

تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی مس خالص در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم

امیر حسین طاهری*^۱، آرش فتاح الحسینی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*amirhossein.taheri3@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۴)

چکیده

در این تحقیق، تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی مس خالص در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم بررسی شد. برای این منظور مس خالص با سرعت چرخش ۳۵۵ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه جوشکاری شد. ریزساختار مس خالص و مس خالص جوشکاری شده به وسیله پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین رفتار خوردگی نمونه‌ها در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم با استفاده از آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شدند. نتایج نشان دادند که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث کاهش اندازه دانه مس خالص و بهبود مقاومت به خوردگی ناحیه اغتشاش می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مس خالص، رفتار خوردگی، ریزساختار.

۱- مقدمه

یک جزء اصلی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پین است که در درز اتصال قطعه کار حرکت کرده و توسط اغتشاش موجب جوشکاری می‌شود. با فرو رفتن پین، حرارت ناشی از اصطکاک به وجود می‌آید و این حرارت با برش آدیاباتیک یک حجم محدود از ماده در نزدیکی پین تکمیل می‌شود. چرخش، حرکت و نیروی محوری پین باعث می‌شود آن مقدار از حجم ماده که به حالت پلاستیک رسیده است از جلو به پشت قطعه کار جریان پیدا کند. سپس مواد جابه‌جا شده، سرد و یک اتصال حالت جامد تشکیل می‌شود. به‌طور کلی یک اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل مناطقی از جمله ماده پایه، منطقه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند اتصال حالت جامد است که در سال ۱۹۹۱ توسط مرکز جوشکاری ابداع شد. یک مزیت مهم این فرایند نسبت به سایر روش‌های جوشکاری ذوبی مرسوم آن است که این فرایند قادر به تولید اتصال بدون حفره است حتی اگر خود قطعه کار شامل حفره باشد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از پین در حال چرخش، فلز را به حالت پلاستیک تبدیل می‌کند و باعث به‌وجود آمدن یک اتصال جوش قوی می‌شود. فرایند اتصال در زیر دمای نقطه ذوب ماده اتفاق می‌افتد که موجب کاهش خطر ایجاد ترک و هم-چنین جدایش در حین انجماد فلز جوش می‌شود [۱-۴].

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، قطعات مس خالص با ابعاد ۱۳۰ میلی‌متر \times ۵۰ میلی‌متر از ورقی به ضخامت ۵ میلی‌متر بریده شدند. سپس عملیات پرداخت کاری با استفاده سنباده تا شماره ۱۲۰۰ روی قطعات برش خورده انجام شد. نمونه‌های آماده شده برای انجام جوشکاری درون قالب مخصوص که روی صفحه دستگاه فرز نصب شده بود، قرار داده شد. سپس با محکم نمودن نمونه‌ها در قالب و اتصال شیر آب‌گرد، عملیات جوشکاری انجام شد. لازم به ذکر است که با توجه به زاویه ۳ درجه‌ای فک دستگاه، پین به عمق ۴ میلی‌متر وارد درز اتصال قطعات شد. اصطکاک حاصل از چرخش پین موجب ایجاد گرما در قطعات شده و ناحیه مورد نظر برای جوشکاری را به حالت پلاستیک می‌رساند. سپس ابزار با پیمودن مسیر اتصال باعث ممزوج شدن دو قطعه در یکدیگر شد. از آنجایی که هیچ گونه ذوبی در این فرایند اتفاق نمی‌افتد، استفاده از گاز محافظ در حین جوشکاری نیز نیاز نیست. برای بررسی تاثیر جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی بر رفتار خوردگی مس خالص در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم، سه سرعت ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. قابل ذکر است که برای هر سه سرعت ذکر شده، سرعت چرخش پین برابر با ۳۵۵ دور بر دقیقه و دیگر شرایط کاملاً یکسان در نظر گرفته شد.

برای بررسی رفتار خوردگی، از مرکز هر نمونه مربعی به ابعاد ۳۰ میلی‌متر \times ۳۰ میلی‌متر بریده و از سطح با عملیات سنباده‌زنی ضخامت ۲ میلی‌متر برداشته شد. سپس عملیات سنباده و چربی‌زدایی انجام و نمونه‌ها با آب دوبار تقطیر شسته شد و پس از خشک کردن با دمش هوا، به سرعت نمونه‌ها در سل تخت به منظور انجام آزمون‌های خوردگی قرار گرفتند. در سل استاندارد سه الکترودی، الکترو پلاتین به‌عنوان الکترو د کمکی و الکترو د نقره/کلرید نقره به‌عنوان الکترو د مرجع انجام شدند. برای انجام آزمون‌های خوردگی، از محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم استفاده شد و هر نمونه به مدت زمان ۵۴۰۰ ثانیه قبل از انجام هر آزمون در این محلول غوطه‌ور شد. سپس آزمون‌های

متاثر از عملیات حرارتی - مکانیکی^۴، منطقه متاثر از حرارت و منطقه ناگت^۵ است [۵-۸].

در جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی، سرعت چرخش و پیشروی پین، زاویه انحراف پین از خط عمود بر سطح قطعه کار و نیروی عمودی وارد بر پین چهار پارامتر بسیار مهم هستند. حرکت چرخشی پین موجب به حرکت درآمدن و مخلوط شدن مواد به دور آن می‌شود و این کار باعث حرکت مواد از جلوی پین به عقب پین می‌گردد. سرعت چرخش بالاتر پین موجب تولید دمای بالاتر می‌شود زیرا باعث اصطکاک بیشتر و مخلوط شدن و جنبش شدیدتر مواد می‌شود. بنابراین با افزایش سرعت چرخش پین نباید انتظار داشت که گرمای تولیدی نیز به‌طور یکنواخت افزایش یابد، با وجود آن که ضریب اصطکاک در سطح با افزایش سرعت چرخش پین تغییر می‌کند. علاوه بر سرعت چرخش پین و سرعت پیشروی آن روی قطعه، زاویه بین پین و قطعه نیز دارای اهمیت می‌باشد. یک زاویه مناسب بین پین و قطعه کار در حین پیمودن مرز جوشکاری موجب می‌شود که به کمک دندان‌های پین و حرکت موثر مواد از جلوی پین به پشت آن، سطح ابزار مواد حرکت داده شده را می‌پوشاند و مانع از اتلاف حرارت می‌شود [۸-۱۰].

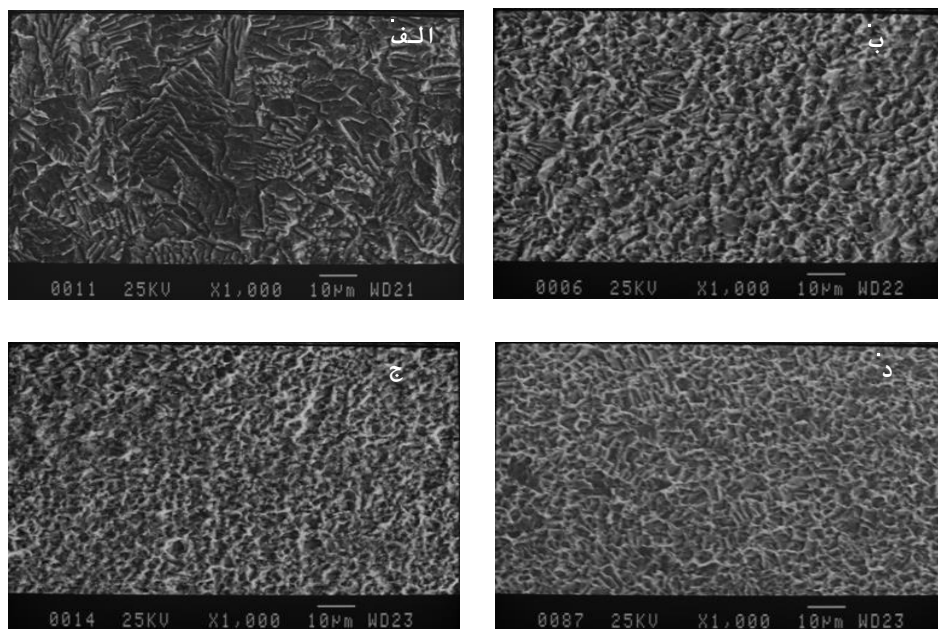
تحقیقات گسترده‌ای در مورد جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی آلومینیوم و آلیاژهای آن و برخی دیگر از فلزات غیر آهنی شده است در حالی که تاثیر این نوع فرایند جوشکاری برای مس و آلیاژهای آن بسیار اندک است [۱۱-۱۷]. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی بر رفتار خوردگی مس خالص در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم با استفاده از آزمون‌های پتانسیل مدار باز، پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی است. هم‌چنین برای بررسی تاثیر این نوع جوشکاری بر ریزساختار مس خالص جوشکاری شده از پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

به طور کلی نحوه صحیح قرارگیری قطعات در قالب، آماده سازی سطحی مناسب و استفاده صحیح از پین و پارامترهای موثر آن باعث ایجاد یک جوش بی عیب و عاری از هر گونه ترک و یا دیگر عیوب خواهد شد. در شکل ۱ ریزساختار مس خالص و مس خالص جوشکاری شده با سرعت چرخش پین برابر ۳۵۵ دور بر دقیقه و سرعت های پیشروی ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی متر بر دقیقه نشان داده شده است.

پلاریزاسیون تافل (با نرخ روبش ۱ میلی ولت بر ثانیه) و هم چنین طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (در پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی هرتز با دامنه طول موج ۱۰ میلی ولت) انجام شدند. برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی، از دستگاه پتانسیواستات / گالوانواستات میکروآتولب و نرم افزار نووا استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

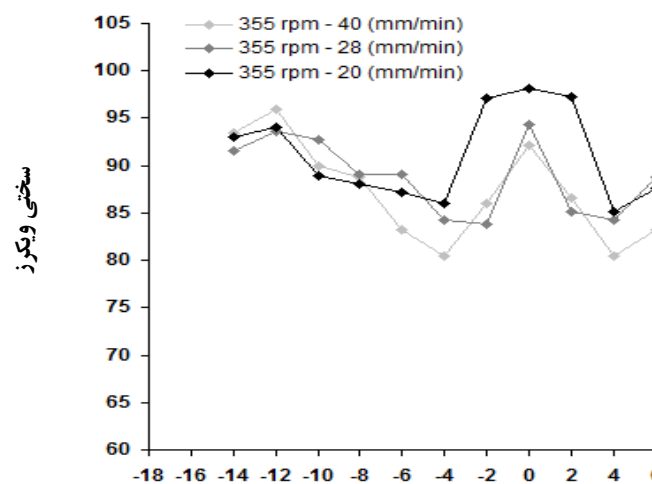
۳-۱- بررسی های ریزساختاری و سختی سنجی



شکل (۱): (الف): ریزساختار مس خالص، (ب)، (ج) و (د): به ترتیب ریزساختار ناحیه اغتشاش در نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت پیشروی پین برابر با ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی متر بر دقیقه

دقیقه نسبت به نمونه های دیگر در این سرعت دوران باید بیشتر باشد که در شکل ۲ مشاهده می شود. کرنش بیشتر سبب ذخیره انرژی بیشتر یا همان افزایش چگالی نابجایی ها می شود. در نمونه های دیگر با سرعت پیشروی ۲۸ و ۴۰ میلی متر بر دقیقه با افزایش سرعت پیشروی، کرنش اعمالی به سیستم کمتر شده و در نتیجه چگالی نابجایی ها کم می شود، لذا کاهش سختی در این نمونه ها مشاهده می شود.

به علت آن که سرعت دوران ۳۵۵ دور بر دقیقه پایین است گرمای چندانی در سیستم ایجاد نشده است و با توجه به کرنش اعمالی و افزایش چگالی نابجایی ها، تبلور مجدد کامل اتفاق نیفتاده است. به طوری که فقط تعدادی از دانه ها که کرنش بیشتری را تحمل کردند، دچار تبلور مجدد شده اند. به علت تمرکز حرارت کم در سرعت دوران ۳۵۵ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی کمتر به این معنی است که کرنش بیشتری به سیستم اعمال می شود. لذا سختی نمونه با سرعت پیشروی ۲۰ میلی متر بر



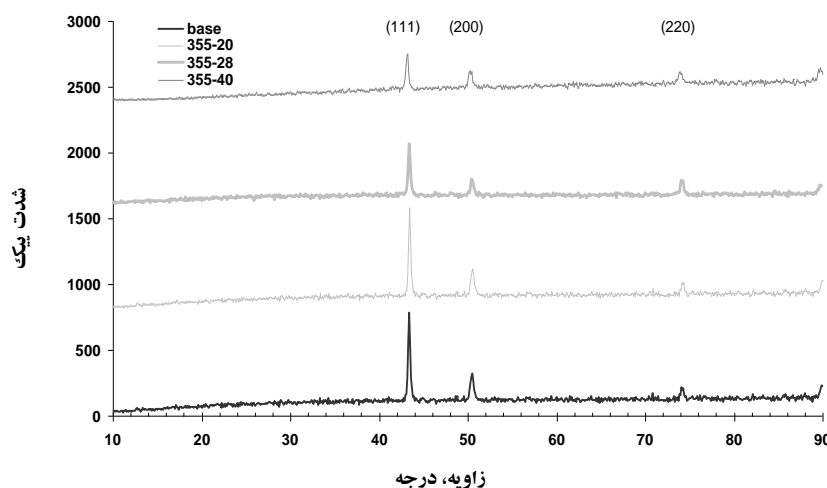
فاصله از مرکز جوش، میلی‌متر

شکل (۲): نمودار سنجی ویکرز برای مس خالص جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخش پین برابر با ۳۵۵ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی پین برابر با ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه

۲-۳- مطالعات پراش پرتو ایکس

انجام فرایند جوشکاری فقط پیک‌های اصلی مس خالص ظاهر شدند و این نشان از عدم حضور فازهای ناخواسته از جمله اکسیدها در ساختار دارد. هم‌چنین با افزایش سرعت پیشروی پین از شدت پیک‌ها کاسته شده است و در مجموع سه ساختار نشان داده شده دارای تغییرات چندانی نیستند.

در شکل ۳ طیف‌های حاصل از پراش پرتو ایکس مس خالص و مس خالص جوشکاری شده با سرعت چرخش پین برابر ۳۵۵ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود الگوی پراش مس خالص دارای سه پیک اصلی (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) می‌باشد که کاملاً در منحنی قابل تشخیص هستند. با توجه به منحنی‌های شکل ۳ ملاحظه می‌شود که پس از

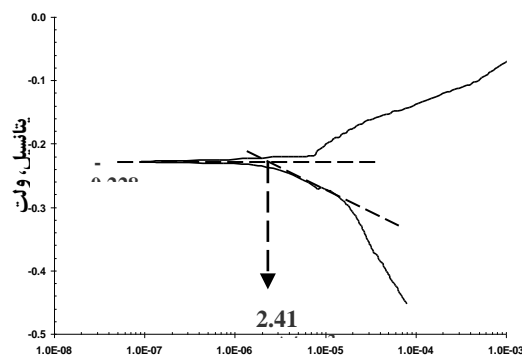


شکل (۳): منحنی‌های پراش پرتو ایکس برای مس خالص و مس خالص جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخش پین برابر با ۳۵۵ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی پین برابر با ۲۰، ۲۸ و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه

۳-۳- رفتار خوردگی

در شکل های ۴ و ۵ منحنی های پلاریزاسیون تافل مس خالص و مس جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پس از غوطه وری به مدت زمان ۵۴۰۰ ثانیه در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است مقدار چگالی جریان خوردگی مس خالص برابر ۲/۴۱ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع است که نشان دهنده مقاومت به خوردگی مناسب مس در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم است. هم چنین پتانسیل خوردگی نیز برابر ۰/۲۲۸- ولت است که پتانسیل نسبتا نجیبی است.

در جدول ۱ مقادیر چگالی جریان و پتانسیل خوردگی به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون تافل برای مس جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود چگالی جریان خوردگی برای مس جوشکاری شده کاهش یافته است و برای سرعت پیشروی پین برابر با ۴۰ میلی متر بر دقیقه کمترین چگالی جریان خوردگی برابر با ۱/۳۱ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع حاصل شده است. هم چنین در جدول ۱ مشاهده می شود که انجام عملیات جوشکاری بر مقادیر پتانسیل خوردگی نیز تاثیر چشمگیر و منفی را نداشته است.

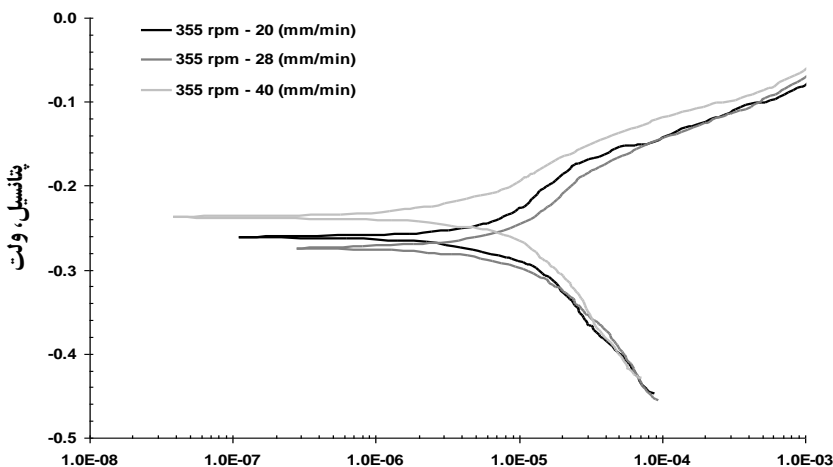


چگالی جریان، آمپر بر سانتی متر مربع

شکل (۴): منحنی پلاریزاسیون تافل مس خالص در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم پس از ۵۴۰۰ ثانیه غوطه وری

جدول (۱): مقادیر چگالی جریان و پتانسیل خوردگی به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون تافلی شکل ۵.

پتانسیل خوردگی، ولت	چگالی جریان خوردگی، میکرو آمپر بر سانتی متر مربع	سرعت پیشروی پین، میلی متر بر دقیقه
-۰/۲۶۱	۲/۵۵	۲۰
-۰/۲۷۴	۲/۴۵	۲۸
-۰/۲۳۷	۱/۳۱	۴۰



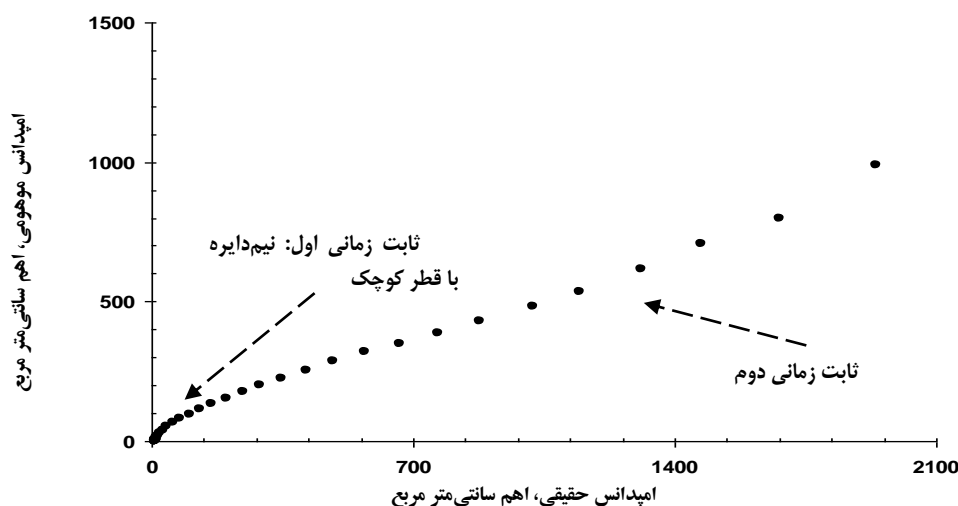
چگالی جریان، آمپر بر سانتی متر مربع

شکل (۵): منحنی های پلاریزاسیون تافل مس خالص جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم پس از ۵۴۰۰ ثانیه غوطه وری

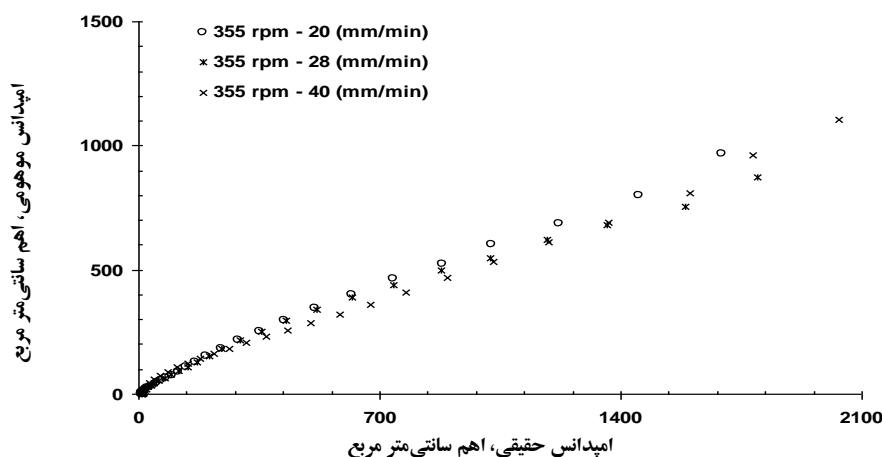
در شکل های ۶ و ۷ به ترتیب منحنی های نایکویست حاصل از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مس خالص و مس

سدیم نشان داده شده است.

جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پس از غوطه‌وری به مدت زمان ۵۴۰۰ ثانیه در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید



شکل (۶): منحنی نایکویست مس خالص پس از ۵۴۰۰ ثانیه غوطه‌وری در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم



شکل (۷): منحنی‌های نایکویست مس خالص جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم پس از ۵۴۰۰ ثانیه غوطه‌وری

مرتبط با فرکانس‌های بالا شامل R_1 و Q_1 است که R_1 نشان‌دهنده مقاومت لایه اکسیدی تشکیل شده روی سطح فلز مس و Q_1 المان فاز ثابت مرتبط با لایه دوگانه الکتریکی در فصل مشترک لایه اکسیدی/ محلول است. ثابت زمانی دوم در فرکانس‌های کم شامل R_2 و Q_2 است که R_2 مقاومت انتقال بار و Q_2 المان فاز ثابت مرتبط با لایه دوگانه الکتریکی در فصل مشترک مس/ لایه اکسیدی است [۱۸].

همان‌طور که در هر دو شکل مشاهده می‌شود منحنی‌های نایکویست دارای رفتار مشابهی هستند و دو ثابت زمانی دیده می‌شود. ثابت زمانی اول در فرکانس‌های بالا به صورت یک نیم‌دایره ناقص و ثابت زمانی دوم در محدوده فرکانس‌های میانی تا کم مشاهده می‌شود. با توجه به منحنی‌های نایکویست که وجود دو ثابت زمانی را نشان می‌دهند از مدار معادل شکل ۸ برای یافتن بهترین برازش استفاده شد. در این مدار معادل، ثابت زمانی

پیشروی بین برابر با ۴۰ میلی متر بر دقیقه بیشترین مقدار است که با نتایج به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون تافل (کمترین میزان چگالی جریان خوردگی) در تطابق کامل است.

۴- نتیجه گیری

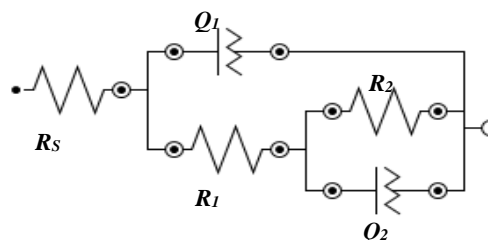
۱- نتایج مطالعات ریزساختاری و ریزسختی نشان داد که سرعت پیشروی کمتر باعث کرنش بیشتری می‌شود و کرنش بیشتر سبب ذخیره انرژی بیشتر یا همان افزایش چگالی نابعجایی‌ها می‌شود. در نتیجه سختی نمونه با سرعت پیشروی کمتر (۲۰ میلی متر بر دقیقه) نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است.

۲- الگوی پرآش پرتو ایکس نشان داد که مس خالص دارای سه پیک اصلی (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) است. هم‌چنین پرآش پرتو ایکس نشان داد که پس از انجام فرایند جوشکاری نیز این پیک‌ها ظاهر می‌شوند و این نشان از عدم حضور فازهای ناخواسته از جمله اکسیدها در ساختار است.

۳- منحنی پلاریزاسیون تافل مس خالص در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان داد که مقدار چگالی جریان خوردگی برابر ۲/۴۱ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع است که نشان‌دهنده مقاومت به خوردگی مناسب مس در این محلول است.

۴- هم‌چنین منحنی‌های پلاریزاسیون تافل مس جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان دادند که مقادیر چگالی جریان خوردگی برای مس جوشکاری شده با سرعت پیشروی بین برابر با ۴۰ میلی متر بر دقیقه، کمترین مقدار خواهد بود. علت را می‌توان به کرنش کمتر که سبب ذخیره انرژی کمتر (یا همان کاهش چگالی نابعجایی‌ها) می‌شود مرتبط ساخت.

۵- نتایج حاصل از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای مس خالص و مس جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان دادند که منحنی‌های نایکوئیست دارای رفتار مشابهی هستند. هم‌چنین این نتایج نشان دادند که دو ثابت زمانی در منحنی‌های نایکوئیست وجود دارد. ثابت زمانی اول در فرکانس‌های بالا به



شکل (۸): مدار معادل الکتریکی برای مدل‌سازی رفتار خوردگی مس خالص و مس خالص جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم

نتایج مدل‌سازی با این مدار معادل نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین منحنی‌های نایکوئیست و مدل‌سازی شده وجود دارد. روند تغییرات مقاومت‌های لایه اکسیدی و انتقال بار در جدول ۲ برای مس جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پس از غوطه‌وری به مدت زمان ۵۴۰۰ ثانیه در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان داده شده است.

جدول (۲): مقادیر مقاومت‌های لایه اکسیدی و انتقال بار به دست آمده از

مدار معادل شکل ۸

مقاومت لایه اکسیدی، اهم سانتی-متر مربع	مقاومت انتقال بار، کیلو اهم سانتی متر مربع	سرعت پیشروی بین، میلی متر بر دقیقه
۶/۶۸	۱۹/۶	۲۰
۵/۵۸	۵۳/۷	۲۸
۱۲۴/۱	۱۱۰/۲	۴۰

لازم به ذکر است که مقادیر مقاومت‌های لایه اکسیدی و انتقال بار برای مس خالص پس از غوطه‌وری به مدت زمان ۵۴۰۰ ثانیه در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم به ترتیب ۹۰/۹ اهم سانتی متر مربع و ۳۸/۲ کیلو اهم سانتی متر مربع به دست آمد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مقدار مقاومت پلاریزاسیون (که از حاصل جمع مقاومت‌های لایه اکسیدی و انتقال بار به دست می‌آید) برای نمونه جوشکاری شده با سرعت

- corrosion initiation sites in Al/Cu joints by SEM-EDS and AFM-SKPFM”, *Corrosion Science*, Vol. 79, pp. 148–158, 2014.
- [8] V. Fahimpour, S. K. Sadrnezhaad & F. Karimzadeh, “Corrosion behavior of aluminum 6061 alloy joined by friction stir welding and gas tungsten arc welding methods”, *Materials and Design*, Vol. 39, pp. 329–333, 2012.
- [9] S. Maggiolino & C. Schmid, “Corrosion resistance in FSW and in MIG welding techniques of AA6XXX”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, pp. 237–240, 2008.
- [10] S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano & M. Inagaki, “Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel”, *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 101–105, 2004.
- [11] H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh & E. Nazari, “Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints”, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 330–334, 2012.
- [12] J. W. Lin, H. Ch. Chang & M. H. Wu, “Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, pp. 296–304, 2014.
- [13] P. Xue, B. L. Xiao, Q. Zhang & Z. Y. Ma, “Achieving friction stir welded pure copper joints with nearly equal strength to the parent metal via additional rapid cooling”, *Scripta Materialia*, Vol. 64, pp. 1051–1054, 2011.
- [14] H. Khodaverdizadeh, A. Heidarzadeh & T. Saeid, “Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper joints”, *Materials & Design*, Vol. 45, pp. 265–270, 2013.
- [15] H. Pashazadeh, J. Teimournezhad & A. Masoumi, “Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification”, *Materials & Design*, Vol. 55, pp. 619–632, 2014.
- [16] H. Pashazadeh, A. Masoumi & J. Teimournezhad, “Numerical modelling for the hardness evaluation of friction stir welded copper metals”, *Materials & Design*, Vol. 55, pp. 619–632, 2014.
- صورت یک نیم‌دایره ناقص و ثابت زمانی دوم در محدوده فرکانس‌های میانی تا کم مشاهده می‌شود.
- ۶- نتایج حاصل از مدل‌سازی با مدار معادل الکتریکی نشان داد که برای مس جوشکاری شده به‌روش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت پیشروی پین برابر با ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، بیشترین مقاومت پلاریزاسیون به دست می‌آید که با نتایج به‌دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون تافل (کمترین میزان چگالی جریان خوردگی) نیز در تطابق کامل است.
- ### ۵- مراجع
- [1] C. S. Paglia & R. G. Buchheit, “A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds”, *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 383–387, 2008.
- [2] V. Proton, J. I. Alexis, E. Andrieu, J. Delfosse, M. C. Lafont & C. Blanc, “Characterisation and understanding of the corrosion behaviour of the nugget in a 2050 aluminium alloy Friction Stir Welding joint”, *Corrosion Science*, Vol. 73, pp. 130–142, 2013.
- [3] D. R. Ni, B. L. Xiao, Z. Y. Ma, Y. X. Qiao & Y. G. Zheng, “Corrosion properties of friction-stir processed cast NiAl bronze”, *Corrosion Science*, Vol. 52, pp. 1610–1617, 2010.
- [4] Squillace, A. De Fenzo, G. Giorleo & F. Bellucci, “A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, pp. 97–105, 2004.
- [5] R. C. Zeng, J. Chen, W. Dietzel, R. Zettler, J. F. dos Santos, M. L. Nascimento & K. U. Kainer, “Corrosion of friction stir welded magnesium alloy AM50”, *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 1738–1746, 2009.
- [6] T. Chen, W. Xue, Y. Li, X. Liu & J. Du, “Corrosion behavior of friction stir welded AZ31B magnesium alloy with plasma electrolytic oxidation coating formed in silicate electrolyte”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 144, pp. 462–469, 2014.
- [7] M. Sarvghad-Moghaddam, R. Parvizi, A. Davoodi, M. Haddad-Sabzevar & A. Imani, “Establishing a correlation between interfacial microstructures and

[18] J. J. Shim & J. G. Kim, "Copper corrosion in potable water distribution systems: influence of copper products on the corrosion behavior", *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 2002–2006, 2004.

Design, Vol. 49, pp. 913–921, 2013.

[17] Y. M. Hwang, P. L. Fan & C. H. Lin, "Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 1667–1672, 2010.

۶- پی نوشت

- [1] Friction Stir Welding (FSW)
- [2] The Welding Institute (TWI)
- [3] Base Metal (BM)
- [4] Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)
- [5] Heat Affected Zone (HAZ)
- [6] Nugget Zone