



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی خواص تریبولوژیکی نانوکامپوزیت آلایژ مس / دی اکسید تیتانیوم تولید شده با استفاده از فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی

احمد افسری^{1*}، علیرضا رهبر²، مازیار جانقربان³، بهداد جهان‌بین¹

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز.

2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز.

3- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت.

* شیراز، صندوق پستی 71365-364، Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

دریافت: 1401/09/04

پذیرش: 1402/02/20

کلیدواژگان

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی،

مس، دی اکسید تیتانیوم، ریزساختار،

سایش، خوردگی

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روشی برای فرآوری حالت جامد آلایژهای فلزی می‌باشد. جهت انجام فرآیند از ماشین فرز FP4M و ابزار دوار غیرمصرفی برای ایجاد حرارت لازم و اختلاط بیشتر مس با پودر دی اکسید تیتانیوم استفاده گردید. ورق پایه از جنس مس با خلوص 99.9٪ است. حرارت ایجاد شده در طی فرآیند بر روی قطعه مسی و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم موجود در شیار، منجر به تغییرات متالورژیکی در ریزساختار فلز پایه شده و منجر به تغییر اندازه دانه‌ها و شکل آن‌ها می‌گردد. نمونه‌ها تحت عملیات متالوگرافی و بررسی‌های ریزساختی توسط میکروسکوپ نوری، XRD، آزمون‌های خوردگی و سایش قرار داده شدند. نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه HAZ نزدیک به فرآیند، و در ناحیه فرآیند، دانه‌ها بصورت ساختار بسیار ریزدانه حاوی نواحی دوقلویی با میانگین اندازه دانه 14 می‌باشند. مقایسه میانگین ضریب اصطکاک در نمودار سایش مس پایه و مس بعد از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی نشان دهنده کاهش مقاومت سایشی می‌باشد. با مقایسه نمودار خوردگی نمونه مس پایه و نمونه مس اصطکاکی اغتشاشی، مشخص گردید که تفاوت محسوسی بین جریان خوردگی در اثر فرآیند وجود ندارد.

Investigation of Tribological Properties of Nano-Composite Copper / Titanium Dioxide Alloy Produced Using Friction-Stir Process

Ahmad Afsari^{*1}, Alireza Rahbar¹, Maziar Janghorban², Behdad Jahanbeen¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

* P.O.B. 71365-364 shiraz, Iran, Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

Keywords

Friction Stir Processes, Copper, Titanium dioxide, Microstructure, Wear, Corrosion.

Abstract

The FSP is a method for solid state processing of metal alloys. FP4M milling machine and non-consumable rotary-tools were used to create the necessary heat and further mixing of copper with titanium-dioxide powder. The base plate is made of copper with a purity of 99.9%. The heat created during the process on the copper piece and the titanium-dioxide nanoparticles in the groove leads to metallurgical changes in the microstructure of the base metal and leads to changes in the size and shape of the grains. The samples were subjected to metallography and microstructure investigations by OP, XRD, corrosion and wear tests. The results showed that in the HAZ and SZ area, the grains were in the form of a ultrafine grain structure. The average friction coefficient in the base copper wear diagram is lower than pure copper that showed FSP weakened wear properties. Comparing corrosion graphs of base copper sample with FSP sample, showed no evident changing in corrosion resistance.

1- مقدمه

مزایای آن می‌توان به ایجاد منطقه تحت تأثیر حرارت بسیار کوچک در قطعه و همچنین کاهش آلایندگی زیست‌محیطی به علت مصرف انرژی کم آن اشاره نمود. اما با وجود این مزایا، عیوبی که در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به

اخیراً فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی به عنوان روش اتصال، فرآوری و ایجاد تغییرات میکروساختاری در مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد که از مهم‌ترین

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Afsari, A., Rahbar, A., Janghorban, M., Jahanbeen, B., "Investigation of Tribological Properties of Nano-Composite Copper / Titanium Dioxide Alloy Produced Using Friction-Stir Process," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2067-2074, 2023.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1974326.1814

قرار گرفته که نتایج حاصل، کاهش ضریب اصطکاک حداقل تا حدود 48٪ نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد. نتایج حاصله از آزمایش‌های سایش و سختی نشان می‌دهد که فرآوری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند مقاومت سایشی و سختی مس خالص تجاری و آلایز برنج را به نحو چشمگیری افزایش دهد [7].

در پژوهشی دیگر با افزودن نانوپودر سرامیکی ZrO_2 به فلز پایه مسی و استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت Cu/ZrO_2 ایجاد شده است. همچنین در بخشی دیگر از این پژوهش نمونه‌ای بدون استفاده از پودر ZrO_2 با شرایط مشابه تهیه و خواص آن به منظور مقایسه با دیگر نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های سایش، ریزسختی و بررسی ریزساختار حاکی از آن است که خواص سایشی و سختی بسیار مطلوبی نسبت به فلز پایه به دست آمده و ریزدانه کردن مس که از پیش مد نظر بوده، کاملاً بدست آمده است. در حالت چهارگذره فرآیند با نانوذرات، لایه کامپوزیتی فرآوری شده از یکنواختی و همگنی بیشتری برخوردار است و دارای خواص مکانیکی بالاتری نسبت به فلز پایه و نمونه‌های بدون پودر است. بر اساس نتایج، بیشترین میزان سختی بدست آمده در حالت چهارگذره با پودر در مقایسه با سختی فلز پایه افزایش بیش از 3.5 برابری داشته است. کمترین میزان ضریب اصطکاک مربوط به نمونه چهارگذره فرآیند با نانوذرات است که بهبود چشمگیری در خواص سایشی نشان می‌دهد [8].

کاربرد ذرات SiC و $h-BN$ بر روی زمینه مسی در فرآیند FSP نیز باعث افزایش سختی مس خالص از حدود 70 ویکرز به 180 ویکرز شده است. پودر SiC اثر قوی‌تری در سخت کردن داشته که ممکن است بدلیل سختی ذاتی بالاتر آن نسبت به پودر $h-BN$ باشد [9]. در تحقیقی ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به طور یکنواخت بر روی سطح ماتریس آلومینیوم از طریق فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با دو پاس پراکنده شدند تا بتوان اثر تعداد عبور بر توزیع ذرات، ریزساختار، ریزسختی و خواص سایشی را به طور سامان‌مند مورد بررسی قرار داد. در این خصوص مطالعات ریزساختاری به دلیل تبلور مجدد دینامیکی، ساختار دانه‌ای هم محور ریز را در منطقه اغتشاشی نشان داده و نمونه کامپوزیت سطح گذر اول به دلیل جریان و کرنش ناکافی مواد منجر به تجمع ذرات به سمت ناحیه پیشرو شده است. با تغییر ناحیه پیشرو و پسرو در پاس دوم، نتایج حاکی از آن است که تغییرات شدید در اندازه دانه نسبت به نمونه اولیه مشاهده شد به نحوی که اندازه دانه اولیه از 42.85 میکرومتر به 4.5 میکرومتر رسیده است. کامپوزیت‌های سطحی فرآوری شده توسط پاس دوم سختی و مقاومت در برابر سایش بهتری از خود نشان می‌دهند [10]. مقایسه آلومینیوم با نمونه‌های قرار گرفته در معرض 4 تا 6 پاس فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی و نمونه دارای پودر اکسید تیتانیوم نشان از افزایش استحکام کششی و تسلیم و کاهش قابلیت انعطاف در نمونه‌های دارای پودر است. در نمونه‌های از 4 تا 6 پاس بدون پودر شکسته شدن ذرات اکسید تیتانیوم و واکنش‌های ایجاد ترکیب بین فلزی Al_3Ti و سرامیک Al_2O_3 نشان داده شده است [11].

در فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی ذرات تقویت‌کننده مختلف در زمینه Al 5059 برای تولید کامپوزیت‌های استفاده گردیده است. آزمایش‌های کشش به ترتیب افزایش 11، 20 و 35 درصد افزایش در استحکام تسلیم را نسبت به آلایز آلومینیوم اولیه برای کامپوزیت‌های شامل ذرات نانویی SiC ، Al_2O_3 و B_4C نشان می‌دهد. بیشترین استحکام تسلیم و سختی و کمترین قابلیت انعطاف مرتبط با کاربرد پودر تقویت‌کننده B_4C بوده است. استفاده از ذرات 4.3 میکرونی Al_2O_3 بجای ذرات 1.1 میکرونی باعث شده است که ریز

وجود می‌آید ممکن است خطرناک بوده ولی با کنترل صحیح پارامترهای فرآیند می‌توان این عیوب را کاهش داد و یا از تشکیل آن جلوگیری نمود [1]. افزایش تقاضا برای بهبود خواص آلایز ساخته شده از یک سو، و همچنین ضرورت کاهش جرم یک سازه از سوی دیگر، منجر به تحقیقات مهندسی مواد شده تا باعث بهبود لایه‌های سطحی و خواص عملکردی مورد نیاز گردد. روش‌هایی مانند روکش کردن، پاشش حرارتی و ذوب مجدد با پرتو لیزر که معمولاً در تولید لایه‌های سطحی استفاده می‌شوند، سال‌ها است که شناخته شده‌اند. یک روش جدید، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی لایه‌های سطحی است. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در درجه اول برای اصلاح ریزساختار در لایه‌های نزدیک به سطح اجزاء فلزی استفاده می‌شود. به طور خاص، این فرآیند ممکن است ساختار ریزدانه، کامپوزیت سطحی، اصلاح ریزساختاری آلایزهای ریخته‌گری، آلایزسازی با عناصر خاص و بهبود کیفیت اتصالات جوش را ایجاد نماید [2] و [3]. مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخش یا دوران ابزار بر حسب دور در دقیقه و سرعت پیشروی ابزار بر حسب میلی‌متر بر دقیقه است. برای رسیدن به محدوده تغییر شکل پلاستیک مواد، حرارت و دمای کافی مورد نیاز بوده و در صورتی که دمای ماده تحت فرآیند به میزان کافی بالا نرود، عملیات ناقص و منجر به ایجاد عیب می‌گردد. از طرف دیگر اگر گرمای اصطکاکی به وجود آمده در واحد طول بیش از حد افزایش یابد، ماده متخلخل شده و خواص نهایی آن افت می‌کند. یکی از پارامترهای مهم برای رسیدن به فرآوری بی‌عیب در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، انتخاب مناسب سرعت دوران ابزار نسبت به سرعت پیشروی آن است. تحقیقات انجام شده نشان داده که هر آلایز در محدوده مشخصی از این نسبت می‌تواند به فرآوری با خواص مطلوب منتهی شود بعلاوه سطح مقطع پین و شانه و جنس ابزار و طراحی ابزار و نیروی عمودی اعمالی نیز بر خواص مناطق مختلف فرآوری شده تأثیرات جدی دارند [4] و [5].

خدابخشی و همکاران [6] تولید نانوکامپوزیت سطحی زمینه مس با ذرات تقویت‌کننده SiO_2 به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود خواص مکانیکی را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان دهنده این است که فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی به تنهایی و بدون دخالت پودر باعث کاهش اندازه دانه از 32 میکرومتر به 10 میکرومتر شده است. کاربرد پودر باعث کاهش اثر فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی در ریز کردن دانه‌ها شده و اندازه دانه‌ها از 32 به 13 کاهش پیدا کرده است. با افزایش سرعت دورانی در نمونه‌های دارای پودر، اندازه دانه‌ها افزایش و در نتیجه سختی کاهش می‌یابد ولی اثر پودر یا فرآیند در این مورد مشخص نیست و نتایج آزمون کششی نشان دهنده آن است که استحکام کششی فلز پایه و فلز فرآوری شده بدون پودر و نمونه حاوی کامپوزیت سطحی تولید شده به ترتیب 218 و 227 و 216 مگاپاسکال می‌باشد. بیشترین استحکام کششی و کمترین قابلیت انعطاف و ضریب اصطکاک مربوط به نمونه بدون پودر بوده است. افزایش پودر اکسید سیلیسیم باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی نسبت به فلز پایه شده است که ناشی از سختی ذاتی ذرات پودر اکسید سیلیسیم می‌باشد.

در پژوهشی برای انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی مس خالص تجاری و آلایز برنج در زیر آب از ابزاری از جنس کاربید تنگستن استفاده شد. بررسی‌های ریزساختار نمونه‌های مس خالص تجاری، کاهش فوق‌العاده اندازه دانه را نشان داده و به همین ترتیب سختی سنجی مقطع عرضی و عمود بر راستای فرآیند، افزایش سختی نمونه‌ها تا 45٪ بیشتر از فلز پایه مشاهده گردید. همچنین رفتار سایشی نمونه‌ها با روش پین روی دیسک مورد بررسی

می‌شود، همچنین افزایش پاس‌های FSP، با جهت مخالف حرکت ابزار بین پاس‌های متوالی، مساحت منطقه اغتشاشی را افزایش می‌دهد. لایه‌های AMC فرآوری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با آلومینیوم اولیه به طور قابل توجهی از نظر سختی و مقاومت در برابر سایش بهبود یافته و افزایش پاس‌های فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث بهبود این دو گردیده است [17].

در این پژوهش بهبود خواص تریبولوژیکی نانو کامپوزیت آلایز مس با دی اکسید تیتانیوم TiO₂ با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و به منظور ارزیابی خواص نمونه‌های تولید شده، نمونه‌ها تحت عملیات متالوگرافی و بررسی‌های ریزساختی توسط میکروسکوپ نوری^۲ و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس^۳ و آزمون‌های خوردگی و سایش قرار داده شدند.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از قطعه مسی به عنوان فلز پایه با درجه خلوص 99.9 درصد و از نانو پودر دی اکسید تیتانیوم برای تشکیل کامپوزیت در محل استفاده شده است. مس خالص انعطاف‌پذیر بوده و قابلیت تغییرشکل، چکش‌خواری، صیقل‌پذیری، تورق و مفتول شدن در آن خیلی زیاد است. مس در مقابل ضربه، فشار و کشش هم مقاومت مناسبی دارد. این فلز با برخی فلزات دیگر، آلایزهای بسیار مهمی را تشکیل می‌دهند که خواص و کاربردهای ویژه‌ای در پژوهش، علم و صنعت دارند. مس خالص صنعتی در صنایع الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته و معمولاً از نوع مس کاندی یا بدون اکسیژن است. مس بدون اکسیژن قابلیت انعطاف‌پذیری، مقاومت و چکش‌خواری بهتری از مس کاندی دارد. همه آلایزهای مس دارای مقاومت به خوردگی در برابر آب و بخار بوده و در بیشتر اتمسفرهای صنعتی و دریایی، محلول‌های نمکی، خاک‌ها، کانی‌های غیر اکسیدی، اسیدهای آلی و محلول‌های سوزآور، مقاوم هستند.

در این تحقیق به منظور انجام فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی، ورقی از جنس مس به ابعاد 5×100×200 میلی‌متر تهیه شد. با استفاده از آزمایش کوآنومتری ترکیب شیمیایی آن مورد بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از تخت بودن سطوح آن و عدم وجود اعوجاج در آن، تحت عملیات پرداخت-کاری با استفاده از ماشین سنگ‌زنی قرار داده شد و سپس مطابق شکل 1 با استفاده از یک تیغ فرز اره‌ای از جنس فولاد تندبر، شیاری به ابعاد 2×176 و عمق 3 میلی‌متر بر روی آن نگه داشتن پودر دی اکسید تیتانیوم و اختلاط بهتر و بیشتر با فلز پایه مس ایجاد گردید.

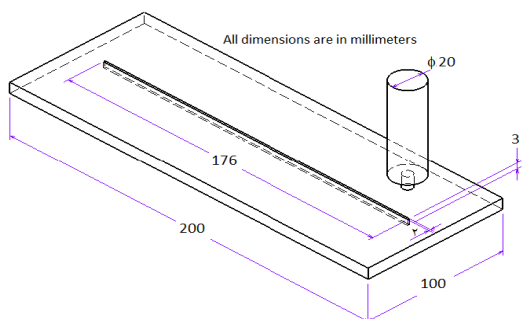


Fig. 1 Schematic diagram of initial part preparation for friction stir processing.

شکل 1 شماتیکی از آماده‌سازی قطعه اولیه برای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

شدن ذرات حدود 10 برابر شده و بدلیل نسبت‌های حجمی بالاتر ذرات اکسیدی، 32 درصد افزایش در استحکام تسلیم در مقایسه با فلز پایه ایجاد شود. به نظر می‌رسد ذرات در مقیاس نانو با افزایش نسبت سطح ذرات در کامپوزیت‌های تولید شده نقش مؤثرتری در افزایش سختی داشته باشند [12]. همچنین در پژوهشی ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات کاربید سیلیسیوم بر سطح فولاد ASTM A106 با به کارگیری فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بررسی شده است و بررسی پوشش‌ها بیانگر بهبود چشمگیر رفتار سایشی آن‌ها در اثر افزودن تقویت‌کننده کاربید سیلیسیوم می‌باشد. با افزایش درصد تقویت‌کننده کاربید سیلیسیوم و کاهش حرارت ورودی باعث افزایش سختی و بهبود عمده در مقاومت سایشی می‌گردد. مکانیزم عمده سایش در نمونه بدون پوشش سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش داده شده مخلوطی از سایش چسبان، اکسایش سطحی و سایش ورقه‌ای تشخیص داده شده است [13].

افزایش درصد حجمی ذرات AlN به زمینه مسی تا 18 درصد نشان داد که سختی از 64 Hv به 109 Hv افزایش پیدا کرده و سرعت سایش از $248 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ در مس خالص به $174 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ رسیده که 30 درصد کاهش را نشان می‌دهد که ناشی از افزایش سختی، کاهش سطح تماس و کاهش ضریب اصطکاک است. افزایش درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده باعث دانسیته بالای نابیایی و ایجاد دانه‌های بسیار ریز شده است. مس خالص دارای مقدار زیادی دوقلوهای آنیلی بوده و پس از انجام FSP نیز در منطقه SZ همچنان این دوقلوها در بزرگنمایی زیاد مشاهده شدند [14].

افزایش دادن پودر TiO₂ در خط جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی مس باعث کاهش بیشتر اندازه دانه و افزایش بیشتر سختی و سفتی ضربه‌ای (به ترتیب 20 و 18 درصد) نسبت به عدم کاربرد آن در این فرایند است. کاربرد پودر و افزایش پاس هرچند باعث بهبود خواص در SZ می‌شود ولی باعث بهبود خواص در منطقه تحت تأثیر حرارت نشده و تمامی نمونه‌های کشتی از این منطقه می‌شکنند. افزایش پاس بدلیل ایجاد حرارت ورودی بیشتر، باعث رشد بیشتر دانه‌ها و کاهش بیشتر استحکام و سختی و سفتی ضربه‌ای در منطقه تحت تأثیر حرارت می‌شود [15].

با افزایش درصد‌های مختلف شیشه مربوط به لوله اشعه کاندی^۱ و 2 درصد BN در نمونه‌های پایه مس در فرایند FSP بدلیل ریز شدن دانه‌ها در SZ سختی تا حدود 65 درصد افزایش می‌یابد ولی نمونه مسی فرایند شده بدون پودر کاهش سختی را نشان می‌دهد. فرایند FSP بطور کلی باعث کاهش استحکام کششی و تسلیم در تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه اولیه می‌شود ولی در نمونه‌های دارای پودر بدلیل اثرات مثبت پودر در افزایش استحکام تسلیم و کشش از طریق ریز کردن دانه‌ها، این اثر مخرب FSP تا حد زیادی برطرف می‌شود. انجام فرایند FSP باعث کاهش کوچکی در سرعت سایش در مس خالص می‌شود ولی افزایش پودر این کاهش سرعت سایش را شدت می‌بخشد. افزایش پودر باعث حرکت ولتاژ شروع خوردگی به سمت اعداد بزرگ‌تر شده و جریان خوردگی نیز کاهش می‌یابد [16]. همچنین در تحقیقی از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای ساخت کامپوزیت سطحی درجا بر اساس سیستم Al-Cu بر روی بستر Al 1060 استفاده شده است. تجزیه و تحلیل XRD نشان داده که با افزایش تعداد پاس‌های FSP، تنها فاز Al₂Cu در جا تشکیل شده و مقدار این فاز هم با افزایش پاس، زیاد

² Optical Microscope, OM

³ X-Ray Diffraction, XRD

¹ Cathod Ray Tube, CRT

1-2- آزمایش‌های ریزساختاری

بر اثر حرارت ایجاد شده در طی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی قطعه پایه مسی و همچنین وجود نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم موجود در شیار، تغییرات متالورژیکی در ریزساختار فلز پایه، رخ می‌دهد. همچنین در این فرآیند امکان تغییر شکل و اندازه دانه‌ها وجود دارد. توزیع ذرات در زمینه می‌تواند به صورت غیر یکنواخت، انباشته، یکنواخت و یا ترکیبی از همه آن‌ها باشد که به شکل متفاوتی خواص را تحت تأثیر قرار خواهند داد. برای انجام آزمایش‌ها تعداد 9 قطعه در معرض آزمایش‌های متالوگرافی (5 نمونه)، سایش (2 نمونه) و خوردگی (2 نمونه) قرار گرفتند. قطعات آماده شده در داخل مواد مانت قرار داده شده و پولیش قطعه با دستگاه پولیشر خودکار Rotopol-3S انجام گردید و سپس نمونه‌ها در معرض یک محیط خوردنده مخلوط اتانول با 2 درصد اسید کلریدریک و 3 گرم $FeCl_3$ قرار گرفته و بر اساس استاندارد ASTM E407-07 اچ شده و در نهایت ریزساختار با میکروسکوپ نوری در محدوده بزرگنمایی 1500-50 مشاهده شدند. برای مطالعه ریزساختاری و تغییرات ایجاد شده در نظم دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی (SZ) برشکاری انجام شده و با دستگاه XRD طبق استاندارد ASTM E3 تحت آزمایش قرار گرفت. بررسی دقیق اثرات فرایند بر روی ساختار با آزمایش بر روی 5 نمونه با کدهای 01، 02، 04، 011 و 22 انجام گردید (شکل 3).



Fig. 3 FSP on parts with codes 01, 02 and 04.

شکل 3 انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی قطعاتی با کد 04، 02، 01

بازرسی چشمی باید از 4 منطقه از هر نمونه انجام شود. در شکل 4 نمونه 01 و سطح مورد مطالعه توسط میکروسکوپ نوری نمایش داده شده است. شکل 5 نیز شماتیکی از سطح جانبی نشان داده شده است چهار ناحیه‌ای که باید مورد بررسی قرار گیرد در این تصویر شماتیک آورده شده است. منطقه اغتشاشی یا منطقه الف مربوط به نمونه شماره 1 در شکل 6 نشان داده شده است. در این ناحیه باید نحوه و میزان توزیع ذرات دیده شود.



Fig. 4 Microstructural investigations by optical microscopy

شکل 4 بررسی‌های ریزساختی سطح جانبی عمود بر خط جوش توسط میکروسکوپ نوری.

دی‌اکسید تیتانیوم گرید 5566 از دسته تیتان‌های روتایل¹ بوده و یک ماده غیرآلی جامد سفیدرنگ است که در برابر حرارت پایدار، غیر قابل اشتعال و دارای قابلیت انحلال ضعیف است.

جهت انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی از ماشین فرز FP4M ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده گردید. ابزار مورد استفاده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در این تحقیق در شکل 2 مشاهده می‌شود. از مهم‌ترین عوامل در طراحی ابزار، جنس آن می‌باشد زیرا ابزار باید مقاومت کافی در برابر حرارت ناشی از اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را دارا باشد. در این تحقیق از ابزاری از جنس فولاد تندبر استفاده شده که دارای سختی 53 راکول سی (HRC) و عدم تمایل به واکنش شیمیایی با فلز پایه مسی می‌باشد. قطر شانه این ابزار 20 میلی‌متر و پین آن دارای قطر 5 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر است تا قادر باشد سطح و درون شیار ایجاد شده درون قطعه را پوشش دهد. این ابزار جهت استفاده بر روی محور چرخنده دستگاه فرز، در گیره فشنگی بسته می‌شود. نحوه درگیری ابزار با قطعه جهت انجام فرایند در شکل 2 مشاهده می‌شود. ابتدا لازم است، ابزار ساده بدون پین برای پوشاندن سطح روی پودر استفاده گردد تا از پراکنده شدن و پاشش پودر به خارج از شیار ممانعت به عمل آید. ابزار دوار غیرمصرفی با سرعت دوران 2000 دور در دقیقه وارد شیار درون ورق شده و سپس در امتداد درز اتصال با سرعت 100 میلی‌متر در دقیقه پیشروی می‌نماید. زاویه بین ابزار و سطح ورق 3 درجه می‌باشد.

اصطکاک بین پین و شانه ابزار با قطعه منجر به ایجاد حرارت شدید و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک قطعه‌کار می‌گردد. گرمایش موضعی، ماده اطراف پین را نرم کرده و ترکیب حرکت چرخشی و خطی ابزار، منجر به جابجایی ماده از جلوی پین به عقب آن می‌گردد و بدین ترتیب حفره پشت ابزار که در اثر حرکت ابزار به طرف جلو ایجاد می‌شود، را پر می‌نماید. از طرفی شانه ابزار که در بالای ناحیه خمیری واقع شده است، با اعمال فشار بر روی مواد نرم شده امکان ایجاد واکنش میان پودر و فلز را به وجود می‌آورد. شانه ابزار جریان فلز به سطح را محدود کرده و در نتیجه عمل ابزار و تأثیر آن بر قطعه-کار، اتصال حالت جامد ایجاد می‌شود. در واقع ابزار سه وظیفه گرم کردن قطعه‌کار، جابجایی مواد برای ایجاد اتصال و تحت فشار نگه داشتن ماده داغ در زیر پیشانی ابزار را بر عهده دارد.



Fig. 2 The tool used and its interaction with the part in the friction stir processing.

شکل 2 ابزار استفاده شده و نحوه درگیری ابزار با قطعه در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.

¹ Rutile

3-2- آزمایش خوردگی

هدف از آزمایش خوردگی، بررسی مقاومت به خوردگی مس قرار گرفته در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و مقایسه آن با مس خالص قبل از این عملیات می باشد. برای این منظور ابتدا نمونه های مورد نیاز از قطعه قرار گرفته در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و مس خالص تجاری استخراج گردید و سپس نمونه ها برای انجام آزمایش خوردگی تافل با دستگاه پتانسیواستات EG & G به صورت یکنواخت آماده سازی شد. نمونه های آماده شده برای آزمون مقاومت به خوردگی مس خالص و مس فراوری شده در شکل 8 نشان داده شده است.

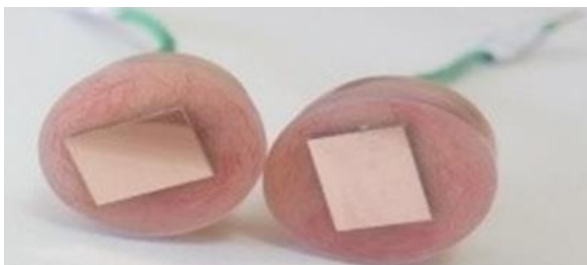


Fig. 8 Corrosion resistance samples of pure and processed copper.

شکل 8 بررسی مقاومت به خوردگی مس خالص و مس فراوری شده.

3- نتایج و بحث

جهت بررسی کیفیت سطح و محل جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بازرسی چشمی از نمونه ها انجام شد. یکی از مهم ترین عیوب این روش فراوری، اثر پین در محل خروج از قطعه است که به صورت حفره می باشد. با توجه به جهت دوران و پیشروی ابزار می توان از دو بخش پیشرو و پسرو در فراوری نام برد که معمولاً مقداری پلیسه در سمت پیشرو تشکیل می شود. مقدار پلیسه بستگی به عمق نفوذ شانه های ابزار در قطعه دارد. زیاد بودن عمق نفوذ شانه های ابزار باعث افزایش میزان پلیسه در کناره های منطقه فراوری می گردد و کاهش عمق نفوذ شانه های ابزار نیز باعث کاهش میزان اصطکاک شده و این مسئله حرارت تولیدی را کاهش می دهد. با کاهش میزان حرارت ورودی، سیلان کافی انجام نمی پذیرد و احتمال وجود عیوب افزایش می یابد.

1-3- ساختار میکروسکوپی

آماده سازی نمونه های متالوگرافی با استاندارد (ASTM E3-11)، میکرواچ فلزات بر اساس استاندارد ((ASTM E407-07) و تصاویر میکروسکوپ نوری بر پایه استاندارد ((ASTM E883 - 11) انجام گرفت و نتایج نمونه ها مشابه بوده و نتیجه بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه 022 در شکل 9 نشان داده شده است. تعیین اندازه دانه در تمامی نمونه ها با استاندارد -ASTM E 112 2013 انجام گرفت.

در تمامی نمونه ها اندازه دانه در منطقه تحت تأثیر حرارت نزدیک خط فرایند برابر 14 و ریزتر و در نمونه های فلز پایه برابر 10 بوده است. تغییرات جزئی در اندازه دانه ها در منطقه تحت تأثیر حرارت در مجاورت فلز پایه مشاهده شده و عدد اندازه دانه بین 8 تا 9 متغیر است.

ساختار میکروسکوپی نمونه 022 برای فلز پایه شامل ترکیبی از دانه های درشت و ریز است و مرز دانه ها بدلیل شبکه FCC مس صاف و مستقیم بوده به گونه ای که میانگین اندازه دانه ها در این ساختار حدود 60 تا 100 میکرومتر می باشد. در بعضی نواحی دانه ها بصورت کشیده به داخل دانه ها

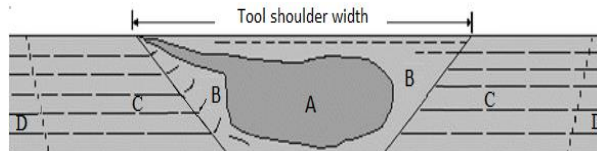


Fig. 5 Schematic of the four zones of a friction-stirred processes sample, including: A - Stirring zone, B - Thermomechanical zone, C - Heat affected zone and D - Base metal

شکل 5 شماتیکی از چهار منطقه یک نمونه قرار گرفته در معرض فرایند اصطکاکی- اغتشاشی شامل: الف - منطقه اغتشاش، ب - منطقه ترمومکانیکال، ج - منطقه تحت تأثیر حرارت و د - فلز پایه [18]

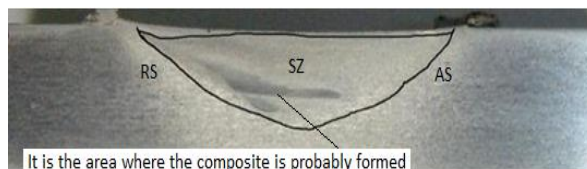


Fig. 6 Composited area.

شکل 6 ناحیه کامپوزیت سازی شده.

2-2- آزمایش های سایش

پدیده سایش یکی از مهم ترین عوامل تخریب قطعات صنعتی است. برای کاهش اثرات این پدیده، انتخاب جنس قطعات درگیر با یکدیگر و نیز انتخاب پوشش سطحی مناسب بسیار حائز اهمیت است. آزمایش پین روی دیسک¹ روش متداولی برای ارزیابی رفتار سایشی و تریبولوژیکی انواع مواد فلزی، سرامیکی، کامپوزیت ها و پوشش های فلزی مواد است. ابتدا نمونه های مورد آزمایش را از قطعاتی که تحت عملیات فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته شده، از وسط فراوری با ماشین وایرکات شرکت توسعه الکترونیک پیشرانه برش داده و استخراج گردید سپس آزمایش پین بر روی دیسک و با استاندارد ASTM G99 انجام گردید (شکل 7).



Fig. 7 Wear Test samples marked with numbers 01 and 08 Copper Specimen with and without FSP.

شکل 7 نمونه های آزمایش سایش مشخص شده با شماره های 01 مربوط به مس فراوری شده با پودر اکسید تیتانیوم (الف) و 08 مس خالص (ب)

¹ Pin on Disk

بدیهی است که با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، ساختار دانه‌بندی در ناحیه اغتشاش یافته تغییر کرده و به دانه‌بندی ریزتر تبدیل شده است و این موضوع به طور واضح برای تمامی نمونه‌ها صدق می‌کند در ناحیه اطراف ناحیه اغتشاش که ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) نامیده می‌شود، دانه‌بندی‌ها نیز همچنان ریزتر شده است زیرا این ناحیه از نمونه‌ها، هم‌زمان تحت تأثیر فرآیند حرارتی و مکانیکی نیز قرار می‌گیرند و بدیهی است که عملیات مکانیکی در این ناحیه، توسط شانه ابزار صورت گرفته شده است، این امر باعث می‌شود که فلز به حالت خمیری شکل تحت تأثیر قرار گیرد. در حالی که ناحیه متأثر از حرارت بین ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی و فلز پایه واقع شده است. این ناحیه تنها حرارت ناشی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را متحمل می‌گردد و با خنک شدن در فضای آزاد، به تدریج دانه‌بندی در آن بزرگ‌تر از فلز پایه شده است. ریز شدن دانه‌ها در اثر فرایند انجام شده می‌تواند باعث تغییرات شدید در سختی و استحکام کششی و تسلیم و حتی افزایش قابل توجه قابلیت انعطاف گردد.

2-3- آزمون تفرق اشعه ایکس

این آزمون بر اساس استاندارد مرجع BS EN13925-1: 2008 تحت ولتاژ 40 کیلوولت و با آند مسی و تحت جریان 30 میلی‌آمپر انجام گردیده است. با استفاده از روش XRD یا پراش اشعه ایکس (X-Ray-Diffraction) نمونه‌های فرآیند که تحت عملیات اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته بود، به منظور بررسی ترکیبات موجود در سطح نمونه با دستگاه D6792-Philips و با استاندارد ASTM E3 توسط موسسه رازی مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه در شکل 10 نشان داده شده است.

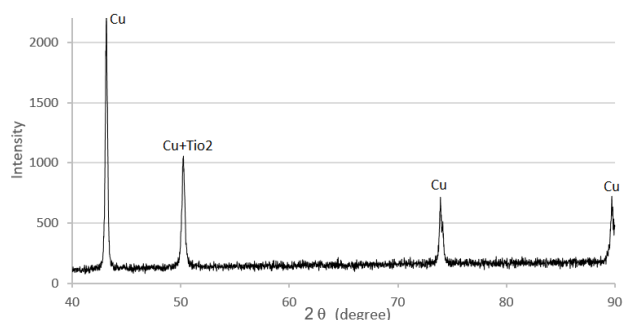


Fig. 10 Test diagram with XRD

شکل 10 نمودار آزمون تفرق اشعه ایکس فلز مس فراوری شده

همان‌گونه که مشاهده می‌شود قله‌های متعددی در زوایای متفاوت و با شدت‌های متفاوت وجود دارد هر کدام از این قله‌ها مربوط به صفحه‌ای خاص از نمونه بوده و زاویه هر قله وابسته به فاصله بین صفحه و شدت قله مربوط به آرایش اتم‌ها در صفحات است در نمونه‌ها فلز پایه تعداد پیک‌های فلزی زیاد و منظم مشاهده می‌شود. قله‌های مربوط به مس و اکسید تیتانیوم ر شکل مشخص شده‌اند. با توجه به قله‌های موجود، وجود اکسید تیتانیوم در لایه سطحی به خوبی نشان داده شده است.

3-3- آزمون سایش

آزمون پین بر روی دیسک در فاصله 220 متر با نیروی عمودی 0.5 کیلوگرم و سرعت 0.02 متر بر ثانیه بر روی مس خالص و نمونه فراوری شده با پودر اکسید تیتانیوم انجام شد همان‌طور که شکل‌های 11 و 12 نشان می‌دهند، در نمودارهای سایش، متوسط ضریب اصطکاک در نمونه مس پایه حدود 0.8 و در ناحیه مس اصطکاکی اغتشاشی، متوسط ضریب اصطکاک حدود یک

نفوذ کرده هستند که در اثر فعال شدن تغییر شکل توسط دوقلوها ایجاد شده می‌باشد. این پدیده در فلزات FCC که انرژی نقص در چیده شدن کوچکی دارند دیده می‌شود. در لبه‌های منطقه تحت تأثیر حرارت، دانه‌ها درشت‌تر می‌شوند ولی با حرکت به سمت مرکز جوش، در اثر حرارت وارد شده، دانه‌ها بشدت ریز می‌شوند و در نهایت در منطقه اغتشاشی که اثر ترکیبی حرارت و تغییر شکل وجود دارد دانه‌ها بسیار ریز بوده و باندهای تغییر شکل و مسیرهای حرکتی آن به راحتی قابل مشاهده است.

بنابراین ساختار اولیه قطعه پایه که مسی قبل از اجرای فرآیند دارای دانه‌بندی درشت بوده در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تبدیل به ساختار با دانه بسیار ریز شده است.

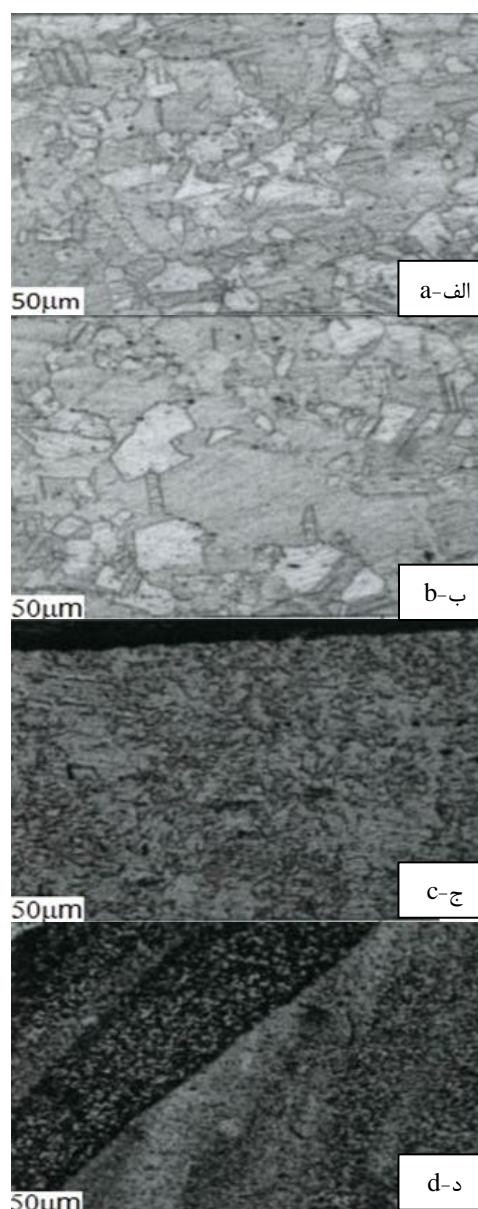
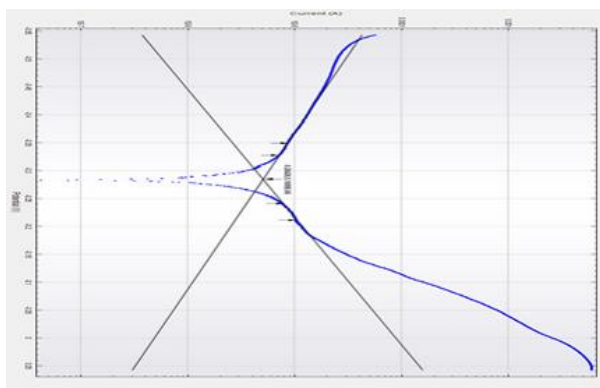


Fig. 9 Microscopic structure of copper solid solution grain in the base metal (a), in the heat-affected zone near the base metal, (b) in the heat-affected zone near the line process (c) in the process area (d), in sample 022.

شکل 9 ساختار میکروسکوپی دانه محلول جامد مس در فلز پایه (الف)، در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به فلز پایه (ب)، در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به خط فرآیند (ج) و در ناحیه فرآیند (د) در نمونه 22.

سایشی کمتر به حضور ذرات اکسید تیتانیوم و اثرات مخرب آن‌ها بر مقاومت سایشی در زمینه بسیار نرم مسی نسبت داده می‌شود. ریز شدن شدید دانه‌ها توسط پودر اکسید تیتانیوم نیز نتوانسته است باعث افزایش مقاومت سایشی مس خالص شود.

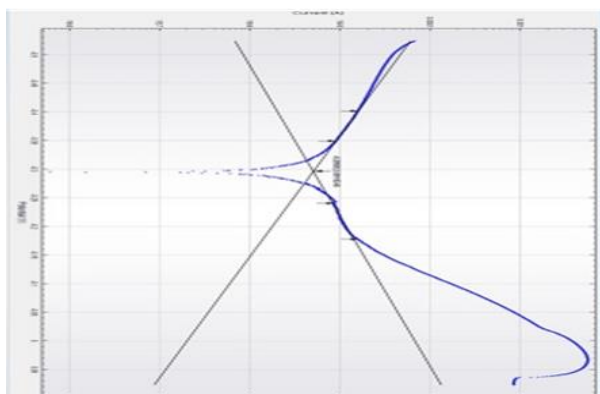
4- با بررسی نمودار خوردگی نمونه مس پایه و نمونه مس اصطکاکی- اغتشاشی با توجه به ولتاژهای محاسبه شده و واقعی و با توجه به جریان خوردگی مشخص گردید که تفاوت معنی داری بین میزان خوردگی مشاهده نمی‌شود بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انجام فرایند FSP بر روی افزایش مقاومت خوردگی مس بی‌تأثیر بوده است.



Corrosion rate, tafel slope
 --- ba (V/dec) = 279.310 mV/dec
 --- bc (V/dec) = 228.630 mV/dec
 --- E_{corr, Calc} (V) = -284.260 mV
 --- E_{corr, Obs} (V) = -283.970 mV
 --- j_{corr} (A/cm²) = 11.0430 μA/cm²
 --- i_{corr} (A) = 5.10090 μA
 --- Corrosion rate (mm/year) = 0.11257
 --- Polarization resistance (Ω) = 10.7040 k
 --- E Begin (V) = -348.820 mV
 --- E End (V) = -211.030 mV

Fig.13 Corrosion chart (tafel) of base copper sample.

شکل 13 نمودار خوردگی (tafel) نمونه مس پایه.

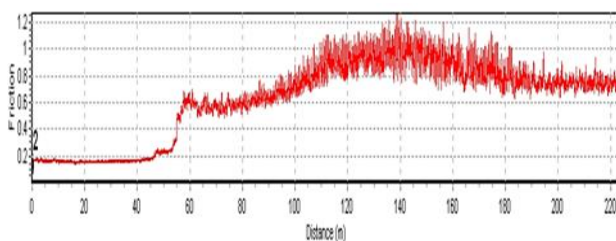


Corrosion rate, tafel slope
 --- ba (V/dec) = 211.290 mV/dec
 --- bc (V/dec) = 262.540 mV/dec
 --- E_{corr, Calc} (V) = -295.850 mV
 --- E_{corr, Obs} (V) = -295.530 mV
 --- j_{corr} (A/cm²) = 11.3410 μA/cm²
 --- i_{corr} (A) = 5.09110 μA
 --- Corrosion rate (mm/year) = 0.11561
 --- Polarization resistance (Ω) = 9.98680 k
 --- E Begin (V) = -401.310 mV
 --- E End (V) = -177.460 mV

Fig. 14 Tafel Corrosion diagram of copper friction-stirring sample.

شکل 14 نمودار خوردگی نمونه مس بعد از فرایند اصطکاکی - اغتشاشی.

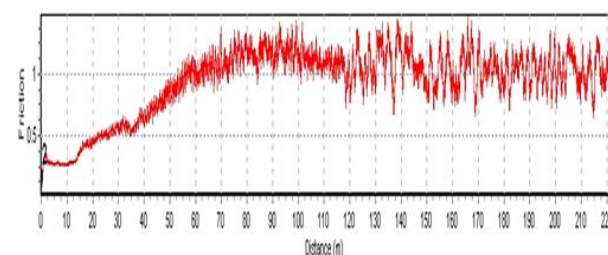
مشاهده می‌گردد که نشانه میزان سایش بیشتر و مقاومت سایشی کمتر نمونه‌های قرار گرفته در معرض فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نسبت به مس خالص می‌باشد.



Wear Test: Vertical force: 0.50Ngf Velocity: 0.02m/s Gain: 0.94

Fig. 11 wear diagram of base copper zone.

شکل 11 نمودار سایش ناحیه مس پایه.



Wear Test: Vertical force: 0.50Ngf Velocity: 0.02m/s Gain: 0.94

Fig. 12 The wear diagram of the friction stirred zone Specimen

شکل 12 نمودار سایش ناحیه اصطکاکی اغتشاشی مس بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی

4-3 تست خوردگی تافل

نتایج تست خوردگی تافل بر روی نمونه مس خالص و مس پس از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در شکل 13 و 14 نشان داده شده است. محور عمودی پتانسیل یا ولتاژ و محور افقی لگاریتم جریان را نشان می‌دهد. با توجه به شاخه‌های کاتدی و آندی نمودارها مشخص گردید، مس خالص دارای ولتاژ خوردگی 283.97 میلی ولت و دانسیته جریان برابر با 11.043 آمپر بر سانتیمتر مربع می‌باشد در حالیکه ولتاژ و جریان خوردگی در نمونه مس بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی با پودر دی اکسید تیتانیوم به ترتیب برابر با 295.53 میلی ولت و 11.34 میکروآمپر بر سانتیمتر مربع می‌باشد. هرچند نمونه پرورس شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی دارای مقاومت خوردگی ضعیفتری نسبت به فلز پایه شده است ولی تفاوت در این مورد بسیار ناچیز است بنابراین می‌توان فرض کرد که انجام فرایند اصطکاکی-اغتشاشی با پودر هیچ تأثیری بر رفتار خوردگی مس نداشته است.

4- نتیجه گیری

- 1- در تمام نمونه‌ها ساختار میکروسکوپی در فلز پایه به صورت دانه‌های مس خالص حاوی دانه‌های کشیده و مرز دانه‌های مستقیم همراه با پدیده دوقلویی وجود دارد.
- 2- در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به فلز پایه دانه‌ها درشت تر شده اند ولی در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به مرز فرایند و در منطقه تحت تأثیر فرایند دانه‌ها در ساختار بسیار ریز شده اند.
- 3- در نمودار سایش، نمونه مس پایه دارای ضریب اصطکاک کمتر و مقاومت سایشی بهتری نسبت به نمونه اصطکاکی-اغتشاشی بوده است. این مقاومت

5- مراجع

- [17] Huang, G., Hou, W., Li, J., & Shen, Y., "Development of surface composite based on Al-Cu system by friction stir processing: Evaluation of microstructure, formation mechanism and wear behavior", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 344, pp. 30-42. 2018.
- [1] Kumar, R., Kumar, H., Kumar, S., & Chohan, J. S., "Effects of tool pin profile on the formation of friction stir processing zone in AA1100 aluminium alloy", *Materials Today, Proceedings*, Vol. 48, pp. 1594-1603, 2022.
- [2] Węglowski, M. S., "Friction stir processing-State of the art", *Archives of civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18(1), pp. 114-129, 2018.
- [3] Wu, B., Ibrahim, M. Z., Raja, S., Yusof, F., Muhamad, M. R. B., Huang, R., & Kamangar, S., "The influence of reinforcement particles friction stir processing on microstructure, mechanical properties, tribological and corrosion behaviors", A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022.
- [4] El-Sayed, M. M., Shash, A. Y., Abd-Rabou, M., & ElSherbiny, M. G., "Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique", A review, *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 3, pp. 100059, 2021.
- [5] Merah, N., Abdul Azeem, M., Abubaker, H. M., Al-Badour, F., Albinmoussa, J., & Sorour, A. A., "Friction Stir processing influence on microstructure, mechanical, and corrosion behavior of steels", A review. *Materials*, Vol. 14, No.17, pp. 5023, 2021.
- [6] Khodabakhshi, E., Kazemi, S., and Ahmadi F. S., "Investigation of mechanical properties and microstructure of copper matrix nanocomposite reinforced with silicon oxide particles produced by friction stir processing method", *Journal of Science and Technology Composite*, Vol. 4, No. 4, pp. 426-433, 2018.
- [7] Moaref, A., and Amin R., "Evaluation of the effect of underwater friction stir welding on microstructure and tribological properties of copper and its alloy." *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 42-51, 2019.
- [8] Rabieezadeh, A., and Saman G., "The influence of multi-pass friction stir processing on microstructure and sliding wear behavior of Cu/ZrO₂ surface composite." *International Journal of Materials Research*, Vol. 111, No. 10, pp. 814-825. 2020.
- [9] Thallapalli, N., Kishore K. K., and Renuka B., "Investigation on the micro-structure and mechanical properties of copper based surface composites fabricated by friction stir processing." *Materials Today, Proceedings* Vol. 27, pp. 1774-1779, 2020.
- [10] Jain, V. K. S., Varghese, J., & Muthukumaran, S., "Effect of first and second passes on microstructure and wear properties of titanium dioxide-reinforced aluminum surface composite via friction stir processing", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 44, No.2, pp. 949-957. 2019.
- [11] Madhu, H. C., Ajay K. P., Perugu, C. S., & Kailas, S. V., "Microstructure and mechanical properties of friction stir process derived Al-TiO₂ nanocomposite", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 27, No.3, pp. 1318-1326. 2018.
- [12] Sahraeinejad, S., Izadi, H., Haghshenas, M., & Gerlich, A. P., "Fabrication of metal matrix composites by friction stir processing with different particles and processing parameters", *Materials Science and Engineering*, Vol. A, No. 626, pp. 505-513., 2015.
- [13] Mazaheri, H. fazel N. M., and Alaei. A., "Study of Microstructure and Tribological Behavior of the Composite Layer Produced of Silicon Carbide Particles on a Steel ASTM A106 GTAW Welding Method", *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 2, No. 1, pp. 65-72, 2015.
- [14] Saravanakumar, S., Gopalakrishnan, S., Dinaharan, I., & Kalaiselvan, K., "Assessment of microstructure and wear behavior of aluminum nitrate reinforced surface composite layers synthesized using friction stir processing on copper substrate", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 322, pp. 51-58, 2017.
- [15] Shahedi, B., Damircheli, M., & Shirazi, A., "Experimental investigation of the effects of welding parameters and TiO₂ nanoparticles addition on FSWed copper sheets", *Materials Research Express*, Vol. 6, No.2, pp. 026525, 2018.
- [16] Gopal P. M., "Influence of Silica Rich CRT and BN on Mechanical, Wear and Corrosion Characteristics of Copper-Surface Composite Processed Through Friction Stir Processing", *Silicon*, Vol. 13, No. 10, pp. 3431-3440. 2021.