

# ارزیابی ریزساختار و مقاومت به خوردگی مقطع جوش کاری شده آلیاژ AI5083-H321 توسط روش جوش کاری قوسی فلز-گاز در محیط آب دریا

فاطمه بداغی\*، مسعود عطاپور و مرتضی شمعیان  
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۱۰/۰۷)

**چکیده** - آلیاژهای xxx آلومینیم دال دارا بودن خواص ویژه در صنعت کاربردهای فراوان دارند. رفتار خوردگی این آلیاژ در آب دریا از جمله آب دریا از جمله مسائلی است که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار دارد. این پژوهش بر بررسی تعداد پاس جوش کاری ریزساختار و رفتار خوردگی جوش آلیاژ AI5083-H321 پرداخته. منظور از آلیاژ مذکور روش جوش کاری فلز-گاز (GMAW) استفاده از پرکننده ER5183، دو پاس جوش کاری. منظور از ریزساختار میکروسکوپی از متالوگراف نوری و الکترون استفاده از آلیاژ خواص خوردگی از طریق اندازه گیری پتانسیل مدار باز، آزمون غوطه‌وری در محلول 3.5% NaCl و آزمون پلارزاسون انجام شد. پژوهش نشان داد که مقاطع جوش کاری آلیاژ AI5083 با دو پاس با توجه به مقدار  $i_{corr}$  و  $E_{corr}$  معادل  $0.087 \times 10^{-6}$  ( $\mu A/cm^2$ ) و  $-0.4395$  (V)، دارای مقاومت به خوردگی نسبت به آلیاژ پایه است.

واژگان کلیدی: رفتار خوردگی، آب دریا، جوش کاری AI5083 فلز-گاز

## Microstructure and Corrosion Behavior Investigation of AI5083-H321 GMAW Weldment in Sea Water

F. Bodaghi\*, M. Atapour and M. Shamanian

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: fatemeh.bodaghi85@yahoo.com

**Abstract:** Aluminium 5xxx alloys excellent properties make them suitable for many industrial applications. The corrosion behavior of this alloy family in industrial environments such as sea water is the main focus of many researches. Due to need for joining large segments of this alloys, the effect of single as well as multipass (double and triple pass) gas metal arc welding (GMAW) on microstructure and corrosion behavior of Al5083-H321 alloy was studied. For this purpose, ER5183 filler metal was used. Microstructures were evaluated using optical and scanning electron microscopy (SEM). Corrosion measurements were performed using open circuit potential test, immersion test in 3.5%NaCl solution and polarization tests. Results indicated that the corrosion resistance of the two passes weldment was improved in comparison with the base metal and its icorr and Ecorr were equal to  $0.087 \times 10^{-6}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) and  $-0.4395$  (V), respectively.

**Keywords:** Corrosion behavior, Sea water, Al5083, Gas-metal arc welding

## ۱- مقدمه

انبساط گرمایی، رفتار ذوب و هدایت الکتریکی از عوامل مؤثر بر جوش کاری آلومینیم هستند [۵]. ریزساختار فلز جوش آلیاژهای عملیات حرارتی ناپذیر شامل دانه‌های ستونی و رونشستی<sup>۱</sup> با ریزساختار سلولی یا سلولی-دندریتی است که دارای اجزای اولیه یونکتیکی بین دندریتی  $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$  در آلیاژهای سری ۱xxx و ۳xxx و Si در آلیاژهای ۴xxx و  $\text{Mg}_3\text{Al}_2$  در آلیاژهای ۵xxx است [۶].

با توجه به کاربرد وسیع آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ در صنعت به ویژه صنایع دریایی و نیاز به اتصال‌دهی صفحات این آلیاژ به منظور تولید قطعات بزرگ صنعتی و عدم مطالعه رفتار خوردگی مقاطع جوش کاری شده آلیاژ با چند پاس متوالی، هدف از این پژوهش بررسی دقیق ریزساختار و مقاومت به خوردگی مقاطع جوش کاری شده آلیاژ و تاثیر تعداد پاس جوش کاری بر خواص خوردگی مقطع جوش این آلیاژ در محیط آب دریا است.

## ۲- روش انجام پژوهش

برای مطالعه تاثیر تعداد پاس‌ها بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی مقطع جوش آلیاژ Al5083-H321، ورقه‌های این آلیاژ با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ توسط روش جوش کاری قوسی فلز-گاز (GMAW) با استفاده از الکترود ER5183 (جدول ۱) که متداول‌ترین فلز پرکن مورد استفاده در صنعت برای این آلیاژ است، به صورت تک پاسه، دو پاسه و سه پاسه جوش کاری شدند. در جدول ۲ طراحی ناحیه جوش و مشخصه‌های جوش کاری مشاهده می‌شود. پس از جوش کاری،

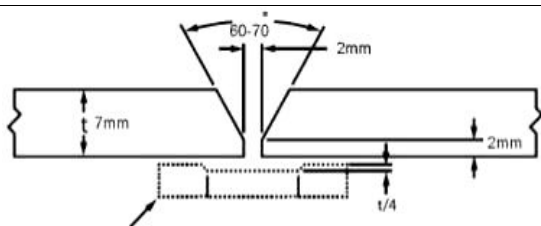
آلیاژهای کار شده سری ۵xxx با توجه به دارا بودن خواص عالی هم‌چون استحکام بالا، شکل‌پذیری خوب، مقاومت به خوردگی و جوش‌پذیری، در گذشته برای کاربردهای وسیعی از جمله بدنه وسایل نقلیه، قطارها، کشتی‌ها یا مخازن تبریدی مورد توجه قرار داشتند. به طور کلی این آلیاژها بهترین ترکیب استحکام و مقاومت به خوردگی را در بین همه آلیاژهای آلومینیم دارا هستند [۱]. در بین آلیاژهای سری ۵xxx، آلیاژ ۵۰۸۳ که یک آلیاژ عملیات حرارتی ناپذیر است، در حالت نورد شده استحکام بالایی دارد اما رفتار الکتروشیمیایی مناسبی ارائه نمی‌دهد [۲]. مقاومت به خوردگی بالای آلیاژهای آلومینیم به دلیل تشکیل لایه اکسید محافظ روی سطح آن‌هاست و خوردگی زمانی رخ می‌دهد که لایه محافظ  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ناپایدار یا دارای عیوبی باشد [۳]. مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیم به طور شدید وابسته به ترکیب شیمیایی آن‌هاست و براساس گزارش‌ها حضور مقادیر کم آهن و گوگرد در ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیم با توجه به عدم حلالیت آن‌ها در زمینه آلومینیم و تشکیل فازهای غنی از آهن و گوگرد منجر به تشدید خوردگی می‌شود. این عناصر در حضور اکسیژن و سایر اکسیدها نسبت به زمینه آلومینیمی رفتار کاتدی دارند و خورده شدن زمینه آلومینیمی اطراف را شدت می‌بخشد [۴].

آلومینیم را می‌توان با روش‌های مختلفی اتصال داد که شامل جوش کاری‌های ذوبی و مقاومتی، لحیم کاری سخت و نرم، اتصال‌دهی چسبان و روش‌های مکانیکی هم‌چون پیچ و مهره و پرچ است. روکش اکسید آلومینیم، هدایت گرمایی، ضریب

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ Al5083 و الکتروود ER5183 (درصد وزنی)

عنصر	Al	سایر عناصر	Ti	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
Al5083	بقیه	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۰۵-۰/۲۵	۴-۴/۹	۰/۴-۱	۰/۱	۰/۴	۰/۴
Er5183	بقیه	۰/۰۰۰۸	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۰۵-۰/۲۵	۴/۳-۵/۲	۰/۵-۱	۰/۱	۰/۴	۰/۴

جدول ۲- جزئیات فرایند جوش کاری

جزئیات اتصال	سرعت حرکت		ولتاژ (V)	جریان		فلز پرکن	
	قوس (ipm/pass)	شدت جریان (A)		قطبیت	قطر	کلاس	
	۲۴-۳۰	۲۲	۱۴۵	DCEP	۱/۲ mm	A5-10	

پنج بار مورد آزمون قرار داده شد و میانگین نتایج به دست آمده به عنوان نمودار پلاریزاسیون نمونه ارائه و مقادیر چگالی جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی نمونه از آن استخراج شد.

### ۳- نتایج و بحث

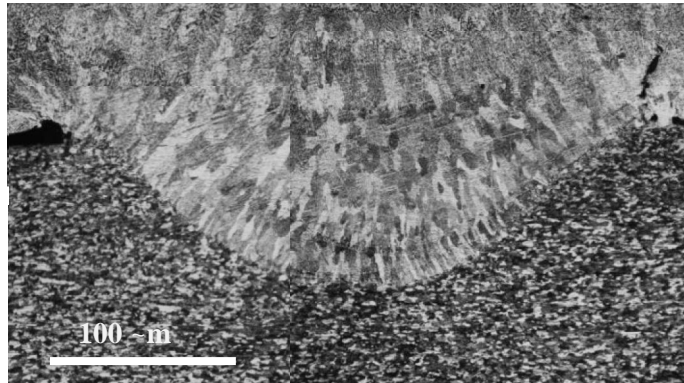
#### ۳-۱- ریزساختار مقاطع جوش کاری شده

همان گونه که از شکل ۱ استنباط می شود، انجماد فلز جوش توسط مکانیزم رونشستی (اپیتکسیال) بر فصل مشترک فلز جوش / آلیاژ پایه شروع و به صورت دندریتی تا نواحی فوقانی فلز جوش ادامه یافته است. انجماد رونشستی را می توان به مشارکت فلز پایه در تشکیل حوضچه مذاب بر سطح آن و ذوب بخشی از دانه های فلز پایه در فاز مذاب نسبت داد. در این شرایط بخش های باقی مانده از دانه های یاد شده به عنوان مراکز جوانه زنی عمل می نماید و ترشوندگی کامل فاز مذاب با آن ها موجب کاهش قابل ملاحظه انرژی فعال سازی جوانه زنی می شود. بنابراین برای انجماد تنها کافی است اتم ها از فاز مذاب به سطح زیرلایه بپیوندند [۷]. به علاوه در شکل ۱، رشد رقابتی

مقطع عرضی و سطح بالایی قطعات مورد ارزیابی ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) و تحلیل عنصری EDS قرار گرفت.

مقاومت به خوردگی مقاطع جوش در محلول NaCl ۳/۵٪ مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از هر قطعه دو نمونه یکی تنها شامل فلز جوش و دیگری شامل منطقه جوش، منطقه متأثر از گرما (HAZ) و فلز پایه تهیه شد. آلودگی سطحی نمونه ها بعد از سنباده زنی و پولیش توسط آلتراسونیک در آب مقطر به مدت ۱۵ دقیقه پاکسازی شد و پس از توزین، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محلول NaCl ۳/۵٪ غوطه ور شدند. بعد از ۲۴ ساعت دوم مرتبه فرآورده های خوردگی و آلودگی های سطح نمونه ها توسط آلتراسونیک زوده شده و پس از خشک کردن، نمونه ها توزین شدند. سپس سطوح نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی شدند.

نمودارهای پلاریزاسیون تافل برای فلز جوش هر نمونه و فلز پایه به طور جداگانه توسط دستگاه Invium در محلول NaCl ۳/۵٪ در محدوده پتانسیل ۲۵۰- تا ۶۰۰+ ولت نسبت به پتانسیل مدار باز، تهیه شدند. برای این کار هر نمونه



شکل ۱- ریزساختار پاس ریشه نمونه دو پاس، نشان‌دهنده انجماد رونشستی فلز جوش که در هر سه نمونه قابل مشاهده بود

جوش کاری ضخامت نمونه ( $g$ ) افزایش می‌یابد. از این رو حداکثر دما ( $T_p$ ) کاهش می‌یابد. در این صورت سرعت سرد شدن ( $v$ ) طبق رابطه (۲) [ $V$ ] کاهش می‌یابد. کاهش  $v$  طبق رابطه (۳) [ $V$ ] موجب افزایش فاصله بین بازوهای دندریتی ( $d$ ) می‌شود. بنابراین می‌توان گفت با افزایش تعداد پاس جوش کاری فاصله بین بازوهای دندریتی افزایش می‌یابد (شکل ۲).

$$= \frac{\Delta T}{t} = \frac{T_p - T_0}{t} \quad (2)$$

$$d = b(\ )^{-n} \quad (b = 2-3) \quad (3)$$

### ۳-۲- نتایج آزمون غوطه‌وری و پلاریزاسیون تافل

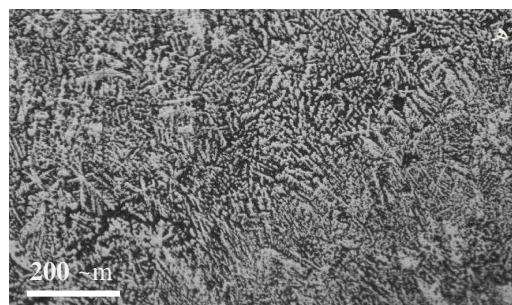
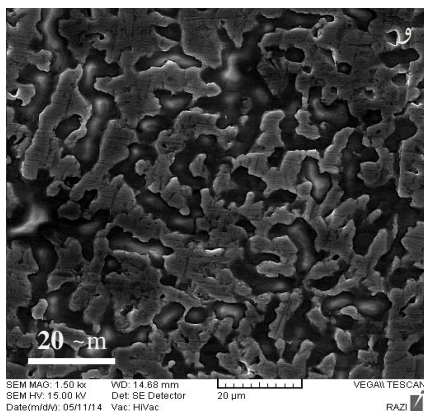
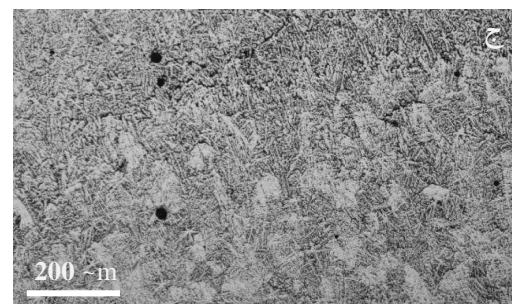
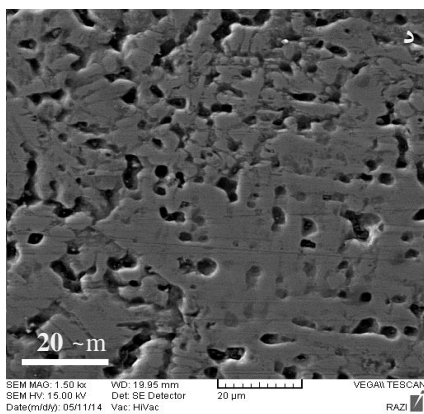
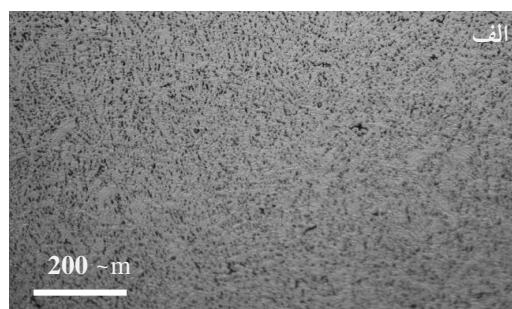
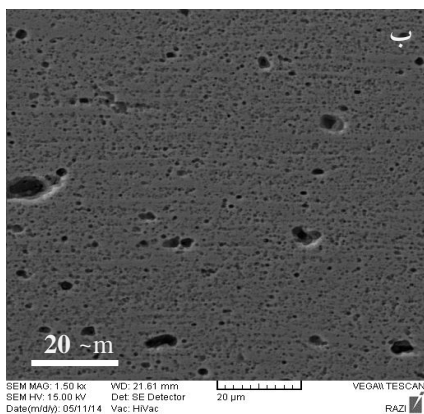
در شکل ۳ نمودار کاهش وزن نمونه‌ها پس از غوطه‌وری برای ۲۴ ساعت در محلول 3.5% NaCl ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه تک پاس بیشترین کاهش وزن را در هر دو حالت نشان می‌دهد. بررسی سطوح در معرض محلول خورنده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۴ نشان داده شده است. تصاویر SEM نشان می‌دهد که تعداد حفره‌ها در نمونه تک پاس بیش‌تر است و همان‌گونه که دیده می‌شود قطر بزرگترین حفره‌ها در نمونه دو پاس کمی بیش‌تر از سایر نمونه‌ها است اما عمق حفره بسیار کم‌تر است. با توجه به کم‌تر بودن تعداد حفره‌ها در نمونه دو پاس، کاهش وزن نمونه دو پاس کم‌تر از سایر نمونه‌ها است.

دندریتهای فاز جامد تشکیل شده در حوضچه مذاب به‌وضوح قابل مشاهده است که می‌تواند در نتیجه رقابت دندریتهای برای رشد در جهت حداکثر گرادیان دمایی (عمود بر فصل مشترک فلز جوش / آلیاژ پایه) و واقع شدن آن‌ها در جهت آسان رشد باشد. این حالت در نمونه تک پاس و در پاس اول نمونه‌های دو پاس و سه پاس قابل مشاهده است.

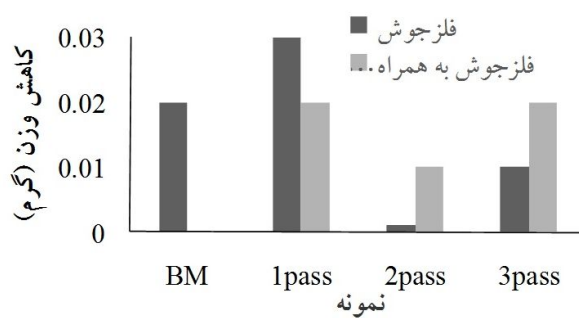
به‌طور جزئی‌تر ریزساختار قطعات مشاهده شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس جوش کاری فاصله بین بازوهای دندریتی افزایش یافته است. ریزساختار ارائه شده مربوط به پاس دوم نمونه دو پاس و پاس سوم نمونه سه پاس است. رابطه ۱ ارتباط متغیرهای فرایند را نشان می‌دهد [ $V$ ].

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13VYg \dots C}{Q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (1)$$

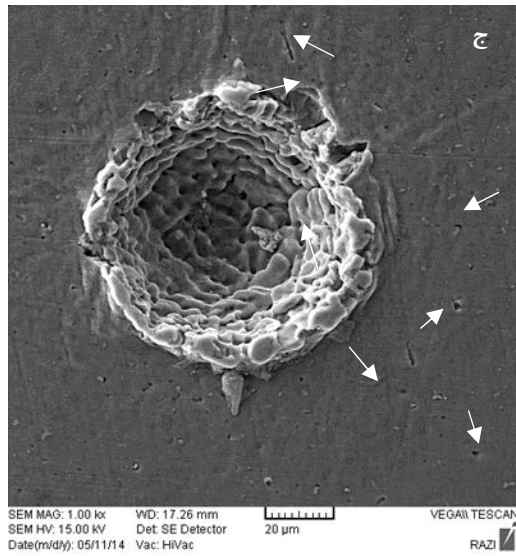
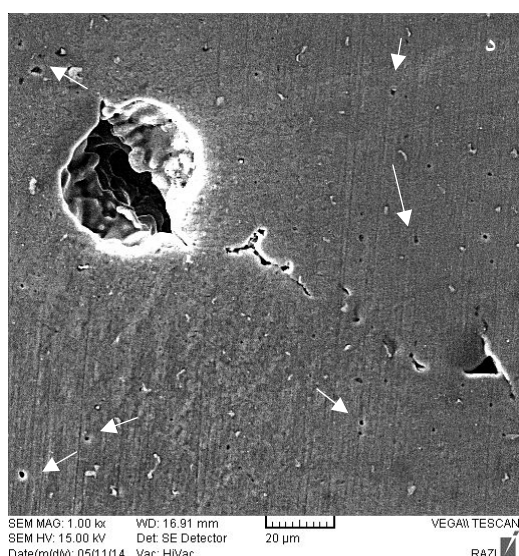
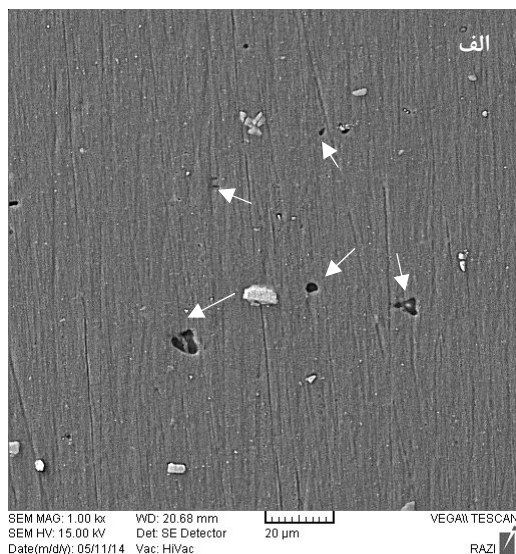
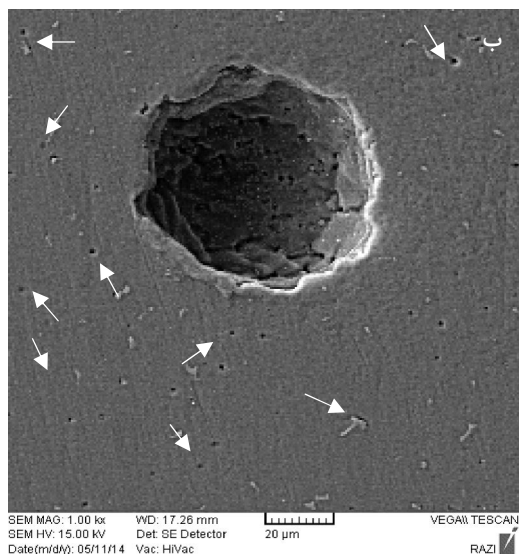
در این رابطه  $T_p$  ماکزیمم دما در فاصله  $Y$  از مرکز جوش،  $V$  سرعت جوش کاری بر حسب  $m/s$ ،  $Y$  فاصله از مرکز جوش و  $g$  ضخامت (هر دو برحسب  $m$ )،  $c$  ظرفیت گرمایی حجمی آلیاژ برحسب  $J/m^3.K$  و  $T_m$  نقطه ذوب آلیاژ و  $T_0$  دمای اولیه قطعه کار (هر دو برحسب کلوین) و  $Q$  گرمای ورودی به قطعه کار برحسب وات هستند. در صورت ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترهای مربوط به فرایند جوش کاری و یا مشخصات آلیاژ برای تمام نمونه‌ها، می‌توان گفت با افزایش تعداد پاس



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از الف و ب) نمونه تک پاس، ج و د) نمونه دو پاس و ه و و) نمونه سه پاس



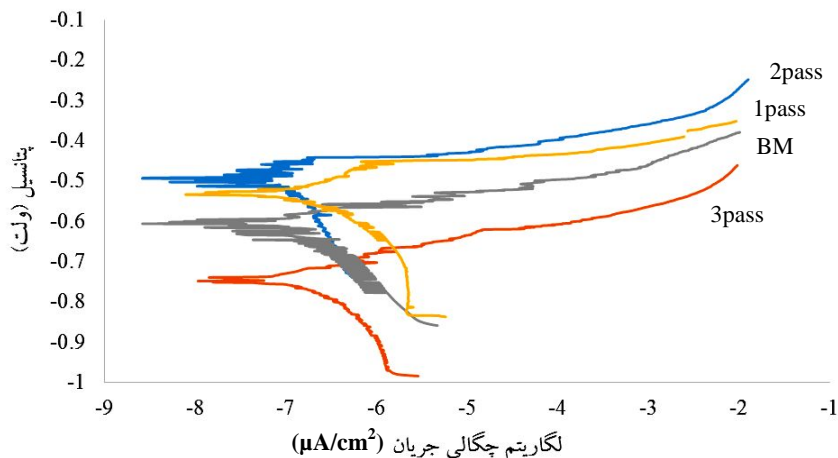
شکل ۳- نمودار کاهش وزن نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در محلول 3.5% NaCl



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در محلول ۳.۵٪ NaCl: الف) فلز پایه، ب) فلز جوش نمونه تک پاس، ج) فلز جوش نمونه دو پاس و د) فلز جوش نمونه سه پاس (پیکان‌ها نشان‌دهنده حفره‌های ریز هستند)

یکوخت‌تر منیزیم در مناطق مختلف شده است. سرعت سرد شدن کم‌تر در نمونه سه پاس باعث نفوذ بیشتر سایر عناصر به مناطق بین دندریتی و تشکیل مناطق کاتدی نسبت به زمینه آلومینیومی شده است و در نتیجه تشدید خوردگی را به همراه دارد. در مورد نمونه تک پاس با توجه به کم‌تر بودن حجم فلز پرکن مورد استفاده، مقدار کم‌تری منیزیم نسبت به دو نمونه دیگر به ناحیه جوش وارد می‌شود و در نتیجه مقاومت به خوردگی این نمونه کم‌تر است. گفتنی است که نمودار

نمودارهای پلاریزاسیون نمونه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۵ و جدول ۳ استنباط می‌شود، با توجه به مقدار  $E_{corr}$  و  $i_{corr}$  محاسبه شده از نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل، نمونه دو پاس بهترین رفتار خوردگی را از خود نشان می‌دهد که با نتایج آزمون غوطه‌وری هم در تطابق است. این رفتار بهتر را می‌توان به توزیع مناسب‌تر و یکوخت‌تر منیزیم در ساختار این نمونه مربوط دانست. در واقع سرعت سرد شدن متوسط در این نمونه منجر به توزیع



شکل ۵- نمودار پلاریزاسیون تافل در محلول 3.5% NaCl

می‌دهد عبارت است از:



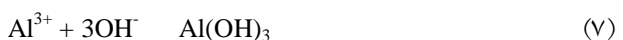
قدرت اسیدی در مناطق آندی باعث نشر تدریجی هیدروژن به صورت واکنش کاتدی ثانویه (در حفره) می‌شود:



از آنجا که محلول NaCl شامل مقدار مشخصی اکسیژن است، واکنش کاتدی اصلی در مناطق کاتدی احیا اکسیژن خواهد بود:



در نتیجه واکنش کاتدی غلظت هیدروکسید افزایش می‌یابد. از این رو pH موضعی قلیایی می‌شود و واکنش ۷ رخ می‌دهد:



و سپس  $\text{Al}(\text{OH})_3$  به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  تبدیل می‌شود:



عموماً گزارش شده است که حضور یون‌های کلریدی در محیط منجر به خوردگی حفره‌ای آلیاژهای آلومینیم می‌شود. چندین مکانیزم مختلف برای نشان دادن نقش یون‌های کلرید در خوردگی حفره‌ای فلزات غیرفعال مثل آلیاژهای آلومینیم، بیان شده است [۱۰-۱۲]. طبق مدل عیوب نقطه‌ای [۱۳]، یون‌های کلرید با جاهای خالی مثبت رقابت می‌کنند و جایگزین اکسیژن در فیلم اکسیدی می‌شوند و تشکیل کلریدفلزی می‌دهند و در

جدول ۳- جریان و پتانسیل خوردگی حاصل از

آزمون پلاریزاسیون تافل

نمونه	چگالی جریان خوردگی ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	ولتاژ خوردگی (V)
فلز پایه	$0.156 \times 10^{-6}$	-0.606
تک پاس	$0.246 \times 10^{-6}$	-0.5335
دو پاس	$0.087 \times 10^{-6}$	-0.4935
سه پاس	$0.149 \times 10^{-6}$	-0.7485

پلاریزاسیون فلز پایه با مطالعات گذشته انجام شده بر این فلز [۸] و آلیاژ آلومینیم سری Vxxx [۹] در محلول NaCl مطابقت دارد و همگی حاکی از فعال بودن این آلیاژها در این محیط کلریدی است. با در نظر گرفتن هم‌زمان اختلاف کم در مقدار  $i_{\text{corr}}$  نمونه‌ها، مشکلات ذاتی آزمون تافل و مشاهده‌های کیفی که نشان‌دهنده مقدار  $i_{\text{corr}}$  کم‌تر از یک میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع است [۸] می‌توان فرض کرد که جوش کاری تأثیری در افزایش نرخ خوردگی قطعات ندارد، بلکه در حالت دو پاس فلز جوش رفتار تاحدودی بهتر از فلز پایه از خود ارائه می‌دهد.

واکنش آندی جزئی که در مناطق آندی (مانند داخل حفره) طی خوردگی موضعی آلیاژهای آلومینیم در محلول NaCl رخ

جدول ۴. نتایج تحلیل عنصری EDS (درصد اتمی)

سایر عناصر	Mg	Al	نمونه
----	۶	۹۴	دندریتها
----	۷/۴۲	۹۲/۵۸	بین دندریتها
----	۳/۵۷	۹۶/۴۳	دندریتها
۶۹/۱	۲/۲۴	۲۸/۶۶	بین دندریتها

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تاثیر تعداد پاس جوش کاری بر ریزساختار و رفتار خوردگی آلیاژ Al5083-H321 مورد مطالعه قرار داده شد و نتایج زیر حاصل شد:

۱. ساختار فلز جوش به صورت انجماد رونشستی و با رشد رقابتی دندریتها در جهت حداکثر گرادیان دمایی است و با افزایش تعداد پاس جوش کاری، در اثر کاهش سرعت سرد شدن، فاصله بین بازوهای دندریتی افزایش می یابد.

۲. تحلیل های عنصری حاکی از آن است که سرعت سرد شدن متوسط در نمونه دو پاس موجب توزیع بهتر و یکنواخت تر منیزیم در نمونه جوش کاری شده با دو پاس است.

۳. با وجود آن که انتظار می رود فلز جوش مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به آلیاژ پایه داشته باشد ولی نتایج آزمون غوطه وری و پلاریزاسیون در محلول 3.5% NaCl برای آلیاژ Al5083 جوش کاری شده با فلز پرکن ER5183 حاکی از رفتار بهتر نمونه جوش کاری شده با دو پاس حتی نسبت به آلیاژ پایه است که مربوط به توزیع یکنواخت تر منیزیم و تشکیل لایه غیرفعال اکسیدی پایدارتر در این نمونه می شود.

#### واژه نامه

##### 1. epitaxial

نتیجه منجر به تخریب فیلم اکسیدی و شروع حفره دار شدن می شوند. بنابراین محصول خوردگی تشکیل شده در محلول NaCl با pH خنثی معمولاً شامل  $Al(OH)_3$ ،  $Al_2O_3$  و  $AlCl_3$  می شود [۱۴].

با توجه به تصاویر SEM (شکل ۴) می توان گفت حضور کلر در محلول خورنده منجر به تشکیل تعداد حفره های بیش تر و با عمق بیش تر در نمونه تک پاس شده است. از تصاویر ریزساختاری مشخص است که نسبت سطح نواحی آندی به کاتدی در نمونه تک پاس نسبت به دو نمونه دیگر بسیار کم تر است. لذا واکنش آندی به صورت متمرکز و با شدت بیش تر رخ می دهد و بنابراین شدت حفره دار شدن در این نمونه افزایش می یابد.

نتایج EDS مناطق مختلف ریزساختاری نمونه دو پاس و سه پاس که در جدول ۴ ارائه شده است، بیانگر بالاتر بودن درصد منیزیم در همه مناطق نمونه دو پاس نسبت به نمونه سه پاس است. اشاره شده است که بالاتر بودن درصد منیزیم باعث بهبود خواص خوردگی آلیاژهای آلومینیم و کاهش حفره دار شدن و شکست فیلم اکسیدی می شود [۴].

همان گونه که از نمودار شکل ۳ مشخص است در حضور فلز پایه حفره دار شدن نمونه ها در محیط 3.5% NaCl شدت می یابد. در واقع حالت گالوانیکی ایجاد شده در نمونه ها خوردگی را جز در مورد نمونه تک پاس شدت می بخشد. دلیل این عدم تشدید خوردگی در نمونه تک پاس، نزدیکی ساختاری و ترکیب شیمیایی فلز جوش در نمونه تک پاس به آلیاژ پایه است.



1. Popovic, M. and Romhanji, E., "Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Al-Mg Alloy Sheet with High Mg Content", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.125-126, pp. 275-280, 2002.
2. Kim, S.J., Han, M.S., Kim, S.K. and Jang, S.K., "Improvement of Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking by Annealing for Al-4.4Mg-0.6Mn Alloy", *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. s17-s22, 2011.
3. Berkeley, D.W., Sallam, H.E.M. and Nayeb-Hashemi, H., "The Effect of pH on the Mechanism of Corrosion and Stress Corrosion and Degradation of Mechanical Properties of AA6061 and Nextel 440 Fiber-Reinforced AA6061 Composite", *Corrosion Science*, Vol. 40, No. 2/3, pp. 141-153, 1998.
4. Brillas, E., Cabot, P.L., Centellas, F., Garrido, J.A., Pe  rez, E. and Rodríguez, R.M., "Electrochemical Oxidation of High-Purity and Homogeneous Al-Mg Alloys with Low Mg Contents", *Electrochimica Acta*, Vol. 43, No. 7, pp. 799-812, 1998.
5. ASM Handbook, *Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International, Vol. 2, 10th ed., 1990.
6. ASM Handbook, *Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, Vol. 6, 10th ed., 1993.
7. Kou, S., *Welding metallurgy*, 2nd ed., John Willey & sons, USA, 2003.
8. Wang, Y, Gupta, R.K, Sukiman, N.L., Zhang, R., Davies, C.H.J. and Birbilis, N., "Influence of Alloyed Nd Content on the Corrosion of an Al-5Mg Alloy", *Corrosion Science*, Vol. 73, pp. 181-187, 2013.
9. Rout, P.K., Ghosh, M.M. and Ghosh, K.S., "Effect of Solution pH on Electrochemical and Stress Corrosion Cracking Behavior of a7150 Al-Zn-Mg-Cu Alloy", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 604, pp. 156-165, 2014.
10. Mendoza, A.R. and Corvo, F., "Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Nonferrous Metals", *Corrosion Science*, Vol. 42, pp.1123-1147, 2000.
11. Lunt, T.T., Scully, J.R., Brusamarello, V., Mikhailov, A.S. and Hudson, J.L., "Spatial Interactions among Localized Corrosion Sites Experiments and Modeling", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 149, pp. 163-173, 2002.
12. Lucente, A.M. and Scully, J.R., "Pitting and Alkaline Dissolution of an Amorphous Nanocrystalline Alloy with Solute-Lean Nanocrystals", *Corrosion Science*, Vol.49, pp.2351-2361, 2007.
13. Macdonald, D.D., "The Point Defect Model for the Passive State", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 139, pp. 3434-3449, 1992.
14. Wang, B., Zhang, L., Su, Y., Mou, X., Xiao, Y. and Liu, J., "Investigation on the Corrosion Behavior of Aluminum Alloys 3A21 and 7A09 in Chloride Aqueous Solution", *Materials and Design*, Vol. 50, pp.15-21, 2013.