

توزیع میکرو/نانوذرات ZrO_2 بر روی فولاد ST37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی و بررسی تأثیر آن بر ارتقاء خواص فولاد در برابر خوردگی

سید محمدحسین شریفی^۱، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی^{۲*}، یگانه داوودیگی^{۳*}

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

۲. شرکت گاز استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۵. هسته پژوهشی علوم و فناوری نانو و مواد پیشرفته، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir

مقاله‌ی علمی - پژوهشی

صفحه ۵۹ - ۶۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

این مقاله با انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی در حالت‌های مختلف بر روی فولاد St37 به بررسی تغییر خواص آن در برابر خوردگی پرداخته است. فرآیند اصطکاک اغتشاشی در ۴ حالت روی فولاد St37 انجام شد. حالت اول فرآیند با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm و بدون میکرو/نانو ذره، حالت دوم در سرعت دورانی ۵۶۰ rpm و با میکرو ذره ZrO_2 ، حالت سوم با سرعت دورانی ۵۶۰ rpm و با نانو ذره ZrO_2 و حالت چهارم با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm و با نانو ذره ZrO_2 صورت پذیرفت. سرعت خطی در کلیه نمونه‌ها ۱۰۰ mm/min بود. مقاومت در برابر خوردگی هر ۴ حالت با مقاومت در برابر خوردگی فولاد ST37 که هیچ فرآیندی بر روی آن انجام نشده بود (نمونه خام)؛ مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که نمونه تولید شده با فرآیند اصطکاک اغتشاشی همراه با نانو ذره ZrO_2 و سرعت دورانی ۹۰۰ rpm بیش‌ترین افزایش مقاومت در برابر خوردگی را دارد. نمونه‌های حاوی نانو ذره در هر دو سرعت دورانی ۵۶۰ rpm و ۹۰۰ rpm نسبت به نمونه‌ی خام، مقاومت در برابر خوردگی بیش‌تری داشتند. در نمونه‌ای که روی آن فرآیند به‌تنهایی و بدون حضور میکرو/نانو ذرات انجام شده بود و همچنین نمونه‌ای که از میکرو ذرات استفاده نموده بود؛ مقاومت در برابر خوردگی نسبت به فلز پایه کاهش یافت. افزایش سرعت دورانی فرآیند منجر به افزایش مقاومت در برابر خوردگی نمونه گردید.

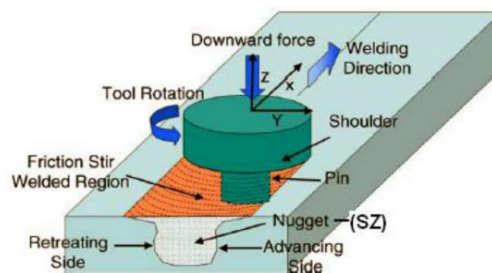
کلید واژه‌ها: فرآیند اصطکاک اغتشاشی، فولاد St37، مقاومت در برابر خوردگی، نانو ذره ZrO_2

۱. مقدمه

فولاد St 37 فولادی با استحکام بالاست که به‌طور گسترده در صنعت نفت، خطوط لوله و ... استفاده می‌شود. این آلیاژ متناسب با نوع کاربرد، مرتباً در معرض سرد و گرم شدن است. همچنین به دلیل کاهش مقاومت سطحی ماده در اثر خوردگی هیدروژنی، ماده به‌شدت در معرض پدیده جوانه‌زنی ترک ناشی از خوردگی است [۱]. در حین جوشکاری روی St 37، هیدروژن از ساختار مولکول آب آزاد شده و در منطقه ذوب نفوذ می‌کند. هر چند در این حالت انتشار هیدروژن امری اجتناب‌ناپذیر



است؛ اما با کنترل متغیرهای محیطی می‌توان آن را محدود نمود [۲]. جهت کنترل این متغیرها، روش‌هایی ارائه گردیده‌اند که از آن جمله می‌توان به فرآیند اصطکاک اغتشاشی^۱ اشاره نمود. این فرآیند از فرآیندهای حالت جامد است که به‌عنوان روشی جایگزین برای جوشکاری، به‌منظور اتصال مواد مختلف و همچنین ارتقا خواص ناحیه اتصال استفاده می‌شود [۳]. فرآیند اصطکاک اغتشاشی به کمک یک ابزار استوانه‌ای و یک شانه صورت می‌پذیرد که در مجموع پین^۲ نامیده می‌شوند. این پین ضمن نفوذ در درون ماده و دوران در محل خود، به‌صورت خطی نیز مسیرهایی را در روی ماده طی می‌کند. هم‌زمانی حرکت خطی و دورانی منجر به توزیع ذرات در سطح ماده و تغییر خواص فلز پایه می‌شود [۴]. فرآیند اصطکاک اغتشاشی را می‌توان بر روی یک فلز پایه جهت تغییر ریزساختار، خواص مکانیکی و متالورژیکی آن اجرا نمود. تصویری شماتیک از فرآیند FSP در (شکل ۱)، نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک از فرآیند FSP [۴]

اورفیلد FSP را روی فولاد آلیاژی AISI 4142 در شرایط خشک انجام داد [۵]. FSP توسط میشرها و همکاران [۶ و ۷]، برای اصلاح میکروساختار به کار گرفته شد. در این روش، یک پین، به‌منظور اصلاح ریزساختار ماده برای بهبود خواص مکانیکی-متالورژیکی، در بخشی از ماده وارد شده و ضمن حرکت دورانی، به‌صورت خطی نیز روی ماده حرکت می‌کند. تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در آلیاژ تجاری 7075Al از طریق FSP منجر به ارتقاء خواص مربوط به انعطاف‌پذیری ماده در نرخ کرنش بالا گردید [۶ و ۸]. روش FSP برای ساخت کامپوزیت سطحی روی آلومینیوم [۹]، کامپوزیت‌های زمینه فلزی و آلیاژهای آلومینیوم ریخته‌گری استفاده شد [۱۰ و ۱۱]. روش FSP در مقایسه با روش‌های موازی دارای مزیت‌هایی

است: (۱) FSP یک فرآیند حالت جامد با مسیر کوتاه و یک مرحله‌ای است که به پالایش ریزساختار ماده می‌پردازد. (۲) ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه پردازش شده را می‌توان با بهینه‌سازی طراحی ابزار، پارامترهای FSP و ... به‌دقت کنترل کرد. (۳) عمق ناحیه پردازش شده را می‌توان به‌صورت اختیاری با تغییر طول پین ابزار در حدود چند صد میکرومتر تنظیم کرد. (۴) FSP یک روش با کارایی بالا برای ساخت و پردازش مواد با خواص ارتقا یافته است. (۵) گرمای ایجاد شده در FSP از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک فلز پایه ناشی می‌شود. پس FSP یک روش سبز است. (۶) FSP شکل و اندازه اجزای پردازش شده را تغییر نمی‌دهد [۱۲-۲۴].

در تحقیقات دیگری تأثیر توزیع نانو ذره SiC بر روی تغییر خواص کامپوزیت آلومینیوم، مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵]. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش تعداد مسیره‌های^۳ اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی سختی سطحی ماده پایه ارتقا می‌یابد [۲۵]. از همین روی در تحقیقات دیگری، تأثیر استفاده از میکرو/نانو ذرات SiC بر روی تغییر خواص خوردگی کامپوزیت آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت که در آن مشخص گردید؛ توزیع میکرو/نانو ذره مذکور بر روی کامپوزیت آلومینیوم منجر به ارتقا خواص خوردگی فلز پایه گردید [۲۶]. در تحقیق دیگری استفاده از نانوذرات SiO₂ بر روی کامپوزیت آلومینیوم جهت ارتقاء خواص خوردگی مورد بحث و بررسی قرار گرفت که نتایج نشان از کاهش مقاومت در برابر خوردگی فلز پایه پس از انجام فرآیند داشت [۲۷]. در تحقیقات دیگری تأثیر استفاده از نانو ذره سیلیکون نیترا^۴ بر روی خواص خوردگی مس مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از ارتقاء خواص خوردگی مس پس از انجام فرآیند دارد [۲۸].

در این پژوهش سعی شده است تا توزیع نانو ذره و میکرو ذره ZrO₂ به کمک روش فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی فلز پایه فولاد St37 در سرعت‌های دورانی مختلف، مورد بررسی قرار گیرد و تأثیر انجام فرآیند در وهله اول به‌تنهایی بروی فلز پایه، در وهله دوم با حضور میکرو ذره ZrO₂ در یک سرعت دورانی خاص بر روی فلز پایه و در وهله سوم با حضور نانو ذره ZrO₂ در سرعت‌های دورانی مختلف روی فلز پایه مورد بررسی قرار گیرد و نتایج بررسی شوند که انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی به‌تنهایی یا با حضور میکرو/نانو ذرات

1. Friction Stir Processing: FSP
2. Pin
3. Pass Numbers
4. Silicon Nitride

در سرعت‌های دورانی مختلف چه تأثیری در ارتقاء خواص فلز پایه در برابر خوردگی داشته است. شایان ذکر است که مطابق با مطالعات پیشین انجام شده، پژوهش حاضر در ۳ جنبه دارای نوآوری است؛ الف) مقایسه تأثیر توزیع نانو ذره و میکرو ذره بر چگونگی تغییر خواص خوردگی فلز پایه پس از انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی که در مطالعات پیشین مقایسه‌ای بین عملکرد این دو مؤلفه صورت نپذیرفته است؛ ب) بررسی استفاده از نانو ذره ZrO_2 با استفاده از فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی تغییر خواص خوردگی فلز پایه که این مورد نیز جنبه نوآورانه دارد؛ پ) بررسی تغییر خواص خوردگی فلز پایه St37 پس از انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی که این مورد نیز طبق مطالعات پیشین جنبه نوآورانه دارد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. فولاد St 37

ابعاد ورق فولادی: یک ورق فولادی St37 با ابعاد ۲ متر طول، ۱ متر عرض و ۲ میلی‌متر ضخامت، از جنسی مشابه جنس به کار رفته در برخی لوله‌های صنعت نفت و گاز تهیه گردید. جهت‌های غلتشی و عرضی صفحه مشخص و خواص صفحه در طی تغییرات ریزساختاری با توجه به شرایط پردازش شناسایی و با دقت ثبت گردید. شناخت جهت عرضی مناسب در تشخیص جهت مناسب برای انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بسیار حائز اهمیت بود.

اضافه می‌گردد که کلیه هزینه‌های انجام شده در این پژوهش اعم از هزینه تهیه ورق، نانو/میکرو ذرات و آزمایش‌های بررسی خواص، با هزینه شخصی پژوهشگران مشارکت کننده در این مقاله تهیه گردیده است.

آزمایش آنالیز شیمیایی^۱: جهت آنالیز شیمیایی فلز پایه، یک نمونه ۲۵/۴ میلی‌متری در ۲۵/۴ میلی‌متری از فولاد فلز پایه، با استفاده از دستگاه برش سیمی^۲، برش داده شد. این نمونه جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه متالورژی جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف ارسال گردید تا ترکیب شیمیایی آن مشخص شود. نتیجه این آنالیز که معرف ترکیب تشکیل دهنده فولاد St 37 است؛ در (جدول ۱) آورده شده است.

نانو ذره ZrO_2 در این پژوهش به‌منظور ارتقاء خواص فلز پایه St37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی، از نانو ذره ZrO_2 (شرکت Merck، خلوص ۹۹/۹۵ درصد) با اندازه ذرات ۲۰

نانومتر و سطح ویژه ۶۰-۳۰ مترمربع بر گرم، استفاده شده است. میکرو ذره ZrO_2 : در این پژوهش به‌منظور ارتقاء خواص فلز پایه St37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی، از میکرو ذره ZrO_2 (شرکت Merck، خلوص ۹۹ درصد) با اندازه ذرات ۲ میکرون استفاده شده است.

دسته‌بندی نمونه‌ها: چون در این پژوهش مینا بر سنجش تأثیر اندازه ذره (میکرو یا نانو) توزیع شده در فلز پایه و سرعت دورانی انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر ارتقاء خواص فلز پایه بوده است؛ نمونه‌های آزمایشی متفاوتی طراحی گردیدند که هر یک برحسب شرایط آزمایش خود، کدگذاری شدند.

برای تهیه نمونه‌های مورد نظر، متناسب با شرایط، صفحه بزرگ فولادی اصلی به ۱۲ قسمت کوچک‌تر تقسیم شد. ۱۲ قطعه ایجاد شده دارای ابعاد ۱۲ سانتیمتر در ۲۰ سانتیمتر بودند و ضخامت کلیه قطعات ۲ میلی‌متر بود. چهار حالت مختلف برای اجرای روش فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی قطعات در نظر گرفته شد که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است: جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی تعیین ۳ پارامتر سرعت دورانی، سرعت خطی و اندازه دانه افزوده شده جهت ارتقاء خواص فلز پایه بسیار حائز اهمیت است و نقش اصلی و تعیین کننده در ارتقاء خواص را دارند. هر چه سرعت خطی انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بیش‌تر باشد؛ مقدار حرارت منتقل شده از طرف پین (نشان داده شده در (شکل ۱) به ناحیه تحت عملیات فلز پایه و همچنین زمان تماس پین و ناحیه تحت عملیات فلز پایه کاهش می‌یابد [۱۱]. کاهش حرارت انتقال یافته از پین به ناحیه عملیاتی و همچنین کاهش زمان تماس پین و ناحیه عملیاتی منجر به کاهش اثرات حرارتی فرآیند اصطکاک اغتشاشی می‌شود [۱۱]. بنابراین هر چه سرعت خطی انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بیش‌تر باشد؛ سطح انتقال حرارت بین ناحیه عملیاتی و پین کاهش بیش‌تری یافته و متعاقباً خواص ایجاد شده در فلز پایه پس از فرآیند اصطکاک اغتشاشی پایدارتر خواهد بود [۱۱]. با توجه به شرایط تجهیز استفاده شده در این پژوهش جهت اجرای فرآیند اصطکاک اغتشاشی (مقدار توان تجهیز و فشاری که می‌توانست بر پین اعمال نماید) سرعت انتقال خطی mm/min تقریباً سرعتی مناسب و بیشینه جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی محسوب می‌شد و به همین دلیل به‌عنوان سرعت انتقال خطی انجام فرآیند انتخاب گردید. جهت

1. Quantometry
2. Wire Cut



سنجش تأثیر تغییر سرعت دورانی فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی چگونگی تغییر خواص فلز پایه، آزمایش‌ها در دو سرعت دورانی مختلف تکرار گردیدند؛ یک سرعت دورانی متوسط (۵۶۰ rpm) و یک سرعت دورانی بالا (۹۰۰ rpm). علت استفاده از سرعت‌های فوق‌الذکر این بوده است که در تجهیز مورد استفاده جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی سرعت دورانی ۵۶۰ rpm یک سرعت میانی^۱ و سرعت دورانی ۹۰۰ rpm یک سرعت دورانی بالا^۲ محسوب می‌شد.

با توجه به عملکرد موفق نانو ذره ZrO_2 در مطالعات پیشین انجام شده و تأثیر آن در ارتقاء خواص فلزات دیگری همچون آلومینیوم [۱۲]، تصمیم گرفته شد تا میزان تأثیر این نانو ذره در ارتقاء خواص فولاد طی فرآیند اصطکاک اغتشاشی در این پژوهش مورد بررسی قرار گیرد. در مورد تکرار آزمایش‌ها توسط نانو ذرات و میکرو ذرات، هدف سنجش میزان تأثیر اندازه ذرات در ارتقاء خواص فلز پایه پس از انجام فرآیند بوده است؛ به همین سبب کلیه آزمایش‌ها هم برای نانو ذره ZrO_2 و هم برای میکرو ذره ZrO_2 تکرار گردید. در ادامه به چگونگی کدگذاری قطعات اشاره شده است.

بر روی سه نمونه اول، فرآیند FSP با سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min و بدون حضور نانو ذرات یا میکرو ذرات اجرا شد. بر روی سه نمونه دوم، فرآیند FSP با حضور میکرو ذرات ZrO_2 با سرعت چرخشی ۵۶۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min اجرا شد. بر روی سه نمونه سری سوم، فرآیند FSP با نانو ذرات ZrO_2 با سرعت چرخشی ۵۶۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min اجرا شد. بر روی سه نمونه سری چهارم، فرآیند FSP با نانو ذرات ZrO_2 با سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min اجرا شد. برای تمامی نمونه‌ها، خواص خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۲. فرآیند اصطکاک اغتشاشی

۲-۲-۱. آماده‌سازی نمونه

صافی سطح همه نمونه‌ها به روش‌های سندبلاست^۳ و ... مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت. سپس نمونه‌ها به‌اندازه ۱۲ سانتی‌متر در ۲۰ سانتی‌متر دسته‌بندی شدند و بر

روی همگی FSP خشک (بدون حضور آب و محیط مرطوب) اجرا شد. (جدول ۲)، کدهای نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

۲-۲-۲. فرآیند اصطکاک اغتشاشی

جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی، نمونه‌های آزمایش بر روی محل تعبیه شده در دستگاه اجرای فرآیند اصطکاک اغتشاشی، نشان داده شده در (شکل ۲-الف)، نصب شدند. پین تجهیز بر روی خط برش سیمی^۴ شده بر روی نمونه‌های آزمایش قرار گرفت و متناسب با شرایط مورد نظر (ذکر شده در جدول ۲)، با سرعت خطی و دورانی مورد نظر به تعداد ۱ مسیر^۵ بر روی خط برش حرکت نمود. پین مورد استفاده برای انجام FSP از جنس کاربید-تنگستن و به شکل استوانه بود که در (شکل ۲-ب)، نشان داده شده است. اضافه می‌گردد که جهت جانمایی سطحی نانو/میکرو ذرات در فلز پایه، نیاز بود که به کمک دستگاه برش سیمی شکاری در امتداد طول نمونه و به عمق ۲ میلی‌متر در سطح نمونه‌های آزمایش ایجاد گردد تا بتوان ذرات را به‌صورت همگن و در امتداد یک خط طولی در سطح نمونه جانمایی نمود. این شیار، خط برش نامیده می‌شود. FSP خشک در یک خط به طول ۱۴ سانتی‌متری در جهت عرضی غلتش انجام شد. نیروی بالادستی وارد شده به پین برابر ۳۵۰۰۰ پوند بود و پس از وارد شدن کامل پین به ۲۵۰۰۰ پوند کاهش یافت.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد ST 37

St 37	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
Magnitude	Base	0.131	0.0657	0.445	0.0092	0.0207	0.0278
St 37	Ni	Mo	Al	Co	Cu	Nb	Ti
Magnitude	0.0286	0.0023	0.0403	0.0045	0.0616	0.00072	
St 37	V	W	Pb	Sn	As	Zr	
Magnitude	0.0023	0.0049	0.0023	0.0043	0.0029	0.00054	

1. Mid-Range
2. High Range
3. Sandblast
4. Wire Cut
5. Pass

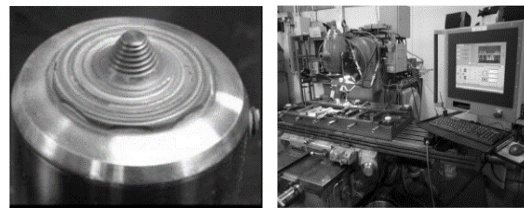
جدول ۲: جزئیات کدگذاری نمونه‌ها

Codes	Characteristics		
	Particle	Traverse Speed (mm/min)	Rotational Speed (rpm)
A-11	560	100	Nano
A-14	900	100	Nano
A-17	900	100	without
A-20	560	100	Micron

سیس با چکش، سیم در شیپار قرار گرفت. در مرحله بعد، نمونه‌ها در قالب تهیه شده از لوله پولیکا قرار داده شدند. آزمایش‌های الکتروشیمیایی در دمای اتاق برای هر نمونه در محلولی حاوی ۳/۵ درصد NaCl انجام شد. آزمایش تافل برای نمونه‌ها تکرار گردید. محدوده فرکانس ۵-۱۰ تا ۲-۲۰ هرتز با استفاده از دامنه ولتاژ AC سینوسی ۲۰ میلی ولت بود. سپس، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک^۲ در محدوده ۱/۲- تا ۰/۲- ولت با سرعت اسکن ۰/۲۵ میلی ولت بر ثانیه انجام شد.

۲-۴. اندازه دانه

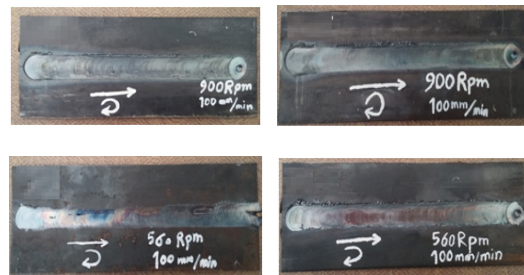
به فراخور موضوع و نیاز اساسی به وجود آنالیز در تحلیل‌ها صرفاً به ارائه ریزساختار و تصاویر متالوگرافی به دست آمده از بهترین نمونه تحت آزمایش یعنی A-14 در مقایسه با نمونه حاصل از فلز پایه پرداخته شده است که در (شکل ۴)، به آن اشاره شده است.



الف ب

شکل ۲: الف) ماشین اجرای فرآیند اصطکاک اغتشاشی، ب) پین Carbide-tungsten FSP threaded

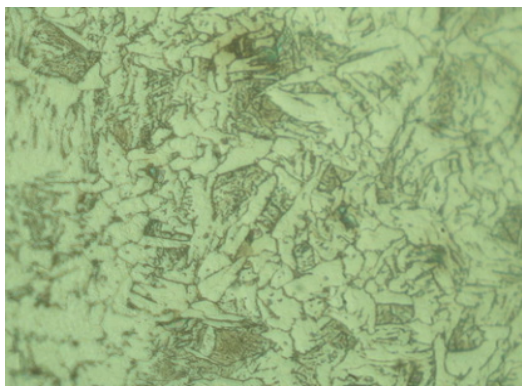
نمونه‌های به کار رفته در هر چهار حالت ذکر شده در بخش ۱-۲، پس از انجام FSP در (شکل ۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳: چهار نمونه پس از انجام فرآیند FSP

۲-۳. آزمایش خوردگی

به منظور انجام آزمایش‌های خوردگی در ابتدا نمونه‌ای با ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}^2$ برش داده شد و با استفاده از صفحات SiC و پودرهای پولیش^۱، سمباده زدنی بر روی آن صورت پذیرفت. در مرحله دوم، در یک سمت آن یک شیپار ایجاد شد. در مرحله سوم، سیمی روی شیپار گذاشته شد و



الف) A-17



ب) A-17

شکل ۴: تصاویر حاصل از متالوگرافی؛ الف) نمونه فلز پایه؛ ب) نمونه ارتقاء یافته به کمک نانو ذره و سرعت دورانی ۹۰۰ rpm

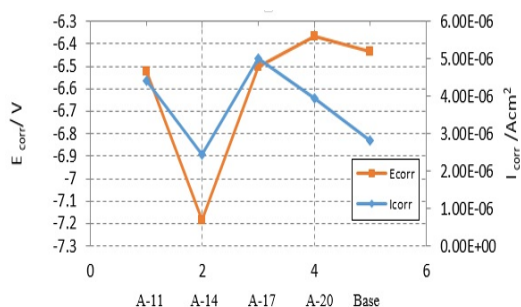
1. Polish
2. Potentiodynamic Polarization



جدول ۳: داده‌های به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

Sample	E _{corr} /V	I _{corr} /A cm ⁻²	β _a /V dec ⁻¹
A-11	-6.523	4.404×10 ⁻⁶	0.097
A-14	-7.183	2.44×10 ⁻⁶	0.058
A-17	-6.502	5.02×10 ⁻⁶	0.061
A-20	-6.366	3.93×10 ⁻⁶	0.047
Base	-6.435	2.818×10 ⁻⁶	0.032

Sample	β _c /V dec ⁻¹	R _p /ohm	V _{corr} /mm y ⁻¹
A-11	0.042	4.04×10 ²	6.54×10 ⁻³
A-14	0.047	4.844×10 ²	3.629×10 ⁻³
A-17	0.036	1.917×10 ²	7.448×10 ⁻³
A-20	0.037	1.893×10 ²	5.842×10 ⁻³
Base	0.048	2.336×10 ²	4.184×10 ⁻³



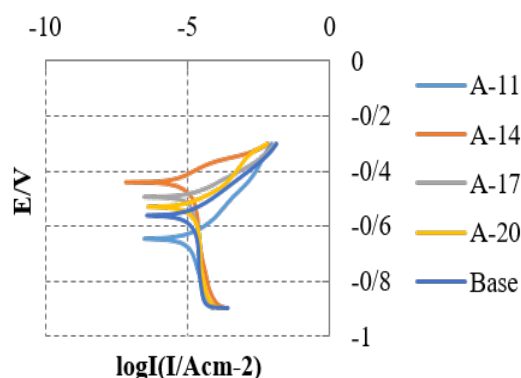
شکل ۶: جریان و پتانسیل خوردگی به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون

همان‌طور که در نتایج نشان داده شده در (جدول ۳)، آمده است؛ به‌دست آوردن مقاومت ماده از تحلیل نتایج آزمایش‌های تافل و پلاریزاسیون، معیار بسیار مناسبی در سنجش رفتار ماده در برابر خوردگی می‌باشد. با توجه به اعداد نشان داده شده در (جدول ۳)، ذیل ستون مقاومت با نماد R_p/ohm، مشاهده می‌شود که فلز پایه (بدون اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی و نانو ذره) دارای مقاومتی برابر ۱۰۲×۲،۳۳۶ می‌باشد که با انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی آن بدون افزودن ذره (A-17) و همچنین با افزودن میکرو ذره (A-20) مقدار این مقاومت به دلیل افزایش سطح مرز دانه‌ها کاهش می‌یابد؛ اما با به‌کارگیری نانو ذرات

همان‌طور که در (شکل ۴) مشخص است؛ در نمونه A-14، دانه‌ها به‌مراتب ریزتر و همگن‌تر شده‌اند و فضاهای خالی بین‌ذره‌ای جهت تجمع آلودگی و ذرات اضافی به‌مراتب کم‌تر شده است.

۳. نتایج

معمولاً یکی از آزمایش‌هایی که منجر به تشخیص نرخ خوردگی و ارزیابی مشخصات آن می‌شود؛ آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک می‌باشند. در (شکل ۵)، به منحنی‌های پلاریزاسیون برای نمونه‌های مختلف آزمایش شده در این پژوهش اشاره شده است. جریان و پتانسیل خوردگی استخراج شده از نمودارهای پلاریزاسیون نیز در (شکل ۶) نشان داده شده‌اند. دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی با استفاده از شیب تافل به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون و سرعت‌های خوردگی در (جدول ۳) و در (شکل ۶) ارائه شده‌اند. با توجه به مقاومت‌های به دست آمده از آزمایش‌های پتانسیودینامیک که معرف مقدار مقاومت نمونه‌های مختلف در برابر خوردگی می‌باشند و با نماد R_p/ohm در (جدول ۳)، نشان داده شده‌اند؛ می‌توان مقیاس مناسبی جهت سنجش میزان مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌ها ارائه داد. تحلیل نمودارهای نشان داده شده در (شکل ۵)، (شکل ۶) و (جدول ۳)، نشان می‌دهند که مقاومت نمونه A-14، از سایر نمونه‌ها بیش‌تر بوده که این موضوع خود نشانه مقاومت بیش‌تر نمونه A-14 در برابر خوردگی می‌باشد.



شکل ۵: منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه‌های مختلف

با سرعت‌های دورانی ۵۶۰ rpm و ۹۰۰ rpm، (نمونه‌های A-11 و A-14) مقدار مقاومت نمونه مورد نظر نسبت به فلز پایه افزایش می‌یابد. علت این افزایش مقاومت، همگن شدن شدید اندازه دانه‌ها، کوچک‌تر شدن آن‌ها و کاهش فضاهای خالی بین ذره‌ای می‌باشد. این فضای بین دانه‌ای بهترین محل جهت تجمع ذرات زائد می‌باشد. به عبارت دیگر این فضاهای خالی موجود که محل تجمع ذرات نامطلوب است به شدت به افزایش جذب آب و اکسیژن در ماده کمک می‌نماید. حال با ریزتر شدن اندازه دانه‌ها، افزایش تعداد دانه‌ها و همگن‌تر شدن اندازه آن‌ها، فضای کم‌تری جهت تجمع ذرات زائد و متعاقباً محل کم‌تری برای جذب آب و اکسیژن وجود دارد که همین موضوع به شدت بر روی مقاومت ماده در برابر خوردگی تأثیر مثبت دارد. بدین ترتیب بیش‌ترین مقدار افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی پس از اعمال شرایط نمونه‌های A-11 و A-14 می‌باشد که قطعاً شدت ریزتر شدن دانه‌ها، افزایش دانه‌ها، همگن‌تر شدن اندازه دانه‌ها و کاهش فضای خالی بین ذرات در نمونه A-14 کامل‌تر بوده و متعاقباً این نمونه میزان مقاومت بیش‌تری را در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

با کاهش اندازه دانه‌ها، مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد؛ بنابراین انرژی روی مرز دانه‌ها بیش‌تر شده و سطح تماس بیش‌تری به وجود می‌آید. افزایش انرژی روی مرز دانه‌ها منجر به همگن‌تر شدن ریزساختار ماده می‌شود. به عبارت دیگر اندازه دانه‌ها به هم نزدیک‌تر شده، شکل دانه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر شده و فضا برای قرارگیری آلودگی، ذرات جانبی و متعاقباً آب و اکسیژن در ریزساختار ماده کم‌تر می‌شود. این همگن شدن، بیش‌تر شدن انرژی روی مرز دانه و بیش‌تر شدن سطح تماس ماده، نتیجه معکوس در روند خوردگی ماده دارد؛ به عبارتی منجر به کاهش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. ضمن کاهش مقاومت ماده در برابر خوردگی به دلیل افزایش سطح تماس، اثری دیگر منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. این اثر در حقیقت همان کاهش شدید فضای خالی بین ذرات ریز اتمی در ساختار ماده پس از اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی ماده می‌باشد. در حقیقت ماده پس از اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی در حضور نانوذره ZrO_2 و با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm تحت تأثیر یک اثر دوگانه در برابر خوردگی قرار دارد که غلبه اثر افزایشی (از بین رفتن محل‌های خالی بین اتمی که محل تجمع آلودگی‌ها؛ ذرات

جانبی و متعاقباً آب و اکسیژن می‌باشد) بر اثر کاهش (اثر افزایش سطح مرز دانه)، در مجموع منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. در واقع اثر افزایش سطح تماس در افزایش خوردگی و اثر کاهش فضای خالی بین ذرات در افزایش مقاومت در برابر خوردگی، عملکردی معکوس در قبال یکدیگر دارند؛ با این احتساب که اثر کاهش فضای خالی بین ذرات در نمونه A-14، بر اثر اول غلبه کرده و همین موضوع منجر به افزایش کلی مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. به عبارت دیگر، تأثیر فرآیند اصطکاک اغتشاشی مطابق با اثر Zenner منجر به افزایش مرز دانه، همگن‌تر شدن ریزساختار، افزایش سطح تماس ماده و کاهش فضای خالی بین ذره‌ای می‌شود. حال هر چه اندازه دانه مورد استفاده کوچک‌تر باشد؛ موارد مذکور در فوق افزایش بیش‌تری را تجربه خواهند کرد. به عبارتی استفاده از نانوذرات ZrO_2 نسبت به میکرو ذرات ZrO_2 تأثیر بیش‌تری در تغییر خواص دارند. افزایش سرعت دورانی نیز منجر به افزایش موارد مذکور می‌شود. پس انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی با استفاده از نانو ذره و در سرعت دورانی بالاتر طبق اثر Zenner منجر به افزایش انرژی روی مرز دانه، متعاقباً همگن‌تر شدن ریزساختار ماده، افزایش سطح تماس ماده و کاهش بیش‌تر فضای خالی بین اتمی در ریزساختار می‌شود و در نهایت منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌گردد. از این روی با توجه به دلایل گفته شده، در ظاهر انتظار می‌رود که نمونه A-14 به دلیل افزایش سطح تماس و مرز دانه‌ها، نمونه ضعیفی در برابر خوردگی باشد اما در واقع، بیش‌ترین مقاومت در برابر خوردگی متعلق به همین نمونه است.

مراجع:

- [1]. K. Masubuchi and D. C. Martin, "Mechanisms of Cracking in HY-80 Steel Weldments," *Welding Journal*, vol. 41, pp. 37-38, 1962.
- [2]. J. H. Nixon, "Underwater Repair Technology," Amsterdam, Netherlands, *Acta Metallurgica*, vol. 19, pp. 108, 2000.
- [3]. L. N. Overfield, "Feasibility of Underwater Friction Stir Welding of Hardenable Alloy Steel," M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, pp: 42-48, September 2012.



- Modification of Cast Aluminum Alloys via Friction Stir Processing,” *Material Science Forum*, vols. 426–432, vol. 31, pp. 91–96, 2003.
- [12]. M. Afzali, and V. Asghari, “Study of the effect of nano ZrO₂ and TiO₂ and rotation speed on friction behavior of rotary friction welding of HIPS and PP,” *Functional Composites and Structures*, vol. 4, pp. 1-13, 2022.
- [13]. C.J. Lee, J.C. Huang, and P.J. Hsieh, “Irradiation Damage in Proton Irradiated Pd-Cr Alloys,” *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 15–20, 2006.
- [14]. Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, and M. Fukusumi, “On the Crystal Structure and Stability of the T1 Precipitates in Aged Al-Li-Cu Alloys,” *Materials and Science Engineering*, vol. A419, pp. 44–48, 2006.
- [15]. Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, and M. Fukusumi, “Strengthening Mechanisms Associated with T1 Particles in Two Al-Li-Cu Alloys,” *Materials and Science Engineering*, vol. A433, pp. 50–54, 2006.
- [16]. M. Dixit, J.W. Newkirk, and R.S. Mishra, “Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of A Cast-Magnesium-Rare Earth Alloy,” *Scripta Materialia*, vol. 56, pp. 41–44, 2007.
- [17]. S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, “Friction Stir Welding and Processing,” *Scripta Materialia*, vol. 51, pp. 37–41, 2004.
- [18]. Z.Y. Ma, S. R. Sharma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, “High Strain Rate Superplasticity in a Friction Stir Processed 7075 Al Alloy,” *Metallurgical Material Transaction*, vol. 37A, pp. 23–36, 2006.
- [4]. A. Thangarasu, N. Murugan, I. Dinaharan, and S. J. Vijay, “Influence of Traverse Speed on Microstructure and Mechanical Properties of AA6082-TiC Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing,” *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 2115-2121, 2014.
- [5]. R. S. Mishra, “Friction Stir Welding and Processing,” *Materials Science Engineering*, vol. 50, pp. 1, 2005.
- [6]. R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, and A.K. Mukherjee, “Nitriding Thermochemical Treatment and Niobium Dual Effect on Nano Crystallization of FeSiBCu Ribbons,” *Scripta Materialia*, vol. 42, pp. 63–68, 2000.
- [7]. R.S. Mishra and M.W. Mahoney, “Time-evolution of Heat Affected Zone (HAZ) of Friction Stir Welds of AA7075-T651,” *Material Science Forum*, vol. 35, pp. 7–12, 2001.
- [8]. P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, and M.W. Mahoney, “Influence of Texture on Mechanical Behavior of Friction-stir-processed Magnesium Alloy,” *Scripta Materialia*, vol. 44, pp. 61–66, 2001.
- [9]. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, and I. Charit, “Effect of Friction Stir Processing on Fatigue Behavior of an Investment Cast Al-7Si-0.6 Mg Alloy,” *Material Science and Engineering*, vol. A341, pp. 7–10, 2002.
- [10]. J. C. Huang and G. T. Gray, “Serrated Flow and Negative Rate Sensitivity in Al-Li Base Alloys,” *Scripta Metallurgica and Materialia*, vol. 24, pp. 85-90, 1990.
- [11]. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, “Microstructural



of stir cast Al7075-2% SiC micro- and nanocomposites by friction stir processing,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 30, pp. 1-13, 2017.

- [27]. Y. Mazaheri, A. Heidarpour, M. M. Jalilvand, and M. Roknin, “Effect of Friction Stir Processing on the Microhardness, Wear and Corrosion Behavior of Al6061 and Al6061/SiO₂ Nanocomposites,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, pp. 4826-4837, 2019.
- [28]. R. Raja, S. Jannet, J. Aby, and D. S. Ebenezer, J. Dhas, “Study of the mechanical, wear and corrosion behaviour of silicon nitride nanoparticles reinforced copper surface composite through friction stir processing,” *Engineering Research Express*, vol. 4, pp. 1-9, 2022.
- [19]. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, and R.S. Mishra, “Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite,” *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 23–26, 2006.
- [20]. K. Oh-ishi and T.R. McNelley, “Microstructural evolution by continuous recrystallization in a superplastic Al-Mg alloy,” *Metallurgical and Materials Transaction, A*, vol. 35A, pp. 51–61, 2004.
- [21]. A.H. Feng and Z.Y. Ma, “Microstructure and Strain Hardening of A Friction Stir Welded High-Strength Al-Zn-Mg Alloy,” *Scripta Materialia*, vol. 56, pp. 39–40, 2007.
- [22]. C.J. Hsu, P.W. Kao, and N.J. Ho, “Intermetallic-reinforced Aluminum Matrix Composites Produced in Situ by Friction Stir Processing,” *Scripta Materialia*, vol. 53, pp. 41–45, 2005.
- [23]. C.H. Chuang, J.C. Huang, and P.J. Hsieh, “High Strain Rate Super plasticity of Mg Based Composites Fabricated by Friction Stir Processing,” *Scripta Materialia*, vol. 53, pp. 55–60, 2005.
- [24]. C.J. Hsu, C.Y. Chang, P.W. Kao, N.J. Ho, and C.P. Chang, “Microstructural Evolution in Commercial Purity Aluminum During High-pressure Torsion,” *Acta Materialia*, vol. 54, pp. 41–49, 2006.
- [25]. H. Mehdi, and R. S. Mishra, “Effect of multi-pass friction stir processing and SiC nanoparticles on microstructure and mechanical properties of AA6082-T6,” *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 3, pp. 39-71, 2021.
- [26]. A. Kumar, K. Pal, and S. Mula, “Simultaneous improvement of mechanical strength, ductility and corrosion resistance



Nano/Micro ZrO₂ Particles Dispersion on St37 Steel by Using Friction Stir Processing and Investigating Its Effect on Steel Corrosion Resistance Promotion

Seyed Mohammad Hossein Sharifi¹, Armin Sabetghadam-Isfahani^{2,3}, Yegane Davoodbeygi^{4,5}

1. Mechanical Engineering Department, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
2. Hormozgan Province Gas Company, Bandar Abbas, Iran
3. Mechanical Engineering Faculty, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
4. Assistant Professor of Department of Chemical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
5. Nanoscience, Nanotechnology and Advanced Materials Research Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 09 May 2023

Revised: 03 June 2023

Accepted: 21 July 2023

Keywords:

Friction stir processing

St 37

Corrosion Resistance

ZrO₂ nanoparticle

ABSTRACT

In this paper, the effect of Friction Stir Processing (FSP) on the enhancement of St37 properties against corrosion has been investigated. The FSP was carried out in 4 modes on St37: The first state of the process was done with a rotational speed of 900 rpm and without micro/Nano particles, the second state was done at a rotational speed of 560 rpm and with ZrO₂ micro particles, the third state was done with a rotational speed of 560 rpm and with ZrO₂ nanoparticles and the fourth state was done with a rotational speed of 900 rpm and with ZrO₂ nanoparticles. The traverse speed in all samples was 100 mm/min. Corrosion resistance of all 4 prepared samples was compared with the one in St37 steel Base Metal (which FSP had not been done on it). The results showed that the sample produced by FSP with ZrO₂ nanoparticles and rotational speed of 900 rpm has the highest increase in corrosion resistance. All Nano dispersed samples showed more corrosion resistance than the Base Metal. The two samples, the FSPed one without any particle and the FSPed one with micro particles, showed less corrosion resistance in comparison to the one in Base Metal. Increasing the rotational speed of the process led to an increase in the corrosion resistance of the sample.

DOR: [20.1001.1.25885251.1402.10.1.4.8](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1402.10.1.4.8)

How to cite this article

S.M. Hossein Sharifi, A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, Nano/Micro ZrO₂ Particles Dispersion on St37 Steel by Using Friction Stir Processing and Investigating Its Effect on Steel Corrosion Resistance Promotion. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 2023; 10(1): 59 -68. (https://www.ijge.irangi.org/article_707973.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir, (Y. Davoodbeygi).

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

