218 مگاپاسکال اندازه گیری شد و میزان ازدیاد طول برای نمونه های بدون پودر نسبت به فلز پایه کاهش یافته است. همچنین منحنی تنش- کرنش و داکتیلیته برای فلز پایه و نمونه های فرآوری شده در شکل 10 و 11 مشاهده می شود.

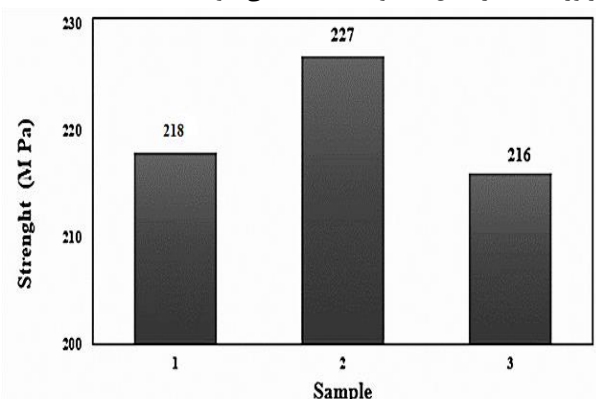


Fig. 9 Mechanical properties of BM and FSP samples

شکل 9 خواص مکانیکی فلز پایه و نمونه های فرآوری شده

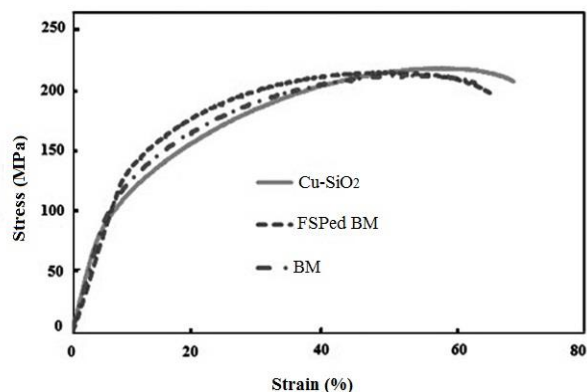


Fig. 10 Stress-strain curves for pure copper and specimens

شکل 10 منحنی تنش-کرنش برای فلز پایه و نمونه های فرآوری شده

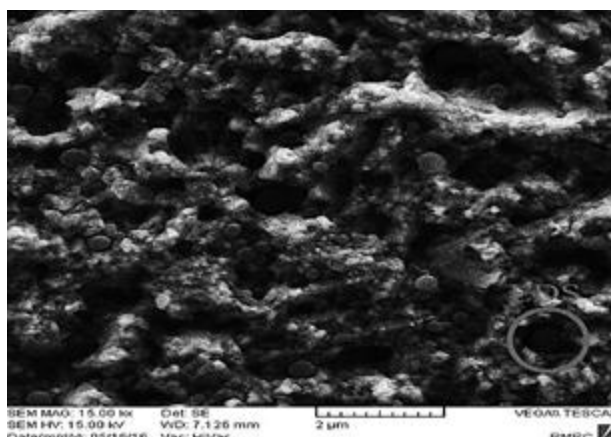


Fig. 7 SEM micrograph of the SZ (a), EDS composition analysis(b)

شکل 7 الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اغتشاشی (ب) نتیجه آنالیز

عنصری

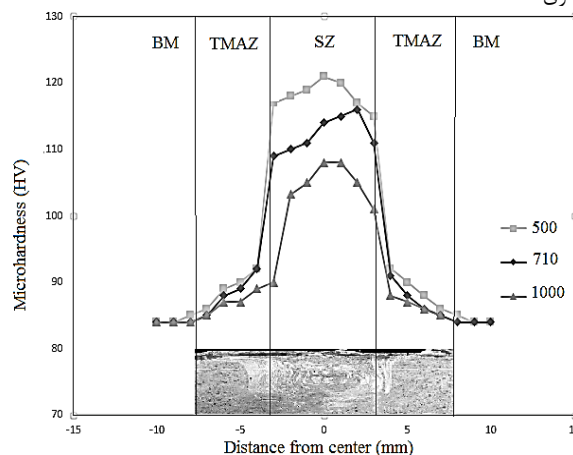


Fig. 8 Hardness values of BM and FSP specimen

شکل 8 نمودار سختی فلز پایه و نمونه های فرآوری شده

شده در اطراف ناحیه SZ به دلیل اثر آنیلینگ و در نتیجه رشد دانه ها در این نواحی، کاهش می یابد. از طرف دیگر در ناحیه ی هسته به علت اثر قفل کنندگی و تبلور مجدد دینامیکی ایجاد شده اندازه دانه ها کاهش می یابد و دانسیته ی نابجایی ها بالاتر می رود و این امر منجر به بهبود رفتار سختی پذیری می شود [10]. همچنین می توان گفت با آنیل شدن و افزایش گرمای درونی مقدار سختی اندازه گیری شده کاهش می یابد [10]. برای توجیه این مطلب می توان از رابطه ی هال-پیچ استفاده کرد. این رابطه بیان میکند که با کاهش اندازه دانه مقدار سختی افزایش می یابد [23]. بنابراین به علت کاهش اندازه دانه در ناحیه SZ میزان سختی در این ناحیه طبق رابطه ی (1) افزایش می یابد.

$$H_v = H_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

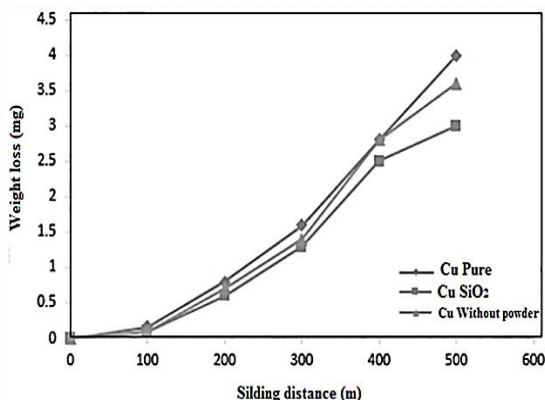


Fig. 12 Variation of weight loss with the sliding distance

شکل 12 تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش

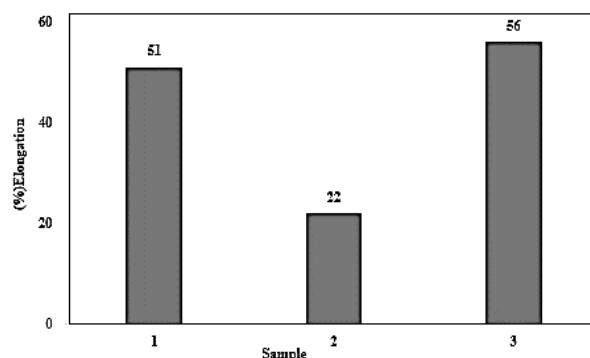


Fig. 11 Ductility of BM and FSP samples

شکل 11 داکتیلیته‌ی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

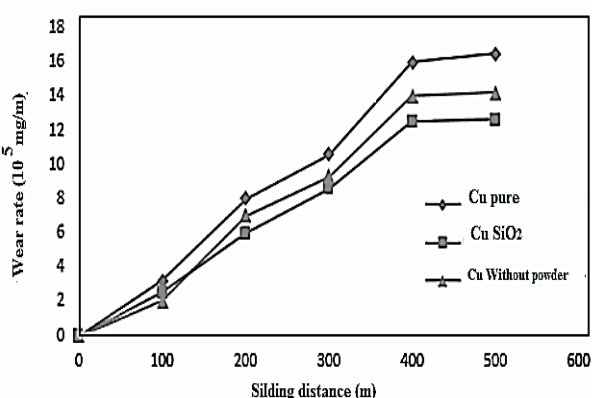


Fig. 13 Variations of wear rate with the sliding distance

شکل 13 تغییرات نرخ سایش بر حسب مسافت لغزش

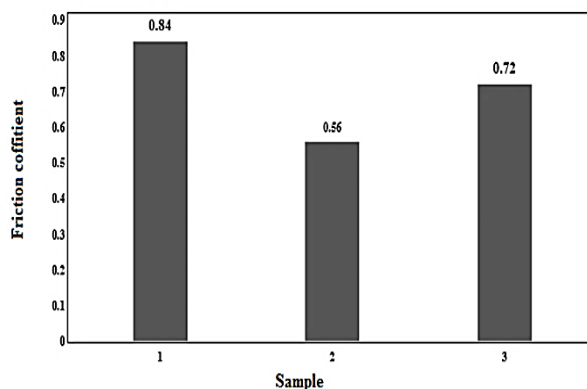


Fig. 14 Variations of friction coefficient with sliding distance for base metal and specimens FSPed

شکل 14 تغییرات ضریب اصطکاک متوسط برای فلز پایه و نمونه های مختلف

سرمدی و همکاران [8] در تحقیقات خود مشاهده کردند، با افزایش درصد تقویت کننده ضریب اصطکاک نمونه‌های فرآوری شده کاهش می‌یابد. همچنین مکانیزم سایش از چسبان به ورقه‌ای تغییر می‌کند.

از جمله دلایل افزایش مقاومت به سایش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مکانیزم استحکام دهی اوراوان به‌وسیله توزیع ذرات تقویت کننده
- افزایش سختی و استحکام
- کاهش بار تماسی بین کامپوزیت و پین در مقایسه با فلز پایه

[10]

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش اندازه دانه می‌شود و این ریزدانه‌گی در جهت بهبود خواص کششی بسیار موثر است.

به منظور بهبود استحکام و درصد ازدیاد طول کامپوزیت‌های زمینه فلزی تولید شده به روش FSP این فرآیند در پاس‌های متوالی تکرار می‌شود. بشارتی و همکاران [25] اثر تعداد پاس بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی مس با ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیوم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش تعداد پاس خواص مکانیکی از جمله میکرو سختی و استحکام کششی بهبود یافته است. این عمل موجب توزیع همگن‌تر ذرات تقویت کننده و پیوند قوی‌تر زمینه - تقویت کننده می‌شود [10]. از دیگر عوامل افزایش استحکام کامپوزیت‌ها حضور ذرات تقویت کننده در مرز دانه‌ها و ممانعت آن‌ها از رشد دانه‌هاست. مطالعات نشان می‌دهد حضور ذرات سخت SiO₂ در مرز دانه‌ها مانع رشد دانه‌ها شده و افزایش استحکام در ناحیه اغتشاشی را موجب می‌شود [26]. در واقع 3 عمل موجب افزایش استحکام کششی می‌شود:

- نابجایی‌ها
- اندازه دانه
- مکانیزم اوراوان

به علت نزدیک بودن فاصله ذرات به یکدیگر مهاجرت نابجایی‌ها قطع می‌شود، بنابراین برای تغییر شکل پلاستیک تنش بیشتری را باید اعمال کنیم که این خود باعث افزایش استحکام ماده می‌شود [27].

4-3- آزمون سایش

آزمون سایش بر روی مس خالص و نمونه‌های فرآوری شده با تقویت کننده و بدون تقویت کننده به روش پین بر روی دیسک انجام شد. شکل 12 نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش را نشان می‌دهد.

شکل 13 نمودار نرخ سایش را بر حسب مسافت لغزش نشان می‌دهد در این نمودار بیشترین نرخ سایش مربوط به فلز پایه و کمترین نرخ سایش مربوط به نمونه‌ی با ذرات تقویت کننده است. به‌طوریکه میزان کاهش وزن این نمونه‌ها به ترتیب 40 و 30 درصد کاهش را نشان می‌دهد.

شکل 14 تغییرات ضریب اصطکاک را برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده نشان می‌دهد.

حضور ذرات تقویت کننده در زمینه منجر به ریز شدن دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی می‌گردد و در نتیجه میزان سختی افزایش می‌یابد و مقاومت سایشی نمونه‌های فرآوری شده بهبود می‌یابد [27].

4- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از فرآوری اغتشاشی اصطکاکی، کامپوزیت زمینه مسی تقویت شده با ذرات اکسید سیلیسیوم تولید شد. میانگین اندازه دانه های ایجاد شده در این فرآیند 32 μm برای فلز پایه به 10 μm برای کامپوزیت سطحی کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت دانه بندی بزرگتر می شود. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که بیشترین استحکام تسلیم مربوط به نمونه ی با سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 56 میلیمتر بر دقیقه است. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث ریزدانه شدن در ناحیه اغتشاشی می شود و میکروسختی نمونه های FSP شده، از 84 MPa برای فلز پایه به 121 MPa برای کامپوزیت سطحی افزایش یافت. همچنین بیشترین نرخ سایش مربوط به فلز پایه است و به علت حضور ذرات سخت اکسید سیلیسیوم در مرز دانه ها موجب ممانعت از رشد دانه ها می شود و در نتیجه میزان سختی در ناحیه اغتشاشی افزایش یافته و در نهایت بهبود مقاومت به سایش و کاهش 28 درصدی ضریب اصطکاک در مقایسه با فلز پایه مشاهده شده است.

5- تقدیر و تشکر

در پایان از مسئولین محترم آزمایشگاه های خواص مکانیکی، متالوگرافی، ماشین ابزار دانشگاه بوعلی سینا به علت همکاری شان تقدیر و تشکر می نمایم.

6- مراجع

- [1] Surekh, k. and Els-Botes, A., "Development of high strength, high conductivity copper by friction stir processing," *Materials and Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 911-916, 2011.
- [2] Woo, W. choo, H. Prime, M. B. Feng, Z. and Clausen, B., "microstructure, and residual stress in a friction stir processed AZ31B magnesium alloy," *Acta Materiala*, Vol. 56, No. 8, pp. 1701-11, 2008.
- [3] Mishra, R. S. and Ma, Y. Z., "Friction stir weldin and processing," *Materials Science and Engineerin*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-78, 2005.
- [4] Degischer, H. p., "Innovative Light Metals: Metal Matrix Composites and Foamed Aluminium", *Materials & Design*, Vol. 18, No. 5, pp. 221-226, 1997.
- [5] Heidarpour, A. Ahmadifard, S. and Kazemi, Sh., "Fabrication and Characterization of Al5083/Al₂O₃ Surface Nanocomposite via Friction Stir Processing", *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 5, No. 2, pp. 11-24, 2017.
- [6] Ahmadifard, S. Kazemi, Sh. Heidarpour, A., "Fabrication of Al5083/TiO₂ surface copomsite by friction stir process and investigating its microstructural mechanical and wear properties", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 55-62, 2015.
- [7] 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.
- [8] Xie, G. M. Ma, Z. Y. and Geng, L., "Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper", *Scripta Materiala*, Vol. 57, No. 6, pp. 73-76, 2007.
- [9] Akramifard, H. R. Shamanian, M. Sabbaghian, M. and Esmailzadeh, M., "Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing", *Materials and Design*, Vol. 54, No. 1, pp. 838-844, 2013.
- [10] Barmouz, M. Besharati Givi, M. K. and Seyfi, J., "On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behaviour," *Materials characterization*, Vol. 62, No. 2, pp. 108-111, 2011.

سایتسکومار و همکاران [24] اثر تغییرات سرعت دورانی ابزار را بر روی نرخ سایش کامپوزیت سطحی Cu/B₄C بررسی کردند. آن ها مشاهده کردند که با افزایش سرعت دورانی طبق قانون آرچارد نرخ سایش نمونه های فرآوری شده نیز افزایش می یابد. این قانون بیان می کند که مقدار جرم ساییده شده با افزایش سختی فلز مورد نظر کاهش می یابد، بنابراین با افزایش سرعت دورانی و کاهش سختی فلز پایه جرم از دست رفته در نمونه های فرآوری شده افزایش می یابد.

$$V_1 = (a_w \times P \times d_s) / H_m$$

(2)

که در رابطه (2)، V_1 جرم ساییده شده، a_w ضریب سایش ماده مورد نظر، P بار وارد شده به ماده، H_m سختی ماده مورد نظر است. شکل 15 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح ساییده شده را نشان می دهد. باتوجه به شکل، میزان کنده شدن ماده از سطح فلز پایه نسبت به نمونه های فرآوری شده بیشتر است. به علت نرم تر بودن فلز پایه پین ساینده بیشتر در سطح فلز نفوذ کرده و باعث کنده شدن بیشتر ماده از سطح و ایجاد شیارهایی با عمق بیشتر در سطح می شود. وجود ذرات تقویت کننده در زمینه مانع کنده شدن پیوسته ذرات از سطح شده و باعث بهبود مقاومت به سایش در نمونه با کد 2 شده است. با مشاهده ی تصاویر سطوح سایش میتوان گفت: مکانیزم غالب سایش نمونه ها، عمدتاً سایش خراشان است که با انواع پدیده های خراش، تورق، ایجاد لبه رخ داده است.

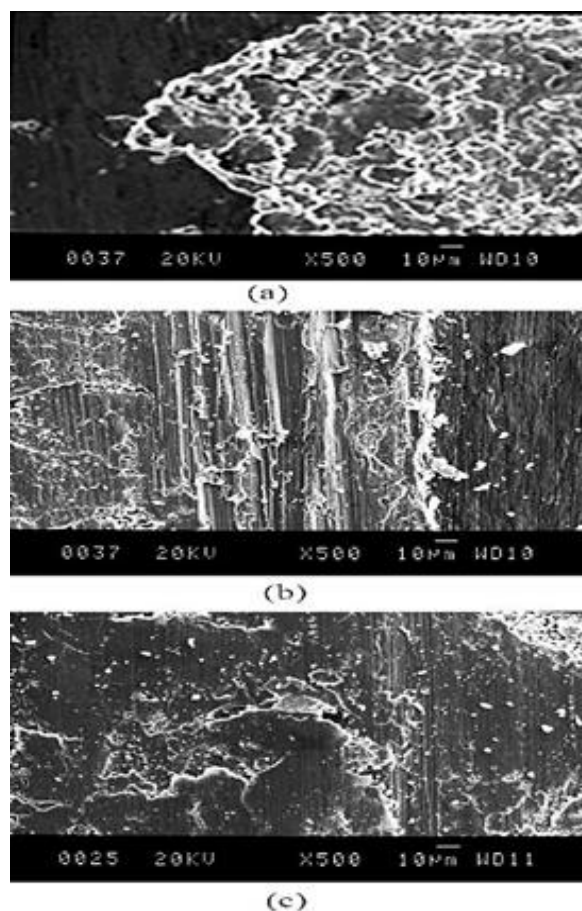


Fig. 15 SEM micrograph of the worn out track of (a) BM (b) specimen whit reinforcement (c) specimen whitout reinforcement
 شکل 15 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از سطح ساییده شده، (الف) فلز پایه (ب) نمونه همراه تقویت کننده (ج) نمونه بدون تقویت کننده

- [11] Barmouz, M. Asadi, P. Givi, M. K. B. and Taherishargh, M., "Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles size and volume fraction", *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 3, pp. 1740–1749, 2011.
- [12] Avettand-Fenoel, M. N. Simar, A. Shabadi, R. Taillard, R. and de Meester, B., "Characterization of oxide dispersion strengthened copper based materials developed by friction stir processing", *Materials and Design*, Vol. 60, No. 2, pp. 343–357, 2014.
- [13] Raju, L. Suvarna, and A. Kumar., "Influence of Al₂O₃ particles on the microstructure and mechanical properties of copper surface composites fabricated by friction stir processing", *Defence Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 1-9, 2014.
- [14] Lee, W. B. and Jung, S. B., "The joint properties of copper by friction stir welding", *Materials Letters*, Vol. 58, No. 5, pp. 1041–1046, 2004.
- [15] Krishnan, K. N., "On the formation of onion rings in friction stir welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 327, No. 2, pp. 246-251, 2002.
- [16] Mahoney, M. W. Rhodes, C. G. Flintoff, J. G. Spurling, R. A. and Bingel, W. H., "Properties of friction stir welded 7075 T651 aluminum", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29, No. 9, pp. 1955-1964, 1998.
- [17] Ma, Z. Y. and Mishra, R. S., "Development of ultrafine-grained microstructure and low temperature (0.48 Tm) superplasticity in friction stir processed Al-Mg-Zr", *Scripta Materialia*, Vol. 53, No. 3, pp. 75–80, 2005.
- [18] Su, J. Q. Nelson, T. W. and Sterling, C. J., "A new route to bulk nanocrystalline materials", *Journal of Materials Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 1757–1760, 2003.
- [19] Su, J. Q. Nelson, T. W. and Sterling, C. J., "Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys", *Scripta Materials*, Vol. 52, No. 4, pp. 135–140, 2005.
- [20] Mishra, R. S. and Mahoney, M. W., "Friction Stir Processing: A New Grain Refinement Technique in Commercial Alloys", *Materials Science Forum*, Vols. 357-359, No. 1, pp. 507-514, 2001.
- [21] Sato, Y. S. Kokawa, H. Enomoto, M. Jogan, S. and Hashimoto, T., "Precipitation sequence in friction stir weld of 6063 aluminum during aging", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, No. 2, pp. 3125-3130, 1999.
- [22] Jata, K. V. Sankaran, K. K. and Ruschau, J. J., "Friction Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminum Alloy 7050 T7451", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, No. 9, pp. 2181-2192, 2000.
- [23] Ma, Z. Y., "Friction Stir Processing Technology: a Review", *Metal Material Transaction A*, Vol. 39, No. 4, pp. 642–58, 2008.
- [24] Sathiskumar, R. Dinaharan, I. Murugan, N. and Vijay, S. J., "Influence of tool rotational speed on microstructure and sliding wear behavior of Cu/B₄C surface composite synthesized by friction stir processing", *Transactions Nonferrous Metal Society China*, Vol. 24, No. 4, pp. 95–102, 2004.
- [25] 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, No. 5, pp. 1445–53, 2011.
- [26] Khayyamin, D. Mostafapour, A. and Keshmiri, R., "The effect of process parameters on microstructural characteristics of AZ91/SiO₂ composite fabricated by FSP", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, No. 9, pp. 217–221, 2013.
- [27] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, Sh. 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.