

مقایسه رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جوش داده شده به روش GTALW و FSLW

احسان وفا^۱، رضا بازرگان لاری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

rbazarganlari@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹)

چکیده

در این تحقیق، ورق های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به ضخامت پنج میلی متر، به روش های جوشکاری هم زن اصطکاکی (FSLW) و قوس الکترود تنگستن - گاز (GTALW) با طرح اتصال لبه روی هم به منظور مقایسه رفتار خوردگی آلیاژ به یکدیگر جوش داده شده اند. جوشکاری به صورت دو پاسه (یک پاس از رو و یک پاس زیر) انجام شد. ساختار متالورژیکی نمونه ها بعد از متالوگرافی توسط تصاویر میکروسکوپی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز کیفی (EDS) و همچنین ریز سختی بررسی شده است. رفتار خوردگی ناحیه جوش توسط نمودار پلاریزاسیون نافل در محلول ۳/۵ درصد NaCl بررسی شده است. آنالیز کیفی EDS وجود رسوبات حاوی آهن و سیلیسیم را در نمونه ها اثبات می کند. اندازه دانه نمونه های جوش داده شده به روش GTALW و FSLW در ناحیه جوش کاری شده به ترتیب حدود ۵ و ۱۸ میکرومتر مشخص گردید. دانه بندی نمونه ها در ناحیه جوش نمونه جوش داده شده به روش GTALW به دلیل انتقال حرارت جهت دار در حین جوشکاری، دندریتی بوده که در یک جهت رشد کرده بودند. نمودار های حاصل از آزمون نافل نشان داد که مقاومت به خوردگی هر دو نمونه جوشکاری شده کمتر از فلز پایه است. همچنین نمونه جوشکاری شده به روش FSLW مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به نمونه GTALW داشته است. دلیل این امر می تواند تفاوت دانه بندی و سرعت سرد شدن نمونه ها پس از جوشکاری باشد.

کلمات کلیدی:

جوشکاری هم زن اصطکاکی، جوشکاری قوس الکترود تنگستن - گاز، پلاریزاسیون نافل.

۱- مقدمه

وزن سبک، قیمت پایین، قابلیت جوشکاری مناسب، شکل پذیری خوب، استحکام مطلوب و مقاومت در برابر خوردگی قابل قبولی دارند [۲]. کاربرد زیاد آلیاژهای آلومینیوم در صنایع باعث شده است تا بررسی و تحقیق درباره جوشکاری این آلیاژها روز به روز توسعه و افزایش یابد [۱]. در جوشکاری

کاربردهای متنوع و ویژه آلومینیوم در صنایع هوافضا و اتومبیل سازی سبب شده است که آلیاژهای آلومینیوم بر اساس رفتار جوشکاری و روش های ممکن جوشکاری طبقه بندی شوند. آلیاژهای آلومینیوم سری ۲XXX، ۶XXX و ۷XXX بیشترین کاربرد را در این صنایع دارند [۱]. چرا که این آلیاژها دارای

آلیاژهای آلومینیوم نواحی ضعیف معمولاً در اطراف جوش شکل می‌گیرد که باعث کاهش مقاومت جوش می‌شود. تبلور مجدد، رسوب و رشد دانه‌ها می‌تواند باعث کاهش مقاومت در منطقه اتصال شود [۳]. مطالعات نشان داده است که با بهینه کردن فاکتورهای جوشکاری مانند تغییر روش جوشکاری، پیش‌گرم و پس‌گرم کردن جوش می‌توان استحکام جوش را تا حد زیادی افزایش داد [۱]. در میان آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ ۶۰۶۱، در صنایع مختلف از قبیل اتومبیل‌سازی و هوافضا کاربردهای مختلف و ویژه‌ای پیدا کرده است. عنصر اصلی در این آلیاژها منیزیم و سیلیسیم می‌باشد [۴].

اغلب سازه‌ها در صنعت از قطعات مختلفی تشکیل شده‌اند که با روش‌های گوناگونی به یکدیگر متصل می‌شوند. یکی از راه‌های اتصال فلزات به یکدیگر جوشکاری می‌باشد. در حقیقت جوشکاری یکی از «فرآیندهای اتصال‌اتی» است که در آن از به هم پیوستگی مواد، با گرم کردن آنها تا دمای جوشکاری، بدون اعمال فشار یا با اعمال فشار و بدون فلز پرکننده یا با آن انجام می‌شود و این توسط جامعه جوشکاری آمریکا (AWS^۱) تعریف گردیده است [۵]. رفتار خوردگی آلیاژهای جوش داده شده، بسته به نوع جوشکاری متفاوت است. روش‌های جوشکاری ذوبی از جمله جوشکاری با الکتروود تنگستنی تحت گاز محافظ، بیشترین کاربرد را در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم دارند. مطالعات نشان داده است که در این روش خط جوش مقاومت کمی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد [۶]. پارامترهای مختلفی از جمله حفره، ترک، تنش باقیمانده، انتخاب فلز پرکننده نامناسب و طراحی نامناسب جوش می‌توانند سبب کاهش مقاومت به خوردگی شوند. محدود کردن هر یک از عوامل ذکر شده در جوش می‌تواند سبب افزایش مقاومت به خوردگی نمونه جوشکاری شده شود [۷]. بسیاری از عیوبی که گفته شد در روش جوشکاری FSLW^۲ ایجاد نمی‌شوند یا محدود می‌شوند. زیرا این روش، جوشکاری در حالت جامد است. به همین دلیل بسیاری از بررسی‌ها نشان داده است که جوشکاری به روش FSLW مقاومت به خوردگی خوبی دارد [۸].

روش جوشکاری هم‌زن اصطکاکی یک روش جوشکاری مطلوب و فاقد عیوب حاصل از روش‌های جوشکاری ذوبی است که امروزه برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم و سایر فلزات همچون مس، تیتانیوم، منیزیم و فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای ایجاد شده در این مدل جوشکاری بسیار کمتر از جوشکاری ذوبی است و در دمایی کمتر از دمای ذوب اتصال انجام می‌شود. به دلیل دمای پایین در روش FSLW، در این روش عیوب متداول در اتصال ذوبی حذف شده و خواص مکانیکی و خوردگی فلز جوش بهبود و اصلاح می‌شود. اگرچه عمل اتصال توسط این روش جوشکاری در زیر نقطه ذوب فلز پایه اتفاق می‌افتد ولی حرارت حاصل شده ممکن است باعث ایجاد تغییر در ساختار آلیاژ گردد و در نتیجه خواص خوردگی تحت تاثیر قرار بگیرد [۹-۱۰].

در این تحقیق، رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جوش داده شده به روش قوس الکتروود تنگستن - گاز^۳ (GTALW) و جوشکاری هم‌زن اصطکاکی (FSLW) بررسی شده است، که نتایج آزمایش و پژوهش‌ها در ادامه ارائه شده‌اند.

۲- روش انجام تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ که با کد استاندارد ASTM B0209-04 تعریف می‌شود [۱۱]. به عنوان ماده تحت اتصال و از آلیاژ آلومینیوم ۴۰۴۳ به عنوان فلز پرکننده در جوشکاری نمونه‌ها، بر اساس استاندارد ASM استفاده گردیده است [۱۲]. ترکیب شیمیایی این آلیاژها در جدول ۱ ارائه شده است.

ورق‌های آلومینیوم به طول ۳۰ و عرض ۱۰ سانتی‌متر تهیه شده‌اند. جهت جوشکاری FSLW، سرعت خطی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش 800rpm در نظر گرفته شد. قطر شانه پین، طول پین و قطر پین به ترتیب ۲۰ و ۷ و ۷ میلی‌متر بود. برای این روش جوشکاری از فولاد H13 بر اساس استاندارد ASTM، به عنوان پین استفاده شده است [۱۳].

گردید. به دلیل ضخامت زیاد ورق ها، جوشکاری به صورت دو پاسه انجام شده است. جهت تعیین ریزساختار نمونه های جوش داده شده از میکروسکوپ نوری (زایس مدل KF2) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (VEGA\TESCAN-LMU) به همراه آنالیز کیفی EDS استفاده شده است.

جهت جوشکاری GTALW از ماشین MW2600-380V استفاده شده است. از گاز آرگون با خلوص ۹۹ درصد جهت حفاظت استفاده شده است. در تحقیق پیش رو، برای جوشکاری GTALW، ولتاژ دستگاه جوشکاری را ۳۵ ولت و جریان ۲۰۰ آمپر در نظر گرفته شد. همچنین زاویه جوشکاری ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است و جوشکاری به صورت لبه روی هم انجام

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۴۰۴۳ (wt%)

آلیاژ	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Pb
آلیاژ ۶۰۶۱	۹۷/۱۷	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۱۹	۰/۰۷	۱/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۰۵
آلیاژ ۴۰۴۳	۹۴/۴۸	۵/۰۰	۰/۳	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۵	-	-	-

۳- بحث و نتایج

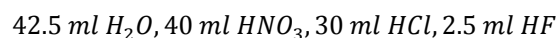
۳-۱ ریزساختار

شکل ۱ و ۲ به ترتیب تصاویر متالوگرافی از مرز خط جوش و فلز پایه را برای نمونه های جوش داده شده به روش GTALW و FSLW را نشان می دهند. در نمونه جوش داده شده به روش FSLW، به دلیل حرارت ورودی بالا، تشخیص ناحیه متأثر از حرارت مقداری دشوار است و تقریباً ساختاری مشابه با فلز پایه دارد. شکل ۳ ریزساختار نمونه جوش داده شده به روش FSLW را با بزرگنمایی بیشتر نشان می دهد.

در بررسی ریز ساختار خط جوش نمونه جوش داده شده به روش GTALW به دلیل ذوب شدن فلز پایه و وجود گرا دیان حرارتی بالا، ساختار دندردیتی و دانه های هم محور ایجاد شده است. در شکل ۴ و شکل ۵ تصویر SEM از نمونه جوش داده شده به روش FSLW و GTALW نشان داده شده است.

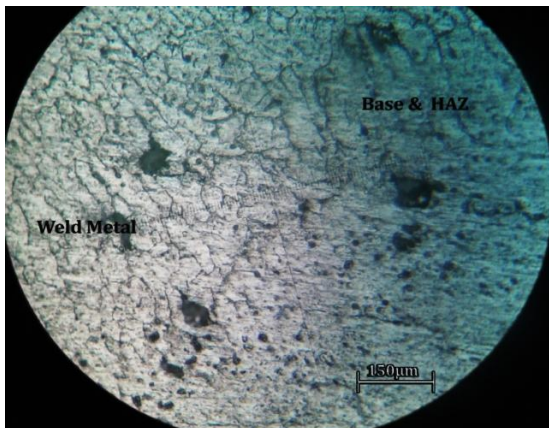
بر اساس اطلاعات حاصل از نرم افزار MI4STUDENTS، که بر اساس استاندارد و با استفاده از خطوط عمودی مشخص گردیده [۱۵]، اندازه دانه نمونه جوش داده شده به روش GTALW و FSLW به ترتیب حدود ۱۸ و ۵ میکرومتر می باشد، که این اعداد با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات گذشته در مقالات مختلف، قابل قبول می باشد [۱۶].

جهت متالوگرافی نمونه ها از دستگاه گریندر پولیشر^۴ مدل MP-2B و از سمباده های ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ استفاده گردید. بعد از متالوگرافی و پولیش کردن، از محلول اسیدی کِلر با ترکیب زیر جهت حکاکی استفاده شد.

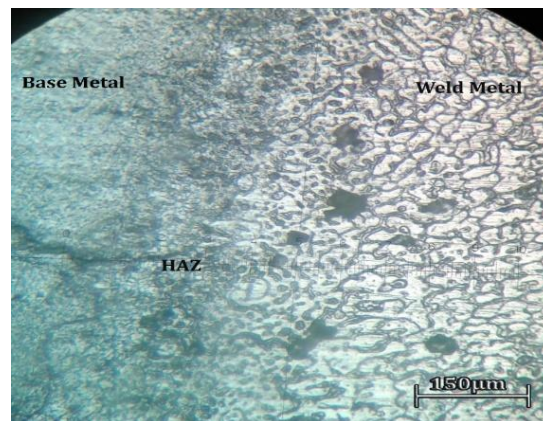


آزمون ریزسختی سنجی با استفاده از دستگاه کوپا مدل MH1 بر اساس استاندارد ASTM با استفاده از بار اعمالی ۱ کیلوگرم و مدت زمان اعمال نیرو ۲۰ ثانیه انجام شده است [۱۴].

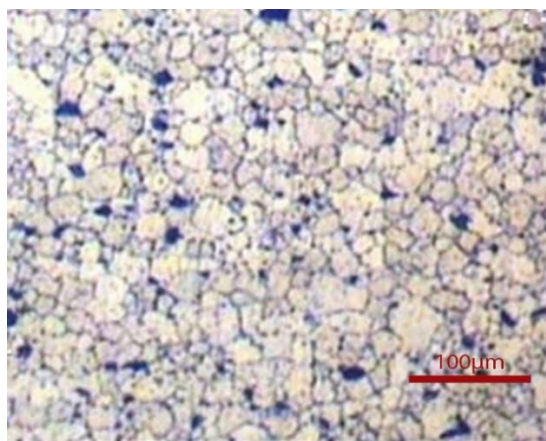
به منظور بررسی رفتار خوردگی قطعات، آزمون خوردگی توسط دستگاه IVIUM مدل ورتکس^۵ انجام و از محلول ۳/۵ درصد NaCl به عنوان محیط خورنده استفاده گردید. در آزمون خوردگی از الکتروود کالومل به عنوان الکتروود مرجع و از پلاتین به عنوان الکتروود کمکی استفاده شده است. نرخ روبش ۱ میلی ولت بر ثانیه در نظر گرفته شده است. پتانسیل اولیه و پتانسیل نهایی نسبت به حالت مدار باز تعیین شده است که به ترتیب ۰/۵- و ۰/۵ ولت اعمال شده است. قبل از شروع آزمایش و رسم نمودار تافل، نمونه را مدت ۳۰ دقیقه درون محلول ۳/۵ درصد NaCl قرار داده شده تا به حالت پایدار برسد.



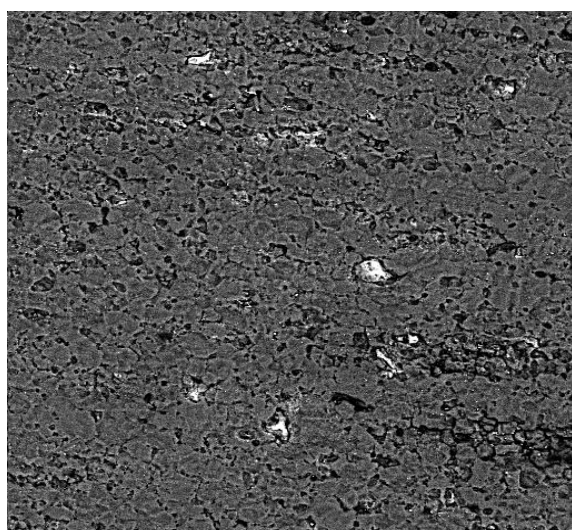
شکل (۲): مرز جوش نمونه جوش داده شده به روش FSLW



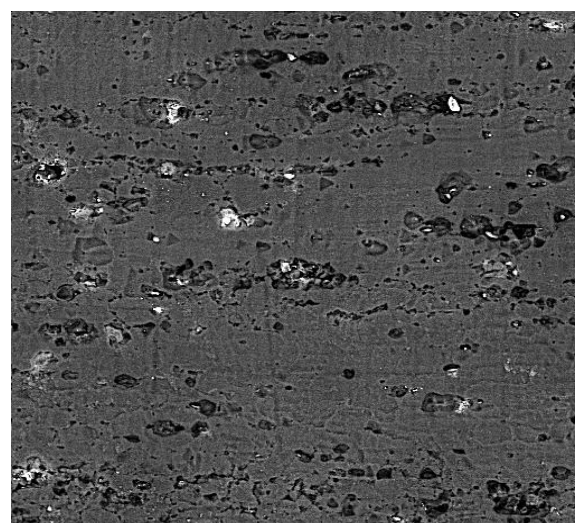
شکل (۱): مرز جوش نمونه جوش داده به روش GTALW



شکل (۳): دانه بندی و توزیع رسوبات حاصل از جوشکاری در نمونه جوش داده شده به روش FSLW



شکل (۵): تصویر SEM از نمونه جوش داده شده به روش GTALW



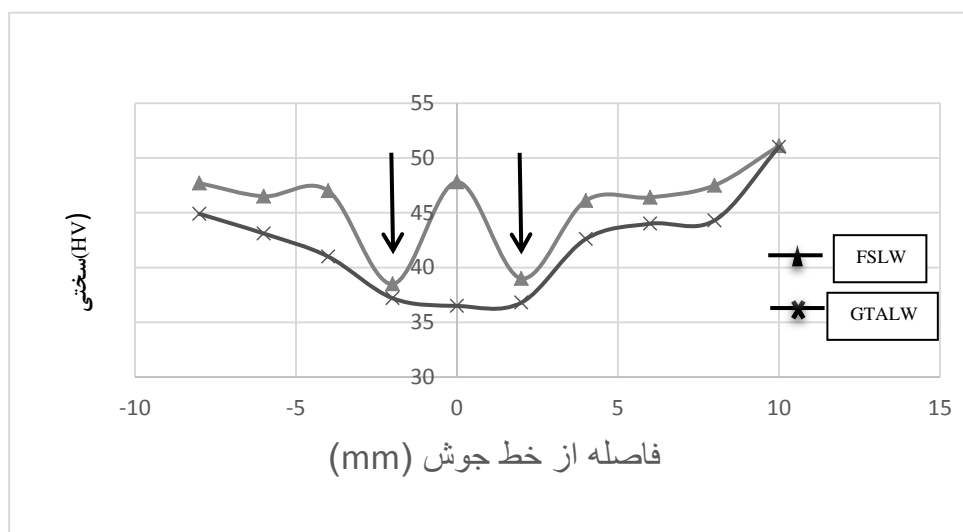
شکل (۴): تصویر SEM از ناحیه جوش نمونه جوش داده به روش FSLW

۳-۲- آزمون ریزسختی

در شکل ۶ نمودار حاصل از آزمون ریزسختی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، سختی نمونه جوش داده شده به روش FSLW بیشتر از نمونه جوش داده شده به روش GTALW است. مشاهده می شود که نمودار ریزسختی نمونه جوش داده شده به روش FSLW به شکل W است در حالی که نمودار نمونه جوش داده شده به روش GTALW به صورت سهمی رسم شده است. نمودار ریزسختی نمونه جوش داده شده به روش FSLW دارای تقارن است این در حالی است که نمونه GTALW چنین تقارن منظمی را ندارد.

در نمونه جوش داده شده به روش FSLW دانه بندی در منطقه جوش ریز می باشد. کوچک بودن ریزساختار و اندازه دانه می تواند باعث افزایش بعضی از خواص مکانیکی از جمله سختی نمونه شود. افزایش میزان سختی به واسطه رسوب های موجود در منطقه هم زده شده مرکزی در تحقیق های گذشته توسط

محققین اثبات شده است [۱۷]. مشاهده می شود که در نمونه جوش داده شده به روش GTALW، در منطقه مرکزی خط جوش، سختی کاهش پیدا کرده در حالی که در نمونه جوش داده شده به روش FSLW، منطقه هم زده شده مرکزی سختی تقریباً برابری با فلز پایه از خود نشان می دهد. دلیل این امر می تواند تفاوت در نحوه جوشکاری باشد. ناحیه متأثر از حرارت هر دو نمونه جوش داده شده کمترین میزان سختی را دارند. پیکان های موجود در نمودار، مرز خط جوش و ناحیه متأثر از حرارت را نشان می دهند. در قسمتی که ناحیه متأثر از حرارت در تماس با منطقه هم زده شده مرکزی می باشد، به دلیل ورود حرارت بیشتر نسبت به قسمتی که در مجاور فلز پایه است، کمترین مقدار سختی مشاهده می شود و با پیشروی به سمت قسمت همجوار فلز پایه، سختی افزایش پیدا می کند.



شکل (۶): نمودار ریزسختی نمونه های جوش داده شده به روش GTALW و FSLW

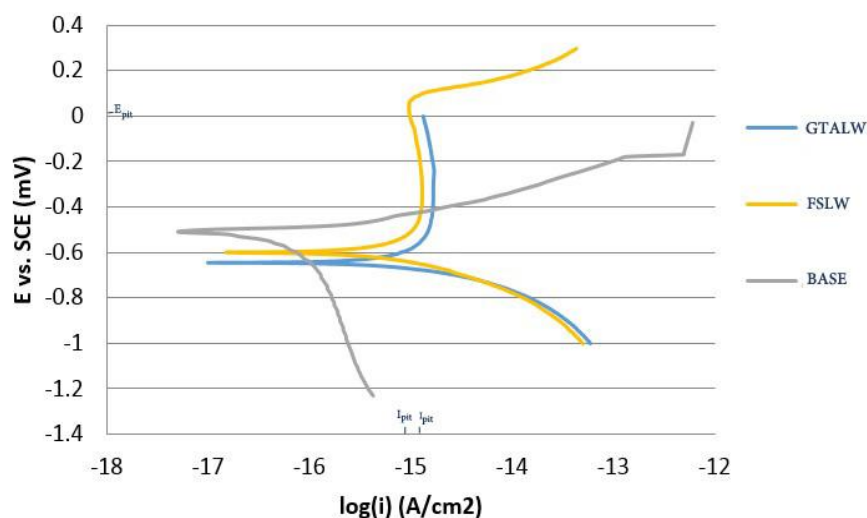
۳-۳- رفتار خوردگی

شکل ۷ نمودار تافل خط جوش دو نمونه جوش داده شده به روش GTALW و FSLW و فلز پایه را نشان می دهد. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به نمودار آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، رفتار ناحیه کاتدی در نمودار پلاریزاسیون

نمونه های GTALW و FSLW تقریباً یکسان و مماس با یکدیگر هستند. همچنین در ناحیه آندی هم رفتار تقریباً مشابهی مشاهده می شود. هر دو نمونه غیرفعال شده اند، اما منطقه غیر فعال نمونه FSLW بیشتر است. دلیل این امر می تواند تفاوت دانه بندی و سرعت سرد شدن نمونه ها پس از جوشکاری باشد. در

نیست و به صورت محسوس قابل مشاهده است. جریان حفره دار شدن I_{pit} در نمونه GTALW از جریان حفره دار شدن نمونه FSLW بیشتر است.

نمودار فلز پایه، ناحیه غیر فعال وجود ندارد. در فلز پایه پتانسیل حفره دار شدن E_{pit} با پتانسیل خوردگی E_{corr} یکسان است در حالی که در نمودار نمونه های GTALW و FSLW پتانسیل حفره دار شدن E_{pit} با پتانسیل خوردگی E_{corr} هر دو نمونه یکسان



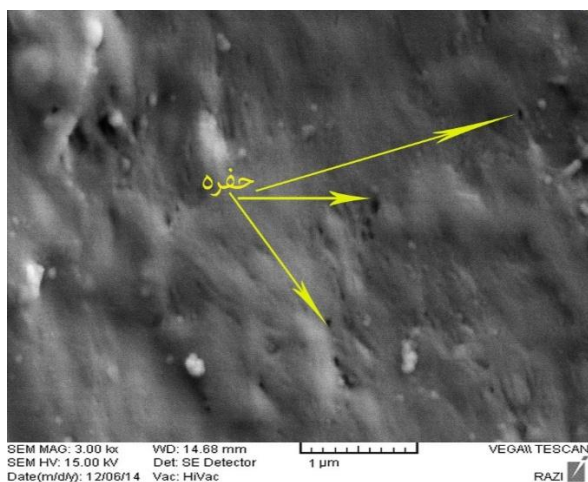
شکل (۷): نمودار تافل فلز پایه و خط جوش دو نمونه جوش داده شده در محلول ۳/۵ درصد NaCl

جدول (۲): داده های حاصل از نمودار تافل خط جوش نمونه ها

	Base	FSLW	GTALW
E_{CORR} (V)	-۰/۵۱۶۱	-0/5960	-0/6625
I_{CORR} (A/cm^2)	$6/253 \times 10^{-16}$	$9/779 \times 10^{-15}$	$8/253 \times 10^{-14}$

کمتری نسبت به فلز پایه داشته باشد. هر دو نمونه جوش داده شده مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به فلز پایه دارند. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می دهد که فلز پایه دچار خوردگی حفره ای شده است. شکل ۸ تصویر SEM از فلز پایه بعد از آزمون خوردگی نشان می دهد. رسوبات ایجاد شده در نمونه های جوشکاری شده می توانند باعث کاهش مقاومت به خوردگی شوند. پتانسیل خوردگی رسوبات و فازهای ثانویه ایجاد شده در نمونه های جوش کاری شده مشابه فلز پایه نیست. این تفاوت در پتانسیل می تواند سبب ایجاد یک سل گالوانیکی شود [۱۹].

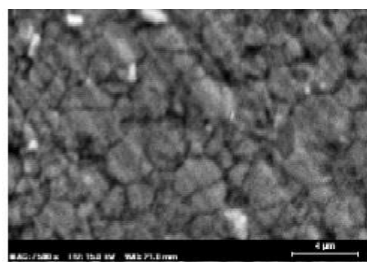
مقاومت به خوردگی خط جوش نمونه جوش داده شده به روش FSLW بیشتر از نمونه GTALW است. دلیل این مقاومت بیشتر می تواند روش جوشکاری باشد و رسوبات ایجاد شده در در نمونه باشد [۱۸]. در نمونه جوش داده شده به روش GTALW ساختار دندریتی ایجاد شده در جوش، سبب توزیع ناهمگن در ساختار می شود که این توزیع ناهمگن می تواند عامل کاهش مقاومت به خوردگی باشد. در نمونه جوش داده شده به روش FSLW، ریزتر شدن دانه ها در منطقه هم زده شده مرکزی، باعث افزایش سطوح مرزدانه ها می شود که بر اساس ترمودینامیک مقاومت به خوردگی کاهش یافته و سبب می شود که نمونه جوش داده شده به روش FSLW مقاومت به خوردگی



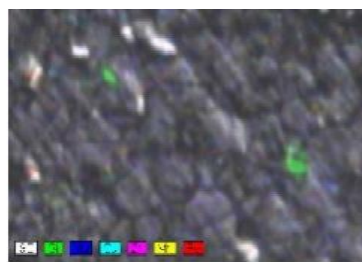
شکل (۸): تصویر SEM از فلز پایه بعد از آزمون خوردگی

جدول ۳ داده های حاصل از آنالیز کیفی نقاط مشخص شده در شکل ۹ برای نمونه های جوش داده شده را نشان داده شده است.

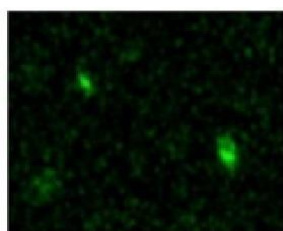
با توجه به آنالیز کیفی نمونه های جوش داده شده، رسوباتی در نمونه ها ایجاد می شوند که غنی از آهن و سیلیسیوم هستند. در



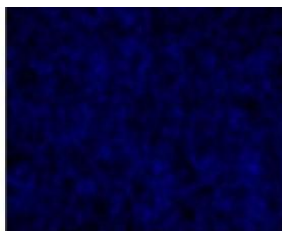
SEM image



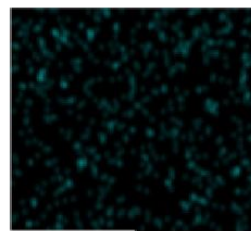
MAP data



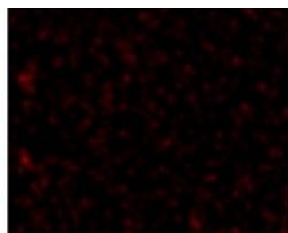
Si-KA



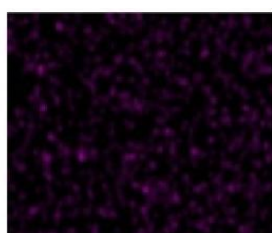
Mg-K



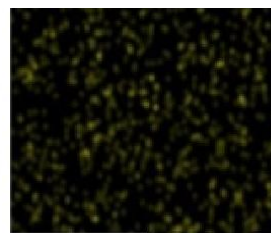
Cu-KA



Fe-KA

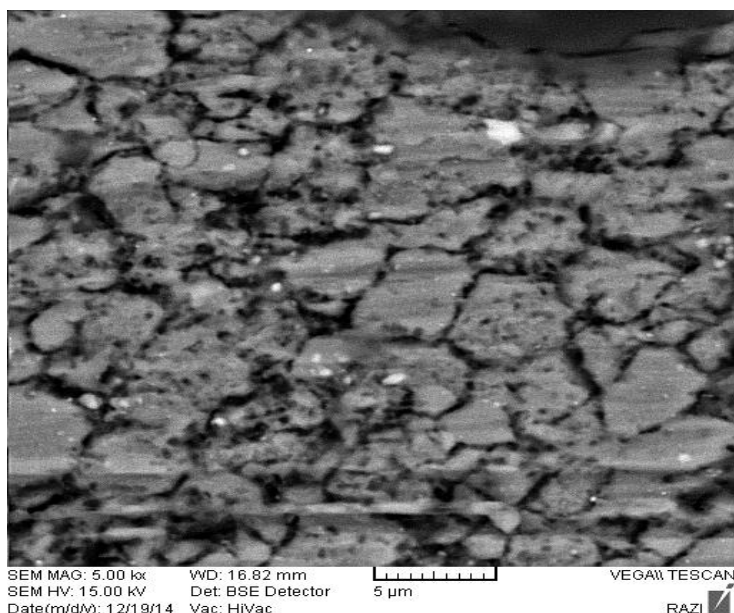


Zn-KA



Mn-KA

شکل (۹): آنالیز کیفی (EDS) رسوب موجود در نمونه جوش داده شده به روش FSLW



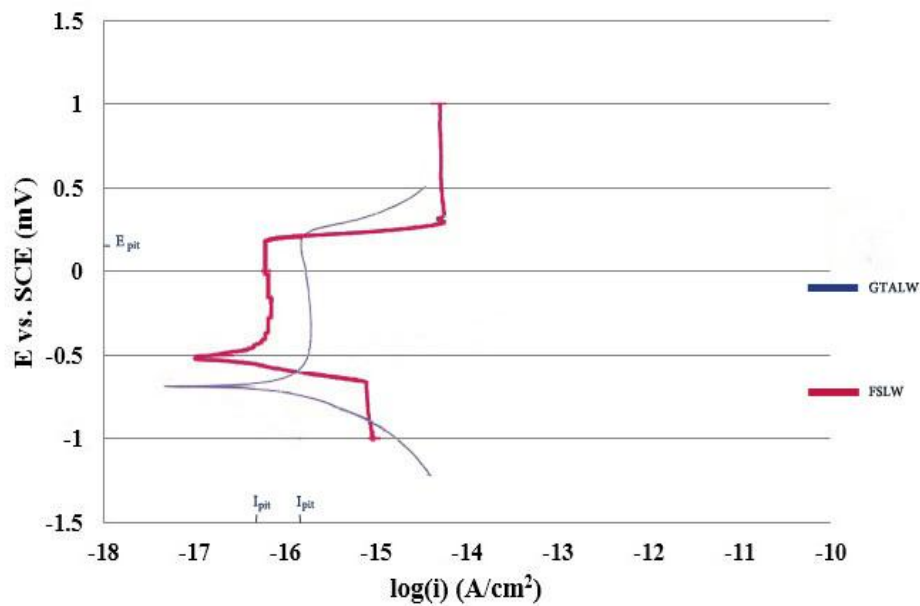
شکل (۱۰): خوردگی بین دانه ای و حفره ای در نمونه جوش داده به روش FSLW

جدول (۳): داده های حاصل از آنالیز EDS رسوب درون نمونه جوش داده به روش FSLW (% wt)

	Al	Mg	Si	Fe	Cr	Cu	Mn
A	۹۰/۲۷	۰/۶۱	۱/۳۱	۷/۲۴	۰/۲۷	۰/۳	-
B	۹۲/۰۱	-	۷/۲۴	۰/۷۵	-	-	-
C	۸۶/۰۶	۰/۴۵	۱۱/۷۳	۰/۷۵	۰/۱۷	۰/۷۹	۰/۰۵

آلومینیوم می تواند سبب ایجاد حفره در نمونه شود [۲۰]. در نمونه های جوشکاری شده به روش FSLW مشاهده می شود که خوردگی بین دانه ای در این نمونه ها اتفاق افتاده است. آلیاژ های آلومینیوم ۶۰۶۱ به دلیل وجود عناصر منیزیم و سیلیسیوم در برابر خوردگی بین دانه ای مقاوم هستند و کمتر این نوع خوردگی در این آلیاژ اتفاق می افتد. این آلیاژها بیشتر دچار خوردگی حفره ای می شوند. اما هنگامی که میزان سیلیسیوم در آلیاژ بیشتر شود با منیزیم تشکیل رسوب Mg_2Si می دهند که این ترکیب پتانسیل خوردگی بین دانه ای را در نمونه افزایش می دهد [۲۱-۲۳].

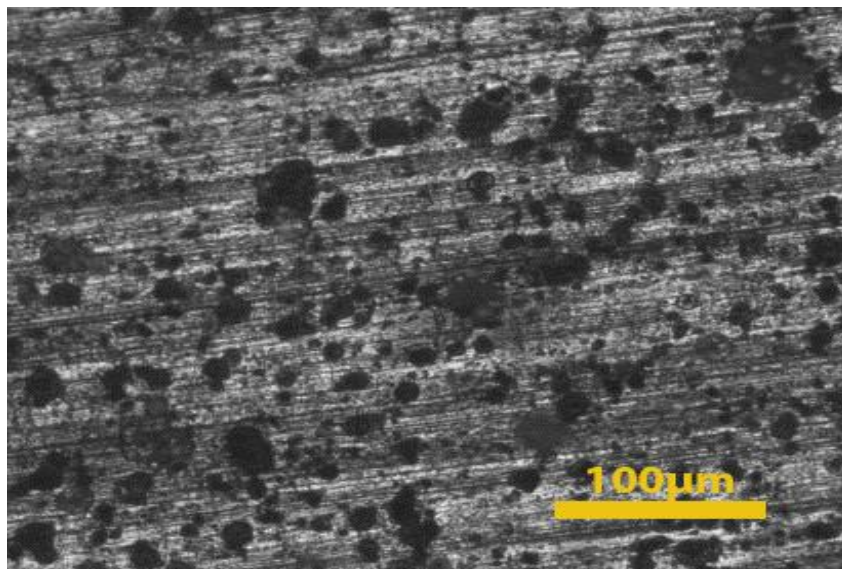
پتانسیل خوردگی این مناطق نسبت به فلز پایه متفاوت است. به همین دلیل می توانند به عنوان یک سل خوردگی عمل کنند. هر چه میزان آهن و سیلیسیوم در رسوبات ایجاد شده بیشتر باشد، در آن مناطق واکنش های کاتدی بیشتر اتفاق می افتد. شکل ۱۰ نشان می دهد که خوردگی بیشتر در مجاورت رسوبهای ایجاد شده اتفاق می افتد. رسوباتی که غنی از آهن هستند می توانند سبب ایجاد خوردگی گالوانیکی در نمونه شوند. بر اساس جدول سری گالوانیکی، آلومینیوم نسبت به آهن و سیلیسیوم فعال تر است و هنگامی که آلومینیوم در مجاورت این عناصر باشد به صورت آنند عمل کرده و خورده می شود. خورده شدن



شکل (۱۱): نمودار تافل ناحیه متأثر از حرارت در محلول ۳/۵ درصد NaCl

مکانیزم مشابهی اتفاق افتاده است، حال اینکه پتانسیل ناحیه کاتدی نمونه FSLW بیشتر از نمونه GTALW است. پتانسیل حفره دار شدن E_{pit} در نمونه ها تقریباً یکسان است اما جریان حفره دار شدن I_{pit} در نمونه GTALW بیشتر است.

در آزمون بعد، نمودار تافل برای ناحیه متأثر از حرارت برای هر دو نمونه جوش کاری شده رسم شده است. همانطور که در شکل ۱۲ و جدول ۴ مشاهده می شود، هر دو نمونه در ناحیه آندی نمودار غیر فعال شده اند. در ناحیه کاتدی هر دو نمودار



شکل (۱۲): ناحیه متأثر از حرارت نمونه GTALW بعد از آزمون خوردگی

جدول (۴): داده های حاصل از نمودار تافل ناحیه HAZ

	FSLW	GTALW
E_{CORR} (V)	-0/5160	-0/7713
I (A/cm^2)	$1/679 \times 10^{-16}$	$1/345 \times 10^{-15}$

نمونه جوش داده شده به روش GTALW بسیار بیشتر از نمونه FSLW می باشد [۲۶].
اندازه حفره های ایجاد شده در نمونه GTALW بیشتر از نمونه جوش داده شده به روش FSLW است. به طور کلی می توان گفت که مقاومت به خوردگی ناحیه متاثر از حرارت نمونه جوش داده به روش GTALW کمتر از ناحیه متاثر از حرارت نمونه FSLW است.

۴- نتیجه گیری

۱- در نمونه های جوش داده شده به روش FSLW به دلیل رخداد تبلور مجدد دینامیکی اندازه دانه های ناحیه جوش نسبت به جوش ذوبی حاصل از روش GTALW کوچک تر و از نظر ترکیب شیمیایی یکنواخت تر بود. اندازه دانه در نمونه های جوشکاری شده در روش GTALW حدود ۱۸ میکرومتر و اندازه دانه در نمونه جوش داده شده به روش FSLW حدود ۵ میکرومتر بود. همچنین در نمونه جوش داده شده به روش FSLW به دلیل ورود حرارت کمتر به نمونه، نسبت به روش GTALW و سرد شدن سریعتر نمونه FSLW دانه ها فرصت رشد نداشته و کوچکتر می شوند.

۲- مقاومت به خوردگی در نمونه های جوشکاری شده به روش GTALW کمتر از نمونه جوش داده شده به روش FSLW بود. زیرا نمونه های جوشکاری شده ذوبی دارای ساختار انجمادی غیر همگن در ناحیه جوش بودند. همچنین حفره های ایجاد شده در نمونه GTALW بیشتر و شدیدتر نسبت به حفره های ایجاد شده در نمونه FSLW بود.

۳- آزمون ریزسختی سنجی نشان داد استحکام مکانیکی اتصالات حاصل از روش جوشکاری FSLW مناسب تر از

با توجه به جداول مشاهده می شود که نمونه جوشکاری شده به روش FSLW مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به نمونه GTALW دارد [۱۸]. در روش GTALW حرارت زیادی به نمونه وارد می شود. حرارت زیاد در حین جوشکاری سبب نفوذ عناصر آلیاژی به سوی مرز دانه ها و تجمع عناصر آلیاژی در مرز دانه ها شود که این امر می تواند باعث ایجاد اختلاف پتانسیل در نمونه گردد و باعث افت مقاومت به خوردگی شود. سرعت خوردگی نمونه جوش داده شده به روش FSLW در ابتدا بسیار سریع است، اما بعد از مدتی روی سطح نمونه لایه محافظ ایجاد می شود و سرعت خوردگی کم می شود. با توجه به نمودارهای پلاریزاسیون ناحیه متاثر از حرارت مشاهده می شود که در قسمتی از نمودار جریان خوردگی ثابت است اما پتانسیل خوردگی افزایش پیدا می کند. دلیل این امر می تواند تشکیل لایه اکسیدی بر روی نمونه ها باشد [۲۴]. بعد از مدتی لایه اکسیدی دچار ضعف شده و نمودار از حالت پسیو خارج می شود. این خارج شدن از حالت پسیو نشان دهنده ایجاد حفره در ناحیه متاثر از حرارت نمونه های جوش داده شده است و نمونه ها دچار خوردگی حفره ای شده اند. همانگونه که در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود، میزان حفره های ایجاد شده در نمونه جوش داده به روش GTALW بسیار بیشتر از تعداد حفره های ایجاد شده در نمونه جوش داده شده به روش FSLW است. دلیل این امر می تواند حرارت تولید شده در حین جوشکاری GTALW باشد که سبب یک شیب حرارتی می شود که می تواند مقاومت به خوردگی را کاهش دهد [۲۵]. شکل ۱۲ ناحیه متاثر از حرارت نمونه جوش داده شده به روش GTALW را بعد از آزمون خوردگی نشان می دهد. پتانسیل حفره دار شدن در

- joins”, J Mater Process Technol, Vol. 152, pp. 97–105, 2004.
- [9] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, Materials science and engineering R, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [10] W. M. Thomas, “Friction stir welding”, international patent application PCT/GB92, Patent application GB9125978, Vol. 8, 1991.
- [11] ASTM standard B0209M-04, Aluminum and magnesium alloys, specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate, Vol. 02. 02. 2005.
- [12] ASM handbook. Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials. Section: alloy and temper designation systems for aluminum and aluminum alloys, ASM, International, Vol. 2, 1997.
- [13] ASM handbook. Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials. Section: alloy and temper designation systems for aluminum and aluminum alloys, ASM, International, Vol. 3. 01, 1997.
- [14] ASM Hand book. Properties and selection. Section: standard test methods for knop and vickers hardness of materials, ASM, international, Vol. 3, 1998.
- [15] ASM Hand book. Properties and selection. Section: standard test methods for vickers hardness of metallic materials, Asm, International, Vol. 3, 2010.
- [16] Z. Suhuddin UFHR, S. Mironov, Y. S. Sato & K. H. Grain, “structure and texture evolution during friction stir welding of thin 6061 aluminum alloy sheets” Mater Sci Eng, Vol. 527A, pp. 1962-1969, 2010.
- [17] Y. S. Sato, H. Kokowa, M. Enomoto & S. Jorgan, “Metallurgical and Materials Transaction”, Vol. 30A, pp. 3125, 1999.
- [18] V. Fahimpour & S. K. Sadrnejad, “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.
- [19] C. H. Tang, F. T. Cheng & H. C. Man, “Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese–
- اتصالات حاصل از شیوه جوشکاری GTALW است. زیرا در فرایند ساختار ناحیه جوش ریزدانه و بسیار یکنواخت تر از ریز ساختار ناحیه جوش GTALW می باشد.
- ۴- خوردگی ایجاد شده در نمونه ها بیشتر از نوع خوردگی حفره ای می باشد. اما در بعضی مناطق از نمونه جوش داده شده به روش FSLW خوردگی بین دانه ای نیز مشاهده شده است.
- ۵- مراجع**
- [1] M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Amba, B. J. Connolly, S. W. Williams & D. A. Price, “The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024–T351”, Corros Sci, Vol. 49, pp. 877–909, 2007.
- [2] G. Mathers, “The welding of aluminium and its alloys”, Abington: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2002.
- [3] T. S. Kumar, V. Balasubramanian & M. Y. Sanavullah, “Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy”, Mater Des, Vol. 28, pp. 2080–2092, 2007.
- [4] R. Ahmad & M. A. Bakar, “Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method”, Mater Des, Vol. 32, pp. 5120–5126, 2011.
- [5] کوکبی، "تکنولوژی فرایندهای جوشکاری"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۵.
- [6] D. A. Wadeson, X. Zhou, G. E. Thompson, P. Skeldon, L. Djapic Oosterkamp & G. Scamans, “Corrosion behaviour of friction stir welded AA7108 T79 aluminium alloy”, Corros Sci, Vol. 48, pp. 887–897, 2006.
- [7] S. Maggiolino, Ch. Schmid, “Corrosion resistance in FSW and in MIG welding techniques of AA6XXX” J Mater Process Technol, Vol. 197, pp. 237–240, 2008.
- [8] 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

- [24] F. Gharavi, K. H. Motari & R. Yonus, "corrosion behavior of friction stir welded lap joint of AA6061-T6 Aluminum alloy", *Materials research*, Vol. 43, pp. 314-322, 2015.
- [25] W. R. Osorio, C. M. Freire & A. Garcia, "the effect of the dendritic microstructure on the corrosion resistance of Zn-Al alloys" *J Alloys Compd*, Vol. 395, pp.179-191, 2005.
- [26] R. Ahmad & M. A. Bakar, "Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6265 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method" *Mater Des*, Vol. 308, pp. 1502-1506, 2011.
- nickel-aluminum bronze", *Mater Sci Eng*, Vol. 373A, pp. 195-203, 2004.
- [۲۰] ک. امینی، ف. غروی، ا. چمی، م. امیرخانی و ح. قاسمی " بررسی رفتار خوردگی مقطع جوشکاری شده آلیاژ آلومینیوم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۴، ص ۱-۱۲۳، ۱۳۹۳.
- [21] *Handbook of Corrosion Data*, Second Edition by Bruce D. Crag, 1995.
- [22] W. Carrol & C. Breslin, *British Corrosion Journal*, Vol. 26, pp. 255-259, 1991.
- [23] N. Birbilis & R. Buchheit, *Electrochemical Society*, Vol. 152, pp. 140-151, 2005.

۶- پی نوشت

- [1] American Welding Society (AWS)
- [2] Friction Stir Lap Welding
- [3] Gas Tungsten Arc Lap Welding
- [4] Grinder Polisher
- [5] Vertex