فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۲، شماره ۲، تابستان ۹۷

ارزیابی خواص مکانیکی جوش‌های غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن AISI 347 به فولاد کم آلیاژ ASTM A335

ایمان حاجیان نیا[۱*]، محمدرضا پاک‌منش[۲]، مرتضی شمعانیان[۳]، مسعود کثیری[۴]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مواد و آلیاژهای نوین، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران

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

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، نجف آباد، ایران

*عهده دار مکاتبات: i.hajiannia@ma.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲، تاریخ پذیرش:۱۳۹۶/۱۱/۰۳)

چکیده: دراین تحقیق، خواص مکانیکی جوش‌های غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۴۷ به فولاد کم آلیاژ ASTM A335 با استفاده از روش قوسی تنگستن-گاز با قطبیت منفی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از دو فلز پرکننده ERNiCr-3 و ER309L استفاده شد. برای به‌دست آوردن ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب در اتصالات مذکور، حرارت ورودی و عملیات حرارتی پیشگرم، از جمله پارامترهای مؤثر و قابل کنترل بود. ریزساختار فلزات پایه و جوش، با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت و برای بررسی سطوح شکست، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که یک ساختار دو فازی شامل مناطق دندریتی و بین دندریتی در فلز جوش ERNiCr-3 با انجماد به‌صورت آستنیتی و در فلز جوش ER309L ساختاری شامل فریت اولیه استخوانی شکل در زمینه آستنیت مشاهده شد. همچنین خواص مکانیکی، شامل استحکام خمشی، استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه، سختی و نیز شکست نگاری نمونه‌ها بررسی شد. در آزمایش کشش تمامی نمونه‌ها، از منطقه متاثر از حرارت فلز پایه فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ و به‌صورت نرم دچار شکست شدند. بیشترین مقدار انرژی شکست، مربوط به فلز جوش ERNiCr-3 بود و بیشترین و کمترین مقادیر سختی به ترتیب مربوط به فلز جوشERNiCr-3 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی۳۰۹L به‌دست آمد. درنهایت، می‌توان نتیجه گرفت، برای اتصالات بین فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ و فولاد کم آلیاژ A۳۳۵، فلز پرکننده‌ی ERNiCr-3 ویژگی‌های بهینه‌ای را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:
جوشکاری غیرمشابه، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، فولاد کم آلیاژ، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷، یکی از پرمصرف‌ترین فولادها در صنعت می‌باشد که به میزان گسترده‌ای در کاربردهای مقاوم به خوردگی در محیط‌های آبی و همچنین در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فولاد در صنایع نفت و گاز، پالایشگاه و نیروگاه‌های تولید برق کاربرد فراوان دارد. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا به خاطر میزان بالای کروم این فولاد است [۱]. وجود نیکل که عنصری آستنیت زا می‌باشد، باعث بالا رفتن خواص مقاوم به حرارت این آلیاژ می‌شود. در این آلیاژ مقاومت به حمله بین‌دانه‌ای[۱] در محیط‌های خورنده بهبود یافته است [۲]. فولادهای کم آلیاژ کروم- مولیبدن‌دار دسته‌ای دیگر از فولادها می‌باشند که از مقاومت به سایش و مقاومت در برابر خوردگی به‌خصوص مقاومت در برابر محیط‌های خورنده احیایی

Archive of SID
www.SID.ir

توسط گازهای گوگرد و مشتقات آن برخوردار می‌باشند و در درجه حرارت‌های نسبتاً بالا نیز استحکام خود را از دست نمی‌دهند؛ زیرا کروم، مقاومت به خوردگی و مولیبدن استحکام در دمای بالای این فولادها را تأمین می‌کند، این فولادها برای ساخت چرخ‌دنده‌ها، عدسی‌های آب‌بندی فشار بالا و در صنایع نفت و نیروگاهی کاربرد گسترده‌ای دارند [۲-۳]. امروزه کاربرد اجتناب‌ناپذیر اتصالات غیرمشابه به دلیل ملاحظات اقتصادی و دست‌یابی به خواص مکانیکی مناسب‌تر و افزایش عملکرد در کاربردهای دمای بالا و افزایش مقاومت در برابر خوردگی برای بسیاری از آلیاژها گسترش یافته است، ازجمله این اتصالات غیرمشابه می‌توان به اتصال فولادهای زنگ‌نزن به فولادهای کم آلیاژ اشاره نمود. در همین راستا گروهی از محققین، تحقیقات خود را بر روی جوشکاری غیرمشابه این آلیاژها متمرکز ساخته اند. ازجمله اریواژا گان[۲] و همکاران [۴] روش‌های مختلف جوشکاری را برای فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به فولاد کم آلیاژ ۴۱۴۰ بررسی کردند و بهترین خواص مکانیکی را با استفاده از روش جوشکاری پرتو الکترونی به‌دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان داد، به‌دلیل سرعت سرد شدن سریع و زمان کوتاه در حرارت‌دهی اتصالات در این روش جوشکاری، مقدار کاربیدهای غنی از کروم در مرز دانه‌ها کاهش می‌یابد. کلوه[۳] [۵] شکست یک اتصال انتقالی بین فولاد ۲/۲۵ Cr-۱Mo و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ ایجاد شده توسط فلز پرکننده پایه نیکلی اینکونل ۱۸۲ را مورد مطالعه قرار داد. تحقیقات او نشان داد، پس از قرارگیری این اتصال در معرض دمای بالا در ۱۰ تا ۱۵ سال، ناحیه متأثر از حرارت دارای دانه‌های فریت درشت شده خواهد شد که درنهایت شکست در این ناحیه را در پی خواهد داشت. در زمینه تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص خوردگی مقاطع جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد کم آلیاژ تحقیقاتی صورت گرفته است، بررسی‌ها نشان می‌دهد، حرارت ورودی بالا باعث ریز جدایش عناصر آلیاژی و تشکیل مناطق فقیر از کروم در مرزدانه‌ها می‌شود که این امر منجر به تضعیف ویژگی‌های مکانیکی اتصالات خواهد شد [۶]. همچنین شاه‌حسینی و همکاران [۱] جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ را با آلیاژ اینکونل ۶۱۷ جهت دست‌یابی به خواص مکانیکی مناسب بررسی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد، از بین فلزات پرکننده فولاد زنگ‌نزن ۳۱۰، اینکونل ۸۲ و اینکونل۶۱۷، بالاترین استحکام کششی مربوط به فلز پرکننده اینکونل ۶۱۷ است. با توجه به مطالب یاد شده و با توجه به اینکه اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ به فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ در صنایع نفت و گاز و بخصوص در مبدل‌های حرارتی[۴] از اهمیت بالایی برخوردار است، همچنین با مطالعه منابع و مراجع مشخص شد، در زمینه اتصال بین این دو آلیاژ تحقیقات چندانی صورت نپذیرفته است. لذا در تحقیق حاضر خواص مکانیکی و ریزساختار مناطق مختلف جوش و تعیین بهترین فلز پرکننده، جهت حصول خواص مطلوب برای این اتصال غیرمشابه مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

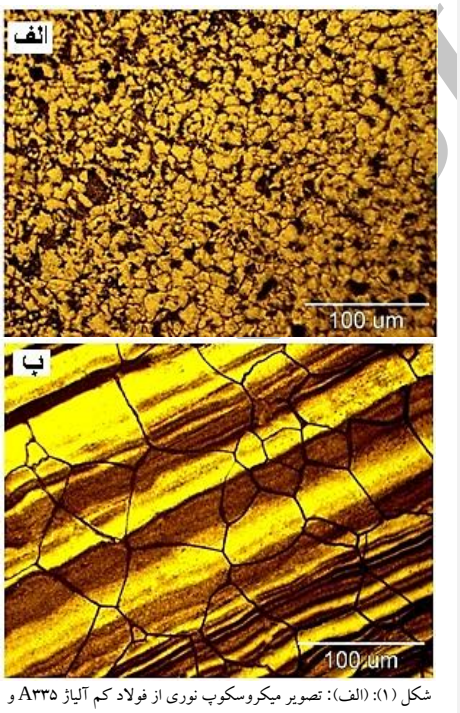
در این تحقیق از لوله‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی۳۴۷ به‌صورت کارشده و در شرایط آنیل انحلالی و فولاد کم آلیاژ ۳۳۵ Aبه‌عنوان فلزات پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و جوش در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده بر اساس درصد وزنی

عنصر	۳۴۷	A۳۳۵	ER309L	ERNiCr-3
C	۰/۰۸	۰/۱	۰/۰۲	۰/۱
Cr	۱۷/۳۶	۱/۱۲	۲۳/۷	۱۶
Ni	۱۰/۶۵	–	۱۳/۹	بقیه
Mo	۰/۳۷	۰/۵	۰/۰۴	۳
Mn	۲	۰/۳	۱/۸	۰/۵
Si	۱	۱	۰/۵۱	۰/۷۵
Nb	۰/۵۵	–	–	۳
Ti	۰/۰۱	–	–	۰/۵
Cu	۰/۳۵	۰/۰۸	۰/۵	۰/۱۲
Fe	بقیه	بقیه	بقیه	۳

Archive of SID

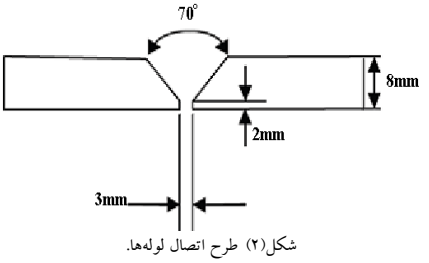
www.SID.ir



شکل (۱): (الف): تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ و (ب): تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷

شکل ۱ (الف) تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه فولاد کم آلیاژ کروم- مولیبدن دار A۳۳۵ درگروه P۱۱ را نشان می‌دهد. این فولاد دارای ریزساختاری شامل پرلیت- فریت است. همان‌طور که مشخص است، ساختار شامل دانه‌های روشن فریت به همراه پرلیت به رنگ تیره می‌باشد. شکل ۱ (ب) تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ با ریزساختاری شامل زمینه آستنیتی همراه با دانه‌های هم‌محور را نشان می‌دهد.

جهت اتصال فلزات پایه از دو فلز پرکننده ER309L و ERNiCr-3 استفاده شد. در تمامی موارد از سیم جوش‌هایی با قطر ۲/۴ میلی‌متر جهت پاس ریشه و پاس‌های بعدی استفاده شد. جهت اتصال لب‌به‌لب با شیار V شکل لوله‌ها آماده‌سازی شدند. طرح اتصال مورد استفاده در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل(۲) طرح اتصال لوله‌ها.

۲-۲- جوشکاری

نمونه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۴۷ بدون عملیات پیش گرم و فولاد کم آلیاژ کروم- مولیبدن دار با پیشگرم تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد طبق استاندارد ASME SEC.IX با توجه به ضخامت لوله انجام شد [۸-۷]. سپس با استفاده از روش جوشکاری قوسی- الکترود تنگستنی با گاز محافظ با قطبیت منفی الکترود (GTAW-DCEN) در وضعیت ۲G و در چهار پاس به‌طوری‌که یک پاس نفوذی و سه پاس پرکننده بود جوشکاری شدند. جوشکاری با استفاده از دستگاه جوش گام الکتریک مدل Pars-EL 631 به‌صورت دستی انجام شد. الکترود مصرف نشدنی مورد استفاده، الکترود تنگستنی ۲٪ اکسید توریم به قطر ۲/۴ میلی‌متر بود. گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه در پاس اول به‌عنوان گاز محافظ و در دیگر پاس‌ها با دبی کمتر که به دلیل کافی بودن محافظت توسط کامل شدن پاس ریشه بود، استفاده شد. دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد تا تنش‌های ناشی از انقباض و سرد شدن فلز جوش به حداقل مقدار ممکن برسد. حرارت ورودی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد [۲].

$$HI = \frac{\eta . I . V}{S} \qquad (۱)$$

در این رابطه I شدت جریان، V ولتاژ و S سرعت جوشکاری است. بازده قوس (η) در این رابطه ۰/۶ در نظر گرفته شده است. در این حالت حرارت ورودی (HI) بر حسب ژول بر میلی‌متر به‌دست می‌آید. با توجه به سیالیت مذاب و سرعت جوشکاری،

Archive of SID

www.SID.ir

مقدار شدت‌جریان و ولتاژ انتخاب گردید. حداقل طول قوس نیز حدود دو میلی‌متر در نظر گرفته شد. جدول ۲ پارامترهای قابل‌کنترل برای جوشکاری با دو فلز پرکننده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مشخصات جوشکاری قوسی تنگستن -گاز

فلز پرکننده	شماره پاس	جریان معادل (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (kJ/mm)
ER309L	۱	۱۵۰	۱۲	۱/۱	۰/۹۸۱
"	۲	۱۴۰	۱۰	۱	۰/۸۴۰
"	۳	۱۳۰	۱۱	۱/۱	۰/۷۰۹
"	۴	۱۱۰	۱۲	۱/۱	۰/۷۲۰
ERNiCr-3	۱	۱۵۰	۱۰	۱/۱	۰/۸۱۸
"	۲	۱۴۰	۱۰	۱	۰/۸۴۰
"	۳	۱۴۰	۱۰	۱	۰/۸۴۰
"	۴	۱۳۰	۱۱	۱/۲	۰/۷۱۵

۲-۳- متالوگرافی

برای مطالعه ریزساختار فلزات پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت[5] از متالوگرافی استفاده شد. بدین منظور از مقطع هر اتصال دو نمونه با ابعاد مناسب بریده شد. سطوح مورد نظر توسط سنباده‌های کاربید سیلیسیوم ۸۰ تا ۲۰۰۰ آماده شد و سپس توسط پودر آلومینای ۰/۳μm پرداخت گردید. نمونه‌ها توسط محلول نایتال که محتوی محلول ۲٪ اسید نیتریک در الکل اچ شد و جهت آشکار شدن ساختار فولاد کم آلیاژ و فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، از محلول ماربل با ترکیبی شامل ($10grCuSO_4$ + 50cc HCl +50cc H_2O) به مدت ۱۵ ثانیه استفاده گردید. همچنین به‌منظور بررسی ریزساختار فلز جوش پایه نیکل، نمونه‌ها در محلول حاوی ۶۰ میلی‌لیتر آب و ۴۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک و تحت ولتاژ ۵ ولت به مدت ۱۰ ثانیه الکترواچ شدند [۹]. ریزساختار مناطق مختلف قطعات جوشکاری شده با میکروسکوپ نوری Olympus مدل CK40M در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای مشخصه‌یابی بهتر ریزساختار و مشاهده سطح مقطع شکست نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی ساخت شرکت Zeiss مدل DSM-950 استفاده شد.

۲-۴- خواص مکانیکی

برای بررسی خواص مکانیکی، آزمایش‌های مکانیکی شامل آزمایش کشش، آزمایش خمش، آزمایش ضربه و آزمایش سختی‌سنجی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد. به‌منظور ارزیابی خواص کششی، نمونه‌هایی از فلزات پایه و جوش بر اساس استاندارد ASME SEC.IX تهیه شد. مطابق این استاندارد، نمونه‌ها باید به‌گونه‌ای تهیه شوند که منطقه تحت کشش شامل فلز جوش و هر دو فلز پایه باشد و فلز جوش باید درست در مرکز نمونه واقع شود. در این حالت علاوه بر فلز جوش، مناطق متأثر از حرارت و فلزات پایه نیز در آزمایش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بر طبق این استاندارد برای هر اتصال، سه نمونه در نظر گرفته شد و با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه کشش Instron مدل 8055 آزمایش گردید، سپس درصد ازدیاد طول، استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه‌ها محاسبه و گزارش شد. آزمایش خمش هدایت شده به‌منظور تعیین سلامت قطعات جوشکاری شده انجام شد. نمونه‌ها طبق استاندارد ASME SEC.IX آماده‌سازی گردید و سپس به وسیله فرم دهنده تحت خمش قرار گرفت. کرنش اعمال شده بستگی به ضخامت نمونه دارد و قطر فرم دهنده دو برابر ضخامت (۳۰ میلی‌متر) تعیین شد و با توجه به ضخامت قطعات، آزمایش خمش رویه و ریشه انجام شد. سه نمونه برای آزمایش رویه و سه نمونه برای آزمایش ریشه با دستگاه Senze مدل ۲۶۶ با زاویه خمش ۱۸۰ درجه تحت خمش قرار گرفتند. به‌منظور مقایسه مقاومت در برابر ضربه فلزات جوش، نمونه‌های آزمایش ضربه مطابق با استاندارد SEC.IX ASME تهیه شدند. نمونه‌ها با ابعاد ۱۰×۱۰×۵۵ میلی‌متر با شیاری به عمق ۲ میلی‌متر و زاویه‌ی ۴۵ درجه در فلز جوش آماده‌سازی شد. فلز جوش درست در مرکز نمونه واقع شد. از هر اتصال سه نمونه برای انجام این آزمایش تهیه گردید. سپس آزمایش ضربه چارپی با استفاده از دستگاه Santam بر روی نمونه‌ها در دمای ۲۷

Archive of SID

www.SID.ir

و ۲۰- درجه سانتی‌گراد انجام و انرژی جذب شده در حین آزمایش گزارش شد. همچنین سطوح شکست نمونه‌ها پس از انجام این آزمایش، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری سختی نمونه‌های مختلف و همچنین رسم پروفیل سختی مقاطع جوش از آزمون ریزسختی‌سنجی استفاده شد، آزمون با استفاده از دستگاه Buehler با وزنه صد گرمی و مدت زمان اعمال نیرو ۱۵ ثانیه و در فاصله ۸ میلی‌متری از خط مرکزی جوش انجام شد.

۲-۵- آنالیز فازی

برای تعیین درصد فازهای فریت و آستنیت در نمونه‌های مختلف از دستگاه فریتوسکوپ ساخت شرکت Fischer مدل FMP30 استفاده شد. این دستگاه با استفاده از روش القای مغناطیسی، کسر حجمی فریت در فولادهای متشکل از فازهای مغناطیسی و غیر مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار فلزات جوش

۳-۱-۱- فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۹ L

در شکل۳ ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ۳۰۹L مربوط به پاس اول نشان داده شده است. نتایج حاصل از فریت سنجی با استفاده از دستگاه فریتوسکوپ برای پاس ریشه فلز پرکننده ۳۰۹L حدود ۵/۷ درصد فریت را نشان داد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ساختار آستنیتی همراه با مقداری فریت دلتا (δ) به‌صورت اسکلتی است و نشان می‌دهد، انجماد در فلز جوش ۳۰۹L به‌صورت فریت اولیه همراه با آستنیت در پایان انجماد می‌باشد [۶]. جدول۳ تغییرات درصد آستنیت پاس ریشه منطقه جوش دو فلز پرکننده استفاده شده در این تحقیق را توسط دستگاه فریتسکوپ نشان می‌دهد.

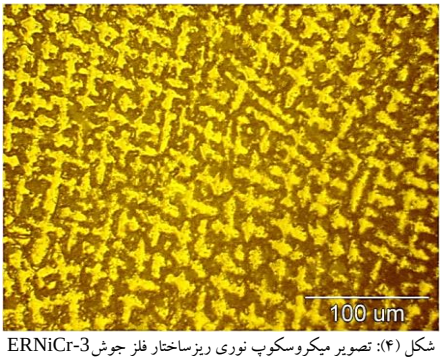
شکل (۳): تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار جوش۳۰۹ L

جدول (۳): تغییرات درصد آستنیت فلز جوش با دستگاه فریتسکوپ

فلز پرکننده	درصد آستنیت	درصد خطا
ERNiCR-3	۹۹/۷	۰/۱
ER309L	۹۴/۳	۱

۳-۱-۲- فلز جوش ERNiCr-3

ساختار دانه‌بندی فلز جوش ERNiCr-3 مربوط به پاس اول در شکل۴ نشان داده شده است. انجماد فلز جوش ERNiCr-3 به‌صورت آستنیت اولیه بوده و در آن یک ساختار دو فازی شامل دندریت‌ها و مناطق بین دندریتی دیده می‌شود. این فلز جوش حاوی ۳٪ نیوبیوم است. نیوبیوم می‌تواند محدوده‌ی دمای انجماد را زیاد کند و به‌عبارت‌دیگر، تحت انجماد را افزایش داده و باعث وسعت اندازه این منطقه شود [۱۰].

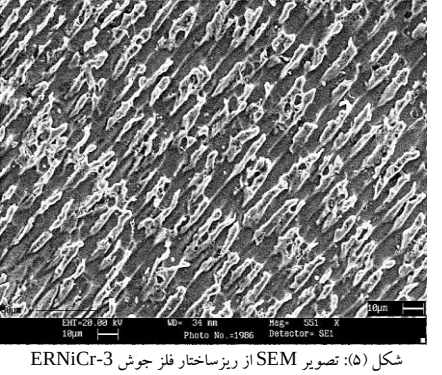


شکل (۴): تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فلز جوشERNiCr-3

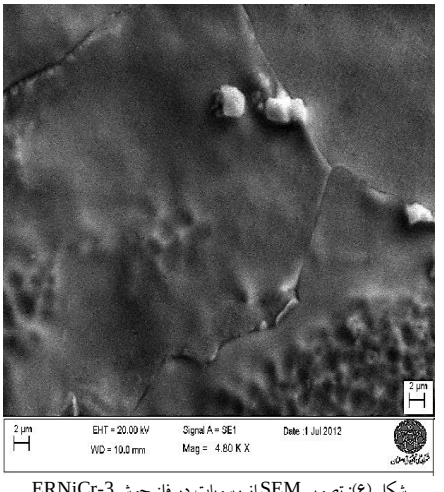
Archive of SID

www.SID.ir

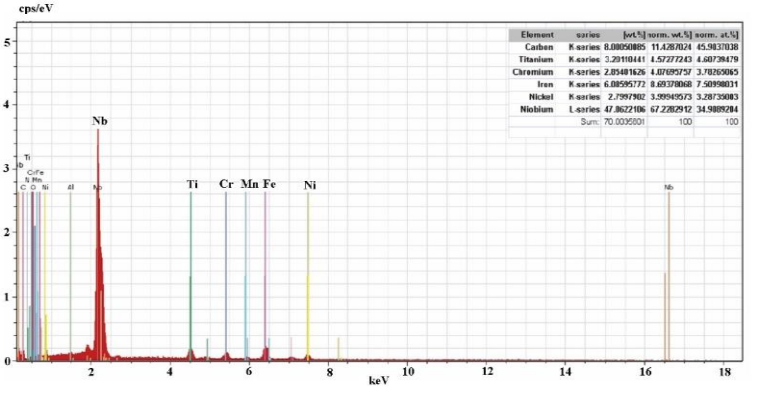
جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. در مناطق بین دندریتی، رسوبات ریز سفید رنگی که عمدتاً از زمینه کاملاً متمایز می‌باشند، مشاهده شد. شکل۵ و ۶ به‌ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی فلز جوش و این رسوبات و شکل۷ آنالیز نقطه‌ای آن‌ها را نشان می‌دهد. این رسوبات، شکل هندسی معینی ندارند و طول آن‌ها تقریباً ۲ میکرومتر اندازه‌گیری شد. رسوبات مذکور غنی از نیوبیوم بوده و می‌تواند، کاربید NbC باشند. هر چند که مقداری Ti نیز در آنالیز نقطه‌ای به چشم می‌خورد که ممکن است، کاربید کمپلکس از این عناصر را تشکیل دهد[۱و۳].



شکل (۵): تصویر SEM از ریزساختار فلز جوش ERNiCr-3



شکل (۶): تصویر SEM از رسوبات در فلز جوشERNiCr-3



شکل (۷): آنالیز عنصری رسوبات بین دندریتی فلز جوشERNiCr-3

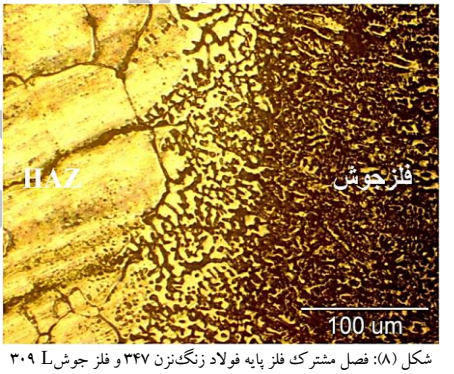
Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲- ریزساختار فصل مشترک فلزات پرکننده و پایه

۳-۲-۱- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش ۳۰۹L و AISI۳۴۷

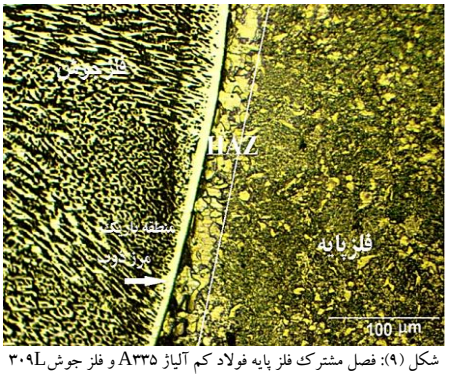
شکل۸، فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ و فلز جوش ۳۰۹L را نشان می‌دهد. مورفولوژی فریت دلتا که به‌صورت اسکلتی انجماد یافته است، به‌وضوح مشخص می‌باشد. فریت، در طول مرز دانه‌ها تشکیل شده است، این فریت در مرز دانه‌های HAZ، می‌تواند، رشد دانه‌ها را محدود کرده و احتمال ترک خوردن ذوبی HAZ را کاهش دهد [۱۱].



شکل (۸): فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ و فلز جوش۳۰۹L

۳-۲-۲- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش ۳۰۹L و A۳۳۵

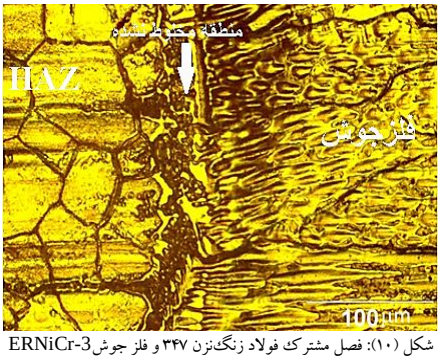
شکل۹ فصل مشترک فلز پایه فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ و فلز جوش ۳۰۹L را نشان می‌دهد، با توجه به شکل در HAZ فولاد کم آلیاژ، درشت شدن دانه‌ها به‌خوبی قابل مشاهده است، همان‌طور که مشخص است، مرز ناحیه انتقال خط ذوب در یک فاصله بسیار کوتاه (حدود یک میلی‌متر) به‌طور چشمگیری تغییر می کند. فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ دارای محتوای کربن بالاتر (پنج برابر) نسبت به فلز جوش ۳۰۹L می‌باشد. بنابراین در طی جوشکاری، مهاجرت کربن از HAZ به ناحیه ذوب وجود خواهد داشت. در این شرایط احتمال پیدایش یک ناحیه مارتنزیتی باریک در مرز ذوب دور از انتظار نمی‌باشد [۸].



شکل (۹): فصل مشترک فلز پایه فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ و فلز جوش۳۰۹L

۳-۲-۳- فصل مشترک فلز جوش ERNiCr-3 و فلزت پایه

شکل ۱۰ فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ و فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد، یک فصل مشترک کاملاً پیوسته در سرتاسر مرز جوش مشاهده می‌شود[۳]. در حد فاصل بین فلز پایه و فلز جوش یک منطقه مخلوط نشده وجود دارد، علت این امر آن است که بخشی از فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ که در مجاورت حوضچه وجود دارد، ذوب شده ولی بدون اینکه با فلز جوش مخلوط شود، دوباره منجمد می‌شود، بنابراین این منطقه ترکیب شیمیایی فلز پایه را دارا می‌باشد. منطقه مخلوط نشده با آنالیز نقطه‌ای بررسی گردید و مشخص شد، ترکیب شیمیایی این منطقه، مشابه فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ می‌باشد.



شکل (۱۰): فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ و فلز جوشERNiCr-3

Archive of SID
www.SID.ir

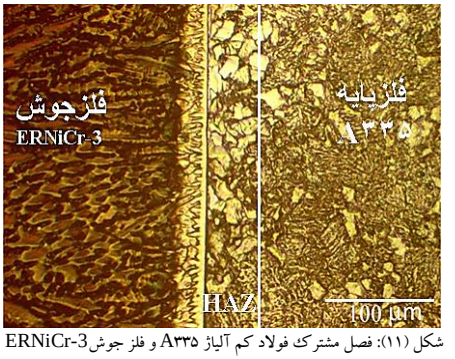
۳-۲-۴- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش ERNiCr-3 و فلز پایه فولاد کم آلیاژ A۳۳۵

شکل ۱۱ فصل مشترک فلز پایه فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ و فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد. اولین نکته قابل‌توجه در تصویر درشت شدن دانه‌ها در HAZ فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منطقه ذوب جزئی و منطقه مخلوط نشده در این قسمت از اتصال از عرض چندانی برخوردار نیستند.

۳-۳- ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات

۳-۳-۱- آزمایش خمش

نتایج حاصل از آزمایش خمش در جدول ۴ آورده شده است، هیچ‌گونه ترک غیر قابل قبولی در سطح نمونه‌ها مشاهده نگردید. تحقیقات [۸] نشان می‌دهد، اگر ریزساختار به‌دست آمده از جوش، میزان کمی فریت در اولین پاس خود دارا باشد، ترک خوردن انجمادی جوش دور از انتظار خواهد بود و فلز جوش به‌طور قابل ملاحظه‌ای انعطاف‌پذیر خواهد شد.



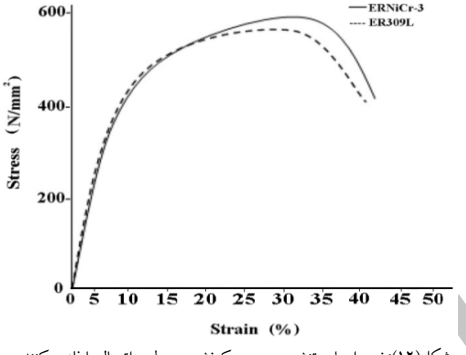
شکل (۱۱): فصل مشترک فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ و فلز جوشERNiCr-3

جدول (۴): نتایج حاصل از آزمایش خمش فلزات جوش

نمونه با فلز پرکننده	زاویه سنبه	جهت خمش	نتیجه
ER309L	۱۸۰°	رویه ریشه	قبول
ERNiCr-3	۱۸۰°	رویه ریشه	قبول

۳-۳-۲- آزمایش کشش

خواص کششی اتصالات جوشکاری شده برای دو اتصال غیرمشابه با فلزات پرکننده ERNiCr-3 و ER309L در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل(۱۲): نمودارهای تنش بر حسب کرنش مربوط به اتصال با فلز پرکننده ERNiCr-3و ER309L

در مقایسه با نمونه‌های معمول کشش، فرآیند تغییر شکل و شکست در نمونه‌های جوشکاری شده به‌خصوص در جوشکاری غیرمشابه که مرکب از نواحی مختلف با خواص و رفتار متفاوت است، پیچیده‌تر خواهد بود. رفتار هر کدام از مناطق موجود دریک اتصال می‌تواند بر روی مناطق مجاور آن تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال تطابق کرنش یک ناحیه نرم با ناحیه سخت مجاور آن می‌تواند دشوار بوده و تغییر شکل ناحیه نرم را محدود سازد. کارسختی ناشی از تغییر شکل کششی که ابتدا در ناحیه نرم‌تر رخ می‌دهد و تأثیر متقابل آن با ناحیه سخت می‌تواند، ناحیه شکست نهایی را به موقعیت متفاوت دیگری انتقال دهد. اولین نتیجه به‌دست آمده از آزمایش کشش این است که تمامی نمونه‌ها در فلز پایه A۳۳۵ و به‌خصوص در منطقه HAZ دچار شکست شدند. این بدین معنی است که ضعیف‌ترین قسمت اتصالات، فلز پایه A۳۳۵ می‌باشد. همان‌گونه که بررسی‌های ریزساختاری نشان داد، آلیاژ A۳۳۵ ریزساختاری فریت-پرلیتی دارد که ساختار همگنی نمی‌باشد. داده‌های به‌دست آمده از نمودارهای تنش- کرنش در

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۵ آمده است. همان‌طور که نتایج نشان داد، مهاجرت کربن منجر به شکل‌گیری یک ناحیه فریتی نسبتاً نرم بین فلز جوش قوی‌تر و فلز پایه می‌شود، همچنین کرنش‌های موضعی بالایی در این ناحیه متمرکز می‌شوند و در ادامه، لغزش مرز دانه رخ می‌دهد، که نهایتاً منجر به شکست، در HAZ فولاد کم آلیاژ می‌شود. در تمامی نمونه‌های مربوط به فلزات جوش در هر دو حالت، درصد بالایی از افزایش طول رخ داده و این به‌دلیل آن است که تسلیم در حین آزمایش کشش تمایل به شروع از محل نرم‌تر داشته است. درشت شدن دانه‌ها در منطقه HAZ فلز پایه می‌تواند، نرخ کارسختی را کم نموده و روند افزایش استحکام را در این منطقه با مشکل مواجه کند. هر چند تحقیقات [۱۱] نشان می‌دهد که شروع تغییر فرم از منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ شروع شده و تا فلز پایه ادامه می‌یابد. نرم بودن فولاد زنگ‌نزن آستنیتی باعث چنین پدیده‌ای می‌شود، به‌طوری‌که فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی با درصد ازدیاد طول تا ۵۰ درصد در اتصال با یک فولاد مستحکم‌تر از خود، دچار شکستگی در فلز پایه می‌گردند، درحالی‌که در فولادهای کربنی و کم آلیاژ شکست اکثراً در منطقه متأثر از حرارت اتفاق می‌افتد، زیرا درصد ازدیاد طول در این نوع فولادها زیاد نبوده و باعث ایجاد شکست در قسمت ضعیف‌تر که معمولاً منطقه متأثر از حرارت است می‌شود. با مطالعه مراجع [۵ و۱۰] مشخص شد، فلز تمام جوش ERNiCr-3 از ازدیاد طول و استحکام کششی بالاتری در مقایسه با فلزات پایه و فلز جوش ER309L برخوردار است. همچنین در طی آزمایش قسمت میانی نمونه دچار ازدیاد طول شده و بیشترین تنش اعمالی در این قسمت اعمال شده است که درنهایت منطقه مجاور جوش در سمت فلز پایه A۳۳۵ تسلیم شده و شکست در آن رخ داده است، همه این عوامل در کنار هم می‌تواند، روند شکست نمونه‌ها در منطقه HAZ فلز پایه A۳۳۵ را توجیه کند و به همین دلیل، در این تحقیق، قبل از اینکه فلز تحت مقدار قابل توجهی کشش پلاستیکی قرار گیرد، شکسته شد.

جدول (۵): نتایج حاصل از آزمایش کشش.

نوع فلز پرکننده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کشش (MPa)	درصد افزایش طول (٪)	محل شکست نمونه
فلز جوش ERNiCr-3	۴۲۷ ± ۱۰	۵۸۴ ± ۱۰	۴۴ ± ۲	HAZ A۳۳۵
فلز جوش ER309L	۴۴۴ ± ۱۰	۵۷۲ ± ۱۰	۴۲ ± ۲	HAZ A۳۳۵

۳-۳-۳- آزمایش ضربه

نتایج آزمایش ضربه چارپی برای فلزات جوش، در دمای ۲۷ و دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در جدول۶ ارائه شده است.

جدول (۶): میانگین نتایج حاصل از آزمایش ضربه فلزات جوش

نوع فلز جوش	انرژی ضربه (ژول) -۲۰°C	انرژی ضربه (ژول) °C +۲۷	نوع شکست
ERNiCr3	۸۶ ± ۱۲	۹۹ ± ۶	نرم
ER309L	۷۱ ± ۷	۸۳ ± ۸	نرم

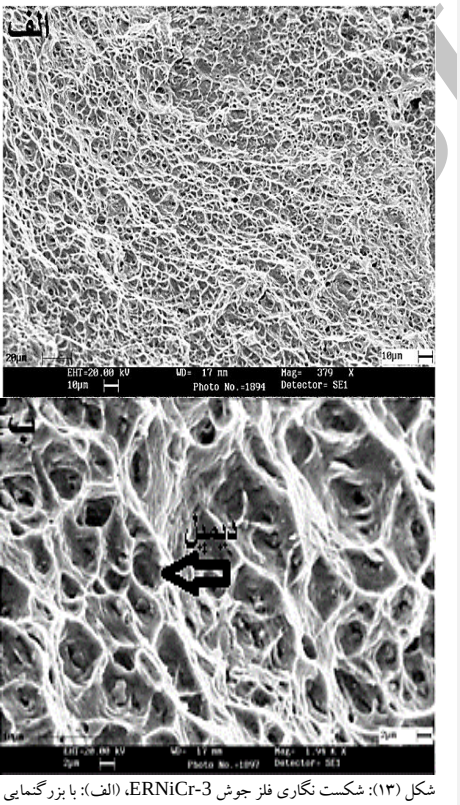
مقادیر انرژی شکست برای فلزات جوش نشان می‌دهد، شکست نرم برای تمامی آن‌ها رخ داده است و در بین فلزات جوش، فلز پرکننده ERNiCr-3 در هر دو دما، دارای بیشترین انرژی شکست ضربه می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطوح شکست فلزات جوش ERNiCr-3 و ER309L، به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. نوع شکست نرم، در هر دو نمونه قابل مشاهده است. این تصاویر شامل گودی‌های ریز و یکنواخت است که نشان می‌دهد، نمونه‌ها تحت اعمال فشار کششی در حالتی انعطاف‌پذیر شکسته می‌شوند. تصاویر سطح شکست فلز جوش ERNiCr-3، مشخصه‌های یک شکست نرم را ارائه می‌کند. حضور دیمپل‌های[۶] درشت در شکست ناحیه آستنیتی، نشان‌دهنده شکست کاملاً نرم[۷] این فاز است [۱۳-۱۲].

Commented [N2R1]:

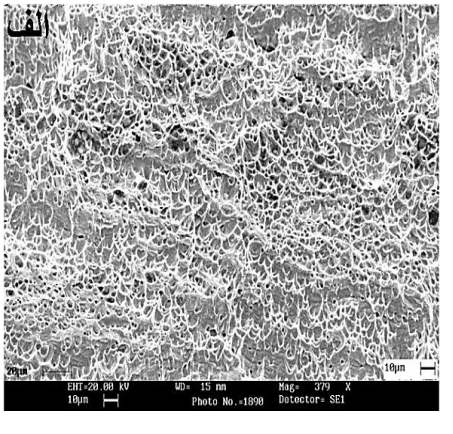
Commented [N1]:

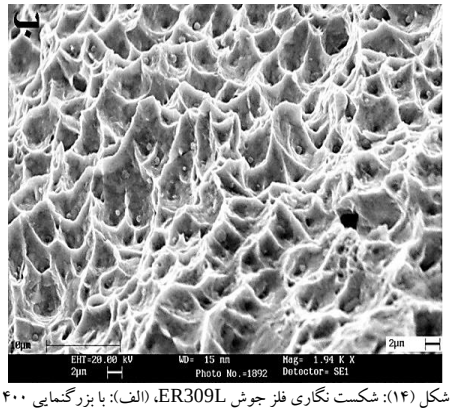
Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۱۳): شکست نگاری فلز جوش ERNiCr-3، (الف): با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر و (ب): با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر





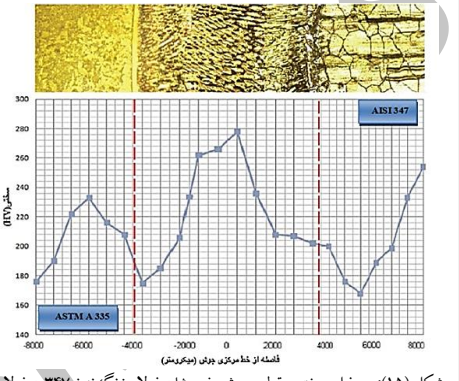
شکل (۱۴): شکست نگاری فلز جوش ER309L، (الف): با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر و (ب): با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر

۳-۳-۴- پروفیل سختی

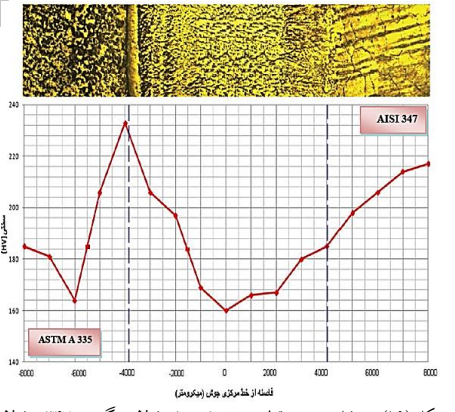
شکل ۱۵ و ۱۶ به ترتیب، پروفیل سختی مقطع جوش مربوط به نمونه جوش شده با فلز پرکننده ERNiCr-3 و ER309L را نشان می‌دهد. در فلز پایه ۳۴۷ سختی بالاتری مشاهده شد، این امر به دلیل عدم تأثیر حرارت به این منطقه و عدم وجود رسوبات در مرز دانه‌ها می‌باشد. با رسیدن به منطقه HAZ روند کاهش سختی مشاهده شد، که به علت درشت شدن دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت می‌باشد [۱۴]. با حرکت به سمت فلز جوش افزایشی در سختی ملاحظه شد. وجود فازهای بین فلزی و کاربیدهای عناصر موجود، ناشی از فلز پرکننده، می‌تواند، باعث این افزایش باشد. در داخل جوش و با حرکت به سمت مرکز جوش، سختی به‌شدت افزایش می‌یابد. ریزساختار ریزتر مناطق مرکزی به همراه منطقه دانه‌های هم‌محور و رسوبات ریز بین‌دندریتی از قبیل کاربید نیوبیوم سبب افزایش سختی در مرکز جوش می‌باشد. همچنین حضور دانه‌های سلولی بزرگ در نزدیکی خط ذوب باعث کاهش سختی در کناره‌های جوش می‌شود. با عبور از فلز پایه فولاد کم آلیاژ، به سمت HAZ یک افت سختی مشاهده شد که به دلیل درشت شدن دانه‌ها در این منطقه و همچنین ناشی از نفوذ کربن از فلز پایه به‌طرف فلز جوش و لذا افزایش فریت کم کربن در منطقه

Archive of SID
www.SID.ir

متأثر از حرارت می‌باشد، که مجدداً با رسیدن به فلز جوش، سختی دوباره افزایش می‌یابد.



شکل (۱۵): پروفیل سختی مقطع جوش غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ به فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ با فلز پرکننده ERNiCr-3



شکل (۱۶): پروفیل سختی مقطع جوش غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ به فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ با فلز پرکننده ER309L

برای نمونه با فلز جوش ۳۰۹L، با توجه به شکل، در طرف فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ در منطقه متأثر از حرارت کاهش سختی در اثر افزایش اندازه دانه‌ها اتفاق افتاده است. در قسمت‌های مرکزی جوش به‌واسطه ساختار آستنیتی، کمترین مقدار سختی مشاهده شد [۱۵-۱۶]. با نزدیک شدن به فلز پایه فولاد کم آلیاژ و افزایش مقدار کربن و وجود کاربیدها (کاربید کروم) سختی افزایش می‌یابد که این امر به علت تغییر در ترکیب شیمیایی بین فولاد A۳۳۵ و فلز پرکننده ۳۰۹L رقیق شده، می‌باشد. همچنین ناحیه باریکی از مارتنزیت، در طول مرز ذوب به وجود آمده که منجر به افزایش شدید در سختی این منطقه شده است. با رسیدن به منطقه متأثر از حرارت فولاد A۳۳۵ یک منطقه نرم و متشکل از دانه‌های بزرگ فریت، مشاهده می‌شود، سختی در HAZ با دانه‌های درشت کاهش یافته ولی با رسیدن به ساختار اولیه فلز پایه، مجدداً افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- انجماد فلز جوش ERNiCr-3 به‌صورت آستنیت اولیه بوده و در آن یک ساختار دوفازی شامل دندریت‌ها و مناطق بین دندریتی دیده می‌شود که در مناطق بین دندریتی رسوبات NbC و کاربیدهای کمپلکس تشکیل شده است. ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ER309L به‌صورت فریت اولیه همراه با مقداری آستنیت در پایان انجماد است و دارای ساختاری با مورفولوژی فریت اسکلتی می‌باشد.

۲- در فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷، برای فلز پرکننده ۳۰۹L، فریت تشکیل شده در طول مرز دانه‌های HAZ رشد دانه‌ها را محدود کرده و احتمال ترک خوردن ذوبی HAZ را کاهش داد. برای فلز جوش ERNiCr-3 در حد فاصل بین فلز پایه و فلز جوش یک منطقه مخلوط نشده به وجود می‌آمد.

۳- در فصل مشترک فولاد کم آلیاژ A۳۳۵ در طی جوشکاری، برای فلز پرکننده ۳۰۹L، مهاجرت کربن از HAZ به ناحیه ذوب وجود داشت که در این شرایط یک ناحیه مارتنزیتی باریک در مرز ذوب تشکیل گردید. برای فلز جوش ERNiCr-3 منطقه ذوب جزئی و منطقه مخلوط نشده از عرض چندانی برخوردار نبود.

۴- در آزمایش کشش، تمامی نمونه‌ها، از منطقه HAZ فلز پایه فولادکم آلیاژ A۳۳۵ و به‌صورت نرم دچار شکست شدند. فلز پرکننده ERNiCr-3 در دمای ۲۰- و ۲۷ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین انرژی شکست ضربه بود. همچنین فلز جوش

Archive of SID

www.SID.ir

ERNiCr-3 بیشترین مقدار سختی را دارا بود.

۵- بررسی‌ها نشان داد برای اتصالات بین فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ و فولاد کم آلیاژ A۳۳۵، ماده‌ی پرکننده‌ی ERNiCr-3 خواص بهینه‌ای را ارائه می‌دهد.

۵- مراجع

[1] H. ShahHosseini, M. Shamanian & A. Kermanpur, "Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds", Materials Characterization, Vol. 62, pp. 425-431, 2011.

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

[3] H. Naffakha, M. Shamaniana & F. Ashrafizadeh, "Dissimilar Welding of AISI 310 Austenitic Stainless Steel to Nickel-Based Alloy Inconel 657", Journal of Materials Processing, Vol. 209, pp. 3628-3639, 2008.

[4] N. Arivazhagan & S. SurendraSingh, "Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding", Materials and Design, Vol. 32, pp. 3036–3050, 2011.

[5] R. L. Klueh & L. King, "Austenitict Stainless Steel-Ferritic Steel Weld Joint Failures", Welding Journal, Vol. 61, pp. 302-311, 1982.

[6] A. A. Omar, "Effects of Welding Parameters On Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds", Welding Journal, Vol. 77, pp. 86-93, 1998.

[7] V. Kumslytis, A. V. Valiulis & O. Cernasejus, "The strength-related characteristics of chromium molybdenum P5 steel dependence on postweld heat treatment parameters", Echanika, pp. 27-30, 2008.

[8] ASME Sec IX, "Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure, Article II, Welding Procedure Qualification", American Society of Mechanical Engineers, Edition: 2th, 2001.

[9] ASM Handbook, "Metallography and Microstructures", ASM International, Materials Park, Ohio, Vol. 9, 2002.

[10] R. Dehmolaie, M. Shamanian & A. Kermanpour, "Microstructural characterization of dissimilar welds alloy 800 and HP heat–resistant steel", Materials Characterization, Vol. 59, pp. 1447-54, 2008.

[11] H. Muesch, "Welding of material grade TP 347", Nuclear Engineering and Design, Vol. 2, pp. 155-161, 2003.

[12] M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh & M. J. Hamedi, "Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels", Materials and Design, Vol. 34, pp. 666–672, 2011.

[13] M. Tan, E. Akiyama, H. Habazaki & A. Kawashima, "The role of chromium and molybdenum in passivation of amorphous Fe-Cr-Mo-P-C alloys in deaerated 1 M HCl", Corrosion Science, Vol. 38, pp. 2137-2151, 1996.

[14] G. Kaishu, X. Xiaodong, X. Hong & W. Zhiwen, "Effect of aging at 700 °C on precipitation and toughness of AISI 321 and AISI 347 austenitic stainless steel welds", Nuclear Engineering and Design, Vol. 23, pp. 2485–2494, 2005.

[15] L. LI & R. Messler, "Segregation of Phosphorus and Sulfur in Heat-Affected Zone Hot Cracking of Type 308 Stainless Steel", Welding Journal, pp. 78-84, 2002.

[16] U. Anwar, M. Hani & M. Tawancy, "Nureddin M. Abbas, Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows", Engineering Failure Analysis, Vol. 12, pp. 181–191, 2005.

۶- پی نوشت

[1] Intergranular corrosion
[2] Arivazhagan
[3] Klueh
[4] Heat Exchangers
[5] Heat affected zone (HAZ)
[6] Dimple
[7] Fully Ductile Fracture

Archive of SID

www.SID.ir

The evaluation of mechanical properties of dissimilar welded AISI 347 stainless steel to ASTM A335 low alloy steel

Iman Hajiannia[1], Mohamad Reza Pakmanesh[2], Morteza Shamanian[1], Masoud Kasiri[3]

1- Ph.D. Student, Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2- M.Sc., Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran
3- Professor, Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
4- Associate Professor, Department of Material Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
*Corresponding author: i.hajiannia@ma.iut.ac.ir

Abstract

In this study, the mechanical properties of dissimilar welding of austenitic stainless steel AISI 347 to low alloy steel ASTM A335 prepared by gas tungsten arc welding process using direct current electrode negative polarity have been investigated. For this purpose, two filler metals including ER309L and ERNiCr-3 were used. In order to achieve suitable structure and excellent mechanical properties in the mentioned joints, controlling of the heat input and preheating were among the effective and controllable parameters. The microstructure of the base metals and weld metals, were evaluated using optical microscopy and scanning electron microscopy was used to analyze fracture surface. Microstructural evaluations showed that a two-phase structure consisting of dendritic and inter-dendritic regions with primary austenite solidification in ERNiCr-3 weld metal, and the primary skeleton-shaped ferrite with austenitic matrix in the 309L weld metal was observed. Also mechanical properties including the bend test, ultimate strength, impact resistance and hardness were investigated. All the specimen underwent ductile fracture in HAZ in the tension test. The maximum fracture energy related to the ERNiCr-3 the welded specimen. The maximum and minimum hardness corresponded to the ERNICr-3 and ER309L, respectively. Finally, it can be calculated that for the joints, between the austenitic stainless steel AISI 347 to low alloy steel A335, the ERNICr-3 filler provided the optimum qualities.

Keyword:
Dissimilar Welding, Austenitic Stainless Steel, Low Alloy Steels, Mechanical Properties.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:
Iman Hajiannia, Mohamad Reza Pakmanesh, Morteza Shamanian, Masoud Kasiri, The evaluation of mechanical properties of dissimilar welded AISI 347 stainless steel to ASTM A335 low alloy steel, in Persian, New Process in Material Engineering, 2018, 12(2), 1-13.

Archive of SID

www.SID.ir