

ارزیابی مقاومت به خوردگی و جوش‌پذیری اتصال غیر همجنس فولاد زنگ‌نزن SAF 2205 به فولاد زنگ‌نزن AISI 316L در روش جوشکاری GTAW با سیم‌جوش‌های ER 309L و ER 347

ابوالفضل متشکر^۱، ایمان دانایی*^۲، محمود پیکری^۳، علی اشرفی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت

^۲ استادیار، گروه مهندسی بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت

^۳ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز

* نویسنده مسئول: danaee@put.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۰۸

چکیده

در این تحقیق اثر فرایند جوشکاری قوس تنگتن تحت پوشش گاز محافظ (GTAW) بر ریزساختار، استحکام و مقاومت به خوردگی اتصال جوشی غیر همجنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی SAF 2205 به فولاد زنگ‌نزن آستیتی AISI 316L مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از دو نوع سیم جوش مختلف با کدهای AWS ER 309L و AWS ER 347 جوشکاری تحت شرایط یکسان انجام شد. جهت تأیید سلامت جوش‌های حاصل، آزمون‌های غیرمخرب بازرسی چشمی، مایع نافذ و رادیوگرافی انجام شد. نمونه‌های متالوگرافی از مقطع جوش به‌منظور مطالعه ریزساختار مناطق مختلف جوش توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی، تهیه شدند. استحکام اتصالات جوشی نیز توسط آزمون کشش تعیین شد. مقاومت به خوردگی اتصالات جوشی نیز توسط آزمون‌های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی ارزیابی شد. در فلز جوش حاصل از سیم جوش ER 347 فاز ترد سیگما ایجاد شد که سبب کاهش مقاومت به خوردگی این اتصال جوشی شد. بر اساس نتایج بررسی‌های متالورژیکی و آزمون‌های خوردگی مشخص شد که برای این اتصال جوشی، سیم جوش ER 309L سبب ایجاد استحکام و مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به سیم جوش ER 347 می‌شود.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ‌نزن، جوشکاری غیر همجنس، پلاریزاسیون، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.

Evaluation of Corrosion Resistance and Weldability of Dissimilar Joint Between Duplex Stainless Steel SAF 2205 and Austenitic Stainless Steel AISI 316L Welded by GTAW Process Using Welding Wires with Codes ER 347 and ER 309L

Abolfazl Moteshakker¹, Iman Danaee^{*2}, Mahmoud Peikari², Ali Ashrafi³

¹. M. Sc. Student, Technical inspection engineering, PUT University

². Assistant Professor, Department of technical inspection engineering, PUT University

³. Assistant Professor, Department of materials science, Shahid Chamran university of Ahvaz

* Corresponding Author: danaee@put.ac.ir

Submission: December 3, 2011 Acceptance: February 27, 2012

Abstract

In this study, the influence of gas tungsten arc welding (GTAW) on microstructure, strength and corrosion resistance of dissimilar weld joint between stainless steel SAF 2205 and stainless steel AISI 316L was investigated. Welding was accomplished by two different types of welding wires with codes ER 347 and ER 309L at the same conditions. To verify soundness of produced welded samples, nondestructive tests including visual inspection, liquid penetrant and radiography were performed. Metallographic samples were prepared from cross-section areas of weld joints to study microstructure of different regions of weld joints by optical microscopy and scanning electron microscopy. The strength of weld joints was determined by tensile tests. Corrosion resistance of weld joints was evaluated by electrochemical polarization and electrochemical impedance tests. In the weld metal which was produced by welding wire with code ER 347, the brittle sigma phase was created resulted in decreasing corrosion resistance of weld joint. According to the results of metallurgical investigations and corrosion tests, it was founded that for produced weld joints, welding wire with code ER 309L causing more strength and more corrosion resistance than welding wire with code ER 347.

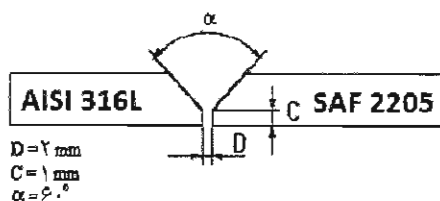
Keywords: Stainless steel, Dissimilar joint welding, Polarization, Electrochemical impedance Spectroscopy.

۱- مقدمه

سرباره وجود نداشته و کنترل بسیار خوبی بر پارامترهای جوشکاری وجود دارد [۵]. این اتصال در ساخت تانکرهای شیمیایی اجتناب ناپذیر است [۶]. جهت ارزیابی کیفیت اتصال، آزمایش‌های متالوگرافی، کشش و خوردگی انجام شد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، ورق‌هایی از فولاد زنگ‌نزن دو فاز SAF 2205 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L با ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی فولادها با استفاده از یک دستگاه آنالیزگر شیمیایی فلز^۳ مدل SPECTROLAB 3000 تعیین شده و نتایج در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی فولادهای مورد استفاده نیز در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۱، به منظور آماده‌سازی ورق‌ها برای جوشکاری، از یک طرح اتصال سربه سر جناغی یک طرفه استفاده شد. سپس دو نوع سیم جوش مختلف با کدهای AWS ER 309L و AWS ER 347 و دارای ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی به ترتیب ارائه شده در جداول ۱ و ۲، انتخاب شده و سپس جوشکاری توسط دستگاه GTAW مدل PARS-EL 6335 انجام شد. همچنین الکتروود تنگستن غیر مصرفی با کد AWS EWTh-2 (الکتروود ته قرمز) و قطر ۲/۴ میلی‌متر انتخاب شد. پارامترهای جوشکاری در جدول ۳ ذکر شده اند. پس از جوشکاری، جهت تأیید سلامت جوش‌های حاصل (عدم وجود هر نوع ناپیوستگی)، آزمون‌های غیرمخرب بازرسی چشمی، مایع نافذ و رادیوگرافی مطابق با ASME Sec V انجام شدند.



شکل ۱: طرح اتصال سربه سر جناغی یک طرفه.

فولادهای زنگ‌نزن، به دلیل ویژگی‌هایی مانند استحکام و مقاومت به خوردگی بالا به‌طور گسترده در محیط‌های مختلف از جمله صنایع نفت، گاز و پتروشیمی استفاده می‌شوند. با توجه به اهمیت و کاربرد این فولادها، جوشکاری و اتصال آنها نیز اهمیت داشته و از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف اصلی استفاده از فولادهای زنگ‌نزن، اغلب مقابله با خوردگی است. در بسیاری موارد به دلیل عدم رعایت الزامات خاص کار با این فولادها، عملکرد فولادهای زنگ‌نزن در حد انتظار نبوده و باعث بروز مشکلاتی از جمله کاهش طول عمر سیستم و نیاز به تعمیرات پیش از موعد گردیده است. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارای ویژگی‌هایی از جمله مقاومت به خوردگی، انعطاف‌پذیری، چقرمگی و جوش‌پذیری هستند. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی^۱، دارای ریزساختاری شامل فاز فریت و آستنیت می‌باشند که در اغلب موارد تمایل بر این است که ۵۰٪ فاز فریت و ۵۰٪ فاز آستنیت در ریزساختار وجود داشته باشد. به دلیل استحکام بالاتر فولاد زنگ‌نزن دوفازی، ضخامت قطعات ساخته شده از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی (مثلاً لوله‌های مبدل‌های حرارتی) نسبت به قطعات ساخته‌شده از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، کمتر است و این امر سبب انتقال حرارت بهتر، کاهش وزن قطعه و مصرف کمتر مواد اولیه می‌شود [۳-۱]. جوش‌های غیر هم‌جنس، در لوله‌های اصلی گاز در ایستگاه‌های انرژی، راکتورهای هسته‌ای و در صنایع پتروشیمی استفاده می‌شوند. در جوشکاری فلزات غیر هم‌جنس، به منظور بهره برداری کامل از مزایای هر دو آلیاژ، باید از فلز پرکننده و روش جوشکاری مناسب استفاده شود [۴]. در این تحقیق به بررسی اتصال غیر هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی SAF 2205 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L به روش GTAW^۲، با استفاده از سیم جوش‌های AWS ER 309L و AWS ER 347 و سرباره پرداخته شده است. در جوش‌های حاصل از فرایند GTAW،

^۳ Chemical metal analyzer

^۱ Duplex stainless steel

^۲ Gas tungsten arc welding

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولادها و سیم جوش‌های مورد استفاده در تحقیق (wt%)

ماده	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cu
SAF 2205	۰/۰۲	۰/۷۶	۱/۹۲	۲۱/۵۹	۴/۵۴	۲/۵	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۱۴
AISI 316L	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۹۵	۱۷/۹۲	۱۰/۰۷	۲/۰۶	۰/۰۴	-	۰/۲۸
AWS ER 347	۰/۰۵	۰/۵	۱/۸	۲۰/۳	۹/۵	-	۰/۵	-	-
AWS ER 309L	۰/۰۲	۰/۵	۱/۷	۲۴	۱۲/۲	-	-	-	-

جدول ۲: خواص مکانیکی فولادها و سیم جوش‌های مورد استفاده در تحقیق (اطلاعات سازنده)

ماده	حداقل استحکام تسلیم (MPa)	حداقل استحکام کششی (MPa)	حداقل ازدیاد طول (%)
SAF 2205	≥ ۴۶۰	≥ ۸۲۰	≥ ۲۵
AISI 316L	≥ ۲۲۰	≥ ۶۰۰	≥ ۴۵
AWS ER 347	≥ ۴۹۰	≥ ۶۶۰	≥ ۳۵
AWS ER 309L	≥ ۴۸۰	≥ ۶۸۰	≥ ۴۰

جدول ۳: پارامترها و شرایط جوشکاری

۲/۴	قطر سیم جوش (mm)
۱۲ ± ۱	ولتاژ (V)
۱۰۰ ± ۲	جریان (A)
۱ ± ۰/۱	سرعت پیشروی (mm/s)
۱/۲ ± ۰/۲۲	حرارت ورودی (kJ/mm)
۲۲	نرخ گاز آرگون برای حفاظت (SCFH) ^(۱)
۴۵	نرخ گاز آرگون برای پرج (Purge)، (SCFH)
۱۰۰	دمای بین پاسی (°C)

(۱) SCFH : Standard Cubic Feet per Hour (استاندارد فوت مکعب در ساعت)

به سیستم آنالیز شیمیایی EDS^۱ صورت گرفت. همچنین آنالیز ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل برای هر اتصال جوشی، با دستگاه آنالیزگر شیمیایی فلز انجام شد. با استفاده از نرم افزار آنالیزگر تصویر^۲ نیز مقدار فریت در هر پاس جوش در اتصالات جوشی تخمین زده شد.

سه نمونه آزمایش کشش از هر اتصال جوشی، طبق استاندارد AWS B4 آماده‌سازی شده (شکل ۲) و آزمایش‌های کشش با نرخ کرنش^۱ ۰/۱ s^{-۱}، توسط دستگاه آزمایش کشش مدل Hounsfield انجام شدند. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های کشش، استحکام کششی و

سپس از هر مقطع جوش، ۴ نمونه تهیه شده و به منظور مطالعه ریزساختار نواحی مختلف و انجام آزمایش‌های خوردگی، سطح نمونه‌ها به وسیله کاغذ سنباده با درجات ۸۰، ۳۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ سنباده زنی شده و سپس با استون چربی زدایی و با آب مقطر شستشو داده شده‌اند. در مرحله بعد، نمونه‌ها توسط پارچه نمد و پودر آلومینای ۳ میکرون پولیش شدند. پس از آن یک نمونه از هر مقطع جوش، به منظور مطالعه ریز ساختار، توسط محلول ۱۰ درصد حجمی اسید اگزالیک در دمای ۱۰ ± ۲۵ °C، به صورت الکتروشیمیایی، با ولتاژ ۵ تا ۶ ولت و در مدت زمان ۲۵ تا ۳۰ ثانیه اچ شد. بررسی ساختار مناطق مختلف جوش توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS DP71 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips-XL30 (مجهز

^۱ Energy dispersive spectroscopy

^۲ Image analysis software

مقطع جوش انجام شد و نتایج، تکرارپذیری آزمایش ها را تأیید کرد.

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایش های غیر مخرب، نشان داد که اتصالات جوشی حاصل، فاقد عیب بودند و از نظر جوش پذیری (عدم وجود هر نوع ناپوستگی)، پارامترهای جوشکاری و سیم جوش ها مناسب انتخاب شده اند.

جدول ۴، سیستم کدگذاری نمونه های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. در شکل ۳، ماکروساختار اتصالات جوشی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، هر اتصال جوشی با ۴ پاس جوش پر شده است. با استفاده از روش متالوگرافی و نرم افزار آنالیزگر تصویر، رقت متوسط هر اتصال، ۳۵ درصد به دست آمد.

جدول ۴: سیستم کدگذاری برای نمونه ها در این تحقیق

تعریف	کد نمونه
فلز جوش حاصل از سیم جوش AWS ER 347	SW1
فلز جوش حاصل از سیم جوش AWS ER 309L	SW2
نمونه کشتی دارای منطقه جوشی حاصل سیم جوش AWS ER 347 در وسط	TW1
نمونه کشتی دارای منطقه جوشی حاصل سیم جوش AWS ER 309L در وسط	TW2

در شکل ۴، ریزساختار فلزات پایه و مناطق مختلف اتصال جوشی نشان داده شده اند. فولاد AISI 316L دارای زمینه آستنیتی و حاوی مقادیری فریت دلتای لایه ای و فولاد SAF 2205 دارای یک زمینه فریتی است که مناطق آستنیتی در آن رشد کرده اند. به طور کلی، فلز جوش همه نمونه ها، دارای ریزساختاری شامل فازهای فریت و آستنیت است. ترکیب شیمیایی فلز جوش نمونه های مختلف و مقادیر کروم معادل و نیکل معادل آنها در جدول ۵ آورده شده است. در ابتدای انجماد، فلز جوش دارای ریزساختاری کاملاً فریتی بوده و با ادامه سرد شدن فلز جوش، فاز آستنیت در مرزخانه های فریت شروع به جوانه زنی می کند [۷].

درصد ازدیاد طول نسبی برای هر نمونه مشخص شد. همچنین با بررسی سطوح شکست، نوع شکست برای هر نمونه نیز تعیین شد. بررسی نتایج آزمایش های کشش برای هر ۳ نمونه از هر اتصال جوشی، تکرار پذیری آزمایش ها را تأیید کرد.



شکل ۲: شماتیک نمونه آزمایش کشش.

به منظور انجام آزمایش های خوردگی، از هر مقطع جوش، ۳ نمونه به عنوان الکتروود کار تهیه شدند. سپس هر نمونه به وسیله رزین پلی استر به گونه ای مانت شد که سطحی به مساحت 1.96 cm^2 از آن در معرض محیط خورنده قرار گرفت. تمام آزمایش ها در دمای اتاق ($20 \pm 1^\circ \text{C}$) و محلول ۳/۵ درصد NaCl انجام شدند. انتخاب محلول ۳/۵ درصد NaCl به عنوان محیط خورنده، به منظور ایجاد شرایط خورنده شدید و مشابه با آب دریا می باشد. NaCl خالص، از شرکت Merck تهیه شد. برای تهیه محلول ها، از آب دو بار یونیزه شده دوبار تقطیر شده، استفاده شده است. آزمایش های خوردگی، به وسیله پتانسیوستات مدل AUTOLAB PGState 302N با سه الکتروود، شامل الکتروود مرجع کالومل، الکتروود کمکی پلاتین و الکتروود کار انجام شدند.

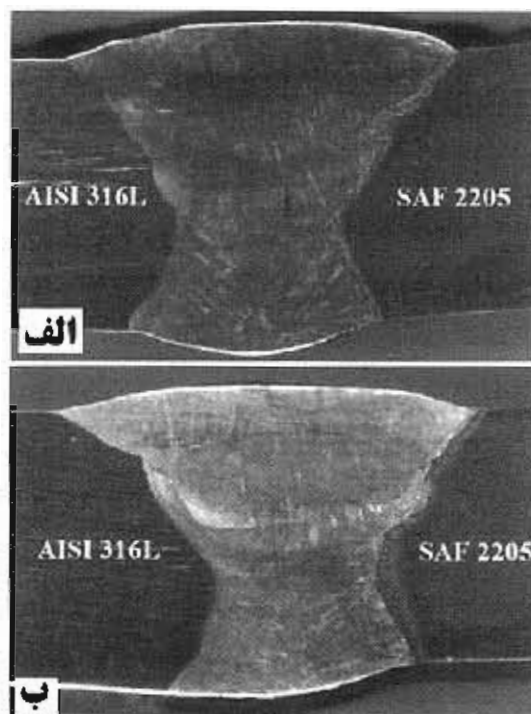
نمونه ها قبل از شروع آزمایش، برای رسیدن به شرایط تعادل، به مدت ۴۰ دقیقه در محلول خورنده قرار گرفتند. آزمایش های پلاریزاسیون، از ناحیه کاتدی با سرعت جاروب 0.5 mV/s و از پتانسیل 0.20 V - نسبت به پتانسیل مدار باز برای هر نمونه شروع شدند. آزمایش های امپدانس الکتروشیمیایی، در پتانسیل مدار باز و محدوده فرکانس 100 kHz تا 10 mHz با اعمال 10 mV پتانسیل AC انجام شدند و از نمودارهای نایکوئیست، مقادیر مقاومت انتقال بار و خازن دو لایه الکتریکی به دست آمدند. آزمایش های پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی برای هر ۳ نمونه از هر

همچنین کمتر شدن مقدار فاز فریت در پاس‌های بالاتر اتصالات جوشی، به دلیل پیش گرم شدن نمونه در حین جوشکاری پاس قبلی است که سبب شده نرخ سرد شدن پایین آمده و آستنیت بیشتری جوانه زنی و رشد کند.

در شکل ۴- ب منطقه مخلوط نشده در سمت فلز پایه آستنیتی مشاهده می‌شود. به دلیل کوتاه بودن زمان قرارگیری در دمای بالا، اختلاف ابعادی زیادی بین دانه‌های فلز پایه آستنیتی و منطقه متأثر از حرارت آن دیده نمی‌شود. همچنین وجود مقادیری فریت در مرزها نیز می‌تواند به دلیل کمتر بودن ضریب انبساط حرارتی فریت نسبت به آستنیت، سبب جلوگیری از رشد دانه‌های آستنیت شده باشد [۹].

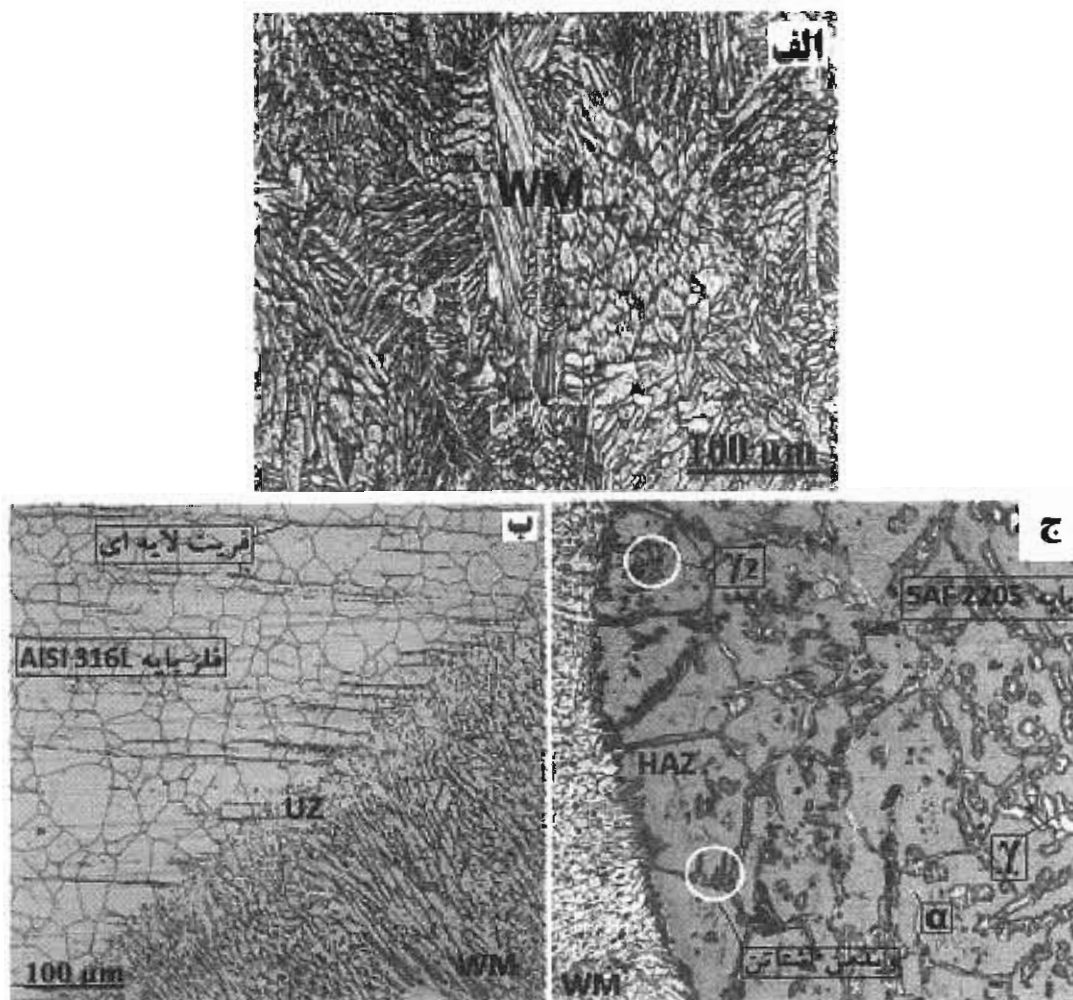
در شکل ۴- ج مشاهده می‌شود که ریزساختار منطقه متأثر از حرارت در سمت فلز پایه دوفازی، شامل دانه‌های فریتی است که در مرز آنها فاز آستنیت وجود دارد. به دلیل بالاتر بودن هدایت حرارتی فلز پایه دوفازی نسبت به فلز پایه آستنیتی، منطقه متأثر از حرارت نمونه‌های جوشکاری شده، در سمت فلز پایه دوفازی، به‌طور قابل توجهی وسیع‌تر از منطقه متأثر از حرارت در سمت فلز پایه آستنیتی است. همچنین سیکل‌های حرارتی ناشی از جوشکاری چند پاسه، سبب ایجاد پدیده نفوذ شده که این امر منجر به تشکیل آستنیت ثانویه درون دانه‌های فریتی و رشد آستنیت از مرزها به سمت داخل دانه‌های فریتی (ساختار ویدمن اشتاترن) شده است [۹].

شکل ۵ تصاویر حاصل از ارزیابی فلز جوش نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی را نشان می‌دهد که مطابق با آن، به دلیل حضور مقادیر بالاتر کربن و نیویوم و همچنین حضور کاربیدهای نیویوم در نمونه SW1، سبب ایجاد شرایطی برای تولید فاز ترد سیگما شده (شکل ۵- الف) که آنالیز ترکیب شیمیایی آن در شکل ۵- ب آورده شده است [۱۰]. مطابق با شکل ۵- ج در نمونه SW2 فاز های ترد مشاهده نشدند. مطابق با نتایج آزمون کشش در جدول ۷، مشخص است که نمونه TW2 دارای استحکام و انعطاف‌پذیری بالاتر است. پایین‌تر بودن خواص مکانیکی نمونه TW1 را می‌توان به دلیل وجود مقادیری فاز ترد در ساختار آن دانست.



شکل ۳. ماکروساختار اتصالات جوشی: (الف) نمونه SW1، (ب) نمونه SW2

تحت این شرایط سرد شدن سریع، ریزساختاری دندریتی در فلز جوش نمونه‌ها مطابق شکل ۴- الف ایجاد شد. در هیچ کدام از نمونه‌های جوشی، ترک خوردگی گرم مشاهده نشد که این امر به دلیل وجود فاز فریت در دماهای بالا حین انجماد فلز جوش است. در اتصال غیر هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، در صورتی که مقدار فاز فریت در فلز جوش در محدوده ۲۰ تا ۷۰ درصد باشد، می‌توان از مزایای خواص مکانیکی مناسب، همراه با مقاومت به خوردگی بالا در فلز جوش برخوردار شد [۸]. با توجه به اینکه برای دست یافتن به خواص مکانیکی و خوردگی بهینه، تمایل به وجود ۵۰ درصد فاز فریت در فلز جوش این اتصالات است و اینکه نمونه SW2 دارای مقدار فریت بیشتری در فلز جوش است (جدول ۶)، می‌توان نتیجه گرفت که از این نظر، سیم جوش ER 309L برای این اتصال مناسب‌تر است. با توجه به اینکه شرایط جوشکاری برای نمونه‌های مختلف مشابه بود، بیشتر بودن مقدار فریت در نمونه SW2، به دلیل بیشتر بودن مقدار کروم معادل (Cr_{eq}) در این نمونه می‌باشد (جدول ۵).



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار اتصال جوشی: (الف) فلز جوش (WM)، خطوط سیاه فریت (α)، مناطق سفید آستنیت (γ)، (ب) مناطق مختلف سمت فولاد AISI 316L، منطقه مخلوط نشده (UZ)، (ج) مناطق مختلف سمت فولاد SAF 2205، منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، آستنیت ثانویه (γ_2).

جدول ۵: ترکیب شیمیایی فلز جوش نمونه های مختلف (wt%)

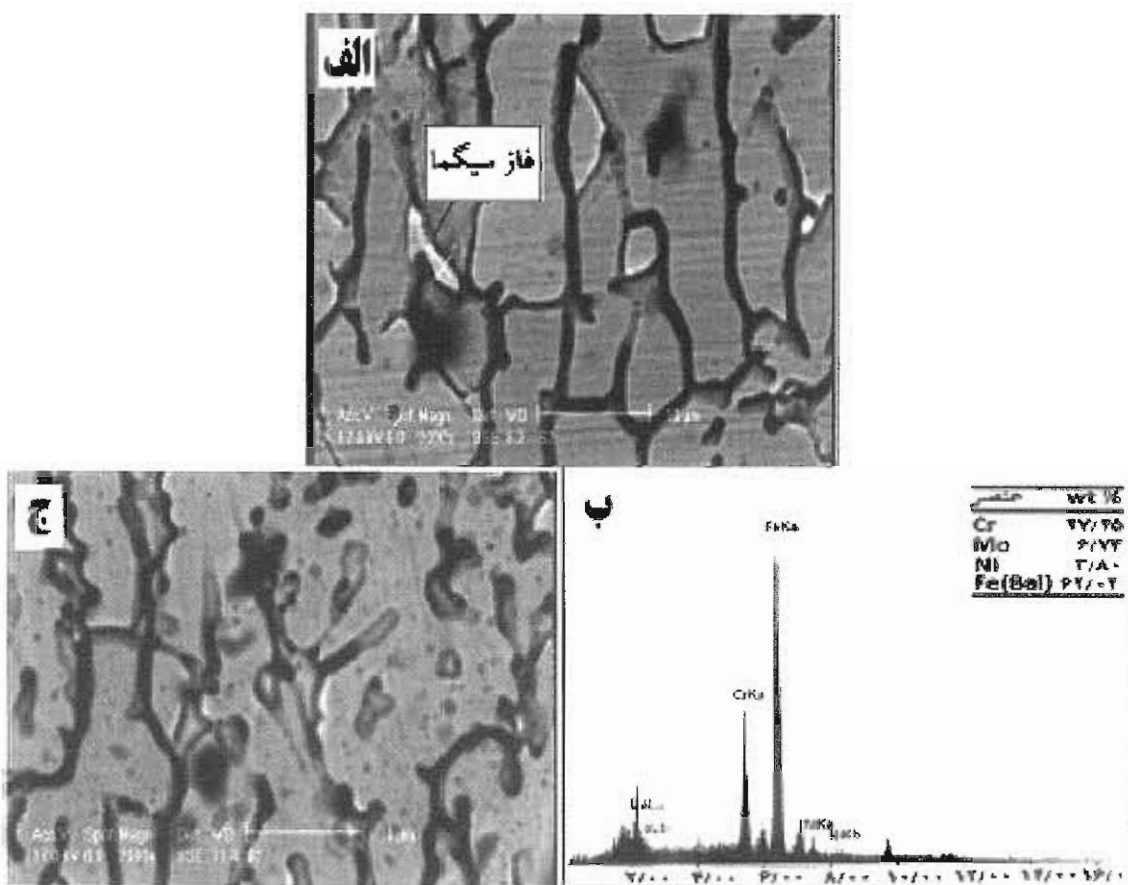
کد نمونه	C	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cu	Cr _{eq} ^(۱)	Ni _{eq} ^(۲)
SW1	۰/۰۴	۲۰/۳۸	۸/۳۲	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۰۳	۰/۰۶	۲۱/۴۵	۱۰/۳۶
SW2	۰/۰۲	۲۲/۸۰	۱۰/۰۷	۰/۸۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۶	۲۳/۶۵	۱۱/۲۸

^(۱) Cr_{eq} = % Cr + % Mo + (0.7 × %Nb); According to WRC-92 [۱].

^(۲) Ni_{eq} = % Ni + (35 × % C) + (20 × % N) + (0.25 × % Cu); According to WRC-92 [۱].

جدول ۶: مقدار متوسط فریت در هر پاس فلز جوش برای نمونه های مختلف (%)

کد نمونه	پاس اول (ریشه)	پاس دوم	پاس سوم	پاس چهارم
SW1	۳۳/۵ ± ۱	۳۱ ± ۲	۲۸/۶ ± ۲	۲۵ ± ۲
SW2	۴۵ ± ۲	۴۱ ± ۲	۳۵ ± ۱	۳۳ ± ۱



شکل ۵: نتایج ارزیابی اتصالات جوشی مختلف با میکروسکوپ الکترونی: (الف) نمونه SW1، (ب) آنالیز شیمیایی فاز سیگمای (sigma) نشان داده شده در نمونه SW1 توسط EDS، (ج) نمونه SW2.

جدول ۷: نتایج آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده با سیم جوش های مختلف.

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)	محل شکست
TW1	۶۱۷ ± ۲	۳۶ ± ۲	فلز جوش
TW2	۶۳۰ ± ۳	۴۴ ± ۲	فلز پایه AISI 316L

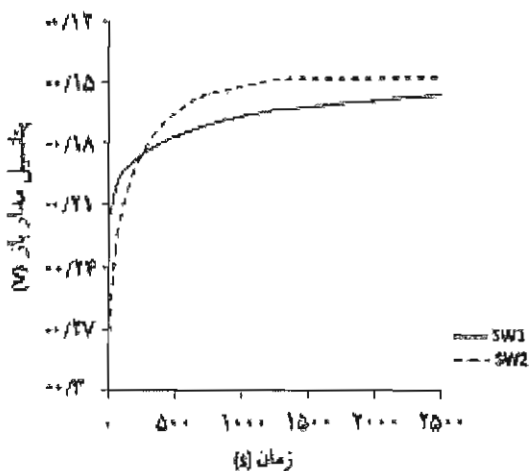


شکل ۶: نمونه های آزمایش کشش: (الف) نمونه TW1، (ب) نمونه TW2.

شکست نمونه TW1 در فلز جوش و نمونه TW2 بر روی فلز پایه آستنیتی رخ داده است (شکل ۶). این موضوع نشان می دهد که سیم جوش ER309L، سبب ایجاد استحکام بالاتری در فلز جوش، نسبت به فلز پایه ضعیف تر (فولاد آستنیتی) شده است. در شکل ۷ نیز تصاویر سطوح شکست نمونه های آزمایش کشش نشان می دهد که فرورفتگی هایی به صورت یکنواخت در سطح شکست پراکنده شده که این الگو نشان دهنده مکانیزم شکست نرم می باشد. همچنین فازهای ثانویه در سطح شکست نمونه TW1 مشاهده شد. مطابق شکل ۸ مشاهده می شود که پتانسیل همه نمونه ها پس از گذشت ۴۰ دقیقه ثابت شده و نمونه ها در محیط خورنده پایدار شده اند. جدول ۸ نیز نشان دهنده مقادیر پتانسیل مدار باز نمونه ها می باشد.

خوردگی، پتانسیل مدار باز شدن، پتانسیل حفاظت، دانسیته جریان خوردگی، دانسیته جریان لایه پسیو، مقاومت پلاریزاسیون و نرخ خوردگی می باشند. نرخ خوردگی نمونه‌ها از رابطه ۱ محاسبه شده که در آن i_{corr} ($\mu A/cm^2$)، D (g/cm^3)، M و n به ترتیب دانسیته جریان خوردگی، چگالی، وزن مولکولی و ظرفیت هر نمونه است [۱۱].

$$C.R = \frac{0.129 \times i_{corr} \times \frac{M}{n}}{D} \quad (1)$$



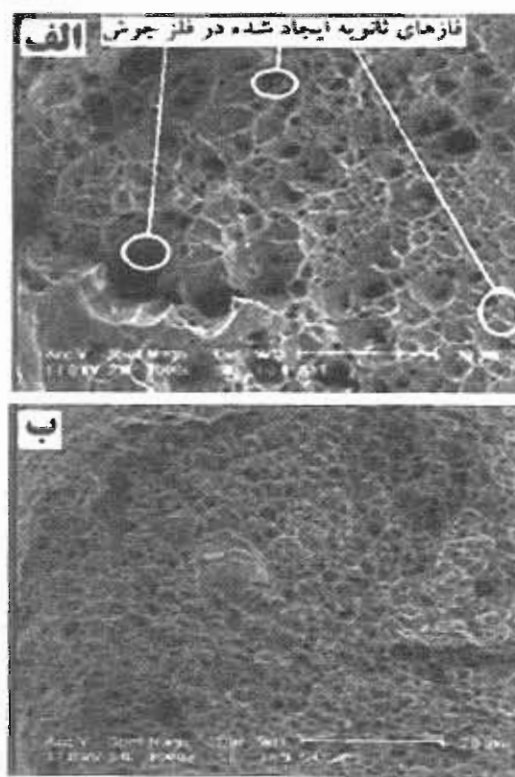
شکل ۸: نمودارهای پتانسیل مدار باز بر حسب زمان.

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، هر دو نمونه دارای پتانسیل‌های خوردگی نزدیک به هم هستند. به هر حال مطابق جدول ۹، مشخص است که پتانسیل خوردگی نمونه SW2 نجیب‌تر و دانسیته جریان خوردگی آن پایین‌تر است که این امر ناشی از بیشتر بودن مقدار کروم معادل است. همچنین شاخه‌های کاتدی و آندی نمودار پلاریزاسیون نمونه SW2 پایین‌تر از شاخه‌های کاتدی و آندی نمونه SW1 است که این بدان معناست که در تمام محدوده پتانسیل، دانسیته جریان برای نمونه SW2 کمتر است.

جدول ۸: نتایج نمودارهای پتانسیل مدار باز (OCP)

کد نمونه	پتانسیل مدار باز (mV)	زمان (s)	محیط خورنده
SW1	-150 ± 1	۲۵۰۰	۳/۵ wt% NaCl
SW2	-148 ± 2	۲۵۰۰	۳/۵ wt% NaCl

مقدار پتانسیل مدار باز به پارامترهای مختلفی از جمله شرایط سطحی نمونه، ترکیب شیمیایی نمونه و غلظت محیط خورنده بستگی دارد. با توجه به اینکه در این تحقیق، مراحل آماده‌سازی نمونه خوردگی و محلول خورنده استفاده شده در هر آزمون خوردگی، مشابه و دقیق انجام شده بود، اختلاف کم بین مقادیر پتانسیل مدار باز نمونه‌ها را می‌توان به دلیل اختلاف در ترکیب شیمیایی نمونه‌ها دانست. هرچه مقدار کروم معادل نمونه بیشتر باشد، مقادیر پتانسیل مدار باز نمونه نجیب‌تر می‌شود [۲].



شکل ۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست

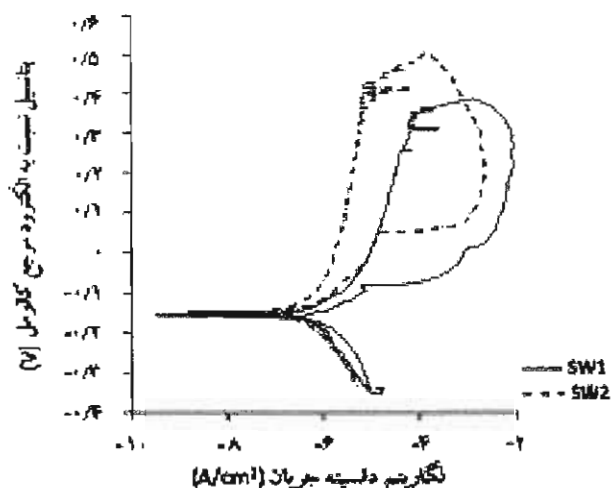
نمونه‌های کشش: (الف) TW1؛ (ب) TW2.

شکل ۹ نشان دهنده نمودارهای پلاریزاسیون برای نمونه‌های SW1 و SW2 است. در جدول ۹ پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون (شکل ۹)، آورده شده اند که در آن R_p ، i_p ، i_{corr} ، E_{Prot} ، E_{Pit} ، E_{corr} ، β_a ، β_c و $C.R$ به ترتیب ثابت کاتدی تافل، ثابت آندی تافل، پتانسیل

خارجی و هیدروکسید/اکسید کروم و اکسیدهای آهن همراه با نیتريد‌های آهن و کروم در بخش داخلی. این ساختار دولایه سبب مقاومت به خوردگی بالایی در فلز جوش نمونه‌ها که دارای ساختار دوفازی اند، شده است [۱۲]. در محیط‌های کلریدی، یون Cl^- می‌تواند جذب سطح لایه پسیو شود و از حفرات و مناطق ضعیف آن نفوذ کند و در نهایت سبب از هم گسیختگی لایه پسیو و خوردگی فلز زیر لایه شود. پتانسیل حفره‌دار شدن و پتانسیل حفاظت برای نمونه‌ها، توسط بررسی حلقه هیستریزس^۲ حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون (شکل ۹) مشخص شدند. پتانسیل حفره دار شدن و پتانسیل حفاظت در نمونه SW2 نجیب تر است که این امر به دلیل مقدار کروم بیشتر است که سبب شده لایه پسیو مقاوم‌تر و طول منطقه پسیو بلندتر شود (جدول ۹). ضعیف‌تر بودن رفتار خوردگی نمونه SW1 را می‌توان ناشی از ایجاد مقادیری فاز سیگما در آن دانست، زیرا تشکیل این فاز نیازمند مصرف کروم است و اطراف این فاز مناطق خالی از کروم یا کم کروم ایجاد می‌شود که این مناطق دارای پایین‌ترین مقاومت در برابر نفوذ یون Cl^- هستند [۱۰].

نتایج به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون، از طریق آزمایش امیدانس الکتروشیمیایی بررسی و تکمیل شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های امیدانس الکتروشیمیایی برای هر نمونه، با استفاده از نمودارهای نایکوئیست در شکل ۱۰ آورده شده است که در آن محور افقی امیدانس حقیقی (Z_R) و محور عمودی امیدانس موهومی (Z_G) را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که نمونه SW2 دارای مقاومت انتقال بار بالاتری است که این امر می‌تواند به دلیل کروم معادل بالاتر و ایجاد لایه اکسیدی محافظ غنی از کروم باشد که سبب مقاومت به خوردگی بالاتری شده است. نمودارهای نایکوئیست برای هر نمونه شامل یک حلقه خازنی ناشی از مقاومت انتقال بار و یک خازن دو لایه الکتریکی است. رفتار نیم‌دایره‌ای نمودارهای نایکوئیست می‌تواند ناشی از ناهم‌واری‌های میکروسکوپی سطح نمونه باشد که سبب

دانسته جریان لایه پسیو برای نمونه SW2 به مقدار قابل توجهی کمتر است که این امر نشان دهنده مقاوم‌تر بودن لایه پسیو در نمونه SW2 نسبت به نمونه SW1 به دلیل بیشتر بودن مقدار کروم است. اثر عناصر آلیاژی و مقدار آنها، پارامتری مهم در ارزیابی رفتار خوردگی می‌باشد. کروم یک لایه چسبنده و حل‌نشونده در محلول، بر سطح فلز تشکیل می‌دهد که سبب حفاظت از فلز زیر لایه در برابر خوردگی یکنواخت و موضعی می‌شود. این لایه محافظ را لایه پسیو گویند که ضخامتی در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ نانومتر و ساختاری مشابه کرومیت^۱ دارد. هرچه مقدار کروم ماده بیشتر باشد، لایه پسیو ایجاد شده ضخیم‌تر بوده و مقاومت بیشتری در برابر خوردگی ایجاد می‌کند. نیکل نیز اگرچه به‌صورت مستقیم بر لایه پسیو اثری ندارد، ولی به‌طور کلی سبب بهبود مقاومت به خوردگی و کاهش سرعت پیشروی خوردگی حفره‌ای می‌شود. مولیبدن عنصری است که حتی در مقادیر پایین، به‌طور قابل توجهی سبب ایجاد مقاومت به خوردگی حفره‌ای در محیط‌های کلریدی می‌شود. نیتروژن نیز دارای اثری سودمند در ایجاد مقاومت به خوردگی حفره‌ای است. لایه پسیو در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به‌طور اساسی از دو منطقه تشکیل می‌شوند: هیدروکسید/اکسید آهن در بخش



شکل ۹: نمودارهای پلاریزاسیون برای نمونه‌های SW1 و SW2.

² Hysteresis loop

¹ Chromite ($FeCr_2O_4$)

جدول ۹: پارامترهای الکتروشیمیایی خوردگی، حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون

کد نمونه	β_c (mV/dec)	β_a (mV/dec)	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p (M Ω)	C.R (mm/year)	E_{pit} (mV)	E_{prot} (mV)	i_p ($\mu A/cm^2$)
SW1	۳۹	۳۸	-۱۵۶	۰/۲۰۸	۰/۲۰۵	$۲/۴۱۱ \times 10^{-3}$	۳۴۸	-۱۶۱	۱۵/۷۰۷
SW2	۳۶	۴۱	-۱۵۰	۰/۰۸۲	۰/۵۱۹	$۰/۹۵۰ \times 10^{-3}$	۴۲۳	-۱۴۶	۳/۰۱۳

نمودارهای تجربی منطبق گردیده و پارامترهای مدار معادل، با نرم افزار (FRA^۲) محاسبه شده و در جدول ۱۰ آورده شده‌اند. این مدار معادل دارای خطایی کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد.



شکل ۱۱: مدار معادل نمودارهای نایکوئیست.

جدول ۱۰: پارامترهای مدار معادل منطبق شده بر

نمودارهای نایکوئیست

کد نمونه	R_s ($\Omega.cm^2$)	R ($\Omega.cm^2$)	Q (F)	n
SW1	۵/۸۸	۵۳۳۴/۷۲۸	۰/۰۰۰۰۲	۰/۸
SW2	۶/۰۷۶	۴۵۲۹۶/۵۸	۰/۰۰۰۰۹	۰/۸۸

۴- نتایج

۱- بر اساس نتایج آزمون‌های غیر مخرب، هر دو نوع سیم جوش با کدهای AWS ER 309L و AWS ER 347 جهت اتصال غیر همجنس فولاد زنگ‌نزن دو فاز SAF 2205 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L، از نظر جوش پذیری (عدم وجود هر نوع ناپوستگی) مناسب می‌باشند.

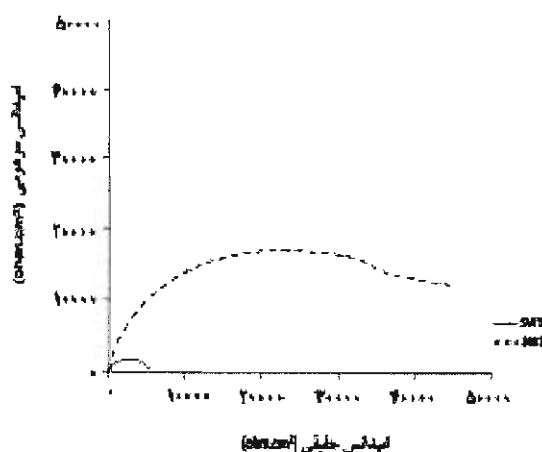
۲- فلز جوش در همه نمونه‌ها دارای ریزساختار فریت و آستنیت می‌باشد. در فلز جوش ایجاد شده با سیم جوش AWS ER 347، به دلیل وجود مقادیر بالاتر کربن و نیویوم مقداری فاز ترد سیگما ایجاد شد.

۳- شکست نمونه جوشکاری شده با سیم جوش AWS ER 347، در فلز جوش و نمونه جوشکاری شده با سیم جوش AWS ER 309L بر روی فلز پایه آستنیتی رخ

توزیع ناهمگن جریان بر سطح نمونه و توزیع ناهمگن مقاومت محلول و خازن دو لایه الکتریکی می‌شود. بنابراین برای انطباق مدار معادل با نمودارهای نایکوئیست نمونه‌ها، از یک عنصر فاز ثابت^۱ که با Q در مدار معادل نشان داده شده است، به جای خازن (C) استفاده شد. امپدانس عنصر فاز ثابت (Z_{CPE}) مطابق با رابطه ۲ در نظر گرفته شد که C و ω به ترتیب خازن و محدوده فرکانس امپدانس می‌باشند. n نیز پارامتری است که رفتار عنصر فاز ثابت را تعیین می‌کند. این بدان معناست که سیستم مورد مطالعه می‌تواند با تغییر پارامتر n از حالت خازن کامل به حالت کنترل نفوذی تغییر کند [۱۳].

$$Z_{CPE} = \frac{1}{C(j\omega)^n} \quad (2)$$

پارامترهای الکتروشیمیایی مدار معادل شامل R_s ، Q، R و هستند که به ترتیب معادل خازن دو لایه الکتریکی، مقاومت محلول و مقاومت انتقال بار می‌باشند. مدار معادل مناسب با نمودارهای نایکوئیست، در شکل ۱۱ نشان داده شده و بر



شکل ۱۰: نمودارهای نایکوئیست برای نمونه‌های SW1 و SW2.

^۲ Frequency Response Analyzer^۱ Constant phase element (CPE)

جوش AWS ER 347 است. این امر به دلیل بالاتر بودن مقدار کروم معادل و در نتیجه تشکیل لایه پسیومقاوم تر بود. ۵- در مجموع از نظر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی فلز جوش ایجادشده، سیم جوش AWS ER 309L مناسب تر از سیم جوش AWS ER 347 می باشد.

۵- تشکر و قدردانی

نگارندگان برخود لازم می‌دانند از اداره بازرسی فنی و خوردگی فلزات مناطق نفت‌خیز جنوب، به سبب فراهم آوردن امکانات این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

داد. بنابراین سیم جوش AWS ER 309L، سبب ایجاد استحکام بالاتری در فلز جوش، نسبت به فلز پایه ضعیف‌تر (فولاد آستنیتی) شده است. در سطح شکست نمونه‌ها، الگوی شکست نرم مشاهده شد.

۴- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش AWS ER 309L، دارای خواص خوردگی بهتر از جمله پایین تر بودن جریان خوردگی، بلندتر بودن طول منطقه پسیو و نجیب‌تر بودن پتانسیل شروع خوردگی حفره‌ای و بالاتر بودن مقاومت انتقال بار، نسبت به نمونه جوشکاری شده با سیم

مراجع

1. I. Alvarez, Duplex stainless steels: Brief history and some recent alloys, Recent patents on mechanical engineering, 2008, Pp. 51-57.
2. A. J Sedrikd, Corrosion of stainless steels, John wiley and sons, 1996.
3. R. N. Gunn, Duplex stainless steels: Microstructure, properties and applications, Cambridge-England, Abington publishing, 1997.
4. R. W. messler, joining of materials and structures, Elsevier press, 2004.
5. AWS C5.5M , Recommended practices for gas tungsten arc welding, 2003, Pp. 1-9.
6. L. Karlsson, Welding of dissimilar metals, welding in the world 36, 1995, pp. 125-132.
7. S. Kou, Welding metallurgy , New Jersey , John wiley and sons, 2nd Ed., 2003.
8. B. Aitken, How to weld duplex stainless steel, Avesta welding, 2007.
9. J. C lippold, Welding metallurgy and weldability of stainless steels, New Jersey , John wiley and sons, 2005.
10. M. Schwind, σ -Phase precipitation in stabilized austenitic stainless steels, Acta mater. 48, 2000, Pp. 2473-2481.
11. Z. Ahmad, Principle of corrosion engineering and corrosion control, Elsevier press, 2006.
12. M. K. Lei, X.M. Zhu, Role of nitrogen in pitting corrosion resistance of a high-nitrogen face-centered-cubic phase formed on austenitic stainless steel, electrochemical society, 2005, vol. 152, No.8, Pp. B291-B295.
13. J. R. Macdonald, Solid state ionics 13, 1984, P. 147.