

# تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ ادر محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم

آرش فتاح الحسینی، مجتبی وکیلی ازغندی

دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی

جمال الدین بزن

دانشگاه آزاد بندر عباس، گروه مهندسی مواد و متالورژی

( دریافت مقاله : ۹۴/۰۹/۰۶ - پذیرش مقاله : ۹۵/۰۷/۲۸ )

## چکیده

در این تحقیق، از تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت اتصال ورق های آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ استفاده شده است و با تغییر پارامترهای جوشکاری شامل سرعت چرخش و سرعت پیشروی پین، رفتار خوردگی ناحیه جوش در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور جوشکاری در سرعت چرخش های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و با سرعت پیشروی های ۱۴ و ۵۶ میلیمتر در دقیقه انجام شد و از تست های مختلف الکتروشیمیایی شامل پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی جهت مطالعه رفتار خوردگی ناحیه جوش و مقایسه آن با فلز پایه استفاده شد. نتایج آزمون های الکتروشیمیایی نشان دادند که بهترین رفتار خوردگی در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۶ میلی متر بر دقیقه حاصل می شود، بطوری که برابر نتایج XRD در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه بهترین شرایط برای تبلور مجدد فراهم شده و افزایش بیشتر سرعت چرخش بین باعث رشد دانه های منطقه جوش تحت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شده است و همین امر باعث کاهش مقاومت به خوردگی در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه شده است. بررسی میکروسختی ناحیه اصطکاکی اغتشاشی نیز حاکی از افزایش سختی ناحیه جوش با افزایش سرعت پیشروی پین و از طرفی افزایش سختی با افزایش سرعت چرخش تا ۵۰۰ دور بر دقیقه بوده است. واژه های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم، خوردگی الکتروشیمیایی، ریزساختار.

## The Effect of Pin Traveling Speed in Friction Stir Welding on the Corrosion Behavior of Pure Copper in 3.5 wt %NaCl Solution

Arash Fattah-alhosseini, Mojtaba Vakili-azghandi

Department of Materials Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

Jamaluddin Bezan

Department of Materials Engineering, Azad University, Bandar abbas

(Received 27 Nov 2016, accepted 19 Oct 2016)

### Abstract

In this study, the effect of Friction Stir Welding (FSW) on the corrosion behavior of 1050 aluminium alloy in 3.5 wt.% NaCl solution was investigated. Is so doing, 1050 aluminium alloy was welded with the rotational speed of 250, 500 and 1000 rpm and traveling speeds of 14 and 56 mm per minute. The microstructure of 1050 aluminium alloy and welded 1050 aluminium alloy was examined by X-ray diffraction. Corrosion behavior of the samples was evaluated in 3.5 wt.% NaCl solution using Tafel polarization tests and electrochemical impedance spectroscopy. The results showed that Friction Stir Welding (FSW) decreases the grain size of 1050 aluminium alloy and improve the corrosion resistance of stir zone. X-ray diffraction pattern was similar for 1050 aluminium alloy and welded samples indicating the absence of unwanted phases in the structure. Given the curves of Tafel polarization and the results from modeling through electrical equivalent circuit expressed that for 1050 aluminium alloy welded by FSW with pin travelling speed equal to 56 mm per minute with rotating speed equal to 500 rpm, the most polarization resistance was obtained and it has also shown the least hardness in the hardness test compared to the other samples.

**Keywords:** Friction stir welding, Aluminium alloy, Electrochemical corrosion behavior, Microstructure.

**E-mail of corresponding author:** Mojtaba.vakili6@gmail.com

## مقدمه

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) توسط میشرها و همکارانش به عنوان فرآیندی برای اصلاح ریزساختار فلزات بر پایه اصول اولیه جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی (FSW) بنا شده است. اساس و پارامترهای این دو فرآیند مشابه هم هستند. همچنین از نظر تغییرات ریزساختاری و خواص ماده تفاوتی بین دو روش وجود ندارد. فرآیند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های بسیار خوبی داشته و به دلیل راندمان انرژی بالا و تطبیق‌پذیری با محیط به تکنولوژی سبز معروف شده است. در مقایسه با دیگر روش‌های متداول، انرژی کمتری را مصرف می‌کند و هیچ پوشش گاز محافظ یا خلأ در آن به کار نمی‌رود [۱،۲].

در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک ابزار که متشکل از پین و شانه است با سرعت دورانی مشخصی به صورت زاویه‌دار نسبت به خط عمود بر سطح قطعه کار وارد قطعه می‌گردد. حرکت پین به داخل قطعه تا زمان تماس سطح شانه با سطح قطعه ادامه می‌یابد. به منظور فراهم آوردن حرارت لازم برای ایجاد حالت خمیری در سطح قطعه کار، علاوه بر اصطکاکی، احتیاج به نیرو نیز است که این نیرو با نفوذ سطح شانه به داخل قطعه کار ایجاد می‌گردد. این مقدار نفوذ به صورت تجربی برای هر آلیاژ تعیین می‌گردد. پس از رسیدن درجه حرارت قطعه کار به مقدار لازم برای پیدایش حالت خمیری، ابزار کار با حرکت خطی شروع به حرکت در داخل قطعه می‌نماید. در اثر این حرکت خطی و دورانی مواد در اطراف پین شروع به حرکت می‌نمایند و در پشت پین متوقف می‌گردند. در اثر این حرکت دو عملیات اکستروژن و فورج بر روی مواد اتفاق می‌افتد. در فرآیند FSP علاوه بر این که جنس مواد مورد نظر بر کیفیت فرآیند انجام شده تأثیر می‌گذارد عوامل دیگری همچون هندسه ابزار کار و نیز پارامترهای جوش شامل سرعت دورانی و سرعت خطی نیز تأثیر ویژه‌ای در این کیفیت دارند. سرعت دورانی ( $\omega$ ) و سرعت خطی ( $v$ ) عواملی

هستند که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. حرکت چرخشی باعث اختلاط مواد و حرکت خطی باعث حرکت مواد به عقب می‌شود. سرعت دورانی بر ایجاد حرارت و سرعت خطی در نرخ گسترش دما در قطعه تأثیر می‌گذارد. هرچه سرعت دورانی بالاتر باشد حرارت ایجاد شده در قطعه بیشتر خواهد بود. کرنش حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش انرژی کرنشی در منطقه جوش در غالب تکثیر عیوب نقطه‌ای، خطی و صفحه‌ای شده و از طرفی تولید گرما طی همین فرآیند می‌تواند سبب حذف برخی عیوب با مکانیزم‌های تنش‌گیری، بازیابی و تبلور مجدد شود. بنابراین پارامترهایی چون سرعت چرخش و سرعت پیشروی پین بعنوان پارامترهای تعیین‌کننده میزان کرنش و حرارت ایجاد شده در نواحی مختلف جوش می‌تواند بر ریزساختار و در نتیجه خواص مختلفی مانند خوردگی و سختی تأثیر بسزایی بگذارند [۱-۵].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اثرات متفاوتی بر خواص خوردگی منطقه جوش دارد که این تفاوت در تأثیر وابسته به جنس فلزات تحت جوشکاری، پارامترهای جوشکاری و نوع اتصال است. این فرآیند در اغلب آلیاژهای باعث بهبود در توزیع یکنواخت ذرات فاز ثانویه شده که خود سبب بهبود مقاومت به خوردگی بویژه خوردگی حفره‌ای می‌شود، بطوری‌که برابر تحقیقات سورخا و همکارانش مقاومت به خوردگی آلومینیوم ۲۲۱۹ بعلت شکسته شدن و حل شدن ترکیبات بین فلزی پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بهبود می‌یابد [۶]. فاندا و همکارانش نیز نشان دادند که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ باعث پراکنده‌سازی فاز  $\beta$  و در نتیجه بهبود رفتار خوردگی می‌شود [۷]. از طرفی افزایش دانسیته مرز دانه طی فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید سبب بهبود استحکام لایه پسیو در آلیاژهایی که قابلیت پسیو شدن دارند و همچنین کاهش خوردگی مرز دانه‌ای می‌شود، بطوری‌که فتاح الحسینی و همکارانش با نورد

اعمال شد و از هر کدام مناطق جوشکاری شده در شرایط مختلف جوش نمونه هایی جدا شده و پس از سمباده زنی و پرداخت جهت انجام تست های خوردگی، میکروسختی و میکروساختاری آماده شدند.

به منظور انجام آزمون های سختی سنجی ویکرز از دستگاه بهلر با شدت بارگذاری به میزان ۵۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه استفاده شد. همچنین تخمین اندازه دانه نمونه ها نیز بعلاوه فوق ریزدانه شدن ساختار با روش آنالیز XRD صورت پذیرفت که به این منظور دستگاه APD2000 و پرتو  $CuK\alpha$  مورد بهره برداری قرار گرفت. ولتاژ و آمپر دستگاه به ترتیب برابر ۴۰ کیلو ولت و ۳۰ میلی آمپر بود و جهت تحلیل و تعیین اندازه دانه از نرم افزار Xpert رابطه ویلیامسون هال بر اساس محاسبه پهنای پیک پراش اشعه ایکس استفاده شد.

برای بررسی رفتار خوردگی، از مرکز هر نمونه مربعی به ابعاد  $30 \times 30$  میلی متر بریده و از سطح با عملیات سنباده زنی ضخامت ۱ میلی متر برداشته شد تا بررسی رفتار خوردگی از متاثرترین نقاط هسته جوش انجام شود. سپس عملیات سنباده زنی تر و چربی زدایی انجام و نمونه ها با آب دوبار تقطیر شسته شد و پس از خشک کردن با دمش هوا، به سرعت نمونه ها در سل تخت به منظور انجام آزمون های خوردگی قرار گرفتند. در سل استاندارد سه الکترودی، الکترود پلاتین به عنوان الکترود کمکی و الکترود نقره/کلرید نقره به عنوان الکترود مرجع قرار گرفتند. برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی خوردگی، از محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم استفاده شد و هر نمونه جهت پایداری پتانسیل الکترود کاری در محلول خوردگی به مدت زمان ۵۴۰۰ ثانیه قبل از انجام هر آزمون در این محلول غوطه ور شد. سپس آزمون های پلاریزاسیون تافل (با نرخ رویش ۲ میلی ولت بر ثانیه) و همچنین طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (در دامنه ۱۰ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز) انجام شدند. برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی، از

تجمعی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ تحت فرآیند خوردگی جمععی به رفتار خوردگی و پسیو شدگی بهتری دسترسی پیدا کردند [۸]. همچنین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با تکمیل فرآیند تبلور مجدد تنش های پسماند را کاهش داده و سبب کاهش تمرکز خوردگی می شود، بطوری که لامسدن و همکارانش با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و در نتیجه ایجاد ریز ساختار ریزدانه و بدون عیب، باعث بهبود رفتار خوردگی آن شده اند [۹].

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم با استفاده از آزمون های پتانسیل مدار باز، پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی است. همچنین برای بررسی تأثیر این نوع جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش بترتیب از پراش پرتو ایکس و سنجش میکروسختی سطح نواحی جوش استفاده شد.

#### مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، قطعات آلومینیوم خالص با ابعاد ۱۰۰ میلی متر  $\times$  ۵۰ میلی متر از ورقی به ضخامت ۳ میلی متر بریده شدند. سپس عملیات پرداخت کاری با استفاده سنباده تا شماره ۱۲۰۰ روی قطعات برش خورده انجام شد. نمونه های آماده شده برای انجام جوشکاری درون قالب مخصوص که روی صفحه دستگاه فرز نصب شده بود، بصورت لب به لب قرار داده شد. پس از محکم کردن دو ورق روی قالب جوشکاری عملیات جوشکاری انجام شد. زاویه پین با صفحه جوش ۳ درجه و جهت چرخش بصورت راستگرد انتخاب شد و جهت جوشکاری از ابزاری از جنس فولاد گرم کار سختکاری شده با قطر شولدر ۱۶۰ و قطر و ارتفاع پین به ترتیب ۶ و ۲ میلی متر استفاده شد. پارامترهای قابل کنترل شامل سرعت چرخش پین ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی پین ۱۴ و ۵۶ میلی متر بر دقیقه بوده جهت جوشکاری

پلاستیک شدید و در نتیجه ریز شدن کریستال‌ها تا زیر ۱ میکرومتر شده است که خود تغییر بسیار زیادی در کاهش اندازه کریستال محسوب می‌شود و از طرفی با افزایش سرعت دوران از ۲۵۰ به ۵۰۰ دور بر دقیقه در سرعت پیشروی ثابت، میانگین اندازه کریستال کاهش بیشتری یافته که این امر حاکی از ایجاد گرمای مناسب ناشی از فرآیند اصطکاکی و اغتشاش در این سرعت دوران بوده تا در نتیجه آن ساختار کرنش یافته انرژی خود را در قالب تبلور مجدد و یا بازیابی توسعه یافته کاهش داده و در نتیجه آن دانه‌ها کوچکتر شوند. همچنین قابل مشاهده است که با افزایش سرعت دوران به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در سرعت پیشروی ثابت میانگین اندازه کریستال افزایش یافته است که این امر می‌تواند حاکی از پدیده رشد دانه‌ها در اثر گرمای زیاد ایجاد شده در سرعت چرخش‌های بالا باشد [۷، ۱۰-۱۲].

$$\beta \cos \theta = \frac{0.9\lambda}{d} + 2A \sin \theta \quad (1)$$

جدول ۱. تخمین اندازه دانه نمونه های جوشکاری شده در شرایط مختلف و نمونه آئیل شده برابر رابطه ویلیامسون-هال.

شرایط نمونه	اندازه کریستال
آئیل شده	۳/۵ μm
۲۵۰rpm ۵۶mm/min	۵۷۷ nm
۵۰۰rpm ۵۶mm/min	۳۸۵ nm
۱۰۰۰rpm ۵۶mm/min	۴۴۷ nm

### بررسی های سختی سنجی

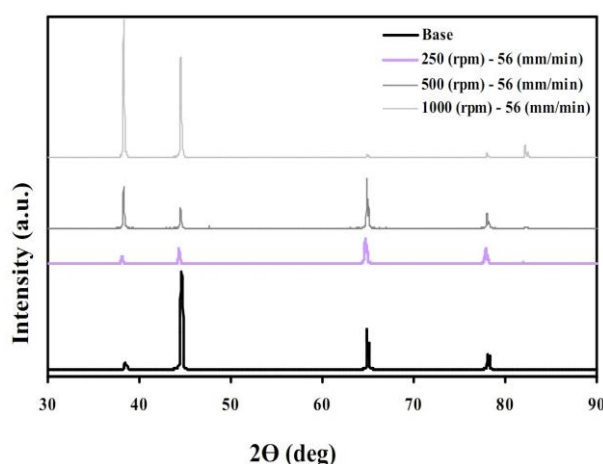
اطلاعات مربوط به میکروسختی مقطع جوش از مرکز جوش به اطراف در شکل ۲ ارایه شده است. نکته قابل توجه اینکه سختی نقاط جوشکاری شده نسبت به اطراف بیشتر بوده که این امر نشان‌دهنده اعمال کرنش در ناحیه

دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات میکروآتولب و نرم‌افزار نووا استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### مطالعات پراش پرتو ایکس

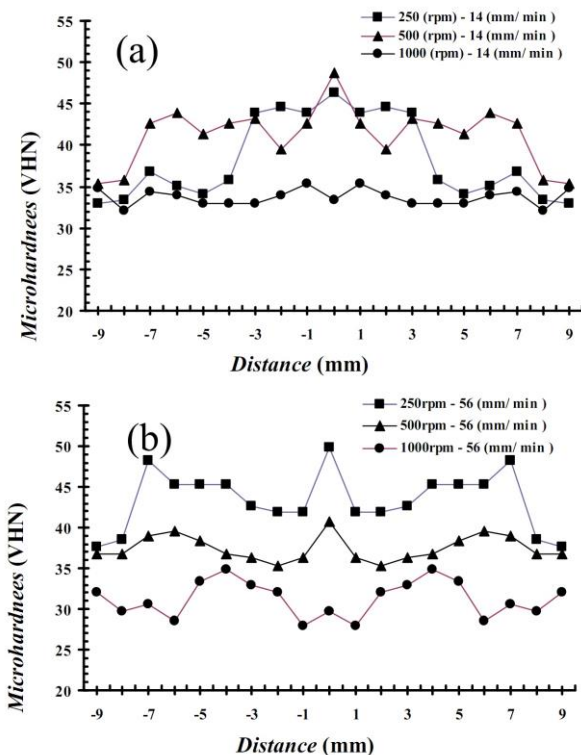
در شکل ۱ طیف‌های حاصل از پراش پرتو ایکس آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ بعنوان فلز پایه و پراش پرتو ایکس نواحی جوشکاری شده با سرعت چرخش بین برابر ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۵۶ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود الگوی پراش فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده دارای زاویه پراش‌های یکسان ولی با شدت و پهنای پیک متفاوت بوده که این خود حاکی از هم فاز بودن ناحیه جوشکاری شده و فاز پایه و عدم تشکیل فاز جدید طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ است. از طرفی بر اساس رابطه ویلیامسون-هال برابر فرمول ۱ میانگین اندازه کریستال بر طبق محاسبه پهنای پیک‌های پراش اشعه ایکس در هر ۴ نمونه مورد آزمایش XRD در جدول ۱ لیست شده است.



شکل ۱. منحنی‌های پراش پرتو ایکس برای آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ آئیل و جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخش بین مساوی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه.

همان‌طورکه در جدول آماده است فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث اعمال فرآیند تغییر شکل

میزان تغییر در نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه کمتر قابل مشاهده بوده است که این امر نشان‌دهنده گرمای تولید شده بالا طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و در نتیجه توزیع گرمای بیشتر در مناطق جوش است [۷، ۱۲-۱۵].



شکل ۲. نمودار سختی سنجی ویکرز برای آلیاژ آلومینیوم جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخش‌های متفاوت با (a) سرعت پیشروی ۱۴ میلی‌متر در دقیقه و (b) سرعت پیشروی ۵۶ دور در دقیقه.

### رفتار خوردگی

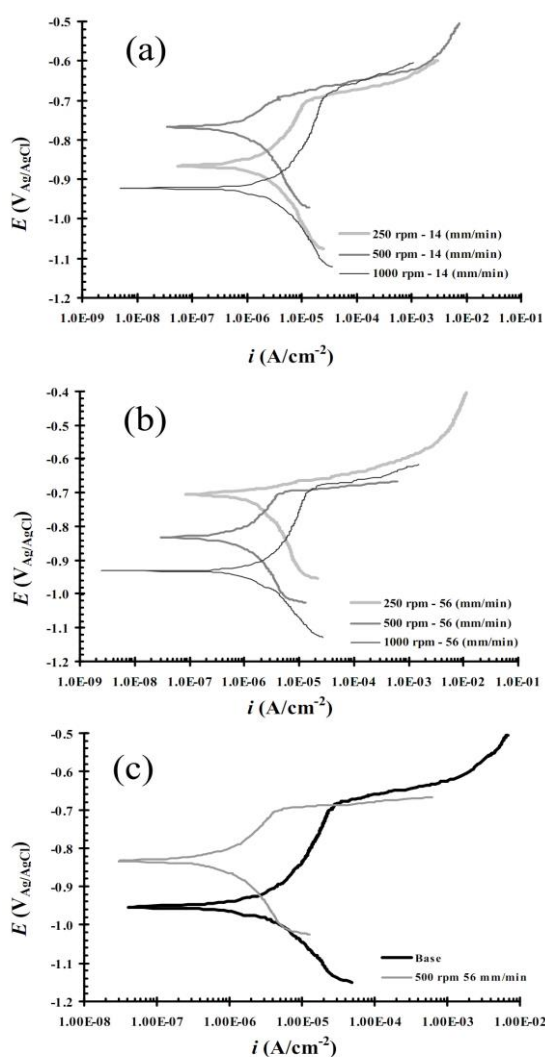
در شکل‌های ۳ منحنی‌های پلاریزاسیون تافل آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ و آلیاژ جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پس از غوطه‌وری به مدت زمان ۱۸۰۰ ثانیه در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان داده شده است. در شکل ۵a تأثیر سرعت چرخش پین در سرعت پیشروی ثابت مساوی با ۱۴ میلی‌متر بر دقیقه، بر رفتار خوردگی و پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک را نشان می‌دهد. در شکل ۵b رفتار خوردگی نمونه‌های

جوش بوده و این تفاوت در سرعت چرخش پین ۱۰۰۰ دور بر دقیقه کمتر مشخص است که این خود حاکی از تولید گرمای زیاد در این سرعت چرخش بوده که می‌تواند اثرات کرنشی فرآیند جوشکاری را کاهش دهد. همانطور که قابل مشاهده است افزایش سرعت چرخش پین در سرعت پیشروی ثابت باعث کاهش سختی شده است. این نتایج به همراه نتایج XRD که کاهش اندازه دانه در سرعت دوران ۵۰۰ نسبت به ۲۵۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد می‌تواند این پدیده را اثبات کند که در سرعت چرخش ۲۵۰ دور بر دقیقه شرایط برای تبلور مجدد کامل فراهم نشده و بیشتر انرژی کرنشی در ساختار ذخیره شده و گرمای مورد نیاز جهت کاهش انرژی در قالب ریزکردن کامل دانه‌ها پیدا نکرده و در نتیجه سختی بیشتری را نشان داده و از طرفی اندازه دانه‌ها به اندازه نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه نشده است. از آنجا که در سرعت دوران ۵۰۰ دور بر دقیقه تبلور مجدد کامل اتفاق افتاده است افزایش بیشتر سرعت دوران از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه سبب افزایش اندازه دانه تحت تأثیر پدید رشد دانه در نتیجه افزایش گرمای تولید در سرعت دوران‌های بالاتر شده است و همین پدیده سبب کاهش بیشتر سختی نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیگر نمونه‌ها در سرعت پیشروی ثابت شده است. این روند در هر دو سرعت پیشروی قابل مشاهده است.

اکنون اگر نمونه‌های متناظر با سرعت چرخش پین یکسان را در نظر بگیریم مشاهده می‌شود که افزایش سرعت پیشروی از ۲۸ به ۵۶ دور بر دقیقه باعث افزایش سختی ناحیه جوش شده است که این پدیده حاکی از توزیع پرکنده‌تر و کمتر گرمای ایجاد شده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در سرعت‌های پیشروی بیشتر بوده و در نتیجه گرمای لازم جهت کاهش انرژی کرنشی در قالب ریز شدن کامل ساختار نبوده است، لذا سختی با افزایش سرعت پیشروی پین افزایش یافته است. نکته قابل توجه اینکه این

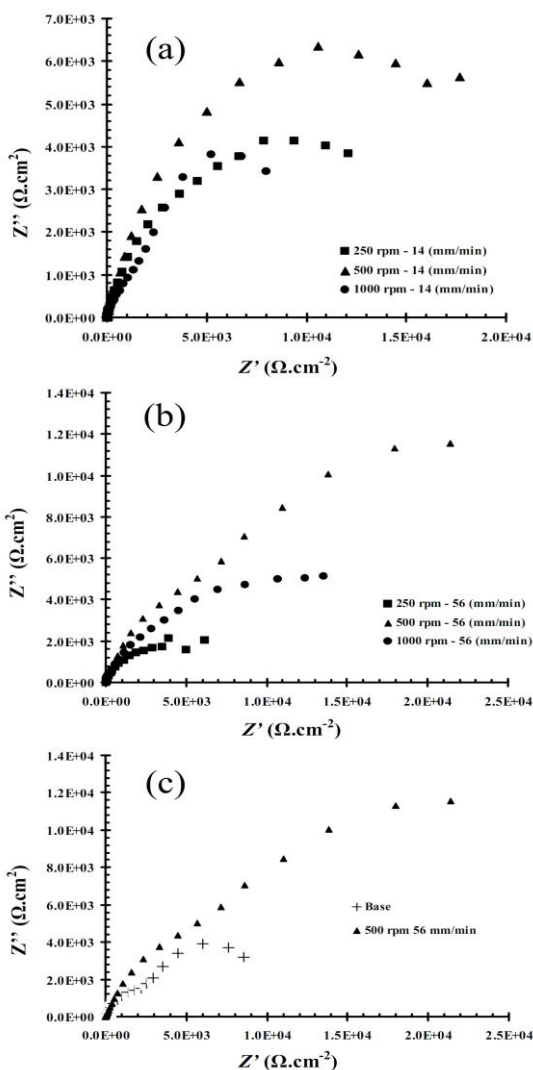
همانطور که از اطلاعات مشخص شده در جدول و شکل‌های مربوط به پلاریزاسیون مشخص است افزایش سرعت چرخش پین تا ۵۰۰ دور بر دقیقه باعث بهبود رفتار خوردگی بعلت فراهم شدن بهترین شرایط برای تبلور مجدد و در نتیجه کاهش انرژی و عیوب و نواقص درونی ساختار و ریز شدن دانه‌ها شده است و این روند در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه برعکس شده بطوری که شاهد افزایش دانسیته جریان خوردگی هستیم و این امر خود ناشی از پدیده رشد دانه در این شرایط بوده که این پدیده ناشی از ایجاد گرمای زیاد در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه است. این موارد در توافق و هماهنگی با اطلاعات بحث شده در تحلیل نتایج XRD و میکروسختی است. در ادامه می‌توان تأثیر سرعت پیشروی پین بر رفتار خوردگی را چنین تشریح کرد که در سرعت چرخش ۲۵۰ دور بر دقیقه بعلت گرمای تولیدی کم در این شرایط آن نمونه‌ای رفتار خوردگی بهتری را نشان می‌دهد که بتواند گرمای بیشتری را در سیستم متمرکز کرده تا انرژی کرنشی و نواقص کمتری در سیستم بصورت پسماند ذخیره شود. در نتیجه نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۱۴ دور بر دقیقه دانسیته جریان خوردگی کمتری نسبت به نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۵۶ دور بر دقیقه دارد. از طرفی نمونه جوشکاری شده در ۵۰۰ دور بر دقیقه شرایط مناسب جهت کاهش انرژی کرنشی و نواقص را در قالب تبلور مجدد و بازبایی توسعه یافته را پیدا کرده، لذا آن نمونه‌ای که در سرعت پیشروی بیشتری جوشکاری شده دارای رفتار خوردگی بهتر و دانسیته جریان خوردگی کمتری است بطوری که افزایش سرعت پیشروی از تمرکز بیشتر گرما در سیستم و در نتیجه فراهم شدن شرایط برای رشد دانه جلوگیری می‌کند، لذا نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۵۶ دور

جوشکاری شده در سرعت چرخش پین ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نشان داده می‌شود و در پایان شکل ۵C مقایسه رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ بعنوان فلز پایه به همراه بهترین رفتار خوردگی نمونه‌های جوشکاری آمده است تا تأثیر مثبت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی این آلیاژ محسوس‌تر باشد. نتایج حاصل از امتداد شیب‌های تاقل آندی و کاتدی شامل پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی در جدول ۲ ارایه شده است.



شکل ۳. منحنی پلاریزاسیون تافل آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ و نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت چرخش‌های متفاوت (a) سرعت پیشروی ۱۴ میلی‌متر در دقیقه و (b) سرعت پیشروی ۵۶ دور در دقیقه در سرعت چرخش‌های متفاوت با (c) نمونه آیل شده به همراه نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۶ دور در میلی‌متر.

خود حاکی از افزایش مقاومت لایه‌های سطحی است. نتایج حاصل از فیت کردن نمودارهای طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی توسط نرم افزار EIS Analyzer بر طبق مدار معادل شکل ۵ در جدول ۳ آمده است.



شکل ۴. نمودارهای نایکوئست مربوط به طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ و نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت چرخش‌های متفاوت با در سرعت چرخش‌های متفاوت با (a) سرعت پیشروی ۱۴ میلیمتر در دقیقه و (b) سرعت پیشروی ۵۶ دور در دقیقه در سرعت چرخش‌های متفاوت با (c) نمونه آنیل شده به همراه نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۶ دور در میلیمتر.

بر دقیقه دارای دانسیته جریان خوردگی کمتری نسبت به نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۱۴ دور بر دقیقه است. با مقایسه رفتار خوردگی و نتایج میکروسختی و XRD می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به قدری گرما در سیستم تولید شده است که شرایط برای رشد دانه فراهم شده و در نتیجه آن نمونه‌ای که در سرعت پیشروی بیشتری جوشکاری شده است کمتر شرایط رشد دانه بعلت کاهش تمرکز گرما را پیدا کرده، لذا نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۵۶ دور بر دقیقه در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه دانسیته جریان خوردگی کمتری نسبت به نمونه جوشکاری شده در همین شرایط ولی با سرعت پیشروی ۱۴ دور بر دقیقه دارد [۱۶-۲۰].

جدول ۲. مقادیر چگالی جریان و پتانسیل خوردگی به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون تافلی شکل ۳.

شرایط نمونه	دانسیته جریان خوردگی (mA/cm <sup>2</sup> )
آنیل شده	۲/۱
۲۵۰rpm/۱۴mm/min	۱/۳۷
۲۵۰rpm/۵۶mm/min	۲/۹۳
۵۰۰rpm/۱۴mm/min	۰/۸
۵۰۰rpm/۵۶mm/min	۰/۱
۱۰۰۰rpm/۱۴mm/min	۲/۵
۱۰۰۰rpm/۵۶mm/min	۱/۱۷

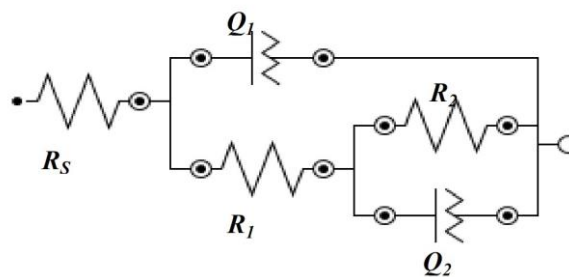
شکل ۴ نمودارهای نایکوئست مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده و آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل شده را نشان می‌دهد. این نمودارها دارای دو نیم دایره بوده که این خود نشان‌دهنده شرایط لایه‌های سطحی با دو ثابت زمانی است که اولی مربوط به رفتار مقاومتی و خازنی لایه دوگانه الکتریکی و دیگری مربوط به رفتار مقاومتی و خازنی لایه پسیو ناشی از خوردگی آلومینیوم در فصل مشترک محلول و سطح فلز است. برابر تحلیل نمودارهای طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی هرچه قطر نیم دایره‌ها بیشتر شود

به پایین‌ترین سرعت چرخش پین بوده که این امر حاکی از تمرکز گرمای بیشتر در این شرایط است. ولی در نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت چرخش پین ۵۰۰ دور بر دقیقه بهترین رفتار خوردگی مربوط به شرایط جوشکاری در سرعت پیشروی بیشینه یعنی شرایط با کمترین گرمای تمرکز یافته و در نتیجه کمترین میزان رشد دانه است. در نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بهترین رفتار خوردگی مربوط به نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۵۶ دور بر دقیقه یعنی کمترین شرایط برای رشد دانه است که در توافق با بیشترین سرعت پیشروی در نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه است.

جدول ۳. پارامترهای امپدانس الکتروشیمیایی به‌دست آمده از مدار معادل شکل ۴ در نمونه‌های جوشکاری و آنیل شده.

شرایط نمونه	R <sub>1</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	R <sub>2</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )
آنیل شده	۲۹۰۹	۷۶۵۲
۲۵۰rpm ۱۴mm/min	۳۲۹۲	۱۱۸۴۱
۲۵۰rpm ۵۶mm/min	۱۶۰۹	۵۵۴۰
۵۰۰rpm ۱۴mm/min	۱۱۱۷۷	۹۲۴۲
۵۰۰rpm ۵۶mm/min	۷۱۰۰	۳۰۲۴۳
۱۰۰۰rpm ۱۴mm/min	۲۳۲۵	۱۰۶۲۹
۱۰۰۰rpm ۵۶mm/min	۸۷۸۹	۱۱۶۳۷

روند کاهش ظرفیت خازنی با افزایش مقاومت حاکی از تغییر خواص لایه‌های سطحی تحت تأثیر پارامترهای اعمالی در فرآیند جوشکاری است. ظرفیت لایه خازنی که توسط فرمول ۳ قابل محاسبه است می‌تواند تابعی از ثابت دی الکتریک لایه سطحی، ضخامت و سطح آن بوده که این



شکل ۵. مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل و جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم.

در این مدار معادل، ثابت زمانی مرتبط با فرکانس‌های بالا شامل R<sub>1</sub> و Q<sub>1</sub> است که R<sub>1</sub> نشان‌دهنده مقاومت لایه اکسیدی تشکیل شده روی سطح فلز آلومینیوم و Q<sub>1</sub> المان فاز ثابت مرتبط با لایه دوگانه الکتریکی در فصل مشترک لایه اکسیدی/ محلول است. ثابت زمانی دوم در فرکانس‌های کم شامل R<sub>2</sub> و Q<sub>2</sub> است که R<sub>2</sub> مقاومت انتقال بار و Q<sub>2</sub> المان فاز ثابت مرتبط با لایه دوگانه الکتریکی در فصل مشترک آلومینیوم/ لایه اکسیدی است. با توجه به تشابه در مدار معادل نمونه‌های جوشکاری شده و نمونه جوشکاری نشده، رفتار خوردگی و تشکیل لایه‌های سطحی مشابه یکدیگر هستند [۲۰، ۱۸، ۱۶، ۹، ۶].

همانطور که از اطلاعات جدول ۳ مشخص است رفتار خوردگی نمونه‌های جوشکاری شده با افزایش سرعت چرخش پین تا ۵۰۰ دور بر دقیقه، بهتر و سپس در ۱۰۰۰ دور بر دقیقه کاهش یافته است و این امر حاکی از ایجاد بهترین شرایط برای تبلور مجدد و حذف نواقص در ساختار در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه است که این خود در توافق و هماهنگی با اطلاعات استخراج شده از پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک بوده و XRD و میکرو سختی است. از طرفی سرعت پیشروی در نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت چرخش‌های متفاوت فرق می‌کند بطوری‌که در نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش ۲۵۰ دور بر دقیقه بهترین رفتار خوردگی مربوط



اغتشاشی با سرعت پیشروی پین برابر با ۵۶ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه، بیشترین مقاومت پلازیماسیون به دست می‌آید.

#### مراجع

1. L. Daniela and Ch. Zhan, *Friction stir welding*, Woodhead, Boca Raton, (2010).
2. Christopher B. Smith, *Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability*, Elsevier Inc, Oxford, (2014).
3. A. Sommers, *Friction stir welding of SC-modified Al-Zn-Mg-Cu alloy extrusions*, in: *International Mech. Eng. Congr. Expo.*, (2014).
4. C. Zhou, X. Yang, G. Luan, *Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy*, *Scr. Mater.* 53 (2005) 1187–1191.
5. P.S. Pao, S.J. Gill, C.R. Feng, K.K. Sankaran, *Corrosion ± fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050*, 45 (2001) 605–612.
6. K. Surekha, B.S. Murty, K. Prasad Rao, *Effect of processing parameters on the corrosion behaviour of friction stir processed AA 2219 aluminum alloy*, *Solid State Sci.* 11 (2009) 907–917.
7. R.W. Fonda, P.S. Pao, H.N. Jones, C.R. Feng, B.J. Connolly, a. J. Davenport, *Microstructure, mechanical properties, and corrosion of friction stir welded Al 5456*, *Mater. Sci. Eng. A.* 519 (2009) 1–8.
8. A. Fattah-alhosseini, S.O. Gashti, *Corrosion Behavior of Ultra-fine Grained 1050 Aluminum Alloy Fabricated by ARB Process in a Buffer Borate Solution*, *J. Mater. Eng. Perform.* 24 (2015) 3386–3393.
9. J.B. Lumsden, M.W. Mahoney, G. Pollock, C.G. Rhodes, *Intergranular Corrosion Following Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 7075-T651*, *Corrosion.* 55 (1999) 1127–1135.
10. Y.T. Prabhu, K.V. Rao, *X-Ray Analysis by Williamson-Hall and Size-Strain Plot Methods of ZnO Nanoparticles with Fuel Variation*, *World J. Nano Sci. Eng.* 4 (2014) 21–28.
11. B.R. Rehani, P.B. Joshi, K.N. Lad, A. Pratap, *Crystallite size estimation of elemental and composite silver nano-powders using XRD principles*, *Indian J. Pure Appl. Phys.* 44 (2006) 157–161.

پارامترها می‌توانند با تغییر ساختار فلز و ناحیه جوش طی فرآیند جوشکاری تغییر کنند [۲۳].

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon^0}{d} S \quad (2)$$

که در این فرمول C ظرفیت خازنی لایه سطحی، ε، ε0، d و S ثابت دی الکتریک لایه، ثابت دی الکتریک خلأ، ضخامت و سطح لایه سطحی هستند.

#### نتیجه‌گیری

(۱) نتایج پراش اشعه ایکس نشان دادند که بهترین شرایط برای ایجاد ساختاری با کوچکترین اندازه کریستال در سرعت دوران ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۶ میلی‌متر بر دقیقه فراهم می‌شود.

(۲) بررسی توزیع سختی در مقطع نمونه‌های جوش حاکی از افزایش سختی با افزایش سرعت پیشروی و از طرفی افزایش سختی با کاهش سرعت چرخش پین تا سرعت‌های میانی است.

(۳) منحنی پلازیماسیون تافل آلیاژهای آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل و جوشکاری شده در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان داد که مقدار چگالی جریان خوردگی با اعمال فرآیند جوشکاری کاهش یافته است، بطوری‌که نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش پین برابر با ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۶ میلی‌متر بر دقیقه بهترین رفتار خوردگی را نشان می‌دهد.

(۴) نتایج حاصل از طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی برای آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل شده و جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان دادند که منحنی‌های نایکویست آن‌ها دارای رفتار مشابهی هستند. هم‌چنین این نتایج نشان دادند که دو ثابت زمانی شامل لایه دوگانه الکتریکی و لایه پسیو سطحی در منحنی‌های نایکویست وجود دارد.

(۶) نتایج حاصل از مدل‌سازی با مدار معادل الکتریکی نشان داد که برای آلومینیوم جوشکاری شده به روش اصطکاکی

23. M. Vakili Azghandi, A. Davoodi, G. a. Farzi, A. Kosari, *Water-base acrylic terpolymer as a corrosion inhibitor for SAE1018 in simulated sour petroleum solution in stagnant and hydrodynamic conditions*, Corros. Sci. 64 (2012) 44–54.
12. A. K. Shettigar, G. Salian, M. Herbert, S. Rao, *Microstructural Characterization and Hardness Evaluation of Friction Stir Welded Composite AA6061-4 . 5Cu-5SiC ( Wt .%)*, 63 (2013) 429–434.
13. S. Babu, K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Balasubramanian, *Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminum alloy joints*, Met. Mater. Int. 15 (2009) 321–330.
14. L.Z. He, X.H. Li, X.T. Liu, X.J. Wang, H.T. Zhang, J.Z. Cui, *Effects of homogenization on microstructures and properties of a new type Al–Mg–Mn–Zr–Ti–Er alloy*, Mater. Sci. Eng. A. 527 (2010) 7510–7518.
15. C.S. Paglia, M.C. Carroll, B. Pitts, T. Reynolds, R.G. Buchheit, *Strength, Corrosion and Environmentally Assisted Cracking of a 7075-T6 Friction Stir Weld*, Mater. Sci. Forum. 396-402 (2002) 1677–1684.
16. R.-C. Zeng, J. Chen, W. Dietzel, R. Zettler, J.F. dos Santos, M. Lucia Nascimento, et al., *Corrosion of friction stir welded magnesium alloy AM50*, Corros. Sci. 51 (2009) 1738–1746.
17. M. Sarvghad-Moghaddam, R. Parvizi, a. Davoodi, M. Haddad-Sabzevar, a. Imani, *Establishing a correlation between interfacial microstructures and corrosion initiation sites in Al/Cu joints by SEM-EDS and AFM-SKPFM*, Corros. Sci. 79 (2014) 148–158.
18. S.H. Park, J.S. Kim, M.S. Han, S.J. Kim, *Corrosion and optimum corrosion protection potential of friction stir welded 5083-O Al alloy for leisure ship*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed. 19 (2009) 898–903.
19. S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki, *Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel*, Scr. Mater. 51 (2004) 101–105.
20. S. Maggiolino, C. Schmid, *Corrosion resistance in FSW and in MIG welding techniques of AA6000*, J. Mater. Process. Technol. 197 (2008) 237–240.
21. K.K. Alaneme, T.M. Adewale, P.A. Olubambi, *Corrosion and wear behaviour of Al–Mg–Si alloy matrix hybrid composites reinforced with rice husk ash and silicon carbide*, J. Mater. Res. Technol. 3 (2014) 9–16.
22. B.N. Padgett, C. Paglia, R.G. Buchheit, *Characterization of corrosion behavior in friction stir weld Al-Li-Cu AF/C458 alloy*, Tms. (2003) 55–64.