



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۴۵ تا ۵۵  
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 45- 55



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## ارزیابی خواص اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی

### UNS S32750 به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65

مجید صادقیان<sup>۱</sup>، مرتضی شمعیان<sup>۲\*</sup>، علی شفیع<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۱۴، پذیرش ۱۳۹۳/۷/۲۷)

#### چکیده

خواص عالی فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی به دلیل بالانس ریزساختار دوگانه فریتی - آستنیتی آن هاست در حالیکه در طی جوشکاری این فولادها، نسبت مطلوب آستنیت - فریت از بین می رود و فازهای مضر نیز تشکیل می شود. در این پژوهش فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 به روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز اتصال داده شد و به منظور ارزیابی خواص فلز جوش، از آزمونهای استحکام ضربه ای، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و سیکلی استفاده شد. همچنین رفتار خوردگی گالوانیکی بین زوج گالوانیکی فلز جوش و فولاد کم آلیاژ استحکام بالا با روش ZRA تعیین شد. نتایج نشان داد که میزان آستنیت فلز جوش بیشتر از فلز پایه بوده و فاز مضر در آن به وجود نیامده است. استحکام ضربه ای فلز جوش بیشتر از فلزات پایه است، همچنین رفتار خوردگی فلز جوش شبیه به فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی و بسیار بهتر از فولاد کم آلیاژ استحکام بالا بود. نتایج آزمون ZRA نیز نشان داد که در زوج گالوانیکی فلز جوش - فولاد کم آلیاژ استحکام بالا، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا دچار خوردگی می شود و مکانیزم آن از نوع خوردگی حفره ای است.

#### کلمات کلیدی

فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا، جوشکاری، استحکام ضربه ای، رفتار خوردگی.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: shamanian@cc.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا<sup>۳</sup> (نظیر API<sup>۴</sup>) تهیه می‌شوند. این فولادها در ساحل به دلیل وجود تنش در محیط دریا و همچنین خشک و تر شدن سیکلی دچار خوردگی و نشت می‌شوند. امروزه برای حل مشکل ناحیه نشت یافته، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا را با فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی جایگزین می‌کنند [۱۱، ۱۲]. به همین دلیل اتصال فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.

در سال ۱۹۹۸، لیپولد و همکاران [۱۳] اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن دوفازی به فولاد کربنی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که حرارت ورودی تاثیر اندکی بر ریزساختار و چقرمگی منطقه جوش دارد، ولی مقاومت به خوردگی با افزایش حرارت ورودی به طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد. سرینیواسان و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۶ اتصال فولاد زنگ نزن دوفازی به فولاد بویلر توسط دو فلز پرکننده آستنیتی و دوفازی را مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند که فلز جوش حاصل از فلز پرکننده آستنیتی، مقاومت به خوردگی موضعی بسیار پایین‌تری دارد. در سال ۲۰۱۰، مندوزا و همکاران [۱۲] از روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز<sup>۵</sup> (GTAW) برای اتصال فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی به فولاد کم آلیاژ استحکام بالا استفاده کردند و نشان دادند که نمودار WRC-1922 با مرزهای مارتنزیت می‌تواند با دقت خوبی برای پیش‌بینی ساختار منطقه جوش به کار رود. در سال ۲۰۱۱، وانگ و همکاران [۱۴] از دو روش GTAW و جوشکاری قوس-الکترو<sup>۶</sup> پوشش‌دار<sup>۷</sup> (SMAW) برای اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن دوفازی به فولاد کم آلیاژ استحکام بالا استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش GTAW به خاطر تشکیل جوش با چقرمگی بالاتر و مقاومت بیشتر به حفره‌دار شدن، روش مناسب‌تری است. تاواریز و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۰۶ اتصال فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی ۳۲۷۵۰ را طی جوشکاری چند پاسه مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش پاس ریشه به روش GTAW با فیلر دارای نیکل کمتر و پاس‌های پرکننده به روش SMAW با فلز پرکننده با نیکل بالاتر جوشکاری شده است. نتایج نشان داد که فلز پایه، پاس ریشه و پاس پرکننده دارای پتانسیل حفره دار شدن و عدد مقاومت به حفره دار شدن یکسان هستند ولی پاس ریشه به دلیل دارا بودن فریت بالاتر و حضور ذرات نیتريد کروم دارای حساسیت بیشتری به خوردگی شده در زمان انجام تست پلاریزاسیون سیکلی می‌باشد. لابانوسکی در سال ۲۰۰۷ [۱۶]، اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L را توسط فلز پرکننده دوفازی در رنج حرارتی ۱/۱۵-۳/۲ KJ/mm به روش جوشکاری زیر پودری مورد

فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی<sup>۱</sup> (SDSS) دارای ساختاری شامل دو فاز فریت ( $\alpha$ ) و آستنیت ( $\gamma$ ) با درصدهای تقریباً یکسان هستند. این فولادها به دلیل ترکیبی از خواص مفید از جمله مقاومت به خوردگی، خواص مکانیکی عالی و قابلیت جوش‌پذیری خوب در کنار قیمت پایین به طور گسترده در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، فرایندهای شیمیایی، دریا و کاغذسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲]. در این صنایع H<sub>2</sub>S، یون کلرید، گاز CO<sub>2</sub> در فشار بالا و دماهای متوسط، باعث ایجاد شرایط فوق‌العاده خورنده‌ای می‌شوند که کاربرد اکثر مواد را محدود می‌کند [۳، ۴، ۵، ۶]. خواص اشاره شده فوق‌هنگامی در فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی حاصل می‌گردد که نسبت فریت به آستنیت نزدیک به ۵۰:۵۰ بوده [۱] و سایر فازهای مضر مانند رسوبات نیتريد کروم (Cr<sub>2</sub>N) و سیگما ( $\sigma$ ) حضور نداشته باشند. در اثر سیکل‌های حرارتی در طی عملیات جوشکاری فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی نسبت آستنیت - فریت دچار تغییر می‌شود و همچنین احتمال تشکیل فازهای مضر وجود دارد [۷].

نسبت آستنیت-فریت به انرژی ورودی<sup>۲</sup> در حین جوشکاری بستگی دارد. تغییرات در انرژی ورودی باعث تغییرات در نرخ سرد شدن و نفوذ در استحاله فریت/آستنیت می‌شود. حرارت ورودی بالا باعث کاهش نرخ سرد شدن و ترغیب استحاله آستنیت از فریت شده در نتیجه استحکام مناسبی در اثر بالانس فازی نزدیک ۵۰:۵۰ ایجاد می‌شود. در طی این شرایط درشت شدن اندازه دانه فلز جوش، عریض شدن منطقه متأثر از حرارت و تشکیل فازهای ترد نیز رخ می‌دهد. حرارت ورودی کم نیز منجر به تشکیل فریت بالا در فلز جوش می‌شود که در اثر آن تمایل به تشکیل رسوبات نیتريدی زیاد شود [۱]. بنابراین دستورالعمل‌های جوشکاری باید به گونه ای تنظیم گردد که نسبت فریت به آستنیت ۱:۱ بوده و فازهای مضر نیز تشکیل نشوند، این مطلوب با کنترل حرارت ورودی در محدوده ۰/۵-۲ KJ/mm برای فولادهای زنگ نزن دوفازی [۸] و در محدوده ۰/۵-۱/۵ KJ/mm برای فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی تا حدودی حاصل می‌گردد [۹].

با گسترش صنایع و افزایش حوزه کاربرد مواد مختلف، استفاده از سازه‌های متشکل از مواد غیرمشابه به ویژه در محلی که تغییر حالتی در خواص و یا کارایی سیستم لازم باشد نیز افزایش یافته است [۱۰]. از جمله این اتصالات غیرمشابه جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی به فولادهای کربنی و کم آلیاژ استحکام بالاست که در صنایع یاد شده به ویژه خطوط انتقال انرژی کاربرد فراوانی دارد. خطوط انتقال انرژی عموماً از

جهت جوشکاری و با ایجاد شیار در وسط فلز جوش به منظور تعیین چقرمگی فلز جوش آماده شدند. آزمایش در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  - و هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. سطوح شکست نمونه‌ها نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

رفتار خوردگی نمونه‌ها توسط آزمون‌های پولاریزاسیون پتانسیو دینامیک<sup>۱۳</sup> و سیکلی<sup>۱۴</sup> مطابق با استانداردهای ASTM G5 [۲۲] و ASTM G61 [۲۳] مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌ها در محلول ۳/۵ درصد NaCl و در دمای محیط انجام شد. این آزمون براساس سیستم سه الکترودی بنا شده است که در آن الکتروود مرجع از نوع Ag/AgCl و الکتروود کمکی سیم پلاتین است. اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه پتانسیو استات/گالوانو استات PARSTAT 2273 انجام شد. در این پژوهش آزمون‌ها ۳۰ دقیقه پس از قرارگیری نمونه‌ها در محلول و با نرخ روبش ۱ mV/s انجام شد.

به منظور تعیین دمای بحرانی حفره‌دار شدن<sup>۱۵</sup> (CPT) مطابق با استاندارد ASTM G150 [۲۴]، آزمون پتانسیو دینامیک در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتیگراد بر روی فلز جوش صورت گرفت. در این آزمایش‌ها دما توسط دستگاه بن‌ماری با دقت  $\pm 1$  درجه سانتیگراد تنظیم شد و آزمایش‌ها نیز توسط دستگاه پتانسیو استات/گالوانو استات به‌پژوه با نرخ روبش ۱ mV/s در محلول ۳/۵ درصد NaCl انجام شد و در نهایت روند تغییرات پتانسیل حفره‌دار شدن با دما ثبت گردید و نقطه عطف این نمودار به عنوان CPT ثبت شد.

آزمایش ZRA<sup>۱۶</sup> توسط دستگاه پتانسیو استات/گالوانو استات PARSTAT 2732 به منظور بررسی خوردگی گالوانیکی بین فلز جوش و فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 در محلول ۳/۵ درصد NaCl انجام شد. در این آزمایش از نسبت‌های مساوی سطح استفاده شد و نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش تا سنباده ۱۲۰۰ سنباده زنی شدند.

بررسی قرار داد و گزارش نمود که اتصالات، دارای خواص مکانیکی قابل قبولی می‌باشند ولی حساسیت به خوردگی تنشی در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن دوفازی به دلیل ریزساختار نامطلوب ایجاد می‌گردد.

تاکنون اطلاعات جامعی در زمینه خواص اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی به فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ به ویژه رفتار خوردگی گالوانیکی اتصال مورد نظر ارائه نشده است، بنابراین هدف از این تحقیق اتصال جوش غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 به روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و ارزیابی خواص اتصال مورد نظر می‌باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش فلزات پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 و فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 به شکل لوله با ضخامت ۴ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۰ سانتیمتر با قطعی به طول ۱۵ سانتیمتر توسط روش GTAW به یکدیگر اتصال داده شدند. فلز پرکننده AWS A2594N مطابق با دیگرام WRC-1992 اصلاح شده توسط کوتکی [۷] برای جوشکاری غیرمشابه اتصال مورد نظر انتخاب گردید. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلز پرکننده در جدول (۱) ارائه شده است. طرح اتصال جناقی یک طرفه<sup>۷</sup> با زاویه پخ<sup>۸</sup> ۷۰ درجه، ریشه اتصال<sup>۹</sup> ۱/۵ mm و پاشنه<sup>۱۰</sup> ۱/۵ mm برای جوشکاری با توجه به ضخامت و روش جوشکاری مطابق با نظر سازنده انتخاب شد [۹]، شرایط جوشکاری نیز در جدول (۲) ارائه گردیده است.

نمونه‌های جوش جهت بررسی‌های ریزساختار مطابق استاندارد A262-86 [۱۸] از لوله‌های جوشکاری شده تهیه شدند. فلز جوش و فلزات پایه تا سنباده ۱۲۰۰ سنباده زنی و سپس توسط ذرات آلومینا با اندازه ۳ میکرومتر پولیش شدند. فلز جوش و فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی در محلول ۱۰ درصد NaOH در ولتاژ ۳ تا ۶ ولت به مدت ۵ تا ۱۲ ثانیه اچ شدند [۱۹]. این محلول اچ مطابق با استاندارد A923 [۲۰] مناسب برای آشکارسازی فازهایی مانند سیگما، چ<sup>۱۱</sup> و غیره در فولادهای دوفازی است. نمونه فلز پایه API X65 نیز با محلول نایتال و پیکرال با نسبت‌های ۵۰:۵۰ اچ شد [۱۹]. آزمایش سختی توسط دستگاه ریزسختی ویکرز در منطقه اتصال صورت گرفت. ریزسختی‌سنجی در شرایط نیروی ۱۰۰ gr و زمان ۱۰ ثانیه انجام شد. آزمایش ضربه چارپی با اندازه کوچک<sup>۱۲</sup> (۲/۵ mm) مطابق استاندارد ASTM E23b [۲۱] تهیه شد. نمونه‌های ضربه عمود بر

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلز پرکننده (درصد وزنی)

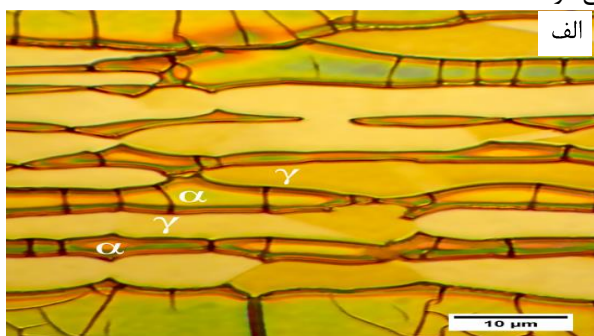
PREN	Ni <sub>eq</sub>	Cr <sub>eq</sub>	Fe	N	Mo	Ni	Cr	Si	Mn	C	
۴۳/۸۲	۱۱/۹	۲۹/۱	بقیه	۰/۲۳	۳/۴	۶/۳	۲۵/۷	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۰۳	فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی
۰/۱۷	۹/۲	۰/۰۶	بقیه	—	۰/۰۴	<۰/۰۳	۰/۰۱۶	۰/۴۴	۱/۳	۰/۲۶	فلز پایه کم آلیاژ استحکام بالا
۴۶/۳۶	۱۴/۶	۳۰/۱	بقیه	۰/۲۲	۴/۲	۹/۲	۲۵/۹	۰/۹۴	۰/۷	۰/۰۳	فلز پرکننده

جدول (۲): شرایط استفاده شده در جوشکاری

قطر الکترود (mm)	جریان گاز محافظ (آرگون)	دمای بین پاسی (°C)	حرارت ورودی (KJ/mm)	سرعت جوشکاری (mm/s)	ولتاژ جوشکاری (V)	جریان جوشکاری (A)	قطبیت
۲/۴	۱۲ L/mm	۱۰۰	۰/۷۸	۱/۴۲	۱۷	۱۱۰	DCEN

### ۳-۱-۲- منطقه متأثر از حرارت

شکل (۲) ریزساختار فصل مشترک فولاد کم آلیاژ استحکام بالا-فلز جوش را نشان می‌دهد. در این فصل مشترک یک ناحیه باریک وجود دارد که توسط نلسون و لیبولد مورد مطالعه قرار گرفت و مرز نوع II، جایی که رشد اپیتکسیال متوقف می‌شود، نامیده شده است [۷]. این تغییر ریزساختاری در اتصال فلزات غیرمشابه با ساختار کریستالی متفاوت (FCC و BCC) دیده می‌شود [۷]. با توجه به نفوذ کربن از سمت فولاد کم آلیاژ استحکام بالا به سمت حوضچه، وجود کروم در حوضچه جوش و سیکل‌های حرارتی جوشکاری، ماهیت این مرز را مارتزیت و یا کاربیدهای میله‌ای از نوع Fe<sub>3</sub>C بیان کرده‌اند که منجر به افزایش سختی در این مرز می‌شود [۱۴]. روند تغییرات سختی اتصال غیر مشابه در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک افزایش در محل مرز نوع II مشاهده می‌شود.



ب

جریان خوردگی (i<sub>G</sub>) و پتانسیل خوردگی (E<sub>G</sub>) بین دو جزء توسط ZRA هر ۰/۵ ثانیه به مدت ۴ ساعت ثبت شد. این آزمایش بر اساس سل سه الکترودی بنا شده است که در آن فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 به عنوان زمین، فلز جوش به عنوان الکترود کاری و الکترود مرجع از نوع Ag/AgCl انتخاب شد. در این حالت علامت جریان مثبت یعنی الکترون‌ها از الکترود کاری به سمت پتانسیواستات حرکت می‌کنند که نشان‌دهنده خورده شدن الکترود کاری (فلز جوش) می‌باشد. علامت منفی یعنی الکترون‌ها در خلاف جهت قبلی حرکت می‌کنند که در این صورت فلز متصل به زمین (فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65) خورده می‌شود. به منظور تعیین نوع خوردگی، سطح فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 بعد از آزمایش نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

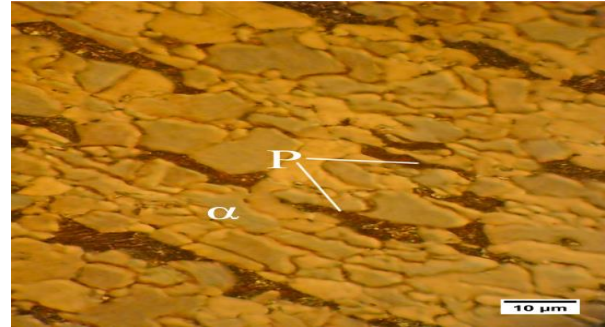
#### ۳-۱- ارزیابی ریزساختار

##### ۳-۱-۱- فلزات پایه

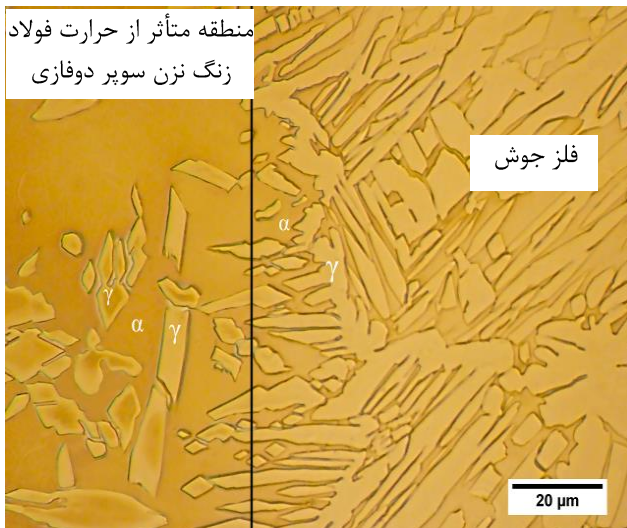
شکل (۱) ریزساختار میکروسکوپی فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 و فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 را نشان می‌دهد. فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 دارای ۴۶ درصد فریت و ۵۴ درصد آستنیت با انحراف معیار  $\pm 2/5$  درصد می‌باشد. فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 نیز دارای ریزساختاری با دانه‌های هم‌محور فریت و کلونی‌های ریز پرلیت (P) می‌باشد.

نرخ‌های سرد شدن بالایی ناشی از جوشکاری، ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت در جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی دارای آستنیت کمتری است.

به دلیل آنکه حداکثر دما در منطقه متأثر از حرارت بسیار بیشتر از حد بالایی تعادل فازی بین فریت و آستنیت است، اغلب جزایر آستنیتی در ریز ساختار دو فازی در زمینه فریتی حل می‌شوند. طی سرد شدن، در گستره دمایی ۱۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد آستنیت شروع به جوانه‌زنی می‌کند. اما نرخ سرد شدن بالا استحاله کنترل نفوذی فریت به آستنیت را متوقف کرده و در نتیجه مقدار آستنیت این منطقه نسبت به فلز پایه کمتر می‌گردد [۱] - [۲۵] - [۲۶].



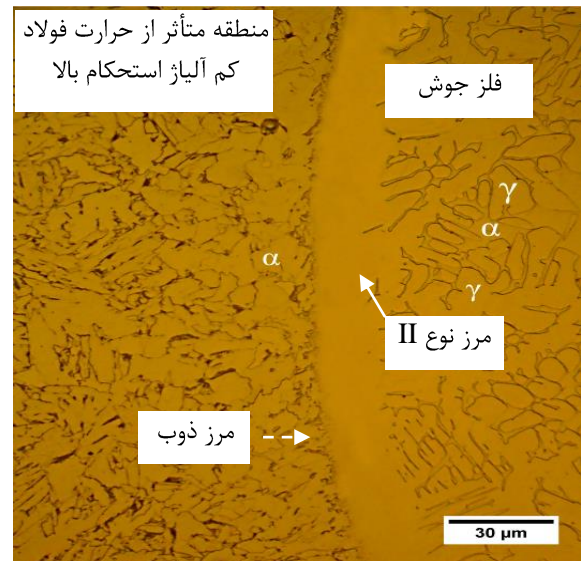
شکل (۱): ریزساختار فلزات پایه الف) فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی ب) فولاد کم آلیاژ استحکام بالا



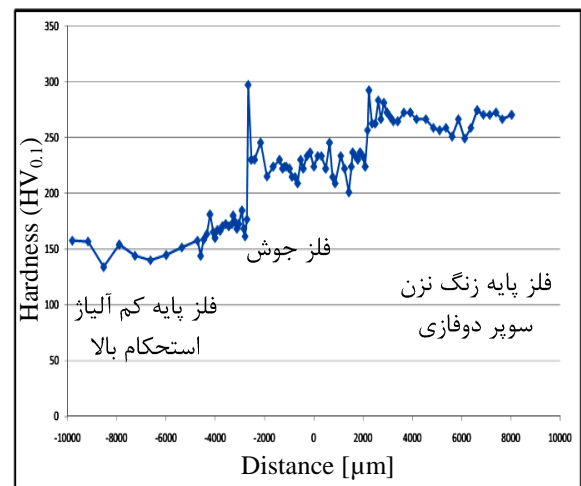
شکل (۴): ریزساختار فصل مشترک فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی - فلز جوش

### ۳-۱-۳- فلز جوش

ریزساختار فلز جوش (شکل ۵) به صورت ریختگی متشکل از دو فاز آستنیت (فاز برجسته) و فریت شامل ۳۷ درصد فریت و عاری از فازهای ترد و مضر می‌باشد. الگوی پراش پرتو ایکس فلز جوش نیز در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فازهای مضر در فلز جوش وجود ندارد و یا حداقل مقادیر آنها به حدی کم بوده است که در پراش پرتو ایکس قابل تشخیص نبوده است. بالا بودن میزان آستنیت فلز جوش مربوط به بالاتر بودن میزان محتوای نیکل فلز پرکننده در مقایسه فلزات پایه (جدول ۱) است که به طور مؤثری نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  را کاهش می‌دهد [۷] و سبب نفوذ کربن از سمت فولاد کم آلیاژ استحکام بالا به حوضچه جوش می‌باشد.



شکل (۲): ریزساختار فصل مشترک فلز پایه کم آلیاژ استحکام بالا - فلز جوش



شکل (۳): پروفیل سختی اتصال غیر مشابه

تصویر میکروسکوپی منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن دوفازی ۳۲۷۵۰ در شکل (۴) نشان داده شده است. به دلیل

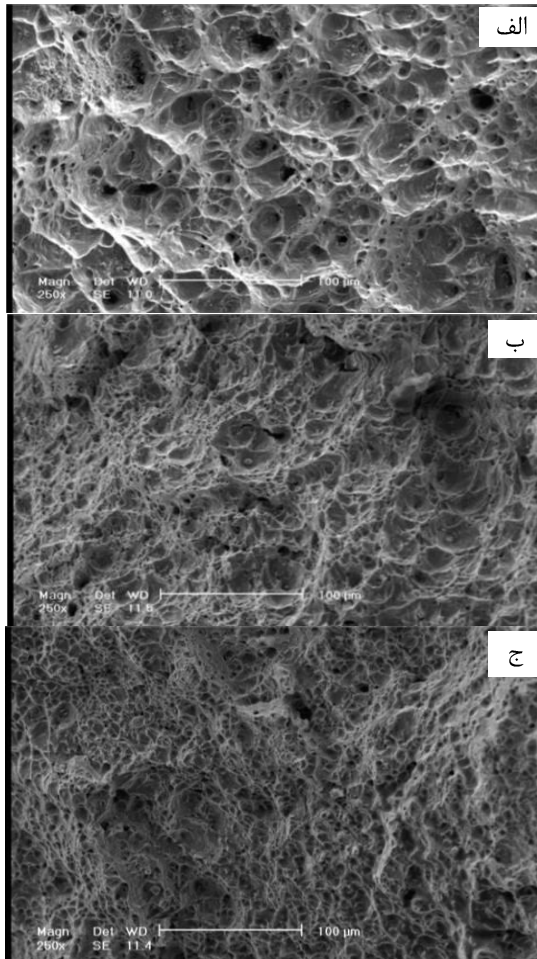
جدول (۳): استحکام ضربه‌ای فلزات پایه و فلز جوش

انرژی ضربه (J)	نمونه
۳۳ ± ۲	فلز پایه کم آلیاژ استحکام بالا
۳۳ ± ۲	فلز پایه زنگ نزن سوپر دو فازی
۴۱ ± ۲	نمونه جوش

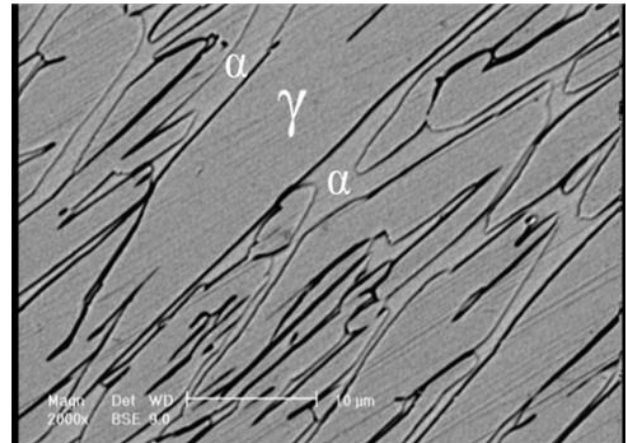
### ۳-۳- رفتار خوردگی

#### ۳-۳-۱- رفتار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و سیکی

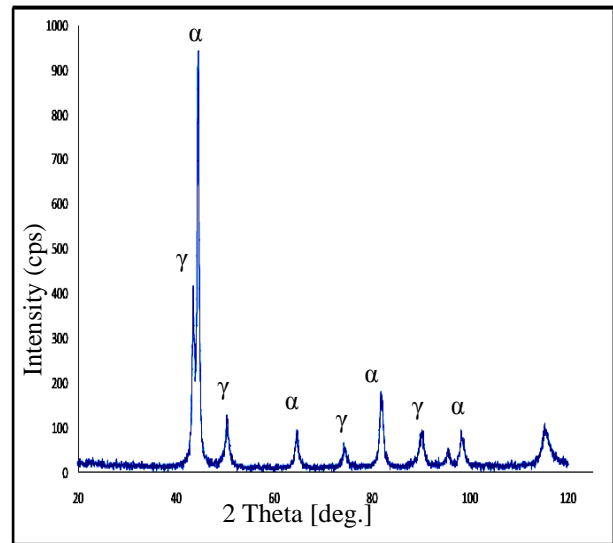
منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و سیکی فلزات پایه و فلز جوش در شکل‌های (۸) - الف و ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد هر دو فلز جوش و فلز پایه زنگ نزن سوپر دو فازی دارای پتانسیل خوردگی بالاتر (نجیب‌تر) و جریان خوردگی بسیار کمتری نسبت به فلز پایه کم آلیاژ استحکام بالا هستند.



شکل (۷): تصاویر سطوح شکست الف) فولاد زنگ نزن سوپر دو فازی (ب) فولاد کم آلیاژ استحکام بالا (ج) فلز جوش



شکل (۵): ریزساختار فلز جوش



شکل (۶): الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) فلز جوش

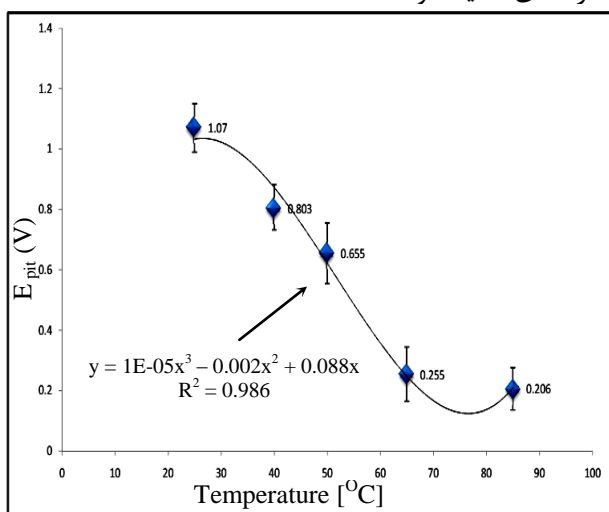
### ۳-۲- استحکام ضربه‌ای

نتایج آزمون ضربه چارپی با اندازه کوچک (۲/۵ mm) در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد برای فلزات پایه و نمونه‌های جوش در جدول (۳) ارائه شده است. استحکام ضربه‌ای نمونه‌ی جوشکاری شده نسبت به فلزات پایه بالاتر می‌باشد که علت آن بالاتر بودن میزان آستنیت فلز جوش نسبت به فلزات پایه است [۷]. تصاویر سطوح شکست فلزات پایه و نمونه‌های جوش در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود سطوح شکست در نمونه‌ها نرم می‌باشند چرا که خطوط سیلان پیوسته و دیمپل‌ها در سطوح آن‌ها به خوبی دیده می‌شود. حضور مقادیر بالای آستنیت در فلز جوش و فولاد زنگ نزن سوپر دو فازی و ریز دانه بودن فولاد کم آلیاژ استحکام بالا سبب چنین سطوح شکستی در نمونه‌ها شده است. نتایج و تصاویر ارائه شده با نتایج تاواریز و همکاران [۱۵] نیز موافقت داشت.

فیلم رویین، نفوذ یون‌ها به داخل و خارج حفره با سرعت بیشتری در دماهای بالاتر انجام می‌شوند [۲۹]. با توجه به نقطه‌ی عطف معادله درجه سه تطبیق داده شده در این شکل، میزان دمای بحرانی حفره‌دار شدن برای فلز جوش حدود ۶۵ درجه سانتیگراد تعیین گردید.

### ۳-۳-۳- رفتار خوردگی گالوانیکی

در اتصالات غیرمشابه از نقطه‌نظر خوردگی، یکی از دغدغه‌های مهم خوردگی گالوانیکی است. خوردگی گالوانیکی می‌تواند بین دو فلز پایه با مقاومت به خوردگی متفاوت رخ دهد و موجب خسارت‌های شدید شود.

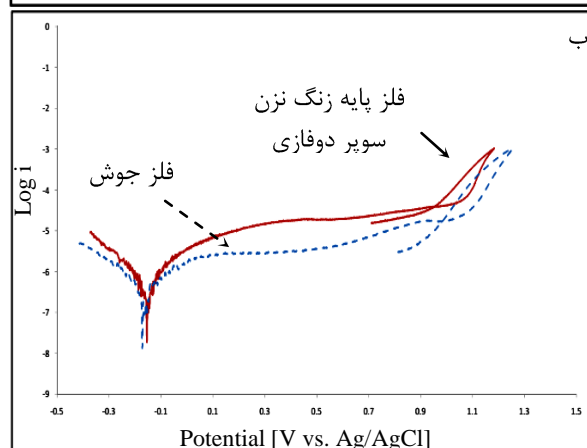
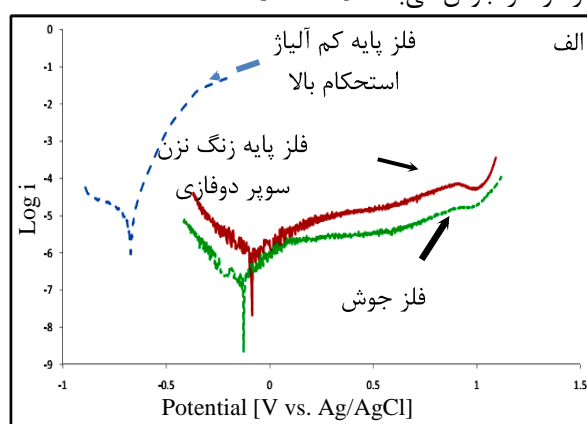


شکل (۹): روند تغییرات پتانسیل حفره‌دار شدن بر حسب زمان فلز جوش

محققین مختلف به دنبال معیارهایی بوده‌اند تا بتوانند با استفاده از آنها به پیش‌بینی وقوع این نوع خوردگی بپردازند. یکی از معیارها برای پیش‌بینی وقوع خوردگی گالوانیکی بر مبنای اختلاف پتانسیلی خوردگی دو عضو متصل بر هم استوار است. گزارش شده که حداقل اختلاف بین پتانسیل خوردگی کاتد و آند در زوج متصل به هم  $(E_C - E_A)$  در حدود ۱۰۰ تا ۱۳۰ میلی‌ولت نیاز است تا خوردگی گالوانیکی قابل توجه باشد [۳۰]. در این پژوهش با توجه به اختلاف پتانسیل خوردگی فلزات پایه و فلز جوش در محیط ۳/۵ درصد کلرید سدیم احتمال خوردگی گالوانیکی بین زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 / فلز جوش وجود دارد.

به منظور بررسی رفتار خوردگی گالوانیکی این زوج گالوانیکی از روش ZRA استفاده شد. دانسیته جریان گالوانیکی ( $i_G$ ) و پتانسیل گالوانیکی ( $E_G$ ) برای زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا / فلز جوش در محیط ۳/۵ درصد کلرید سدیم و دمای محیط پس از ۴ ساعت در شکل (۱۰) ارائه شده است. این

این تفاوت‌ها به خوبی با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و فلزات پایه قابل تشریح است. فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی و فلز پرکننده دارای حدود ۲۴ درصد کروم، ۳ درصد مولیبدن و ۲ درصد مس می‌باشد در حالی که فلز پایه کم آلیاژ استحکام بالا عاری از این عناصر بوده و این امر باعث بهبود مقاومت به خوردگی فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی و فلزات جوش نسبت به فلز پایه کم آلیاژ استحکام شده است. همچنین رفتار خوردگی فلز جوش نزدیک به فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی می‌باشد که علت این امر ترکیب شیمیایی نزدیک فلز پرکننده و فلز پایه زنگ نزن سوپر دوفازی و همچنین عدم تشکیل فازهای مضر در فلز جوش می‌باشد [۲۷، ۲۸].



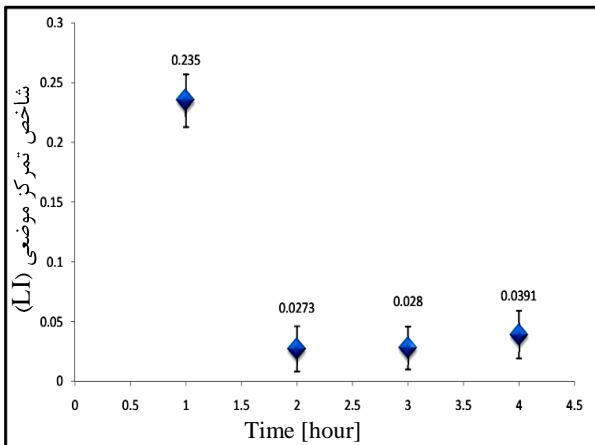
شکل (۸): رفتار خوردگی فلزات پایه و فلز جوش (الف) پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک (ب) پلاریزاسیون سیکی

### ۳-۳-۲- دمای بحرانی حفره‌دار شدن (CPT)

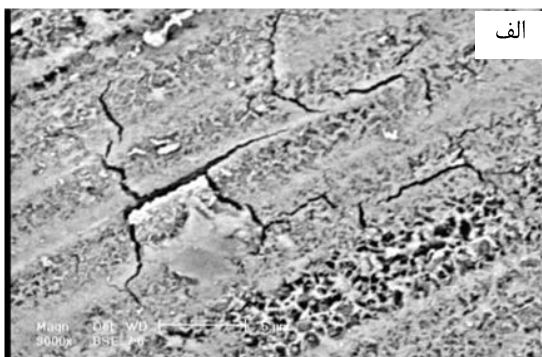
روند تغییرات پتانسیل حفره‌دار شدن ( $E_{pit}$ ) بر حسب دما برای فلز جوش در شکل (۹) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش حرارت ورودی در فلز جوش میزان پتانسیل حفره‌دار شدن کاهش یافته است زیرا واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی نظیر انحلال فلز یا آلیاژ، رشد فیلم اکسیدی با دما، انحلال فیلم اکسیدی، نفوذ اجزای مختلف به

موضوعی و زیر ۰/۱ خوردگی یکنواخت پیش‌بینی شده است که البته این نظریه مخالفی نیز دارد [۲۹].

نتایج شاخص تمرکز موضعی برای زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 / فلز جوش برای هر ساعت در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص تمرکز موضعی در ساعت اول ۰/۲۳ بدست آمده است و مکانیزم خوردگی آن از نوع موضعی پیش‌بینی می‌شود ولی برای ساعاتی بعد از آن شاخص تمرکز موضعی کمتر از ۰/۱ است و خوردگی عمومی برای ساعاتی بعدی پیش‌بینی می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح فولاد کم آلیاژ استحکام بالا پس از انجام آزمایش در مدت ۹۰ دقیقه به منظور تعیین نوع خوردگی صورت گرفته که در شکل (۱۲) ارائه شده است. نوع خوردگی‌های مشاهده شده در سطح از نوع خوردگی عمومی (شکل ۱۲-الف) و خوردگی حفره‌ای (شکل ۱۲-ب) می‌باشد، پس زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 - فلز جوش نیاز به حفاظت کاتدی دارد.

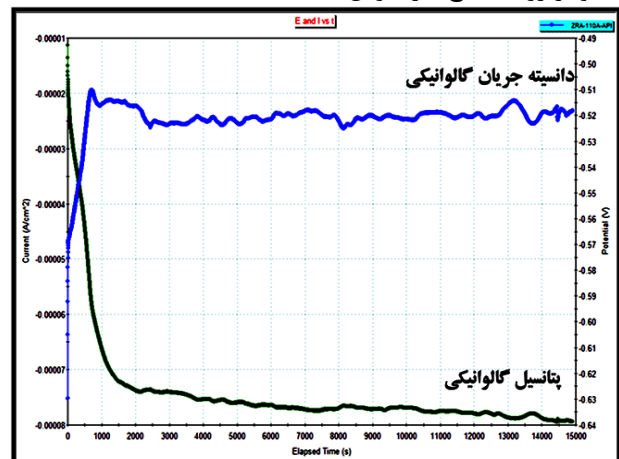


شکل (۱۱): نتایج شاخص تمرکز موضعی زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا - فلز جوش



ب

شکل نشان می‌دهد که دانسیته جریان گالوانیکی در مدت انجام آزمایش منفی می‌باشد در نتیجه در طی این مدت فولاد کم آلیاژ استحکام بالا آند و فلز جوش کاتد است. به عبارت دیگر در این زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا دچار خوردگی می‌شود. از نشانه‌های خوردگی یکنواخت در این آزمایش حضور پتانسیل با دامنه کم و سیگنال پایین جریان می‌باشد [۳۱، ۳۲]. دامنه پتانسیل و سیگنال دانسیته جریان گالوانیکی در مدت یک ساعت اول در این زوج گالوانیکی بسیار شدید می‌باشد و پس از آن دامنه پتانسیل و سیگنال دانسیته جریان کم می‌شود. به نظر می‌رسد که در مدت یک ساعت اول مکانیزم خوردگی از نوع موضعی و پس از آن یکنواخت باشد. همچنین همان‌طوری که در شکل دیده می‌شود پتانسیل گالوانیکی در مدت انجام آزمایش در حال کاهش و تمایل به رسیدن به پتانسیل خوردگی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا یعنی مقدار ۰/۶۷ ولت را دارد و این در حالی است که دانسیته جریان گالوانیکی تقریباً ثابت می‌باشد که پایدار شدن جریان گالوانیکی در این آزمایش را مربوط به تشکیل فیلم پسیو بر روی سطح فلز جوش دانسته‌اند [۳۱].



شکل (۱۰): دانسیته جریان و پتانسیل گالوانیکی زوج گالوانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا - فلز جوش

یکی از مزیت‌های مهم آزمون خوردگی گالوانیکی ZRA پیش‌بینی نوع خوردگی پس از انجام این آزمون می‌باشد. برای تعیین مکانیزم خوردگی می‌توان از روش تحلیل آماری شاخص تمرکز موضعی<sup>۱۷</sup> (LI) استفاده نمود که بسیار مورد توجه می‌باشد و در معادله (۱) ارائه شده است [۳۱، ۳۲].

$$li = \frac{\sigma_i}{i_{rsm}} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_i$  انحراف از معیار استاندارد دانسیته جریان<sup>۱۸</sup> و  $i_{rsm}$  ریشه دوم میانگین مربعات دانسیته جریان<sup>۱۹</sup> است و در نتیجه شاخص تمرکز موضعی بین صفر تا یک تغییر می‌کند. برای شاخص تمرکز موضعی بالاتر از ۰/۱ مکانیزم خوردگی از نوع



and Li, J., "Effect of annealing temperature on the pitting corrosion resistance of super duplex stainless steel UNS S32750", Materials Characterization, pp. 1049- 1054, 2009.

El-Yazgi, A.A.; and Hardie, D., "Stress Corrosion Cracking of Duplex and Super Duplex Stainless Steels in Sour Environments", Corrosion Science, Vol. 40, No. 6, pp. 909- 930, 1998.

Cui, Z.D.; Wu, S.L., Zhu, S.L., and Yang, X.J., "Study on Corrosion Properties of Pipelines in Simulated Produced Water Saturated with Supercritical CO<sub>2</sub>", Applied Surface Science, Vol. 252, No. 6, pp. 2368-2374, 2006.

Smith, L., "A Guideline to the Successful Use of Duplex Stainless Steels for Flowlines", Stainless Steel World, Duplex America Conference – KCL Publishing BV, DA2-102, pp. 1- 16, 2000.

Hussaina, E., and Husain, A., "Erosion-Corrosion of Duplex Stainless Steel under Kuwait Marine Condition", Desalination, Vol. 183, No. 1-3, pp. 227- 234, 2005.

Kotecki D.J.; and Lippold J.C. , "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley, Hoboken, New.

Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, International Molybdenum Association, London, 1999.

Sandvik Materials Technology, "Welding Guidelines for SAF 2507, Revision 1", <http://www2.sandvik.com>, 2011.

Ramazan Kacar; Orhan Baylan, "An investigation of microstructure / property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steels", Materials and Design, Vol. 25, pp. 317- 329, 2004.

Xiaoyan, W., Lei, Z., Xianren, K., and Minxu, L., "Microstructure and galvanic corrosion of dissimilar weldment between duplex stainless steel UNS 31803 and X80 steel", ASME 28<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Honolulu, Hawaii, USA, 2009.

Bravo, I.M.; Zepeda, C.M.; Hernandez, A.A., and Piedras, E.R., "Dissimilar welding of super duplex stainless steel/HSLA steel for offshore applications joined by GTAW", Engineering, pp. 520- 528, 2010.

Barnhouse, E.J.; and Lippold, J.C., "Microstructure / Property Relationships in Dissimilar Welds Between Duplex Stainless Steels and Carbon Steels", Welding Journal, Vol. 77, No. 12, pp. 477s- 487s, 1998.



شکل (۱۲): سطح فلز کم آلیاژ استحکام بالا پس از انجام تست ZRA (الف) خوردگی عمومی (ب) خوردگی حفره‌ای

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی خواص اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 پرداخته شد و نتایج زیر حاصل شد:

جوش حاصل از فلز پرکننده AWS A2594N با استفاده از فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با قطبیت منفی و کنترل حرارت ورودی در محدوده ۰/۷۸ کیلو ژول بر میلیمتر دارای انرژی شکست بالا در آزمون ضربه چارپی در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد و مقاومت به خوردگی عالی می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک و سیکلی، رفتار خوردگی فلزات جوش شبیه فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 می‌باشد.

آزمون ZRA نشان داد که در زوج گالوانیکی فلز جوش - فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا دچار خوردگی می‌شود و مکانیزم خوردگی از نوع حفره‌ای تعیین شد. به منظور بررسی‌های بیشتر بررسی نتایج حاصل از این آزمون در ساعت‌های طولانی ضروری به نظر می‌رسد.

#### ۵- تقدیر و تشکر

تهیه کنندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از آقای دکتر کیوان رئیس، به دلیل هم فکری‌هایی که داشته اند، تشکر و قدردانی نمایند.

#### ۶- مراجع

Muthupandi, V.; BalaSrinivasan, P., Seshadri, S.K., and Sundaresan, S., "Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steels", Materials Science and Engineering A, Vol. 358, pp. 9- 16, 2003.

Tan, H.; Jiang, Y.; Deng, B.; Sun, T.; Xu, J., [۲]

- Cervo, R.; Ferro, P.; and Tiziani, A., [۲۵] "Annealing temperature effects on super duplex stainless steel UNS S32750 welded joints I: microstructure and partitioning of elements", *Journal of Materials Science*, Vol. 45, pp. 4369- 4377, 2010.
- Kordatos, J.D., Fourlaris, G., and Papadimitriou, G., [۲۶] "The effect of cooling rate on the mechanical and corrosion properties of SAF 2205 (UNS S32803) duplex stainless steel welds", *Scripta Materiala*, Vol. 44, pp. 401- 408, 2001.
- Hermas, A.A., Ogura, K., Takagi, S., and Adachi, T., [۲۷] "Effect of alloying additions on corrosion and passivation behaviors of type 304 stainless steel", *Corrosion*, Vol. 51, pp. 3- 10, 1995.
- Lloyd, A.C.; Noel, J.J., McIntyre, S., and Shoesmith, D.W., [۲۸] "Cr, Mo and W alloying additions in Ni and their effect on passivity", *Electrochemical Acta*, Vol. 49, pp. 3015- 3027, 2004.
- Liou, H.Y.; Pan, Y.T., Hsieh, R.L., and Tsai, W.T., [۲۹] "Effects of alloying elements on the mechanical properties and corrosion behaviors of 2205 duplex stainless steels", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 10, pp. 231- 241, 2001.
- Blasco-Tamarit, E.; Igual-Munoz, A.; and Garcia-Anton, J., [۳۰] "Galvanic corrosion of high alloyed austenitic stainless steel welds in LiBr systems", *Corrosion Science*, Vol. 49, pp. 4452- 4471, 2007.
- Sanchez-Tovar, R., Montanes, M.T., Garcia-Anton, J.; and Guenbour, A., [۳۱] "Galvanic Corrosion of the Base AISI 316l/Micro-Plasma Arc Welded AISI 316l in Polluted Phosphoric Acid Media at Different Temperatures", *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 6, pp. 3656- 3670, 2011.
- Blasco-Tamarit; E., Igual-Munoz, A., Garcia Anton, J. and Garcia-Garcia, D.M., [۳۲] "Galvanic corrosion of titanium coupled to welded titanium in LiBr solution at different temperatures", *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 1059- 1102, 2009.
- Wang, S., Ma, Q., and Li, Y., [۱۴] "Characterization of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Welded Joint between 2205 Duplex Stainless Steel and 16MnR", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 831- 837, 2011.
- S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, L.D. Lima, I.N. Bastos, A.M. Nascimento; J.A. de Souza, [۱۵] "Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750", *Materials Characterization*, Vol. 58, pp. 610 - 616, 2007.
- J. Labanowski, [۱۶] "Mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar stainless steel welds", *Archives of Materials Science and Engineering*, pp. 27- 33, Volume 28, Issue 1, 2007.
- J. Labanowski, [۱۷] "Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, VOLUME 20, ISSUES 1- 2, 2007.
- Structural Steel Welding Code, American [۱۸] Welding Society, 1992.
- ASM Handbook, Volume 9, Metallography [۱۹] and Microstructures, 2004.
- A 923- 03: Standard Test Methods for [۲۰] Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic / Ferritic Stainless Steels, ASTM Standard, 2003.
- E23- 02a: Standard Test Methods for Notched [۲۱] Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM Standard, 2002.
- G5-48-R03: Standard Test Methods for Pitting [۲۲] and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. ASTM Standard. 2004.
- G61: Standard Test Method for Conducting [۲۳] Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, ASTM Standard. 2004.
- G150-99-R04: Standard Test Method for [۲۴] Electrochemical Critical Pitting Temperature Testing of Stainless Steels, ASTM Standard, 2004.

## ۷- زیر نویس ها

- 
- <sup>۱</sup> Super duplex stainless steel
  - <sup>۲</sup> Heat Input
  - <sup>۳</sup> High Strength Low Alloy Steel
  - <sup>۴</sup> American Petroleum Institutor
  - <sup>۵</sup> Gas Tungsten inert Arc Welding
  - <sup>۶</sup> Shielded Metal Arc Welding
  - <sup>۷</sup> Single-V-Groove
  - <sup>۸</sup> Bevel
  - <sup>۹</sup> Joint Root
  - <sup>۱۰</sup> Root Face
  - <sup>۱۱</sup> Chi
  - <sup>۱۲</sup> Sub-size
  - <sup>۱۳</sup> Potationdynamic Polarization
  - <sup>۱۴</sup> Cyclic Polarization
  - <sup>۱۵</sup> Critical Pitting Temperature
  - <sup>۱۶</sup> Zero Resistance Ammeter (ZRA)
  - <sup>۱۷</sup> Localization Index
  - <sup>۱۸</sup> Current density standard deviation
  - <sup>۱۹</sup> Root mean square of current density