

ارزیابی رفتار سایشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ پس از فرایند سطحی

اصطکاکی اغتشاشی

احسان عابدینی

فائزه اسکندری، مسعود عطاپور و محمد علی گل‌عذار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله ۹۴/۰۳/۰۴ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۷/۱۱)

چکیده

در این پژوهش به ارزیابی رفتار سایشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ بعد از اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. برای این منظور، فرایند اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از یک ابزار بدون پین از جنس کاربید تنگستن و با سرعت چرخشی ۵۶۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نوری صورت گرفت. همچنین پروفیل سختی نمونه‌ی عملیات شده با استفاده از روش ریزسختی سنجی مورد مطالعه قرار گرفت. مقاومت به سایش نمونه‌های فلز پایه و نمونه‌ی فراوری شده با استفاده از آزمون پین روی دیسک انجام شد. نتایج نشان داد که فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث اصلاح ریزساختار و ریز دانه شدن ریزساختار و همگن شدن آن شد. اندازه دانه‌ها از $93 \pm 3 \mu\text{m}$ در فلز پایه به $26 \pm 3 \mu\text{m}$ در ناحیه‌ی اغتشاش کاهش یافت. این نتایج با مطالعات سختی سنجی مورد تایید قرار گرفت که نشان داد با اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی سختی فولاد از $170 \pm 1 \text{HV}$ به $213 \pm 5 \text{HV}$ افزایش یافت. نتایج آزمون سایش نشان داد که فرایند اصطکاکی اغتشاشی مقاومت سایشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ را حدود ۲ برابر افزایش داد. این رفتار براساس ریزساختار ایجاد شده در منطقه‌ی اغتشاش مورد بحث قرار گرفته است. براساس مشاهدات میکروسکوپی الکترونی روشی از سطوح سایش، مکانیزم اصلی سایش از نوع سایش خراشان تشخیص داده شد.

واژه‌های کلیدی: فرایند اصطکاکی اغتشاشی، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴، سایش.

Wear behavior of AISI 304 stainless steel after friction stir processing

F. Eskandari, M. Atapour and M.A. Golozar

Materials Engineering Department, Isfahan University of Technology

E. Abedini

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 25 May 2015, accepted 03 October 2015)

Abstract

The wear behavior AISI 304 stainless steel was investigated after Friction Stir Processing (FSP). FSP was carried out using a WC pin less tool at tool rotation of 560 rpm and tool feed of 50 mm/min. Microstructure analysis was conducted by using optical and scanning electron microscopy evaluations. Wear resistance of the FS processed and base metal specimens were compared using pin-on-disk tests. The results demonstrated that FSP homogenized and refined the grain size of 304 stainless steel. A reduction in grain size throughout the stir zone (26 ± 3) compared to that of the base metal (93 ± 3) was achieved through FSP. These results were confirmed by microhardness evaluations. According to the wear results, wear resistance of 304 base material improved significantly (two orders of magnitude) after FSP. This behavior was attributed to the grain refinement obtained by FSP. According to SEM observations, the abrasive wear was the main mechanism of wear after FSP.

Key words: Friction Stir processing, AISI 304 stainless steel, wear.

E-mail of corresponding author: m.atapour@cc.iut.ac.ir.

مقدمه

به بالا بودن استحکام و سختی فولادها و تخریب ابزار حین عملیات اصطکاکی اغتشاشی نسبت داده شده است.

داد^۳ و همکاران [۱۳] تاثیر این فرایند را روی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ مورد بررسی قرار دادند که بهبود سختی و رفتار سایشی حاصل شد. الدجاج^۴ و همکاران [۴] با استفاده از این فرایند به بهبود رفتار سایشی و کاهش ضریب اصطکاک فولاد پرکربن دست یافتند. رهبر و همکاران [۱۴] توانستند مقاومت به سایش لایه‌ی اسپری شده روی فولاد ۵۲۱۰۰ را توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی بهبود بخشند.

با توجه به مطالعات انجام شده تا کنون هیچ گزارشی در مورد تاثیر عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی روی رفتار سایشی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ انجام نشده است. بنابراین در این مطالعه این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ [۱۵].

عنصر	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
درصد	۰/۰۸	۲۰	۱۰	۲	۱	۰/۰۴۵	۰/۰۳
وزنی		۱۸	۸				

فرایند سطحی اصطکاکی اغتشاشی توسط یک ابزار بدون پین به شکل دوزنقه با ضلع بزرگ ۱۲mm و ضلع کوچک ۴mm با عمق نفوذ شانه ۱mm و از جنس کاربید تنگستن انجام شد. برای انجام فرایند از یک دستگاه فرز عمودی با

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی پرکاربردترین و بزرگ‌ترین گروه فولادهای زنگ‌نزن هستند. این دسته از فولادها، مخصوصاً فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴، به دلیل خواص مفیدی مانند مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوب، قابلیت شکل‌گیری عالی و جوش‌پذیری قابل قبول در کاربردهای مهندسی بسیار مورد توجه هستند. با این حال، مقاومت به سایش پایین این دسته از فولادها باعث ایجاد محدودیت در استفاده برای برخی از کاربردها شده است [۱-۳]. برای این اساس در سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی جهت بهبود مقاومت به سایش این فولادها صورت گرفته است. به عنوان مثال پوشش دادن سطح با یک لایه‌ی TiN CrN، و غیره توسط روش‌هایی مثل PVD و CVD، عملیات مکانیکی مثل ساچمه‌پاشی و سخت کردن سطحی از جمله مهم‌ترین روش‌های استفاده شده برای بهبود رفتار تریبولوژیکی این فولادها بوده است [۴ و ۵]. قابل ذکر است که فولادهای زنگ‌نزن نمی‌توانند توسط عملیات حرارتی سخت شوند [۵].

فرایند سطحی اصطکاکی اغتشاشی^۱ یکی از روش‌های جدید بهبود خواص سطحی مواد است که براساس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۲ بنا شده و توسط میسرا و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۵ توسعه یافته است.

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت بهره گرفتن از این روش برای بهبود رفتار سایشی مواد مختلف صورت گرفته است. به عنوان مثال گزارش شده است که این فرایند باعث بهبود قابل ملاحظه‌ی مقاومت به سایشی آلیاژهای آلومینیوم [۷]، آلیاژهای مس [۸]، آلیاژهای منیزیم [۹] و فولادهای زنگ‌نزن [۴ و ۱۰-۱۴] شده است. با وجود این، تلاش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی فولادها بسیار محدود است که این

³ Dodds

⁴ Aldajah

¹ Friction Stir Processing

² Friction Stir Welding

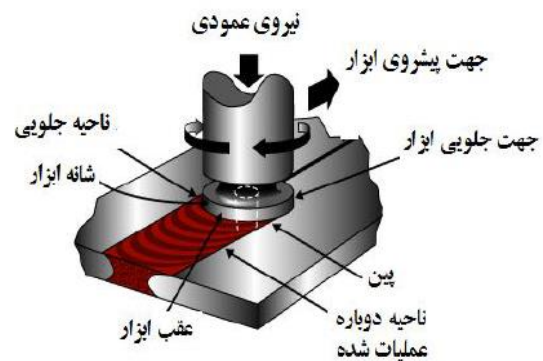
به منظور ارزیابی‌های ریزساختاری، پس از برش نمونه‌های تهیه شده عملیات متالوگرافی استاندارد انجام شد و سطح کاملاً صیقلی حاصل شد. نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های ۲۴۰۰-۸۰ سنباده‌زنی شدند. عملیات پولیش نیز با استفاده از پودر آلومینا انجام شد. پس از مراحل شست‌وشو و چربی-زدایی عملیات الکتروپولیش با استفاده از محلول نیتریک اسید ۶۵٪ در ولتاژ ۲ ولت به مدت ۱۰۰-۴۵ ثانیه انجام شد. با استفاده از تصاویر متالوگرافی و نرم افزار TSView اندازه ذرات تعیین شد. برای این منظور اندازه‌ی ۳۰ دانه تعیین شد و سپس اندازه دانه‌ی میانگین گزارش شد.

به منظور بررسی تاثیر فرایند روی رفتار سایشی فولاد آستنیتی ۳۰۴، از تست سایشی پین روی دیسک استفاده شد. برای مقایسه‌ی رفتار سایشی، مطابق استاندارد ASTM-G99 [۱۷]، پین‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر از هر دو نمونه‌ی ماده‌ی اولیه و از منطقه‌ی تحت فرایند فراوری شده بدون پین تهیه شد. دیسک‌های ساییده به قطر ۵ سانتی‌متر و از فولاد AISI 52100-100cr6 با سختی ۶۳HRC تهیه شدند. این دیسک‌ها قبل از استفاده مورد عملیات حرارتی در دمای ۹۵۰°C به مدت ۹۰min قرار گرفتند، سپس در روغن کوئنچ شدند. در نهایت سنگ‌زنی مغناطیسی بر روی آن‌ها انجام شد. آزمون سایش با استفاده از نیروی ۱۵ نیوتن انجام شد. برای به‌دست آوردن میزان کاهش وزن از ترازوی دقیق با دقت ± 0.0001 گرم استفاده شد. پس از طی مسافت‌های مشخص پین جدا شده، با استون شست‌وشو شد و سپس میزان کاهش وزن آن تعیین شد. آزمون سایش برای هر نمونه ۳ بار تکرار شده است. جدول ۳ مشخصات آزمون سایش پین روی دیسک انجام شده را نشان می‌دهد.

همچنین ریزساختار نمونه‌های سایشی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه شد.

توان بالا استفاده شد. پس از اتمام فرایند، عمق منطقه‌ی فراوری شده ۱/۱mm تعیین شد.

پارامترهای انجام این فرایند در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۱ شماتیکی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی و شکل ۲ نمونه‌ی فراوری شده را نشان می‌دهند.



شکل ۱. شماتیکی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی [۱۶].



شکل ۲. نمونه‌ی فراوری شده بدون پین.

جدول ۲. پارامترهای فرایند سطحی اصطکاکی اغتشاشی در این پژوهش.

پارامترهای فرایند	سرعت چرخش ابزار (rpm)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)
مقدار	۵۶۰	۵۰

نتایج و بحث

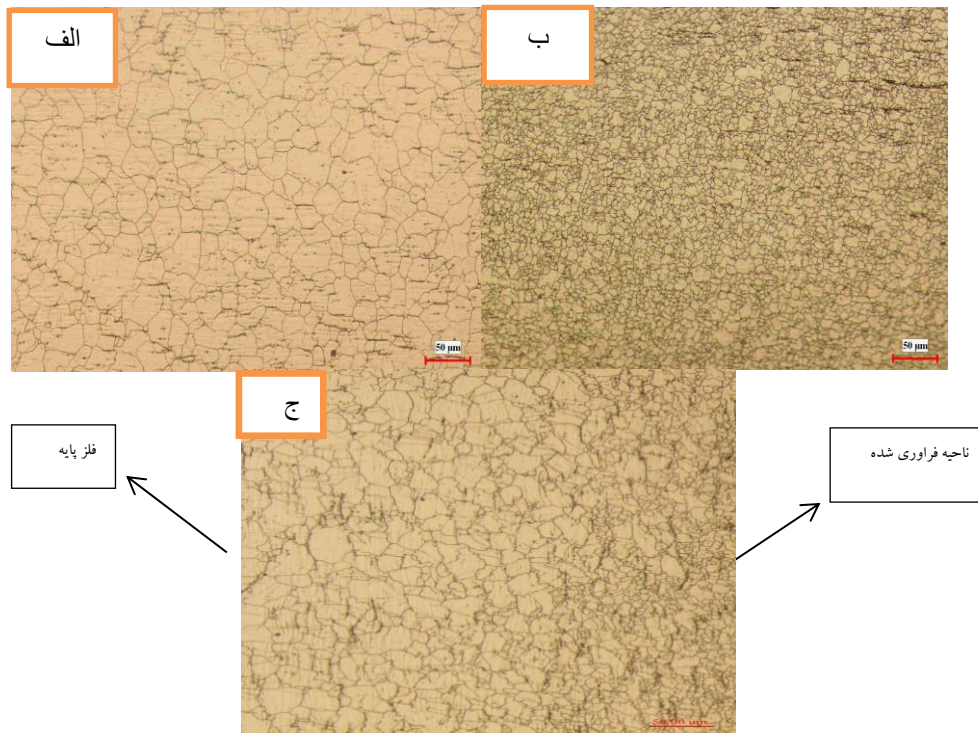
شکل ۳ ریزساختارهای مشاهده شده با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری در بزرگنمایی ۲۰۰ را نشان می‌دهد.

همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ اولیه شامل فاز آستنیت با دانه‌های هم‌محور (با اندازه دانه‌ی $93 \pm \mu\text{m}$) می‌باشد. فازی که به صورت خطوط تیره رنگ در شکل ۳ وجود دارد، فریت دلتای تشکیل شده در مراحل اولیه‌ی انجماد است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد ریزساختار فلز پایه حاوی دانه‌های درشت است، در حالی که نمونه‌ی فرآوری شده دانه‌های هم‌محور و ریزتری نسبت به فلز پایه دارد [۶ و ۱۸]. در اثر اعمال فرایند، اندازه دانه‌ها از $93 \pm \mu\text{m}$ در فلز پایه به $26 \pm \mu\text{m}$ در ناحیه‌ی اغتشاش کاهش یافته‌است.

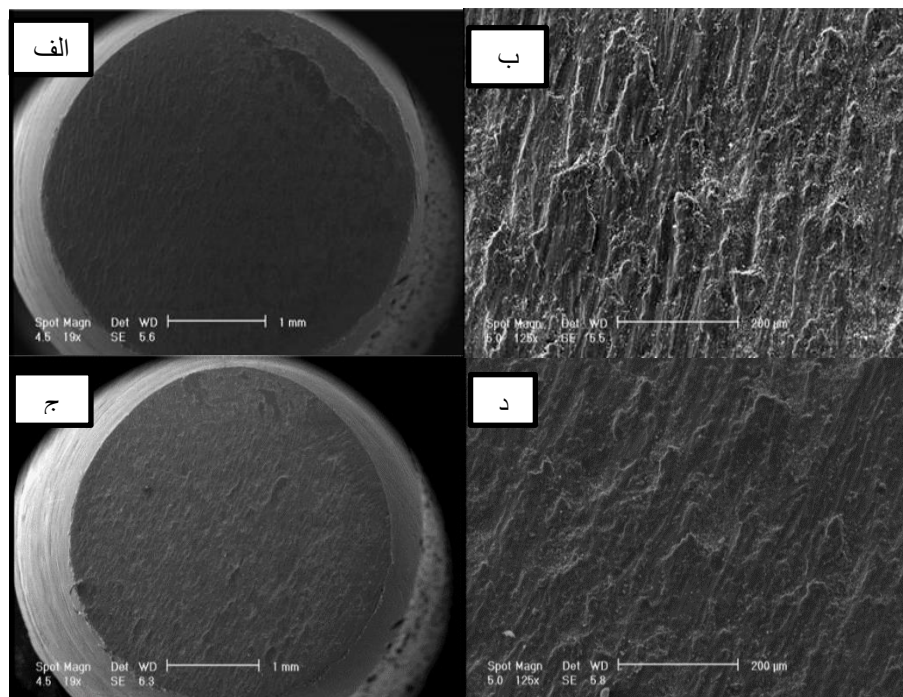
به منظور بررسی تغییر سختی پس از اعمال فرایند، سختی فلز پایه و نمونه‌ی فرآوری شده اندازه‌گیری شد. شکل ۸ متوسط سختی و شکل ۹ پروفیل ریزسختی نمونه‌ی فرآوری شده، از سطح به عمق، را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات آزمون سایش بین روی دیسک انجام شده.

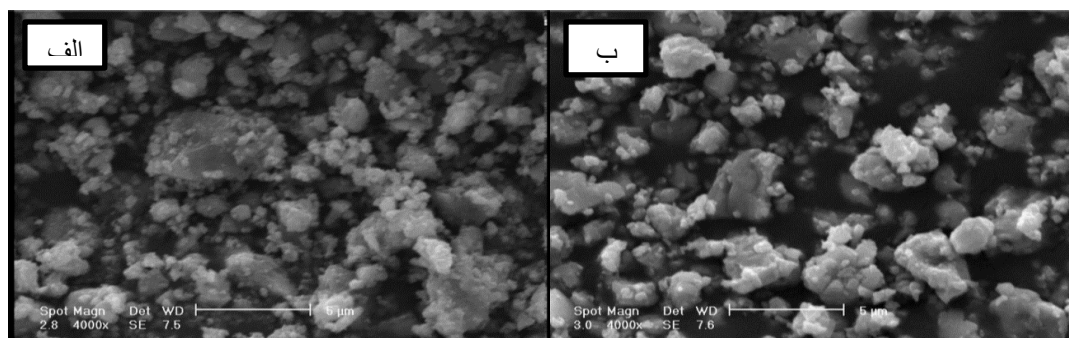
نوع آزمون سایش	بین روی دیسک
مشخصات بین	استوانه به قطر ۵ میلیمتر (سرکروی به قطر ۱۰ میلیمتر)
مشخصات دیسک	فولاد AISI 52100-100cr6 با سختی ۶۳HRC و به قطر ۵ سانتیمتر
کل مسافت طی شده	۱۰۰۰ متر
نیروی عمودی	۱۵ نیوتن



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختارهای (الف) فلز پایه، (ب) فرآوری شده بدون بین و (ج) دو ناحیه در کنار هم.



شکل ۴. تصاویر SEM از پین‌های سایشی: الف و ب) فلز پایه و ج و د) فراوری شده بدون پین.



شکل ۵. تصاویر SEM از ذرات حاصل از سایش: الف) فلز پایه و ب) فراوری شده بدون پین.

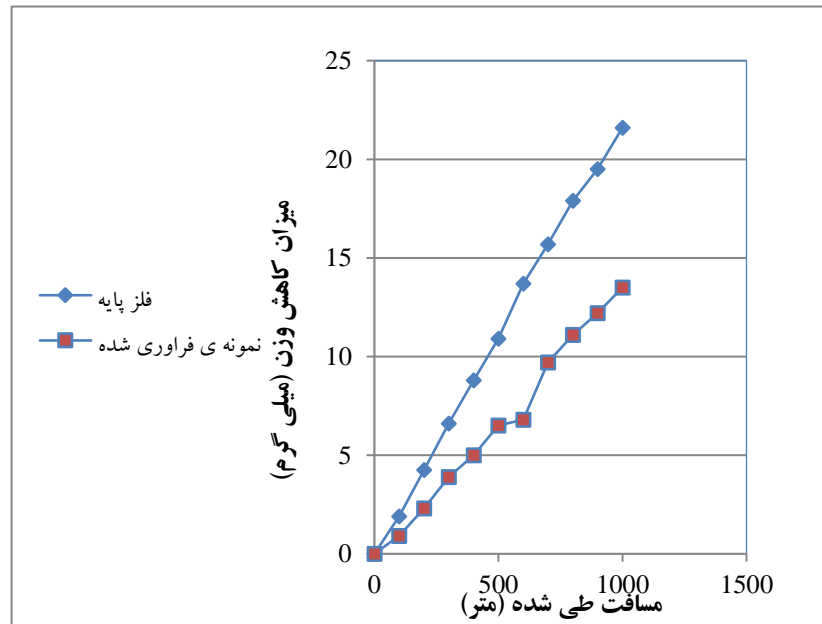
اصطکاک اغتشاشی، مکانیزم تشکیل دانه‌های جدید، فرایند تبلور مجدد دینامیکی معرفی شده است [۶ و ۹ و ۱۸ و ۱۹]. حاجیان و همکاران [۲۰] بیان کردند که فرایند اصطکاک اغتشاشی یک فرایند تبلور مجدد دینامیکی است که در آن دو عامل افزایش دما و افزایش نرخ کرنش برای حاصل شدن ریزساختار حاوی دانه‌های ریزتر یا درشت‌تر با هم رقابت می‌کنند. چرا که افزایش دما باعث درشت‌دانه شدن و افزایش نرخ کرنش منجر به ریزدانه‌گی می‌شوند. همچنین ریزساختار نمونه‌های سایشی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه شد که در

در طی انجام فرایند اصطکاک اغتشاشی، بین ابزار و قطعه کار اصطکاک شدیدی به وجود می‌آید. این اصطکاک باعث سیلان ماده می‌شود. در نتیجه‌ی این اصطکاک، دمای منطقه‌ی فراوری شده به شدت بالا می‌رود و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی رخ می‌دهد. تغییر شکل پلاستیک شدید و گرمای ناشی از اصطکاک در حین انجام فرایند منجر به ایجاد یک ناحیه‌ی تبلور مجدد دینامیکی یافته با دانه‌های ریز درون ناحیه‌ی اغتشاش می‌شود. دانه‌های هم‌محور و ریز عاری از تنش بیانگر بروز پدیده‌ی تبلور مجدد دینامیکی است. در حقیقت با توجه به نرخ کرنش و دمای بالا در حین فرایند

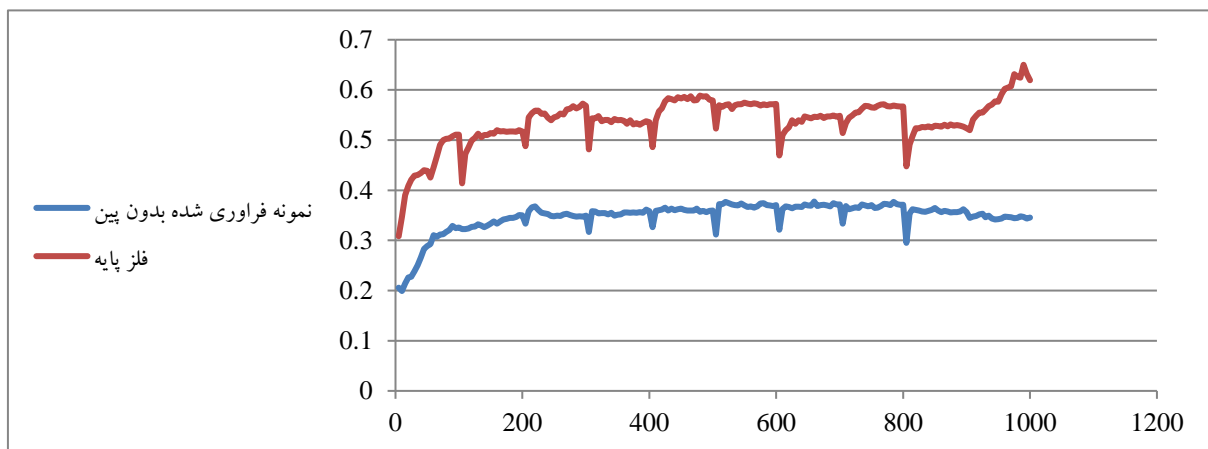
تصاویر SEM ذرات حاصل از این سایش در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ذرات حاصل از سایش تقریباً کروی شکل هستند که این ذرات در نمونه‌ی فراوری شده ریزتر از فلز پایه هستند [۱۹]. رفتار سایشی این نمونه‌ها در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که مکانیزم سایش برای هر دو نمونه مشابه و سایش خراشان است که شروع آن با خیش ریز بوده است. در این تصاویر دیده می‌شود که شدت کندگی‌ها در نمونه‌ی فراوری شده نسبت به فلز پایه کمتر بوده است که افزایش مقاومت به سایش با اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. با دقت در سطوح سایش، کشیدگی ماده در راستای سایش و وجود شیارهایی در این راستا را می‌توان مشاهده کرد.

مسافت طی شده (متر)	کاهش وزن (میلی گرم)	
	فلز پایه	نمونه‌ی فراوری شده
۰	۰	۰
۱۰۰	۱/۹	۰/۹
۲۰۰	۴/۲۵	۲/۳
۳۰۰	۶/۶	۳/۹
۴۰۰	۸/۸	۵
۵۰۰	۱۰/۹	۶/۵
۶۰۰	۱۳/۷	۶/۸
۷۰۰	۱۵/۷	۹/۷
۸۰۰	۱۷/۹	۱۱/۱
۹۰۰	۱۹/۵	۱۲/۲
۱۰۰۰	۲۱/۶	۱۳/۵



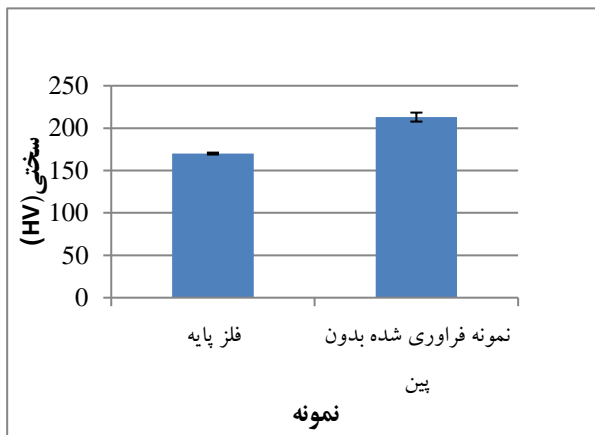
شکل ۶. دیاگرام رفتار سایشی نمونه‌ها.



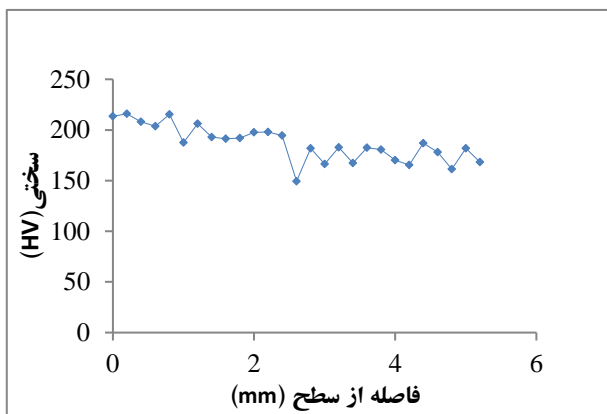
شکل ۷. نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده.

فرایند باعث همگن شدن ریزساختار می‌شود. همه‌ی موارد گفته شده باعث افزایش سختی می‌شود. افزایش سختی از تغییر شکل پلاستیک ذرات به‌خاطر نیروهای برشی ناشی از سایش ممانعت می‌کند و در نتیجه باعث کم شدن کاهش وزن می‌شود. که نتیجه‌ی آن افزایش مقاومت به سایش است [۱۳].

شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهند که سختی نمونه‌ی فراوری شده اندکی بیشتر از فلز پایه است. حداکثر مقدار سختی مربوط به ناحیه‌ی اغتشاش است که نتایج مشاهده شده در کارهای انجام شده توسط سایر محققین را تایید می‌کند [۱۸].



شکل ۸. نمودار سختی فلز پایه و نمونه‌ی فراوری شده (بر حسب ویکرز).



شکل ۹. نمودار ریزسختی نمونه‌ی فراوری شده از سطح به عمق (بر حسب ویکرز).

همان‌طور که نمودار کاهش وزن ناشی از سایش بر حسب مسافت طی شده (شکل ۶) نشان می‌دهد، کاهش وزن از فلز پایه به نمونه‌ی فراوری شده بدون بین کاهش می‌یابد. در این نمودار میزان کاهش وزن در حال افزایش است که علت آن این است که میزان کاهش وزن تجمعی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کاهش وزن کل برای فلز پایه ۲۱/۶ بوده که این مقدار برای نمونه‌ی فراوری شده بدون بین ۱۳/۵ می‌باشد. بنابراین میزان کاهش وزن برای نمونه‌ی فراوری شده بدون بین ۳۷/۵٪ کمتر از فلز پایه بوده است و همین کمتر بودن کاهش وزن بیانگر افزایش مقاومت به سایش است. افزایش مقاومت به سایش می‌تواند ناشی از افزایش سختی باشد. حضور دانه های ریز، هم محور و تبلور مجدد یافته ناشی از دمای بالا و تغییر فرم شدید پلاستیکی در ناحیه‌ی اغتشاش و دانسیته‌ی بالای مرزهای با زاویه‌ی کم در این ناحیه باعث سختی بالاتر نسبت به فلز پایه می‌شود [۲۱ و ۲۲]. شکل ۷ نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک در ابتدا در حال افزایش بوده و کم کم به یک مقدار ثابت می‌رسد. در این نمودارها نوساناتی مشاهده می‌شود که علت آن جدا شدن ذرات سایش از بین و دیسک و گاهی چسبیدن این ذرات به هم است. بر اساس این نمودارها میانگین ضریب اصطکاک برای فلز پایه حدود ۰/۶ و برای نمونه‌ی فراوری شده بدون بین حدود ۰/۳ می‌باشد. این یعنی ضریب اصطکاک کاهش یافته است. دلیل این موضوع هم افزایش سختی است.

شکل ۸، سختی متوسط فلز پایه و نمونه‌ی فراوری شده را نشان می‌دهد. طبق این شکل سختی فولاد ۳۰۴ پس از اعمال فرایند از 170 ± 11 HV به 213 ± 5 HV افزایش یافته است اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث اصلاح موضعی ریزساختار می‌شود و ساختار در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و تبلور مجدد دینامیکی ریزدانه می‌شود. نتیجه آن که مساحت مرزدانه‌های سطحی افزایش می‌یابد. همچنین این

نتیجه‌گیری

4. S.H. Aldajah, O.O. Ajayi, G.R. Fenske and S. David, *Effect of friction stir processing on the tribological performance of high carbon steel* *Wear*, 267(2009) 350–355.

5. R.Singh, *Applied welding engineering: processes, codes, and standards*, Elsevier Inc., 2012.

6. R.S. Mishra and Z.Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, *Materials Science and Engineering R*, 50(2005) 1-78.

7. S.A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, S. Soleymani and H Assadi., *Microstructure and tribological performance of an aluminium alloy basedn hybrid composite produced by friction stir processing*, *Materials and Design*, 32(2011) 2727–2733.

8. H. R. Akramifard, M. Shamanian, M. Sabbaghian and M. Esmailzadeh, *Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing*, *Materials and Design*, 54(2014)838-844

9. H. S. Arora, H. Singh and B. K. Dhindaw, *Wear behavior of a Mg alloy subjected to friction stir processing*, *Wear*, 303(2013)65-77.

10. M. Hajian, A. Abdollah-zadeh, S. S. Rezaei-Nejad, H. Assadi, S. M. M. Hadavi, K. Chung and M. Shokouhimehr, *Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel*, *Materials and Design*, 67(2015)82-94.

11. M. Mehranfar and K. Dehghani, *Producing super-austenitic steels by friction stir processing*, *Materials Science and Engineering A*, 528(2011)3404-3408.

12. J. D. Escobar, E. Velasquez, T. F. A. Santos, A. J. Ramirez and D. Lopez, *Improvement of cavitation erosion resistance of a duplex stainless steel through friction stir processing(FSP)*, *Wear*, 297(2013)998-1005.

13. S. Dodds, A.H. Jones and S. Cater, *Tribological enhancement of AISI 420*

در این پژوهش فرایند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخشی ۵۶۰ rpm و سرعت پیشروی ۵۰mm/min بر روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ انجام شد که نتایج زیر حاصل شد:

(۱) انجام این فرایند باعث اصلاح ریزساختار و ریز دانه شدن ریزساختار و همگن شدن آن شد. اندازه دانه‌ها از $93 \pm 3 \mu\text{m}$ در فلز پایه به $26 \pm 3 \mu\text{m}$ در ناحیه‌ی اغتشاش کاهش یافت.

(۲) سختی فولاد ۳۰۴ با اعمال این فرایند از $170 \pm 1 \text{HV}$ به $213 \pm 5 \text{HV}$ افزایش یافت.

(۳) در نتیجه‌ی انجام این فرایند مقاومت به سایش فولاد ۳۰۴ در نمونه‌ی فراوری شده نسبت به فلز پایه افزایش یافت.

(۴) ضریب اصطکاک فولاد ۳۰۴ در نمونه‌ی فراوری شده کمتر از فلز پایه بود.

مراجع

1. R. Nafar Dehsorkhi, S. Sabooni, F. Karimzadeh, A. Rezaeian and M.H. Enayati, *The effect of grain size and martensitic transformation on the wear behavior of AISI 304L stainless steel*, *Materials and Design*, 64(2014)56–62.

2. A. Andrews, T. G. Motsi and A. P. Olubambi, *Wear and corrosion behaviour of AISI 310 and AISI 316 stainless steels in synthetic mine water*, *Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.)*, 104 /11(2013)1114-1121.

3. Y.C. Chen, H. Fujii, T. Tsumura, Y. Kitagawa, K. Nakata, K. Ikeuchi, K. Matsubayashi, Y. Michishita, Y. Fujiya and J. Katoh, *Banded structure and its distribution in friction stir processing of 316L austenitic stainless steel*, *Nuclear Materials*, 420(2012)497–500.

martensitic stainless steel through friction-stir processing, Wear.

14. A. Rahbar-Kelishami, A. Abdollah-Zadeh, M. M. Hdavi, R. A. Seraj and A. P. Gerlich, *Improvement of wear resistance of sprayed layer on 52100 steel by friction stir processing*, Applied Surface Science, 316(2014)501-507.

۱۵. فتاح الحسینی آرش، ساعتچی احمد و محمدیان صمیم پرویز، فولادهای زنگ‌نزن خوردگی یکنواخت و خوردگی در دماهای بالا، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ۱۳۹۱.

۱۶. عطاپور مسعود، بررسی تاثیر عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول رینگر، علوم و مهندسی سطح، ۲۰ (۱۳۹۳) ۷۹-۸۸.

17. ASTM G 99-99a, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, 385.

18. Y. C. Chen, H. Fujii, T. Tsumura, Y. Kitagawa, K. Nakata, K. Ikeuchi, K. Matsubayashi, Y. Michishita, Y. Fujiya and J. Katoh, *Friction stir processing of 316L stainless steel plate*, Science and Technology of Welding and Joining, 14(2009) 197-201.

۱۹. انوری سیده راضیه، کریم‌زاده فتح الله، عنایتی محمد حسین و عباسی بهارانچی محسن، بررسی تغییرات ریزساختار و رفتار سایشی آلیاژ آلومینیوم AA6061-T6 در اثر اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی، ششمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران.

20. A.K. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian, *An assessment of microstructure, hardness, tensile and impact strength of friction stir welded ferritic stainless steel joints*, Materials and design, 31(2010) 4592-4600.

۲۱. سقایی محبوبه، کریم‌زاده فتح الله، عنایتی محمد حسین، مظاهری یوسف و تحویلان احمد، تغییرات ساختاری

منطقه جوش در طی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.

22. M. Hajian, A. Abdollah-zadeh, S.S. Rezaei-Nejad, H. Assadi, S.M.M. Hadavi, K. Chung, M. Shokouhimehr, *Improvement in cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel by friction stir processing*, Applied Surface Science 308 (2014) 184–192.