



بررسی ریزساختار، خواص سایشی و مقاومت به خوردگی لایه کامپوزیت سطحی برنج/گرافیت فرآوری شده با فرآیند اصطکاکی همزن

حامد یوسف پور^۱، سید علی اصغر اکبری موسوی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران

۲- دانشیار، مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران

تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، akbarimusavi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۰/۲۱

پذیرش: ۹۵/۲/۲

چکیده

در این پژوهش، یک لایه کامپوزیتی بر پایه آلیاژ برنج با ذرات تقویت کننده گرافیت با اندازه ذرات ۷ میکرومتر توسط فرآیند اصطکاکی همزن تولید شده است. شیار به عمق و پهنا ۲/۵ و ۰/۳ میلیمتر روی سطح یک نمونه از آلیاژ برنج با ضخامت ۳ میلیمتر توسط دستگاه وایرکات ایجاد و توسط ذرات گرافیت کاملاً پر شده است. فرآیند اصطکاکی همزن با سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه و ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه تحت ۱ و ۳ پاس انجام شده و ریز ساختار و خواص مکانیکی قبل و بعد از فرآیند نیز بررسی شده است. مشاهدات میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که افزایش تعداد پاس‌ها منجر به توزیع یکنواخت‌تر ذرات خواهد شد. بیشینه سختی در لایه کامپوزیتی، حدود ۱۴۱ ویکرز به دست آمد. این درحالی است که سختی زیرلایه تقریباً ۸۴ ویکرز محاسبه شد. رفتار سایشی زیرلایه، لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده و لایه کامپوزیتی با ذرات تقویت کننده گرافیت با استفاده از یک دستگاه پین روی دیسک بررسی شد. نتایج نشان داد که مقاومت سایشی لایه‌های کامپوزیتی حاوی ذرات مولیبدنیوم دی‌سولفید تا حدود ۱/۵ برابر زیرلایه افزایش پیدا کرده است. نتایج آزمون خوردگی تاغل نشان داد که پتانسیل خوردگی لایه کامپوزیتی با ذرات گرافیت نزدیک به مقادیر مربوط به فلز پایه بوده و تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. در حالی که پتانسیل خوردگی در لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقریباً ۴۸ میلی ولت بیشتر از فلز پایه محاسبه شد.

کلیدواژگان:

کامپوزیت برنج/گرافیت
فرآیند اصطکاکی همزن
سایش
خوردگی
پودر گرافیت

Investigations on microstructure, wear behavior and corrosion resistance of brass/graphite composite produced by friction stir processing

Hamed yousefpoor¹, Seyed Ali Asghar Akbari Mousavi^{2*}

1- Department of Material Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

2-School of Metallurgy and Material Engineering, School of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, akbarimusavi@ut.ac.ir

Keywords

Brass/Graphite composite
Friction stir processing
Wear
Corrosion
Graphite particle

Abstract

In this study, a brass alloy-based (Cu-30%Zn) composite was fabricated by Graphite particles with initial size of 7 μ m reinforcement via friction stir processing. Groove with the Width and depth of 0.3mm & 2.5 mm were made on the surface of a brass specimen, respectively and filled by Graphite powder. Friction stir processing was carried out with transverse and rotational speeds of 100mm/min and 800rpm, respectively and the tilt angle of 1°. Single pass and three-pass FSP were conducted on the samples. The microstructure and mechanical properties before and after FSP were investigated. Optical and scanning electron microscope observations revealed that increasing the number of passes exhibits homogeneous distribution of Graphite particles. The wear behavior was examined without lubricant and at room temperature using a pin-on-disc device. The results showed that the wear resistance of composite layers containing MoS₂ particles has increased to about 1.5 times the substrate. Maximum hardness in the stir zone was 141 Vickers, while the hardness of base metal was 84 Vickers. TOEFL test results also showed that the corrosion potential layer composite with graphite particles near to the values of the base metal had no significant change. While the corrosion potential in the processed layer without reinforcing particles of the base metal is approximately 48 Mv.

Please cite this article using:

yousefpoor, H. and Akbari Mousavi, S. A. A., "Investigations on microstructure, wear behavior and corrosion resistance of brass/graphite composite produced by friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 253-260, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

لایه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات و بدون ذرات گرافیت و اثر تعداد پاس‌های فرآیند بر روی نحوه توزیع ذرات گرافیت، همچنین رفتار سایشی با استفاده از یک دستگاه پین روی دیسک^۶ برای نمونه زیرلایه و نمونه‌های فرآوری شده مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت به منظور بررسی رفتار خوردگی، نمونه‌های فرآوری شده و فلز پایه نیز تحت آزمایش پلاریزاسیون تافل قرار گرفتند.

۲- مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر از ورقه‌هایی برنجی با ابعاد $۱۵۰ \times ۱۰۰ \times ۳$ میلی‌متر استفاده شده که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. جهت ساخت لایه کامپوزیتی، از ذرات گرافیت ۷ میکرونی استفاده شده و به همین منظور شیاری با عمق $۲/۵$ و پهنا $۰/۳$ میلی‌متر بر روی سطح یک نمونه از آلیاژ برنج توسط دستگاه وایرکات ایجاد و با ذرات گرافیت کاملاً پر شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلز پایه

عنصر	Cu	P	Sn	Pb	Fe	Zn
درصد وزنی		۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۲۹/۲۳

به‌منظور بررسی تاثیر ذرات تقویت کننده بر سختی، رفتار سایشی و مقاومت به خوردگی، فرآیند اصطکاکی همزن ابتدا بدون اضافه کردن ذرات تقویت کننده و سپس با استفاده از پودر گرافیت انجام شده است. در این پژوهش دو ابزار متفاوت بکار رفته است. الف-۱- ابزاری از جنس کاربید تنگستن (ابزار اصلی مورد استفاده در این پژوهش) برابر شکل ۲ الف که شامل شانه ابزار با قطر ۱۸ میلی‌متر و پین بدون رزوه با قطر کوچک ۶ و قطر بزرگ ۷/۵ میلی‌متر با یک تقعر ۵ درجه ای روی شانه ابزار برای کمک به سیلان مواد در حین انجام فرآیند می‌باشد. ب-۲- ابزار بدون پین برابر شکل ۲ ب که از جنس فولاد گرمکار St37-H13 بوده و جهت پوشاندن شیاری حاوی ذرات گرافیت قبل از انجام فرآیند اصطکاکی مورد استفاده قرار گرفته است. این ابزار مانع حدر رفتن پودرها در حین انجام فرآیند اصطکاکی می‌شود. پارامترهای بهینه فرآیند اصطکاکی همزن شامل سرعت چرخشی، سرعت پیشروی، میزان فرورفتگی ابزار در قطعه کار و زاویه ابزار با اجرای چندین مرحله از فرآیند اصطکاکی همزن روی فلز پایه برابر جدول ۲ به دست آمده است. به منظور جلوگیری از تجمع ذرات تقویت کننده فرآیند اصطکاکی همزن تحت یک و سه پاس انجام شده است.

جهت بررسی نحوه توزیع ذرات گرافیت، تاثیر تعداد پاسها بر پراکندگی ذرات و نیز بررسی ریزساختار زیرلایه و لایه‌های فرآوری شده، از میکروسکوپ نوری مجهز به دوربین و نرم افزار آنالیز تصاویر و میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل و بعد از حکاکی نمونه‌ها استفاده شده است. نمونه‌های متالوگرافی از قسمت لایه ایجاد شده توسط فرآیند اصطکاکی همزن توسط دستگاه وایرکات برش داده شده و با سمباده‌های نمره ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ سمباده زنی و با خمیر الماسه $۰/۳$ میکرون توسط دستگاه پولیش، صیقلی گردیده اند.

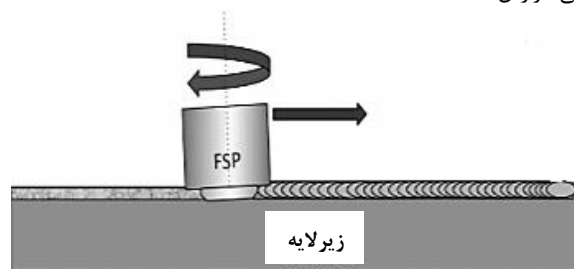
جدول ۲ پارامترهای فرآیند اصطکاکی همزن

سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه نفوذ ابزار (deg)	عمق فروروی ابزار (mm)
۸۰۰	۱۰۰	۲	۰/۳

6. Pin On Disc

برنج از شناخته شده‌ترین آلیاژهای مس است (آلیاژ مس-روی). برنج دارای خواص بسیار مفیدی همچون هدایت الکتریکی، قابلیت ماشین کاری و شکل پذیری عالی می‌باشد [۱]. با این حال، سختی نسبتاً پایین و مقاومت در برابر سایش کم این آلیاژها، استفاده از آن‌ها را در محیط‌های ساینده محدود کرده است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی در مقایسه با آلیاژهای تقویت نشده حاوی ذرات تقویت کننده ای بوده که باعث افزایش استحکام، مقاومت به سایش، خزش و خستگی بهتری خواهند شد. در سال‌های اخیر، به منظور اصلاح ساختار کامپوزیت‌های زمینه فلزی و بهبود خواص سطحی آن‌ها از روش‌هایی همچون آبکاری الکترولس [۲]، لایه نشانی فیزیکی از فاز بخار [۳] و اکسیداسیون پلاسما [۴] برای تولید سطح کامپوزیتی روی آلیاژهای برنج استفاده شده است. استفاده از روش‌های متداول ذوبی مانند جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ^۳ و لیزر برای آلیاژ برنج دشوار است، چراکه انتشار حرارتی بالا و دمای پایین تبخیر روی ($۴۱۹/۴$ درجه سانتی‌گراد) موجب مشکلاتی نظیر اعوجاج، تغییر در ترکیب شیمیایی، تخلخل و کاهش خواص مکانیکی در ناحیه جوش شده است. بنابراین اگر روند ساخت لایه‌های کامپوزیتی سطحی در دمای پایین و فاز جامد صورت پذیرد، می‌توان بر این مشکلات غلبه کرد [۵، ۶]. به همین منظور در این پژوهش از فرآیند اصطکاکی همزن استفاده شده است.

فرآیند اصطکاکی همزن^۴ مشتقی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۵ است است که توسط موسسه جوشکاری آمریکا برای فرآوری آلیاژهای آلومینیوم توسعه یافته است [۷]. شکل ۱ تصویر شبیه سازی شده این فرآیند را نشان می‌دهد. در فرآیند اصطکاکی همزن، برای ایجاد لایه کامپوزیتی از حرارت تولید شده توسط اصطکاک ایجاد شده بین ابزار و قطعه کار استفاده می‌شود. از فرآیند اصطکاکی هم زن برای بهبود خواص سطحی آلیاژهای آلومینیوم، فولاد، تیتانیوم و منیزیم استفاده شده است [۸، ۹]. تاکنون در رابطه با استفاده از فرآیند اصطکاکی همزن برای کامپوزیت سازی سطح مس و آلیاژهای آن جهت بررسی خواص متالورژیکی و مکانیکی لایه‌های ایجاد شده، تلاشهای اندکی گزارش شده است [۶، ۱۰].



شکل ۱ تصویر نمایی از فرآیند اصطکاکی همزن

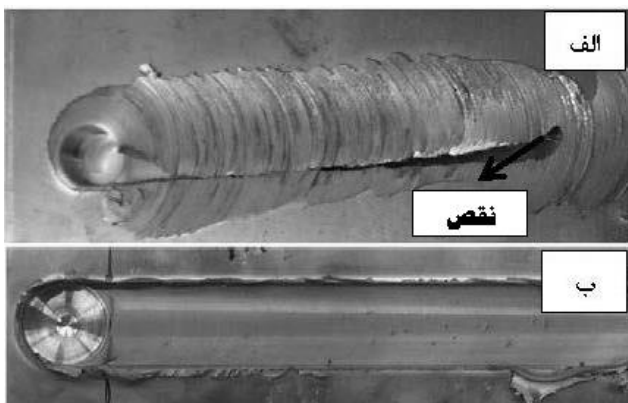
هدف از این پژوهش بررسی تاثیر حضور ذرات گرافیت در لایه کامپوزیت سطحی و لایه ایجاد شده بدون حضور ذرات تقویت کننده بر روی ریزساختار و تاثیر آن روی رفتار سایشی و خوردگی (هنگامی که از فرآیند اصطکاکی همزن بر روی ورقه‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر از جنس آلیاژ برنج استفاده شده است) می‌باشد. در این پژوهش ریزساختار و خواص مکانیکی زیرلایه،

1. Physical Vapor Deposition (PVD)
2. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)
3. Tungsten Inert Gas Welding (TIG)
4. Friction Stir Processing (FSP)
5. Friction Stir Welding (FSW)

در این آزمون از دستگاه پلاریزاسیون به همراه الکتروکد کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکتروکد مرجع و یک الکتروکد پلاتینی به منظور اندازه‌گیری شدت جریان استفاده شده است. در شکل ۵ تاثیر انتخاب متغیرهای فرآیند اصطکاکی همزن نشان داده شده است.



شکل ۴ نمونه‌های آماده‌سازی شده جهت انجام آزمون سایش



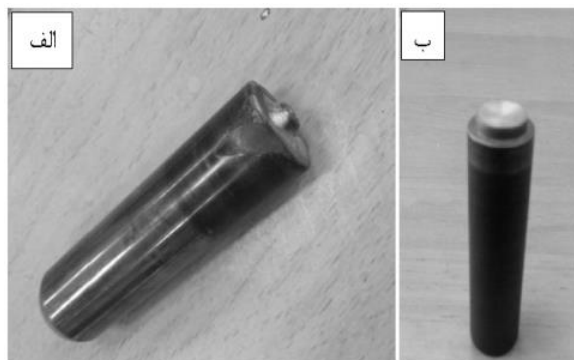
شکل ۵ تاثیر انتخاب متغیرهای فرآیند اصطکاکی همزن (الف) لایه دارای عیب (ب) لایه بدون عیب

جهت تهیه محلول، به مقدار ۱/۷۵ گرم پودر نمک طعام با خلوص بالا در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد تا PH حدود ۶ حاصل شود. کلیه اطلاعات مورد نیاز پس از گذشت مدت زمان ۱۵ دقیقه از شروع آزمون، ثبت شدند تا اطمینان حاصل شود که نمونه‌ها به حالت پایدار رسیده‌اند.

۲- نتایج و بحث

۳-۱- نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در لایه‌های کامپوزیتی

نحوه توزیع ذرات تقویت کننده گرافیت در لایه‌های کامپوزیتی بوسیله ی میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در برنج یکی از تاثیر گذارترین عوامل بر ریز ساختار و خواص سطح کامپوزیتی تولید شده با فرآیند اصطکاکی همزن می‌باشد. در بین متغیرهای فرآیند نیز تاثیر تعداد پاس‌ها یکی از اصلی ترین پارامترهایی است که بر نحوه توزیع ذرات در ناحیه اغتشاشی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ نوری با دو بزرگنمایی مختلف از نحوه توزیع ذرات گرافیت در لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک و سه پاس FSP قبل از حکاکی را نشان می‌دهد.

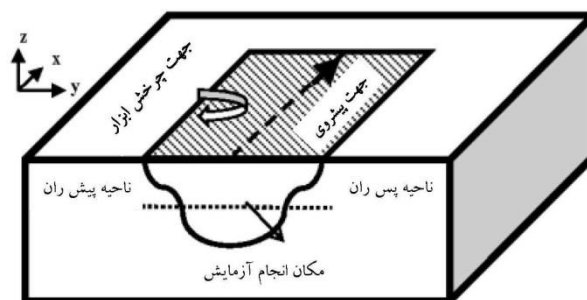


شکل ۲ ابزارهای فرآیند اصطکاکی همزن مورد استفاده در این مطالعه (الف) ابزار اصلی و (ب) ابزار بدون پین

پس از اتمام فرآیند آماده سازی اولیه نمونه‌ها، به منظور تهیه محلول حکاکی ۲ گرم $FeCl_3$ به همراه ۶ میلی لیتر اسید کلریدریک (HCl-37%) در ۱۲۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد. سپس نمونه‌های پولیش شده به مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه در این محلول، حکاکی و آشکارسازی شدند.

برای بررسی مقدار میانگین سختی لایه‌های سطحی ایجاد شده و دیگر فازهای موجود در ریز ساختار نمونه‌ها از دستگاه میکرو سختی سنج ویکرز تحت بار ۱۰۰ گرم استفاده شده است. پروفیل سختی در امتداد عمق لایه‌ها نیز مطابق شکل ۳ از مقدار سختی موجود بین لایه ایجاد شده تا آلیاژ پایه بر روی یک خط مستقیم تهیه و نتایج آن ثبت و برای جلوگیری از تاثیر نقطه اثرهای متوالی، فاصله هر دو نقطه ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی رفتار سایشی نمونه‌ها، آزمایش سایش با دستگاه پین روی دیسک در دمای محیط و بدون حضور روانکار انجام شد. نمونه‌ها به شکل پین با قطر ۵ میلی متر توسط دستگاه وایرکات (برابر شکل ۴) برش داده شد. ضمناً باتوجه به ضخامت کم نمونه‌ها از یک نگهدارنده که به همین منظور تعبیه شده استفاده شده است.

برای سطح مقابل نیز از یک دیسک فولادی (فولاد ابزار سردکار ۱۱۰۰ با سختی حدود RC ۶۰) استفاده گردید. نمونه‌های پین و دیسک قبل از شروع آزمایش سایش، با استفاده از دستگاه التراسونیک و محلول استون، چربی گیری و پاک شدند. آزمایش سایش تحت نیروی ثابت ۱۵ نیوتن، سرعت دورانی دیسک ۵۰ سانتیمتر بر ثانیه انجام و کاهش وزن هر کدام از نمونه‌ها پس از طی مسافت‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ متر اندازه گیری شده است. در نهایت به منظور بررسی مقاومت به خوردگی لایه‌های کامپوزیتی ایجاد شده، آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول ۳/۵% NaCl در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد با استفاده از دستگاه EG&G PARK237 و طبق استاندارد ASTM G5-94 انجام گرفت.



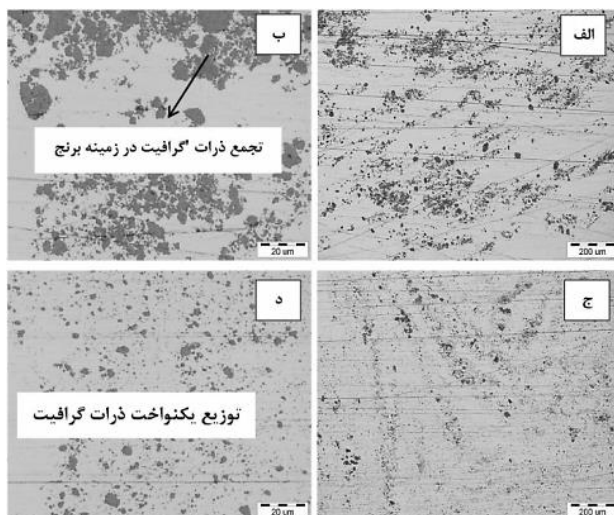
شکل ۳ نمایی از محل انجام آزمایش سختی میکروسکوپی

از مقایسه لایه کامپوزیتی ایجاد شده با ذرات گرافیت یک پاس و سه پاس FSP، به خوبی می‌توان نقش ذرات گرافیت و تاثیر تعداد پاس‌ها را در مهار رشد دانه‌ها مشاهده نمود.

در این شکل تفاوت اندازه دانه در فلز پایه، سطح تولید شده با ذرات تقویت کننده گرافیت تحت ۱ و ۳ پاس نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود در تمامی نمونه‌ها صرف نظر از نوع ذره تقویت کننده و تعداد پاس‌های فرآیند اندازه دانه‌ها به یک مقدار کمیته رسیده است. بیشترین کاهش اندازه دانه مربوط به نمونه فرآوری شده با ذرات گرافیت تحت سه پاس FSP با اندازه دانه ۱۲ میکرومتر است.

در شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات گرافیت نشان داده شده است. در این تصویر از دو آشکار ساز الکترون ثانویه و الکترون برگشتی برای مشاهده نحوه توزیع ذرات گرافیت استفاده شده است.

در این تصاویر نقاط تیره رنگ مربوط به ذرات گرافیت و نقاط روشن مربوط به رسوبات فاز ثانویه هستند. همانطور که در این شکل نیز مشخص است، در لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP تجمع ذرات گرافیت زیاد و توزیع ذرات غیر یکنواخت است که علت آن همانطور که پیش از این گفته شد، ناکافی بودن نرخ تلاطم در فرآیند اصطکاکی همزن می‌باشد.

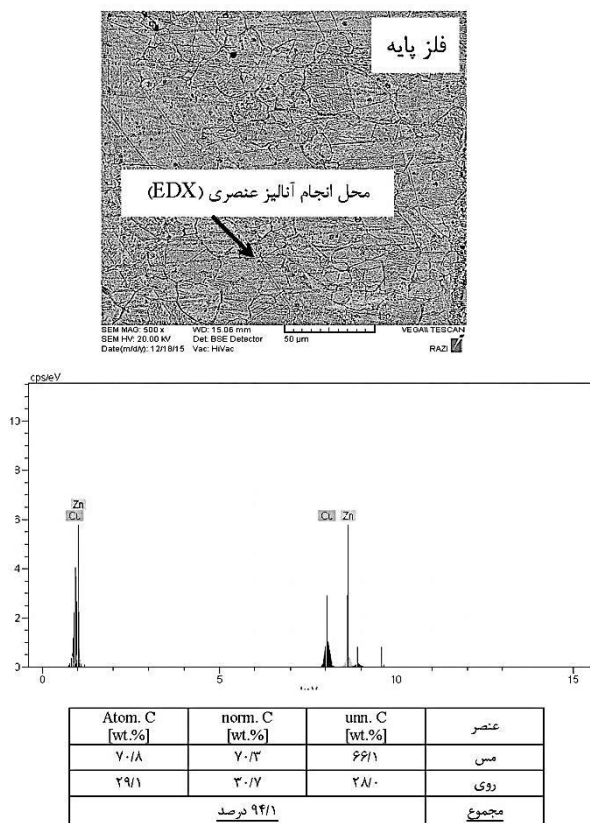


شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ نوری از نحوه توزیع ذرات گرافیت در لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده با الف) یک پاس FSP و ب) بزرگ‌نمایی بیشتر از الف، ج) سه پاس FSP، قبل از حکاکی و د) بزرگ‌نمایی بیشتر از پ

همان‌گونه که در شکل مشخص است، با افزایش تعداد پاس‌ها از تجمع ذرات تقویت کننده کاسته شده و توزیع ذرات یکنواخت تر شده است که علت آن می‌تواند افزایش نرخ تلاطم مواد باشد. در شکل ۶ الف که مربوط به نمونه کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP است، تجمع ذرات گرافیت به خوبی قابل مشاهده است. این در حالی است که در شکل ۶ ب که مربوط به نمونه لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده با سه پاس FSP است، توزیع ذرات تقویت کننده گرافیت یکنواخت تر بوده و از تجمع ذرات کاسته شده است و تنها در برخی از نقاط ذرات گرافیت در کنار یکدیگر قرار گرفته اند.

۳-۲- ریزساختار

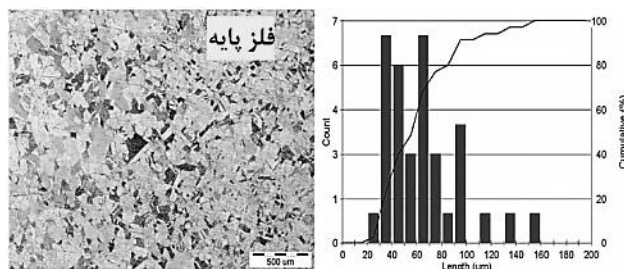
در شکل ۷ تصویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ Cu-30Zn اولیه بعد از حکاکی، در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان داده شده است. اندازه متوسط دانه‌ها در فلز پایه (آلیاژ برنج Cu-30Zn) نیز ۶۵ میکرومتر محاسبه گردید. در شکل ۸ تجزیه شیمیایی عنصری سنجش شدت انرژی طیف پرتو X (EDS) از برنج نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص شده است، فازهای تشکیل دهنده فلز پایه با ترکیبی که در جدول ۱ برای این آلیاژ ارائه شده، مطابقت دارد. در شکل ۹ نواحی مختلف لایه‌های فرآوری شده توسط فرآیند اصطکاکی همزن مشخص شده است. در تمامی نمونه‌ها کاهش اندازه دانه در منطقه همزده^۱ (SZ) مشاهده می‌شود.



شکل ۸ تصویر تجزیه شیمیایی عنصری سنجش شدت انرژی طیف پرتو X (EDS) از فلز پایه

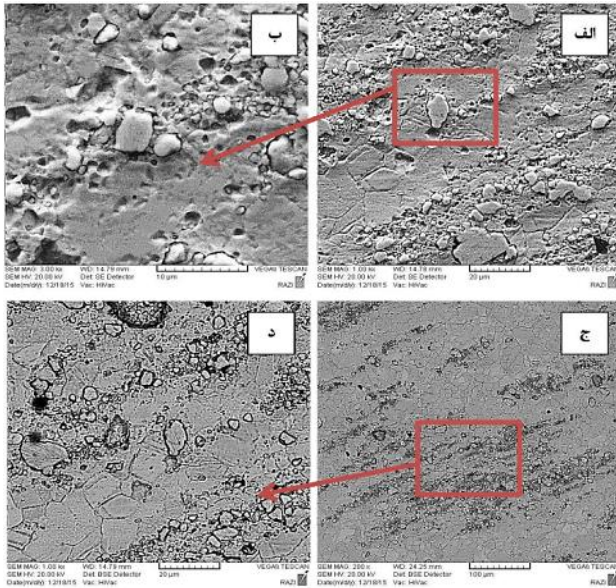
۳-۳- نتایج حاصل از آزمایش سختی میکروسکوپی

شکل ۱۰ پروفیل سختی بر حسب فاصله از مرکز ناحیه همزده برای نمونه‌های کامپوزیت سازی شده با ذرات تقویت کننده گرافیت با یک و سه



شکل ۷ تصویر متالوگرافی نوری از شکل دانه‌ها و فازهای ثانویه آلیاژ برنج اولیه در دو بزرگ‌نمایی کم و زیاد

1. Stir Zone



شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه همزده‌ی نمونه کامپوزیتی (الف) آشکار ساز الکترون ثانویه، (ب) بزرگ‌نمایی بیشتر از الف، (ج) آشکار ساز الکترون برگشتی و (د) بزرگ‌نمایی بیشتر از ب

متوسط سختی زیر لایه و منطقه متاثر از حرارت در این نمونه به ترتیب در حدود ۸۴/۲ و ۹۹/۴ ویکرز می‌باشد. بالاترین سختی در بین این سه لایه مربوط به لایه کامپوزیت سازی شده با ذرات گرافیت تحت سه پاس FSP است. مقدار سختی در این لایه بین ۱۲۰ تا ۱۴۱ ویکرز متغیر بوده که به طور متوسط در حدود ۳۶ ویکرز بیشتر از سختی فلز پایه می‌باشد.

$$\sigma_i = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، σ_0 تنش اصطکاکی، D قطر دانه و k عدد ثابت می‌باشد که به جنس ماده بستگی دارد.

۴-۳- بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش سایش

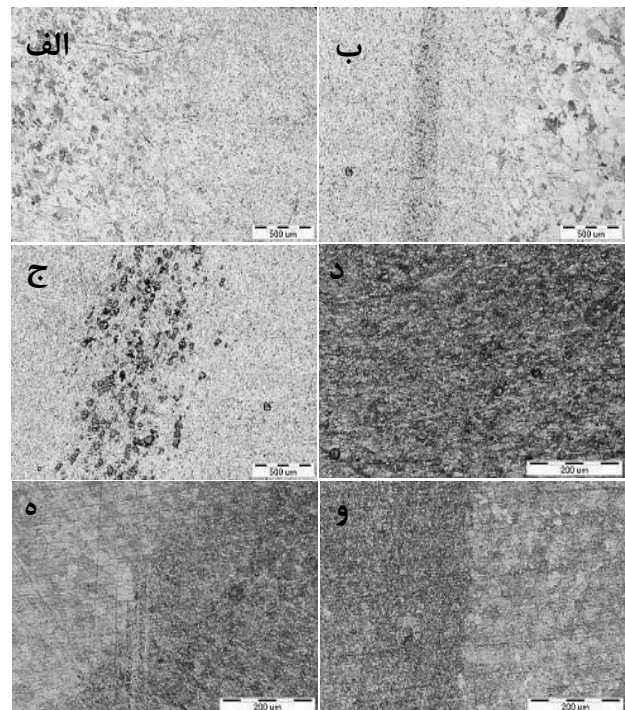
در شکل ۱۲ نمودارهای مجموع کاهش وزن زیرلایه، لایه کامپوزیت سطحی با ذرات گرافیت و لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده برحسب مسافت سایش آورده شده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که مقدار کاهش وزن زیرلایه، لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده و لایه کامپوزیت سطحی با ذرات گرافیت تحت سه پاس FSP، پس از طی ۱۰۰۰ متر مسافت سایش به ترتیب ۱۶/۱۱، ۱۱/۴۲ و ۱۰/۶۳ میلی گرم اندازه گیری شده است. علت بالا بودن مقدار کاهش وزن برنج زیر لایه به حضور ذرات سرب در ساختار آن برمیگردد. در برخی موارد از مقداری عنصر سرب برای بالا بردن قابلیت ماشینکاری برنجهای استفاده می‌شود. بنابراین این نمونه به راحتی ساییده شده و مقدار زیادی کاهش وزن را به دنبال داشته است. همچنین نمونه‌های تحت فرآیند اصطکاکی همزن نیز متناسب با مقادیر سختی متوسط منسوب به این لایه‌ها، به میزان کمتری دچار کاهش وزن شده‌اند.

از آنجایی که نرخ سایش با ضریب اصطکاک رابطه مستقیم دارد، بررسی این پارامتر در تشخیص رفتار سایشی لایه‌ها مهم است. در شکل ۱۳ ضریب اصطکاک برای نمونه‌های زیرلایه، لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده، لایه کامپوزیتی ایجاد شده با ذرات گرافیت تحت ۳ پاس FSP در ۱۰۰۰ متر مسافت سایش نشان داده شده است. در شکل ۱۳ میانگین

پاس FSP و نمونه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد.

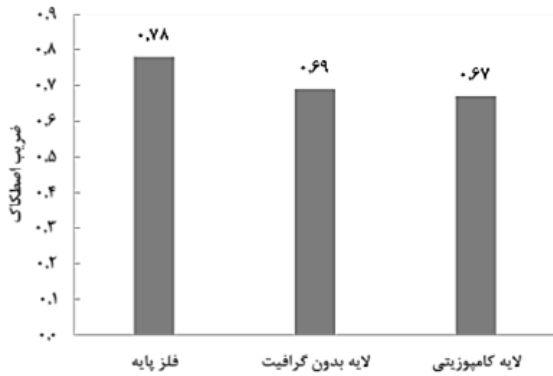
در این شکل مقدار سختی با فاصله از مرکز نمونه‌های فرآوری شده به یک مقدار بیشینه می‌رسد و سپس در طول لایه‌ها ثابت می‌ماند. با رسیدن به منطقه متاثر از حرارت^۱، سختی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. در روشهای ذوبی به علت دمای بالای ایجاد شده در طول فرآیند، سختی منطقه متاثر از حرارت تا حدودی از سختی زیرلایه کمتر می‌شود. اما در این پژوهش برابر شکل ۱۰، نتایج حاصل از آزمایش سختی سنجی میکروسکوپی نشان می‌دهد که سختی منطقه متاثر از حرارت نه تنها از زیرلایه کمتر نشده بلکه در مورد لایه‌های ایجاد شده با ذرات تقویت کننده گرافیت، سختی این ناحیه تا ۱/۵ برابر زیرلایه برنجی افزایش داشته و با گذر از منطقه مذکور به سختی زیرلایه می‌رسد. همانطور که از نمودارهای سختی (شکل ۱۱) پیداست، توزیع سختی در لایه‌های کامپوزیتی با ذرات گرافیت از روندی مشابه لایه ایجاد شده بدون حضور ذرات تقویت کننده پیروی می‌کند. با این تفاوت که از یکنواختی کمتری نسبت به این لایه برخوردار است. علت این عدم یکنواختی را می‌توان به توزیع غیر یکنواخت مناطق غنی از گرافیت در سطوح کامپوزیتی ایجاد شده توسط فرایند FSP ارتباط داد.

نکته دیگری که با توجه به این دو شکل قابل استنتاج است، تاثیر نحوه توزیع ذرات تقویت کننده بر توزیع سختی بر عمق لایه سخت شده و سختی متوسط آن است. با توجه به مشاهدات تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روشی که در بخش قبل جهت بررسی نحوه توزیع ذرات بحث شد، در منطقه همزده اندازه دانه‌ها بسیار ریز شده که همین امر باعث افزایش ۳۵ درصدی مقدار سختی نمونه در این ناحیه شده است.

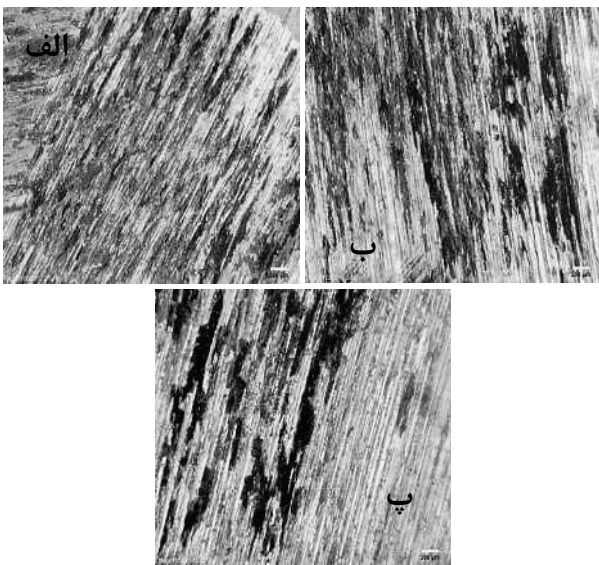


شکل ۹ تصویر میکروسکوپ نوری از لایه کامپوزیتی سطحی تحت سرعت‌های چرخشی و پیشروی ۸۰۰ دور بر دقیقه و ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه (الف)، (ب)، (ج) یک پاس FSP و (د)، (ه)، (و) سه پاس FSP

1. Heat Affected Zone



شکل ۱۳ تغییرات ضریب اصطکاک برحسب فاصله برای فلز پایه، کامپوزیتی تولید شده با ۳ پاس FSP و لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده



شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپ استریو از سطح سایش (الف) فلز پایه، (ب) نمونه فرآوری شده بدون ذرات تقویت کننده و (پ) نمونه کامپوزیتی با ذرات گرافیت با ۳ پاس FSP پس از ۱۰۰۰ متر سایش

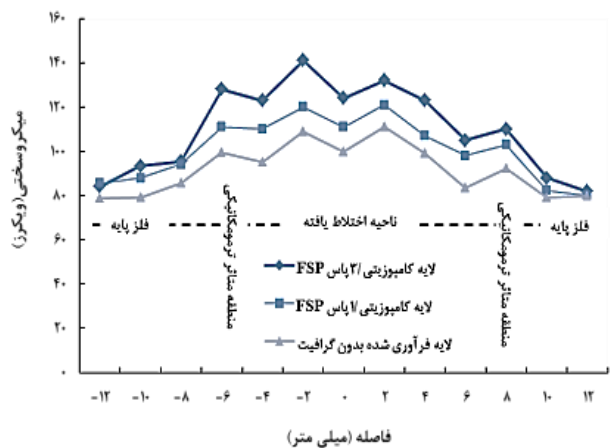
در نیروی ۱۵ نیوتن و به واسطه گرمای تولید شده متاثر از اصطکاک، پیوندهای چسبان ایجاد می شود. پیشگیری از ایجاد پیوندهای چسبان در مقاطعی که سطوح به یکدیگر نزدیک شده اند غیرقابل اجتناب است و از طرف دیگر اتصال سبب فرورفتن ناهمواری‌های جسم صلب تر در جسم نرم تر میگردد. در چنین شرایطی بر اثر حرکت لغزشی در سطح، ماده به طرف جلو و اطراف جابجا شده، شیارهایی در جهت حرکت به صورت خراش‌هایی روی سطح تشکیل می دهد که مکانیزمی از نوع خراشان را به وجود می آورد که این حالت در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۲-۵- بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش خوردگی

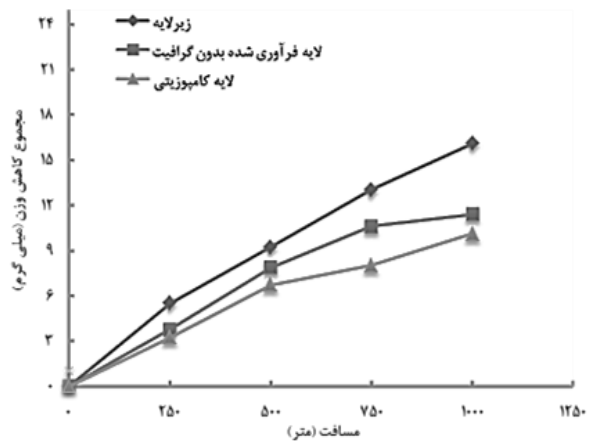
جدول ۳ نتایج به‌دست آمده از نمودار پلاریزاسیون تاغل نمونه فلز پایه، لایه کامپوزیت سطحی فرآوری شده با ذرات گرافیت و لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود پتانسیل خوردگی و چگالی جریان لایه کامپوزیتی با ذرات گرافیت نزدیک به مقادیر مربوط به فلز پایه بوده و تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. در حالی که

ضریب اصطکاک برای زیر لایه تقریباً ۰/۷۸ است، در حالی که ضریب اصطکاک لایه‌های فرآوری شده بدون پودر و لایه کامپوزیتی با ذرات گرافیت به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۷ به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تست سختی و متالوگرافی نمونه‌ها همانطور که انتظار میرفت ضریب اصطکاک تمام نمونه‌های فرآوری شده کاهش یافته است. بهترین نتیجه برای لایه ی کامپوزیتی تقویت شده با ذرات گرافیت به‌دست آمده است. حضور ذرات سخت گرافیت روی زمینه ی داکتیل برنج باعث می‌شود که در حین انجام آزمون سایش ابتدا این ذرات دچار ساییدگی شوند. در نتیجه مقاومت به سایش سطوح تقویت شده با ذرات گرافیتی افزایش قابل توجهی را نسبت به زیرلایه برنجی نشان داده است.

در شکل ۱۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از زیرلایه و لایه‌های سطحی فرآوری شده نشان داده شده است. فرو رفتگی‌ها و کندگی‌هایی در این تصاویر مشاهده می‌شود که به صورت شیارهایی موازی با جهت لغزش، قابل تشخیص هستند. چنین علایمی از مشخصه‌های بارز سایش خراشان است. این شیارها توسط پستی و بلندی‌های موجود بر روی سطح دیسک فولادی و یا ذرات سخت حاضر بین سطوح تماس که سطح نمونه را شخم می‌زنند، ایجاد می‌شوند.



شکل ۱۱ پروفیل سختی لایه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات گرافیت تحت یک و سه پاس FSP و بدون حضور ذرات تقویت کننده



شکل ۱۲ تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش فلز پایه، لایه کامپوزیتی تولید شده با ۳ پاس FSP و لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده

۴- کمترین مجموع کاهش وزن مربوط به لایه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات گرافیت و بیشترین نرخ سایش مربوط به زیرلایه می‌باشد.

۵- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش سختی سنجی میکروسکوپی و متالوگرافی نمونه‌ها، ضریب اصطکاک تمام نمونه‌های فرآوری شده با فرآیند اصطکاکی همزنی کاهش داشته است. بهترین نتیجه برای لایه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات گرافیت، با ضریب اصطکاک ۰/۶۷ به دست آمده است.

۶- پتانسیل خوردگی در لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده ۲۹۸- میلی ولت به دست آمده است که تقریباً ۱/۲ برابر فلز پایه می‌باشد. بنابراین مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده از مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی فلز پایه بهتر بوده است.

۵- مراجع

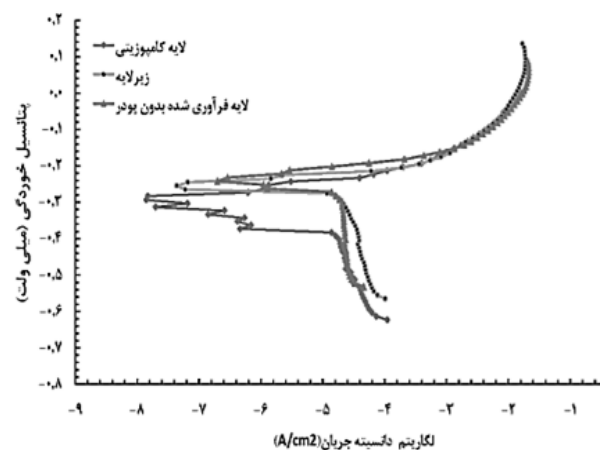
- [1] Meran, C., "The Joint Properties Of Brass Plates By Friction Stir Welding", Materials & Design, Vol. 27, pp. 719-726, 2006.
- [2] Novakovic, J. Vassiliou, p. Samara, k. and Argyropulos, TH., "Electroless Nip-Tio2 Composite Coatings: Their Production And Properties", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 895-901, 2006.
- [3] Hiraoka, T. Nakamura, Y. and Tanaka, Y., "Mechanical Properties Of Cast Iron Surface-Hardened By TIG Arc Remelting", AFS Transaction, Vol. 94-65, pp. 603-608, 2002.
- [4] Park, C.G. Kim, J.G. Chung, Y.M. and Lee. C.H., "A Study On Corrosion Characterization Of Plasma Oxidized 65/35 Brass With Various Frequencies. Surface And Coatings Technology", Surface and Coatings Technology Vol. 200, pp. 77-82, 2005.
- [5] Park, H.S. Kimura, T. Murakami, T. Nagano, Y. Nakata, K. and Ushio, M., "Microstructures And Mechanical Properties Of Friction Stir Welds Of 60%Cu-40%Zn Copper Alloy, Materials Science And Engineering", Vol. 371, pp. 160-169, 2004.
- [6] 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 of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 25, pp. 95-102, 2015.
- [7] Mishra, R.S. Ma, Z.Y. and Charit, I., "Friction Stir Processing: A Novel Technique For Fabrication Of Surface Composite", Materials Science and Engineering, Vol. 341, pp. 307-310, 2003.
- [8] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, S. Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication Of A5083/Sic Surface Composite By Friction Stir Processing And Its Characterization", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2015.
- [9] Dixit, M. Newkirk, J.W. and Mishra, R.S., "Properties Of Friction Stir-Processed Al 1100-Niti Composite", Vol. 56, pp. 541-544, 2007.
- [10] Moghaddam, M.S. Parvizi, R. Sabzevar, M.H. and Davoodi, A., "Microstructural And Mechanical Properties Of Friction Stir Welded Cu-30Zn Brass Alloy At Various Feed Speeds: Influence Of Stir Bands", Materials & Design, Vol. 32, pp. 2749-2755, 2011.

پتانسیل خوردگی در لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده تا حدودی، بیشتر از فلز پایه شده است. همچنین چگالی جریان برای لایه فرآوری شده بدون حضور ذرات تقویت کننده پایین تر از مقدار به دست آمده برای فلز پایه و لایه کامپوزیت سطحی است که نشان می‌دهد واکنش‌های خوردگی در این لایه با سرعت پایین تری انجام شده است.

جدول ۳ نتایج به دست آمده از نمودار پتانسیل تافل برای نمونه‌های مختلف

نمونه	تعداد پاس‌ها	سرعت پیشروی (mm/min)	پودر مصرفی	پتانسیل خوردگی (mv)	چگالی جریان (A/cm ²)
۱	-	-	-	-۲۵۰	-۵/۰۲
۲	۱	۱۰۰	-	-۲۹۸	-۴/۹۴
۳	۳	۱۰۰	گرافیت	-۲۴۵	-۵/۰۰

شکل ۱۵ نمودارهای به دست آمده از آزمون تافل را برای نمونه فلز پایه، لایه کامپوزیتی سطحی با ذرات گرافیت و لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد. از داده‌های این نمودار می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده از مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی فلز پایه بهتر بوده است.



شکل ۱۵ مقایسه نمودار پلاریزاسیون تافل نمونه فلز پایه، لایه کامپوزیت سطحی و لایه بدون حضور ذرات تقویت کننده

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از فرآیند اصطکاکی همزن و با استفاده از متغیرهای بهینه یک لایه کامپوزیتی سطحی روی زیرلایه برنج با ذرات میکرونی گرافیت با موفقیت ایجاد شد و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- توزیع ذرات تقویت کننده در ناحیه همزده در لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده با افزایش تعداد پاس‌های FSP یکنواخت تر شده و با افزایش تعداد پاس‌ها، از تجمع این ذرات کاسته می‌شود.
- ۲- میانگین سختی ناحیه همزده در لایه‌های کامپوزیت سطحی با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند افزایش می‌یابد که می‌توان علت آن را کاهش اندازه دانه در پی افزایش تعداد پاس‌ها دانست.
- ۳- بالاترین سختی مربوط به لایه کامپوزیت سطحی فرآوری شده با ذرات تقویت کننده گرافیت تحت سه پاس FSP است. مقدار سختی در اینلایه بین ۱۲۰ تا ۱۴۱ ویکرز متغیر بوده که به طور متوسط در حدود ۳۶ ویکرز بیشتر از سختی فلز پایه می‌باشد.

