فرآیندهای نوین در مهندسی مواد سال ۱۱، شماره ۳، پاییز ۹۶

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

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

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

ايران

*Babajani.mahdi@gmail.com (تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۵)

چکیدہ

در این پژوهش اتصال جوشکاری سوپر آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با دو فلز پرکننده ۶۲۵ (ERNiCrMo3) و فولاد زنگ 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 ۱۹۲۲ با فلز جوش ۲۰۸L درشت شدن دانه ها 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.

كلمات كليدى:

اینکلوی ۸۲۵ فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L، جوشکاری غیرمشابه، آنیل انحلالی، رشد رونشینی، مرزدانه 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

فر آوری سوخت اتمی شده است. فولادهای زنگ نزن آستنیتی از جمله پرمصرف ترین مواد مهندسی جهت جایگزینی سوپر آلیاژها هستند که به دلیل خواص مشابه و نیز در الویت قرار دادن الزامات فرایند و مباحث اقتصادی امکان اتصال غیرمشابه را به سوپر آلیاژهای پایه نیکل-آهن فراهم می کنند. از جمله روش های اتصال جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) با تمرکز حرارتي بالا مي باشد. اهميت اتصال غير مشابه سوير آلياژهاي يايه نیکل-آهن به فولاد زنگ نزن آستنیتی همواره مورد پژوهش های مختلف قرار گرفته است. چنانچه دهملایی به بررسی اتصال فولاد HP و اینکلوی ۸۰۰ یر داخته و فلز یر کننده اینکونل ۸۲ را به عنوان فلز پرکننده مناسب معرفی نموده است [۱]. همچنین سیرشا و همكاران ريزساختار جوش هاي غير همجنس بين فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶LN و آلیاژ ۸۰۰ را با سه نوع پر کننده 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 می آورند [۲]. در پژوهشي سايرام، ريزساختار جوشكاري غيرمشابه اينكلوي

www.	SID.	ir

۸۰۰H به فولاد زنگنزن آستنیتی ۳۲۱ را با پرکننده اینکونل ۸۲ و ۶۱۷ بررسی و پرکننده ۶۱۷ را مناسب تر معرفی نمود[۳]. بنابراین از آنجا که تاکنون پژوهش مدون و کاملی بر روی اتصال غیرمشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶۲ انجام نشده، لزوم شناسایی و بررسی خصوصیات سیم جوشهای مناسب برای این اتصال پرکاربرد به اثبات می رسد. 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 جوش ها در حالت رقیق نشده مطابق با جدول ۱ آنالیز کوانتومتری به عمل آمد. همچنین جهت اطمینان، از فلز تمام جوش حاصله از سیم جوش ها، آنالیز صورت گرفت.

	Fe	Ni	Cr	Mo	Mn	Cu	Ti	C	Si	Р	S	AL	Co	Nb	V	W
اینکلوی ۸۲۵	31/18	پايە	22/00	/YA ٣	/VY •	/1A Y	/94 •	/•) •	•	•	•	/17	•	•	•	•
فولاد زنگنزن ۳۱۶L	پايە	۱/۴ ۰	18/1	/•0 Y	/7F 1	/۲۶	/• \ •	/•٣ •	/***	/•۴ •	•/•1	/•V •	/17	/•N •	/•۵	/\· ·
فلز پرکننده ۶۲ ۵	<•/۵	پايە	۲۲	٨	•/۵ <	•/۵ <	•	•/1	•/۵ <	/•۲	•/• \ <	•/۴ <	•	•/۴ <	•/۴ <	•
فلز پرکننده ۳۰۸L	پايە	۱.	۲.	•/1	۱/۶	•	•	/•N •	•/۴	•	•	•	•	•	•	•

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

V شکل 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 پخ سازی و برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه، قطعاتی به اندازه ۶*۶۰*۳۰۰ میلیمتر با استفاده از دستگاه ورق بر، برشکاری شد. به منظور انجام عملیات جوشکاری ذوبی ورق ها برای اتصال لب به لب با شیار

الکترود تنگستنی با گاز محافظ آرگون و قطبیت منفی الکترود (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. آلودگیها و چربیهای 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-

	فلز پرکننده		فلز پر NiCrM		-3(625 NiCrM			۳۰۸۲	۳۰۸L
	شمارہ پاس		,		۲			١	٢
1	جريان(آمپر)		۱۷۰		10.			۱۷۰	10.
پارامترهای (،		ولتاژ(ولت	,	١٢		11		١٢	11
جوسكارى	جوشکاری (mms ⁻¹)		١/٢		١/٣			١/٣	1/4
	(kJmm	گرماي ورودي(1-	۱,	10		• /AV		1/•۶	۰ /۸۲
Shielded Ga		as	Perchir	Perching gas Past Gas		.S	Time of Perching gas		
(پاس ريشه)Fixture		۱۰Lit/min		-		-		-	
(پاس ريشه)Instrument		۱۵Lit/min		۵Lit/min		10 S		۱۶	
(پاس رویه)Fixture		۹Lit/min		-		-		-	
(پاس رویه)Instrument		دلالمال المال ا		۱۵Lit/min		10 S		١٢	
مثير المراق		زاویه فیلر در پاس رویه		در Gunزاویه		Gunزاويه		i E T IE - Li	
راویه فیکر در پاش ریسه	پاس ریشه			ِ پاس رو يه	در	ار فون			
۴۰(درجه)		۳۰(درجه)		درجه)	s)∧•	۷۰(درجه)		٩٠	٩/٩٩٩٩

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

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 آستنیتی 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 کاربید سیلیسیم ۲۵۰۰–۱۰۰ صاف و سپس با اسپری و دستگاه پولیش پرداخت شدند. سپس برای مشاهده ساختار متالوگرافی از الکترواچ استفاده شد. تفاوت

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 نمونه ها پس از پولیش، الکتروپولیش و سپس نمونه اینکلوی ۸۲۵ با محلول ماربل و فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L با محلول ۸۲۵ اچ شد. متالو گرافی توسط میکروسکوپ نوری Olympus GX71 و با نرم افزار DP2-BSW انجام شد.

برای آزمون کشش، نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM E-8M در ابعاد ۶*۲۰* 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 نمونه ها (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 AFRRI مدل DM8B استفاده شد که جهت بالابردن دقّت آزمون از سیستم CCD و مانیتورینگ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث
 ۳-۱- ریز ساختار فلزات پایه
 ۳-۱-۱- اینکلوی ۸۲۵
 شکل ۱(الف) تصویر متالو گرافی اینکونل ۸۲۵ اچ شده با محلول
 ماربل است. ساختار شامل دانه های هم محور آستنیت (فاز گاما)
 می باشد.

به منظور بررسی دقیق ساختار اینکلوی 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 اینکلوی ۸۲۵ بدست آمد(شکل ۱(ب)).

همان گونه که در شکل ۱(ب) مشاهده می شود اینکلوی ۸۲۵ در حال انجماد تعادلی دارای ساختاری کاملاً آستنیتی 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، آستنیتی میباشد.

نوع دانه بندی نتیجه فر آیند 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، ناهمگنی ها و جدایش های میکرو و ماکرو به وجود آمده در اثر فرایند 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 فرایند تبلور مجدد، ساختاری با دانه های هم محور ایجاد و با افزایش زمان آنیل دانه ها فرصت رشد یافته و در نهایت ساختاری شامل دانههای هم محور به وجود آورده است. علاوه بر این، به دلیل جلوگیری از حرکت نابجایی ها توسط این نوع دوقلوییها استحکام ماده تا حدودی افزایش مییابد [۵].





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

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 رشته فریت دلتار به چشم می خورند 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 قرار گرفتن در محدوده دمایی ۹۰۰- ۲۰۰ درجه سانتیگراد تسریع می کند که منجر به کاهش انعطاف پذیری و چقرمگی آلیاژ خواهد شد [۶].



شکل(۲): ریزساختار فولاد زنگنزن آستنیتیHr۱۶L (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 هیدوکسید آمونیوم همراه با ۹۰ میلی لیتر اتانول در ولتاژ ۱۵ ولت در مدت زمان ۴۰ ثانیه توسط کاتد فولاد زنگنزن)

۳-۲- ریز ساختار فلز جوش
۶۲۵ اینکونل ۶۲۵
۳-۲-۱- فلز جوش اینکونل ۶۲۵ در سه ناحیه مرکز، نزدیک به 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 اینکونل۶۳۵: (الف): مرکز جوش، (ب): ریشه جوش و (ج): کناره جوش

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 آنها 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 شکل۳(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 آر گون 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 شکل۳(ج) مربوط به کناره جوش، نیز ساختاری دندریتی ديده مي شود كه به دليل جهت انتقال حرارت كه به سمت فلز پايه بوده است دندریت ها در جهت عمود بر خط جوشکاری رشد نموده اند و با وجود ساختاري مشابه با ساير قسمتها اما در جهتي متفاوت رشد يافته اند.

۳-۲-۲- فلز جوش ۳۰۸L به طور کلی نوع انجماد در فولادهای زنگنزن آستنیتی به عواملی همچون ترکیب شیمیایی و فاکتورهای سینتیکی همچون سرعت سرد شدن بستگی خواهد داشت.

منگامی 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 متالو گرافی آن مشاهده می شود، یک ریز ساختار انجمادی قابل تشخیص است. این حالت انجماد نوع A

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 متالو گرافی فلز جوشL ۳۰۸ اچ شده با Braha'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 قرار دارند و در میانه تصویر این بازوها ظریف تر و با فاصله بیشتری از هم قرار دارند و در میانه تصویر این بازوها ظریف تر و با فاصله کمتری از هم تشکیل شدهاند. 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 انجماد) در خط مرکزی و RGL نرخ رشد در خط ذوب معرفی می گردد و نیز GCL>>SFL و GCL

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

ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی L316

که در این رابطه R×G 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- ریز ساختار فصل مشتر ک فلز جوش و فلز پایه ۳-۳-۱- ریز ساختار فصل مشتر ک اینکلوی ۸۲۵ با فلز جوش اینکونل ۶۲۵

در شکل ۵(الف) ساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل 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 دانهها در امتداد دانههای فلز یایه 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 حركت مرز ذوب به طرف جلو، دانهها به صورت ستونى رشد می کنند. به همین دلیل این نوع مکانیزم انجماد را رشد رونشینی می نامند و این گونه تجسم میشود که دانه های ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به هم پیوستهاند زیرا تعدادی از دانه های فلز پایه به داخل حوضچه ی مذاب رشد کرده و باعث انجماد شدهاند [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 متاثر از حرارت رخ داده است.



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

۳-۳-۲- ریز ساختار فصل مشترک فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L با فلز جوش اینکونل 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 فلزپایه و ذوب موضعی به صورت نوار روشن در کناره جوش دیده میشود.

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

اند به درون مرزدانه ها جدایش کرده، نقطه ذوب آن را کاهش داده و باعث ذوب مرز دانه ها می شوند. به عبارت دیگر ابتدا جدایش در مرز دانه ها رخ می دهد و سپس ذوب مرز دانه ها اتفاق می افتد آن ها پیشنهاد کرده اند که علت چنین جدایشی در مرز دانه ها می تواند یکی از عوامل زیر باشد:

جاروب کردن چنین اتم هایی توسط مرز دانه در حال
 مهاجرت در حین رشد دانه

نفوذ لوله ای چنین اتم هایی 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 متاثر از حرارت فولاد زنگنزن آستنیتی TIPL با فلز جوش اینکونل ۶۲۵

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

۳-۳-۳ **ریز ساختار فصل مشتر ک اینکلوی ۸۲۵ با فلز جوش** ۳۰۸L تفاوت در ترکیب شیمیایی بین فلز پایه اینکلوی ۸۲۵ و فلز جوش ۲۰۸L و عدم امکان استفاده از یک محلول اچ که هر دو ساختار

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 فلزپایه و ذوب موضعی به صورت ناحیه ای متمایز از سایر قسمت ها در کناره جوش به وجود آمده است. با دقت در شکل۷ و مقایسه آن با شکل ۱ (الف) تفاوت اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه به وضوح مشخص می گردد. دانه های درشت ر ناشی از نرخ انتقال حرارت کمتر فلز پایه ۸۲۵ است که فرصت را برای رشد دانه ها فراهم می آورد.



شکل(۷): تصویر متالوگرافی منطقه متاثر از حرارت مربوط به اینکلوی ۸۲۵ با فلز پر کننده ۲۰۸L

۳-۳-۴- ریز ساختار فصل مشترک فولاد زنگنزن آستنیتی ۳۱۶L با فلز جوش ۳۰۸L

با توجه به مشابهت ترکیب شیمیایی فلزجوش ۲۰۸L و فولاد زنگنزن آستنیتی ۲۱۶L از یک محلول اچ یکسان به منظور متالو گرافی استفاده شد. همان گونه که در شکل ۸ مشخص است جدایش محسوسی در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه مشاهده نمی گردد 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 می باشد.

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 زنگنزن آستنیتی ۳۱۶L می باشد که شرایط رشد دانه ها مهیا نشده است.



شکل(۸): تصویر متالوگرافی منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگنزن آستنیتی L ۳۱۶ با فلز جوش ۲۰۰L

۳-۴- ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات

به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصال آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگنزن آسیتنیتی 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.

ستاندارد درصد افزایش سختی استحکام استحکام تسلیم(MPa) نام										
	1									
طول ويكرز (max) نهايي (MIPa)										
۲۰۹ ۲۰۰ ASTM B' اینکلوی ۸۲۵ ۲۴۰ (min	705									
۳۱۶L ۱۷۰ (min) ۴۸۵ (min) ۲۱۰ ۴۰ ASTM A	240									
ERNICrMo 3 ٣١٠ ٧٦٠ ٢٠٩ ٣۵ AWS A5	.14									
Ψ·ΛL - ΔΥ· Υι· ΨΔ AWS AS	5.9									

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

بدست آمده و تلفیق آن با جدول ۳ نشان میدهد سختی منطقه متأثر از حرارت آلیاژ اینکلوی ۸۲۵ تغییر محسوسی نداشته است. این عدم تغییر سختی با رشد دانه ها در فصل مشتر ک 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 بر خورد 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

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 فلزجوش با پر کننده اینکونل۶۲۵

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 جلو گیری 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 شده، نیروی رانش برای تبلور مجدد یک ماده کار سخت شده است و باندهای لغزشی که در خلال کار سختی تشکیل شدهاند به عنوان محل های جوانه زنی دانههای تبلور مجدد می باشند ایشان از است. از سوی دیگر انرژی کرنشی ذخیره ماده نیروی رانش برای تبلور مجدد یک ماده کار سخت شده ماده باندهای لغزشی که در خلال کار سختی تشکیل شدهاند به عنوان محل های جوانه زنی دانههای تبلور مجدد می باشند عنوان محل های جوانه زنی دانههای تبلور مجدد در ضمن جوشکاری شرایط را برای بازیابی فراهم می آورد. در ضمن

بازيابي تغييرات عمده اي كه در ساختار بلوري فلز به وجود مي-آيد، عبارت از كاهش و يا از بين رفتن معايب بلوري كه 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 منفى به ترتيب در يكديگر ادغام شده و حذف مىشوند. در نتیجه انرژی داخلی کاهش می یابد. ادامه ی عملیات بازیابی همراه با لغزش و صعود نابجاییهای 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 كاهش انرژي آزاد داخلي ريزساختار مي شود، عملي 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 يا خنثي مي كند. يس بدون تغيير نابجايي ها، فقط با آرايش مجدد و مرتب شدن، انرژی داخلی کاهش می یابد. در بازیابی خواص فیزیکی تقریباً به طور کامل بازیابی شده، در حالی که تغییرات خواص مكانيكي چندان محسوس نيست [18-١٧].

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 ۲۱۶L 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.

جوشکاری شده با ۶۲۵	استحكام تسليم(MPa)	استحکام نهایی(MPa)	درصد افزایش طول
اینکلوی ۸۲۵	raa±a	۶۸۵±۲	۵۷±۱
فولاد زنگنزن ۳۱۶L	۲۸۵±۱	090±3	94±1
ERNiCrMo 3نمونه جوش	۳۰۳±۱	ゲ・ ム土 ۱	۵۴±۱
ميانگين سه نمونه	ΥνΥ/V±۵/۵	۵۶۲/۴±۵/۵	۶۳ ±1

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

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

از مقطع جوشکاری شده با پرکننده ۳۰۸L نیز سه نمونه تهیه و آزمون سختي مطابق با استاندارد انجام گرديد. پروفيل ريزسختي بر حسب مقطع نمونه شامل فلزات پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش، جوشکاری شده با یر کننده 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 اینکلوی ۸۲۵ جوشکاری شده با پرکننده ۳۰۸L نیز افت سختی با وجود رشد دانه ها روى نداده است كه اين عدم افت مطابق با توضيحات ذکر شده در قسمت قبل ناشی از تنش حرارتی باقی مانده از جوشکاری، قفل شدن نابجایی ها و افزایش استحکام و سختی و نيز پديده بازيابي ناشي از تبلور مجدد يا تلفيقي از هر دو مي باشد. نكته قابل توجه ميزان افزايش سختى منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگنزن 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 ر شد 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 فلزیایه ۳۱۶L نسبت به منطقه متأثر از حرارت آن شده است. لازم به ذکر است در دیگر موارد دو پدیده افزایش سختي متناسب با دلايل بيان شده و رشد دانه در جهت عكس و تعدیل کننده یکدیگر بودند در صورتی که عدم رشد و افزایش

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



شکل(۱۰): پروفیل ریز سختی فلز جوش با پرکننده ۲۰۸L

۳-۹-۲- آزمون کشش به منظور بررسی استحکام نمونه ها سه نمونه کشش از هر یک از پرکنندههای 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

www.SID.ir

۳۱۶۲ است. از آنجا که پارامترهای دیگری نیز در این زمینه تأثیر گذار هستند نمی توان 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 داده های بدست آمده از نمودارهای تنش کرنش، مربوط به فلز پایه، فلز جوش و نمونه های 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 درجوشکاری غیرمشابه که مرکب از نواحی مختلف با خواص و رفتار متفاوت است، پیچیدهتر خواهد بود. رفتار هر کدام از مناطق موجود در یک اتصال می تواند 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 قیود ناحیه سخت می تواند ناحیه شکست نهایی را به موقعیت متفاوت دیگری انتقال دهد [۱۸]. به دلیل آن که نمونه ها از ناحیه جوش شكسته نشدهاند به طور دقيق نمي توان بر روى خواص ناحيه جوش بحث نمود ولى دانستن خواص فلز تمام جوش اينكونل ۶۲۵ مفيد خواهد بود.

در تمامی نمونه های 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 ۲۱۶L دو اثر به وقوع می پیوندد:

این تغییر شکل توسط اعمال قیود از سوی نواحی سخت تر مجاور که در اینجا فلز جوش است محدود می شود (استحکام فلز جوش بیشتر از فلز پایه ۳۱۶L است).

فلز پایه ۳۱۶L تحت کارسختی قابل ملاحظه ای قرار می گیرد. پس از ایجاد کار سختی در فلز پایه۳۱۶L، افزایش کرنش با افزایش نیروی کشش بستگی به استحکام تسلیم فلز جوش و فلز پایه

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 می دهد. در اثر کرنش این بار کار سختی در فلز جوش و فلز پایه ۸۲۵ به وقوع می پیوندد. در ادامه با افزایش کرنش، دو اثر یاد شده مجدد تکرار خواهد شد تا در نهایت شکست در فلز پایه ۲۱۶۲ رخ می دهد. وقوع شکست در فلز پایه ۲۱۶۲ بیانگر این مطلب است که استحکام فلز پایه ۸۲۵ و فلز جوش ۲۹۶۵ که قسمتی از آن در اثر کار سختی ایجاد شده است از استحکام فلز پایه ۲۱۶۲ به علاوه استحکامی که در اثر کار سختی کسب نموده است بیشتر می باشد. شکل ۱۱ مربوط به سطح شکست فلز پایه فولاد زنگنزن ۲۱۶۳، جوشکاری شده با پر کننده اینکونل ۶۲۵ می باشد که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است.



شکل(۱۱): شکست نگاری فلز پایه ۲۱۶ در نمونه جوشکاری شده با فلزجوش اینکونل ۶۲۵

سطح شکست فلز پایه ۳۱۶۲ 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 دیمپلها 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

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

۳-۴-۲-۲- 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 جو شکاری شده با ۳۰۸L

نمونه	استحكام تسليم(MPa)	استحکام نهایی(MPa)	درصد افزايش طول
نمونه جوش ۳۰۸L	YV9±1	sri±i	۳۶ ±۱
ميانگين سه نمونه	۲۲۱/۵±۶/۵	¥91/49±4/1	84/1±9/4

۴- نتیجه گیری

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.



شکل(۱۲): شکست نگاری فلز جوش L ۳۰۸ 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.

در بررسی جوشکاری غیر مشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگنزن آستنیتی ۳۱۶L در فصل مشترک فلزهای پایه با فلز جوش به جز ۱۹۳۷ 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 مشاهده نشد. در فصل مشترک فلزهای پایه با فلز جوش، افت جواص مکانیکی مشاهده نشد. از نظر خواص مکانیکی فلز جوش خواص مکانیکی مشاهده نشد. از نظر خواص مکانیکی فلز جوش جوشکاری شده با سیم جوش اینکونل ۳۲۵ با استحکام نهایی جوش اینکونل ۶۲۵، در فلز پایه ۳۱۶۲ و در جوش ۳۰۸L، در فلز جوش اینکونل ۳۰۸، در فلز پایه ۳۱۶۲ و در جوش ۳۰۸L، در فلز

۵- مراجع

 R. Dehmolaei, 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. [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. طرقی نزاد و عسگری، "تبلور مجدد و پدیده های مرتبط با آنیل"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ویرایش دوم، ۱۳۸۹.

- [۱۶] م.ع. گلعذار، "عملیات حرارتی فولادها"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ چهارم، زمستان ۱۳۸۲.
- [۱۷] ج. ای .دیتر / شهیدی، "متالورژی مکانیکی"، انتشارات دانشگاهی تهران، چاپ اول، ۱۳۶۹.
- [۱۸] ح. شاه حسینی، "جوشکاری غیر مشابه سوپرآلیاژ اینکونل 617 به فولاد زنگنزن آستنیتی310 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.
- [6] سیندو کو / مترجم. شمعانیان و اشرفی، "متالورژی جوشکاری"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ دوم، تابستان ۱۳۸۵.
- [۶] ج. لیپولد، د. کو تکی/مترجم. شمعانیان و رحمتی، "متالورژی جو شکاری و جوش پذیری فولادهای زنگنزن"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان،، چاپ دوم، بهار ۱۳۸۹.
- [٧] ۱. منشی و ع. رضوی، "انجماد در جوشکاری"، انتشارات ارکان دانش، چاپ اول، پاییز ۱۳۸۷.
- [٨] ج. دوپونت، ج. لیپولد، س. کیسر / مترجم. شمعانیان، پورمحمد، امینی و مصطفایی، "متالورژی جو شکاری و جوش پذیری آلیاژهای پایه نیکل"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ اول، ۱۳۹۲.
- [٩] 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 nickelalloy bare welding electrodes and rods, 2004.
- [13] AWS A5.9, Specification for stainless steel bare welding electrodes and rods, 2004.