

بررسی رفتار خوردگی اتصالات غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۰ و ۶۰۸۲ به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

حمیده معین وزیری^۱، مریم احتشام زاده^۲، مصطفی حبیب نیا^۳، محسن شاکری^۴، سلمان نوروزی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۳ دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه نوشیروانی بابل

^۴ دانشیار، دانشگاه نوشیروانی بابل

^۵ استادیار، دانشگاه نوشیروانی بابل

* نویسنده مسئول: ehtesham@uk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۱۹

چکیده

در این مقاله ورق‌هایی از جنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۰ و ۶۰۸۲ با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ متصل شد. از سه منطقه ناحیه مرکزی خط جوش، ناحیه متأثر از جوش و فلز پایه در هر دو طرف خط جوش نمونه برداری شد و رفتار خوردگی این مناطق در محلول ۳/۵٪ NaCl و با روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین دانسیته جریان خوردگی مربوط به ناحیه مرکزی خط جوش در محل اتصال دو صفحه می‌باشد. در ورق‌های آلومینیوم، ناحیه متأثر از جوش مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به فلز پایه نشان داد با این حال مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در همه نواحی حفظ شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، رفتار خوردگی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.

Evaluating the Corrosion Behavior of Dissimilar Joints of Aluminum Alloys 6082 and 5050 to Stainless Steel 304 Produced by Friction Stir Welding

Hamideh Moeinvaziri¹, Maryam Ehteshamzadeh*², Mostafa Habibnia³, Mohsen Shakeri⁴, Salman Noruzi⁵

¹. M. SC. Student, Department of Material Science and Engineering, ShahidBahonar University of Kerman.

². Associate professor, Department of Material Science and Engineering, ShahidBahonar University of Kerman.

³. Ph. D student, Department of Mechanical Engineering, BabolNoshirvani University of Technology.

⁴. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, BabolNoshirvani University of Technology.

⁵. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, BabolNoshirvani University of Technology

* Corresponding Author: ehtesham@uk.ac.ir

Submission: February03, 2013 Acceptance: July 10, 2013

Abstract

In this research, sheets of aluminum alloys 6082 and 5050 were joined to stainless steel 304 by friction stir welding. The corrosion behavior of parent metal, heat affected zone and boundary line of joints in each side of the sheets was studied in 3.5% NaCl media by potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Results showed that maximum current density belonged to the galvanic cell of the boundary lines of the joints. For the aluminum sheets, the corrosion resistance of HAZ was lower than parent metals. On the other hand the corrosion resistance of stainless steel 304 was the same in all regions.

Keywords: Friction Stir Welding, Corrosion Behavior, Potentiodynamic Polarization, Electrochemical Impedance Spectroscopy.

۱- مقدمه

کاهش وزن وسیله نقلیه شده و نه تنها موجب کاهش هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت می‌شود بلکه در حفاظت از محیط زیست نیز مؤثر خواهد بود [۵]. این اتصالات می‌توانند کاربرد گسترده‌ای در صنایع کشتی‌سازی و حمل و نقل دریایی داشته باشند. مطالعاتی در زمینه رفتار خوردگی اتصالات همجنس آلومینیوم و یا فولاد صورت گرفته است [۶-۸]، اما در مورد اتصالات غیرهمجنس نیاز به تحقیقات بیشتر می‌باشد. در این تحقیق از آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۸۲ و ۵۰۵۰ و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ استفاده شده که همگی کاربرد فراوانی در صنایع دریایی دارند و رفتار خوردگی نواحی مختلف جوش در اتصالات ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱ آماده سازی ورق و انجام جوشکاری

ورق‌های نورد سرد شده آلومینیوم ۵۰۵۰ و ۶۰۸۲ به ضخامت سه میلی متر با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و به کمک دستگاه فرز عمودی به فولاد زنگ نزن آستیتی ۳۰۴ با ضخامت مشابه، متصل شد. نمونه‌ها در ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}^2$ بوسیله دستگاه گیوتین برش داده شده دستگاه فرز جهت موازی و مسطح نمودن لبه اتصال ماشینکاری و سپس سوهانکاری شد تا اکسیدهای محل اتصال کاملاً زدوده شود. سرعت خطی جوشکاری 50 mm/min ، مقدار آفست (فاصله پین از لبه ورق) $1/8 \text{ mm}$ ، مقدار زاویه انحراف (زاویه ابزار نسبت به محور افقی) 2° و مقدار سرعت دورانی 630 rpm انتخاب شد.

۲-۲ ارزیابی رفتار خوردگی

نمونه‌هایی به ابعاد 1 cm^2 از نواحی مختلف جوش شامل ناحیه مرکزی خط جوش، ناحیه متأثر از جوش و فلز پایه تهیه و به کمک کاغذ سنباده از شماره ۳۲۰ تا ۵۰۰۰ آماده سازی شد. تست‌های خوردگی الکتروشیمیایی بوسیله دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات EG&G مدل A263 با استفاده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSW) برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ در مؤسسه جوش انگلستان^۲ (TWI) به عنوان یک تکنیک جوشکاری حالت جامد ابداع شد. از آنجا که این روش یک فرآیند اتصال حالت جامد می‌باشد که هیچ ذوبی در حین فرآیند ایجاد نمی‌شود، عیوبی که در حالت‌های جوشکاری ذوبی به دلیل ذوب موضعی فلز بوجود می‌آید، در این روش حذف می‌شود. تغییرات میکروساختاری باعث ایجاد نواحی مختلف جوش می‌شود که این نواحی شامل فلز پایه^۳ (PM)، ناحیه متأثر از حرارت و کارمکانیکی^۴ (TAMZ)، ناحیه اغتشاش^۵ (SZ) و ناحیه متأثر از جوش^۶ (HAZ) می‌باشد. در ناحیه فلز پایه افزایش دما به اندازه‌ای نیست که سبب تغییر در ساختار ناحیه جوش شود. ناحیه متأثر از جوش که نسبت به دیگر نواحی بیشترین فاصله را از خط مرکزی جوش داراست در حین فرآیند تغییر شکل پلاستیک نمی‌دهد، اما میکروساختار در اثر سیکل‌های حرارتی تغییر کرده و بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد. در ناحیه متأثر از حرارت و کارمکانیکی علاوه بر تغییر دما، کارمکانیکی نیز روی فلز انجام می‌شود. ناحیه اغتشاش که در واقع محل تماس قطعه کار و پین است، ناحیه‌ای با تبلور مجدد کامل می‌باشد و ماده در دمای بالا و تحت تغییر شکل نسبتاً شدید قرار می‌گیرد [۱-۳]. اتصال فلزات غیرهمجنس یک ایده جالب در صنعت طراحی و ساخت قطعات صنعتی می‌باشد. هدف از اتصال دو فلز غیرهمجنس ترکیب خواص مکانیکی و حرارتی دو فلز است. به عنوان مثال ترکیب خواص مکانیکی همچون استحکام بالای فلز اولیه و خواصی مانند مقاومت به خوردگی فلز ثانویه که می‌تواند در صنایع زیادی استفاده شود [۴]. در وسایل نقلیه اتصال فولاد به آلومینیوم باعث

1. Friction Stir Welding

2. The Welding Institute

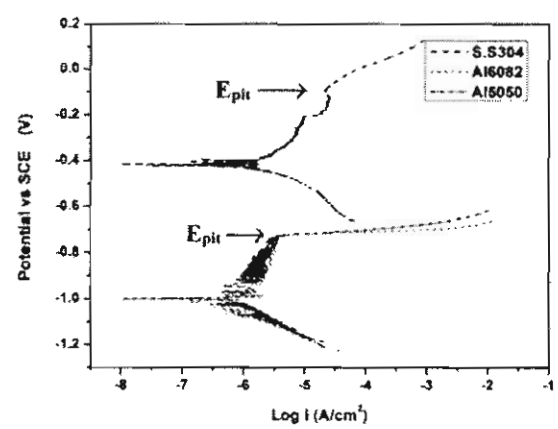
3. Parent Metal

4. Thermo Mechanically Affected Zone

5. Stir Zone

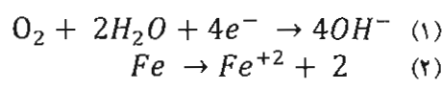
6. Heat Affected Zone

دریافت فولاد زنگ نزن در این محلول مقاومت به خوردگی بهتری را داراست. لایه محافظ در فولادهای زنگ نزن آستنیتی مقاوم تر از لایه محافظ آلیاژهای آلومینیوم می باشد. این فولادها مقاومت به خوردگی بالای خود را مدیون این لایه محافظ مقاوم و متراکم می باشند که علت آن نیز حضور کروم در این فیلم می باشد. افزایش ناگهانی دانسیته جریان در Epit مربوط به ایجاد حفره و پایداری خوردگی حفره ای می باشد [۹]. آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۰ و ۶۰۸۲ رفتار خوردگی مشابهی داشته و نمودارهای پلاریزاسیون آنها بر یکدیگر منطبق است.



شکل ۱: منحنی های پلاریزاسیون آلیاژهای مورد استفاده

برای فولاد واکنش کاتدی که روی سطح رخ می دهد، احیا اکسیژن و واکنش آندی، یونیزاسیون فلز می باشد.



اما درون حفره مکانیزم خوردگی متفاوت می باشد. پس از وقوع واکنش آندی یونیزاسیون فلز، یون فلز تولید شده، توسط مولکولهای آب هیدرولیز می گردد. سپس هیدروکسید تولید شده با یونهای کلر که به درون حفره مهاجرت کرده اند، واکنش داده و کلرید آهن تولید می شود. در مرحله بعد کلرید آهن با آب واکنش داده و مجدداً هیدروکسید آهن تولید می شود.

برای آلومینیوم نیز در محیط آبی واکنش کاتدی که روی سطح رخ می دهد همانند آنچه که در مورد فولاد گفته شد،

از سل استاندارد سه الکترودی شامل الکتروود مرجع کالومل، الکتروود کمکی از جنس پلاتین و الکتروود کاری و در محلول ۳/۵٪ NaCl انجام شد. پس از قرارگیری نمونه ها در محلول به مدت ۲ ساعت و به ثبات رسیدن پتانسیل و اندازه گیری OCP^۷، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی طبق استاندارد ASTM-G106 در پتانسیل مربوط به OCP و در گستره فرکانس ۱۰mHz تا ۱۰۰kHz و با استفاده از سیگنال سینوسی با دامنه پتانسیل ۱ ± mV انجام شد و از نرم افزار ZSimWin3.21 جهت مدل سازی داده ها طبق مدار الکتریکی پیشنهادی استفاده شد. همچنین آزمون پلاریزاسیون پتاسیودینامیک بر اساس استاندارد ASTM-G 59-97 انجام شد.

نمونه های دیگری نیز به روش مشابه از ناحیه اغتشاش آلومینیوم تهیه شد و به مدت ۲۵ روز در محلول قرار داده شد و سپس سطح نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت.

۳-۲ طیف سنجی پراش اشعه ایکس

نمونه هایی با ابعاد ۱cm² از نواحی HAZ در هر یک از ورق های آلومینیوم تهیه شده و به منظور شناسایی ساختارهای بین فلزی از طیف سنجی پراش اشعه ایکس استفاده شد. دستگاه مورد استفاده Philips X'pert بوده و آزمایش مورد نظر با پرتو Cu-ka با طول موج ۱/۵۴۰ آنگستروم و در رنج ۳۰ تا ۱۲۰ درجه انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ آزمون الکتروشیمیایی پلاریزاسیون

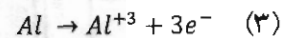
در شکل ۱ رفتار پلاریزاسیون فلزات مورد استفاده قبل از انجام فرآیند جوشکاری و در جدول ۱ پارامترهای حاصل از این نمودار نشان داده شده است. آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای زنگ نزن از جمله فلزات با قابلیت تشکیل لایه محافظ می باشند. همانطور که از نمودارها نیز می توان

7. Open Circuit Potential

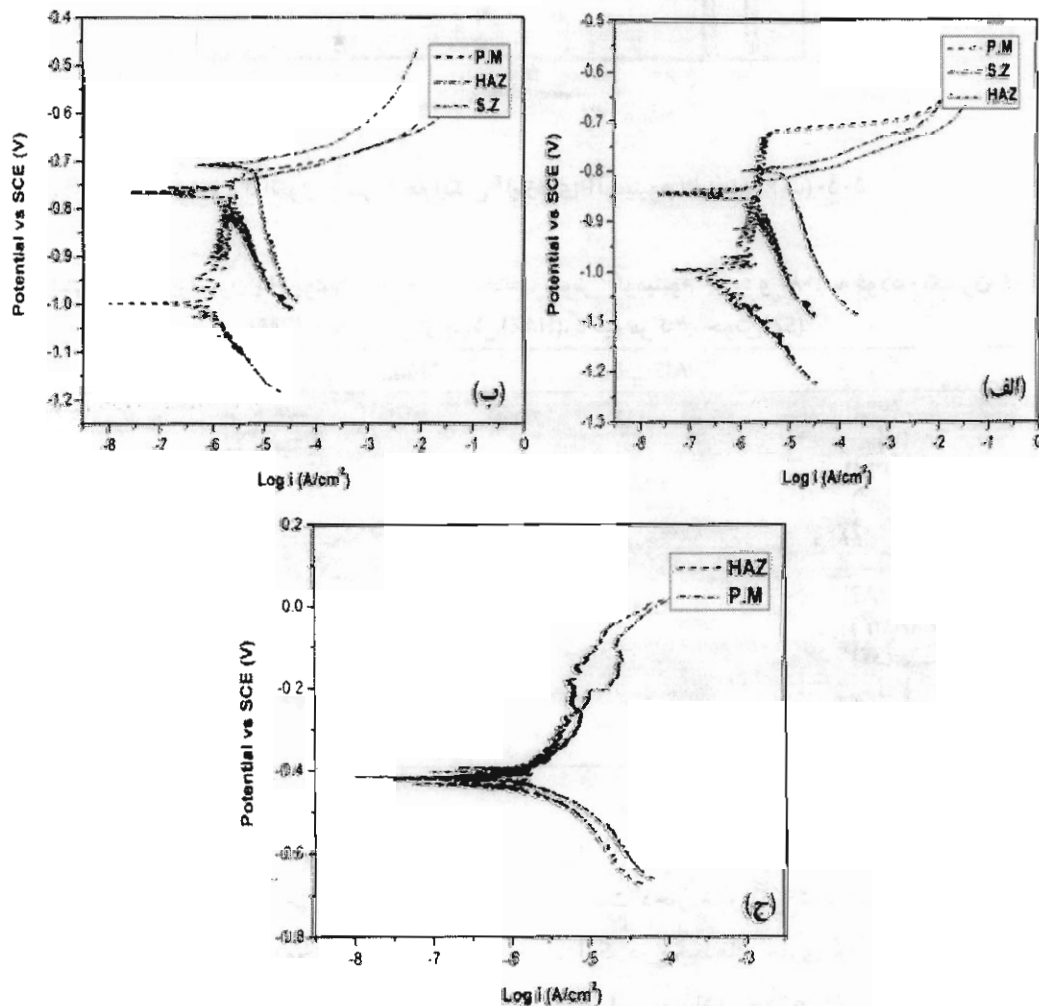
نواحی مختلف جوش در سمت آلومینیوم و فولاد می‌باشد. با توجه به شکل و داده‌های حاصل از آن که در جدول ۱ گزارش شده است، می‌توان دریافت که چه در آلیاژ ۵۰۵۰ و چه در آلیاژ ۶۰۸۲، دانسیته جریان خوردگی در ناحیه HAZ و در محل اتصال افزایش داشته است.

با توجه به نتایج حاصل از تفرق اشعه ایکس (شکل ۳) می‌توان ترسیب فازهای بین فلزی مانند $Fe_{13}Al_4$ در ناحیه متأثر از جوش را عاملی برای تضعیف شدن فیلم محافظ و افزایش تمایل به ایجاد حفره در آن دانست، چرا که ترک‌ها معمولاً در محل ذرات بین فلزی موجود در آلومینیوم و به ویژه در مجاورت فازهای بین فلزی حاوی مس و آهن تشکیل می‌شوند [۹].

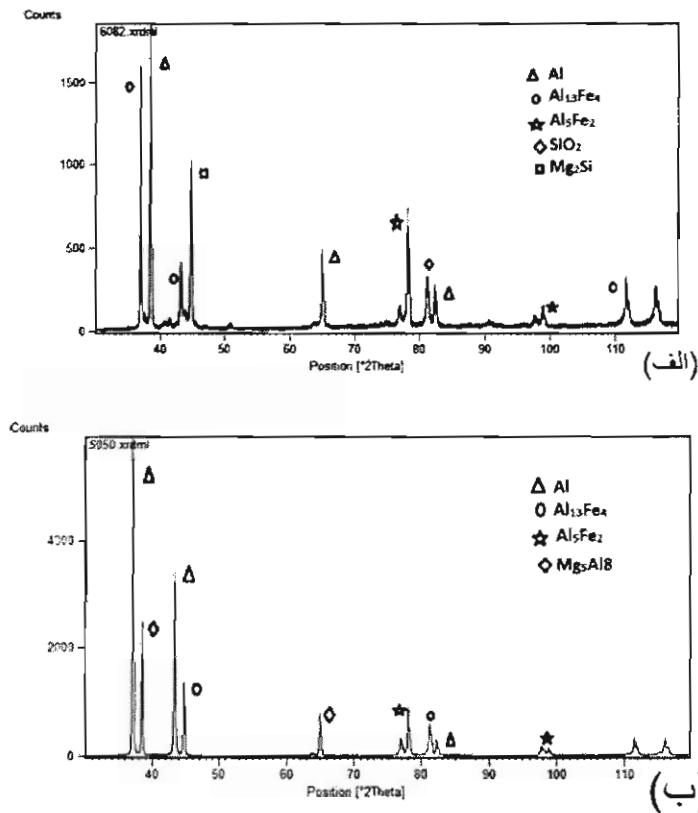
احیای اکسیژن می‌باشد و تولید یون آلومینیوم واکنش آندی را تشکیل می‌دهد.



آنچه که درون حفره رخ می‌دهد متفاوت از واکنش‌های سطحی است. هیدرولیز یون‌های آلومینیوم و تصاعد هیدروژن به عنوان واکنش کاتدی و نیز مهاجرت یون‌های هیدروژن به خارج از حفره، pH داخل حفره را تعیین می‌کند. در pH تولید شده هیدروکسید آلومینیوم تشکیل می‌شود و مانند آنچه که در مورد فولاد گفته شد، یون‌های کلرید تولید کلرید آلومینیوم کرده و هیدرولیز کلرید آلومینیوم منجر به تشکیل دوباره هیدروکسید آلومینیوم می‌شود [۱۰-۱۲]. شکل ۲ نشان دهنده رفتار



شکل ۲: منحنی‌های پلازیناسیون مناطق مختلف جوش آلیاژ الف) ۶۰۸۲ (ب) ۵۰۵۰ (ج) فولاد ۳۰۴



شکل ۳: الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژهای آلومینیوم الف) ۶۰۸۲ ب) ۵۰۵۰

جدول ۱: پارامترهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نواحی مختلف جوش آلومینیوم ۵۰۵۰ و ۶۰۸۲ به فولاد زنگ نزن ۳۰۴. فلز پایه (PM)، ناحیه متأثر از جوش (HAZ)، ناحیه مرکزی جوش (SZ)

	Al5050	Al6082	S.S304
$E_{corr}(PM)$ (V)	-۰/۹۹	-۱	-۰/۴۱
$I_{corr}(PM)$ (A/cm ²)	۱/۱۸	۱/۲۲	۱/۱
$E_{corr}(HAZ)$ (V)	-۰/۷۸	-۰/۸۰	-۰/۴۲
$I_{corr}(HAZ)$ (A/cm ²)	۱/۰۹	۱/۷۰	۱
$E_{corr}(SZ)$ (V)	-۰/۷	-۰/۸	-
$I_{corr}(SZ)$ (A/cm ²)	۶/۱۲	۵/۱۳	-

فولاد باعث می‌شود که آلومینیوم ماهیت آندی داشته و به شدت دچار خوردگی شود اما فولاد زنگ نزن علی‌رغم آنکه در محیط‌های حاوی یون کلرید به خوردگی حفره‌ای حساس می‌باشد، به عنوان کاتد عمل کرده و دچار

دانسیته جریان خوردگی در ناحیه مرکزی خط جوش برای هر دو آلیاژ آلومینیوم بسیار بیشتر از نواحی دیگر می‌باشد. با فرارگیری مقطع مرکزی جوش در محلول، یک کویل گالوانیکی ایجاد می‌شود. پتانسیل کمتر آلومینیوم نسبت به

در دیگر روش‌های جوشکاری به شدت به خوردگی مرزانه ای حساس می‌باشد.

۲-۳ امیدانس الکتروشیمیایی (EIS)

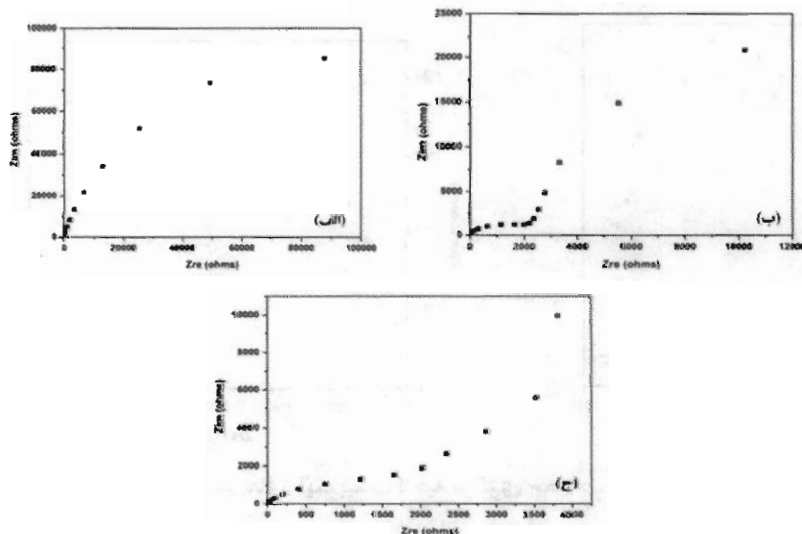
نمودارهای امیدانس الکتروشیمیایی فلزات پایه در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها و داده‌های حاصل از مدار معادل آنها (شکل ۶) که در جدول ۲ گزارش شده است، می‌توان دریافت که لایه اکسیدی آلیاژهای آلومینیوم از دو قسمت تشکیل می‌شود. به محض قرارگیری آلومینیوم در معرض هوا روی سطح آن اکسید آلومینیوم تشکیل می‌شود و پس از قرار گرفتن در محیط آبی لایه دیگری روی سطح آن تشکیل می‌شود که عموماً در اثر هیدراته شدن آلومینیوم ایجاد می‌شود. مقادیر توان فرکانس (n) نشان می‌دهد که لایه داخلی متراکم‌تر است. با توجه به این مطلب که ثابت‌های این دو لایه در مدار به صورت سری قرار گرفته‌اند می‌توان دریافت که این لایه‌ها چسبندگی خوبی به یکدیگر دارند. مدار معادل مربوط به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ نشان دهنده آن است که لایه اکسیدی روی سطح بر خلاف آلومینیوم تنها از یک لایه ایجاد شده است. مقاومت پلاریزاسیون بالای این فلز نسبت به آلیاژهای آلومینیوم نشان دهنده مقاومت به خوردگی بهتر آن می‌باشد.

خوردگی نمی‌شود. در واقع فولاد سطح مؤثر را برای واکنش کاتدی افزایش می‌دهد. علاوه بر این تکه‌هایی از فولاد که طی فرآیند جوشکاری در محل اغتشاش آلومینیوم قرار می‌گیرد نیز به عنوان کاتد عمل کرده و نه تنها باعث افزایش نسبت سطح کاتد به آند می‌شوند، بلکه به دلیل ایجاد ترک، باعث افزایش تمرکز خوردگی در مجاورت خود می‌شوند (شکل ۴).

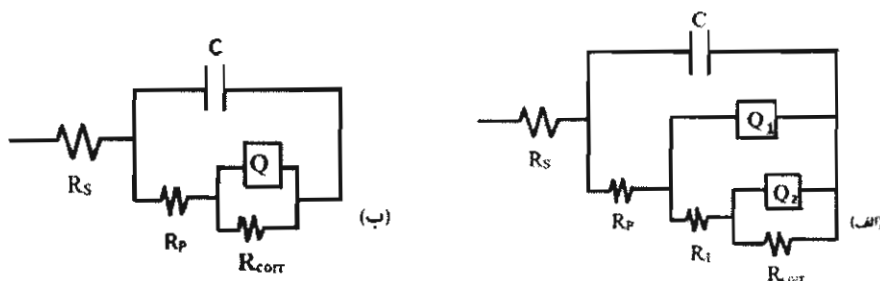


شکل ۴: تصویر میکروسکوپی از مناطق آندی و کاتدی در ناحیه اغتشاش آلومینیوم

ذرات فولادی که در ناحیه اغتشاش آلومینیوم قرار گرفته‌اند بدون تغییر باقی مانده و آلومینیوم به طور موضعی دچار خوردگی شده است. رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در ناحیه HAZ بسیار شبیه فلز پایه است زیرا دمای ورودی به این قسمت به حدی نیست که موجب تغییرات میکروساختاری گردد. در حالیکه ناحیه HAZ ایجاد شده



شکل ۵: منحنی‌های نایکوئیست فلزات پایه (الف) فولاد ۳۰۴ (ب) آلومینیوم ۶۰۸۲ (ج) آلومینیوم ۵۰۵۰



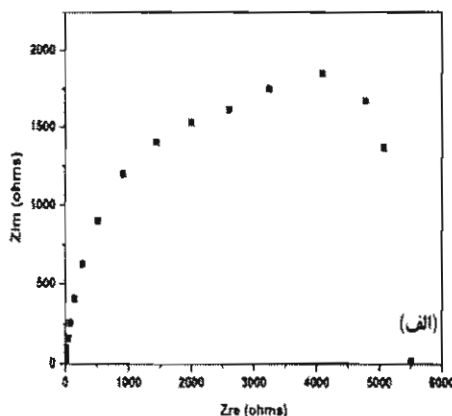
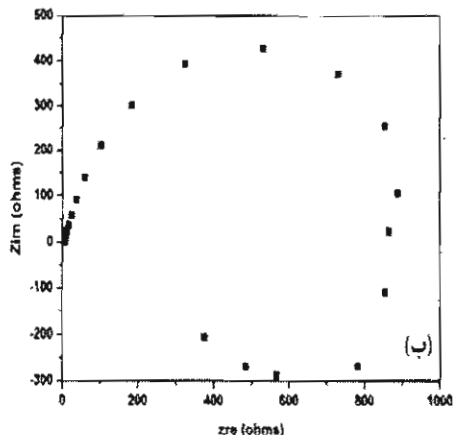
شکل ۶: مدار معادل پیشنهادی جهت مدلسازی داده‌های امپدانس الف) آلومینیوم ۵۰۵۰ و ب) فولاد ۳۰۴

جدول ۲: پارامترهای مدار معادل پیشنهادی برای فلزات پایه

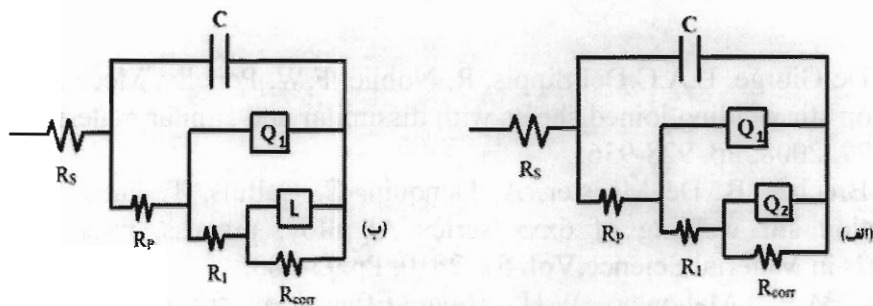
	$R_s (\Omega)$	$C (\mu F)$	$R_p (\Omega)$	$Y_{0(1)} (\Omega^{-1}S^n)$	n_1	$R_1 (\Omega)$	$Y_{0(2)} (\mu\Omega^{-1}S^n)$	n_2	$R_2 (\Omega)$
Al5050	۰/۵۴	۰/۶	۳۲	۲/۸۰	۰/۸۶۹	۸۳۶۱	۱/۵	۰/۹۹۹	۱۰۲۰
Al6082	۰/۳۸	۰/۰۰	۳۲	۴/۶۸	۰/۹۹۳	۲۸۸۳	۱/۵	۰/۹۹۳	۷۷
S.S 304	۰/۸۸	۰/۲۶	۲۹۹۴۵	۰/۸۵	۰/۸۰۰	۴	۰/۴	-	-

که علت آن ایجاد حفره‌ها و ترک‌های بیشتر در مجاورت ذرات فولادی قرار گرفته در این لایه‌ها می‌باشد (شکل ۹). در ناحیه مرکزی خط جوش آلیاژ ۶۰۸۲ نیز شاهد کاهش مقاومت پلاریزاسیون و مقاومت لایه‌های اکسیدی می‌باشیم. در این آلیاژ لایه اکسیدی چسبیده به سطح فلز رفتار القایی را نشان می‌دهد که ناشی از جذب و واجذب پیوسته واکنش‌دهنده‌ها روی سطح فلز می‌باشد.

در شکل ۷ و ۸ به ترتیب نمودارهای امپدانس الکتروشیمیایی نواحی مرکزی خط جوش و مدارهای معادل آنها نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها و داده‌های حاصل (جدول ۳) می‌توان دریافت که مدار معادل ناحیه مرکزی خط جوش آلومینیوم ۵۰۵۰ مشابه مدار معادل فلز پایه می‌باشد. مقایسه مقاومت پلاریزاسیون این مقطع با آلیاژ پایه نشان می‌دهد که مقاومت به خوردگی کمتر شده است. علاوه بر این مقاومت لایه‌های اکسیدی روی سطح نیز کاهش یافته



شکل ۷: منحنی‌های نایکوئیست ناحیه مرکزی خط جوش الف) ۵۰۵۰ ب) ۶۰۸۲



شکل ۸: مدار معادل ناحیه مرکزی جوش الف) آلومینیوم ۵۰۵۰ ب) آلومینیوم ۶۰۸۲

جدول ۳: پارامترهای مدار معادل پیشنهادی برای نواحی مرکزی جوش

	$R_s (\Omega)$	$C (\mu F)$	$R_p (\Omega)$	$Y_{0(1)} (\mu \Omega^{-1} S^n)$	n_1	$R_1 (\Omega)$	$Y_{0(2)} (\mu \Omega^{-1} S^n)$	$L (H)$	n_2	$R_2 (\Omega)$
Al5050	۶/۲۳۹	۹/۵۵	۱۵/۳۰	۱/۱۹	۰/۸۶	۳۳۵۴	۹/۷۴	-	۰/۸۹۵	۱۰۰۸
Al6082	۵/۱۲۰	۱/۴۹	۲۷/۶۰	۱/۳۰	۰/۸۰	۳۱۲۷	-	۲۱۰۵	۰/۸۴۳	۶۶



شکل ۹: حفره‌های ایجاد شده در مجاورت ذرات فولاد در ناحیه اغتشاش

۴- نتیجه گیری

آلومینیوم به علت وجود نواحی تمرکز تنش در ترک‌های ایجاد شده در پوسته محافظ در این ناحیه، کمتر از فلز پایه این آلیاژها می‌باشد. در ورق فولاد به دلیل حرارت ورودی کم ساختار فلز در ناحیه HAZ تغییر نکرده و مقاومت به خوردگی آن در این ناحیه حفظ شده است.

نتایج حاصل از رفتار خوردگی نواحی مختلف جوش نشان می‌دهد که بیشترین دانسیته جریان خوردگی مربوط به ناحیه مرکزی خط جوش می‌باشد که علت این امر تشکیل کوپل گالوانیکی در این قسمت است که در آن آلومینیوم نسبت به فولاد رفتار آندی داشته و به شدت دچار خوردگی می‌شود. همچنین مقاومت به خوردگی در ناحیه HAZ آلیاژهای

مراجع

1. A. Scialpi, M. De Giorge, L.A.C.DeFilippis, R. Nobile, F.W. Panella, Mechanical analysis of ultra-thin friction stir welding joined sheets with dissimilar and similar materials, *Materials and Design*, Vol. 29, 2008, Pp. 928-936.
2. A. Simar, Y. Brechet, B. De Meester, A. Denquin, C. Calluis, T. Pacdoen, Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloy: process, microstructure and properties, *Progress in Material Science*, Vol. 57, 2010, Pp.95-183.
3. C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, *ScriptaMaterialia*, Vol. 36, 1997, Pp. 69-75.
4. E. Taban, J. E. Gould, J. C. Lippold, Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminium alloy and AISI-1018 steel: properties and microstructural characterization, *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, Pp. 2305-2311.
5. K. Kimapong, T. Watanabe, "Lap joint of A5083 aluminium alloy and SS400 steel by friction stir welding", *Materials Transition*, 46, 2005, 835-841.
6. C. Chen, J. Zhang, G. Jipping, Microstructure and electrochemical behaviors of the friction stir welding of dissimilar weld, *Environmental Science*, Vol. 23, 2011, Pp. 532-538.
7. S. Maggolino, C. Schmid, Corrosion resistance in FSW and in MIG welding techniques of AA6XXX, *materials processing technology*, Vol. 197, 2008, Pp. 237-240.
8. S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki, Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding, *ScriptaMaterialia*, Vol. 49, 2003, Pp.1175-1180.
۹. ای.ای. استنبری، ر.ا. باچانان، اصول خوردگی الکتروشیمیایی، ترجمه مریم احتشام زاده، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۹
10. K. S. Rao, K. P. Rao, Pitting Corrosion of Heat Treatable Aluminium Alloys and Welds: A Review, *Trans Indian*, Vol. 57, 2004, Pp. 593-610.
11. A. M. A. Alsamuraee, H. A. Ameen, S. I. J. Alrubaiey, Evaluation of the pitting Corrosion for Aluminium Alloys in 3.5% NaCl Solution with Range of Temperature (100-500)°C, *Scientific and Industrial Research*, Vol. 51, 2011, Pp. 283-296.
12. S. Yahaya, A. A. Rahim, A. M. Shah, R. Adnan, Inhibitive Behaviour of Corrosion of Aluminium Alloy in NaCl by Mangrove Tannin, *SainsMalaysiana*, Vol. 49, 2011, Pp. 953-957.