

ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنک نزن آستنیتی ۳۱۶L

مهدی باباجانی^{۱*}، مرتضی شمعانیان^۲، مسعود کثیری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

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

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*Babajani.mahdi@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۵)

چکیده

در این پژوهش اتصال جوشکاری سوپر آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنک نزن آستنیتی ۳۱۶L به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با دو فلز پرکننده ۶۲۵ (ERNiCrMo3) و فولاد زنک نزن آستنیتی ER308L بررسی گردید. بررسی‌ها نشان دهنده ساختار دندریتی در فلز جوش اینکونل ۶۲۵ و سلولی-دندریتی در ساختار فلز جوش ۳۰۸L بود و هیچ گونه ترک انجمادی در ساختارها مشاهده نشد. در فصل مشترک فلزهای جوش با فلز پایه به جز فصل مشترک فلز پایه ۳۱۶L با فلز جوش ۳۰۸L درشت شدن دانه‌ها مشاهده شد. از نظر خواص مکانیکی فلز جوش جوشکاری شده با سیم جوش اینکونل ۶۲۵ با استحکام نهایی ۵۶۲/۵ مگاپاسکال، دارای خواص مکانیکی بهتری بود.

کلمات کلیدی:

اینکلوی ۸۲۵، فولاد زنک نزن آستنیتی ۳۱۶L، جوشکاری غیرمشابه، آنیل انحلالی، رشد رونشینی، مرز دانه های فرعی.

۱- مقدمه

است که قابلیت ماشین کاری و جوش پذیری خوب همراه با مقاومت به خوردگی در دمای بالا، موجب کاربرد گسترده آن در صنایعی مانند لوله سازی، خطوط انتقال گاز ترش، محیط های حاوی اسید سولفوریک، صنایع پتروشیمی، صنایع نظامی و باز

سوپر آلیاژ به آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن-نیکل و پایه کبالت گفته می شود که دارای مقاومت به خوردگی، استحکام خوب و مقاومت به خزش هستند. یکی از سوپر آلیاژها که در دسته بندی آلیاژهای استحکام یافته با محلول جامد قرار دارد اینکلوی ۸۲۵

H۸۰۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ را با پرکننده اینکونل ۸۲ و ۶۱۷ بررسی و پرکننده ۶۱۷ را مناسب‌تر معرفی نمود [۳]. بنابراین از آنجا که تاکنون پژوهش مدون و کاملی بر روی اتصال غیرمشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L انجام نشده، لزوم شناسایی و بررسی خصوصیات سیم جوش‌های مناسب برای این اتصال پرکاربرد به اثبات می‌رسد. در این تحقیق به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی این اتصال با استفاده از دو فلز پرکننده پایه نیکلی و پایه آهنی پرداخته شد و فلز پرکننده مناسب انتخاب گردید.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

بر اساس مراجع و استانداردها از جمله AWS برای اتصال، سیم جوش اینکونل ۶۲۵ و سیم جوش آستنیتی L۳۰۸ انتخاب شد. در ابتدا از فلزات پایه و سیم جوش‌ها در حالت رقیق نشده مطابق با جدول ۱ آنالیز کوانتومتری به عمل آمد. همچنین جهت اطمینان، از فلز تمام جوش حاصله از سیم جوش‌ها، آنالیز صورت گرفت.

فرآوری سوخت اتمی شده است. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی از جمله پرمصرف‌ترین مواد مهندسی جهت جایگزینی سوپرآلیاژها هستند که به دلیل خواص مشابه و نیز در الویت قرار دادن الزامات فرایند و مباحث اقتصادی امکان اتصال غیرمشابه را به سوپرآلیاژهای پایه نیکل-آهن فراهم می‌کنند. از جمله روش‌های اتصال جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) با تمرکز حرارتی بالا می‌باشد. اهمیت اتصال غیرمشابه سوپرآلیاژهای پایه نیکل-آهن به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی همواره مورد پژوهش‌های مختلف قرار گرفته است. چنانچه دهملایی به بررسی اتصال فولاد HP و اینکلوی ۸۰۰ پرداخته و فلز پرکننده اینکونل ۸۲ را به عنوان فلز پرکننده مناسب معرفی نموده است [۱]. همچنین سیرشا و همکاران ریزساختار جوش‌های غیر همجنس بین فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶LN و آلیاژ ۸۰۰ را با سه نوع پرکننده بررسی کردند و در نهایت دریافتند اینکونل ۸۲ و ۱۸۲ و نیز ۳۱۶ هر سه قابلیت اتصال این دو آلیاژ را به هم با خواص متفاوت فراهم می‌آورند [۲]. در پژوهشی سایر، ریزساختار جوشکاری غیرمشابه اینکلوی

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده مورد استفاده در اتصال اینکلوی ۸۲۵ به فولاد ۳۱۶L

	Fe	Ni	Cr	Mo	Mn	Cu	Ti	C	Si	P	S	AL	Co	Nb	V	W
اینکلوی ۸۲۵	۳۱/۲۸	پایه	۲۲/۰۵	۲/۲۸ ۳	۰/۷۲ ۰	۰/۱۸ ۲	۰/۶۴ ۰	۰/۰۱ ۰	۰	۰	۰	۰/۱۲ ۰	۰	۰	۰	۰
فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L		۱/۴ ۰	۱۶/۳	۰/۰۵ ۲	۰/۲۴ ۱	۰/۲۶ ۰	۰/۰۱ ۰	۰/۰۳ ۰	۰/۳۸ ۰	۰/۰۴ ۰	۰/۰۱	۰/۰۷ ۰	۰/۱۲ ۰	۰/۰۱ ۰	۰/۰۵ ۰	۰/۱۰ ۰
فلز پرکننده ۶۲۵	<۰/۵	پایه	۲۲	۸	۰/۰۵ <	۰/۰۵ <	۰	۰/۰۱	۰/۰۵ <	۰/۰۲ ۰	۰/۰۱ <	۰/۰۴ <	۰	۰/۰۴ <	۰/۰۴ <	۰
فلز پرکننده ۳۰۸L	پایه	۱۰	۲۰	۰/۰۱	۱/۰۶	۰	۰	۰/۰۱ ۰	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

شکل ۷ با استفاده از سنگ فرز تهیه شدند. زاویه هر ورق در ناحیه شیار جوش ۳۵ درجه و در مجموع ۷۰ درجه و عرض و ارتفاع ریشه جوش یک میلیمتر در نظر گرفته شد. صحت پخ‌سازی و

برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه، قطعاتی به اندازه ۶*۶*۳۰۰ میلیمتر با استفاده از دستگاه ورق بر، برشکاری شد. به منظور انجام عملیات جوشکاری ذوبی ورق‌ها برای اتصال لب به لب با شیار

الکتروود تنگستنی با گاز محافظ آرگون و قطبیت منفی الکتروود (GTAW-DCEN) در دو پاس، پاس ریشه نفوذی و یک پاس رویه پرکننده انجام شد. دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. مشخصات جوشکاری نمونه ها مطابق جدول ۲ انتخاب و عمل گردید. همچنین پس از انجام جوشکاری، آزمون مایع نافذ انجام و سطح عاری از ترک های سطحی بود.

عدم وجود ترک در نمونه ها توسط آزمایش مایع نافذ مورد بررسی قرار گرفت. آلودگی ها و چربی های احتمالی در سطح قطعات و سیم جوش ها با استون و سطوح اکسید منطقه جوش و اطراف آن توسط سنگ دستی برطرف شد. جهت مهار و جلوگیری از تاب برداشتن ورق ها در هنگام جوشکاری با توجه به ابعاد و ضخامت ورق ها از قید و بند استفاده شد. جوشکاری نمونه ها بدون پیشگرم و با استفاده از روش جوشکاری قوسی -

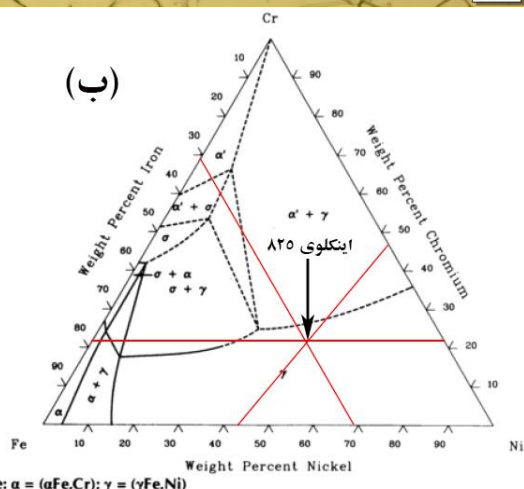
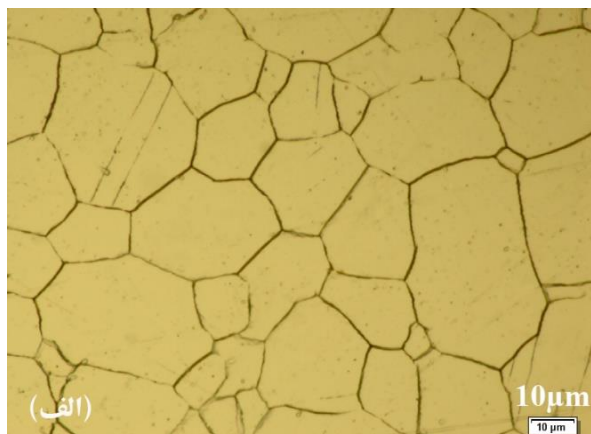
جدول (۲): مشخصات جوشکاری نمونه ها در اتصال اینکلوی ۸۲۵ به فولاد L ۳۱۶

	فلز پرکننده	NiCrMo3(625)	NiCrMo3(625)	۳۰۸L	۳۰۸L
	شماره پاس	۱	۲	۱	۲
پارامترهای جوشکاری	جریان (آمپر)	۱۷۰	۱۵۰	۱۷۰	۱۵۰
	ولتاژ (ولت)	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱
	سرعت جوشکاری (mms^{-1})	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۴
	گرمای ورودی (kJmm^{-1})	۱/۱۵	۰/۸۷	۱/۰۶	۰/۸۲
	Shielded Gas	Perching gas	Past Gas	Time of Perching gas	
Fixture (پاس ریشه)	۱۰ Lit/min	-	-	-	
Instrument (پاس ریشه)	۱۵ Lit/min	۱۵ Lit/min	۱۵ s	۱S	
Fixture (پاس رویه)	۹ Lit/min	-	-	-	
Instrument (پاس رویه)	۱۵ Lit/min	۱۵ Lit/min	۱۵ s	۱S	
زاویه فیلر در پاس ریشه	زاویه فیلر در پاس رویه	در Gun زاویه پاس ریشه	در Gun زاویه در پاس رویه	خلوص گاز آرگون	
۴۰ (درجه)	۳۰ (درجه)	۸۰ (درجه)	۷۰ (درجه)	۹۹/۹۹۹۹	

در ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده منجر به استفاده از محلول های اچ متفاوت گردید. بدین صورت که از محلول ۱۰۰ میلی لیتر آب همراه با ۱۰ گرم اکسید کرم با اختلاف پتانسیل ۵ ولت در مدت ۱۰ ثانیه برای مشاهده ساختار آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ و محلول ۱۵ گرم اسید اگزالیک همراه با ۸۵ میلی لیتر آب با اختلاف پتانسیل ۵ ولت برای مدت ۳۰ ثانیه برای مشاهده ساختار فولاد زنگ نزن آستینیتی و فلز پرکننده آن و برای مشاهده فریت

ابتدا و انتهای نمونه های جوشکاری به اندازه دو سانتیمتر جدا و سپس نمونه مورد نیاز آزمون ها تهیه شد. نمونه های متالوگرافی به صورت عرضی از مقطع جوش جدا و متالوگرافی بر اساس استاندارد ASTM E3-05 انجام شد. بدین صورت که سطوح با سنباده های کاربرد سیلیسیم ۲۵۰۰-۱۰۰ صاف و سپس با اسپری و دستگاه پولیش پرداخت شدند. سپس برای مشاهده ساختار متالوگرافی از الکترواچ استفاده شد. تفاوت

نوع دانه‌بندی نتیجه فرآیند آنیل انحلالی انجام شده بر روی آلیاژ است. این آلیاژ پس از تولید به روش نورد گرم یا سرد، تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفته است تا رسوبات، ناهمگنی‌ها و جدایش‌های میکرو و ماکرو به وجود آمده در اثر فرآیند تولید از بین برود. از آنجا که نمونه در حالت آنیل بوده است و آنیل انحلالی علاوه بر یکنواختی در ترکیب شیمیایی، در اثر وقوع فرآیند تبلور مجدد، ساختاری با دانه‌های هم‌محور ایجاد و با افزایش زمان آنیل دانه‌ها فرصت رشد یافته و در نهایت ساختاری شامل دانه‌های هم‌محور به وجود آورده است. علاوه بر این، دوقلوبی‌هایی ناشی از آنیل در سرتاسر ساختار به چشم می‌خورد. به دلیل جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها توسط این نوع دوقلوبی‌ها استحکام ماده تا حدودی افزایش می‌یابد [۵].



شکل (۱): (الف): ریزساختار اینکلوئید ۸۲۵ اچ شده با محلول ماربل و (ب): دیاگرام سه جزئی ایزوترمال نیکل-کروم-آهن در ۶۵۰ درجه سانتیگراد [۴]

دلتا نیز محلول ۱۰ میلی لیتر هیدروکسید آمونیوم با ۹۰ میلی لیتر اتانول در اختلاف پتانسیل ۱۵ ولت در مدت ۴۰ ثانیه توسط کاتد فولاد زنگ نزن استفاده شد. همچنین تعدادی از نمونه‌ها پس از پولیش، الکتروپولیش و سپس نمونه اینکلوئید ۸۲۵ با محلول ماربل و فولاد زنگ نزن آستیتی ۳۱۶L با محلول Braha's اچ شد. متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری Olympus GX71 و با نرم افزار DP2-BSW انجام شد.

برای آزمون کشش، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E-8M در ابعاد ۶*۱۰*۱۰۰ و طول سنجه ۳۲ میلیمتر تهیه و با دستگاه کشش Instron 4486 با نرخ کرنش ۳ میلی متر بر دقیقه آزمون انجام شد. تنها آزمون سختی قابل انجام بر روی نمونه‌ها (با توجه به ابعاد) به صورت میکرونوپ (HKM) و یا میکروویکرز (HVM) می‌باشد، که از آزمون سختی سنجی به روش میکروویکرز با دستگاه میکروسختی سنج AFRR1 مدل DM8B استفاده شد که جهت بالابردن دقت آزمون از سیستم CCD و مانیتورینگ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریز ساختار فلزات پایه

۳-۱-۱- اینکلوئید ۸۲۵

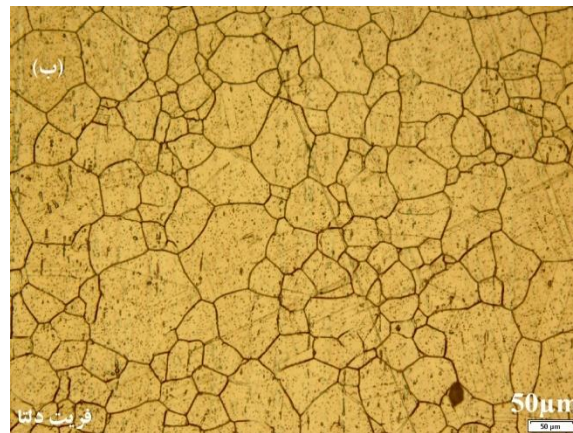
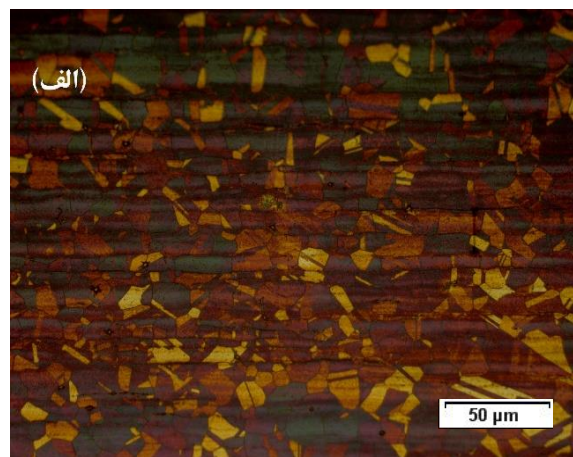
شکل ۱ (الف) تصویر متالوگرافی اینکونل ۸۲۵ اچ شده با محلول ماربل است. ساختار شامل دانه‌های هم‌محور آستیت (فاز گاما) می‌باشد.

به منظور بررسی دقیق ساختار اینکلوئید ۸۲۵ نمودار سه جزئی Ni-Cr-Fe از ASM Handbook Vol 3 مربوط به دیاگرام فازی آلیاژها استخراج و متناسب با ترکیب شیمیایی، ساختار آلیاژ اینکلوئید ۸۲۵ بدست آمد (شکل ۱ (ب)).

همان گونه که در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌شود اینکلوئید ۸۲۵ در حال انجماد تعادلی دارای ساختاری کاملاً آستیتی می‌باشد. اما از آنجا که آلیاژهای تجاری مورد استفاده در شرایط انجماد تعادلی قرار ندارند به طور معمول در اثر نوسان غلظتی دارای مقداری فاز آلفا نیز هستند ولی عمده ساختار، آستیتی می‌باشد.

۳-۱-۲- فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L

تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی در شکل ۲(الف) نشان داده شده است. ریز ساختار شامل زمینه کاملاً آستنیتی بوده و از دانه های هم محور تشکیل شده است. همچنین دوقلویی های آنیل ناشی از فرایند آنیل انحلالی در سرتاسر ساختار به چشم می خوردند همچنین شکل ۲(ب) وجود رشته فریت دلتا(δ) را نشان می دهد. وجود فریت دلتا روند به وجود آمدن فاز سیگما(σ) در آلیاژ را، پس از فرار گرفتن در محدوده دمایی ۹۰۰-۶۰۰ درجه سانتیگراد تسریع می کند که منجر به کاهش انعطاف پذیری و چقرمگی آلیاژ خواهد شد [۶].

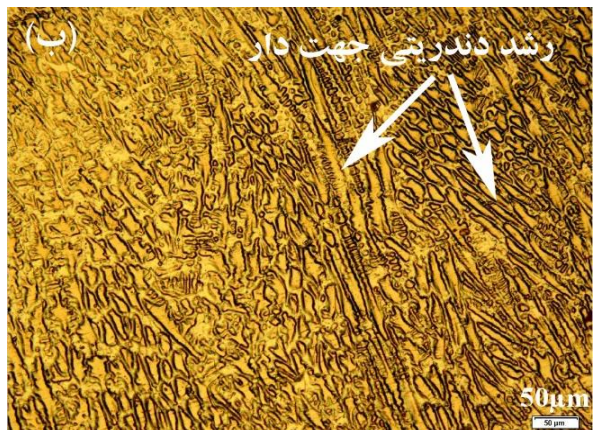
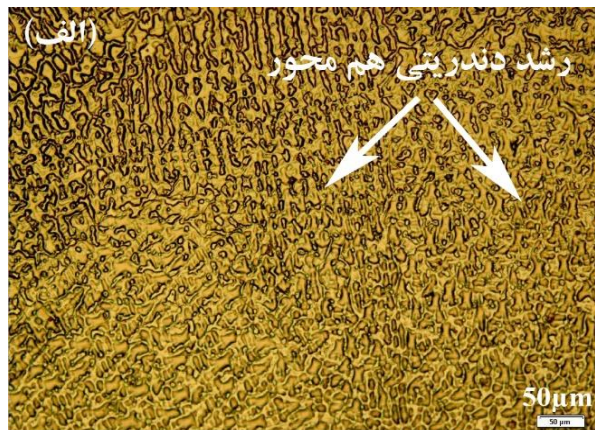


شکل ۲: ریز ساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L: (الف): دانه های هم محور ناشی از فرایند آنیل اچ شده با محلول Braha's و (ب): اچ شده با محلول خاص فریت دلتا (محلول ۱۰ میلی لیتر هیدروکسید آمونیوم همراه با ۹۰ میلی لیتر اتانول در ولتاژ ۱۵ ولت در مدت زمان ۴۰ ثانیه توسط کاتد فولاد زنگ نزن)

۳-۲- ریز ساختار فلز جوش

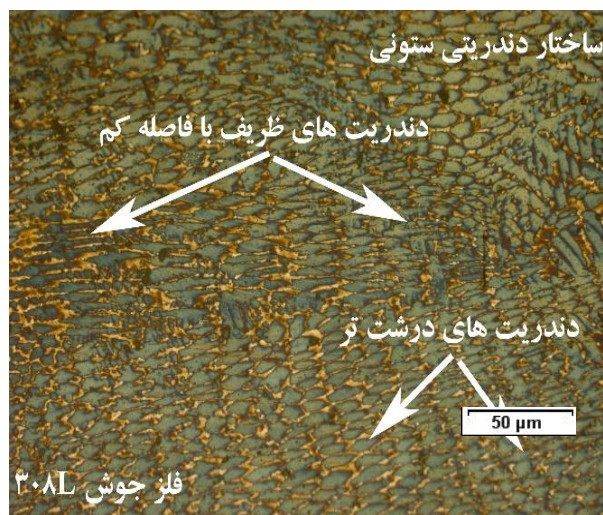
۳-۲-۱- فلز جوش اینکونل ۶۲۵

ساختار فلز جوش اینکونل ۶۲۵ در سه ناحیه مرکز، نزدیک به ریشه و کناره جوش در مجاورت فلز پایه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳: ریز ساختار حاصل از فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵: (الف): مرکز جوش، (ب): ریشه جوش و (ج): کناره جوش

مشخص شده است. این مشخصه انجماد به صورت آستنیت اولیه است که به خاطر جدایش عناصر آلیاژی و عناصر ناخالصی است که در طی انجماد رخ داده و همچنین ناشی از نفوذ پذیری به نسبت پایین این عناصر در دمای بالا است، به طوری که جدایش ایجاد شده در طی انجماد، پایدار باقی می ماند [۷].



شکل (۴): تصویر متالوگرافی فلز جوش ۳۰۸L اچ شده با Brahma's

در شکل ۴ انجماد از نوع A است که آستنیت اولیه تشکیل و طی سرد شدن تا دمای محیط باقی مانده است که حاکی از یک ریز ساختار دندریتی ستونی است که در حین انجماد متناسب با شیب دمایی و درجه ی تحت تبرید ترکیبی تشکیل شده است. نکته جالب توجه در این تصویر فاصله بین بازوهای دندریتی است که در قسمت پایین تصویر بازوها درشت تر و با فاصله بیشتری از هم قرار دارند و در میانه تصویر این بازوها ظریف تر و با فاصله کمتری از هم تشکیل شده اند. فاصله بین بازوهای دندریت ها یا سلول ها نیز، نظیر حالت انجماد در سرتاسر منطقه ذوب می تواند تغییر کند. از آنجا که GCL گرادیان دمایی در خط مرکزی جوش و GFL گرادیان دمایی در خط ذوب و RCL نرخ رشد (نرخ انجماد) در خط مرکزی و RGL نرخ رشد در خط ذوب معرفی می گردد و نیز $GCL << GFL$ و $RCL >> RFL$ بنابراین:

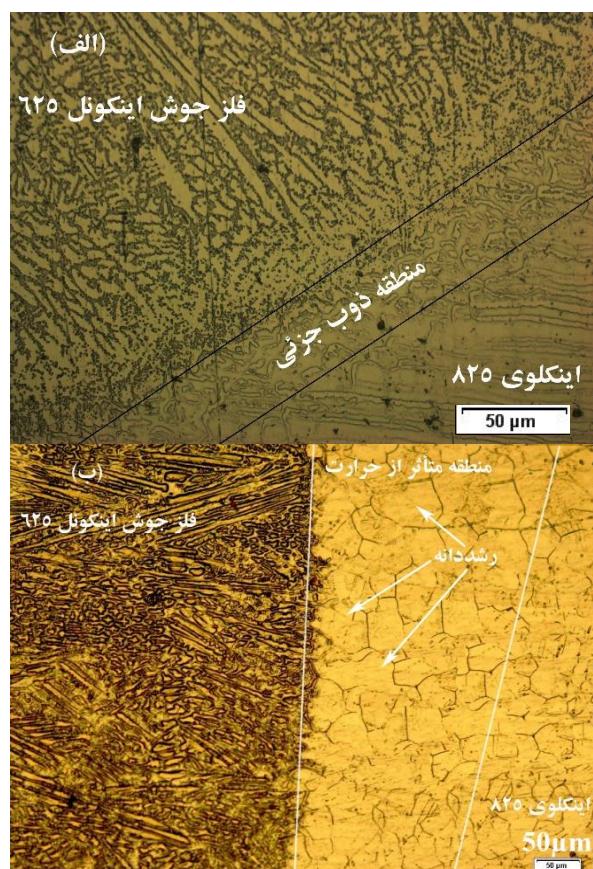
$$(G \times R) CL > (G \times R) FL \quad (1)$$

در شکل ۳ یک ساختار به طور کامل آستنیتی به صورت دندریتی و بسته های دندریتی به وضوح قابل مشاهده است که ساختاری مورد انتظار از فلز جوش می باشد. تفاوت در نسبت شیب دمایی به نرخ انجماد (G/R)، نقطه تمایز هر یک از آن ها می باشد. در شکل ۳(الف) مربوط به مناطق مرکزی جوش، دندریت ها به صورت هم محور و منظم رشد یافته است که ناشی از کم بودن نسبت شیب دمایی به نرخ انجماد در نواحی مرکزی جوش است. در شکل ۳(ب)، مربوط به ناحیه نزدیک به ریشه جوش، دندریت ها مشاهده می شود که به صورت جهت دار و در جهتی که انتقال حرارت بیشتر بوده، رشد یافته اند. مطابق انتظار چون در هنگام جوشکاری پاس ریشه، کلیه قسمت ها از قبیل فلز پایه و قیدو بند جوشکاری، در دمای محیط قرار داشته اند انتقال حرارت نیز بیشتر به سمت پایین و تا حدی کناره ها بوده است. لازم به ذکر است پس از اتمام پاس ریشه به مدت ۱۵ ثانیه گاز محافظ آرگون دمش شده است که همین امر به انتقال حرارت بیشتر کمک کرده است که می تواند منجر به رشد بیشتر دندریت ها به سمت پایین شده باشد. در شکل ۳(ج) مربوط به کناره جوش، نیز ساختاری دندریتی دیده می شود که به دلیل جهت انتقال حرارت که به سمت فلز پایه بوده است دندریت ها در جهت عمود بر خط جوشکاری رشد نموده اند و با وجود ساختاری مشابه با سایر قسمت ها اما در جهتی متفاوت رشد یافته اند.

۳-۲-۳- فلز جوش ۳۰۸L

به طور کلی نوع انجماد در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به عواملی همچون ترکیب شیمیایی و فاکتورهای سینتیکی همچون سرعت سرد شدن بستگی خواهد داشت.

هنگامی که انجماد به صورت آستنیت اولیه رخ می دهد، امکان ایجاد دو ریز ساختار فلز جوش آستنیت (A) و آستنیت-فریت (AF) ممکن است. اگر ریز ساختار در پایان انجماد کاملاً آستنیتی باشد، طی سرد کردن تا دمای محیط، آستنیتی باقی می ماند و هنگامی که متالوگرافی آن مشاهده می شود، یک ریز ساختار انجمادی قابل تشخیص است. این حالت انجماد نوع A



شکل (۵): (الف): منطقه ذوب جزئی در فصل مشترک اینکلوی ۸۲۵ با فلز جوش اینکلونل و (ب): تصویر متالوگرافی منطقه متأثر از حرارت مربوط به آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ با فلز جوش اینکلونل ۶۲۵

۳-۳-۲- ریز ساختار فصل مشترک فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L با فلز جوش اینکلونل ۶۲۵

در شکل ۶، ناحیه PMZ به صورت نوار روشن در کناره جوش قابل مشاهده است. در این ناحیه فلز پایه ذوب شده، راکد بوده و با فلز پرکننده مخلوط نشده است. جریان موضعی سیال در حین جوشکاری به اندازه کافی برای مخلوط شدن کامل، کافی نیست و در نتیجه پس از انجماد به دلیل تمایز در ترکیب شیمیایی بین فلز پرکننده و فلز پایه و ذوب موضعی به صورت نوار روشن در کناره جوش دیده می شود.

لیپولد و همکاران مکانیزم ذوب ناشی از جدایش را برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی پیشنهاد داده اند. در چنین مکانیزمی عناصر آلیاژی و یا ناخالصی که نقطه ذوب فلز پایه را کاهش داده

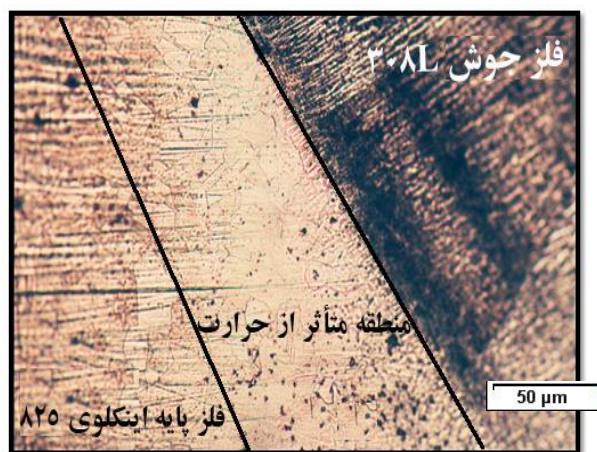
که در این رابطه $G \times R$ بیانگر نرخ سرد شدن است. بر اساس رابطه ۱ نرخ سرد شدن در خط مرکزی جوش بیشتر و در خط ذوب کمتر است. بر این اساس فاصله بین بازوی دندریت ها از خط ذوب به سمت خط مرکزی جوش کاهش می یابد، زیرا با افزایش نرخ سرد شدن، فاصله بین بازوهای دندریت کاهش می یابد [۸-۹].

۳-۳-۳- ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه اینکلونل ۶۲۵

در شکل ۵ (الف) ساختار فصل مشترک فلز جوش اینکلونل ۶۲۵ با فلز پایه اینکلوی ۸۲۵ نمایش داده شده است. منطقه ذوب جزئی (PMZ)، منطقه ای خارج از فلز جوش و بلافاصله پس از آن است، که حین جوشکاری، ذوب شدن می تواند به وجود آید که در شکل مشخص شده است.

در تصویر ۵ (ب) مکانیزم رشد از نوع اپی تکسیال قابل تشخیص است و رشد دانه ها در امتداد دانه های فلز پایه روی داده است. در اینجا اتم ها به سرعت بر روی موقعیت های شبکه بلوری فلز پایه رسوب می کنند. به عبارت دیگر شیب دمایی زیاد در حوضچه ی جوش باعث جلوگیری از جوانه زنی شده و لذا هر دانه ابتدا به صورت ادامه ی یکی از دانه های موجود در بخشی از مرز ذوب که در آن پهنای جوش از همه بیشتر است، تشکیل می شود. در این حالت با حرکت مرز ذوب به طرف جلو، دانه ها به صورت ستونی رشد می کنند. به همین دلیل این نوع مکانیزم انجماد را رشد روشینی می نامند و این گونه تجسم می شود که دانه های ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به هم پیوسته اند زیرا تعدادی از دانه های فلز پایه به داخل حوضچه ی مذاب رشد کرده و باعث انجماد شده اند [۶]. همچنین می توان مشاهده کرد که نسبت G/R زیاد و انتقال حرارت جهت دار در کناره جوش منجر به رشد ستونی فلز جوش در کناره شده است و نیز در اثر حرارت ناشی از جوشکاری و نرخ انتقال حرارت پایین اینکلوی ۸۲۵ رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت رخ داده است.

را نمایان سازد سبب شد تا در تصویر متالوگرافی شکل ۷ فلز جوش به وضوح قابل مشاهده نباشد. در منطقه ذوب جزئی ملاحظه می‌شود که فلز پایه ذوب شده و با فلز پرکننده مخلوط نشده است و پس از انجماد به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی بین فلز پرکننده و فلز پایه و ذوب موضعی به صورت ناحیه ای متمایز از سایر قسمت ها در کناره جوش به وجود آمده است. با دقت در شکل ۷ و مقایسه آن با شکل ۱ (الف) تفاوت اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه به وضوح مشخص می‌گردد. دانه های درشت‌تر ناشی از نرخ انتقال حرارت کمتر فلز پایه ۸۲۵ است که فرصت را برای رشد دانه ها فراهم می‌آورد.



شکل (۷): تصویر متالوگرافی منطقه متأثر از حرارت مربوط به اینکلوی ۸۲۵ با فلز پر کننده ۳۰۸L

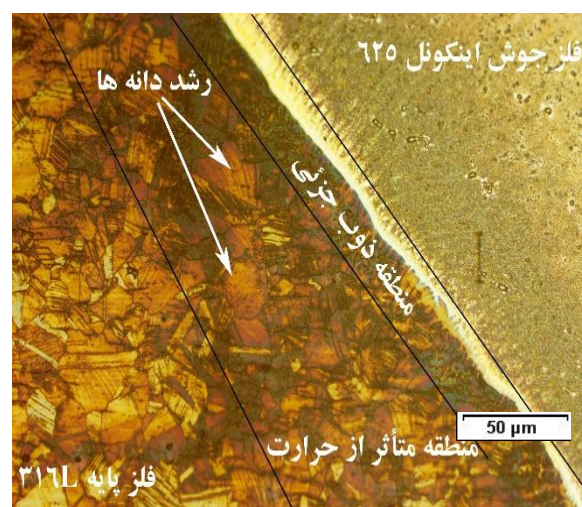
۳-۳-۴- ریز ساختار فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی

۳۱۶L با فلز جوش ۳۰۸L

با توجه به مشابهت ترکیب شیمیایی فلز جوش ۳۰۸L و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L از یک محلول اچ یکسان به منظور متالوگرافی استفاده شد. همان گونه که در شکل ۸ مشخص است جدایش محسوسی در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه مشاهده نمی‌گردد و مطابق با یک رشد از نوع اپی تکسیال انجماد صورت پذیرفته است. منطقه ذوب جزئی در تصویر مشخص شده است در این ناحیه ذوب موضعی روی داده و سپس انجماد سریع منجر به تشکیل دانه های ریز شده و از این طریق قابل تشخیص می‌باشد.

اند به درون مرزدانه ها جدایش کرده، نقطه ذوب آن را کاهش داده و باعث ذوب مرز دانه‌ها می‌شوند. به عبارت دیگر ابتدا جدایش در مرز دانه‌ها رخ می‌دهد و سپس ذوب مرز دانه‌ها اتفاق می‌افتد آن ها پیشنهاد کرده اند که علت چنین جدایشی در مرز دانه‌ها می‌تواند یکی از عوامل زیر باشد:

- نفوذ تعادلی اتم‌های عناصر به درون مرز دانه ها
- جاروب کردن چنین اتم‌هایی توسط مرز دانه در حال مهاجرت در حین رشد دانه
- نفوذ لوله ای چنین اتم‌هایی از طریق مرزهای دانه در منطقه ذوب که این مرزها به طور پیوسته از مرز ذوب به درون PMZ امتداد یافته اند [۸].



شکل (۶): تصویر متالوگرافی منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L با فلز جوش اینکلون ۶۲۵

از مقایسه تصویر فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی (شکل ۲(الف)) با شکل ۶ در خصوص اندازه دانه های منطقه متأثر از حرارت، یک رشد نسبی ملاحظه می‌گردد که دلیل آن حرارت ناشی از جوشکاری است که منجر به رشد دانه ها گردیده‌است.

۳-۳-۳- ریز ساختار فصل مشترک اینکلوی ۸۲۵ با فلز جوش ۳۰۸L

تفاوت در ترکیب شیمیایی بین فلز پایه اینکلوی ۸۲۵ و فلز جوش ۳۰۸L و عدم امکان استفاده از یک محلول اچ که هر دو ساختار

۳-۴- ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات

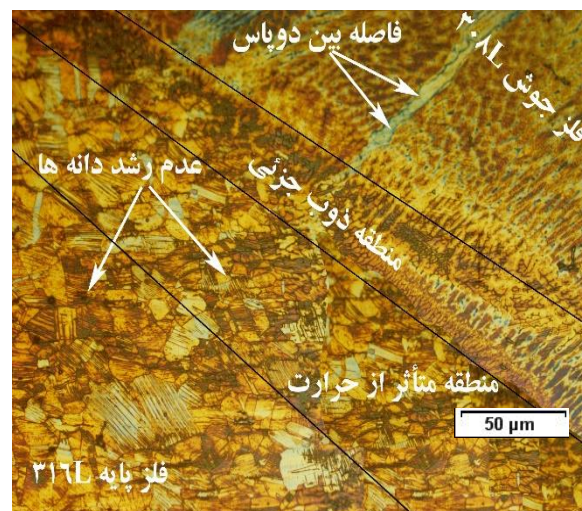
به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصال آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶L با فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵ و پرکننده ۳۰۸L آزمون سختی و کشش انجام و از مقطع گسیختگی، شکست نگاری صورت پذیرفت.

جهت تحلیل نتایج، سختی و استحکام فلز پایه و فلز جوش، مطابق جدول ۳ از استانداردها استخراج گردید و جهت یکپارچه سازی واحدهای سختی از استاندارد ASTM E140 بهره برده شد [۱۴]. همچنین لازم به ذکر است در بررسی های صورت گرفته هیچ گونه ترکی ناشی از فرآیند جوشکاری در ساختار فلزات پایه، فلزات جوش و مناطق متأثر از حرارت هیچ یک از نمونه ها مشاهده نگردید.

۳-۴-۱- آزمون سختی

به منظور بررسی میزان سختی نمونه ها در سه نوبت به صورت خطی، عدد سختی در فلزات پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش اندازه گیری و نتایج و نمودارهای ترسیمی ارزیابی شد.

با مقایسه تصویر ۸ و شکل مربوط به فلز پایه ۳۱۶L (شکل ۲ الف)) اندازه دانه ها تفاوت محسوسی نکرده است که این ناشی از میزان حرارت ورودی کمتر (جدول ۲) و نرخ انتقال حرارت سریع تر در فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶L می باشد که شرایط رشد دانه ها مهیا نشده است.



شکل (۸): تصویر متالوگرافی منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن آستینیتی L ۳۱۶ با فلز جوش ۳۰۸L

جدول (۳): خواص مکانیکی فلز پایه و فلز جوش بر اساس استاندارد [۱۰-۱۳]

نام	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	سختی ویکرز (max)	درصد افزایش طول	استاندارد
اینکلوی ۸۲۵	۲۴۰ (min)	۵۸۶ (min)	۲۰۹	۳۰	ASTM B705
۳۱۶L	۱۷۰ (min)	۴۸۵ (min)	۲۱۰	۴۰	ASTM A240
ERNiCrMo 3	۳۱۰	۷۶۰	۲۰۹	۳۵	AWS A5.14
۳۰۸L	-	۵۲۰	۲۱۰	۳۵	AWS A5.9

بدست آمده و تلفیق آن با جدول ۳ نشان می دهد سختی منطقه متأثر از حرارت آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ تغییر محسوسی نداشته است. این عدم تغییر سختی با رشد دانه ها در فصل مشترک که در شکل ۵ (ب) نشان داده شد به این صورت تفسیر می گردد که هنگامی که یک فلز کار سرد شده است و تغییر شکل پلاستیک داده است، تعدادی نابجایی در آن ایجاد می شود. این نابجایی ها با یکدیگر برخورد کرده و گره های نابجایی را ایجاد می کنند. این گره های

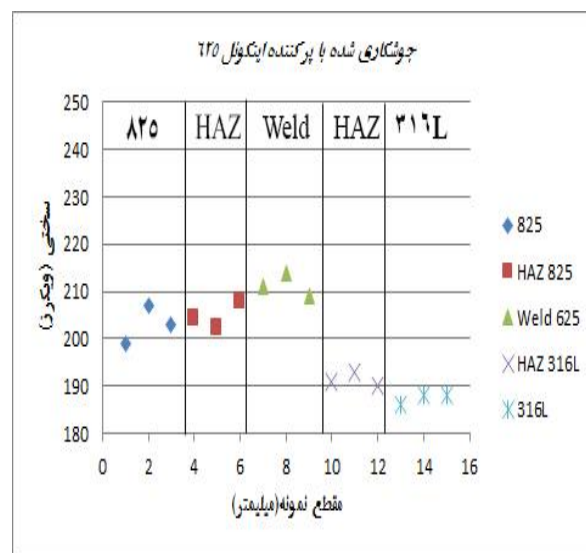
۳-۴-۱-۱- آزمون سختی نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵

مطابق با استاندارد، آزمون ریز سختی سنجی برای نمونه جوشکاری شده با پرکننده اینکونل ۶۲۵ انجام گردید. پروفیل ریزسختی بر حسب مقطع نمونه شامل فلزات پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش، جوشکاری شده با پرکننده اینکونل ۶۲۵ در شکل ۹ مشاهده می شود. مقایسه این نمودار و مقادیر میانگین

بازیابی تغییرات عمده ای که در ساختار بلوری فلز به وجود می-آید، عبارت از کاهش و یا از بین رفتن معایب بلوری که از قدرت تحرک زیادی برخوردارند، است. در این عملیات، معایب نقطه ای نظیر جاهای خالی و اتم های اضافی یکدیگر را خنثی می کنند، نابجایی های پیچی چپ گرد و راست گرد و نابجایی های لبه ای مثبت و منفی به ترتیب در یکدیگر ادغام شده و حذف می شوند. در نتیجه انرژی داخلی کاهش می یابد. ادامه ی عملیات بازیابی همراه با لغزش و صعود نابجایی های باقی مانده و ردیف قرار گرفتن آنها است. به این ترتیب مرزهای فرعی تشکیل می شوند. تشکیل مرزهای فرعی که به چند وجهی شدن موسوم است چون باعث کاهش انرژی آزاد داخلی ریزساختار می شود، عملی خود به خود است. با به ردیف قرار گرفتن نابجایی ها در زیر هم (به منظور تشکیل مرزهای فرعی) میدان تنش کششی هر نابجایی بر میدان تنش فشاری نابجایی دیگر اثر گذاشته و آن را کاهش داده و یا خنثی می کند. پس بدون تغییر نابجایی ها، فقط با آرایش مجدد و مرتب شدن، انرژی داخلی کاهش می یابد. در بازیابی خواص فیزیکی تقریباً به طور کامل بازیابی شده، در حالی که تغییرات خواص مکانیکی چندان محسوس نیست [۱۶-۱۷].

پس با وجود آن که رشد دانه ها در ریز ساختار مشاهده شد ولی هریک از عوامل تنش های باقیمانده از جوشکاری و یا بازیابی ناشی از حرارت فرآیند و یا تلفیقی از هر دو می تواند عامل عدم کاهش سختی در منطقه متأثر از حرارت فلز پایه اینکلوی ۸۲۵ باشد. سختی فلز جوش نیز مطابق با جدول ۴ در محدوده استاندارد قرار دارد. سختی منطقه متأثر از حرارت فلز پایه ۳۱۶L با وجود رشد دانه ها به دلیل بیان شده ناشی از تنش های حرارتی ناشی از جوشکاری افت نکرده است و در محدوده عدد سختی فلز پایه می باشد.

نابجایی، حرکت نابجایی های جدید ایجاد شده را محدود ساخته و بنابراین تغییر شکل پلاستیک بعدی مشکل تر می گردد. بدین ترتیب فلز توسط کار سرد، استحکام یافته و یا به عبارت دیگر سخت می شود. این مکانیزم کار سختی نامیده می شود [۸].



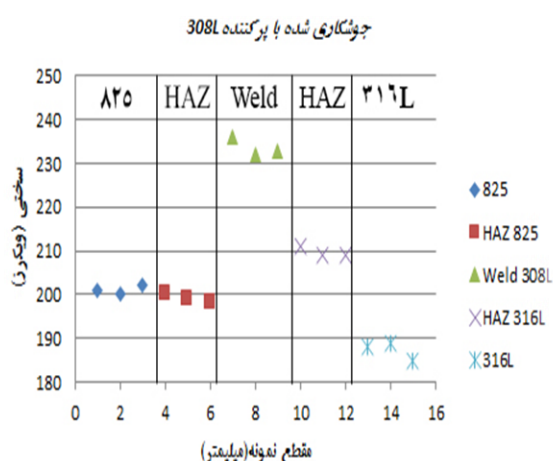
شکل (۹): پروفیل ریز سختی فلز جوش با پرکننده اینکلون ۶۲۵

حال با توجه به حرارت ناشی از جوشکاری، تنش های کششی باقی مانده در فلز جوش و نواحی مجاور آن از فلز پایه، و تنش های فشاری باقی مانده در نواحی دورتر از آن منجر به ایجاد تنش های باقی مانده ناشی از جوشکاری می گردد که وجود این تنش ها باعث قفل شدن یکسری از نابجایی ها در یکدیگر شده و از افت سختی و استحکام جلوگیری می کند. همچنین با توجه به این نکته که نمونه اینکلوی ۸۲۵ به صورت لوله بوده است و سپس صاف و به شکل ورق در آمده است در حین صاف کاری کار سرد بر روی آن انجام شده است. از سوی دیگر انرژی کرنشی ذخیره شده، نیروی رانش برای تبلور مجدد یک ماده کار سخت شده است و باندهای لغزشی که در خلال کار سختی تشکیل شده اند به عنوان محل های جوانه زنی دانه های تبلور مجدد می باشند [۸-۱۵]. گام نخست تبلور مجدد بازیابی است. حرارت ناشی از جوشکاری شرایط را برای بازیابی فراهم می آورد. در ضمن

جدول (۴): نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده با ۶۲۵

جوشکاری شده با ۶۲۵	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	درصد افزایش طول
اینکروی ۸۲۵	۳۵۵±۸	۶۸۵±۲	۵۷±۱
فولاد زنگ نزن ۳۱۶L	۲۸۵±۱	۵۶۵±۳	۶۴±۱
ERNiCrMo 3 نمونه جوش	۳۰۳±۱	۶۰۵±۱	۵۴±۱
میانگین سه نمونه	۲۷۲/۷±۵/۵	۵۶۲/۴±۵/۵	۶۳±۱

سختی و استحکام در منطقه متأثر از حرارت ۳۱۶L هم راستا بودند.



شکل (۱۰): پروفیل ریز سختی فلز جوش با پرکننده ۳۰۸L

۳-۴-۲- آزمون کشش

به منظور بررسی استحکام نمونه ها سه نمونه کشش از هر یک از پرکننده های اینکونل ۶۲۵ و ۳۰۸L تهیه، و آزمون کشش انجام شد. همچنین مقاطع شکست توسط دستگاه SEM مورد تحلیل قرار گرفت.

۳-۴-۲-۱- آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با فلز

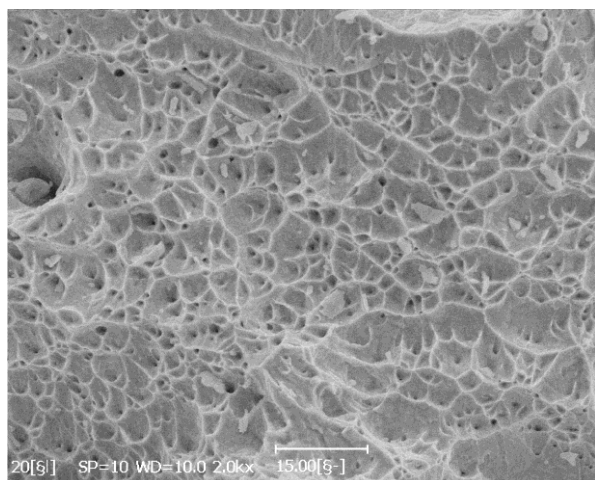
پرکننده اینکونل ۶۲۵

آزمون کشش بر روی سه نمونه تهیه شده صورت پذیرفت. اولین نتیجه بدست آمده از آزمون کشش این بود که هر سه نمونه مورد آزمایش از فلز پایه ۳۱۶L دچار شکست شدند. این بدان معنی است که به احتمال فراوان ضعیف ترین قسمت اتصال فلز پایه

۳-۴-۱-۲- آزمون سختی نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ۳۰۸L

از مقطع جوشکاری شده با پرکننده ۳۰۸L نیز سه نمونه تهیه و آزمون سختی مطابق با استاندارد انجام گردید. پروفیل ریزسختی بر حسب مقطع نمونه شامل فلزات پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش، جوشکاری شده با پرکننده ۳۰۸L، در شکل ۱۰ مشاهده می شود. مقایسه این نمودار و مقادیر میانگین بدست آمده و تلفیق آن با جدول ۳ نشان می دهد در منطقه متأثر از حرارت اینکروی ۸۲۵ جوشکاری شده با پرکننده ۳۰۸L نیز افت سختی با وجود رشد دانه ها روی نداده است که این عدم افت مطابق با توضیحات ذکر شده در قسمت قبل ناشی از تنش حرارتی باقی مانده از جوشکاری، قفل شدن نابجایی ها و افزایش استحکام و سختی و نیز پدیده بازیابی ناشی از تبلور مجدد یا تلفیقی از هر دو می باشد. نکته قابل توجه میزان افزایش سختی منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن آستنیتی است که در مقایسه با پرکننده ۶۲۵ در همین ناحیه از افزایش بیشتری نسبت به فلز پایه برخوردار است. با دقت در شکل ۸ مشاهده می شود رشد دانه در این ناحیه روی نداده است و در نتیجه رخداد پدیده قفل شدن نابجایی ها ناشی از تنش حرارتی باقی مانده از حرارت جوشکاری موجب افزایش استحکام و سختی شده است و عدم رشد دانه منجر به افزایش تفاوت عدد سختی فلز پایه ۳۱۶L نسبت به منطقه متأثر از حرارت آن شده است. لازم به ذکر است در دیگر موارد دو پدیده افزایش سختی متناسب با دلایل بیان شده و رشد دانه در جهت عکس و تعدیل کننده یکدیگر بودند در صورتی که عدم رشد و افزایش

۸۲۵ خواهد داشت. از آنجا که استحکام تسلیم فلز پایه ۸۲۵ در مقایسه با فلز جوش بیشتر است در نتیجه در فلز جوش کرنش بیشتری رخ می‌دهد. در اثر کرنش این بار کار سختی در فلز جوش و فلز پایه ۸۲۵ به وقوع می‌پیوندد. در ادامه با افزایش کرنش، دو اثر یاد شده مجدد تکرار خواهد شد تا در نهایت شکست در فلز پایه ۳۱۶L رخ می‌دهد. وقوع شکست در فلز پایه ۳۱۶L بیانگر این مطلب است که استحکام فلز پایه ۸۲۵ و فلز جوش ۶۲۵ که قسمتی از آن در اثر کار سختی ایجاد شده است از استحکام فلز پایه ۳۱۶L به علاوه استحکامی که در اثر کار سختی کسب نموده است بیشتر می‌باشد. شکل ۱۱ مربوط به سطح شکست فلز پایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L، جوشکاری شده با پرکننده اینکونل ۶۲۵ می‌باشد که توسط میکروسکوپ الکترونی روشی تهیه شده است.



شکل (۱۱): شکست نگاری فلز پایه ۳۱۶L در نمونه جوشکاری شده با فلز جوش اینکونل ۶۲۵

سطح شکست فلز پایه ۳۱۶L در نمونه جوشکاری شده با پرکننده اینکونل ۶۲۵ مشخصه‌های یک شکست نرم را ارائه می‌کند. در این سطح خطوط سیلان مشخص بوده و حالت پیوسته دارند. حفرات و دیپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند. از بین دو پرکننده استفاده شده، فلز جوش اینکونل ۶۲۵ پس از عملیات جوشکاری بیشترین استحکام و درصد افزایش طول را

۳۱۶L است. از آنجا که پارامترهای دیگری نیز در این زمینه تأثیر گذار هستند نمی‌توان با قاطعیت اظهار نظر کرد. به طور کلی محل شکست در نمونه‌های جوشکاری شده، به استحکام نسبی اجزای مختلف نمونه در اتصال و عاری بودن از عیوب جوشکاری بستگی خواهد داشت.

بر اساس داده‌های بدست آمده از نمودارهای تنش کرنش، مربوط به فلز پایه، فلز جوش و نمونه‌های جوشکاری شده در جدول ۴ ارائه شده است. در مقایسه با نمونه‌های معمول کشش، فرآیند تغییر شکل و شکست در نمونه‌های جوشکاری شده به خصوص در جوشکاری غیرمشابه که مرکب از نواحی مختلف با خواص و رفتار متفاوت است، پیچیده‌تر خواهد بود. رفتار هر کدام از مناطق موجود در یک اتصال می‌تواند بر روی مناطق مجاور آن تأثیر گذار باشد. به عنوان مثال تطابق کرنشی 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 نرم تر رخ می‌دهد و تأثیر متقابل آن با قيود ناحیه سخت می‌تواند ناحیه شکست نهایی را به موقعیت متفاوت دیگری انتقال دهد [۱۸]. به دلیل آن که نمونه‌ها از ناحیه جوش شکسته نشده‌اند به طور دقیق نمی‌توان بر روی خواص ناحیه جوش بحث نمود ولی دانستن خواص فلز تمام جوش اینکونل ۶۲۵ مفید خواهد بود.

در تمامی نمونه‌های مربوط به فلز جوش درصد بالایی از افزایش طول رخ داده مربوط به فلز پایه ۳۱۶L بوده و این به دلیل آن است که تسلیم در حین آزمون کشش، تمایل به شروع، از محل نرم تر (در اینجا فلز پایه ۳۱۶L) داشته است. به دنبال شروع تسلیم در فلز پایه ۳۱۶L دو اثر به وقوع می‌پیوندد:

این تغییر شکل توسط اعمال قيود از سوی نواحی سخت‌تر مجاور که در اینجا فلز جوش است محدود می‌شود (استحکام فلز جوش بیشتر از فلز پایه ۳۱۶L است).

فلز پایه ۳۱۶L تحت کارسختی قابل ملاحظه‌ای قرار می‌گیرد. پس از ایجاد کار سختی در فلز پایه ۳۱۶L، افزایش کرنش با افزایش نیروی کشش بستگی به استحکام تسلیم فلز جوش و فلز پایه

مقطع شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد تحلیل قرار گرفت. اولین نتیجه بدست آمده از آزمون کشش این بود که هر سه نمونه مورد آزمایش، از فلز جوش ۳۰۸L دچار شکست شدند. میانگین داده های بدست آمده از نمودارهای تنش- کرنش در جدول ۵ ارائه شده است. داده های بدست آمده از نمودار نتیجه حاصل شده را توجه می کند بدین صورت که استحکام کششی حاصل از فلز جوش نسبت به دوفلز پایه پایین تر می باشد و در نتیجه فلز جوش گسیخته شده است.

دارا می باشد که موجب می شود سطح زیر منحنی تنش- کرنش آن نسبت به دیگر فلز جوش بزرگتر باشد. این سطح معرف چقرمگی شکست می باشد. پس می توان این گونه نتیجه گرفت که پرکننده ۶۲۵ بهترین خواص مکانیکی را پس از جوشکاری ارائه می کند.

۳-۲-۴-۲- آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ۳۰۸L

به منظور بررسی استحکام نمونه های جوشکاری شده با پرکننده ۳۰۸L سه نمونه کشش تهیه، و آزمون کشش انجام شد. همچنین

جدول (۵): نتایج آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده با ۳۰۸L

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	درصد افزایش طول
نمونه جوش ۳۰۸L	۲۷۶±۱	۵۳۱±۱	۳۶±۱
میانگین سه نمونه	۲۲۱/۵±۶/۵	۴۶۸/۴۶±۳/۲	۳۴/۱±۶/۴

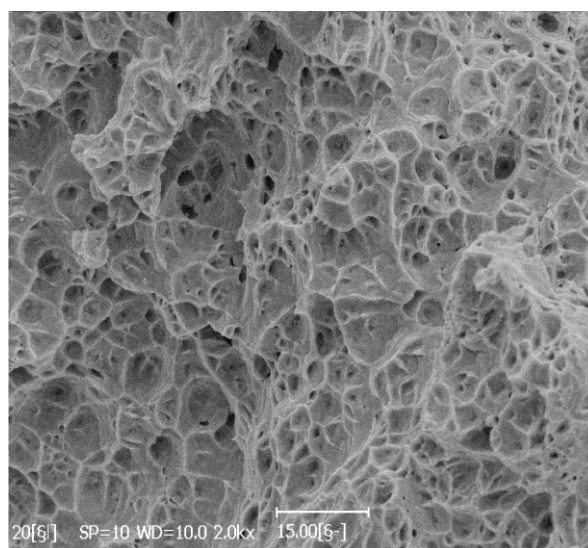
شکل ۱۲ مربوط به سطح شکست فلز جوش ۳۰۸L می باشد. همان گونه که مشاهده می شود این سطح شکست نیز از نوع نرم بوده است.

۴- نتیجه گیری

در بررسی جوشکاری غیر مشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L در فصل مشترک فلزهای پایه با فلز جوش به جز ۳۱۶L با ۳۰۸L درشت شدن دانه ها مشاهده شد. همچنین انجماد در فلز جوش اینکونل ۶۲۵ به صورت دندریتی و ۳۰۸L دندریتی- سلولی بود. هیچ گونه ترک ناشی از جوشکاری در ساختارها مشاهده نشد. در فصل مشترک فلزهای پایه با فلز جوش، افت خواص مکانیکی مشاهده نشد. از نظر خواص مکانیکی فلز جوش جوشکاری شده با سیم جوش اینکونل ۶۲۵ با استحکام نهایی ۵۶۲/۵ مگاپاسکال، دارای خواص بهتری بود. شکست در نمونه جوش اینکونل ۶۲۵، در فلز پایه ۳۱۶L و در جوش ۳۰۸L، در فلز جوش روی داد.

۵- مراجع

- [1] R. Dehmlaei, M. Shamanian & A. Kermanpur, "Microstructural characterization of dissimilar welds between alloy 800 and HP heat-resistant steel", Material Scharacteriza ation, Vol. 59, pp. 1447 – 1454, 2008.



شکل (۱۲): شکست نگاری فلز جوش ۳۰۸L

پس با توجه به نتایج حاصل شده، فلز پرکننده ۳۰۸L در شرایط بارگذاری و تحت تنش شرایط مورد انتظار از لحاظ خواص مکانیکی را برآورده نمی کند.

- [14] ASTM E140, Standard hardness conversion tables for metals relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, superficial hardness, Knoop hardness and Scleroscope hardness, 2004.
- [۱۵] اف. جی. هامفریز، ام. هانزلی / مترجم. طرقي نژاد و عسگری، "تبلور مجدد و پدیده های مرتبط با آتیل"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ویرایش دوم، ۱۳۸۹.
- [۱۶] م. ع. گلغذار، "عملیات حرارتی فولادها"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ چهارم، زمستان ۱۳۸۲.
- [۱۷] ج. ای. دیتز / شهیدی، "متالورژی مکانیکی"، انتشارات دانشگاهی تهران، چاپ اول، ۱۳۶۹.
- [۱۸] ح. شاه حسینی، "جوشکاری غیر مشابه سوپرآلیاژ اینکونل 617 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 و ارزیابی خواص اتصال"، پایان نامه دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- [2] M. Sireesha, V. Shankar, S. K. Albert & S. Sundaresan, "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800", Materials Science and Engineering, Vol. 292A, pp. 74–82, 2000.
- [3] G. Sayiram & N. Arivazhagan, "Microstructural characterization of dissimilar welds between Incoloy 800H and 321 Austenitic Stainless Steel", Materials Characterization, Vol. 102, pp. 180-188, 2015.
- [4] ASM Handbook, "Alloy phase diagrams", Vol. 3, pp. 85-153, 1992.
- [۵] سیندو کو / مترجم. شمعیان و اشرفی، "متالورژی جوشکاری"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ دوم، تابستان ۱۳۸۵.
- [۶] ج. لیپولد، د. کوتکی / مترجم. شمعیان و رحمتی، "متالورژی جوشکاری و جوش پذیری فولادهای زنگ‌نزن"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ دوم، بهار ۱۳۸۹.
- [۷] ا. منشی و ع. رضوی، "انجماد در جوشکاری"، انتشارات ارکان دانش، چاپ اول، پاییز ۱۳۸۷.
- [۸] ج. دوپونت، ج. لیپولد، س. کیسر / مترجم. شمعیان، پورمحمد، امینی و مصطفایی، "متالورژی جوشکاری و جوش پذیری آلیاژهای پایه نیکل"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ اول، ۱۳۹۲.
- [۹] د. آ. پورتر، ک. ا. ایسترلینگ / مترجم. افضلی، "استحاله ی فازها در فلزات و آلیاژها"، انتشارات دانشگاهی تهران، چاپ اول، ۱۳۷۹.
- [10] ASTM B705, Standard specification for Nickel-Alloy (UNS No6625, No. 6219 and No. 8825) welded pipe, 2004.
- [11] ASTM B240, Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and general applications, 2004.
- [12] AWS A5.14, Specification for nickel and nickel-alloy bare welding electrodes and rods, 2004.
- [13] AWS A5.9, Specification for stainless steel bare welding electrodes and rods, 2004.