

بررسی رفتار خوردگی جوش همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ با روش کاوشگر روبشی کلوین استاندارد

علی عرب زاده^۱، بهمن کروجی^{۲*}، سید مصطفی موسوی زاده^۲، سید علیرضا حسینی^۴

^۱ دکتری، ^۲ استادیار، ^۴ دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۳ استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه گناباد، گناباد، ایران

* نویسنده مسئول: b.korojy@hsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

چکیده

در این تحقیق رفتار خوردگی جوش همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای^۱ آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ بررسی شده و با رفتار خوردگی فلز پایه مورد مقایسه قرار گرفته است. نمونه جوشکاری با سرعت چرخش ۲۵۰۰ دور در دقیقه در مدت زمان نگهداری ۱۲ ثانیه انجام شد. میزان فروروی ابزار در سطح نمونه ۰/۱ میلی‌متر، قطر ابزار ۱۶ میلی‌متر و زائده دایره‌ای شکل زیر نمونه‌ها با قطر ۱۰ و ارتفاع ۰/۴ میلی‌متر از سطح میز کار تعبیه شدند. با استفاده از روش آزمون پلاریزاسیون تافلی و کاوشگر روبشی کلوین استاندارد^۲ و از طریق تغییرات پتانسیل سطوح جوش و فلز پایه و همچنین تغییرات چگالی شدت جریان خوردگی، رفتار خوردگی جوش همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پتانسیل خوردگی ناحیه جوش در مقایسه با فلز پایه کاهش می‌یابد. اما این کاهش منجر به افزایش قابل ملاحظه چگالی جریان خوردگی نشده است. همچنین ناحیه جوش ایجاد شده دارای بیشترین چگالی جریان خوردگی و ناحیه فلز پایه دارای کمترین چگالی جریان خوردگی بوده است.

کلیدواژه: جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای؛ کاوشگر روبشی کلوین؛ رفتار خوردگی؛ آلومینیم ۲۰۲۴

1 - Projection Friction Stir Spot Welding, (PFSSW)
 2 - Standard scanning Kelvin Probe, (SKP)

Investigating Into the Corrosion Behavior of Friction Stir Welding of 2024 Aluminum Alloy by Standard Scanning Kelvin Probe Method

A. Arabzadeh¹, B.Korojy^{2*}, S.M.Mousavizade³, SA. Hosseini⁴

¹Ph. D, ² Assistant Professor, ⁴Associate Professor, Department of Materials and Polymer engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

³Assistant Professor, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

* Corresponding Author: b.korojy@hsu.ac.ir

Submission: 2022,12,14

Acceptance: 2023,02,06

Abstract

In the present study, the corrosion behavior of projection friction stir spot welding of 2024 aluminum alloy has been investigated and compared with the corrosion behavior of the base metal. Welding of sample was performed with the rotation speed of 2500 rpm and the dwell time of 12 seconds. The penetration depth of the tool on the surface of the sample was 0.1 mm, the diameter of the tool was 16 mm, and a circular protrusion with a diameter of 10 mm and a height of 0.4 mm was placed below the working table. By using Tafel polarization test method and standard Scanning Kelvin Probe through potential change of weld surfaces and base metal as well as change in corrosion current density, the corrosion behavior of projection friction stir spot welding was investigated. The results showed that the corrosion potential of the weld area is reduced compared to the base metal, although this reduction has not led to a significant increase in corrosion current density. Also, the welding zone has higher corrosion current density than the base metal region.

Keywords: Projection Friction Stir spot welding; Scanning Kelvin probe; corrosion behavior; 2024 aluminum alloy

۱- مقدمه

امروزه با توجه به کاربرد فراوان آلیاژهای آلومینیم در صنایع اتومبیل، هوا فضا، نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی و دیگر صنایع مرتبط، جوشکاری و اتصالات این آلیاژها از اهمیت خاصی برخوردار است [۱]. روش‌های اتصال نقطه‌ای در صنایع مختلف کاربرد فراوان دارند. استفاده از روش مناسب و مقرون به صرفه در اتصال نقطه‌ای محصولات صنعتی نقش مهمی در افزایش کیفیت آن‌ها دارد. وجود جوش‌های نقطه‌ای با کیفیت نامطلوب می‌تواند سبب کاهش کیفیت محصولات صناعی که از ورق فلزی استفاده می‌کنند، مانند صنایع خودروسازی، هوا فضا، نفت و تجهیزات پالایشگاهی گردد چرا که از یک طرف در وسایل نقلیه به هنگام تصادفات جوش‌های نقطه‌ای نقش مهمی در جذب انرژی و انتقال نیرو ایفا می‌کنند و می‌توانند تعیین کننده ایمنی سرنشینان وسیله نقلیه باشند و از طرفی در صنایع نفت و گاز این جوش‌ها در معرض دما، فشار، بارهای متناوب، لرزش و سیالات مختلف قرار دارند، لذا می‌بایست از مقاومت به خوردگی و استحکام بالایی برخوردار باشند. علاوه بر این، حرکت در مسیرهای ناهموار و شرایط متغیر رانندگی همواره سبب اعمال بار اضافی بر جوش‌های نقطه‌ای می‌شوند [۲-۵]. در صنایع پالایشگاهی و پتروشیمی نیز این اتصالات نه تنها از نظر استحکام مکانیکی دارای اهمیت هستند بلکه با توجه به شرایط محیطی، می‌بایست از نظر مقاومت در برابر خوردگی نیز در وضعیت مطلوبی قرار گیرند. تولید جوش‌های با استحکام بالا، بدون عیب و مقاوم در برابر خوردگی، نیازمند استفاده از روش‌های جوشکاری نقطه‌ای مقرون به صرفه و دارای کیفیت بالا است. کیفیت در جوشکاری نقطه‌ای به عوامل متعددی از قبیل مقاومت مکانیکی، مصرف انرژی و مقاومت در مقابل خوردگی مربوط می‌باشد [۱].

زرقانی و همکاران [۶] روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای را برای بررسی اثر زمان ماندگاری ابزار (۶، ۱۲ و ۱۸ ثانیه) بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیم ۲۰۲۴ به ضخامت ۱ میلی‌متر مورد بررسی

قرار دادند. دوران‌دیش و همکاران [۷] خواص مکانیکی و ریزساختاری جوش همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای ورق‌های آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ به ضخامت ۱ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. سرعت چرخشی ابزار و ارتفاع زائده به عنوان متغیرهای موثر برای ایجاد شرایط بهینه جوش مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که جوش‌های عاری از سوراخ کلیدی ایجاد شده توسط این روش دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به جوش همزن اصطکاکی معمول می‌باشند.

۱-۱ - خوردگی در جوش همزن اصطکاکی

آلیاژهای آلومینیم

توزت و همکاران [۸] ارتباط بین ریزساختار، سختی و حساسیت به خوردگی اتصالات جوش همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ را با استفاده از دو روش آزمون خوردگی بین دانه‌ای نرمالیزه شده مطابق استاندارد ASTM-G110 و اندازه گیری پتانسیل الکتروشیمیایی مدار باز مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که ناحیه HAZ نزدیک به TMAZ به خاطر حضور خطوط پیوسته‌ی رسوبات فاز $S'(S)$ در مرز دانه‌ها مستعدترین ناحیه به خوردگی بین دانه‌ای است. ناحیه HAZ مجاور TMAZ مستعدترین ناحیه برای خوردگی است. در این ناحیه شیب بالایی از ریز سختی و یک پتانسیل الکترونگاتیوی پایدار وابسته به حضور نواحی آندی پیوسته‌ی بی شماری وجود دارد. این نواحی آندی که به صورت ترکیبات بین فلزی درشت و رسوبات بین دانه‌ای نرم $S'(S)$ مشخص هستند، مستعد هر دو نوع خوردگی حفره‌ای و بین دانه‌ای خواهند بود. در فلز پایه برخی از مرز دانه‌ها مورد حمله قرار گرفته و همچنین تعداد کمی حفره مشاهده شد. در ناحیه HAZ مجاور TMAZ، ناحیه‌ای همگن از خوردگی بین دانه‌ای و تعداد کمی حفره نیز همانند فلز پایه مشاهده شد. در ناحیه TMAZ، برخی مرز دانه‌ها مورد حمله قرار گرفته و تعدادی حفره وجود داشت. در ناحیه همزده

مکانیزم اصلی خوردگی، از نوع حفره‌ای است. [۸]. سترامان و همکاران [۹] ارزیابی خوردگی جوش همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیم AA۲۰۲۴ را به روش آزمون مه نمکی^۱ مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ورق نورد شده‌ی آلیاژ آلومینیم AA۲۰۲۴ با ضخامت ۵ میلی‌متر به روش همزن اصطکاکی جوشکاری شده است. عملکرد خوردگی نمونه‌ها در محلول NaCl بوسیله آزمون مه نمکی در مقادیر pH و غلظت‌های مختلف یون کلر و زمان پاشش متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نرخ خوردگی در pH خنثی کاهش پیدا کرد و در pH های اسیدی و قلیایی نرخ خوردگی افزایش یافت. همچنین مشخص شد که سرعت خوردگی با افزایش زمان پاشش، کاهش یافت، اما با افزایش زمان و افزایش غلظت یون کلرید شکل خوردگی به شکل یکنواخت تمایل پیدا کرد و نرخ خوردگی در آزمایش خوردگی پاشش نمک افزایش یافت. در مطالعه ریز ساختاری مشخص شد که مورفولوژی خوردگی و حفره دار شدن در جوش همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ بستگی به میزان pH محلول، زمان پاشش و غلظت یون کلرید دارد. همچنین، فاز S یعنی فاز ثانویه، نسبت به فلز پایه $\alpha(Al)$ به صورت کاتدی عمل کرده و عامل افزایش میزان خوردگی است [۹]. یاساکو و همکاران [۱۰]، ساختار خوردگی و مهار خوردگی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ را توسط روش SKPFM مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تاثیر خوردگی با اندازه‌گیری پتانسیل ولتا و نقشه‌برداری سطحی فلز پایه و ذرات بین فلزی فاز S بعد از غوطه‌وری در الکترولیت‌های مختلف با pH متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که حضور آنیون‌های کلرید در محلول الکترولیت باعث افزایش پتانسیل سطح فلز آلومینیم تا حدود ۱۰۰ میلی‌ولت گردید. این افزایش پتانسیل می‌تواند ناشی از جذب یون‌های کلرید و ادغام آن‌ها در لایه اکسید سطحی بوده که باعث تغییر خواص نیمه‌هادی لایه اکسید شده است. نواحی اطراف ذرات بین فلزی فاز S به‌طور

قابل توجهی تغییر یافتند که نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه پتانسیل در این نواحی است. این نواحی با افزایش میزان اکسیژن در ارتباط هستند که نشان‌دهنده تشکیل لایه اکسید ضخیم‌تر به دلیل پلاریزاسیون موضعی است. مایکل رودر و همکاران [۱۱] ضمن معرفی حالت کاوشگر کلون در میکروسکوپ نیروی اتمی (SKPFM) در زمینه‌های مختلف از علم خوردگی گرفته تا علوم زیستی، آن را با تکنیک کاوشگر روبشی کلون استاندارد مقایسه نمودند. برای بسیاری از این کاربردها، وضوح بالا^۲ مورد نیاز است زیرا اطلاعات مربوطه در لایه‌های زیر میکروسکوپی و پتانسیل سطوح مربوطه نهفته است که تمایل به استفاده از این روش را افزایش می‌دهد. با این حال در مقایسه با روش کاوشگر روبشی کلون استاندارد، داده‌های اندازه‌گیری شده در روش SKPFM دارای پیچیدگی و خطاهای بیشتری است. به همین دلیل استفاده از روش SKP در آزمون‌های خوردگی قابلیت اطمینان و کاربرد بیشتری دارد و معمولاً در روش SKPFM کنتراست پتانسیل دقیقی بدست نمی‌آید. همچنین نتایج آزمایش در روش SKP از وضوح بالاتری برخوردار است.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- معرفی فلز پایه

در این پژوهش ورق‌هایی مستطیل شکل از جنس آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ با ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۴/۵ در ۱۰/۵ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی ورق‌ها با استفاده از دستگاه کوانتومتر^۴ اندازه‌گیری شد و در جدول ۱ گزارش شده است.

۲-۲- معرفی روش جوشکاری همزن اصطکاکی

نقطه‌ای زائده‌ای و ابزار جوشکاری

روش جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق که برای ایجاد جوش همزن اصطکاکی بدون سوراخ کلیدی، براساس ابزار بدون پین و طراحی خاص زائده بر روی سندان معرفی شده (شکل ۱) خواص مکانیکی خوبی از خود نشان داد [۱، ۱۲].

- 1 - Salt fog test
- 2 - Salt spray corrosion test
- 3 - High resolution
- 4 - Quantometer

۱۳]. جزییات روش جوشکاری و ابزار مورد استفاده قبلاً گزارش شده است [۱۳، ۱].

۲-۳- پارامترهای جوشکاری

در پژوهش حاضر بعد از آزمونهای جوشکاری متعدد کارگاهی در پارامترهای متفاوت، نمونه ایی بر اساس سالم بودن ظاهر جوش و حفظ خواص مکانیکی و ریزساختاری انتخاب شد [۱۳، ۶، ۷، ۱۳]. نمونه سالم انتخاب شده با سرعت چرخش ۲۵۰۰ دور در دقیقه در مدت زمان نگهداری ۱۲ ثانیه جوشکاری شده است. میزان فروروی ابزار در سطح نمونه ۰/۱ میلی متر در نظر گرفته شد. قطر ابزار ۱۶ میلی متر و زائده دایره ای شکل دارای قطر ۱۰ و ارتفاع ۰/۴ میلی متر از سطح میز کار در نظر گرفته شد.

۲-۴- آزمونهای خوردگی

جهت بررسی خوردگی جوش همزن اصطکاکی نقطه ایی زائده ایی، آزمونهای پلاریزاسیون سیکلی، آزمون غوطه وری نمونه ها در محلول خورنده NaCl ۳٪/۵ و آزمون کاوشگر روبشی کلین استاندارد قبل و بعد از غوطه وری نمونه در محلول خورنده انجام شد.

۲-۴-۱- روش آزمونهای پلاریزاسیون تافلی

آزمونهای الکتروشیمیایی پلاریزاسیون تافلی روی مقطع عرضی ناحیه جوش نمونه به مساحت ۱۰ میلی متر مربع انجام شده است. برای این منظور، اطراف ناحیه جوش با رزین اپوکسی مانت شد تا سطحی صاف و یکنواخت از مقطع عرضی ناحیه جوش برای انجام آزمونهای الکتروشیمیایی در دسترس باشد. قبل از انجام آزمایشها، ابتدا نمونه مانت شده با سمباده های شماره ۲۲۰، ۳۲۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰، ۱۰۰۰،

۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ صیقل کاری شده و در ادامه با آب مقطر شستشو و با اتیل الکل چربی گیری و شستشوی نهایی شد. در ادامه برای جلوگیری از تماس محلول خورنده با فلز پایه در نواحی مجاور جوش (نواحی غیر جوش)، این نواحی با لاک عایق شدند.

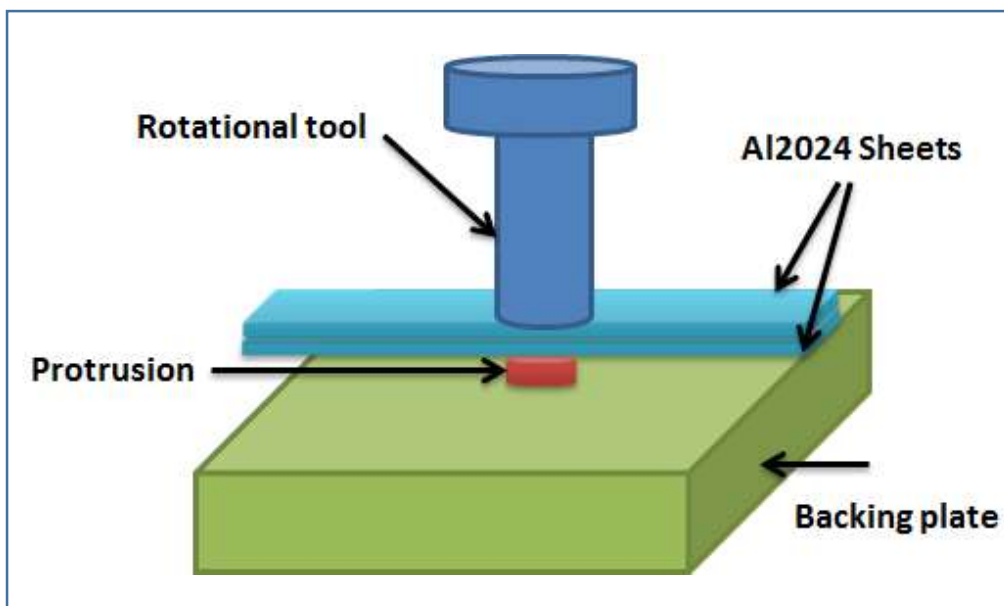
آزمونهای پلاریزاسیون در محلول ساکن ۳/۵ در صد کلرید سدیم و در دمای اتاق انجام شد. در سلول آزمایش، از یک میله گرافیتی به عنوان الکترود کمکی و از الکترود Ag/AgCl با محلول اشباع از AgCl به عنوان الکترود مرجع استفاده شد. آزمونهای پلاریزاسیون بلافاصله پس از تثبیت پتانسیل مدار باز نمونه ها که حدود ۴۵۰ میلی ولت بود انجام شد. مدت زمان تثبیت پتانسیل برای همه نمونه ها حدود یک ساعت بوده است. معیار شروع آزمایشها عدم تغییر پتانسیل مدار باز بیشتر از ۵ mV در محدوده زمانی ۱۰ دقیقه بوده است [۱۴]. آزمونهای پلاریزاسیون با دستگاه ACM Field Machine انجام شد. نرخ روبش پتانسیل ۱ mV.sec-۰/۵ بوده و روبش پتانسیل از ۲۰۰ میلی ولت منفی تر از پتانسیل خوردگی شروع و تا حدود ۲۰۰ میلی ولت مثبت تر از پتانسیل خوردگی ادامه یافت. تجزیه و تحلیل نمودارهای پلاریزاسیون نیز توسط نرم افزار Origin 2022 انجام شد.

۲-۴-۲- آزمون غوطه وری

به منظور بررسی خوردگی سطوح جوشکاری شده قبل و بعد از غوطه وری و اثر محلول خورنده بر روی آن، نمونه جوشی تا سمباده شماره ۴۰۰۰ صیقل کاری شده و سپس غوطه وری آنها به مدت ۲۰ ساعت در محلول کلرید سدیم ۳/۵ در صد وزنی در دمای محیط انجام شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴

عنصر	Cr	Si	Zn	Fe	Mn	Mg	Cu	Al
درصد وزنی	۰/۰۱۲۳	۰/۰۸۴	۰/۱۴	۰/۲۳۹	۰/۶۲۹	۱/۲۸	۴/۹	باقی مانده



شکل ۱ - طرح کلی از ابزارهای جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای مورد استفاده در این تحقیق [۱۳]

نمونه‌ها ۵۰ μm انتخاب شده است. برای تحلیل آماری نتایج آزمون‌های SKP از نرم‌افزارهای Excel، Matlab و MagicPlotPro استفاده شد. به منظور درک بهتر نتایج آزمون‌های SKP، از تابع گاوسی (رابطه ۱) برای برازش نحوه توزیع داده‌های پتانسیل استفاده شد [۱۵، ۱۶]:

$$Y = \frac{1}{\sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp \left[-\frac{2(x - \mu)^2}{\sigma^2} \right] \quad \text{رابطه (۱)}$$

شکل این تابع زنگوله‌ای متقارن است که به سرعت به صفر نزول می‌کند. در رابطه فوق، Y عدد شمارش، σ انحراف استاندارد داده‌ها (تعیین کننده میزان کشیدگی یا پهن شدگی زنگوله)، μ مقدار میانگین (محل مرکز قله نمودار برازش) داده‌های پتانسیل و X عدد پتانسیل است [۱۶].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون پلاریزاسیون

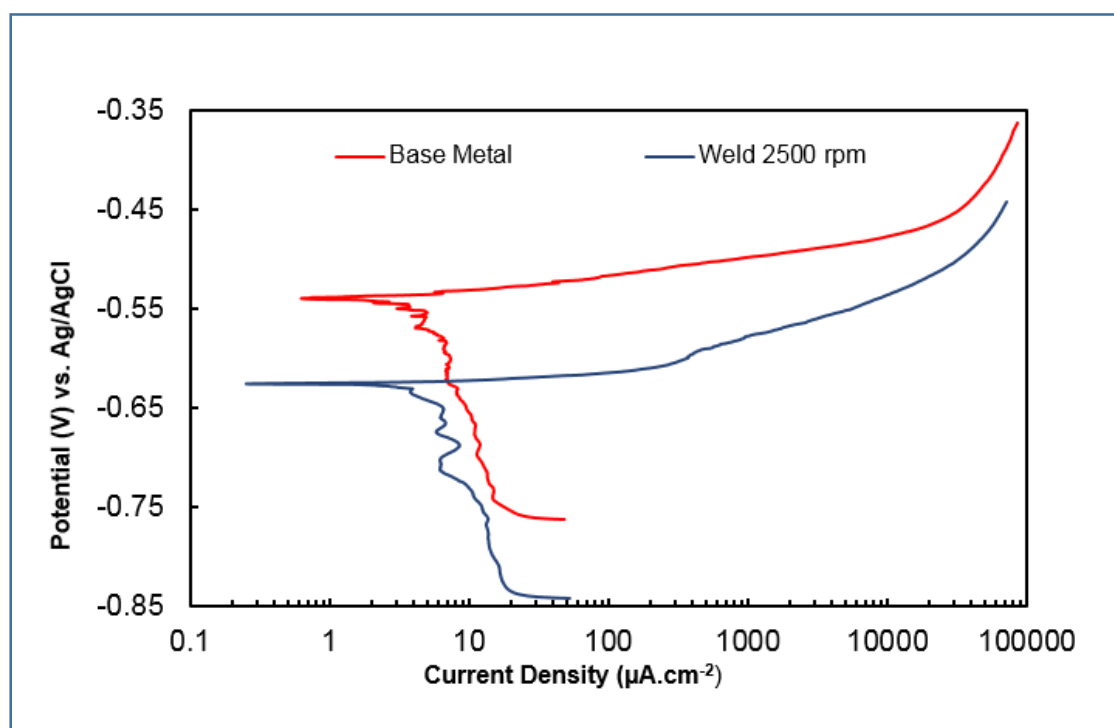
نمودارهای پلاریزاسیون تافلی فلز پایه و فلز جوش در شکل ۲ آورده شده است. نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای پلاریزاسیون در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که

۲-۳- آزمون کاوشگر روبشی کلون استاندارد

آزمون‌های کاوشگر روبشی کلون استاندارد در مقطع عرضی نمونه‌ها انجام شد. این آزمون‌ها قبل از غوطه‌وری نمونه‌ها و همچنین بعد از ۲۰ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳/۵ در صد وزنی انجام شده است. برای انجام آزمون‌های SKP قبل از غوطه‌وری، ابتدا نمونه‌ها با سمباده‌های شماره ۲۲۰، ۳۲۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ صیقل کاری شده و در ادامه با آب مقطر شستشو و با اتیل الکل چربی‌گیری و شستشوی نهایی شدند. این آزمون‌ها روی نمونه‌ها پس از پایان ۲۰ ساعت غوطه‌وری نیز انجام شده است. آزمون‌های SKP توسط دستگاه Scanning Electrochemical Workstation Model M370 ساخت شرکت Uniscan انجام شده است. همچنین، این آزمون‌ها در دما و اتمسفر اتاق (با رطوبت نسبی ۲۵٪) انجام شده است. برای انجام آزمون‌های SKP از یک پروب تنگستن با قطر ۵۰ μm استفاده شد. فاصله نوک پروب تنگستن از سطح نمونه‌ها هنگام اجرای آزمون‌های SKP در حدود ۱۰۰ μm تنظیم گردید. همچنین پروب تنگستن با دامنه ۳۰ μm و فرکانس ۸۰ Hz در ارتعاش بوده است. گام روبش در جهت طول نمونه ۱۰ μm و در جهت عرض

مشاهده می‌شود، شاخه آندی نمودار پلاریزاسیون نمونه‌ها با تغییرات بسیار کم پتانسیل، افزایش شدید جریان را تجربه کرده است. به عبارت دیگر، نمودارهای پلاریزاسیون برای نمونه‌ها دارای شیب Tafel بسیار کمی در شاخه آندی (β_a) هستند. این بدان معنی است که نمونه‌ها در محلول خورنده رفتار روئین یا شبه روئین را تجربه نکرده و صرفاً به صورت فعال دچار خوردگی شده‌اند. از سوی دیگر، امکان تفکیک پتانسیل شکست لایه روئین از پتانسیل خوردگی، در نمودارهای پلاریزاسیون وجود ندارد. به عبارت دیگر، پتانسیل شکست لایه روئین و پتانسیل خوردگی عملاً بسیار نزدیک به هم هستند. این نوع رفتار پلاریزاسیون بیانگر حساسیت شدید نمونه مورد آزمایش به خوردگی حفره‌ای است و نشان می‌دهد که خوردگی حفره‌ای در پتانسیل خوردگی رخ می‌دهد [۱۷]. میزان نويز مشاهده شده در شاخه کاتدی می‌تواند به دلیل مساحت بسیار کم ناحیه جوش و واکنش احیاء اکسیژن در این ناحیه باشد. شیب نسبتاً بالای

شاخه کاتدی نمودارهای پلاریزاسیون (β_c) نیز نشان می‌دهد که سرعت خوردگی تحت تأثیر پلاریزاسیون غلظتی قرار دارد و با پلاریزاسیون غلظتی کنترل می‌شود [۱۴]. نکته جالب توجه دیگر این است که با اعمال فرآیند جوشکاری PFSSW روی ورق آلومینیم، پتانسیل خوردگی ناحیه جوش به سمت مقادیر منفی‌تر منتقل می‌شود که بیانگر افزایش حساسیت به خوردگی ورق آلومینیم پس از اعمال فرآیند جوشکاری PFSSW است. با این حال، با تجزیه و تحلیل نمودارهای پلاریزاسیون طبق داده‌های استخراج شده از این نمودار در جدول ۲، مشاهده می‌شود که این انتقال پتانسیل منجر به افزایش قابل ملاحظه چگالی جریان خوردگی نمونه نشده است. همچنین مشاهده می‌شود خوردگی ناحیه جوش از نظر پتانسیل سطحی متفاوت از فلز پایه بوده است؛ ولی این تغییر قابل ملاحظه نبوده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نمونه جوش ایجاد شده دارای چگالی جریان خوردگی بیشتری نسبت به نمونه فلز پایه است.



شکل ۲ - نمودارهای پلاریزاسیون Tafel ناحیه جوش PFSSW آلومینیم ۲۰۲۴ در سرعت چرخش ابزار ۲۵۰۰ rpm و فلز پایه.

جدول ۲ - نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای پلاریزاسیون آلومینیم جوشکاری شده
 با روش PFSSW در سرعت‌های مختلف چرخش ابزار جوشکاری

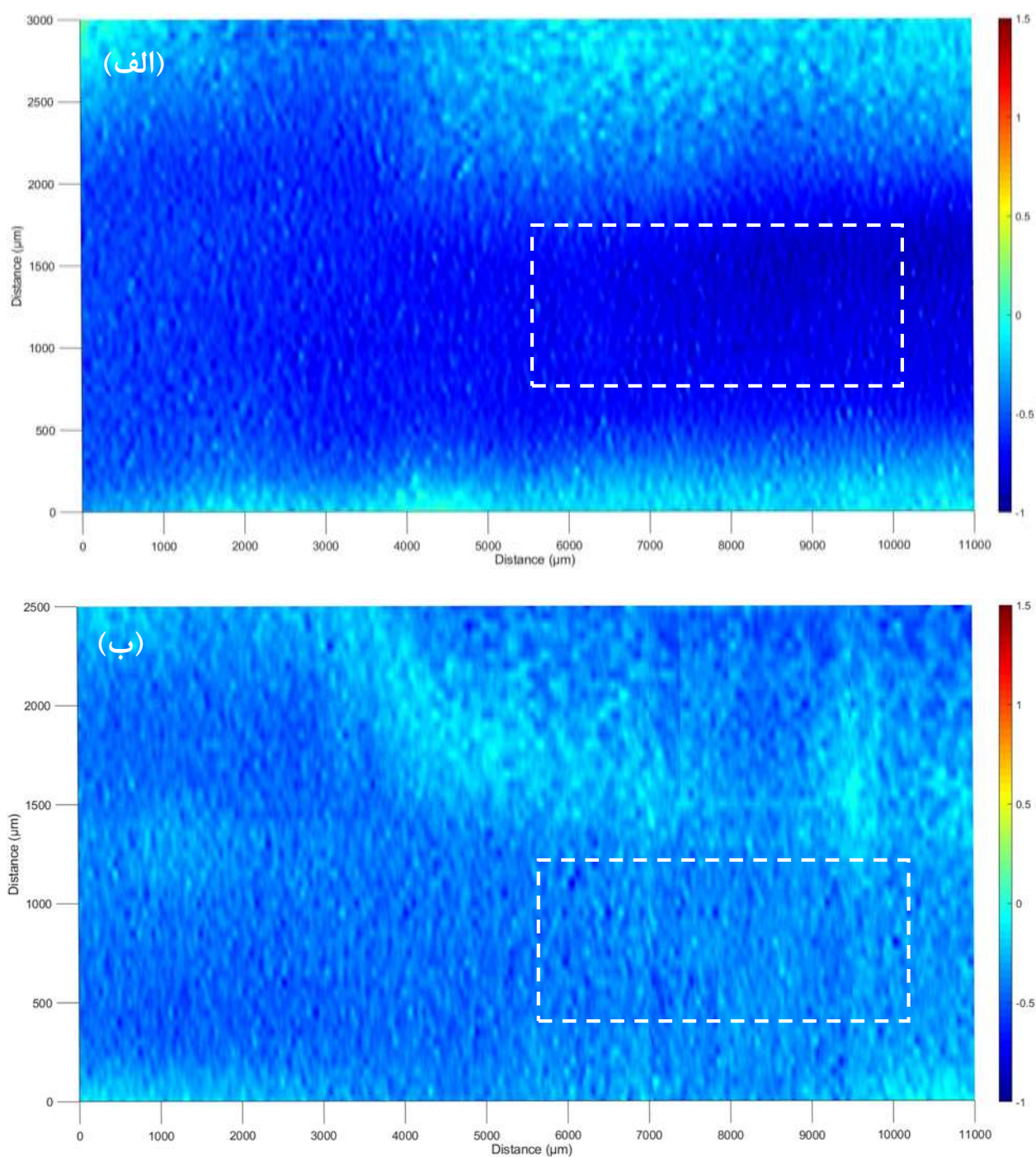
Sample	E_{corr} (mV) vs. Ag/AgCl	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	i_{corr} ($\mu A.cm^{-2}$)
Base	-541	18	335	4.75
2500 rpm	-626	7.7	309	4.9

۳ - ۲ - نتایج آزمون کاوشگر روبشی کلین استاندارد

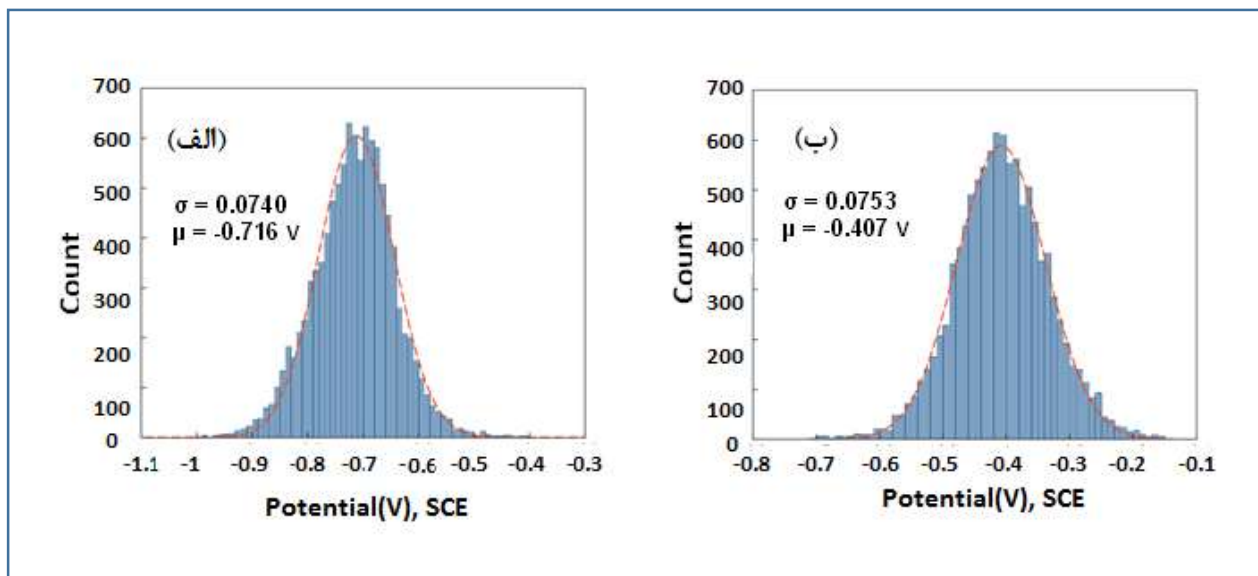
در شکل ۳ نتایج آزمون‌های SKP برای نمونه جوشکاری شده با سرعت ۲۵۰۰ rpm قبل و بعد از ۲۰ ساعت غوطه‌وری ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع پتانسیل این نمونه جوش قبل از آزمون غوطه‌وری از سمت فلز پایه به سمت مرکز جوش دارای یک روند کاهشی است. غوطه‌وری به مدت ۲۰ ساعت در محلول کلرید سدیم و خوردگی سطح فلز (در ناحیه جوش و فلز پایه) منجر به افزایش پتانسیل سطح برای همه نقاط سطح شده است. در شکل ۴ هیستوگرام‌های توزیع داده‌های پتانسیل در ناحیه انتخابی جوش (ناحیه محصور در داخل مستطیل خط‌چین) ارائه شده است. همچنین در شکل ۵ منحنی‌های برازش گاوسی هیستوگرام‌های بدست آمده برای مقایسه بهتر، روی یک نمودار نشان داده شده است. بر اساس تحلیل و برازش نمودارهای هیستوگرام با تابع گاوس، مشاهده می‌شود مقدار میانگین پتانسیل سطح از ۷۱۶- به ۴۰۷ mV- افزایش یافته است. این افزایش پتانسیل نتیجه وقوع خوردگی روی سطح فلز و تجمع لایه نازکی از محصولات خوردگی روی سطح جوش است [۱۳]. با این حال مشاهده می‌شود که همه نقاط سطح جوش تقریباً دارای

شدت خوردگی یکسانی بوده و خوردگی در بخش خاصی از سطح به ویژه در مرز بین جوش و فلز پایه متمرکز نبوده است. لذا بر اساس نتایج آزمون SKP، به نظر می‌رسد جوشکاری با سرعت چرخش ابزار ۲۵۰۰ rpm منجر به حساسیت نواحی خاصی از جوش به ویژه نواحی مرزی آن با فلز پایه نشود.

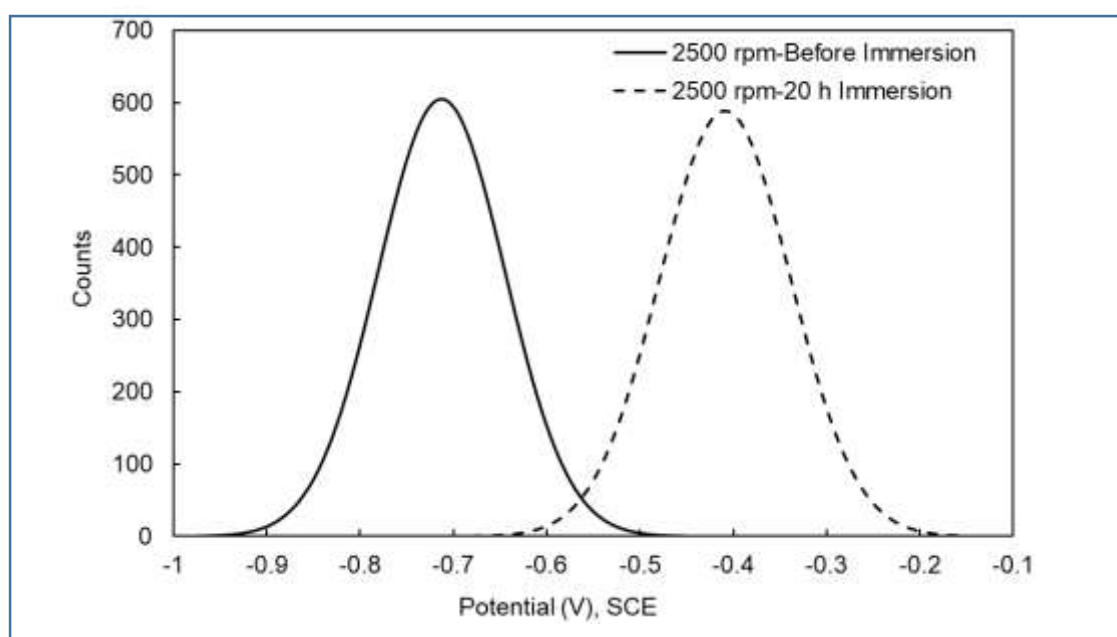
مقایسه نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون و SKP تقریباً شرایط یکسانی از وضعیت خوردگی نمونه‌ها را پیش‌بینی می‌کنند. بر اساس نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون، نمونه ۲۵۰۰ rpm دارای چگالی جریان خوردگی بیشتری نسبت به نمونه فلز پایه بوده است. در نمودارهای SKP نیز پتانسیل‌های به مراتب منفی‌تری برای نمونه جوشی با سرعت دورانی ابزار rpm ۲۵۰۰ در مقایسه با بخش فلز پایه ثبت شده است. نمونه جوشی با سرعت دورانی rpm ۲۵۰۰ هر چند تا حدودی پتانسیل منفی‌تری نسبت به نمونه فلز پایه داشته است ولی هر دو نمونه خوردگی یکنواختی را بر روی کل سطح تجربه کرده‌اند. همچنین به دلیل خوردگی یکنواخت‌تر و به تبع آن تجمع یکنواخت‌تر محصولات خوردگی بر روی سطح فلز پایه، چگالی جریان خوردگی روی سطح فلز پایه به نسبت کمتر بوده است.



شکل ۳- توزیع پتانسیل سطحی (بر حسب SCE) روی سطح مقطع عرضی نمونه‌های آلومینیومی جوشکاری شده با روش PFSSW با سرعت چرخش ابزار ۲۵۰۰ دور بر دقیقه: (الف) قبل از غوطه‌وری و (ب) بعد از ۲۰ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در دمای اتاق و شرایط ساکن.



شکل ۴ - هیستوگرام توزیع پتانسیل سطحی در ناحیه جوش نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش ابزار ۲۵۰۰ rpm (الف) قبل از غوطه‌وری و (ب) بعد از ۲۰ ساعت غوطه‌وری با توجه به نتایج آزمون SKP در شکل ۳ و منحنی برازش گاوسی (نمودارهای قرمز).



شکل ۵ - مقایسه منحنی‌های برازش گاوسی طبق شکل ۴.

نتیجه گیری

در این تحقیق، وضعیت خوردگی نمونه‌های آلومینیم ۲۰۲۴ جوشکاری شده با روش PFSSW با دو روش الکتروشیمیایی پلاریزاسیون و کاوشگر روبشی کلوین استاندارد بررسی شده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق به شرح ذیل است:

بر اساس آزمون‌های پلاریزاسیون، پتانسیل خوردگی ناحیه جوش در مقایسه با فلز پایه حدود ۰/۳۵ ولت کاهش یافته اما این کاهش منجر به افزایش قابل ملاحظه چگالی جریان خوردگی نشده است.

بر اساس شیب بسیار کم شاخه آندی نمودارهای پلاریزاسیون (۱۸ برای بخش جوش و ۷/۷ برای فلز پایه)، وقوع خوردگی حفره‌ای برای همه قسمت‌های نمونه در غوطه‌وری دراز مدت پیش‌بینی می‌شود.

بر اساس نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون، جوش ایجاد شده در سرعت چرخش ابزار ۲۵۰۰ rpm دارای بیشترین چگالی جریان خوردگی ($4/9 \mu A.cm^{-2}$) و ناحیه فلز پایه دارای کمترین چگالی جریان خوردگی ($4/75 \mu A.cm^{-2}$) بوده است.

بر اساس نتایج آزمون SKP، پتانسیل سطح فلز از سمت فلز پایه به سمت مرکز جوش مطابق شاخص‌های رنگی مربوط به تغییرات پتانسیل در نمودارها دارای یک روند کاهشی بوده است. این رفتار به احتمال زیاد نتیجه توزیع افزایشی انرژی سطحی از لبه‌های جوش به سمت مرکز جوش است که در اثر افزایش تدریجی نیروی اعمالی ابزار از لبه‌ها به سمت مرکز جوش رخ داده است.

غوطه‌وری نمونه در محلول خورنده کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی منجر به خوردگی سطح نمونه جوشی و افزایش پتانسیل سطحی نمونه از ۰/۷۱۶- ولت به ۰/۴۰۷- ولت شده است.

با توجه به نتایج آزمون پلاریزاسیون و کلوین پروب ناحیه جوش ایجاد شده در نمونه آلومینیم ۲۰۲۴ به روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای از مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به فلز پایه برخوردار است.

مراجع

- [1] A. Arabzadeh, S.M. Mousavizade, B. Korojy, S.A. Hosseini, Projection Friction Stir Spot Welding: A New Welding Technique for Creating Safe and Reliable Aluminum Welds, Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology 9(3) (2020) 61-76.
- [2] M. Pouranvari, S. Marashi, Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties, Science and Technology of welding and joining 18(5) (2013) 361-403.
- [3] M. Pouranvari, S. Marashi, On failure mode of resistance spot welded DP980 advanced high strength steel, Canadian Metallurgical Quarterly 51(4) (2012) 447-455.
- [4] M. Pouranvari, S. Marashi, Key factors influencing mechanical performance of dual phase steel resistance spot welds, Science and Technology of Welding And Joining 15(2) (2010) 149-155.
- [5] M. Pouranvari, S. Marashi, Factors affecting mechanical properties of resistance spot welds, Materials Science and Technology 26(9) (2010) 1137-1144.
- [6] F. Zarghani, S. Mousavizade, H. Ezatpour, G. Ebrahimi, High mechanical performance of similar Al joints produced by a novel spot friction welding technique, Vacuum 147 (2018) 172-186.
- [7] S. Dourandish, S. Mousavizade, H. Ezatpour, G. Ebrahimi, Microstructure, mechanical properties and failure behaviour of protrusion friction stir spot welded 2024 aluminium alloy sheets, Science and Technology of Welding and Joining 23(4) (2018) 295-307.

- [8] E. Bousquet, A. Poulon-Quintin, M. Puiggali, O. Devos, M. Touzet, Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024-T3 friction stir welded joint, *Corrosion Science* 53(9) (2011) 3026-3034.
- [9] R. Seetharaman, V. Ravisankar, V. Balasubramanian, Corrosion performance of friction stir welded AA2024 aluminium alloy under salt fog conditions, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 25(5) (2015) 1427-1438.
- [10] K. Yasakau, M.L. Zheludkevich, M.G. Ferreira, Study of the corrosion mechanism and corrosion inhibition of 2024 aluminum alloy by SKPFM technique, *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ, 2008, pp. 405-409.
- [11] M. Rohwerder, F. Turcu, High-resolution Kelvin probe microscopy in corrosion science: scanning Kelvin probe force microscopy (SKPFM) versus classical scanning Kelvin probe (SKP), *Electrochimica Acta* 53(2) (2007) 290-299.
- [12] S.M. Mousavizade, M. Pouranvari, Projection friction stir spot welding: a pathway to produce strong keyhole-free welds, *Science and Technology of Welding and Joining* (2018) 1-7.
- [13] A. Arabzadeh, B. Korojy, S.M. Mousavizade, S.A. Hosseini, Corrosion investigation of projection friction stir spot welding of Al 2024 sheets in oil and gas industry, *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Technology* 9(1) (2022) 39-48.
- [14] R.G. Kelly, J.R. Scully, D. Shoesmith, R.G. Buchheit, *Electrochemical techniques in corrosion science and engineering*, CRC Press 2002.
- [15] B. Łosiewicz, M. Popczyk, M. Szklarska, A. Smółka, P. Osak, A. Budniok, Application of the scanning kelvin probe technique for characterization of corrosion interfaces, *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publ, 2015, pp. 369-382.
- [16] E. Rahimi, A. Rafsanjani-Abbasi, A. Imani, S. Hosseinpour, A. Davoodi, Correlation of surface Volta potential with galvanic corrosion initiation sites in solid-state welded Ti-Cu bimetal using AFM-SKPFM, *Corrosion Science* 140 (2018) 30-39.
- [17] W. Tait, *An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists*. 1994, Racine, WI: Pair O Docs Publications.