تاثیر فر آوری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی، تریبولوژیکی و مقاومت به خوردگی فولاد کم کربن

امین ربیعی زادہ*	استادیار، مهندسی مواد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
احمد افسرى	استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، دانشکده مهندسی، شیراز، ایران
اشکان بهمنی	فارغ التحصيل كارشناسي ارشد، گروه مهندسي مكانيك، گروه مهندسي مواد، واحد شيراز، دانشگاه آزاد اسلامي،
	شیراز، ایران
صديقه سهرابىزاده	فارغ التحصيل كارشناسي، گروه مهندسي مواد، گروه مهندسي مواد، واحد شيراز، دانشگاه آزاد اسلامي، شيراز، ايران

چکیدہ

در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص تریبولوژیکی، مکانیکی و خوردگی فولاد کم کربن AISI 1010 پرداخته شده است. فرآیند در سرعتهای چرخش متفاوتی از ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ دور بر دقیقه انجام شد و بهترین نتایج برای نمونه فرآوری شده با کمترین سرعت چرخش (۸۰۰ دور بر دقیقه) بدست آمد. با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی دانهبندی ساختار تحت مکانیزم تبلورمجدد دینامیک تا ابعاد ۲۵، میکرومتر ریز شد (اندازه دانه اولیه ۱۰ میکرومتر بوده است). همچنین استحکام کششی نمونههای فرآوری شده در شرایط بهینه فرآیند تا ۵۰ مگاپاسکال افزایش داشت. به همین ترتیب سختی نمونههای فرآوری شده بیش از ۲/۵ برابر فلز پایه افزایش داشت. با بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونهها در نتیجه فرآوری اصطکاکی – اغتشاشی، متعاقبا رفتار تریبولوژیکی شده بیش از ۲/۵ برابر فلز پایه افزایش داشت. با بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونهها در نتیجه فرآوری اصطکاکی – اغتشاشی، متعاقبا رفتار تریبولوژیکی بهبود پیدا کرده و نرخ سایش نمونهها حدودا ۲۸٪ کاهش یافته است. جهت بررسی خواص خوردگی نمونه ها آزمون خوردگی بر اساس استاندارد انجام شد. مشاهده گردید که اعمال فرآوری اصطکاکی – اغتشاشی تغییری در خواص خوردگی فولاد کم کربن ایجاد نمی کند.

Effects of Friction Stir Processing on Mechanical, Tribological and Corrosion Resistance of Low Carbon Steel

A. Rabiezadeh	Young Researchers and Elite Club, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
A. Afsari	Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
A. Bahmani	Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
S. Sohrabizadeh	Department of Materials Engineering, College of Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz Iran

Abstract

In the present work, the effect of friction stir processing (FSP) on tribological and mechanical properties as well as the corrosion resistance of a low carbon steel (AISI 1010 (CK10)) is studied. FSP was successfully applied with different rotating speeds of 800-1600 rpm. Optimum properties was gained for the sample which was processed with the minimum rotating speed of 800 rpm. Metallographic study of this sample showed that dynamic recrystallization has decreased the average grain size to about 0.5 μ m, while the initial value was ~10 μ m. The tensile strength of the optimal specimen increased for about 50 MPa. Also, the hardness of the processed samples was about 2.5 times that of the raw material. As the result of grain refinement and the improvement of mechanical properties, the tribological properties of the sample were also improved such that a 28% reduction in the wear rate was observed. Finally, corrosion tests (according to ASTM G5) showed that FSP has no considerable influence on the corrosion resistance of the studied steel.

Keywords: Friction stir processing, low-carbon steel, tribological properties, corrosion resistance, mechanical properties.

۱- مقدمه

به انواع مکانیزمهای سایش در سطح قطعات می شود. سایش اجزای ما شین منجر به افت قابلیت اطمینان و عمر آنها شده و تعویض دورهای و پیش از موعد آن را سبب می شود [۱]. برای عموم قطعات مهند سی، بدنه کشتیها، راه آهن و بسیاری از صنایع دیگر از فولاد کم کربن استفاده می شود. فولادها از خواص سیستمها و قطعاتی که دارای اجزای متحرک هستند، به نحوی که سطح اجزاء در تماس با یکدیگر بوده و دارای حرکت نسبی میبا شند، در معرض خسارات ناشی از اصطکاک هستند. دندهها، یاطاقانها، درز گیرها، و قطعات متحرک مختلف موتورها از این دسته میباشند. در این حالت، علاوه بر تلفات انرژی در نتیجه اصطکاک، تنشهای برشی منجر

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.rabiezadeh@gmail.com تاریخ دریافت: ۱۵/۱۵/۵۹ تاریخ پذیرش: ۷۰۱۲-۵۱

مغناطیسی بالا و قابلیت جوشکاری خوبی برخوردار بوده و در مواردی که قطعات تحت عملیات سختی سطحی قرار میگیرند کاربردهای متعددی دارند. سخت کاری سطحی به همراه روانکاری یکی از مهمترین روشهای کاهش اصطکاک و سایش قطعات است. روشهای متعددی به منظور سختکاری سطحی قطعات معمول است. در فولادها، که شاید مهمترین ماده تریبولوژیکی مورد استفاده در صنعت میباشند. سختکاری سطحی به روشهای متعدد عملیات حرارتی انجام میشود. از جمله این روشها میتوان به کربوره کردن، نیتروره کردن، سختکاری القایی، سختکاری سطحی به کمک لیزر، سختکاری سطحی به کمک دسته پرتو الکترونی و ... اشاره کرد [۲-۷]. انواع بیشماری از پوششهای لایه نازک سخت و پوششهای پاشش حرارتی نیز به منظور سختکاری سطحی و بهبود رفتار اصطکاکی و سایشی بر روی فولادها اعمال میشود [۸–۱۳]. تمامی روشهای سختکاری سطحیای که به آنها اشاره شد نیازمند انرژی یا هزینه بالایی هستند.

جوشکاری/ فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل موفقیت این روش به عنوان یک روش اتصال حالت جامد و بهبود ریز ساختار لایه سطحی مواد فلزی توسعه و کاربرد روزافزونی داشته است. آلیاژهای آلومینیم، منیزیم و تیتانیم به منظور کاربردهای مهندسی به صورت تجاری و انبوه با این روش جوش_کاری/ فرآوری می شوند [۱۴-۲۱]. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی دسته وسیعی از فلزات و آلیاژها انجام شده است، و تاثیر آن بر بهبود فرمی، مقاومت به خستگی، خوردگی و حذف عیوب سطحی ثابت شده است. بیشتر بررسیهای به عمل آمده در خصوص کاربرد فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به آلیاژهای با دمای ذوب پایین، نظیر آلومینیم، منیزیم و برنز، محدود می شود. با اید حال، بررسیهای بسیار محدودی در خصوص کاربرد این روش فرآوری بر روی فولادها انجام شده است. اغلب بررسیهای به عمل آمده بر روی فولادهای زنگ نزن و فولادهای ابزار به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی و افزایش عمر ابزار با ایجاد ساختار فوق ریزدانه بوده است [۱۶, ۱۷, ۲۷-۲۷]. پژوهشهای محدودی در راستای تولید ماده مرکب سطحی بر روی فولاد به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش نانو ذرات سرامیکی از قبیل Al₂O₃ و TiC نیز به عمل آمده است [۲۸, ۲۹]. اما تا کنون پژوهشیی در زمینه بهبود ریزساختار و خواص فولادهای کم کربن که کاربرد وسیعی در صنعت دارند گزارش نشده است.

در این پژوهش به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی فولاد کم کربن فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آن انجام شد. به منظور ارزیابی خواص نمونه تولید شده آزمونهای سختی، استحکام کششی و سایش انجام شد. همچنین مقاومت به خوردگی نمونهها بعد از انجام فرآیند به روش پلاریزاسیون خطی ارزیابی گردید.

۲- مبانی و روشها

در این پژوهش از فولاد کم کربن 10 CK به عنوان ماده اولیه استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. ابزار طراحی شده برای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از جنس کاربید تنگستن به قطر ۱۳۵۶ و طول ۹۰ mm و سختی HRC ۸۳ (تقریبا HV (ماریند برای سه سرعت ۲۰۰۸, ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه با سرعت

پیشروی ۸ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. زاویه ابزار ۳ درجه انتخاب شد. به منظور ارزیابی ریز ساختار نمونهها بعد از آماده سازی نمونهها تو سط محلول اسـید نیتریک ۷٪ اچ شـدند. از میکروسـکوپ نوری به منظور مطالعه ریز ساختاری استفاده شد. برای انجام آزمون سختی، نمونهها بر ۱ ساس ا ستاندارد ASTM E3 آماده سازی شده بر ا ساس ا ستاندارد نیروی اسـتفاده شـده ۱۰۰ گرم و مدت زمان بار گذاری ۱۵ ثانیه نیروی اسـتفاده شـده ۱۰۰ گرم و مدت زمان بار گذاری ۱۵ ثانیه میبا شد. آزمون کشش به منظور ارزیابی ا ستحکام کششی، بر ا ساس نیرو وارده در این آزمون ۱۰ نیوتون، سـرعت لغزش ۲/۰ متر بر ثانیه در مسافت ۱۰۰ متر و در دمای اتاق حدود ۲۴ درجه سانتیگراد انجام شد. نیرو وارده در این آزمون ۱۰ نیوتون، سـرعت لغزش ۲/۰ متر بر ثانیه در مسافت ۱۰۰ متر و در دمای اتاق حدود ۲۴ درجه سانتیگراد انجام شد. اسـتاندارد ASTM G9 ایریزاسـیون خطی بر اسـاس مسافت ۱۰۰ متر و در دمای اتاق حدود ۲۴ درجه سانتیگراد انجام شد. اسـتاندارد ASTM G9 ایریزاسـیون خطی بر اسـاس میافومت به خوردگی نمونهها به روش پلاریزاسـیون خطی بر اسـاس

۳- نتايج

بررسیهای میکروسیکپی نمونه اولیه نشان میدهد که ۹۵٪ ریزساختار فاز فریت و ۵٪ دیگر آن فاز پرلیت است (شکل ۱). دانهها در شت و نامنظم هستند بطوریکه اندازه دانهها به حدود ۷-۹ میکرومتر می رسد. با افزایش سرعت چرخش ابزار در سرعت پیشروی یک سان، حرارت ورودی به ناحیه تحت فرآوری بیشتر می شود. علاوه بر این با افزایش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی، نرخ کرنش اعمالی به قطعه افزایش می یا بد [۳۰]. در نتیجه در حین فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، ماده بطور همزمان دمای بالا و تغییر فرم پلاستیک شدید را تجربه می کند. بر اساس اصول کلی تبلور مجدد، افزایش دما منجر به رشد دانه و افزایش نرخ کرنش منجر به کاهش اندازه دانه می شود. بر این اساس، در فرآیندهایی نظیر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی که شرایط تبلور مجدد دینامیکی حاکم است، رقابت میان دو عامل دما و نرخ کرنش اندازه دانههای هممحور را کنترل میکند. لازم به ذکر است که فاکتور غالب در کنترل اندازه دانههای تبلور مجدد دینامیکی یافته در حين فرآوري اصطكاكي اغتشاشي، دما است. شكل ۲ ناحيه ها و ریزساختار قسمتهای مختلف ناحیه اغتشاشی را برای سرعتهای چرخش متفاوت ابزار نشان میدهد.

در جدول ۲ اندازه دانهها در قسمتهای مختلف ناحیه اغتشاشی و سرعتهای متفاوت چرخش ابزار گزارش شده است. با توجه به اصول تبلور مجدد و رشـد دانه انتظار می رود که افزایش سـرعت چرخش ابزار منجر به افزایش دمای اصطکاکی شده و لذا سبب ر شد بیشتر دانهها پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شـود. همانطور که در شـکل ۲ مشـاهده میشـود، اندازه دانه با افزایش سـرعت چرخش ابزار اندکی مشـاهده میشـود، اندازه دانه با افزایش اندازه دانه فولاد را با افزایش سرعت دورانی ابزار به افزایش دمای آسـتنیته با افزایش سـرعت ابزار نسـبت داد. رحمتی و همکارش بر اسـاس آزمایشهای تجربی دمای ناحیه اغتشاشی فولاد را بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد گزارش دادهاند [۳]. بر این اساس در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ناحیه اغتشاش تا محدوده آستنیت گرم می شود.

Ī	آهن	آلومينيوم	نيكل	موليبدن	كرم	سولفور	منگنز	كربن	نام عنصر
	99/477	•/•AY	•/•**	•/•٣١	۰/۰۶۱	•/••٢	۰/۲۱۶	•/•۵۵	میانگین درصد ترکیبات



شکل ۱- ریزساختار فولاد کم کربن CK 10



ميانه منطقه اغتشاش



۱۶۰۰ rpm ۸۰۰rpm فر آوری شده با سرعتهای مختلف در قسمتهای مختلف ناحیه اغتشاشی

اندازه دانه ها (میکرومتر)					
با سرعت ۱۶۰۰ rpm	با سرعت ۱۰۰۰ ۲pm	با سرعت ۸۰۰ rpm	منطقه اغتشاش		
۳ تا ۴	۳۲۲	۲ ت ۲	بالای منطقه		
۳ تا ۴	۲ تا ۳	۲ تا ۲	ميانه منطقه		
۳ تا ۴	۲ تا ۳	حدود ۵/۰	پایین منطقه		

جدول ۲- اندازه دانهها در ناحیه اغتشاشی در سرعتهای مختلف چرخش ابزار

در عین حال با افزایش سرعت دورانی دمای قطعه افزایش یافته و دماهای بالاتری در محدوده آستنیته را تجربه می کند. نمونههایی که با سرعت دورانی کمتر تولید می شوند دمای آستنیته کمتری را تجربه کرده و و لذا اندازه دانه کلی ساختار ریزتر دیده می شود. لازم به ذکر است که در ناحیه اغتشاش، ریز ساختارهای متعددی با اندازه دانه متفاوت مشاهده می شود و تمام قسمتهای ناحیه اغتشاشی دارای اندازه دانه یکسان نمی باشد. تفاوت در اندازه دانه در قسمتهای مختلف این ناحیه را می توان به تغییر فرم اعمال شده و سرعت سرد شدن نسبت داد [۱۸]. توزیع سختی نمونه ها در امتداد سطح مقطع، عمود بر مسیر فرآیند، اندازه گیری شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است.

در فولادها، افزایش دمای آ ستنیته شدن سبب افزایش اندازه دانه نهایی می شود [۳۳, ۳۳]. در پژوهش حاضر مشاهده می شود که با افزایش سر عت چرخش ابزار و افزایش حرارت ورودی، قطعه دمای آ ستنیته شدن بالاتری را تجربه می کند. بدین ترتیب انتظار می رود که با افزایش سرعت چرخش ابزار، اندازه دانه نهایی بزرگتر و لذا سختی

کمتر با شد. همانطور که انتظار می ود و در شکل ۳ مشاهده می شود، بیشترین سختی در کمترین سرعت چرخش ابزار به دست آمده است. بیشترین سختی ۴۳۴ HV است که در سمت پیشرو برای سرعت عبور ابزار mm/min ۸ گزارش شده است. در این حالت تنها با استفاده از یدیده تبلور مجدد دینامیک سختی در ناحیه اغتشاشے تا ۲/۵ برابر سيختى فلز پايه افزايش داشيته است. البته افزودن نانوذرات سيخت سرامیکی نظیر دیبوراید تیتانیم میتوان سختی قطعه را تا ۳/۵ برابر فلز پایه (HV-~>) افزایش داد [۳۴]. همچنین نتایج نشان میدهد تقریبا مقدار سختی در سمت را ست ناحیه اغتشاش ۳۰ تا ۵۰ ویکرز بیشتر از سمت چپ بوده و این اثر به این دلیل است که سمت را ست ناحیه پیش رونده بوده که دانهها در این قسمت ریز تر از دانهها در ناحیه پس رونده هســتند. انتظار میرود که با افزایش ریزسـختی، مساحت سطح تماس سایشی کاهش یافته و لذا نرخ سایش کاهش یابد [۱۶]. با توجه به افت خواص مكانيكي قطعه با افزايش سرعت چرخش ابزار، در بررسیهای بعدی سرعت چرخش ۱۶۰۰ rpm لحاظ نشده است.





شکل ۳- نمودار توزیع سختی نمونهها در سرعتهای فر آوری متفاوت

نمودار تنش- کرنش فلز پایه (فولاد کم کربن) و نمونههای فرآوری ا صطکاکی- اغتشا شی شده در سرعتهای چرخش ابزار ۲pm ۸۰۰ و ۱۰۰۰ rpm در شکل ۴ نشان داده شده است.

های فرآوری شده در مقایسه با فلز پایه از استحکام تسلیم و استحکام کششی بالاتر و ازدیاد طول کمتری برخوردار هستند.

> خواص کششی فلز پایه و نمونههای فرآوری ا صطکاکی اغتشا شی شده در جدول ۳ گزارش شده است. همانطور که مشاهده میشود نمونه



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش فولاد کم کربن و نمونههای فر آوری اصطکاکی اغتشاشی شده

استحکام شکست (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	نمونه
۱۷۱/۵۴	۳۳۹/۴	737/V	فولادکم کربن
۱۹۷/۸۵	۳۷۰/۲	292/4	نمونه FSP شده با سرعت ۸۰۰
197/1	3784/1	۲۷۹/۸	نمونه FSP شده با سرعت ۱۰۰۰

در تطابق با نتایج سختی سنجی، بهبود استحکام نمونههای فرآوری شده را میتوان به ساختار ریز دانه بدست آمده نسبت داد. در حقیقت، با کاهش اندازه دانه، مساحت مرزدانهها افزایش مییابد. مرزدانهها مانع از حرکت آزادانه نابجاییها میشوند. در نتیجه، افزایش مساحت مرزدانهها سبب افزایش استحکام میشود.

نتایج آزمون کشـش نشـان می دهد به طور کلی تنش تسلیم با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشـاشی نسبت به فولاد کم کربن افزایش یافته، ولی با افزایش سـر عت دورانی (افزایش حرارت ورودی) تنش کاهش می یابد. این موضوع به مطالعات ریز ساختاری بر می گردد. فولاد کم کربن با ۲۰۵۵ درصـد کربن در ناحیه فریتی و مقدار ناچیز پرلیتی می باشـد. با انجام فرایند اصطکاکی اغتشـاشی با سـرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه و سـرعت پیشـروی ۸ میلیمتر بر ثانیه در ریزسـاختار آن تغییر چندانی مشـاهده نمی شـود. تنها دانههای پرلیتی به دانههای ریزتری تقسـیم می شـوند و درصـد کم کاربیدهای تشـکیل شـده آن به طور

یکنواخت در شبکه فریتی توزیع می شود که سبب بالا رفتن استحکام تسلیم و استحکام نهایی و استحکام شکست می شود. اما با افزایش سرعت دورانی، حرارت ورودی افزایش یافته، و رشد دانه و افت خواص مکانیکی رخ می دهد.

نتایج آزمون سایش برای فلز پایه و نمونه های فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی شده در شکلهای ۵ تا ۸ و جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج نشان می دهد که ضریب ا صطکاک به دست آمده برای فولاد کم کربن CK10 حدود ۵/۲۰ بوده و با انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی روی این فولاد مقدار ضریب اصطکاک به ۲/۴۵ با سرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه می رسد. دلیل این کاهش این است که هرچه سطح نمونهها سخت تر شوند مقدار سایش کمتر و ضریب ا صطکاک کاهش می یابد. از آنجایی که بیشترین سختی برای نمونه با کمترین سرعت چرخش بدست آمده است، متناسب با آن کمترین ضریب ا صطکاک و



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در نمونه خام



شکل ۶- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در نمونه فر آوری شده با سرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۲- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در نمونه فر آوری شده با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۸- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در نمونه فر آوری شده با سرعت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه

سرعت مختلف	نا با د	ک نمونه ه	يب اصطكا	و ضر	سايش	۴- نرخ	جدول
------------	---------	-----------	----------	------	------	--------	------

ضريب اصطكاك	نرخ سایش	نمونه
	(ميليمترمكعب/نانومتر)	
• /۵۲	•/•• \	نمونه خام
• /۴۵	•/•••٧٢	نمونه فرآوری با سرعت۸۰۰
•/۴٩	۰/۰۰۰۸۵	نمونه فرآوری با سرعت۱۰۰۰
• /۵ •	•/•••	نمونه فرآوری با سرعت ۱۶۰۰

در شــکلهای ۹ و ۱۰ نتایج خوردگی نمونه خام و نمونههای فرآوری شده ارائه شده است. نتایج شامل دو نمودار پلاریزسیون خطی (نمودار پتانسیل خوردگی بر حسب چگالی جریان) و نمودار پتانسیل مدار باز(OCP) (نمودار پتانســیل مدار باز نمونه بر حســب زمان) می،اشد. در جدول ۵ اطلاعات نمودارهای خوردگی ارائه شده است.

نتایج نشان میدهد در سرعت ۸۰۰ دوربردقیقه، مقاومت به خوردگی افزایش یافته بطوریکه پتانسیل خوردگی از مقدار ۶۳۲/۰۰ به حدود ۲۰/۵۹۳۶- می رسد. فرآیند ا صطکاکی اغتشا شی بر مقاومت به

خوردگی فولاد کم کربن تاثیر چندانی ندارد زیرا ریزساختار این فولاد فریتی و مقدار اندکی پریت بوده و با اعمال فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی تغییر فازی خاصی در آن رخ نمیدهد در نتیجه تنها به مقدار کمی نرخ خوردگی افزایش می یابد که به علت ریزتر شدن دانههای فریتی و تبلور مجدد و تغییر شکلی که در آنها رخ میدهد می باشد.







OCP(v)	$ m i_{Corr}/cm^2$ (چگالی جریان)	V _{Corrosion} (v)	نمونهها
-•/۶۳۱۷	٣/٩٣۴× ^{۶–} ۱۰	-•/۶ ∧ ۹	نمونه خام
-•/۶۱۱۳	۵/۱۶× ^{۶-} ۱۰	-•/۶۵۹	نمونه فرآوری با سرعت ۸۰۰
-•/۵۹۳۶	۶/۳۶۶× ^{۶–} ۱ •	-•/۶۸Y	نمونه فرآوری با سرعت ۱۰۰۰

جدول ۵- داده های مهم در آزمون خوردگی نمونهها

۴- نتیجهگیری

در این پژوهش فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی بر روی فولاد کم کربن با استفاده از ابزاری از جنس تنگستن کاربید انجام شد.

 با انجام این فرآیند به روی فولاد کم کربن، به علت تغییر فرم پلاستیک شدید و حرارت بالای ناشی از اصطکاکی مابین ابزار و نمونه، ریز ساختاری دانه ریز بدست آمد. که در بهترین شرایط اندازه دانه ها از ۹ میکرومتر به حدود ۰/۵ میکرومتر تقلیل یافت.

- نتایج سختی نشان میدهد مقدار سختی به علت ریزتر شدن دانه ها تا حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ ویکرز افزایش یافته بطوریکه بیشترین مقدار آن در سرعت ۸۰۰ دور برابر ۴۳۴ ویکرز می باشد. در صورتی که در نمونه خام این مقدار ۱۵۵ ویکرز می باشد.

نتایج کشش نشان می دهد با انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
 استحکام تسلیم و تنش نهایی نمونه ها نسبت به نمونه خام افزایش
 یافته که این افزایش به حدود ۵۰ مگاپاسکال می سد.

۵- مراجع

- نتایج سایش نشان می دهد مقدار ضریب اصطکاک با این فرآیند از ۱/۵۲ در نمونه خام به ۱/۴۵ می رسد، زیرا با این فرآیند ماده سختتر شده و ضریب اصطکاک کاهش پیدا می کند.

- نتایج خوردگی نشان می دهد که به علت عدم تغییر فاز این فولاد و
 باقی ماندن در فاز فریتی، مقاومت به خوردگی تغییر چندانی نشان
 نمی دهد، و می توان گفت فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی به روی مقاومت
 به خوردگی فولاد CK10 تاثیر چندانی ندارد.

- درنهایت این چنین می توان گفت اگر فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی با همه شرایط ایدهآل انجام شود بطوریکه در قطعه عیب یا تخلخلی بوجود نیاید، این فرآیند سبب افزایش تمامی خواص تریبولوژیکی، مکانیکی، خوردگی می شود .در تحقیق حاضر بهترین نتیجه ها مربوط به نمونه با سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلیمتر بر دقیقه می،اشد.

[10] Li M., Han B., Wang Y., Song L. and Guo L., Investigation on laser cladding high-hardness nano-ceramic coating assisted by ultrasonic vibration processing, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 127, pp. 4596-4600, 2016.

[11] Liu H., Xu Q., Wang C. and Zhang X., Corrosion and wear behavior of Ni60CuMoW coatings fabricated by combination of laser cladding and mechanical vibration processing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 621, pp. 357-363, 2015.

[12] Luo F., Cockburn A., Sparkes M., Lupoi R., Chen Z.-j., ONeill W., *et al.*, Performance characterization of Ni60-WC coating on steel processed with supersonic laser deposition, *Defence Technology*, Vol. 11, pp. 35-47, 2015.

[13] Owens A. G., Brühl S., Simison S., Forsich C. and Heim D., Comparison of Tribological Properties of Stainless Steel with Hard and Soft DLC Coatings, *Procedia Materials Science*, Vol. 9, pp. 246-253, 2015.

[14] Gibson B. T., Lammlein D. H., Prater T. J., Longhurst W. R., Cox C. D., Ballun M. C., *et al.*, Friction stir welding: Process, automation, and control, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, pp. 56-73, 2014.

[15] Lohwasser D. and Chen Z., Friction stir welding, From basics to applications. New York: CRC Press, 2010.

[16] Tinubu O. O., Das S., Dutt A., J. E. Mogonye, V. Ageh, R. Xu, *et al.*, Friction stir processing of A-286 stainless steel: Microstructural evolution during wear, *Wear*, Vol. 356-357, pp. 94-100, 2016.

[17] Yasavol N. and Ramalho A., Wear properties of friction stir processed AISI D2 tool steel," *Tribology International*, Vol. 91, pp.77-183, 2015.

[18] Xue P., Ma Z. Y., Komizo Y. and Fujii H., Achieving ultrafine-grained ferrite structure in friction stir processed weld metal, *Materials Letters*, Vol. 162, pp. 161-164, 2016.

[19] Navazani M. and Dehghani K., Investigation of Microstructure and Hardness of Mg/TiC Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing (FSP), *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 509-514, 2015.

[1] Glaeser W. A., *Materials for Tribology*. New York: Elsevier, 1992.

[2] Kowser M. A. and Motalleb M. A., Effect of Quenching Medium on Hardness of Carburized Low Carbon Steel for Manufacturing of Spindle Used in Spinning Mill, *Procedia Engineering*, Vol. 105, pp. 814-820, 2015.

[3] Bartkowska A., Pertek A., Kulka M. and Klimek L., Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel," *Optics & Laser Technology*, vol. 74, pp. 145-157, 2015.

[4] Catteau S. D., Van Landeghem H. P., Teixeira J., Dulcy J., Dehmas M., Denis S., *et al.*, Carbon and nitrogen effects on microstructure and kinetics associated with bainitic transformation in a low-alloyed steel, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 658, pp. 832-838, 2016.

[5] Watanabe H., Arase S., Yamamoto T., Wells P., Onishi T. and Odette G. R., "Hardening and microstructural evolution of A533b steels irradiated with Fe ions and electrons," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 471, pp. 243-250, 2016.

[6] Bataev I. A., Golkovskii M. G., Losinskaya A. A., Bataev A. A., Popelyukh A. I., Hassel T., *et al.*, Non-vacuum electron-beam carburizing and surface hardening of mild steel, *Applied Surface Science*, Vol. 322, pp. 6-14, 2014.

[7] Bataev I. A., Golkovskii M. G., Bataev A. A., Losinskaya A. A., Dostovalov R .A., Popelyukh A. I., *et al.*, Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 242, pp. 164-169, 2014.

[8] Bolelli G., Berger L. M., Börner T., Koivuluoto H., Lusvarghi L., Lyphout C., *et al.*, Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 265, pp. 125-144, 2015.

[9] Jankauskas V., Antonov M., Varnauskas V., Skirkus R. and Goljandin D., Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix, *Wear*, vol. 328-329, pp. 378-390, 2015.

[20] Ratna Sunil B., Pradeep Kumar Reddy G., Mounika A. S. N., Navya Sree P., Rama Pinneswari P., Ambica I., *et al.*, Joining of AZ31 and AZ91 Mg alloys by friction stir welding, *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 3, pp. 330-334, 2015.

[21] Hussein S. A., Tahir A. S. M. and Hadzley A. B., Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review, *Materials Today Communications*, Vol. 5, pp. 32-49, 2015.

[22] Rezaei-Nejad S. S., Abdollah-zadeh A., Hajian M., Kargar F. and Seraj R., Formation of Nanostructure in AISI 316L Austenitic Stainless Steel by Friction Stir Processing, *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 397-402, 2015.

[23] Hajian M., Abdollah-zadeh A., Rezaei-Nejad S. S., Assadi H., Hadavi S. M. M., Chung K., et al., Improvement in cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel by friction stir processing, *Applied Surface Science*, Vol. 308, pp. 184-192, 2014.
[24] Hajian M., Abdollah-zadeh A., Rezaei-Nejad S. S., Assadi H., Hadavi S. M. M., Chung K., et al., Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L

stainless steel, *Materials & Design*, Vol. 67, pp. 82-94, 2015. [25] Mehranfar M. and Dehghani K., Producing nanostructured super-austenitic steels by friction stir processing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 3404-3408, 2011.

[26] Grewal H. S., Arora H. S., Singh H. and Agrawal A., Surface modification of hydroturbine steel using friction stir processing, *Applied Surface Science*, Vol. 268, pp. 547-555, 2013.

[27] Dodds S., Jones A. H. and Cater S., Tribological enhancement of AISI 420 martensitic stainless steel through friction-stir processing, *Wear*, Vol. 302, pp. 863-877, 2013.

[28] Ghasemi-kahrizsangi A., Kashani-Bozorg S. F. and Moshref-Javadi M., Effect of friction stir processing on the tribological performance of Steel/Al2O3 nanocomposites, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 276, pp. 507-515, 2015.

[29] Ghasemi-Kahrizsangi A. and Kashani-Bozorg S. F., Microstructure and mechanical properties of steel/TiC nanocomposite surface layer produced by friction stir processing, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 209, pp. 15-22, 2012.

[30] Mishra R. S. and Ma Z. Y., Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports,* Vol. 50, pp. 1-78, 2005.

[31] Darvazi A. R. and Iranmanesh M., Thermal modeling of friction stir welding of stainless steel 304L, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, pp. 1299-1307, 2014.

[32] Suski C. A. and Oliveira C. A. S., Effect of Austenitization Temperature on the Precipitation of Carbides in Quenched Low Carbon Boron Steel, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Vol. 2, pp. 79-87, 2013.

[33] Nagaoka T., Kimoto Y., Watanabe H., Fukusumi M., Morisada Y. and Fujii H., "Friction stir processing of a D2 tool steel layer fabricated by laser cladding," *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 224-229, 2015.

[34] Khademi A. R. and Afsari A., Fabrications of Surface Nanocomposite by Friction Stir Processing to Improve Mechanical and Microstructural Properties of Low Carbon Steel, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016.