ارزیابی ریزساختار جوش‌های غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L

مهدی رحمانی*[1]، مرتضی شمعانیان[2]، مسعود کثیری [3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

*Rahmani_mhd@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۰۷)

چکیده

دراین پژوهش، بررسی ریزساختار جوش‌های غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از روش جوشکاری قوس تنگستن تحت گاز محافظ با قطبیت منفی و دو نوع فلز پرکننده ER25104L و ER309LMo استفاده شد. پس از جوشکاری، ریزساختار مناطق مختلف هر اتصال شامل فلزات جوش، مناطق متأثر از حرارت و فصل مشترک‌ها به‌وسیله میکروسکوپ نوری بررسی شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد در فلز جوش ER25104L، ریزساختار به صورت دندریت‌های آستنیت و زمینه فریت همراه با رسوبات آستنیت ثانویه بود. انجماد فلز جوش ER309LMo، به صورت فریت اولیه همراه با مقداری آستنیت و با مورفولوژی فریت اسکلتی شکل صورت گرفت. در فصل مشترک فلزات پرکننده با فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L رشد رونشستی و در فصل مشترک فلزات پرکننده با فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 میزان فریت بالایی مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی:

جوش‌های غیرمشابه، فولاد زنگ نزن آستنیتی، فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی، ریزساختار

۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی 304L به عنوان بزرگ‌ترین و پرمصرف‌ترین گروه فولادهای زنگ نزن محسوب می‌شوند که به‌طور گسترده در کاربردهایی که نیاز به مقاومت خوردگی خوب در اتمسفر و یا دمای بالا باشد به کار گرفته می‌شوند. این فولاد در صنایع مختلف نظیر نفت و گاز، پالایشگاه، پتروشیمی و نیروگاه‌های تولید برق کاربرد فراوان دارد [۱]. فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L به‌دلیل داشتن مقادیر بالایی از عناصر آلیاژی همچون کروم و نیکل و مقادیر جزئی کربن در ترکیب شیمیایی در کاربردهایی که حمله بین دانه‌ای و ترک خوردن خوردگی تنشی[1] مورد توجه است، بکار می‌روند. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا به خاطر میزان بالای کروم در این فولاد می‌باشد. وجود نیکل که عنصری آستنیت‌زا می‌باشد، باعث بالا رفتن

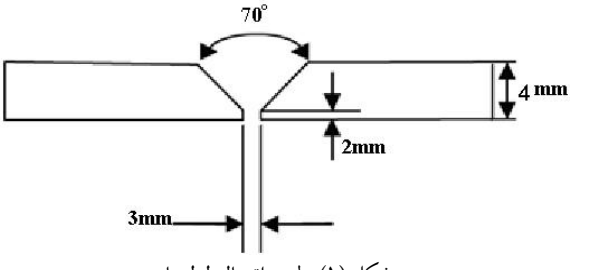
خواص مقاوم به حرارت این آلیاژ می‌شود [۲]. با وجود مقاومت به خوردگی خوب فولادهای زنگ نزن آستنیتی، در محیط‌های بسیار خورنده حاوی غلظت‌های بالای یون کلر، این فولادها مقاوم نبوده و در برابر خوردگی حفره‌ای[۲] و ترک خوردن خوردگی تنشی آسیب‌پذیر هستند. زیرا این فولادها در محدوده ۸ تا ۱۲ درصد وزنی نیکل، کم‌ترین مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی را از خود نشان می‌دهند و با افزایش و یا کاهش میزان نیکل، مقاومت در خارج از این محدوده افزایش می‌یابد [۲]. 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 هم‌چنین ریزساختار فریتی و آستنیتی تقریباً یکسان از استحکام و مقاومت به خوردگی خوبی در ارتباط با خوردگی حفره‌ای و تنشی در محیط‌های سولفیدی و کلریدی برخوردار می‌باشند [۳]. بنابراین فولادهای زنگ نزن دوفازی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی باشند. فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 یک فولاد زنگ نزن دوفازی پرآلیاژ جدید بوده که وجود مقادیر قابل توجهی از عناصری چون کروم، نیکل، مولیبدن و نیتروژن در ترکیب آن خواص ممتاز و بی نظیری را به آن بخشیده است. مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی، حفره‌ای و شیاری[۳] در محیط‌های خورنده به همراه استحکام کششی و خواص سایشی عالی باعث کاربرد وسیع این فولاد برای لوله‌های نفت و گاز در ساحل دریا یا درون دریا، مبدل‌های حرارتی، مخازن تحت فشار، صنایع نفت و پتروشیمی شده است [۴]. امروزه کاربرد اجتناب ناپذیر اتصالات غیرمشابه به دلیل ملاحظات اقتصادی و دست یابی به خواص مکانیکی مطلوب و افزایش مقاومت به خوردگی برای بسیاری از آلیاژها گسترش یافته است، از جمله این اتصالات غیرمشابه می‌توان به اتصال فولادهای زنگ نزن به یکدیگر و به انواع فولادهای کربنی اشاره نمود، در همین راستا گروهی از محققین، تحقیقات خود را برروی جوشکاری غیرمشابه این آلیاژها متمرکز ساخته‌اند، از جمله مندوزا[۴] و همکارانش [۵] به بررسی ریزساختار فلز جوش، فصل مشترک‌های اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 به فولادهای کربنی و هم‌چنین تعیین فلز پرکننده مناسب برای اتصال پرداخته‌اند. این محققین گزارش کرده‌اند که استفاده از فلز پرکننده 25104L به علت دارا بودن نیکل بالاتر و نقش آستنیت‌زایی آن جهت به‌دست آوردن نسبت مناسب ریزساختار فریت و آستنیت موثر است. در سال‌های اخیر نیز لابونسکی[۵] [۶]، به بررسی خواص مکانیکی و حساسیت به ترک خوردن خوردگی تنشی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L به فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 پرداخته است. این محقق گزارش کرده است که در این اتصال غیرمشابه، ضعیف‌ترین مکان در ارتباط با ترک خوردن خوردگی تنشی، منطقه متاثر از حرارت[۶] فولاد زنگ نزن دوفازی است. هم‌چنین اسکریبا[۷] و همکاران [۷]، تحقیقات خود را در زمینه تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی اتصالات سوپردوفازی به یکدیگر متمرکز کرده‌اند، نتایج تحقیقات 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. همان‌طور که اشاره شد با توجه به اینکه اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و سوپر دوفازی 32750، در صنایع نفت و گاز و به خصوص در مبدل‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است، لذا در این تحقیق به ارزیابی ریزساختار فلز جوش و فصل مشترک‌های اتصال وتعیین فلز پرکننده مناسب پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و طرح اتصال

در این پژوهش، از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L و فولاد زنگ نزن سوپر دو فازی UNS 32750 به عنوان فلزات پایه به صورت کار شده استفاده شد. بدین منظور لوله‌هایی با اندازه قطر داخلی ۸۰ میلی‌متر(۳ اینچ) و طول ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر(۰/۱۵ اینچ) تهیه شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و

فلزات پرکننده در جدول (۱) ارائه شده است. ترکیب شیمیایی فلزات پایه براساس نتایج کوانتومتری و ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده ترکیب اسمی گزارش شده توسط سازنده است. انتخاب فلزات پرکننده علاوه بر ترکیب شیمیایی براساس پارامترهای دیگری مانند خواص مکانیکی حاصله، ضریب انبساط حرارتی، مقاومت به خوردگی، قابلیت دردسترس بودن و هزینه‌ها انجام شد. بر همین اساس جهت اتصال فلزات پایه از دو فلز پرکننده سیم جوش ER 309LMo و سیم جوش ER 25104L بر طبق استاندارد AWS A5.9 [۸]، و ASME SEC.II, Part C [۹]، با قطر ۲/۴ میلی‌متر بهره برده شد. لوله‌ها جهت اتصال لب به لب با شیار V شکل آماده سازی شدند. شماتیک طرح اتصال و مشخصات ابعادی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح اتصال لوله‌ها.

۲-۲- جوشکاری نمونه‌ها

جوشکاری نمونه‌ها به صورت دستی با استفاده از روش جوشکاری قوس تنگستن تحت گاز محافظ (GTAW-DCEN) با استفاده از دستگاه جوش گام الکتریک مدل Pars-EL 631 و در وضعیت 5G و در سه پاس به‌طوریکه یک پاس نفوذی و دو پاس پرکننده بود، انجام شد. جوشکاری طبق استاندارد ASME SEC.IX [۱۰]، و با توجه به ضخامت لوله بدون پیش گرم کردن و بیشینه دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به منظور 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. گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز محافظ استفاده شد. به منظور 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 شد [۱۰].

$$H.I=\frac{\eta.I.V}{S} \quad (۱)$$ حرارت ورودی

در این رابطه I شدت جریان، V ولتاژ و S سرعت جوشکاری است. η بازده قوس در این رابطه ۷/. در نظر گرفته شده است [۴]. جدول (۲) مشخصات جوشکاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده براساس درصد وزنی [۵].

عناصر	فلزات پایه		فلزات پرکننده	
	۳۲۷۵۰	۳۰۴L	۲۵۱۰۴L	۳۰۹ LMo
C	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳
Cr	۲۵/۸۹	۱۹/۱	۲۵	۲۲
Ni	۶/۵۴	۱۰/۸	۱۰	۱۵
Mo	۳/۷۸	–	۴	۲/۷
Mn	۱/۲	۲	۰/۴	۱/۶
Si	۱	۰/۷۵	۰/۳	۰/۴۵
N	۰/۲۵	–	۰/۲۵	–
Pb	۰/۰۳۵	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۳
S	۰/۰۱۵	۰/۲۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲
Fe	پایه	پایه	پایه	پایه

جدول (۲): مشخصات جوشکاری قوس تنگستن تحت گاز محافظ

فلزپرکننده	شماره پاس	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (kJ/mm)
۲۵۱۰۴L	۱	۱۱۰	۱۲	۱	۰/۹۲۴
	۲	۱۰۰	۱۱/۳	۰/۸۵	۰/۹۳
	۳	۸۰	۹/۵	۰/۷۴	۰/۷۱۸
۳۰۹LMo	۱	۱۱۰	۱۲	۰/۹۶	۰/۹۶
	۲	۹۰	۱۱	۰/۸۴	۰/۸۲۵
	۳	۸۵	۱۰	۰/۷۲	۰/۸۲۶

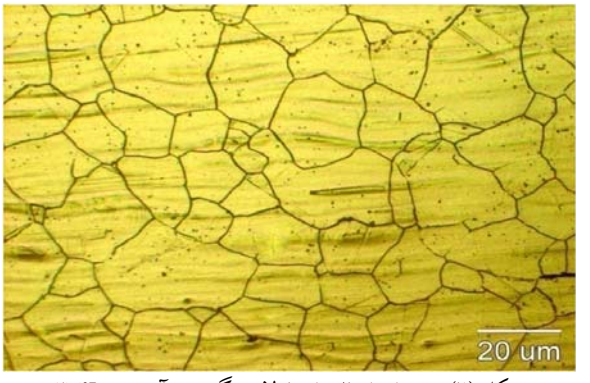
۲-۳- بررسی‌های ریزساختاری

به منظور مطالعه و بررسی ریزساختار مناطق آلیاژهای پایه، فلز جوش، منطقه تحت تأثیر حرارت و هم‌چنین تحولات ریزساختاری، از متالوگرافی استفاده شد. بدین منظور از هر اتصال دو نمونه با ابعاد مناسب تهیه شد. سطوح نمونه‌ها توسط سنباده‌های کاربید سیلیسیوم ۱۰۰ تا ۲۴۰۰ سنباده زنی و با استفاده از پودر آلومینای ۳/ µm پولیش شدند. نمونه‌ها توسط محلول رنگی براهاا (۸۰ میلی لیتر آب مقطر، ۳۰ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۳/ گرم k2S2O5) به مدت ۳۰ ثانیه اچ شدند [۱۱]. پس از آماده سازی نمونه‌ها، ریز ساختار مناطق مختلف قطعات جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری Olympus مدل CK40M در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری 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 غیر مغناطیسی اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه عمدتاً برای تعیین مقدار فاز فریت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی و دوفازی طراحی شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری فلزات پایه

شکل (۲) 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. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ریزساختار، دانه‌های آستنیتی هم محور را نشان می‌دهد. در شکل (۳) 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 برابر ۳ ± ۴۷ است. این مقدار نزدیک به ۵۰ 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 توسط نرم افزارهای میکروسکوپ نوری، مقدار میانگین اندازه دانه‌های آستنیت حدود ۲۳ میکرومتر بدست آمد.



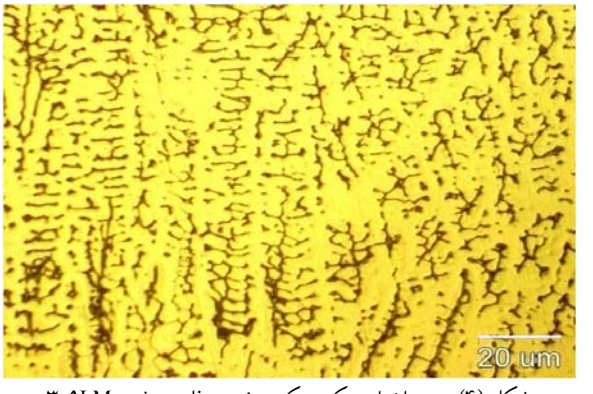
شکل (۲): ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L

شکل (۳): ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰

۳-۲ بررسی ریزساختار فلزات جوش

در شکل (۴) ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده 309LMo مربوط به پاس اول نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ساختار آستنیتی همراه با مقداری فریت دلتا به صورت اسکلتی است. انجماد در فلز جوش 309LMo از نوع FA (فریتی-آستنیتی) است. بنابراین ریزساختار حاصل، شامل فریت کرمی شکل یا اسکلتی در زمینه آستنیت می‌باشد. ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده 25104L مربوط به پاس اول در شکل (۵) 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 می‌مانند. با پائین آمدن دما، استحاله حالت جامد فریت به آستنیت شروع می‌شود. تشکیل آستنیت ثانویه بیشتر در فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت طی جوشکاری چند پاسه رایج است [۱۲]. بازگرمایش قطعه جوشکاری شده سبب می‌شود، نفوذ بیشتری صورت گیرد که می‌تواند سبب رشد بیشتر آستنیت موجود و یا جوانه زنی آستنیت جدید شود. رسوب آستنیت ثانویه می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای چقرمگی جوش‌های رسوب داده شده را بهبود بخشد. اما شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد حضور آستنیت ثانویه ممکن است مقاومت به خوردگی حفره‌ای را کاهش دهد [۱۳].



شکل (۴): ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش ۳۰۹LMo

شکل (۵): ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش ۲۵۱۰۴L

به منظور پیش بینی ساختار فلز جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی از دیاگرام‌هایی نظیر WRC-1992 استفاده می‌شود [۱۴]. این دیاگرام با شرایط جوشکاری انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. در این دیاگرام با محاسبه مقدار Cr_{eq}/Ni_{eq} می‌توان ساختار فلز جوش را پیش بینی کرد. کروم معادل[۹] و نیکل معادل[۱۰] از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$Cr_{eq}=\%Cr+\%Mo+0.7(\%Nb)$$

$$Ni_{eq}=\%Ni+35(\%C)+20(\%N)+0.25(\%Cu) \quad (۴)$$

جدول (۳) مقادیر کروم معادل و نیکل معادل محاسبه شده براساس ترکیب شیمیایی برای فلزات پایه و فلزات پرکننده را نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقادیر محاسبه شده کروم ونیکل معادل فلزات پایه و پرکننده

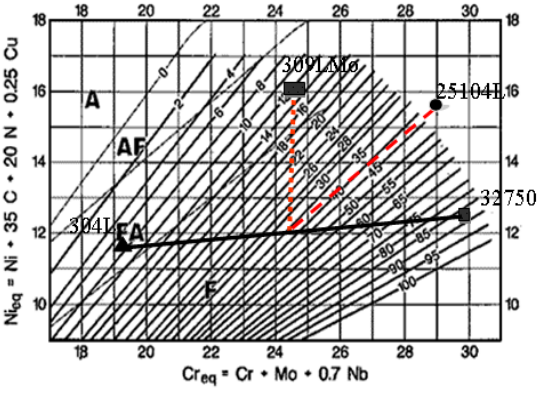
نوع ماده	کروم معادل	نیکل معادل	Cr_{eq}/Ni_{eq}
UNS 32750	۲۹/۶۷	۱۲/۴۱	۲/۳۹
AISI 304L	۱۹/۱	۱۱/۸۵	۱/۶۱
ER25104L	۲۹	۱۵/۷	۱/۸۴
ER309LMo	۲۴/۷	۱۶	۱/۵۴

در شکل (۶) نمودار WRC-1992، ترکیب شیمیایی به صورت کروم معادل و نیکل معادل برای فلز پایه آستنیتی 304L با علامت مثلث، 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 فلزجوش پاس اول، با فرض رقت فلزات پایه برابر و با فاصله از علامت دایره و مستطیل در امتداد خط چین به سمت وسط خط رابط بین دو فلز پایه نشان می‌دهد، که این نقاط حدوداً خط ایزوفریت با عدد فریت ۴۳ برای فلز پر کننده ER25104L و خط ایزوفریت با عدد فریت ۱۹ برای فلز پرکننده ER309LMo را قطع می‌کنند. ضریب تبدیل عدد فریت به درصد حجمی برای آلیاژهای دوفازی تقریباً ۷۰ درصد در نظر گرفته می‌شود [۱]. بنابراین میزان فریت فلز جوش به ترتیب برای فلز پرکننده 25104L و 309LMo در حدود ۳۰ درصد و ۱۳/۳درصد پیش بینی می‌شود. جدول (۴) درصد حجمی فاز آستنیت اندازه گیری شده توسط دستگاه فریتسکوپ را نشان

می‌دهد. درصد حجمی فاز فریت محاسبه شده توسط این دستگاه حدود ۳۹ درصد برای فلز پرکننده 25104L و ۱۰ درصد برای فلز پرکننده 309LMo در پاس اول می‌باشد. مطالعات نشان داده است که کنترل میزان فریت فلز جوش، برای جلوگیری از ترک خوردن انجمادی[11] در جوش‌های چند پاسه بسیار اهمیت دارد [۱۵].

جدول (۴): تغییرات درصد آستنیت فلز جوش برای دو فلز پرکننده

فلز پرکننده	فریتسکوپ	درصد خطا
ER25104L	۶۱	۱/۵
ER309LMo	۹۰	۰/۵

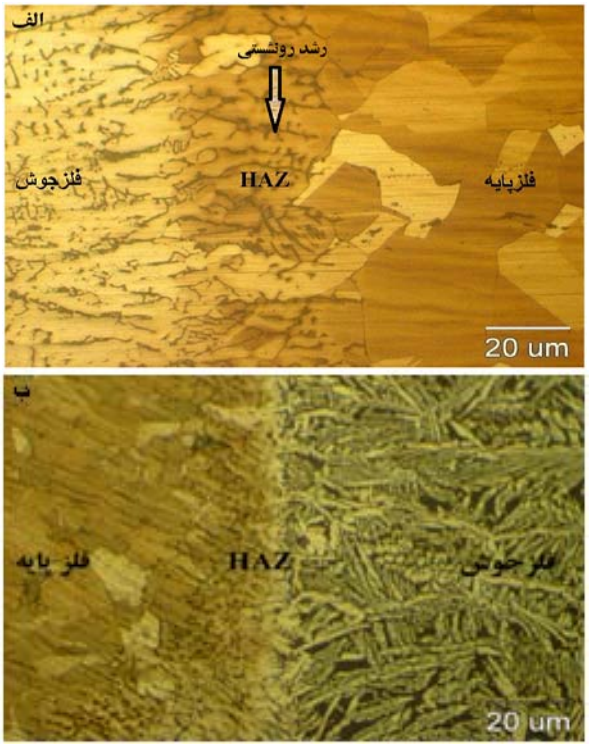


شکل (۶): نمودار WRC–۱۹۹۲ فولادهای زنگ نزن دوفازی [۱]

۳-۳- بررسی ریزساختار فصل مشترک‌ها

۳-۳-۱ بررسی ریزساختار مرز ذوب فلز پایه 304L / فلزات جوش

شکل (۷) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی 304L و فلز جوش با استفاده از فلز پرکننده 309LMo و 25104L را برای پاس اول نشان می‌دهد. یک فصل مشترک کاملاً پیوسته در سرتاسر مرز جوش همراه با رشد صفحه‌ای مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود هم آستنیت و هم فریت در خط ذوب از فلز پایه به سمت فلز جوش به صورت رونشستی[12] رشد کرده‌اند. مقداری فریت دلتا در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L مشاهده می‌شود. میزان تشکیل فریت در منطقه متاثر از حرارت معمولا کم می‌باشد زیرا استحاله آستنیت به فریت نسبتاً آهسته است و سیکل حرارتی HAZ معمولاً سریع می‌باشد. تشکیل فریت در طول مرزدانه‌های HAZ، رشد دانه را محدود خواهد کرد و همچنین احتمال ترک‌های ذوبی[13] HAZ را کاهش خواهد داد [۱۶]. میزان فریت اندازه‌گیری شده در این منطقه توسط دستگاه فریتسکوپ تقریباً ۲۰ درصد می‌باشد. هم‌چنین اندازه دانه در منطقه متاثر از حرارت برای فلز پرکننده 309LMo حدود ۳۰ میکرومتر و برای فلز پرکننده 25104L حدود ۱۵ میکرومتر بدست آمد.

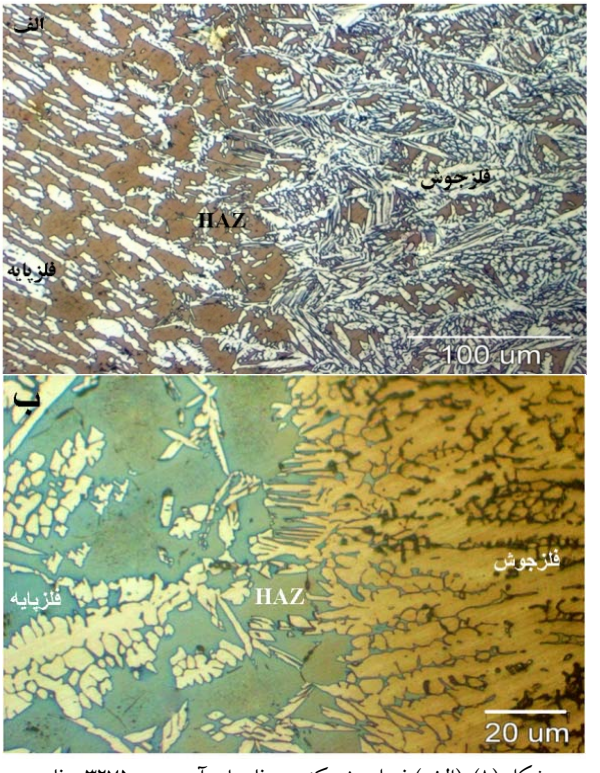


شکل (۷): (الف) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی ۳۰۴L و فلز جوش۳۰۹LMo مربوط به پاس اول.
(ب) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی ۳۰۴L و فلز جوش ۲۵۱۰۴L مربوط به پاس اول.

۳-۳-۲- بررسی ریزساختار مرز ذوب فلز پایه 32750/ فلزات جوش

شکل (۸) فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن دو فازی

32750 و فلز جوش با استفاده از فلز پر کننده 25104L و 309LMo با رشد صفحه‌ای برای پاس اول را نشان می‌دهد. با دقت در اشکال به وضوح مشخص است، که جوش‌ها و مناطق تحت تأثیر حرارت از دماهای نزدیک به خط انحلال فریت سریعاً سرد می‌شوند، بنابراین تمایل به فریت بیشتری در فلز جوش و منطقه تحت تأثیر حرارت فولاد زنگ نزن دو فازی نسبت به فلز پایه وجود دارد. درنتیجه میزان فریت در منطقه متاثر از حرارت با استفاده از فلز پرکننده 25104L بیشتر است، این میزان فریت حدود ۷۳ درصدتوسط دستگاه فریتسکوپ اندازه‌گیری شده است. به دلیل نرخ بالای سرد شدن ناشی از جوشکاری، ریزساختار منطقه متأثر از حرارت در جوش‌های فولاد زنگ نزن دوفازی دارای نسبت غیر تعادلی از فریت و آستنیت است. از آن‌جایی که حداکثر دما در منطقه متاثر 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 می‌گردد [۱۷-۱۸]. مقدار آستنیت بیشتر در منطقه متاثر 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 دمای خط انحلال فریت بالاتر به آستنیت اجازه می‌دهد در دمای بالاتر تشکیل شود، در نتیجه میزان آستنیت بیشتر خواهد شد. بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که ریزساختار حاصل شامل ۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستنیت باشد و فاصله گرفتن از این مقدار باعث از بین رفتن تعادل و تخریب خواص مکانیکی خواهد شد [۱۸]. اندازه دانه در HAZ و فلز جوش هر دو به عنوان تابعی از حرارت ورودی افزایش می‌یابند. تحقیقات، محققانی همچون وانگ[۱۴] و یوسفیه[۱۵] [۱۶-۱۹] نشان داده است که حرارت ورودی نقش بسزایی در تغییرات ریزساختاری منطقه جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی دارد. فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی بر حسب ضخامت و هندسه اتصال باید با حرارت ورودی بین ۰/۵تا ۱/۵کیلو ژول بر میلی متر جوشکاری شوند. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که مناطق متاثر از حرارت دارای دانه‌های درشت‌تری نسبت به فلزات پایه می‌باشند. به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت و پایین بودن ظرفیت حرارتی فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 نسبت به فولاد زنگ نزن 304L، منطقه متاثر از حرارت 32750 وسیع‌تر از 304L است. عرض منطقه متاثر از حرارت در سمت فولاد 32750 حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر می‌باشد. در حالی‌که عرض منطقه متاثر از حرارت در سمت فولاد 304L خیلی باریک‌تر و در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرومتر می‌باشد.



شکل (۸): (الف) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی ۳۲۷۵۰ و فلز جوش۲۵۱۰۴L مربوط به پاس اول.
(ب) فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی ۳۲۷۵۰ و فلز جوش۳۰۹LMo مربوط به پاس اول.

٤- نتیجه گیری

۱- بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که ریزساختار حاصل از فلز پرکننده 25104L،آستنیتی – فریتی به همراه رسوب گذاری

آستنیت ثانویه است و ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی 309LMo به صورت فریت اولیه همراه با آستنیت بوده و ساختار با مورفولوژی اسکلتی بدست می‌آید.

۲- برای فلز جوش 25104L ساختاری با ۳۹ درصد فریت و برای فلز پرکننده 309LMo، ۱۰ درصد فریت با استفاده از فریت سنجی بدست آمد که در تطابق با پیش بینی‌های حاصل از نمودار WRC-1992 بود.

۳- تشکیل فریت دلتا در فصل مشترک فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و فلز جوش در طول مرز دانه های HAZ، رشد دانه‌ها را محدود خواهد کرد و احتمال ترک‌های ذوبی HAZ را کاهش خواهد داد.

۴- استفاده از فلز پرکننده 25104L به علت نزدیک بودن به تعادل ریزساختار فریت و آستنیت برای اتصال بین فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 و فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L مناسب‌تر است.

۵- مراجع

[1] J.C. Lippold and D. Koteki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainles Steels", John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.

[2] A.C. Lioyd, J.J. Noei, S. Mcintyre, D.W. Shoesmith, "Cr, Mo and W Alloying Addiations in Ni and Their Effect on Passivity", Electrochimica Acta, Vol. 49, pp. 3015-3027, 2004.

[3] F. Eghbali, M.H. Moayed, A. Davoodi, N. Ebrahimi, "Critical Pitting Temprature (CPT) Assessment of 2205 Duplex Stainless Steel in 0.1 M NaCl at Various Molybdate Concentration", Corrosion Sience, Vol. 53, pp. 513-522, 2011.

[4] C. Pettersson, 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. Albiter 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] j. Labanowski, "Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Stainless Steel Welds", Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 28, pp. 27-33, 2007.

[7] D.M. Escriba, E. Materna-Morris, R.L. Plaut, A.F. Padilha, "Chi-phase Precipitation in a Duplex Stainless Steel", Materials Characterization, Vol. 60, pp. 1214–1219, 2009.

[8] ANSI/AWS A5.9/A5.9M, " Specification For Bare Stainless Steel Welding Electrodes And Rods, 2nd Printing", American Welding Society, Edistion 7th, 2007.

[9] ASME Sec II, "Specification for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals", Part C, American Society of Mechanical Engineers, Edition: 3th, 2004 .

[10] ASME Sec IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure, Article II, Welding Procedure Qualification.

[11] ASM Handbook, Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels, an 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, 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, 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, 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, pp. 65–69, 2011.

[17] S. kou, Y. Le, "The Effect of Quenching on The Solidification Structure and Transformation Behavior of Stainless Steel Welds", Metallurgical Transactions, 13A, pp. 1141-1152, 1982.

[18] D. Zou, Y. Han, W. Zhang, 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, 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.

٦- پی‌نوشت

1- Stress Corrosion Cracking
2- Pitting Corrosion
3- Crevice Corrosion
4- Mendoza
5- Labanowski
6- Heat Affected Zone
7- Escriba
8- Delta Ferrite
9- Chorumim Equalent
10- Nickel Equalent
11- Solidification Cracking
12- Epitaxial
13- Liquation Cracking
14- Wang
15- Yousefieh