

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های نامشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L

مهدی رحمانی^{*}، مرتضی شمعیان^۱ و مسعود کثیری^۲

چکیده

در این پژوهش، ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های نامشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با قطبیت منفی و دو نوع فلز پرکننده ER25104L و ER309LMo استفاده شد. پس از جوشکاری، ریزساختار مناطق گوناگون هر اتصال شامل فلزات جوش، مناطق متأثر از حرارت و فصل مشترک‌ها با میکروسکوپ نوری بررسی شدند و ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات مورد بررسی قرار گرفته شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان دادند که در فلز جوش ER25104L، ریزساختار به صورت دندریت‌های آستنیت و زمینه فریت بود. انجماد فلز جوش ER309LMo، به صورت فریت اولیه همراه با مقداری آستنیت و با ریخت‌شناسی فریت اسکلتی شکل صورت گرفت. همچنین، خواص مکانیکی شامل خمش، استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه، سختی و نیز شکست‌نگاری نمونه‌ها بررسی شد. در آزمایش کشش تمامی نمونه‌ها از منطقه HAZ فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و به صورت نرم دچار شکست شدند. همچنین، بیش‌ترین مقدار انرژی شکست مربوط به فلز جوش ER25104L بود. نمونه جوش شده با فلز پرکننده ER25104L بیش‌ترین انعطاف پذیری را از خود نشان داد. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار سختی به ترتیب برای فلز پرکننده ER309LMo و ER25104L بدست آمد. خواص مکانیکی بدست آمده با استفاده از دو نوع فلز پرکننده ER25104L و ER309LMo قابل قبول بوده، اگرچه فلز جوش ER25104L خواص مکانیکی بهتری را نسبت به فلز جوش ER309LMo از خود نشان داد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت برای اتصال بین فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L، ماده‌ی پرکننده‌ی ER25104L ویژگی‌های بهینه‌ای را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: جوش‌های نامشابه، فولاد زنگ نزن آستنیتی، فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی، ریزساختار.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

2- دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

3- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

*- نویسنده مسئول مقاله: Rahmani_mhd@yahoo.com

پیشگفتار

فولادهای زنگ نزن آستنیتی 304L به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین گروه فولادهای زنگ نزن بشمار می‌روند که به گونه گسترده در کاربردهایی که نیاز به مقاومت خوردگی خوب در اتمسفر و یا دمای بالا باشد، به کار گرفته می‌شوند. این فولاد در صنایع گوناگون نظیر نفت و گاز، پالایشگاه، پتروشیمی و نیروگاه‌های تولید برق کاربرد فراوان دارد [1]. فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L به دلیل داشتن مقادیر بالایی از عناصر آلیاژی همچون کروم و نیکل و مقادیر جزئی کربن در ترکیب شیمیایی در کاربردهایی که حمله بین دانه ای و ترک خوردن خوردگی تنش‌ی مورد توجه است، بکار می‌روند. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا به خاطر میزان بالای کروم در این فولاد می باشد. وجود نیکل که عنصری آستنیت زا می باشد، باعث بالا رفتن خواص مقاوم به حرارت این آلیاژ می شود [2]. با وجود مقاومت به خوردگی خوب فولادهای زنگ نزن آستنیتی، در محیط های بسیار خورنده حاوی غلظت های بالای یون کلر، این فولاد ها مقاوم نبوده و در برابر خوردگی حفره ای و ترک خوردن خوردگی تنش‌ی آسیب پذیرند زیرا این فولادها در محدوده 8 تا 12 درصد وزنی نیکل، کمترین مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنش‌ی را از خود نشان می دهند و با افزایش و یا کاهش میزان نیکل، مقاومت در خارج از این محدوده افزایش می یابد [2]. از سوی دیگر، فولادهای زنگ نزن دوفازی به دلیل دارا بودن مقادیر نسبتاً بالایی از کروم و مولیبدن نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی و دارا بودن ریزساختار فریتی و آستنیتی تقریباً یکسان از استحکام و مقاومت به خوردگی خوبی در ارتباط با خوردگی حفره ای و تنش‌ی در محیط های سولفیدی و کلریدی برخوردارند [3]. بنابراین، فولادهای زنگ نزن دوفازی می‌توانند جایگزینی بسیار مناسب برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی باشند. فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 یک فولاد زنگ نزن دوفازی پرآلیاژ جدید بوده که وجود مقادیری قابل توجه از عناصری چون کروم، نیکل، مولیبدن و نیتروژن در ترکیب آن خواصی ممتاز و بی نظیر را به آن بخشیده است. مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنش‌ی، حفره‌ای و شیاری در محیط‌های خورنده

به همراه استحکام کششی و خواص سایشی عالی باعث کاربرد وسیع این فولاد برای لوله های نفت و گاز در ساحل دریا یا درون دریا، مبدل های حرارتی، مخازن تحت فشار، صنایع نفت و پتروشیمی شده است [4].

امروزه کاربرد اجتناب ناپذیر اتصالات نامشابه به دلیل ملاحظات اقتصادی و دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب و افزایش مقاومت به خوردگی برای بسیاری از آلیاژها گسترش یافته است، از جمله این اتصالات نامشابه می توان به اتصال فولادهای زنگ نزن به یکدیگر و به انواع فولاد های کربنی اشاره کرد. در همین راستا، گروهی از پژوهشگران، پژوهش‌های خود را بر جوشکاری نامشابه این آلیاژها متمرکز ساخته اند، از جمله مندوزا و همکارانش [5] به بررسی ریزساختار فلز جوش، فصل مشترک های اتصال نامشابه فولادزنگ نزن سوپر دوفازی 32750 به فولادهای کربنی و هم‌چنین، تعیین فلز پرکننده مناسب برای اتصال پرداخته اند. این پژوهشگران گزارش کرده اند که استفاده از فلز پرکننده 25104L به علت دارا بودن نیکل بالاتر و نقش آستنیت زایی آن جهت بدست آوردن نسبت مناسب ریزساختار فریت و آستنیت موثر است. ساتو و همکارانش [6] ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی 32750 را بررسی کرده اند. این پژوهشگران گزارش کرده اند که درصد آستنیت منطقه جوش بین 55 تا 65 درصد بوده و تبلور دوباره دینامیکی سبب ریزشدن منطقه اغتشاش شده است. در سال های اخیر نیز لابونسکی [7] به بررسی خواص مکانیکی و حساسیت به ترک خوردن خوردگی تنش‌ی اتصال نامشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L به فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 پرداخته است. این پژوهشگر گزارش کرده است که در این اتصال نامشابه، ضعیف‌ترین مکان در ارتباط با ترک خوردن خوردگی تنش‌ی، منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ نزن دوفازی است. علت این امر رسوب فازهای بین فلزی و به تعویق افتادن استحاله فریت به آستنیت و در نتیجه، کاهش خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی است. هم‌چنین، گروهی از پژوهشگران، پژوهش‌های خود را در زمینه تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی

ASME B16.9 آماده‌سازی شدند. شماتیک طرح اتصال و مشخصات ابعادی آن در شکل 1 نشان داده شده است.

جوشکاری نمونه‌ها

جوشکاری نمونه‌ها به صورت دستی با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW-DCEN) با استفاده از دستگاه جوش گام الکتریک مدل Pars-EL 631 به وسیله جوشکار ماهر صلاحیت دار در وضعیت 2G و در سه پاس به گونه ای که یک پاس نفوذی و دو پاس پرکننده بود، انجام گرفت. جوشکاری بر اساس استاندارد ASME SEC.IX و با توجه به ضخامت لوله بدون پیش گرم کردن و بیشینه دمای بین پاسی 155 درجه سانتیگراد بمنظور کاهش تنش‌های اعوجاج ناشی از انقباض و سرد شدن و همچنین، جلوگیری از افزایش حرارت ورودی و امکان ایجاد رسوب فازهای بین فلزی و به تعویق افتادن استحاله فریت به آستنیت و در نتیجه، کاهش خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی، انجام شد. الکتروود مصرف‌نشده‌ی مورد استفاده، الکتروود تنگستنی حاوی 2 درصد توریم به قطر 2/4 میلیمتر بود. گاز آرگون با خلوص 99/99 درصد با دبی 15 لیتر بر دقیقه به عنوان گاز محافظ استفاده شد. بمنظور محافظت ریشه جوش، از گاز آرگون به عنوان گاز محافظ پشتی استفاده شد. در هر پاس مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه زیر حرارت ورودی محاسبه گردید [9].

$$HI = \frac{\eta \cdot I \cdot V}{S} \quad (1)$$

در این رابطه I شدت جریان، V ولتاژ و S سرعت جوشکاری است. η بازده قوس در این رابطه 0.7 در نظر گرفته شده است. با توجه به سیالیت حوضچه مذاب و سرعت دست جوشکار و مطالعه منابع مقدار پارامترهای شدت جریان و ولتاژ در هر پاس انتخاب گردید. جدول 2 مشخصات جوشکاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

بررسی‌های ریزساختاری

بمنظور مطالعه و بررسی ریزساختار مناطق آلیاژهای پایه، فلز جوش، منطقه تحت تأثیر حرارت و همچنین، تحولات ریز ساختاری، از متالوگرافی استفاده شد. بدین

اتصالات نامشابه متمرکز کرده اند، نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داده است که استفاده از حرارت ورودی زیاد باعث رسوب فازهای بین فلزی و به تعویق افتادن استحاله فریت به آستنیت و در نتیجه، کاهش خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خواهد شد [8]. همان‌گونه که اشاره شد، با توجه به این‌که اتصال نامشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و سوپر دوفازی 32750، در صنایع نفت و گاز و بویژه در مبدل‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است و با توجه به این‌که یکی از فاکتورهای مهم در اتصالات نامشابه برآورده شدن نیازهای خواص مکانیکی است، فلزات پرکننده و شرایط جوشکاری باید به گونه ای باشد که فلز جوش ایجاد شده بتواند از لحاظ خواص مکانیکی با فلزات پایه برابری کند، لذا، در این پژوهش به انتخاب بهترین ماده پرکننده از دیدگاه ریزساختاری و خواص مکانیکی پرداخته شده است.

مواد و روش پژوهش

آماده‌سازی نمونه‌ها و طرح اتصال

در این پژوهش، از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L و فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به عنوان فلزات پایه به صورت کار شده استفاده شد. بدین منظور، لوله‌هایی با اندازه قطر داخلی 85 میلی‌متر (3 اینچ) و طول 155 میلیمتر و ضخامت 4 میلیمتر (5/15 اینچ) تهیه شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پرکننده در جدول (1) ارائه شده است. ترکیب شیمیایی فلزات پایه براساس نتایج اسپکتروگرافی نشر نوری و ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده ترکیب اسمی گزارش شده توسط سازنده است. انتخاب فلزات پرکننده افزون بر ترکیب شیمیایی براساس پارامترهای دیگری مانند خواص مکانیکی حاصله، ضریب انبساط حرارتی، مقاومت به خوردگی، قابلیت در دسترس بودن و هزینه‌ها انجام شد. بر همین اساس جهت اتصال فلزات پایه از دو فلز پرکننده AWS A5.9 (سیم جوش ER 309LMo) و AWS A5.9 (سیم جوش ER 25104L) با قطر 2/4 میلیمتر با استفاده از استاندارد CASME SEC.II, Part و مطالعه مراجع بهره برده شد [9 و 15]. لوله‌ها جهت اتصال لب به لب با شیار V شکل بر اساس استاندارد

منظور دو آزمایش خمش ریشه و دو آزمایش خمش رویه توسط دستگاه خمش Senze انجام شد.

جهت مقایسه مقاومت در برابر ضربه فلزات جوش، نمونه‌های آزمایش ضربه مطابق با استاندارد ASME SEC.IX QW-403.5 تهیه شدند. بر اساس این استاندارد فلز جوش درست در مرکز نمونه واقع می‌شود، از هر اتصال سه نمونه برای انجام این آزمایش تهیه شد. سپس آزمایش ضربه چارپی با استفاده از دستگاه Santam بر روی نمونه‌ها در دمای 27 درجه سانتیگراد به دلیل اهمیت انعطاف پذیری و کاهش آن در دمای پایین انجام و انرژی جذب شده در حین آزمایش گزارش شد. همچنین، سطوح شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمایش، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leo تحت ولتاژ 25 کیلو ولت مورد مطالعه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

بررسی‌های ریزساختاری فلزات پایه

شکل 2 تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L را نشان می‌دهد. این ریزساختار، شبیه به ریزساختار معمول فولادهای زنگ نزن آستنیتی است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، ریزساختار، دانه‌های آستنیتی هم محور را نشان می‌دهد. در شکل 3 تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 ارائه شده است. ساختار متشکل از دو فاز فریت و آستنیت به صورت لایه‌ای می‌باشد و ساختار نوردی کاملاً واضح است. فاز روشن آستنیت و فاز تیره رنگ فریت می‌باشد. بررسی‌ها با استفاده از دستگاه فریتسکوپ نشان داد که درصد حجمی آستنیت فلز پایه حدود 47 است. این مقدار نزدیک به 55 درصد بوده و بیانگر آن است که تعادل یک به یک آستنیت - فریت به خوبی حفظ شده است. با توجه به شکل و محاسبات انجام گرفته به وسیله نرم افزارهای میکروسکوپ نوری و همچنین براساس استاندارد ASTM E112 مقدار میانگین اندازه دانه های آستنیت حدود 23 میکرومتر بدست آمد.

منظور از هر اتصال دو نمونه با ابعاد مناسب تهیه شد. سطوح نمونه‌ها به وسیله سنباده‌های کاربید سیلیسیوم 155 تا 2455 سنباده زنی و با استفاده از پودر آلومینای $5/3 \mu\text{m}$ پولیش شدند. نمونه‌ها به وسیله محلول رنگی برها (85 میلی لیتر آب مقطر، 35 میلی لیتر اسید کلریدریک، $5/3$ گرم $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) به مدت 35 ثانیه اچ شدند [15 و 11]. پس از آماده سازی نمونه‌ها، ریز ساختار مناطق گوناگون قطعات جوشکاری شده به وسیله میکروسکوپ نوری Olympus مدل CK40M در بزرگنمایی‌های گوناگون مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بمنظور اندازه گیری درصد فازهای فریت و آستنیت در هر نمونه از دستگاه فریتسکوپ Fischer مدل FMP30 استفاده شد. این دستگاه قابل حمل بوده و دارای یک پروب است که با استفاده از روش القای مغناطیسی، کسر حجمی فاز مغناطیسی را در فولادهای متشکل از فازهای مغناطیسی و نا مغناطیسی بر اساس استاندارد ANSI/AWS A4.2M/A4.2 اندازه گیری می‌کند. این دستگاه بیش تر برای تعیین مقدار فاز فریت در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و دوفازی طراحی شده است.

ارزیابی خواص مکانیکی

بمنظور ارزیابی خواص مکانیکی بر اساس استاندارد ASME SEC.IX نمونه های آزمایش کشش، خمش و ضربه از قطعات جوشکاری شده تهیه گردید [9]. بر اساس این استاندارد نمونه‌هایی برای آزمایش کشش تهیه شد که منطقه تحت کشش شامل فلز جوش و هر یک از فلزات پایه باشد. بنابراین، فلز جوش بایستی درست در مرکز نمونه واقع شود. تعداد نمونه‌های آزمایش کشش برای اتصالات با ضخامت کم تر از 25 میلیمتر دو نمونه می‌باشد. بدین منظور، برای هر اتصال دو نمونه در نظر گرفته شد و به وسیله دستگاه کشش مدل Instron کشیده شد سپس درصد ازدیاد طول، استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه‌ها محاسبه و گزارش گردید. همچنین نمونه‌هایی از اتصال براساس استاندارد ASME SEC.IX جهت آزمایش خمش ریشه و آزمایش خمش رویه تهیه شد و سپس به وسیله فرم دهنده تحت بار قرار گرفت [9]. بدین

بررسی ریزساختار فلزات جوش

در شکل 4 ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده 309LMo مربوط به پاس نخست نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، ساختار آستنیتی همراه با مقداری فریت دلتا به صورت اسکلتی است. انجماد در فلز جوش 309LMo از نوع FA است. بنابراین، ریزساختار حاصل، شامل فریت کرمی شکل یا اسکلتی در زمینه آستنیت می باشد. ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده 25104L مربوط به پاس نخست در شکل 5 نشان داده شده است. ساختار متشکل از فاز فریت (تیره)، آستنیت (روشن) و رسوب آستنیت ثانویه (ظریف روشن) است. تمام فولادهای زنگ نزن دوفازی به صورت فریتی منجمد شده و تا پایان انجماد هم فریتی باقی می ماند. با پایین آمدن دما، استحاله حالت جامد فریت به آستنیت شروع می شود. تشکیل آستنیت ثانویه بیش تر در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت طی جوشکاری چند پاسه رایج است [12]. بازگرمایش قطعه جوشکاری شده سبب می شود نفوذ گرمایی بیش تری صورت گیرد که می تواند سبب رشد بیش تر آستنیت موجود و یا جوانه زنی آستنیت جدید شود. رسوب آستنیت ثانویه می تواند به طور قابل ملاحظه ای چقرمگی جوش های رسوب داده شده را بهبود بخشد، اما شواهدی وجود دارد که نشان می دهد حضور آستنیت ثانویه ممکن است مقاومت به خوردگی حفره ای را کاهش دهد [13]. بمنظور پیش بینی ساختار فلز جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی از دیاگرام هایی نظیر WRC-1992 استفاده می شود [14]. این دیاگرام با شرایط جوشکاری انطباقی مناسب را نشان می دهد. در این دیاگرام با محاسبه مقدار Cr_{eq}/Ni_{eq} می توان ساختار فلز جوش را پیش بینی کرد. کروم معادل و نیکل معادل از روابط زیر بدست می آیند [14].

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (4)$$

جدول 3 مقادیر کروم معادل و نیکل معادل محاسبه شده براساس ترکیب شیمیایی برای فلزات پایه و فلزات پرکننده را نشان می دهد. در شکل 6 نمودار WRC-1992، ترکیب شیمیایی به صورت کروم معادل و نیکل معادل برای فلز پایه آستنیتی 304L با علامت

مثلت، برای فلز پایه دوفازی 32750 با علامت مربع، برای فلز پرکننده ER25104L با علامت دایره و برای فلز پرکننده ER309LMo با علامت مستطیل مشخص شده است. ترکیب شیمیایی فلز جوش پاس نخست، با احتساب رقت 35 درصد و با فاصله از علامت دایره و مستطیل در امتداد خط چین به سمت وسط خط رابط بین دو فلز پایه نشان می دهد که این نقاط حدوداً خط ایزوفریت با عدد فریت 43 برای فلز پرکننده ER25104L و خط ایزوفریت با عدد فریت 19 برای فلز پرکننده ER309LMo را قطع می کنند. ضریب تبدیل عدد فریت به درصد حجمی برای آلیاژهای دوفازی تقریباً 75 درصد در نظر گرفته می شود [1]. بنابراین، میزان فریت فلز جوش به ترتیب برای فلز پرکننده 25104L و 309LMo در حدود 35 درصد و 13/3 درصد پیش بینی می شود. جدول (4) درصد حجمی فاز آستنیت اندازه گیری شده به وسیله دستگاه فریتسکوپ را نشان می دهد. درصد حجمی فاز فریت محاسبه شده به وسیله این دستگاه حدود 39 درصد برای فلز پرکننده 25104L و 15 درصد برای فلز پرکننده 309LMo در پاس اول می باشد. مطالعات نشان داده است که کنترل میزان فریت فلز جوش، برای جلوگیری از ترک خوردن انجمادی در جوش های چند پاسه بسیار اهمیت دارد [15].

بررسی ریزساختاری فصل مشترک ها

بررسی ریزساختار مرز ذوب فلز پایه 304L / فلزات جوش

شکل 7 فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی 304L و فلز جوش با استفاده از فلز پرکننده 309LMo و 25104L را برای پاس نخست نشان می دهد. فصل مشترکی کاملاً پیوسته در سرتاسر مرز جوش همراه با رشد صفحه ای مشاهده می شود. همان گونه که در شکل 7 مشاهده می شود، هم آستنیت و هم فریت در خط ذوب از فلز پایه به سمت فلز جوش به صورت رونشستی رشد کرده اند. مقداری فریت دلتا در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L مشاهده می شود. میزان تشکیل فریت در منطقه متأثر از حرارت معمولاً کم می باشد زیرا استحاله آستنیت به فریت نسبتاً آهسته است

دمای خط انحلال فریت بالاتر به آستنیت اجازه می‌دهد تا در دمای بالاتر تشکیل شود، در نتیجه، میزان آستنیت بیش‌تر خواهد شد. بهترین عملکرد زمانی ایجاد می‌شود که ریزساختار حاصل شامل 55 درصد فریت و 55 درصد آستنیت باشد و فاصله‌گرفتن از این مقدار باعث از بین رفتن تعادل و تخریب خواص مکانیکی خواهد شد [18]. اندازه دانه در HAZ و فلز جوش هر دو به عنوان تابعی از حرارت ورودی افزایش می‌یابند. پژوهش‌های، پژوهشگرانی همچون یوسفیه [16] و وانگ [19] نشان داده است که حرارت ورودی نقشی بسزا در تغییرات ریزساختاری منطقه جوش فولادهای زنگ‌نزن دوفازی دارد. فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی بر حسب ضخامت و هندسه اتصال باید با حرارت ورودی بین 5/5 تا 1/5 کیلو ژول بر میلی متر جوشکاری شوند. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهند که مناطق متأثر از حرارت دارای دانه‌هایی درشت‌تر نسبت به فلزات پایه هستند. به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت و پایین بودن ظرفیت حرارتی فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی 32750 نسبت به فولاد زنگ نزن 304L، منطقه متأثر از حرارت 32750 وسیع‌تر از 304L است. عرض منطقه متأثر از حرارت در سمت فولاد 32750 حدود 255 تا 255 میکرومتر است. در حالی که عرض منطقه متأثر از حرارت در سمت فولاد 304L خیلی باریک‌تر و در حدود 155 تا 155 میکرومتر می‌باشد.

آزمایش خمش

بررسی مراجع نشان داد که اگر ریزساختار بدست آمده از جوش، میزان کمی فریت در نخستین پاس خود دارا باشد، ترک خوردن انجمادی جوش بسیار نامحتمل خواهد بود و فلز جوش به گونه‌ای قابل ملاحظه انعطاف‌پذیر خواهد شد [25]. نتایج بدست آمده از آزمایش خمش در جدول 5 آورده شده است. نتایج ناشی از فریت‌سنجی در پاس نخست نشان داد که فلز جوش 25104L دارای عدد فریت حدود 35 و فلز جوش 309LMo دارای عدد فریت حدود 13 بود. در نهایت، هیچ‌گونه ترک نا قابل قبولی در سطح نمونه‌ها مشاهده نگردید.

و سیکل حرارتی HAZ معمولاً سریع می‌باشد. تشکیل فریت در طول مرزدانه‌های HAZ، رشد دانه را محدود خواهد کرد و همچنین، احتمال ترک‌های ذوبی HAZ را کاهش خواهد داد [15 و 16]. میزان فریت اندازه‌گیری شده در این منطقه به وسیله دستگاه فریتسکوپ تقریباً 25 درصد است. همچنین، اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت برای فلز پرکننده 309LMo حدود 35 میکرومتر و برای فلز پرکننده 25104L حدود 15 میکرومتر بدست آمد.

بررسی ریزساختار مرز ذوب فلز پایه 32750/ فلزات جوش

شکل 8، فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ‌نزن دوفازی 32750 و فلز جوش با استفاده از فلز پرکننده 25104L و 309LMo با رشد صفحه‌ای را برای پاس نخست نشان می‌دهد. با دقت در اشکال به وضوح مشخص است که جوش‌ها و مناطق تحت تأثیر حرارت از دماهای نزدیک به خط انحلال فریت به سرعت سرد می‌شوند، بنابراین، تمایل به فریت بیش‌تری در فلز جوش و منطقه تحت‌تأثیر حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی نسبت به فلز پایه وجود دارد. در نتیجه، میزان فریت در منطقه متأثر از حرارت با استفاده از فلز پرکننده 25104L بیش‌تر است، این میزان فریت حدود 73 درصد به وسیله دستگاه فریتسکوپ اندازه‌گیری شده است. به دلیل نرخ بالای سرد شدن ناشی از جوشکاری، ریزساختار منطقه متأثر از حرارت در جوش‌های فولاد زنگ‌نزن دوفازی دارای نسبت نا تعادلی از فریت و آستنیت است. از آنجایی که بیشینه دما در منطقه متأثر از حرارت بسیار بیش‌تر از حد بالایی تعادل فازی بین فریت و آستنیت است، اغلب جزایر آستنیتی در ریزساختار دوفازی در زمینه فریتی حل می‌شوند. طی سرد شدن در زیر خط انحلال فریت آستنیت شروع به جوانه زنی می‌کند، اما در نرخ سرد شدن بالا استحاله فریت به آستنیت به تاخیر افتاده و در مقایسه با فلز پایه مقدار کم‌تری آستنیت تشکیل می‌شود [17 و 18]. مقدار آستنیت بیش‌تر در منطقه متأثر از حرارت نمونه جوش شده با استفاده از فلز پرکننده 309LMo قابل توضیح است. این نمونه دارای مقدار کم‌تر Cr_{eq}/Ni_{eq} می‌باشد و به دلیل

آزمایش کشش

نمودار تنش- کرنش مربوط به اتصالات نامشابه جوشکاری شده با فلزات پرکننده 309LMo و 25104L در شکل 9 به عنوان نتایج آزمایش کشش آورده شده است. نخستین نتیجه بدست آمده از آزمایش کشش آن است که تمامی نمونه‌های جوش شده با استفاده از فلز پرکننده 25104L و 309LMo از منطقه ضعیف‌تر اتصال، یعنی در فلز پایه 304L دچار شکست شدند. این بدان معنی است که ضعیف‌ترین قسمت اتصالات، فلز پایه 304L می‌باشد. به طور کلی محل شکست در نمونه‌های جوشکاری شده به استحکام نسبی اجزای گوناگون نمونه در اتصال بستگی خواهد داشت. جدول 6 نتایج آزمایش کشش برای فلزات پایه و جوش را نشان می‌دهد.

بررسی ها نشان می‌دهند که فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی معمولاً در شرایط کار سرد، نورد گرم و آتیل شده جوشکاری می‌شوند. بنابراین، مقداری نرم شدگی در منطقه تحت تاثیر حرارت رخ می‌دهد که به رشد دانه در مواد نورد گرم شده و یا تبلور دوباره و رشد دانه در مواد کار سرد شده مربوط است. در نتیجه، وقتی که آزمایش کشش عرضی نمونه‌های جوش انجام می‌شود، شکست اغلب در منطقه متأثر از حرارت در مقایسه با فلز جوش رخ می‌دهد [1]. از سوی دیگر، مطالعه منابع [21] موجود نشان می‌دهد که فلز پایه آستنیتی 304L درصد بالایی از افزایش طول را به خود اختصاص داده است و این باعث می‌شود تسلیم در حین آزمایش کشش تمایل به شروع از محل نرم تر (فلز پایه 304L داشته باشد. درشت شدن دانه ها در منطقه HAZ فلز پایه می‌تواند نرخ کار سختی را کم نموده و روند افزایش استحکام در این منطقه را با مشکل مواجه کند. این روند شکست نمونه ها در منطقه فلز پایه 304L را توجیه می‌کند.

بررسی آزمایش کشش نمونه‌های جوشکاری شده نشان داد که فلز جوش موجود در قسمت میانی نمونه، طی آزمایش کشش دچار ازدیاد طول شده است. با توجه به آن‌که نمونه ها از سلامت کاملی قبل از جوشکاری برخوردار بوده اند و بیشینه تنش اعمالی در قسمت میانی اعمال می‌شود لذا، ازدیاد طول فلز جوش رخ داده است.

هم‌چنین، با توجه به استحکام کششی بالاتر فلز جوش خالص 25104L و 309LMo در مقایسه با فلزات پایه، نمونه‌های جوشکاری شده استحکام کشش بالاتری را نشان می‌دهند و پس از آن‌که میزان تنش اعمالی به حد بالاتری در مقایسه با استحکام کشش فلز پایه 304L رسید، منطقه مجاور جوش در سمت این فلز پایه تسلیم شده و شکست در آن رخ می‌دهد. بنابراین، میزان استحکام کشش نمونه های جوشکاری شده در مقایسه با فلز پایه 304L بالاتر است.

آزمایش ضربه و شکست نگاری فلزات جوش

نتایج آزمایش ضربه چارپی برای فلزات جوش مورد بحث در این پژوهش در دمای 27 درجه سانتیگراد در جدول 7 ارائه شده است. مقادیر انرژی شکست برای فلزات جوش نشان می‌دهد که شکست نرم برای تمامی آن ها رخ داده است و در بین فلزات جوش، فلز پرکننده 25104L به دلیل وجود فریت بیش‌تر و اندازه دانه کم‌تر، دارای بیش‌ترین انرژی شکست ضربه بوده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطوح شکست فلزات جوش ER25104L و ER309LMo به ترتیب در شکل‌های 15 و 11 ارائه شده است. تصاویر سطح شکست برای هر دو فلز جوش مشخصه‌های یک شکست نرم را ارائه می‌کند. حضور حفرات و دیپل‌های درشت در سطح شکست نمونه 25104L، نشان دهنده شکست کاملاً نرم این فاز است. تنها تفاوت نمونه ها در آزمایش ضربه، اختلاف در میزان انرژی شکست آنها می‌باشد، همان‌گونه که ملاحظه شد، انرژی شکست فلز جوش ER25104L، بیش‌تر از فلز جوش ER309LMo می‌باشد [22].

پروفیل سختی

پروفیل سختی معیاری مناسب از ریزساختار تشکیل شده در مناطق گوناگون محل اتصال است. شکل 12 پروفیل سختی مقطع جوش مربوط به نمونه جوش شده با فلز پرکننده 25104L و شکل 13 سختی مقطع جوش با استفاده از فلز پرکننده 309LMo را نشان می‌دهد. به طور کلی یک روند صعودی از سمت فلز پایه 304L به سمت فلز پایه 32750 برقرار است. بررسی ها نشان داده

منطقه می‌باشد که همین امر موجب سختی بالاتر آن می‌شود.

با توجه به مطالب ارائه شده، می‌توان گفت که استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از فلز پرکننده 25104L برای اتصال بین فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 و فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L ویژگی‌های بهینه‌ای را ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

1) بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که ریزساختار ناشی از فلز پرکننده 25104L آستنیتی - فریتی به همراه رسوب‌گذاری آستنیت ثانویه است و ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 309LMo به صورت فریت اولیه همراه با آستنیت است و ساختار با ریخت‌شناسی اسکلتی بدست می‌آید.

2) برای فلز جوش 25104L ساختاری با 39 درصد فریت و برای فلز پرکننده 309LMo، 15 درصد فریت با استفاده از فریت‌سنجی بدست آمد که بر اساس پیش‌بینی‌های نمودار WRC-1992 بود.

3) در آزمایش کشش، تمامی نمونه‌ها، از منطقه HAZ فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L شکسته شدند.

از بین دو فلز پرکننده بکاررفته در این پژوهش، فلز پرکننده 25104L دارای بیش‌ترین استحکام کششی بود.

4) نتایج شکست نگاری نمونه‌های آزمایش ضربه، شکست نرم را برای هر دو فلز پرکننده نشان داد و فلز پرکننده ER25104L در دمای آزمایش 27 درجه سانتیگراد دارای بیش‌ترین انرژی شکست ضربه بود.

5) بیش‌ترین مقادیر سختی مربوط به فلز پرکننده 25104L و کم‌ترین مقادیر سختی مربوط به فلز پرکننده 309LMo می‌باشد.

6) از دیدگاه خواص مکانیکی، جهت اتصال نامشابه فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 و فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L، فلز پرکننده 25104L بالاترین خواص مکانیکی را بوجود می‌آورد.

است که ساختارهای دوفازی سختی بالاتری نسبت به ساختارهای آستنیتی دارند. از سوی دیگر، در آن طرف اتصال با گذر از فلز پایه سوپر دوفازی 32750 و در منطقه تحت تأثیر حرارت یک افزایش موضعی سختی مشاهده می‌شود که علت این افزایش سختی در مقایسه با مناطق مجاور خود، مقدار تنش پس‌ماند بیش‌تر در این منطقه است. همان‌گونه که در شکل 12 مشخص است، میانگین سختی فلز جوش در حد فاصل خط مرکزی جوش تا فلز پایه 304L پایین‌تر از میانگین سختی در حدفاصل خط مرکزی تا فلز پایه 32750 است.

با توجه به آن که هدایت حرارتی فلز پایه دوفازی بیش‌تر از فلز پایه آستنیتی است [7]. انتقال حرارت از سمت فلز پایه 32750 بیش‌تر است. بنابراین، می‌توان گفت نرخ سرد شدن منطقه جوش در نواحی نزدیک به فلز پایه 32750 بیش‌تر از نواحی مجاور فلز پایه 304L است. نرخ سرد شدن بیش‌تر موجب می‌شود تا تنش پس‌ماند فلز جوش نزدیک به فلز پایه 32750 بیش‌تر باشد. تنش پس‌ماند بیش‌تر موجب افزایش سختی در این منطقه می‌گردد. در حالی که در نواحی نزدیک به فلز پایه 304L به علت نرخ سرد شدن کم‌تر و در نتیجه، درشت شدن دانه‌ها روند کاهش سختی مشاهده می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت به احتمال زیاد، تفاوت کمی که در سختی مشاهده می‌شود، به دلیل متفاوت بودن هدایت حرارتی دو فلز پایه است. از سوی دیگر، برای فلز جوش 309LMo با توجه به شکل 13 نیز یک روند صعودی افزایش سختی از سمت فلز پایه 304L به سمت فلز پایه 32750 برقرار است. با عبور از فلز جوش 309LMo و رسیدن به منطقه متأثر از حرارت 304L یک روند کاهش سختی مشاهده می‌شود. علت این کاهش سختی در منطقه متأثر از حرارت می‌تواند نرخ سرد شدن کمتر و در نتیجه درشت شدن دانه‌ها باشد. در آن طرف اتصال باگذر از فلز جوش 309LMo و رسیدن به منطقه متأثر از حرارت سوپر دوفازی 32750 یک افزایش موضعی سختی مشاهده می‌شود که علت این افزایش سختی در مقایسه با مناطق مجاور خود، مقدار تنش پس‌ماند بیش‌تر در این

References

- 1- J.C. Lippold and D. Koteki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.
- 2- A.C. Lioyd, J.J. Noei, S. McIntyre, D.W. Shoosmith, "Cr, Mo and W Alloying Additions in Ni and Their Effect on Passivity", *Electrochimica Acta*, Vol.49, pp.3015-3027, 2004.
- 3- F. Eghbali, M.H. Moayed, A. Davoodi, and N. Ebrahimi, "Critical Pitting Temperature (CPT) Assessment of 2205 Duplex Stainless Steel in 0.1 M NaCl at Various Molybdate Concentration", *Corrosion Science*, Vol.53, pp.513-522, 2011.
- 4- C. Pettersson, and S. Fager, "Welding Practice for the Sandvik Duplex Stainless Steel SAF2304, SAF 2205 and SAF 2507", *Sandvik Steel*, S-811 81, pp.1-14, 1994.
- 5- B. Mendoza, z. Maldonado, H. Albitar and P. Robles, "Dissimilar Welding of Superduplex Stainless steel / HSLA Steel for Offshore Application Joined by GTAW", *Scientific Research*, Vol. 2, pp. 520-528, 2010.
- 6- Y.S. Sato, T.W. Nelson, C.J. Sterling, and R.J. Pettersson, "C.-O., Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded SAF 2507 Super Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, 397, pp. 376-384, 2005.
- 7- j. Labanowski, "Mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar stainless steel welds", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 28, pp.27-33, 2007.
- 8- D.M. Escriba, E. Materna-Morris, R.L. Plaut, and A.F. Padilha, "Chi-phase Precipitation in a Duplex Stainless Steel", *Materials Characterization*, Vol.60, pp.1214-1219, 2009.
- 9- ASME Sec IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure, Article II, Welding Procedure Qualification, 2001.
- 10- J. Nowacki and A. Łukojc, "Structure and Properties of the Heat Affected Zone of Duplex Steels Welded Joints", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp.1074-1081, 2005.
- 11- ASM Handbook, Vol.1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002.
- 12- J.O. Nilsson, P. Jonsson and A. Wilson, "Formation of Secondary Austenite in Super Duplex Stainless Steel Metal and its Dependence on Chemical Composition", Paper 39 in Duplex Stainless Steel 94, 1994.
- 13- A.M. Nascimento, M.C.F. A.Y. Ierardi, Kina, and S.S.M. Tavares, "Pitting Corrosion Resistance of Cast Duplex Stainless Steel in 3.5% NaCl Solution", *Material Characterization*, Vol.59, pp.1736-1740, 2009.
- 14- A.L. Schaeffler, "Selection of Austenitic Electrodes for Welding Dissimilar Metals", *Welding Journal*, pp.601-620, 1947.
- 15- J.C. Lippold, and W.F. Savage, "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments, The effect of Alloy Composition on Ferrite Morphology", *Welding Journal*, pp.48-58, 1980.
- 16- M. Yousefieh, M. Shamanian, and A. Saatchi, "Influence of Heat Input in Pulsed Current GTAW Process on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol.18, Pages 65-69, 2011.
- 17- S. kou, and Y. Le, "The Effect of Quenching on The Solidification Structure and Transformation Behavior of Stainless Steel Welds", *Metallurgical and materials Transactions*, 13A, pp. 1141-1152, 1982.
- 18- D. Zou, Y. Han, W. Zhang, and G. Fan, "Phase Transformation and Its Effects on Mechanical Properties and Pitting Corrosion Resistance of 2205 duplex Stainless Steel", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol.17, pp.67-72, 2010.
- 19- SH. Wang, Q. Ma, and Y. Li, "Characterization of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Welded Joint Between 2205 Duplex Stainless Steel and 16MnR", *Materials and Design*, pp.831-837, 2011.
- 20- T. Ogawa and E. Tsunetomi, "Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steels", *Welding Journal*, pp.82-93, 1982.
- 21- H. Shah Hosseini, M. Shamanian, and A. Kermanpur, "Characterization of Microstructures and Mechanical Properties of Inconel 617/310 Stainless Steel Dissimilar Welds", *Materials Characterization*, 62, pp. 425-431, 2011.
- 22- I. Hajiannia, M. Shamanian, and M. Kasiri, "The Evaluation of Microstructure and Impact Toughness of AISI 347 Stainless Steel to ASTM A335 Low Alloy Steel of Dissimilar

Welds", Journal of New Materials, 3, pp. 1-13, 2012.

پیوست‌ها

جدول 8- ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده مورد استفاده (درصد وزنی).

عنصر	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	S	Fe
AISI304L	5/53	19/1	15/8	-	2	5/75	-	5/58	5/26	بقیه
UNS32750	5/525	25/89	6/54	3/78	1/2	1	5/25	5/535	5/515	بقیه
309LMo	5/53	22	15	2/7	1/6	5/45	-	5/53	5/52	بقیه
25014L	5/52	25	15	4	5/4	5/3	5/25	5/52	5/515	بقیه

جدول 2- مشخصات جوشکاری نمونه‌ها.

پارامترهای جوشکاری					
فلز پرکننده	شماره پاس	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت جوشکاری (mms^{-1})	گرمای ورودی (kJmm^{-1})
ER309LMo	1	115	12	5/96	5/96
	2	95	11	5/84	5/825
	3	85	15	5/72	5/826
ER25104L	1	115	12	1	5/924
	2	155	11/3	5/85	5/93
	3	85	9/5	5/74	5/718

جدول 8- مقادیر محاسبه شده کروم معادل و نیکل معادل فلزات پایه و پرکننده.

نوع ماده	کروم معادل	نیکل معادل	$\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$
UNS 32750	29/67	12/41	2/39
AISI 304L	19/1	11/85	1/61
ER25104L	29	15/7	1/84
ER309LMo	24/7	16	1/54

جدول 4- تغییرات درصد آستنیت فلز جوش با دستگاه فریتسکوپ.

فلز پرکننده	درصد آستنیت	درصد خطا
ER25104L	61	1/5
ER309LMo	95	.5

جدول 8- نتایج حاصل از آزمایش خمش فلزات جوش.

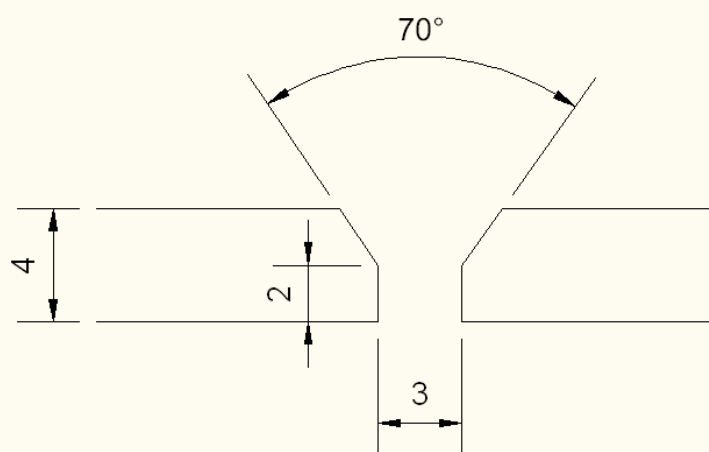
نتیجه	زاویه سنبه	جهت خمش
نمونه با فلز پرکننده ER309LMo	185°	ریشه
قبول	185°	رویه
نمونه با فلز پرکننده ER25104L	185°	ریشه
قبول	185°	رویه

جدول 6- نتایج حاصل از آزمایش کشش.

محل شکست	درصد افزایش طول (%)	استحکام کشش (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	نوع
HAZ 304L	17	914 ± 15	758 ± 15	فلز جوش 25104L
HAZ 304L	18	883 ± 15	755 ± 15	فلز جوش 309LMo
HAZ 304L	15	785	555	فلز پایه 32750
HAZ 304L	45	555	195	فلز پایه 304L

جدول 7- میانگین نتایج حاصل از آزمایش ضربه برای فلزات جوش.

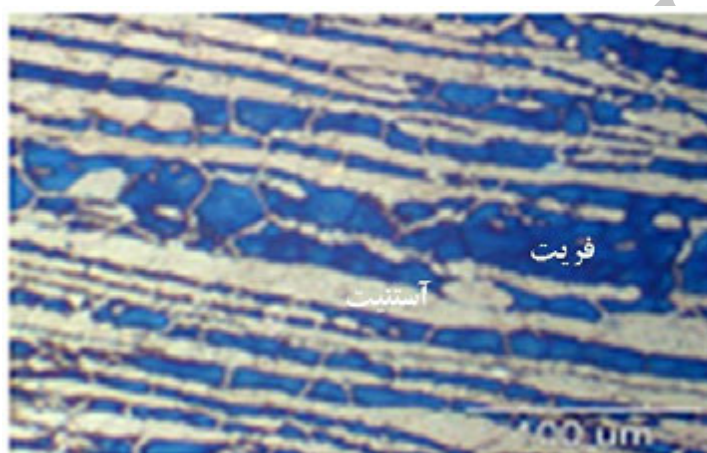
نوع شکست	انرژی ضربه (ژول) +27 °C	فلز پرکننده
نرم	175	ER25104L
نرم	95	ER309LMo



شکل 8- طرح اتصال لوله ها.



شکل 2- ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L.



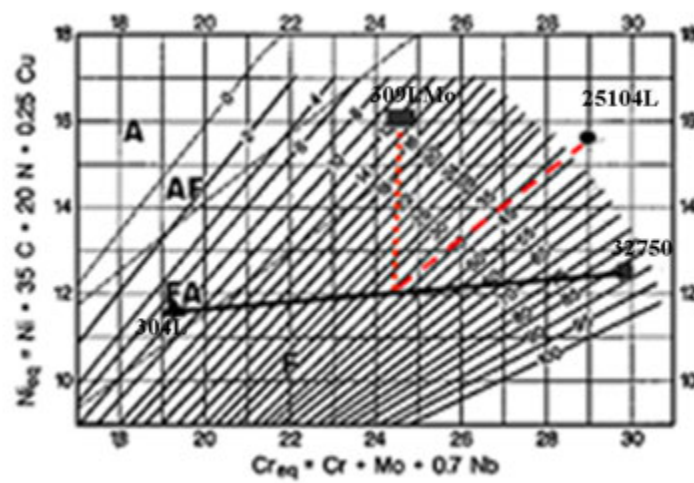
شکل 8- ریزساختار فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750.



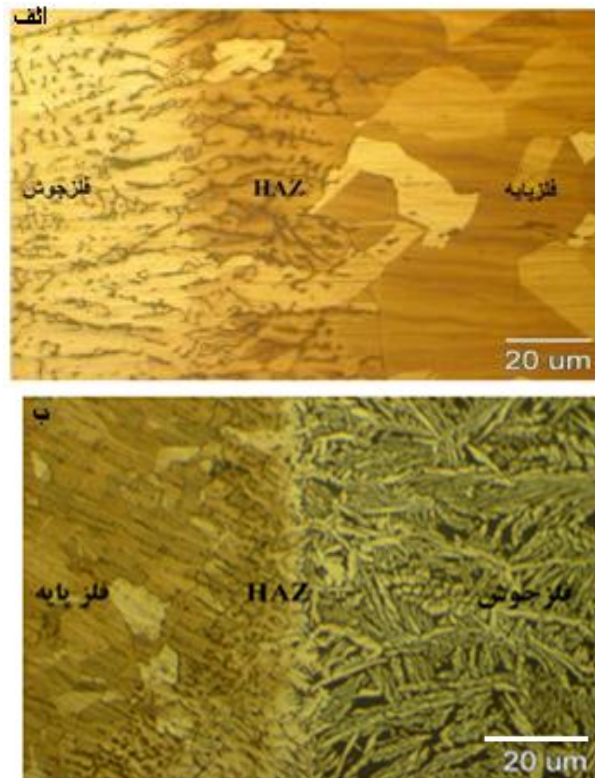
شکل 4- ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش 309LMo مربوط به پاس نخست.



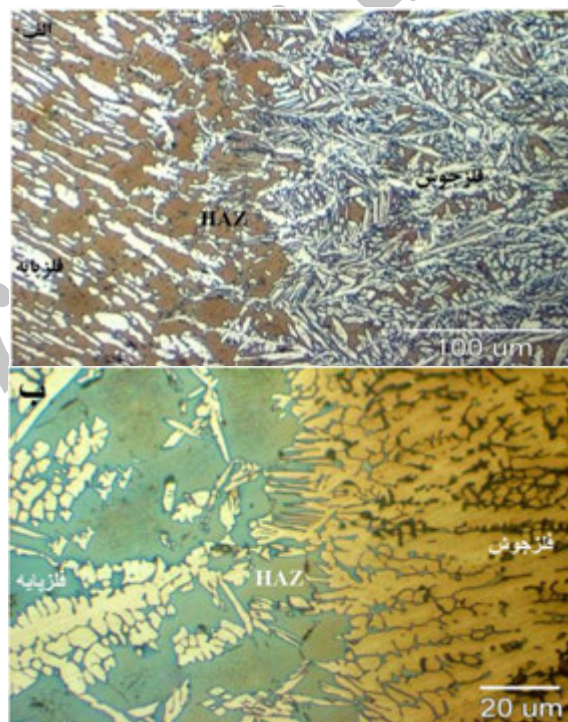
شکل 8- ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش 25104L مربوط به پاس نخست.



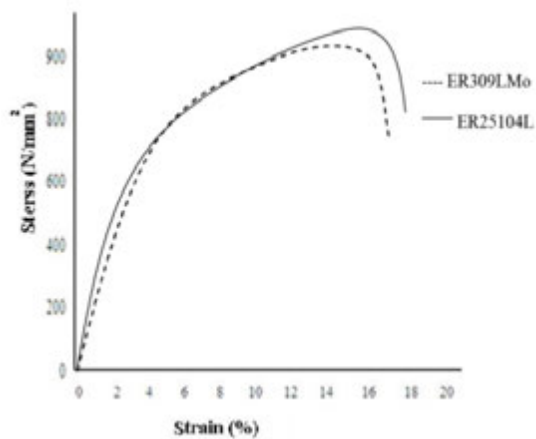
شکل 6- نمودار WRC-1992 برای فولادهای زنگ نزن دوقازی [8].



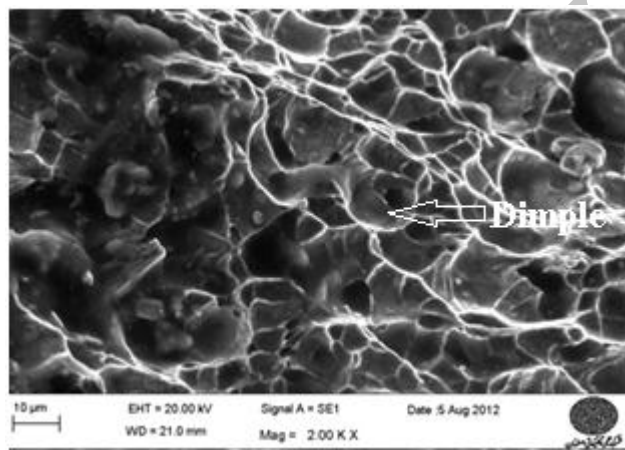
شکل 7- (الف) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی 304L و فلز جوش 309LMo مربوط به پاس نخست. (ب) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی 304L و فلز جوش 25104L مربوط به پاس نخست.



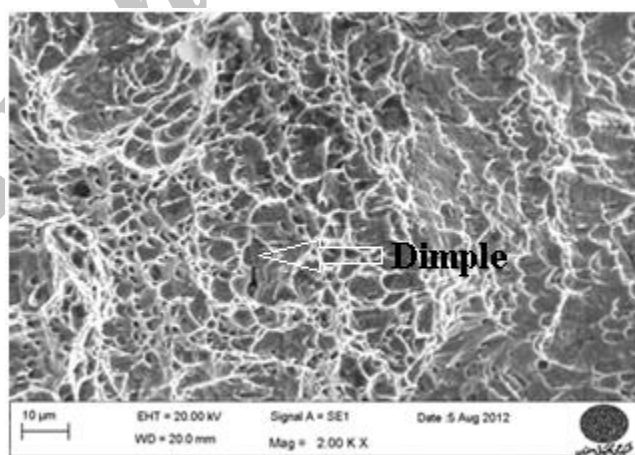
شکل 8- (الف) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی 32750 و فلز جوش 25104L مربوط به پاس نخست. (ب) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی 32750 و فلز جوش 309LMo مربوط به پاس نخست.



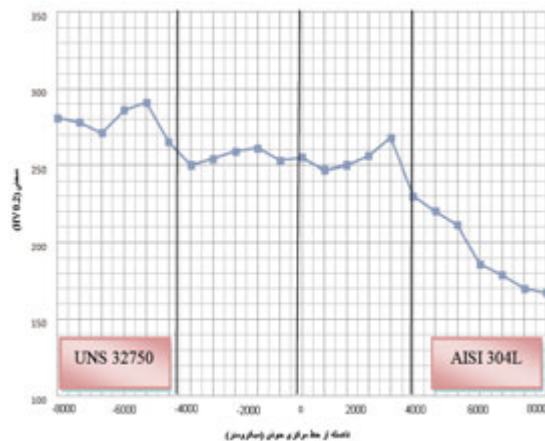
شکل 9- نمودار تنش بر حسب کرنش مربوط به اتصالات.



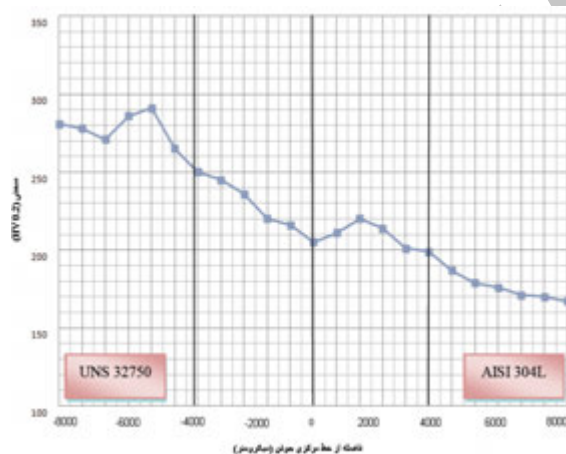
شکل 81 - شکست نگاری فلز جوش ER25104L با بزرگنمایی 2111 برابر.



شکل 88 - شکست نگاری فلز جوش ER309LMo با بزرگنمایی 2111 برابر.



شکل 82- پروفیل سختی مقطع جوش نامشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L به فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 با استفاده از فلز پرکننده 25104L.



شکل 88- پروفیل سختی مقطع جوش نامشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L به فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 با استفاده از فلز پرکننده 309LMo.