

بررسی ریز ساختار و خواص سطحی کامپوزیت سطحی فولاد St ۱۴ تقویت شده با ذرات نانو ساختار پایه آهنی ساخته شده به روش فرایند همزن اصطکاکی

آمنه امیرافشار، امیر عبدالله زاده و حمیدرضا شاهرودی

دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۹۱/۰۵/۳۱ - پذیرش مقاله: ۹۲/۰۱/۲۰)

چکیده

در تحقیق حاضر، از روش فرایند همزن اصطکاکی برای ساخت کامپوزیت سطحی با حضور ذرات نانو ساختار پایه آهنی $Fe_{48}Cr_{18}Mo_7Nb_6C_4B_{16}Y_1$ استفاده شد. به همین منظور، یک ابزار مخروطی شکل از جنس پایه تنگستن کاربید و همچنین سرعت طولی و چرخشی به ترتیب 100 mm/min و 800 rpm استفاده شد. ریزساختار، خواص سطحی و سختی کامپوزیت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از سختی، حاکی از افزایش سختی به دلیل حضور ذرات تقویت کننده در کامپوزیت و بهبود ریزساختاری سطح فولاد بر اثر فرایند همزن اصطکاکی بود. بررسی رفتار سایشی کامپوزیت نشان از افزایش قابل توجه مقاومت به سایش کامپوزیت سطحی نسبت به زمینه فولادی تقویت نشده دارد. همچنین بررسی سطوح سایش نشان داد که مکانیزم غالب سایش، در زمینه فولادی تقویت نشده، سایش تورقی است که با کامپوزیت سازی در سطح، مکانیزم غالب به سایش خراشان ملایم تبدیل می شود. واژه های کلیدی: فرایند همزن اصطکاکی، کامپوزیت سطحی، سختی، سایش، فولاد ساده کربنی، ریزساختار، ذرات تقویت کننده.

Study of microstructure and surface properties of st14 steel surface composite reinforcement by friction Fe based Nano structured by friction stir processing

A. Amirafshar, A. Abdollahzadeh and Hamidreza Shahevardi

Department of Materials Engineering, University of Tarbiat Modares

(Received 21 August 2012, accepted 9 April 2013)

Abstract

In this study, friction stir processing (FSP) was utilized to fabricate Fe based nano structure $Fe_{48}Cr_{18}Mo_7Nb_6C_4B_{16}Y_1$ particles. For this reason, we cone shape tool and constant tool rotation rate and travel speed 800 rpm and 100 mm/min was used respectively. Microstructural, tribological properties and hardness has been studied. The results show that the hardness was increased by the presence of reinforcing particles and improved microstructure by FSP. The study of wear behavior shows that wear resistance was increased than steel base. Also investigation of wear surface showed that the dominant wear mechanism in the not reinforcement steel is lamination wear that with composite fabrication it to become abrasive wear.

Key words: friction stir processing, surface composite, hardness, wear, plane carbon steel, micro structure, reinforcement particles

E-mail of corresponding author: A.Amirafshar@gmail.com

مقدمه

در تحقیقاتی که توسط مهرانفر و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۱ انجام شد؛ اندازه دانه‌های فولاد سوپر آستنیتی، تا ابعاد ۳۰ تا ۹۰nm در ضخامت ۹۰ میکرومتر از سطح کاهش پیدا کرد و خواص سطحی بهبود یافت.

البته قابل ذکر است؛ ساخت کامپوزیت‌های سطحی با روش‌های متداول بر پایه فرایندهای ذوبی در دمای بالا مثل لیزر و پلاسما، منجر به تخریب ویژگی‌های کامپوزیت می‌شود. در طول این فرایندها، اجتناب از واکنش بین تقویت کننده و زمینه فلزی و در نتیجه شکل گیری فازهای مخرب بسیار مشکل است. اما اخیراً توجه بسیار زیادی به فرایند FSP به عنوان یک روش حالت جامد صورت گرفته است. از آن جایی که ساخت کامپوزیت سطحی به وسیله FSP در دمای زیر دمای ذوب فلزات انجام می‌شود، مشکلات روش‌های متداول بر پایه ذوب و انجماد فلزات را ندارد [۴].

بررسی‌های انجام گرفته مبنی بر ساخت کامپوزیت سطحی بر روی فولاد توسط فرایند همزن اصطکاکی نشان می‌دهد که تا کنون از FSP و پارامترهای آن برای بهبود ریزساختار سطحی، تولید ساختارهای نانو در سطح و تغییر حالت‌های متالورژیکی در فولادها استفاده شده است. استفاده از FSP برای تولید کامپوزیت سطحی برای اولین بار در این پژوهش بیان شده است.

فولاد St14 جزء فولادهای کربنی یا غیر آلیاژی می‌باشد که به عنوان فولاد ساختمانی در بسیاری از سازه‌های فولادی نقش بسزایی را ایفا می‌کند. فولادهای St14 حدود ۱٪ کربن دارند و معمولاً دارای ساختار فریتی هستند که ساختار نرم با قابلیت ماشین کاری مناسب است. با کامپوزیت سازی، شرایط سطحی این فولاد بهبود یافته و دامنه کاربرد آن بویژه در شرایطی که مقاومت به سایش نیاز است، بیشتر می‌شود. همچنین تاثیر پارامترهای جوشکاری همزن اصطکاکی بر روی ریز ساختار و خواص این آلیاژ تا حال به صورت کامل بررسی نشده است. دلیل استفاده از ذرات نانو ساختار پایه آهنی بررسی

جوشکاری همزن اصطکاکی یا Friction stir welding که اختصاراً به آن FSW نیز گفته می‌شود، یکی از تکنیک‌های نوین جوشکاری بوده که در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط موسسه TWI انگلستان ابداع گردید [۱]. فرآیند همزن اصطکاکی FSP^۲ برای بهسازی ریز ساختاری مواد فلزی توسط Mishra و همکارانش [۳و۲] ابداع شده است که اصول این فرآیند بر مبنای اصول جوشکاری همزن اصطکاکی استوار است.

مواد با ویژگی‌های سطحی و سایشی مناسب، پیش شرط لازم برای طراحی‌های مهندسی پیشرفته است [۴]. کامپوزیت‌های سطحی زمینه فلزی، ویژگی‌های خوبی از قبیل؛ سختی و مقاومت به سایش بالا دارند [۵ و ۶].

Konkol و همکارانش [۷] طی تحقیقاتشان بر روی تغییرات ریزساختاری فولاد HSLA-65 دریافتند که ریز ساختارهای متفاوتی در فریت ریزدانه این نوع فولاد به وجود می‌آید. به طوریکه این ساختار، از فریت ریز دانه و مقادیر کمی پرلیت در آن تا فریت درشت دانه و ویدمن اشتاین و بسته‌های فریت - کاربید متغیر است.

چابک و دهقان [۸] جهت ریزدانه کردن فولاد IF توسط فرایند همزن اصطکاکی؛ از محیط خنک کننده آبی، جهت کاهش سریع تر دما و جلوگیری از رشد دانه استفاده کردند. با این کار آن‌ها به ساختاری با اندازه دانه بین ۵۰ تا ۱۲۵nm در ضخامت ۳۰ تا ۳۵ میکرو متر از سطح بر اساس فرایند تبلور مجدد دینامیکی، دست یافتند. بنابراین توانستند به یک افزایش ۳ برابری در خواص سطحی دست پیدا کنند.

Morisada و همکارانش [۹] با تلفیق همزمان ذوب لیزری و FSP توانستند به کاربیده‌های نانو ساختار M₇C₃ به ابعاد 100nm دست بیابند. آن‌ها با این کار سختی را تا ۹۰۰ ویکرز افزایش دادند.

¹ The welding institute

² Friction stir processing

برای تهیه کامپوزیت زمینه فولادی، ابزاری با جنس پایه کاربید تنگستن، قطر شانه ابزار ۱۶mm و یک پین مخروطی شکل طراحی و ساخته شد.

سرعت چرخشی (W) و انتقالی ابزار (V) به ترتیب ۸۰۰rpm و ۱۰۰mm/min انتخاب گردید. دلیل این انتخاب، بهینه بودن این سرعت در توزیع و تغییرات ریزساختاری در بین سرعت‌های بررسی شده دیگر است [۱۲]. برای بررسی سطح مقطع عرضی کامپوزیت، نمونه‌های متالوگرافی بریده، پولیش و جهت بررسی میکرو ساختاری با محلول نایتال ۲٪ حکاکی شد. بررسی سختی، با استفاده از ماکرو سختی ویکرز با بار اعمالی ۱۰N بر روی منطقه همزده شده انجام شد. برای بررسی "مقاومت به سایش" کامپوزیت ساخته شده، آزمایش سایش "پین بر روی دیسک" در مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شد.

شرایط آزمایش "پین بر روی دیسک" در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

قبل از ارائه گزارش و بیان بحث بر روی نتایج به دست آمده قابل ذکر است که بگوییم از محدودیت های این روش تولید پیوسته و مقدار زیاد ذرات تقویت کننده می باشد. زیرا این ذرات توسط فرایند Melt spinning تولید شده است که این سیستم از نظر تولید پیوسته و مقدار زیاد نوارهای تامورف با مشکل روبرو می باشد. شکل ۲ سطح نمونه کامپوزیتی ساخته شده را نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است سطح نمونه تقریباً سالم است و عیوبی همچون عدم پرتو شدگی ناشی از سیلان ناقص مواد، پلیسه و تاول سطحی در سطح نمونه مشاهده نمی شود.

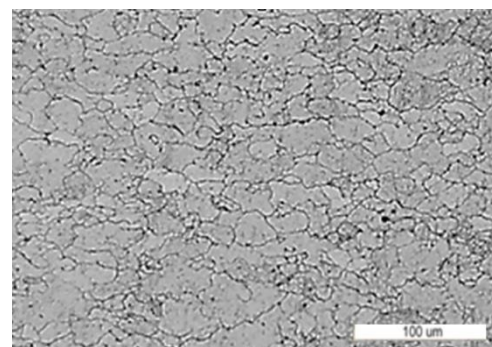
اثر ساختار نانو بر روی خاص سطحی فولاد کم کربن می باشد.

اهمیت و هدف از انجام تحقیق بررسی خواص سایشی کامپوزیت سطحی زمینه فولاد St14 تقویت شده با ذرات نانو ساختار آهنی و همچنین بررسی اثر نانو ساختارهای آهنی بر فولاد و تغییر ریز ساختاری در سطح فولاد در اثر فرایند همزن اصطکاکی می باشد.

مواد و روش تحقیق

جهت ساخت کامپوزیت سطحی، از فولاد ساختمانی St14 با ابعاد ۱۰×۱۰cm^۲ و ضخامت ۲mm استفاده شد. شکل ۱ ریزساختار و جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ را نشان می دهد.

از پودر نانو ساختار پایه آهنی، با ترکیب شیمیایی Fe48Cr18Mo7Nb6C4B16Y1 و ابعاد متوسط ۵۰μm به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد [۱۱]. جهت تزریق فاز تقویت کننده، شیارهایی با عمق ۱mm و عرض ۰/۶mm بر روی قطعات ایجاد شد.



شکل ۱. ریزساختار فلز St14.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد St14.

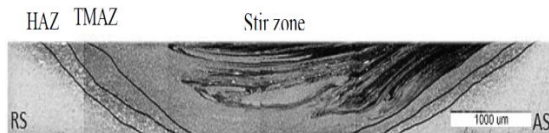
عناصر	C	Si	Mn	P	S	Other
درصد وزنی	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۷N

جدول ۲. شرایط آزمایش سایش پین روی دیسک.

استوانه‌ای	شکل پین
۲/۵	شعاع نوک پین (mm)
۲	نیروی عمودی (kgf)
۶۰	سرعت لغزش پین روی دیسک (cm/s)
۷۱/۶۲	سرعت چرخشی پین (rpm)
۲۵±۶	دما

ناحیه است؛ که باعث افزایش کرنش و دما شده و در نتیجه مساحت TMAZ را در AS کاهش می‌دهد [۱۴ و ۱۵].

ناحیه SZ (شکل ۴ که با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۵ نشان داده است)، ناحیه‌ای با بیشترین میزان کرنش و دما است در نتیجه بیشترین میزان تغییر شکل پلاستیک را تحمل می‌کند. تغییر شکل پلاستیک شدید در این ناحیه باعث خرد شدن دانه‌های فولاد و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود. حضور ذرات تقویت کننده در ناحیه SZ در حین فرایند FSP به فرایند تبلور مجدد کمک کرده و دانه‌هایی کوچک‌تر و عاری از کرنش را به وجود می‌آورد [۱۶].



شکل ۳. سطح مقطع عرضی کامپوزیت.

شکل ۴، تفاوت دانه بندی نواحی مذکور را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد.

ناحیه TMAZ (شکل ۴) ناحیه‌ای است که در آن میزان کرنش اعمالی بر مواد کمتر از ناحیه SZ است و همچنین دما در این ناحیه بالاتر است. این امر باعث تشکیل دانه‌هایی به مراتب درشت‌تر نسبت به SZ می‌شود.

ناحیه TMAZ توسط ناحیه‌ای به نام HAZ پوشیده شده است. HAZ فقط تحت تاثیر حرارت است. عدم کرنش و تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه باعث رشد دانه در این ناحیه شده در نتیجه باعث تشکیل دانه‌هایی بزرگتر از دانه‌های فلز پایه می‌شود.



شکل ۲. سطح کامپوزیت زمینه فولادی.

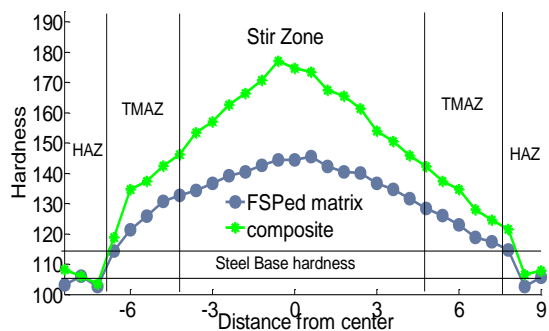
شکل ۳ تصویر سطح مقطع عرضی کامپوزیت ساخته شده را در بزرگنمایی ۵۰ برابر نشان می‌دهد. خط سیلانی مواد از ناحیه پیش رونده (AS^۱) شروع شده اما به ناحیه پس روند (RS^۲) نمی‌رسد. تحقیقات انجام گرفته [۱۳] نشان می‌دهد که بالا بودن حرارت ورودی در سرعت چرخشی بالا باعث تسهیل در سیلان مواد شده و نیروی بازدارنده اصطکاک مواد در این حرارت ورودی ناچیز می‌شود.

همان طور که از شکل ۳ مشخص است کامپوزیت شامل نواحی همزده شده (SZ)، منطقه تحت تاثیر حرارت و عملیات مکانیکی (TMAZ) و منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) است. از آن جایی که دما و کرنش در AS بالاتر است، TMAZ در این ناحیه باریک‌تر از سمت RS می‌شود [۱۴ و ۱۵]. این امر در شکل ۳ به خوبی دیده می‌شود. کرنش و دمای بالاتر در AS، به دلیل هم جهت بودن میدان‌های سرعت چرخشی و حرکتی ابزار در این

¹ Advancing side

² Retreating side

زمانی که ذرات فاز ثانویه بر روی مرز دانه ها قرار می گیرند احتمال رخداد فرایند تبلور مجدد افزایش یافته، این امر مانع از تحرک نابجایی ها شده و افزایش مساحت مرز دانه ها را در اثر ریز شدن دانه ها باعث می شود و سختی نسبت به حالت FSP نشده افزایش می یابد [۱۷ و ۱۸].

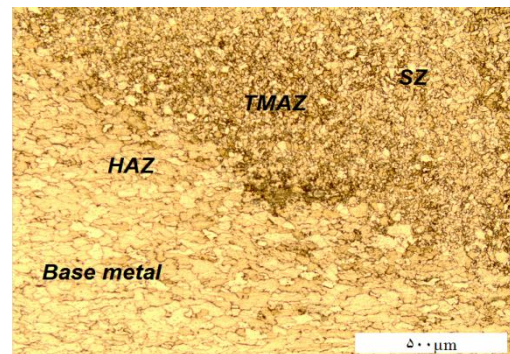


شکل ۶. ماکرو سختی کامپوزیت، نمونه FSP شده و زمینه فولادی.

همان طور که شکل ۶ نشان می دهد، سختی نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه FSP شده بیشتر است. حضور ذرات سخت تر در زمینه، افزایش سختی کامپوزیت را نسبت به حالت FSP شده و تقویت نشده باعث می شود [۱۸].

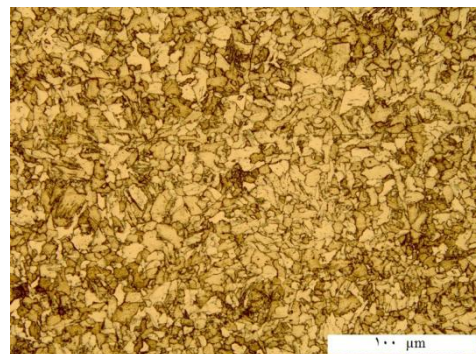
حضور ذرات تقویت کننده در کامپوزیت باعث پدیده تبلور مجدد شده و در نتیجه باعث ایجاد ذرات یز دانه تر در مناطق مختلف ناحیه FSP می شود. همچنین ذرات تقویت کننده مانع از تحرک مرز و درشت شدن ذرات در نمونه کامپوزیتی می شود. بنابراین می توان گفت حضور دانه های ریزتر به دلیل حضور ذرات ثانویه نمونه کامپوزیتی باعث افزایش سختی در ناحیه TMAZ نمونه کامپوزیتی می شود.

افزایش سختی در کامپوزیت و نمونه FSP شده و کامپوزیت نشده نسبت به زمینه فولادی علاوه بر وجود ذرات فاز ثانویه و افزایش مرز دانه، به تغییر متالورژیکی ساختار و تبدیل فریت پلی گونال به فریت سوزنی در



شکل ۴. تصویر نوری دانه بندی نواحی مختلف تشکیل شده در کامپوزیت.

برای بررسی سختی از ماکرو سختی ویکرز با بار اعمالی ۱۰N بر روی زمینه فولادی، کامپوزیت و نمونه FSP شده بدون حضور ذرات تقویت کننده، استفاده شد. نتایج تست سختی به صورت نمودار در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار سختی مشخص است؛ سختی نمونه FSP شده نسبت به زمینه فولادی افزایش یافته است. این می تواند به تغییرات میکروساختاری و ریز شدن اندازه دانه ها نسبت داده شود [۱۷].



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه SZ کامپوزیت.

افزایش سختی، تحت تاثیر همزمان دو عامل سختی مرز دانه ای و سختی حاصل از ذرات فاز ثانویه می باشد. ذرات فاز ثانویه بر اساس مکانیزم سخت گردانی انتشاری ارووان مانع از حرکت نابجایی ها می شوند و سختی را افزایش می دهد. همچنین مرز دانه ها نیز مانند یک سد در مقابل تحرک نابجایی ها قرار می گیرند و تحرک نابجایی ها را با مشکل روبرو می کنند؛ و سختی افزایش می یابد.

کننده می‌شود [۱۸]. نسبت W^2/V برای مدلسازی حرارت ورودی به مراتب بهتر از نسبت W/V می‌باشد [۱۹]. برای بررسی میزان مقاومت به سایش از آزمایش "پین روی دیسک" با توجه به شرایط جدول ۲ و مسافت ۱۰۰۰ متر استفاده شد. در هر ۲۵۰ متر سایش متوقف و کاهش وزن ناشی از سایش بررسی شد.

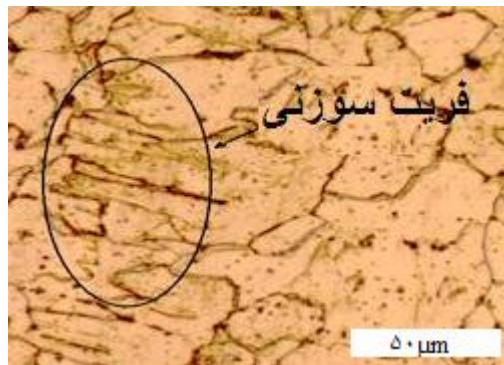
جدول ۳. حرارت ورودی، اندازه ذرات تقویت کننده و اندازه دانه کامپوزیت و زمینه.

نمونه	اندازه دانه (μm)	اندازه ذرات (μm)	$W^2/1000V$	W/V
زمینه	۳۴	-	-	-
نمونه FSP شده	۲۱	-	۶/۴	۸
کامپوزیت	۱۱	۲۶	۶/۴	۸

برای اندازه گیری اندازه دانه ها و ذرات از نرم افزار Image Analyzer a4i به عنوان یک سیستم متصل به میکروسکوپ نوری استفاده شد.

شکل ۸ نتایج کاهش وزن را بر اساس مسافت طی شده نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است میزان کاهش وزن برای نمونه کامپوزیتی از دو نمونه دیگر کمتر است. کاهش وزن کمتر در کامپوزیت، به دلیل حضور ذرات فاز تقویت کننده و افزایش مساحت مرزدانه ناشی از تغییر شکل پلاستیک در طی فرایند FSP است. این عوامل مانع از تغییر شکل پلاستیک در اثر نیروهای برشی حاصل از سایش می‌شوند و نرخ کاهش وزن را کم می‌کند. شیب نمودار کاهش وزن_مسافت لغزش، نشان دهنده سرعت سایش است. شکل ۹ نرخ سایش را برای هر سه نمونه نشان می‌دهد. با مقایسه شیب نمودارها در شکل ۹ می‌توان فهمید که سرعت سایش در نمونه

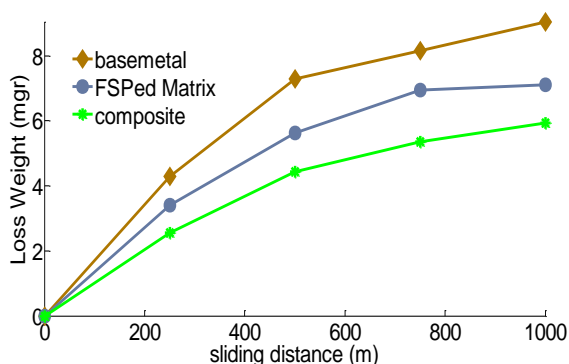
شرایط ساخت کامپوزیت نیز بر می‌گردد. این نوع فریت در شکل ۷ نشان داده شده است.



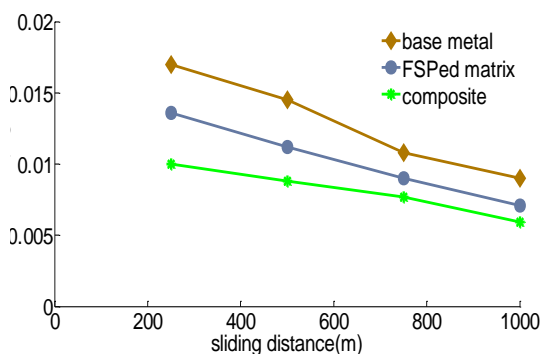
شکل ۷. تصویر میکروسکوپ نوری فریت سوزنی تشکیل شده در کامپوزیت.

حرارت ورودی در سرعت $800\text{rpm}-100\text{mm/min}$ نسبت به سایر سرعت‌های بررسی شده در تحقیقات گذشته [۱۲]، به مقدار بسیار زیادی بالا می‌رود بنابراین با قرار گرفتن نمونه در دمای محیط، سرمایش با سرعت بالایی اتفاق می‌افتد و فریت از حالت پلی گونال به حالت سوزنی تبدیل می‌شود. تشکیل درصد کمی فریت سوزنی باعث افزایش سختی در کامپوزیت و نمونه FSP شده نسبت به زمینه فولادی می‌شود.

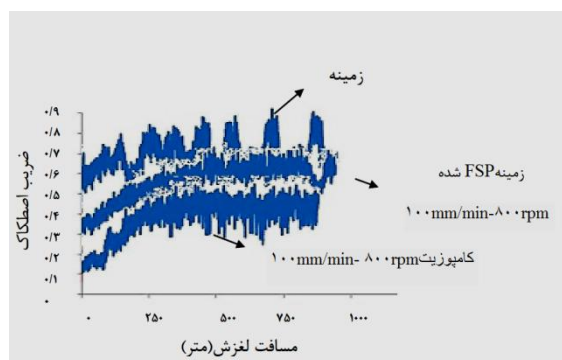
جدول ۳ میزان حرارت ورودی، اندازه دانه و اندازه ذرات فاز ثانویه در ناحیه SZ را در فرایند FSP برای هر سه نمونه زمینه فولادی، نمونه FSP شده بدون حضور ذرات تقویت کننده و کامپوزیت نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است اندازه دانه در کامپوزیت از زمینه و نمونه FSP شده کوچک‌تر است. وجود کرنش و تغییر شکل پلاستیک شدید به همراه فرایند تبلور مجدد دینامیکی باعث کاهش اندازه دانه در کامپوزیت می‌شود [۱۸]. همچنین اندازه ذرات فاز تقویت کننده پس از فرایند FSP نسبت به حالت اولیه کوچک‌تر شده است. مطالعات گذشته در این زمینه نشان می‌دهد که تغییر شکل پلاستیک شدید در SZ باعث خرد شدن ذرات تقویت



شکل ۸. نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای زمینه، نمونه FSP شده و کامپوزیت.



شکل ۹. نمودار سرعت سایش بر حسب مسافت لغزش برای زمینه، نمونه FSP شده و کامپوزیت.



شکل ۱۰. نمودار ضریب اصطکاک برای زمینه فولادی، نمونه FSP شده و کامپوزیت.

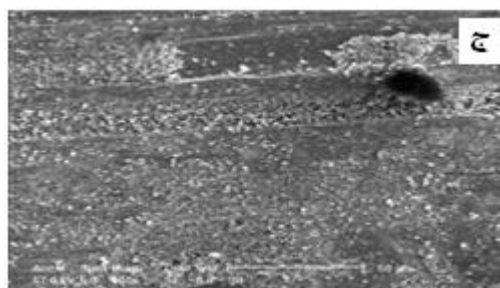
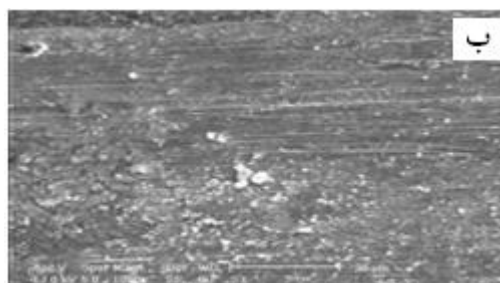
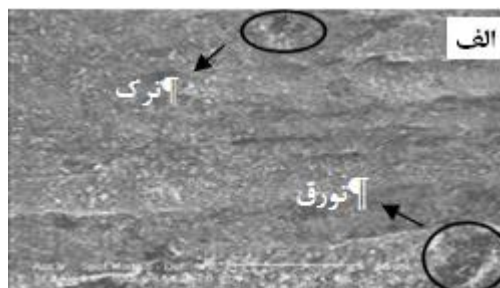
نوسانات و تغییرات لحظه‌ای در نمودار سایش نمونه فولادی به دلیل جوش خوردن و جدایش میکرو جوش‌های حاصل از سایش سطوح سایش است. افزایش ضریب اصطکاک در زمینه به چسبندگی محصولات سایش به سطوح سایش بر می‌گردد. بنابراین نمونه

کامپوزیتی ابتدا زیاد و سپس کاهش می‌یابد. زمانی که نمودار کاهش وزن کامپوزیت به حالت پایدار می‌رسد سرعت سایش در کامپوزیت کاهش می‌یابد. در حالیکه سرعت سایش برای نمونه FSP شده و زمینه فلزی زمانی، که نمودار کاهش وزن به حالت پایدار می‌رسد ثابت می‌شود. از مقایسه شکل های ۸ و ۹ چنین بر می‌آید که در کامپوزیت، میزان وزن کاهش یافته و نرخ سایش کمتر از زمینه و نمونه FSP شده می‌باشد و با افزایش مسافت لغزش این اختلاف بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کامپوزیت سازی بر روی فولاد زمینه باعث افزایش مقاومت به سایش فولاد st14 می‌شود.

نتایج تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که نرخ سایش، شامل دو مرحله سایش مرحله اول و سایش حالت پایدار است [۲۰]. با توجه به شکل؛ سرعت سایش مرحله اول، زیاد است؛ و کاهش وزن بیشتری رخ می‌دهد. زمانی که تماس‌های تعادلی بین دو قطعه برقرار شود و یک حوزه کارسختی در نمونه در نزدیکی سطح ایجاد شود سایش مرحله اول یا سایش ناپایدار، پایان می‌یابد [۲۰ و ۴]. قابل مشاهده است که در سایش مرحله پایدار، سرعت سایش ثابت می‌شود و نرخ کاهش وزن، کم می‌شود. تشکیل یک لایه محافظ بین دیسک و نمونه در حال سایش، مانع از سایش بیشتر نمونه می‌شود در نتیجه نرخ سایش در حالت پایدار کاهش می‌یابد [۲۰].

تبدیل سایش مرحله اول به حالت پایدار در کامپوزیت‌ها سریعتر از زمینه فلزی و زمینه FSP شده و کامپوزیت نشده رخ می‌دهد [۴]. شکل ۱۰، ضریب اصطکاک و شکل ۱۱ سطوح سایش را برای زمینه فولادی، نمونه FSP شده و کامپوزیت، نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است ضریب اصطکاک برای کامپوزیت پایین‌تر از زمینه و نمونه FSP شده است. دلیل این امر، کاهش اصطکاک بین دو سطح است. از آن جایی که ذرات فاز ثانویه سخت‌تر هستند تغییر شکل پلاستیک ناشی از فرایند FSP کمتر شده و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد [۴].

فولادی باید سایش چسبان شدیدی را تجربه کند. این امر در شکل ۱۱- الف که سطح سایش نمونه فولادی را نشان می‌دهد به خوبی دیده می‌شود.



شکل ۱۱. تصاویر SEM سطوح سایش الف) زمینه فولادی ب) نمونه FSP شده ج) کامپوزیت.

نمودار ضریب اصطکاک نمونه FSP شده از نمونه فولادی پایین تر است. از آنجایی که سطوح FSP شده سخت تر هستند تغییر شکل پلاستیک کمتر و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد [۲۱]. این امر به دلیل افزایش مساحت مرزخانه‌ها در حین فرایند FSP می‌باشد؛ با مقایسه نمودار ضریب اصطکاک برای نمونه FSP شده و شکل ۱۱- ب می‌توان گفت که؛ مکانیزم سایش نمونه FSP شده و کامپوزیت نشده به سایش چسبان و تورقی

ملایم‌تری نسبت به زمینه فولادی تبدیل می‌شود. ضریب اصطکاک برای کامپوزیت پایین تر است و همچنین نوسانات کمتری نسبت به دو نمودار دیگر دارد. ضریب اصطکاک پایین نشان از سایش خراشان دارد. با بررسی نتایج کاهش وزن در شکل ۸، نمودار ضریب اصطکاک و سطح سایش کامپوزیت در شکل ۱۱- ج می‌توان گفت؛ مکانیزم سایش در کامپوزیت، به دلیل حضور ذرات تقویت کننده و مقاومت بیشتر در برابر نیروهای برشی، وارد مرحله تورقی نمی‌شود؛ فقط در ابتدا سایش چسبان ملایمی را تجربه می‌کند و سپس وارد مرحله سایش خراشان ملایم می‌شود.

نتیجه گیری

- ۱- تغییر شکل برشی بسیار زیاد در فرایند FSP، باعث تبلور مجدد در فولاد شده و دانه‌ها در اثر فرایند تبلور مجدد خرد می‌شوند.
- ۲- کرنش بالای FSP باعث خردایش ذرات تقویت کننده شده توزیع آن‌ها را در سطح همگن تر می‌کند.
- ۳- حضور ذرات فاز ثانویه به همراه افزایش مساحت مرزخانه، تحرک نابجایی‌ها را با مشکل روبرو می‌کند و سختی را در کامپوزیت و نمونه FSP شده و کامپوزیت نشده افزایش می‌دهد.
- ۴- بالا بودن سرعت چرخشی و حرکتی در حین فرایند FSP، باعث تغییر حالت متالورژیکی فولاد از فریت پلی گونال به فریت سوزنی شده که تشکیل درصد کمی فریت سوزنی، افزایش سختی را به همراه دارد.
- ۵- ذرات تقویت کننده در زمینه فولادی باعث افزایش مقاومت فولاد زمینه، به نیروهای برشی ناشی از سایش شده و مقاومت به سایش را در کامپوزیت افزایش می‌دهند.

منابع

1. C.J.Lee, J.C.Haung and P.J.Hsieh, *Mg based Nano-Composite fabricated by friction stir processing*, Scripta Materialia, 54(2006) 1415-1420.
2. S. Mishra and Z.Y. Ma, *Friction stir welding & processing*, Material Science and Engineering. 50(2005)1-70.
3. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, I. Charit, *Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite*, Material Science and Engineering, A341 (2003)307-310.
4. S.A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, S. Soleymani and H. Assadi, *Microstructure and tribological performance of an aluminium alloy based hybrid composite produced by friction stir processing*, Materials and Design, 32 (2010)2727-2733.
5. Lim SC, Gupta M, Ren L and Kwok JKM, *The tribological properties of Al-Cu/SiCp metalmatrix composites fabricated using the rheocasting technique*, Material Process and Technology, 80(1999)591-596.
6. Garcia-Cordovilla C, Narciso J and Louis E, *Abrasive wear resistance of aluminiumalloy/ceramic particulate composites*, Wear, 192(1996)170-177.
7. P.J. Konkol, J.A. Mather and J.R. Pickens, *Friction stir welding of HSLA-05 steel forshipbuilding*, ship production, 3(2003) 153-154.
8. C.Chabok and K.Dehghani, *Formation of Nanograin in IF steels by friction stir processing*, Material Science &Engineering, A528 (2010) 303-313.
9. Y. Morisada, *Nanostructured tool steel fabricated by combination of laser melting and friction stir processing*, Material Science & Engineering, A505 (2009) 157-162.
10. M. Mehranfar and K. Dehghani, *Producing Nanostructured super-austenitic steels by friction stir processing*, Material Science & Engineering, A528 (2011) 3404-3408.
11. S. Ahmadi, H.R. Shahverdi and S.S. Saremi, *Effects of Nb alloying on Nano-Crystallization kinetics of Fe55-x Cr18Mo7B16C4Nb_x(x=0, 3) bulk amorphous alloys*, Materials Science & Technology, 27(2011) 735-740.
12. آمنه امیرافشار، ساخت نانو کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات نانوساختار $Fe_{48}Cr_{18}Mo_7Nb_6C_4B_{16}Y_1$ به روش فرایند همزن اصطکاکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۹۰.
13. K. Elangovan and V. Balasubramania, *Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy*, Materials and Design, 29(2008) 362-373.
14. William J.Arbegast, *A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding*, Scripta Materialia, 58(2008)372.
15. Y.G.Kim, H.Fujii, T.Tsumura, T.Komazaki and Y.Nakata, *Tree defect types in friction stir welding of aluminum die castin alloy*, Material Science and Engineering, A 415(2006)250.
16. Z.Y.Ma, S.R.Sharma, R.S.Mishra, *Microstructure modification of cast aluminum Alloy via Friction Stir Processing*, Material science and engineering, A433 (2006) 269.
17. A.C. Somasekharan and L.E. Murr, *Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy*, Materials Characterization, 52(2004) 49-64.
18. H. Uzun, C.D. Donne, A. Argagnotto, T. Ghidini and C. Gambaro, *Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi12-11 stainless steel*, Materials and Design, 20(2005)41-46.
19. L. Commin, M. Dumont, J. E. Masse and L. Barrallier, *Friction stir welding of AZ31magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters*, Acta materialia 57(2009)326-334.
20. A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg and A. Zarei-Hanzaki, *Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing*, Materials Science and Engineering, A 500(2009) 84-91

21. Aldajah SH, Ajayi OO, Fenskeb GR and Davidc S, *Effect of friction stir processing on the tribological performance of high carbon steel*, Wear, 267(2009)350–355.