

تأثیر نوع فلز پرکننده بر ریزساختار اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد کوئنچ و تمپر A۵۱۷

احمدرضا فروغی^{۱*}، مرتضی شمعیان^۲، مسعود کثیری^۳
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲، ش.ص ۱۲۵-۱۳۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲)

چکیده

در این پژوهش، به بررسی ریز ساختار در مناطق متفاوت از مقاطع جوش غیر مشابه فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S۳۲۲۰۵ به فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر ASTM A۵۱۷ با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی پرداخته شد. بدین منظور از روش جوشکاری قوسی تنگستن گاز و دو نوع فلز پرکننده ER۳۰۹LMo و ER۲۲۰۹ استفاده شد. برطبق نتایج حاصل از متالوگرافی و آنالیز فازی XRD در هیچ کدام از نمونه‌ها فازهای ترد بین فلزی مشاهده نشد. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نشان داد فلز جوش ER۳۰۹LMo آستنیتی همراه با فریت شبکه‌ای و فلز جوش نمونه ER۲۲۰۹ با ساختاری متفاوت، دارای شبکه‌های پیوسته آستنیت در زمینه فریت اولیه است. بررسی‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال سمت فولاد A۵۱۷ نشان داد، در هر دو نمونه جوشکاری شده مناطق مخلوط نشده تشکیل شده و در نمونه ER۳۰۹LMo علاوه بر این منطقه، یک لایه دی کربوره شده نیز قابل مشاهده است. منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد ۲۲۰۵ غیر عریض همراه با دانه‌های درشت فریت اولیه و در سمت فولاد A۵۱۷ عریض همراه با ریزساختار مارتزیت تمپر نشده است. نتایج پروفیل میکروسختی نشان داد که فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ۲۲۰۹ دارای سختی در حدود ۳۰۰ ویکرز و فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ۳۰۹LMo دارای سختی در حدود ۲۴۰ ویکرز بوده است.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ نزن دوفازی، فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر، جوشکاری قوسی تنگستن - گاز، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

^۱- کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

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

^۳- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: A.FOROUGHI1990@Gmail.com

بیشگفتار

امروزه در میان روش‌های مختلف اتصال فلزات به یکدیگر، روش جوشکاری و از این میان جوشکاری غیر مشابه فلزات به طور وسیعی جهت اتصال فولادهای زنگ نزن به مواد دیگر استفاده می‌شود. خواص منحصر به فرد فولادهای زنگ نزن دو فازی، موجب تنوع کاربرد این نوع فولادها در مصارف صنعتی شده است. این کاربردهای متنوع صنعتی شامل تأسیسات انرژی هسته‌ای، خطوط لوله در تأسیسات شیمیایی، خطوط لوله انتقال نفت و گاز، مخازن تحت فشار و سازه‌های مورد استفاده در محیط‌های دریایی می‌باشد. بهبود جوش پذیری فولادهای دو فازی ناشی از نقش نیتروژن به عنوان یک عنصر آلیاژی و همچنین روش‌های پیشرفته دی کربوره کردن خلاء اکسیژن بر روی سطح مذاب (VOD)^۴ و دی کربوره کردن آرگون اکسیژن (AOD)^۵ بوده است [۱]. ریزساختار آستنیتی-فریتی با نسبت تقریباً ۱ به ۱ فولادهای زنگ نزن دو فازی را نسبت به هم گروه آستنیتی خود برتر نشان می‌دهد. فاز آستنیت در فولادهای زنگ نزن دو فازی، قابلیت بهبود خواص چقرمگی و جوش پذیری و فاز فریت در این فولادها قابلیت بهبود خواص کششی (افزایش تنش تسلیم) را دارد [۲]. دست یابی به تعادل فازی مناسب و خواص بهینه در فرآیند جوشکاری فولادهای دوفازی اکثراً با شکست مواجه می‌شود و میزان فریت فلزجوش بیش‌تر از ۵۰ درصد به‌دست خواهد آمد [۳]. میزان حرارت ورودی جوشکاری و ترکیب شیمیایی فلزجوش دو عامل موثر در تنظیم این تعادل فازی می‌باشند. در نتیجه تکنولوژی جوشکاری فولادهای زنگ نزن دو فازی، یک فاکتور کلیدی برای به‌دست آوردن خواص کاربردی در این فولادها است. همچنین نوع فلزپرکننده نیز عامل دیگری برای دستیابی به این تعادل فازی است [۲]. تحقیقات انجام شده در زمینه جوشکاری فولادهای زنگ نزن دو فازی به فولادهای کم آلیاژ، بسیار اندک می‌باشد. به عنوان نمونه می‌توان به پژوهشی که وانگ و همکارانشان [۴] در زمینه

جوشکاری فولاد دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای 16MnR انجام داده‌اند، اشاره کرد. این محققین دو روش جوشکاری قوسی تنگستن گاز GTAW و جوشکاری قوسی با الکتروود دستی پوششدار SMAW با فلز پرکننده و الکتروود ۲۲۰۹ را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق نتایج این محققین ایجاد یک لایه دکربوره شده در سمت فولاد کم آلیاژ و یک ناحیه مخلوط نشده در مرز جوش قابل مشاهده است. همچنین این محققین روش GTAW را روشی برتر نسبت به روش SMAW برای جوشکاری این دو فولاد ارزیابی کردند [۴]. در پژوهشی دیگر این محققین [۵] اثر سرعت سرد شدن بر ریزساختار فلز جوش فولاد دوفازی ۲۲۰۵ به دو روش جوشکاری GTAW و PCGTAW را مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران دریافتند که بیش‌ترین سرعت سرد شدن در روش PCGTAW با نیتروژن مایع و همراه با بالاترین مقدار آستنیت می‌باشد. همچنین به‌وجود آمدن نسبت‌های نزدیک‌تر فریت و آستنیت با افزایش سرعت سرد کردن از نتایج این محققین به شمار می‌آید [۵]. در پژوهشی دیگر آقای بالاو همکاران [۶] به بررسی خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد دوفازی UNS318۰۳ به فولاد کربنی E ۲۰۶۲ IS توسط دو فلز پرکننده E ۳۰۹ و E۲۲۰۹ پرداختند. تشکیل مرز نوع دو در فصل مشترک فلز پایه کربنی در فلزجوش با الکتروود ۳۰۹ و افت میزان چقرمگی در HAZ فولاد کربنی از جمله نتایج این محققین به شمار می‌رود [۶]. همچنین در پژوهشی دیگر آقای رحمانی و همکاران [۷] ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپردوفازی UNS S۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L AISI را توسط روش GTAW و دو نوع فلز پرکننده ER۲۵۱۰۴L و ER۳۰۹LMo مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج این محققین فلز جوش حاصل از فلز پرکننده دوفازی ER۲۵۱۰۴L دارای بیش‌ترین استحکام، انعطاف پذیری و بیش‌ترین مقدار جذب انرژی ضربه در دمای ۲۷ درجه سانتیگراد است که موجب فراهم شدن خواص مکانیکی بالاتر و در نتیجه ایجاد ویژگی‌های بهینه برای این نوع از اتصال است [۷]. در سال‌های اخیر نیز صادقان و همکاران [۸] تأثیر حرارت ورودی بر

4. Vacuum Oxygen Decarburization

5. Argon Oxygen Decarburization

جوشکاری^۸ (WPS) طبق استاندارد^۹ ASME بخش نهم [۹] برای هر کدام از فلزات پرکننده تنظیم شد. در این پژوهش از حرارت ورودی تا مقدار ۱/۴۷ کیلوژول بر میلیمتر استفاده شد؛ زیرا که تمام مراجع حرارت ورودی بهینه در اتصالات فولادهای زنگ نزن دوفازی را در حدود ۰/۵ تا ۲ کیلوژول بر میلیمتر بیان کرده‌اند و نتایج حاصل از مرور مطالعاتی بهترین حالت را در حدود ۱/۵ کیلوژول بر میلیمتر بیان می‌کند. نوع جریان DCEN، دمای پیشگرم، ۲۵ درجه سانتیگراد و حداکثر دمای بین پالسی ۱۵۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شدند. حداکثر دمای بین پالسی توسط گچ حرارتی و ترموکوپل لیزری، در فاصله ۷/۵ سانتیمتری از هر سمت از اتصال جوش داده شده کنترل شد. حرارت ورودی جوشکاری در این محاسبات بر حسب Kj/mm و توسط فرمول $(Q=\eta I S)$ محاسب و ولتاژ V و ولتاژ بر $(VI/1000S)$ به دست آمده است. در این فرمول S سرعت حرکت دست جوشکار بر حسب میلیمتر بر ثانیه و η راندمان حرارتی برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است. جدول (۲) مشخصات و حرارت‌های ورودی مورد استفاده در جوشکاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

بررسی‌های ریزساختاری

به منظور مطالعه و بررسی ریزساختار مناطق آلیاژهای پایه، فلزجوش، 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 ۶۰ تا ۳۰۰۰ ساییده شدند و برای براق شدن سطح نمونه‌ها و برطرف شدن خطوط اضافی سطح از دمرحله پولیش استفاده گردید. ابتدا نمونه‌ها به وسیله خمیر الماسه با ذرات ۲۰ میکرون پولیش شده و پس از آن از خمیر الماسه با ذرات ۱ میکرون با صفحه پولیش نمدی استفاده شد. لازم به ذکر است که از اتانول به عنوان عامل روان ساز، برای تر نمودن صفحه پولیش استفاده شد.

ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد دوفازی UNS S ۳۲۷۵۰ به فولاد کم آلیاژ API X ۶۵ را مورد ارزیابی قرار دادند. این محققین حضور بیش‌تر از مقادیر فاز فریت در حرارت ورودی کم‌تر و تشکیل بیش‌تر فاز آستنیت در حرارت ورودی بالاتر را جزء نتایج تحقیقاتشان دانسته و عدم حضور فازهای مخرب بین فلزی در دو حرارت ورودی مورد استفاده را نتیجه گیری کردند [۸]. همان‌گونه که اشاره شد با توجه به اینکه اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S ۳۲۲۰۵ به فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر ASTM A۵۱۷ در مخازن تحت فشار و به خصوص صنایع دریایی از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در این تحقیق به ارزیابی ریزساختار فلز جوش و فصل مشترک‌های اتصال و تعیین فلز پرکننده مناسب پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده و طرح اتصال

در این پژوهش از فولاد زنگ نزن دو فازی UNS S ۳۲۲۰۵ و فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر ASTM A۵۱۷ به عنوان فلزات پایه و از سیم جوش‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ER۳۰۹LMo و دوفازی ER۲۲۰۹ به عنوان فلزپرکننده استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پرکننده در جدول (۱) ارائه شده است. فلزات پایه مورد استفاده به حالت ورق و با ضخامت ۶ میلیمتر بودند. با توجه به ضخامت، جنس مواد و طرح اتصال‌های پیشنهادی منابع، از طرح اتصال V یک طرفه با زاویه پخ ۶۰ درجه، درز اتصال^۶ ۲ mm و پاشنه اتصال^۷ ۱/۵mm استفاده شد. شماتیک طرح اتصال در شکل (۱) ارائه شده است.

روش جوشکاری نمونه‌ها

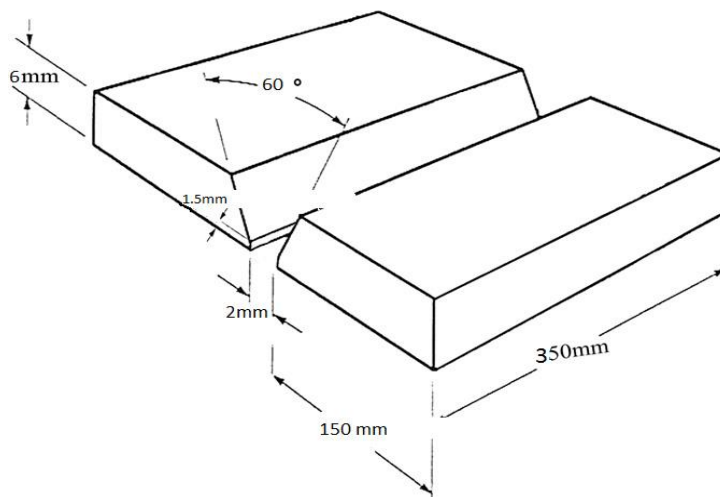
از روش جوشکاری قوسی تنگستن گاز جهت اتصال نمونه‌ها استفاده شد. به این منظور دستورالعمل

^۸-Welding Procedure Specification

^۹-American Society of Mechanical Engineers

^۶-Root Opening

^۷-Root Face



شکل ۱- طرح اتصال فولاد UNS S۳۲۲۰۵ به فولاد A۵۱۷

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پرکننده

فلزات پرکننده		فلزات پایه		عناصر
۲۲۰۹	۳۰۹LMo	A۵۱۷	۲۲۰۵	
۲۲/۶	۲۳	۰/۵۷	۲۲/۲۸	Cr
۸/۸	۱۳/۵	۰/۰۵	۵/۲۸	Ni
۳/۲	۲/۱	۰/۲۲	۳/۱۷	Mo
۱/۷	۲/۲	۰/۹۱	۱	Mn
۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷۶	V
۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۳	S
۰/۰۳۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴۱	P
۰/۴	۰/۶	۰/۳	۰/۳۷	Si
۰/۰۱۵	۰/۰۳	۰/۲	۰/۰۲۲	C
-	۰/۵	۰/۰۹	-	Cu
۰/۱۵	-	-	۰/۱۸	N
پایه	پایه	پایه	پایه	Fe

جدول ۲- مشخصات و حرارت های ورودی مورد استفاده در جوشکاری قوسی تنگستن گاز

فلز پرکننده	نوع پاس	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت دست جوشکار (mm/s)	حرارت ورودی (Kj/mm)
۳۰۹LMo	پاس ریشه	۲۱۴	۱۲	۱/۲۲	۱/۴۷
	پاس پرکن	۲۶۱	۱۲	۲/۱۱	۱/۰۴
	پاس رویه	۲۴۵	۱۲	۱/۸۰	۱/۱۴
	پاس پشتی	۲۵۰	۱۲	۱/۹۰	۱/۱۰
۲۲۰۹	پاس ریشه	۲۲۰	۱۲	۱/۲۶	۱/۴۶
	پاس پرکن	۲۴۳	۱۲	۲/۱۸	۰/۹۴
	پاس رویه	۲۱۴	۱۲	۲/۰۳	۰/۸۸
	پاس پشتی	۱۸۰	۱۲	۱/۸۰	۰/۸۴

بررسی ریزساختار فولاد کوئنچ و تمپر

تصاویر میکروسکوپ نوری به وسیله میکروسکوپ نیکن (Nikon) مدل EIPHOT 300 ساخت کشور ژاپن تهیه شد. همچنین نمونه‌های متالوگرافی شده، به منظور بررسی فازهای عمومی در بزرگنمایی بیشتر، فازهای مخرب نیتريدی و فاز سیگما به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

فریت سنجی اتصال

به منظور بررسی مقدار فریت موجود در نمونه‌های جوشکاری شده در مناطق فلزجوش و فلز پایه فریت اسکوپ Fischer مدل FMP30 ساخت کشور آلمان استفاده شد. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM A799 انجام شد.

نتایج و بحث

ریزساختار فلزهای پایه

فلز پایه‌ی فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ متشکل از دوفاز فریت و آستنیت است. این دو فاز توسط یک انجماد کاملاً فریتی و بعد از آن یک استحاله حالت جامد کنترل نفوذی در ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن دو فازی به وجود می‌آیند [۱۰]. فلز پایه فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر A۵۱۷ متشکل از فاز مارتنزیت بازپخت شده به همراه مقادیری از فاز فریت و در بعضی مواقع بینیت است، فاز مارتنزیت بازپخت شده در اثر عملیات کوئنچ و تمپر، بعد از تولید فولاد با روش‌های فولادسازی ایجاد می‌شود [۱۱].

شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های متالوگرافی شده از فلزهای پایه UNS S۳۲۲۰۵ و ASTM A۵۱۷ را نشان می‌دهد. شکل (الف) ساختار نوردی از فولاد UNS S۳۲۲۰۵ را ارائه می‌دهد. در این تصاویر زمینه فریتی با رنگ تیره مشخص شده و فاز برجسته آستنیت با رنگ روشن قابل مشاهده است [۱۲]. شکل (ب) ساختار مارتنزیتی از فولاد ASTM A۵۱۷ را ارائه می‌دهد. در این تصویر فاز مارتنزیت بازپخت شده بصورت طیفه‌های کشیده مشخص شده‌اند [۱۳]. همچنین در فلز پایه این فولاد مقادیری از فاز فریت نیز مشاهده می‌شود.

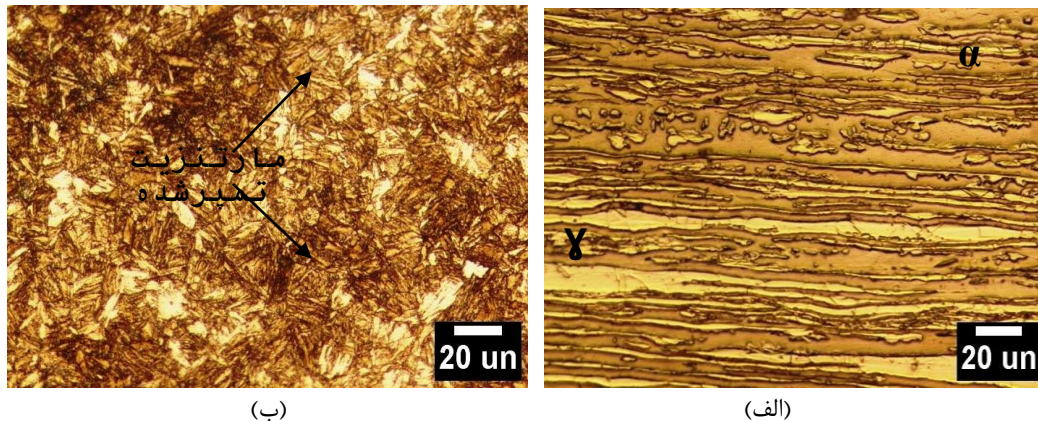
به منظور مشاهده فازهای موجود در سمت فولاد A۵۱۷ از محلول اچ نایتال ۲٪ استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری به وسیله میکروسکوپ نیکن (Nikon) مدل EIPHOT 300 ساخت کشور ژاپن تهیه شد. همچنین نمونه‌های متالوگرافی شده، به منظور بررسی فازهای عمومی موجود در مناطق متفاوت فلز جوش، فازهای غیر معمول احتمالی و تشخیص مرزهای خاص به وجود آمده مانند مرز نوع دو و مرز مارتنزیتی در سمت فولاد A۵۱۷، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

بررسی ریزساختار فولاد کوئنچ و تمپر

به منظور مشاهده فازهای موجود در سمت فولاد A۵۱۷ از محلول اچ نایتال ۲٪ استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری به وسیله میکروسکوپ نیکن (Nikon) مدل EIPHOT 300 ساخت کشور ژاپن تهیه شد. همچنین نمونه‌های متالوگرافی شده، به منظور بررسی فازهای عمومی موجود در مناطق متفاوت فلز جوش، فازهای غیر معمول احتمالی و تشخیص مرزهای خاص به وجود آمده مانند مرز نوع دو و مرز مارتنزیتی در سمت فولاد A۵۱۷، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

بررسی ریزساختار فولاد دوفازی

به منظور مشاهده فازهای عمومی موجود در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد ۲۲۰۵ از الکترواچ استفاده شد. برای این منظور از محلول اچ نایتال ۵۰٪ و با مقدار ولتاژ ۳۷ و زمان غوطه‌وری ۳ s استفاده شد. همچنین از فولاد زنگ نزن آستنیتی نوع ۳۰۴ به عنوان کاتد استفاده گردید. این نوع محلول اچ کنتراست بسیار خوبی را برای مشاهده فازهای عمومی (فریت و آستنیت) موجود در فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ایجاد می‌کند. برای بررسی بهتر در مورد نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده ER۲۲۰۹ از محلول اچ رنگی براها با ترکیب شیمیایی ۰/۷ گرم $K_2S_2O_5$ ، ۲۰ میلی لیتر HCl و ۸۰ میلی لیتر H_2O استفاده شد. این محلول اچ فاز فریت و آستنیت را به دو رنگ کاملاً متفاوت و قابل تشخیص نمایش می‌دهد.

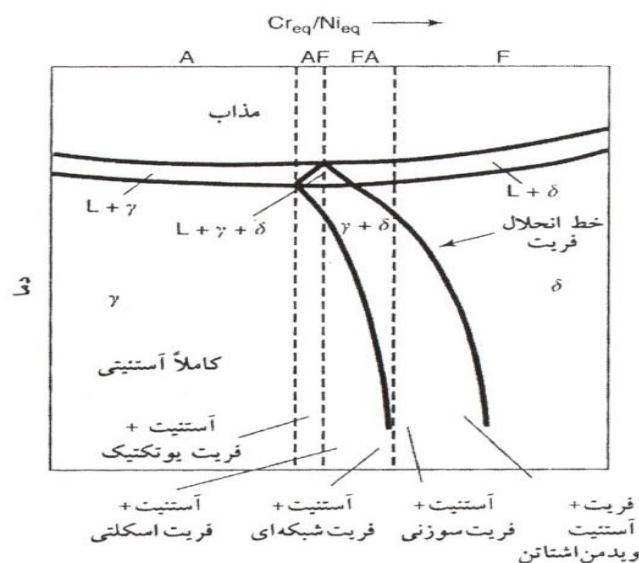


شکل ۲- ریزساختار فلزات پایه (الف) فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ (ب) فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر A۵۱۷

بررسی ریزساختار در فلزهای جوش

در این پژوهش، ریزساختار فلزجوش توسط دو فلز پرکننده آستنیتی ER۳۰۹LMo و فلز پرکننده دوفازی ER۲۲۰۹ حاصل شد. به طور کلی در فلزهای جوش حاصل از فلزهای پرکننده زنگ نزن، چهار نوع انجماد و استحاله حالت جامد امکان پذیر است. این واکنش‌ها مربوط به نمودار فازی آهن - کروم - نیکل می‌باشند که در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به مقادیر کروم معادل به نیکل معادل برای فلز پرکننده آستنیتی ER۳۰۹LMo در نمودار فازی Fe-Cr-Ni مشخص می‌شود که حالت انجماد در این فلز پرکننده، فریت آستنیت (FA) بوده است (شکل ۳).

شکل ۴ (الف و ب) ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده توسط فلز پرکننده ER۳۰۹LMo را در دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد. این تصاویر، ساختارهای حاصل از یک انجماد FA را نشان می‌دهد. انجماد FA به صورت فریت اولیه رخ می‌دهد و در پایان انجماد مقداری آستنیت شکل می‌گیرد به طوری که در انتهای انجماد فریت اولیه، یک واکنش پریکتیک - یوتکتیک آستنیت را در طول مرزهای سلولی و دندریتی فریت ایجاد می‌کند. این واکنش در طول ناحیه سه فازی مثلی نمودار فازی Fe-Cr-Ni رخ می‌دهد.



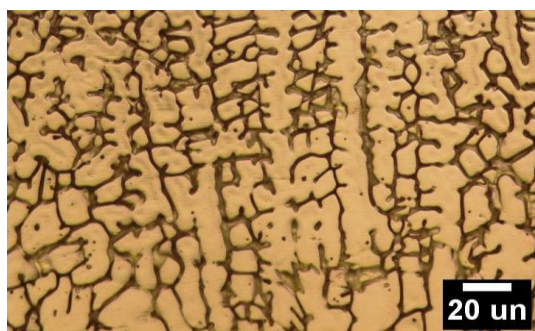
شکل ۳- ارتباط نوع انجماد با نمودار فازی شبه دوتایی

از هر کدام از فازهای فریت و آستنیت در گروه‌های استاندارد، وجود مقادیر بیش‌تر فاز آستنیت، باعث بهبود خاصیت چقرمگی در انواع فلزجوش دوفازی خواهد شد [۱۶]. به‌طور کلی انجماد در فلز جوش حاصل از فلزهای پرکننده دوفازی به‌صورت فریتی (انجماد نوع F) می‌باشد. در این حالت ریزساختار در انتهای انجماد کاملاً فریتی است. هنگامی که فلز جوش تا زیر خط انحلال فریت سرد شود، آستنیت طی یک استحاله نفوذی به‌وجود می‌آید [۱۰]. مورفولوژی حاصل از فلز پرکننده ER۲۲۰۹ یک ریزساختار با زمینه فریت و شبکه‌های پیوسته آستنیت در مرز دانه‌های فریت اولیه می‌باشد. باید به این نکته توجه کرد که فریت در ریزساختار دوفازی به بزرگی حالتی نیست که در مرزهای دندریتهای فریت اصلی در طی انجماد حاصل از فلزهای پرکننده آستینی (انجماد FA) باعث تشکیل فریت شبکه‌ای می‌شود [۶ و ۱۰].

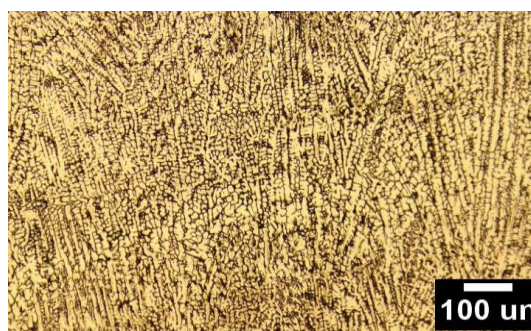
فلزجوش حاصل از فلز پرکننده ۲۲۰۹ علاوه بر الکترواچ با محلول نایتال ۵۰٪ با محلول اچ برآها نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ (ب) نمونه فلزجوش ER۲۲۰۹ را که توسط محلول اچ رنگی برآها حکاکی شده است نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص می‌شود، فاز زمینه = فریتی با رنگ کاملاً متمایز از فاز آستنیت حکاکی شده است. این تصویر حاکی از وجود مقادیر کافی از فاز آستنیت و مقادیری از فاز فریت در ساختار می‌باشد. فازهای بین فلزی در این تصویر قابل مشاهده نبوده و می‌توان عدم وجود آن‌ها در فلزجوش نمونه‌ی ER۲۲۰۹ را عنوان کرد.

همان‌گونه که در شکل ۴ (الف و ب) مشخص شده است با افزایش مقادیر کروم معادل به نیکل معادل در محدوده انجمادی FA یک مورفولوژی فریت شبکه‌ای ایجاد شده است. مورفولوژی شبکه‌ای به دلیل محدودیت نفوذ در طی استحاله‌ی فریت - آستنیت به جای مورفولوژی اسکلتی شکل می‌گیرد. وقتی که فاصله‌های نفوذی کاهش یابد برای استحاله موثرتر است که شبکه‌های فضایی فشرده‌تری ایجاد نماید، این امر باعث ایجاد الگوی فریت باقی مانده می‌شود که جهت رشد سلول یا دندریته اصلی راقطع نموده است [۱۰].

شکل ۵ (الف) تصویر متالوگرافی و ریزساختار فلزجوش حاصل از ER ۲۲۰۹ را نشان داده است. این نوع از فلز پرکننده دوفازی می‌باشد. فلزهای پرکننده دوفازی علاوه بر اتصال‌های مشابه و غیرمشابه، برای روکش کاری فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. در این فلزجوش نیز همانند فلز پایه فولاد زنگ نزن دوفازی، فاز فریت در زمینه ریزساختار و فاز آستنیت به‌صورت فاز استحاله‌یافته و برجسته، در زمینه فریتی قابل مشاهده است با این تفاوت که ساختار فلزجوش، نوردی نمی‌باشد و بیش‌تر شبیه ساختار ریختگی این فولاد است [۱۵]. بدیهی است که میزان چقرمگی در این نوع فلزجوش پایین‌تر از فلزهای جوش آستینی است. این امر به دلیل وجود مقادیر بالاتر از فاز فریت نسبت به مقدار اندک این فاز در فلزهای جوش آستینی می‌باشد؛ اما به دلیل بازه بین ۳۰ تا ۷۰ درصدی

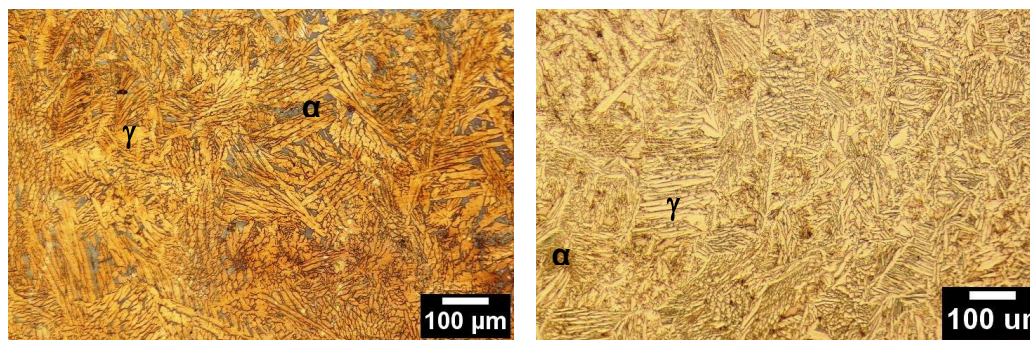


(ب)



(الف)

شکل ۴- ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده توسط فلز پرکننده‌ی ER۲۲۰۹ LMo



(ب)

(الف)

شکل ۵- ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده توسط فلز پرکننده‌ی ER۲۲۰۹ (الف) نمونه اچ شده با محلول الکترواچ و (ب) نمونه اچ شده با محلول اچ شیمیایی براها

آنالیز فازی XRD برای فلزهای جوش

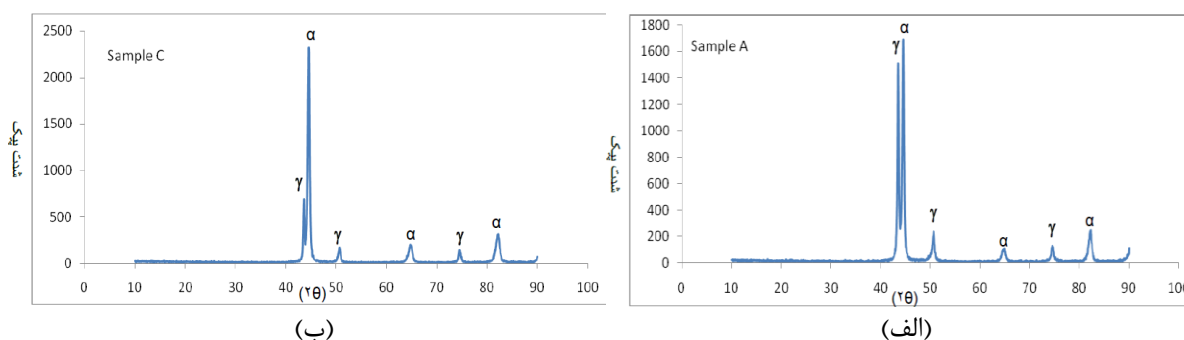
این ناحیه نسبت به نواحی دیگر جوش شده است [۸] و [۱۰]. در منطقه متأثر از حرارت هر دو نمونه جوشکاری شده آستنیت‌های مرز دانه‌ای، درون دانه‌ای و آستنیت ویدمن اشتاتن تشکیل شده است و اندازه دانه‌های فریت نیز در این منطقه افزایش یافته است [۱۵]. کاهش میزان آستنیت مرزدانه‌ای در منطقه متأثر از حرارت نسبت به فلزجوش کاملاً مشهود است. این اتفاق به دلیل رشد بیش از اندازه دانه‌های فریت بواسطه حرارت وارد شده در این ناحیه رخ داده است. اندازه منطقه متأثر از حرارت در نمونه آستنیتی بیش‌تر از نمونه دو فازی و در حدود ۵۰۰ میکرون مشاهده می‌شود؛ اما در نمونه ER۲۲۰۹ اندازه این منطقه کاهش داشته و در حدود ۴۰۰ میکرون شده است. دلیل اندازه بیش‌تر HAZ در نمونه ER۳۰۹LMo حرارت ورودی بالاتر این نمونه نسبت به نمونه ER۲۲۰۹ بوده که موجب افزایش عرض منطقه متأثر از حرارت این نمونه شده است.

با توجه به شکل (۶) ملاحظه می‌شود که در آنالیز فازی (XRD) انجام شده برای دو نمونه جوش، هیچ گونه ترکیب بین فلزی شناسایی نشده است. در این آنالیز پیک‌های دوفاز فریت و آستنیت قابل شناسایی بود. تنها تفاوت موجود در این پیک‌ها، شدت بیش‌تر پیک‌های فریت در فلزجوش حاصل از فلز پرکننده دوفازی ۲۲۰۹ و یا به بیان دیگر کاهش شدت پیک‌های فاز آستنیت در نمونه‌ی دوفازی بوده است.

بررسی ریزساختار منطقه‌ی متأثر از حرارت و فصل

مشترک فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵

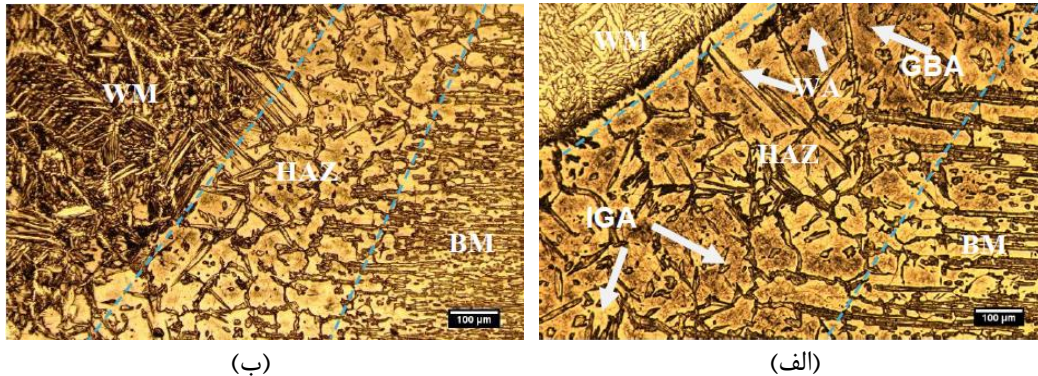
با توجه به شکل ۷ (الف و ب) ملاحظه می‌شود در هر دو نمونه جوشکاری شده مناطق متأثر از حرارت مشابهی به وجود آمده است، به طوری که مقدار فاز فریت به دلیل وجود سرعت سرد شدن نسبتاً بالا در این منطقه افزایش داشته و استحاله فریت به آستنیت در این ناحیه به تعویق افتاده است. این اتفاق باعث کاهش میزان فاز آستنیت در



(ب)

(الف)

شکل ۶- آنالیز فازی XRD برای فلزجوش نمونه‌های جوشکاری شده



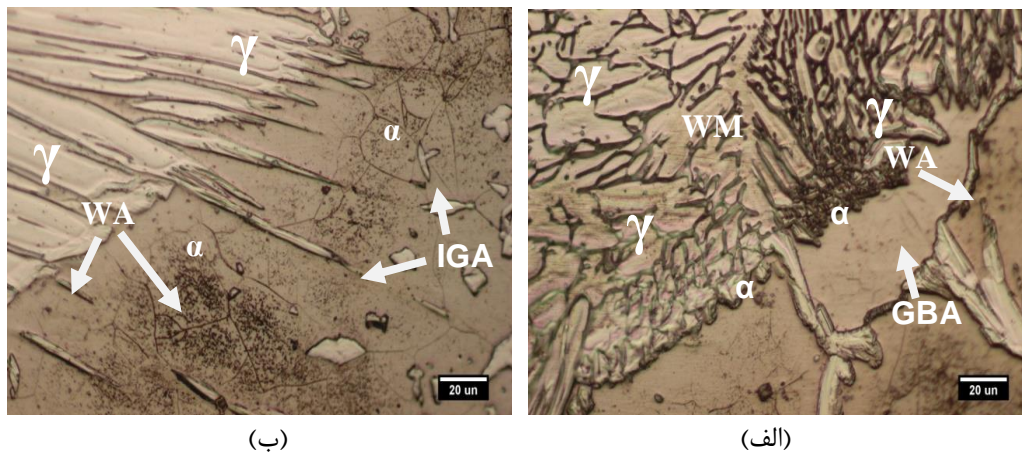
شکل ۷- مناطق متأثر از حرارت سمت فولاد ۲۲۰۵ (الف) نمونه‌ی ER۳۰۹LMo و (ب) نمونه ER۲۲۰۹

بررسی ریزساختار منطقه‌ی متأثر از حرارت و فصل

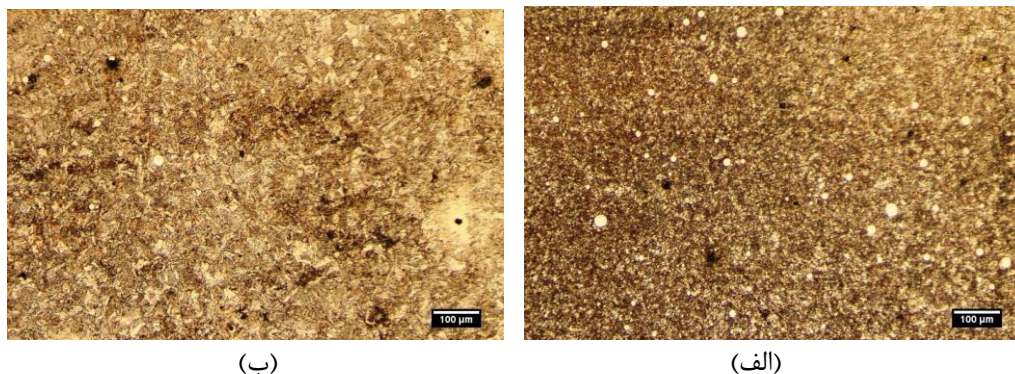
مشترک فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر A۵۱۷

شکل (۹) منطقه متأثر از حرارت فولاد A۵۱۷ را در دو نمونه جوشکاری شده نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر مشخص می‌شود که منطقه متأثر از حرارت برای هر دو نمونه دارای ساختار مارتنزیتی می‌باشد. علت وجود این ساختار در منطقه متأثر از حرارت فولاد A۵۱۷ سرعت سرمایش زیاد طی یک سیکل حرارتی در پروسه جوشکاری بوده است. در نتیجه، حرارت بالای جوشکاری ساختار فولاد از حالت پایه (مارتنزیت تمپر شده) خارج شده و پس از سرد شدن به دلیل عدم وجود فرصت کافی برای تمپر اتوماتیک در طی سرمایش سریع، به ساختار مارتنزیت تمپر نشده تبدیل شده است.

با توجه به شکل ۸ (الف و ب) ملاحظه می‌شود در فصل مشترک بلافاصله بعد از فلزجوش به دلیل وجود حرارت زیاد و ماندگاری بیش‌تر این ناحیه در دماهای زیاد نسبت به نواحی دیگر HAZ، دانه‌های فریت اولیه فرصت رشد پیدا کرده و با یک افزایش رشد در نواحی فصل مشترک نمایان شده‌اند. همچنین با پیشروی از سمت فلز پایه به سمت فلزجوش در منطقه متأثر از حرارت، دانه‌های آستنیت از حالت نوردی و کشیده به صورت گرد و هم محور میل پیدا کرده است. دلیل این رخداد میزان حرارت ورودی بیش‌تر در نواحی نزدیک به فلزجوش می‌باشد که باعث تبلور مجدد و هم محور شدن دانه‌های آستنیت در این ناحیه شده است.



شکل ۸- ریزساختار فصل مشترک سمت فولاد ۲۲۰۵ (الف) نمونه ER۳۰۹LMo و (ب) نمونه ER۲۲۰۹



شکل ۹- مناطق متاثر از حرارت سمت فولاد A۵۱۷ (الف) نمونه ER۳۰۹LMo و (ب) نمونه ER۲۲۰۹

شیمیایی فلزهای پرکننده مانند نیتروژن بیش تر در فلز پرکننده ER۲۲۰۹ شرایطی را حاصل می کند که باعث سهولت پیشرفت مارتنزیت در نزدیکی مرز ذوب و سمت فلز پایه A۵۱۷ خواهد شد. این اتفاق به دلیل میزان نیکل، کروم و مولیبدن کم تر در فلز پایه فولاد A۵۱۷ و میزان کربن بیش تر در آن است که باعث تشکیل کاربیدهای کروم و مولیبدن در ناحیه ای نزدیک به فلزجوش نیز خواهد شد [۶].

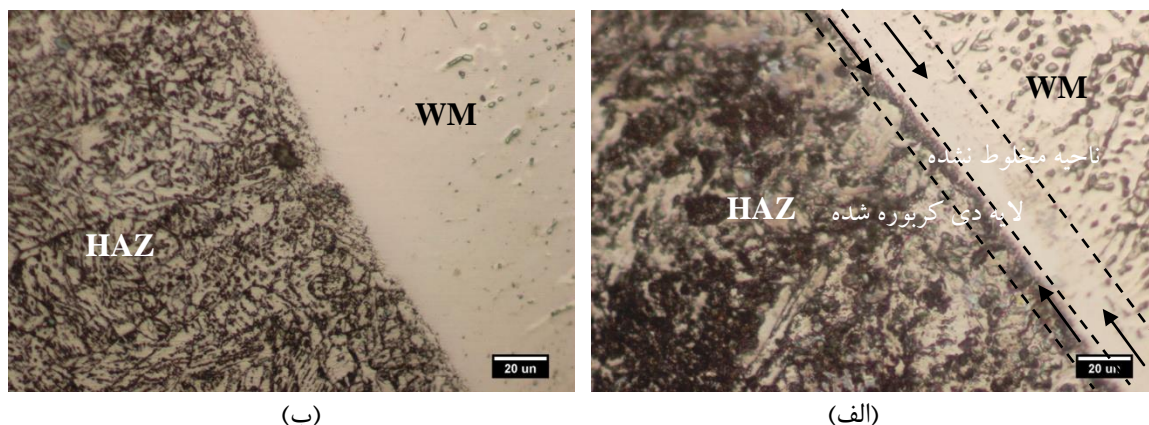
فریت سنجی فلز جوش توسط فریت اسکوپ

نتایج مقدار فریت در فلزجوش با استفاده از فریت اسکوپ در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به جدول مذکور، مشخص می شود که در نمونه ER۳۰۹LMo، ۱۰ درصد و در نمونه ER۲۲۰۹، ۲۵ درصد از فاز فریت وجود دارد. نتایج حاصل از فریت سنجی نمونه های جوشکاری شده نشان می دهد که میزان فریت موجود در فلز جوش آستنیتی به مقداری بوده است که برای عدم ایجاد ترک انجمادی اطمینان حاصل شود.

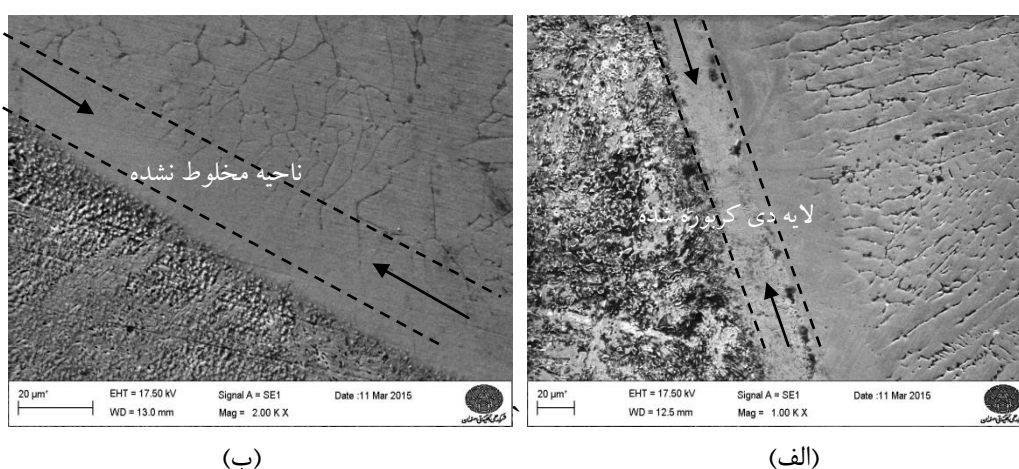
همچنین این فاز در فلزجوش نمونه ER۲۲۰۹ به مقدار کافی تشکیل شده است به طوری که علاوه بر حفظ چقرمگی فلزجوش مقادیر استحکام بالاتری در این نمونه ایجاد کند. آزمون فریت سنجی برای فلز پایه فولاد ۲۲۰۵ انجام شده است و نتایج مقدار فریت فولاد ۲۲۰۵ در جدول (۳) گزارش شده است. مقدار ۴۵-۴۰ درصدی از فاز فریت در فلز پایه دو فازی حاکی از درصد های فازی آستنیت و فریت نزدیک به هم و مناسب بودن تعادل فازی در فلز پایه دو فازی بوده است.

شکل (۱۰) فصل مشترک فلزجوش و فلز پایه A۵۱۷ را در دو نمونه جوشکاری شده نشان می دهد. از تصاویر شکل (۱۰) مشخص می شود که در فصل مشترک فولاد A۵۱۷ و فلزجوش یک منطقه مخلوط نشده برای هر دو نمونه جوشکاری شده تشکیل شده است. وجود این مناطق در اتصال های غیر مشابه، به دلیل وجود اختلاف در ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و فلز پایه می باشد [۱۰]. از شکل ۱۰ (الف) مشخص می شود که فصل مشترک فولاد A۵۱۷ در نمونه ER۳۰۹LMo دارای یک منطقه دی کربوره شده است. وجود این ناحیه به دلیل وجود عناصر آلیاژی به مقدار زیاد در فلزجوش و عدم وجود آن ها در فلز پایه A۵۱۷ می باشد. این تفاوت در ترکیب شیمیایی باعث می شود که تمایل مهاجرت عنصر کربن از فلز پایه به سمت فلزجوش افزایش یابد و یک منطقه تهی از کربن را در سمت فلز پایه به وجود آورد. همچنین از دلایل دیگر به وجود آمدن این ناحیه در نمونه ER۳۰۹LMo اعمال حرارت ورودی بالا در آن بوده است به طوری که حرارت ورودی زیاد موجب کاهش سرعت سرد شدن شده و در نتیجه نفوذ کربن در گستره وسیع تری صورت می پذیرد [۱۳].

همان گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تأیید کننده وجود یک منطقه دی کربوره شده در فصل مشترک نمونه ER۳۰۹LMo است. شکل ۱۱ (ب) فصل مشترک فولاد A۵۱۷ در نمونه ER۲۲۰۹ را نشان می دهد. با توجه به این تصویر مشخص می شود که لایه دی کربوره شده و یا مرز نوع دو در این نمونه تشکیل نشده و تنها ناحیه مخلوط نشده قابل مشاهده است. اختلاف در ترکیب



شکل ۱۰- فصل مشترک‌های فلز جوش سمت فولاد A۵۱۷ (الف) نمونه ER۳۰۹LMo و (ب) نمونه ER۲۲۰۹



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک فلز جوش، سمت فولاد A۵۱۷ (الف) نمونه ER۳۰۹LMo و (ب) نمونه ER۲۲۰۹

جدول ۳- درصد حجمی فاز فریت در فلزهای جوش و فلز پایه فولاد زنگ نزن دوفازی

موضع نمونه	درصد حجمی فاز فریت
ER۳۰۹LMo-WM	۱۰
ER۲۲۰۹-WM	۲۵
UNS S۳۲۲۰۵-BM	۴۰-۴۵

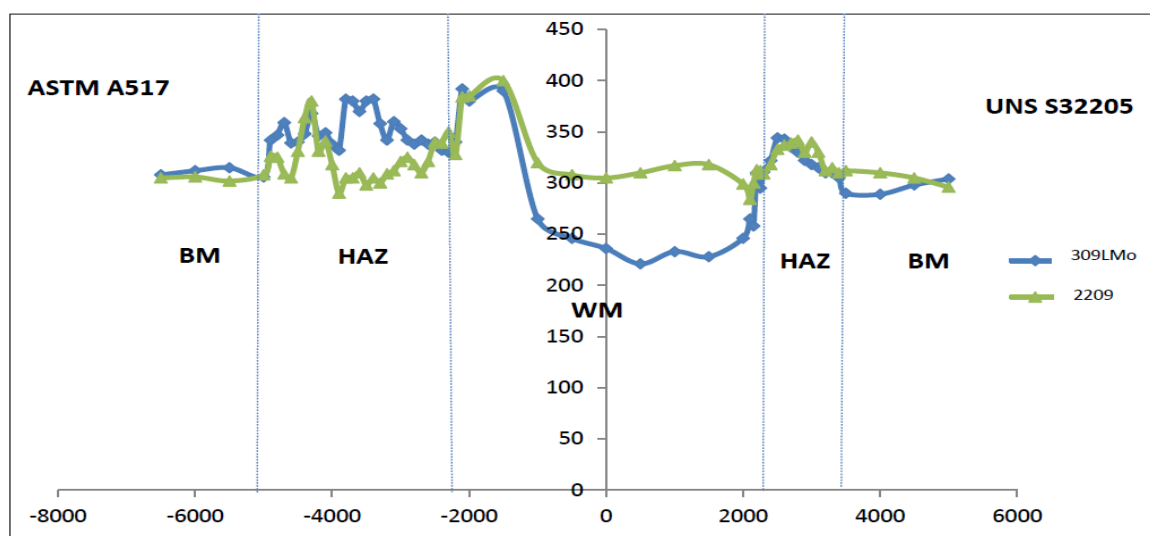
پروفیل ریزسختی

۳۰۹LMo دارای سختی در حدود ۲۴۰ ویکرز است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فلز جوش ۲۲۰۹ دارای سختی بالاتر و بهتر نسبت به فلز جوش ۳۰۹LMo است؛ زیرا که این میزان سختی در محدوده و مشابه با میزان سختی فلزهای پایه است. در منطقه‌ی متأثر از حرارت دو نمونه آستنی‌تی و دوفازی، افزایش سختی نسبت به فلز پایه مشاهده شد. افزایش سختی در HAZ دو نمونه ناشی از حضور بیش‌تر فاز فریت در این منطقه نسبت به فلز پایه

نتایج آزمون ریزسختی سنجی افقی از فلز پایه فولاد دوفازی ۲۲۰۵ تا فلز پایه فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر A۵۱۷ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که سختی در فلز پایه فولاد زنگ نزن دوفازی در محدوده ۳۰۰ ویکرز بوده است. فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ۲۲۰۹ دارای سختی در حدود ۳۰۰ ویکرز و فلز جوش حاصل از فلز پرکننده

جوشکاری و با توجه به شیب غلظتی ایجاد شده، کربن در سمت فلز پایه A۵۱۷ موقعیت نفوذ به فلز جوش در فصل مشترک را داشته باشد. نفوذ کربن از یک سو و عناصر آلیاژی زیاد در فلز جوش از سوی دیگر موقعیت فصل مشترک را برای ایجاد ساختارهایی با سختی بالا همانند مارتنزیت و کاربید فراهم می‌سازد [۴ و ۶]. به‌طور کلی پیک افزایش سختی در فصل مشترک فلز جوش و HAZ در سمت فولاد A۵۱۷ ناشی از حل شدن عناصر آلیاژی فلز جوش با بخشی از فلز پایه و افزایش سختی محلول جامد این ناحیه نسبت به فلز پایه A۵۱۷ و فلزهای جوش بوده است. این امر موجب تشکیل نوار مارتنزیتی با سختی بالا در نمونه‌های جوش می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از آزمون ریزسختی ملاحظه می‌شود، عرض منطقه متأثر از حرارت در سمت فولاد A۵۱۷ بزرگ‌تر از این ناحیه در سمت فولاد ۲۲۰۵ بوده است که دلیل آن انتقال حرارت پایین‌تر فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ نسبت به فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر A۵۱۷ می‌باشد. این خاصیت از فولاد ۲۲۰۵ باعث می‌شود که تجمع حرارتی در فلز پایه‌ی نزدیک به فلز جوش بیش‌تر صورت گیرد و در نتیجه علاوه بر درشت شدن دانه‌های فریت در ساختار، عرض HAZ نیز کوچک‌تر از عرض این ناحیه در فولاد کم آلیاژ شود [۴].

است [۱۶]. با وارد شدن به منطقه فصل مشترک فلز جوش سمت فولاد دوفازی ۲۲۰۵ کاهش میزان سختی مشاهده می‌شود. دلیل کاهش میزان سختی در این ناحیه افزایش ناگهانی میزان آستنیت در ریزساختار بواسطه برهم خوردن تعادل فاز فریت آستنیت در فصل مشترک و وجود عناصر آستنیت‌زای بیش‌تر در فلز جوش نسبت به فلز پایه بوده است. کاهش سختی در فصل مشترک برای هر دو نمونه آستنیتی و دوفازی قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص شده است، سختی در فلز جوش نمونه دوفازی مقدار بیش‌تری را به خود اختصاص داده است. این مقدار از سختی مشابه با سختی فلز پایه فولاد دوفازی بوده و دلیل این اتفاق وجود مقادیر بیش‌تر از فاز فریت در این نمونه از فلز جوش نسبت به نمونه‌های آستنیتی بوده است. همچنین افزایش تعداد مرز دانه‌ها در ساختار با نسبت فریت به آستنیت نزدیک‌تر، باعث افزایش سختی در فلز جوش نمونه دوفازی شده است. در فصل مشترک فلز جوش و فولاد A۵۱۷ افزایش زیاد سختی در هر دو نمونه مشاهده می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد این افزایش به دلیل حضور عناصر آلیاژی بسیار زیاد در فلزهای جوش نسبت به فلز پایه‌ی فولاد A۵۱۷ و همچنین حضور مقادیر کم‌تر از عنصر کربن در فلزهای جوش نسبت به فلز پایه A۵۱۷ می‌باشد. این امر باعث می‌شود که در دماهای بالاتر سیکل حرارتی



شکل ۱۲- پروفیل ریزسختی از فلز پایه دوفازی ۲۲۰۵ تا فلز پایه کم آلیاژ A۵۱۷

نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی ریز ساختار اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ و فولاد کم آلیاژ کوئنچ و تمپر A۵۱۷ با استفاده از دو فلز پرکننده ER۳۰۹LMo و ER۲۲۰۹ پرداخته شد. مهم‌ترین دست آوردهای این پژوهش عبارتند از:

۱- ریزساختار در نمونه ER۳۰۹LMo آستنیتی همراه با فریت شبکه‌ای، و در نمونه ER۲۲۰۹ به صورت متفاوت از نمونه دیگر بوده و دارای شبکه‌های پیوسته آستنیت در زمینه فریت اولیه است.

۲- در دو نمونه جوشکاری شده، HAZ فولاد ۲۲۰۵ غیر عریض و همراه با دانه‌های درشت فریتی و مقادیر کمتری از فاز آستنیت نسبت به فلز جوش است.

۳- در نمونه‌های جوشکاری شده، HAZ فولاد A۵۱۷ عریض و دارای ریزساختار مارتنزیت تمپر نشده است.

۴- در هر دو نمونه جوشکاری شده فصل مشترک فلز جوش سمت فولاد A۵۱۷، دارای یک منطقه مخلوط نشده با ساختار مارتنزیتی و سختی بالا است.

۵- میزان سختی فلز جوش دوفازی بالاتر از فلز جوش آستنیتی و در مقایسه با فلزهای پایه در محدوده مشابه و مناسب‌تری قرار دارد.

در پایان با وجود متداول بودن استفاده از فلزهای پرکننده آستنیتی در جوشکاری غیر مشابه فولادهای زنگ نزن دوفازی، فلز پرکننده دوفازی ER۲۲۰۹ به دلیل وجود مشکلات کم‌تر ریزساختاری نسبت به نوع آستنیتی و شباهت درصد فازی در ریزساختار فلز جوش به ریزساختار فلز پایه دوفازی و همچنین میزان سختی بالاتر و بهتر، مناسب‌تر از فلز جوش در نمونه حاصل از فلز پرکننده ER۳۰۹LMo ارزیابی شد.

References:

1- Y. Jiang, H. Tan, Z. Wang, J. Hong, L. Jiang, J. Li, "Influence of Creq/Nieq on pitting corrosion resistance and mechanical properties of UNS S32304 duplex stainless steel welded joints", Corrosion Science, Vol.70, pp. 252-259, 2013.

2- J. Luo, Y. Dong, L. Li, X. Wang, "Microstructure of 2205 duplex stainless steel joint in submerged arc welding by post weld heat treatment", Journal of Manufacturing Processes, Vol.16, pp. 144-148, 2014.

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

4- S. 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, Vol. 32, pp. 831-837, 2011.

5- S. Wang, P. Chiu, J. Yang, J. Fang, "Gamma phase transformation in pulsed

GTAW weld metal of duplex stainless steel" Materials Science and Engineering A, Vol.420, pp. 26-33, 2006.

6- P. Bala Srinivasan, V. Muthupandi, W. Dietzel, V. Sivan, "An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels", Materials and Design, Vol. 27, pp. 182-191, 2006.

۷- م. رحمانی، م. شمعیان و م. کثیری " بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های نامشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۰۴L"، مجله مواد نوین مردودشت، جلد سوم، شماره دوم، ۱۳۹۱.

8- M. Sadeghian, M. Shamanian, A. Shafyei, " Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints between super duplex stainless steel and high strength low alloy steel", Materials and Design, 2014.

9- ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec IX, Welding and BRAZING Qualifications, The American Society of Mechanical Engineers, 2007.

10- J. C. Lippold and D. J. Kotecki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", JohnWiley & Sons Inc.,

New Jersey, USA, 2005.

11- Materials Welding Handbook Vol. 1, Welding Technology. American Welding Society, 2000.

12- H. Sieurin, R. Sandstrom, " Austenite reformation in the heat-affected zone of duplex stainless steel 2205", Materials Science and Engineering A, Vol.418, pp. 250-256, 2006.

13- A. Eghlimi, M. Shamanian, M. Eskandarian, A. Zabolian, M. Nezakat, "Evaluation of microstructure and texture across the welded interface of super duplex stainless steel and high strength low alloy steel", Surface & Coatings Technology, Vol. 264, pp. 150-162, 2015.

14- ASM metals handbook, "Welding, Brazing and Soldering", vol. 6, 2005.

15- S. Kou, "Welding Metallurgy", 2nd Ed., Wiley-Interscience, New Jersey, The United States of America, 2003.

16- A-H.I. Mourad, A. Khourshid, T. Sharef, "Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties", Materials Science and Engineering A, Vol. 549, pp.105-113, 2012.