

## ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس اینکولوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن ۳۱۶

رسول قاسمی<sup>۱\*</sup>، ابراهیم حشمت دهکردی<sup>۲</sup>، مرتضی شمعیان اصفهانی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، ایران

۲- انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران، تهران، ایران

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲)

### چکیده

در این تحقیق به بررسی ریزساختار اتصال غیرهمجنس اینکولوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L پرداخته شده است. بدین منظور از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پالسی و فلز پرکننده 316L، اینکونل ۸۲ و اینکونل ۶۲۵ استفاده شده است. نمونه ها پس از برش و آماده سازی، به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پالسی با جریان پیک ۲۲۰ و جریان زمینه ۱۱۰ آمپر جوشکاری انجام گرفت. در ادامه جهت بررسی ریزساختار؛ جوش های حاصل متالوگرافی شده و آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) استفاده شد. خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده با آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار جوش در تمامی نمونه ها به صورت آستنیتی همراه با رشد دندریت های ستونی و هم محور بود. فلز جوش اینکونل ۶۲۵ دارای ظریف ترین ساختار دندریتی بود. بررسی های آزمون کشش نشان داد که شکست همه ی نمونه ها به صورت نرم و با درصد ازدیاد طول بالا اتفاق افتاد در این میان بیشترین استحکام کششی نمونه ی جوشکاری شده مربوط به فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵ به مقدار ۶۱۰ مگا پاسکال و درصد ازدیاد طول ۴۸ درصد بدست آمد. نتایج آزمون ریز سختی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان سختی فلز جوش به ترتیب مربوط به فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با میانگین سختی ۲۳۲ ویکرز و فولاد زنگ نزن 316L با میانگین سختی ۲۲۴ ویکرز می باشد.

کلمات کلیدی: اینکولوی ۸۲۵، فولاد 316L، جوشکاری غیرهمجنس، جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پالسی، ساختار آستنیتی، آزمون EDS.

## Investigation of microstructures and mechanical properties of dissimilar welds between Incoloy 825 and 316 stainless steel

R. Ghasemi<sup>1</sup>, E. HeshmatDehkordi<sup>2</sup>, M. Shamanian<sup>3</sup>

1- Department of Materials Engineering, Islamic Azad University (Sirjan), Sirjan, Iran

2-Iranian Institute of welding and Nondestructive Testing, Tehran, Iran

3- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received 31 January 2016 ; Accepted 18 April 2016)

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی [ghasemirasool@yahoo.com](mailto:ghasemirasool@yahoo.com)

## Abstract

In this study, microstructural features and mechanical properties of Incoloy 825-316L stainless steel dissimilar joints have been investigated. For this purpose, pulsed gas tungsten arc welding method was employed and 316L, Inconel 82 and Inconel 625 alloys were used as filler metal. First, specimens were cut. Pulsed gas tungsten arc welding was performed using peak and base currents of 220 A and 110 A, respectively. Microstructure of welded joints was studied using metallographic observations and energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis. In order to evaluate the mechanical properties, tensile and microhardness measurements were done on the joints. In all specimens, dendritic and equiaxed and/or cellular growth of austenite phase was observed. Incoloy 625 weld metal had the finest dendritic structure. Tensile test results revealed the ductile fracture with a high percent of elongation for all specimens. The highest tensile strength and percent of elongation of 610 MPa and 48% were obtained for specimen welded using Inconel 625 filler metal. Inconel 625 and 316 stainless steel weld metals showed the highest and lowest microhardness with values of 232 HV and 224 HV, respectively.

**Keywords:** Incoloy 825, 316L stainless steel, Dissimilar welding, Pulsed gas tungsten arc welding, Austenitic microstructure, EDS.

## ۱- مقدمه

فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L با هدف کاهش هزینه ها، ایجاد اتصال فلزی غیر مشابه بین این دو آلیاژ با استفاده از فرایندهای جوشکاری ذوبی امری اجتناب ناپذیر است.

در زمینه جوشکاری غیر مشابه سوپر آلیاژ به فولاد زنگ نزن آستنیتی می توان به تحقیقات شاه حسینی و همکاران وی اشاره کرد که در آن به بررسی جوش پذیری و خواص اتصال بین اینکونل ۶۱۷ و فولاد زنگ نزن ۳۱۰ پرداخته شده است [۶]. نتایج حاصل از آن نشان می دهد فلزپرکننده پایه نیکل (اینکونل) در بین چهار فلزپرکننده بهترین انتخاب است. در تحقیقی دیگر که توسط سیریشا انجام شده است نشان داده شد که فلزات پرکننده اینکونل ۱۸۲/۸۲ بهترین خواص را در جوشکاری اتصال غیرمشابه 316LN به آلیاژ ۸۰۰ ایجاد می کنند [۷-۹]. همچنین لی نشان داد که افزایش تیتانیوم در ترکیب شیمیایی فلزپرکننده منجر به تشکیل دندریتهای هم محور و بنابراین افزایش ازدیاد طول در جوش آلیاژ پایه نیکل ۶۹۰ به فولاد زنگ نزن 304L می شود [۱۰]. ریزساختار و جوش پذیری جوش غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی به آلیاژهای پایه نیکل توسط دوپونت و همکاران وی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق اثر پارامترهای جوشکاری و ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده روی ریزساختار و جوش پذیری

آلیاژهای پایه نیکل یکی از مهمترین گروه های مواد مهندسی هستند. همچنین مواد مصرفی جوشکاری آلیاژ پایه نیکل در شرایط پس از جوشکاری خواصی ارائه می دهند که در هیچ نوع دیگری از محصولات جوشکاری چنین خواصی یافت نمی شود [۱]. در این میان فولاد زنگ نزن به علت دربرداشتن خواص مکانیکی و مقاوم به خوردگی خوب در محیطهای مختلف از دیرباز مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از فولادهای زنگ نزن آستنیتی همانند 316L در صنایع نفت و گاز به دلیل دارا بودن خواص خوب و منحصر به فرد و همچنین ارزان قیمت بودن نسبت به سوپر آلیاژهای پایه نیکلی افزایش چشم گیری داشته است [۲].

جوشکاری غیرمشابه آلیاژهای پایه نیکل به فولادهای زنگ نزن به ویژه در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی اغلب مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مشکلاتی که در جوشکاری اتصالات غیر مشابه اتفاق می افتد ترک و نهایتاً شکست اتصال است [۳-۵]. در بسیاری از موارد که یک انتقال جهت سازش با محیط خورنده تر یا استحکام عالی در دماهای بالا لازم است، فولادهای زنگ نزن به آلیاژهای پایه نیکلی جوش داده می شوند. به منظور جایگزینی سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۲۵ با

پاس ریشه و در ادامه جهت روشنایی پاس های دوم و سوم بهره برده شد. در جدول ۳ ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده در حالت رقیق نشده استخراج شده از شرکت های سازنده، آورده شده است. برای ایجاد اتصال بین فلزات پایه، نمونه ها در ابعاد  $300 * 60 * 6$  میلی متر بریده شد. لبه سازی نمونه ها به صورت شکل V با زاویه  $70^\circ$  درجه براساس ASME Sec IX در نظر گرفته شد. عرض ریشه جوش تقریباً به اندازه ی قطر فلز پرکننده و به مقدار ۲ میلی متر و ارتفاع ریشه جوش یک میلی متر در نظر گرفته شد. در ضمن آلودگی ها و چربی های احتمالی موجود در سطح قطعات و سیم جوش ها توسط استون حذف شد.

## ۲-۱- جوشکاری نمونه ها

در این پژوهش از دستگاه جوش گام الکترونیک مدل PARS DIGA TIG - SPQ250 AC/DC با ظرفیت ۳۵۰ آمپر استفاده شد. جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ و گاز پشتی آرگون ۹۹/۹۹٪ با استفاده از الکتروود تنگستن توریم دار به قطر ۲/۴ میلی متر انجام گرفت. جوشکاری نمونه ها بدون پیشگرم و با استفاده از روش جوشکاری قوسی الکتروود تنگستن با گاز محافظ آرگون به صورت پالسی در سه پاس (یک پاس ریشه و نفوذی و دو پاس پرکننده) انجام شد. دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد؛ تا تنش های اعوجاج ناشی از انقباض و سرد شدن از جوش به حداقل مقدار ممکن برسد. این دما به این صورت بررسی شد که بعد از جوشکاری در هر پاس از گچ حرارتی با برند Tempilstik ساخت کشور آمریکا و بدون گوگرد در محل جوش کشیده می شد. اگر این

جوش های غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپر AL-6XN و دو آلیاژ اینکونل ۶۲۵ و اینکونل ۶۲۲ مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که با کنترل پارامترهای جوشکاری و ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده می توان به ساختار مناسبی رسید [۱۱].

این تحقیق به سازندگان و کارفرمایان پروژه های پایین دستی صنایع نفت کمک خواهد کرد تا با اطمینان، فلزپرکننده مناسب برای جوشکاری اینکولوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ را انتخاب کنند و این خود یک نوآوری در صنعت جوشکاری به حساب می آید.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق از سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۲۵ و فولاد زنگ نزن آستنیتی با گرید AISI 316L به صورت کار شده (نورد شده) در شرایط آنیل انحلالی استفاده شد. از آنالیز طیف سنجی اتمی (کوانتومتری) جهت تعیین دقیق ترکیب شیمیایی ورق ها استفاده شد. آنالیز ترکیب شیمیایی ماده اولیه در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است. ورق های اولیه با ضخامت ۶ میلیمتر به ورق هایی با ابعاد ۳۰۰ میلیمتر طول و ۶۰ میلی متر عرض بریده شد. جهت اتصال فلزات پایه از سه فلز پر کننده زیر استفاده شد:

الف) سیم جوش فولاد زنگ نزن 316L (ER316L)

ب) سیم جوش اینکونل ۸۲ (ERNiCr-3)

ج) سیم جوش اینکونل ۶۲۵ (ERNiCrMo-3)

در تمامی موارد از سیم جوش های با قطر ۲/۴ میلی متر جهت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی اینکولوی ۸۲۵

عنصر	Fe	Cr	Cu	Mo	Mn	Ti	C	Si	Al	Co	V	Ni
Wt%	۳۱/۲۸	۲۲/۰۵	۲/۱۸	۳/۲۸	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۰۱	۰	۰/۱۲	۰	۰	بقیه

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 316L

عنصر	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Ti	Cu	V	Fe
Wt%	۰/۰۲	۱۶/۲	۱۱/۹	۲/۶۶	۱/۲۵	۰/۳۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۸۹	۰/۱۴	۰/۰۴	بقیه

جدول ۳- ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده

عنصر	فلزات پرکننده		
	ERNiCrMo-3	ERNiCr-3	ER316L
C	۰/۱	۰/۱	۰/۰۳
Cr	۲۱	۲۰	۱۸-۲۰
Ni	۵۸ Min	۶۷ Min	۱۱-۱۴
Mo	۹	-	۲-۳
Mn	۰/۵	۳	۲
Si	۰/۵	۰/۵	۰/۶۵
Fe	۵	۳	پایه
Ti	-	۰/۷۵	-
Cu	۰/۵	۰/۵	-
Co	-	۰/۱۲	-
Al	۰/۴	-	-
Nb	۳/۲	۳	-

OxfordCam Scan MV2300 استفاده شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی فلز پایه، آزمون کشش توسط دستگاه HounsfieldH50ks با سرعت 1mm/min انجام شد. نمونه های آزمون کشش به صورت عرضی و بر اساس استاندارد ASTM-E8M-04 به تعداد سه عدد از هر نمونه جوش برش داده شد.

جهت بررسی سختی نمونه ها با استفاده از دستگاه ریزسختی سنجی LESTZ WETZLAR GERMANY 112544 تحت بار گذاری با نیروی ۱۰۰ گرم و مدت زمان 10s استفاده شد. به این منظور پروفیل سختی در طول ناحیه جوش و عرض آن با فاصله 300µm از یکدیگر انجام گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ بررسی ریزساختار فلزات پایه

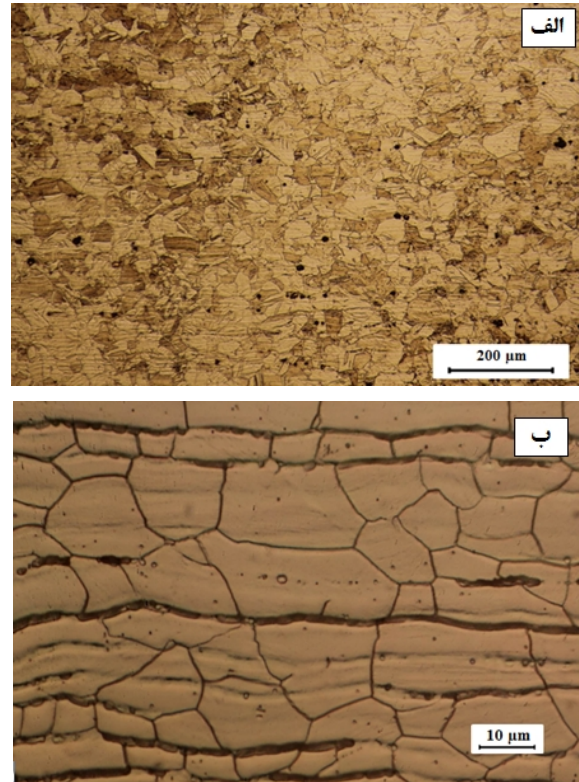
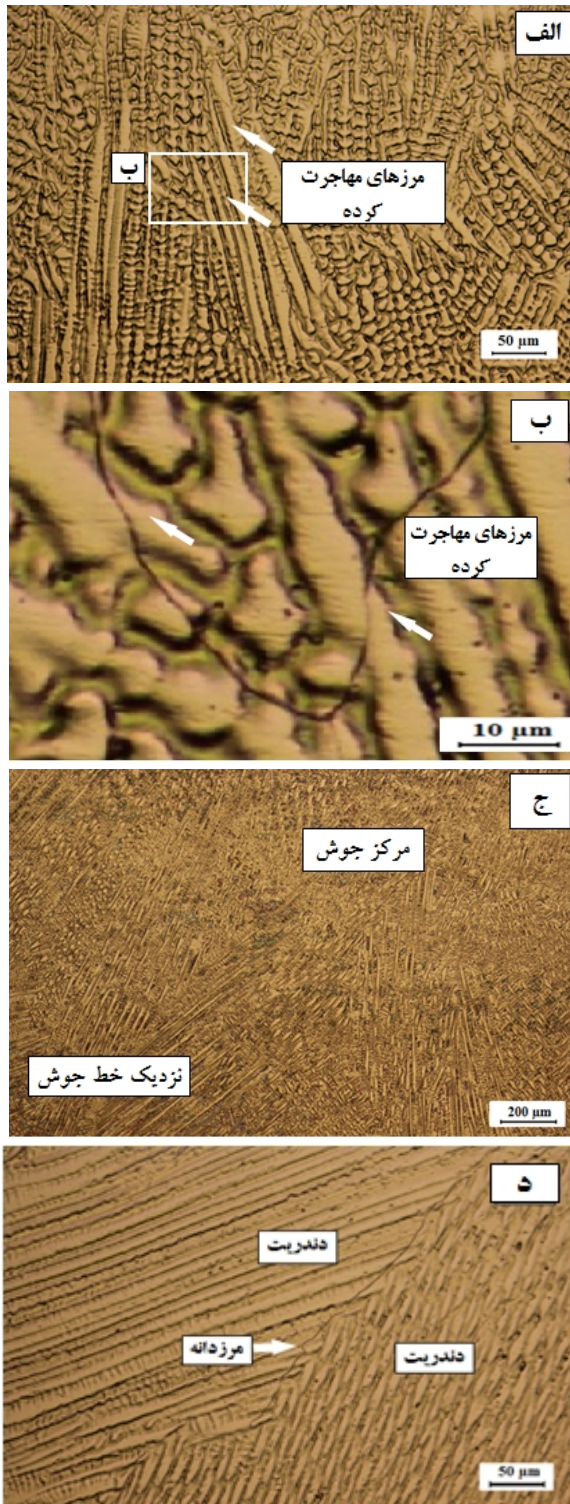
شکل ۱ (الف) تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار اینکولوی ۸۲۵ اچ شده با محلول ماربل را نشان می دهد. ساختار شامل دانه های هم محور آستنیت (فاز گاما) می باشد. تصویر ریزساختار فولاد زنگ نزن 316L دارای زمینه کاملا آستنیتی بوده و در بین دانه های فاز آستنیت زنجیره فریت

گچ تغییر رنگی از خود نشان می داد که دمای قطعه در محل جوش بالاتر از ۱۵۰ درجه می بود و باید صبر می شد تا این دما به زیر ۱۵۰ درجه کاهش پیدا کند.

#### ۲-۲ آزمون های مشخصه یابی

جهت شناسایی عناصر موجود در فولاد AISI 316L و Incoloy 825 خریداری شده آنالیز کوانتومتری انجام گرفت. نمونه ها در محلول ماربل (50cc H<sub>2</sub>O + 10gr CuSO<sub>4</sub> + 50cc HCL) اچ شدند. سپس فلز جوش و نواحی اطراف آن با محلول اسید نیتریک ۶۵٪ و تحت ولتاژ ۵ ولت و آمپراژ ۰/۰۲ آمپر به مدت زمان ۳۰ ثانیه الکترواچ شدند. در این مرحله ریزساختار فلز جوش و فلز پایه نیکل مشخص گردید. سپس از میکروسکوپ نوری NIKON-EPIPHOTO300 جهت بررسی ساختار ناحیه جوش و اطراف آن استفاده شد. جهت بررسی ریزساختار و آنالیز رسوبات و نواحی مختلف جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. جهت تعیین تقریبی ترکیب شیمیایی و شناسایی فازها در فلزات پایه و فلزات جوش و مناطق اتصال از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز ترکیب شیمیایی (EDS) از نوع

دلنا کاملاً مشخص است (تصویر ب شکل ۱).

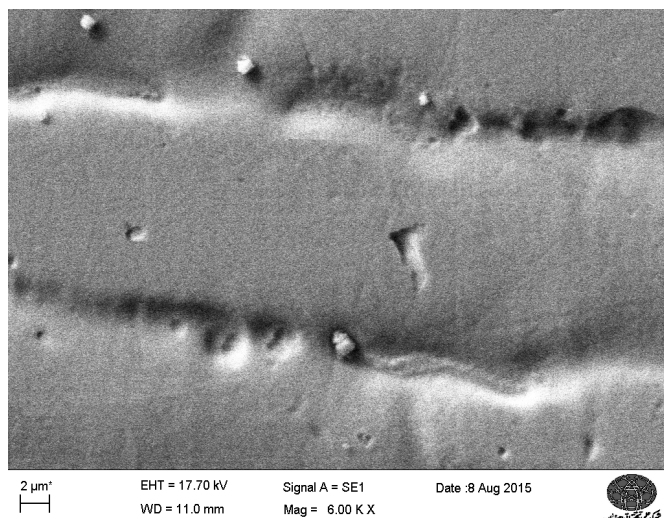


شکل ۱-الف) ریزساختار اینکولوی ۸۲۵ اچ شده با ماربل، ریزساختاری با دانه های هم محور گاما ب) ریزساختار میکروسکوپی نوری فولاد زنگ نزن 316L با زنجیره فریت دلنا.

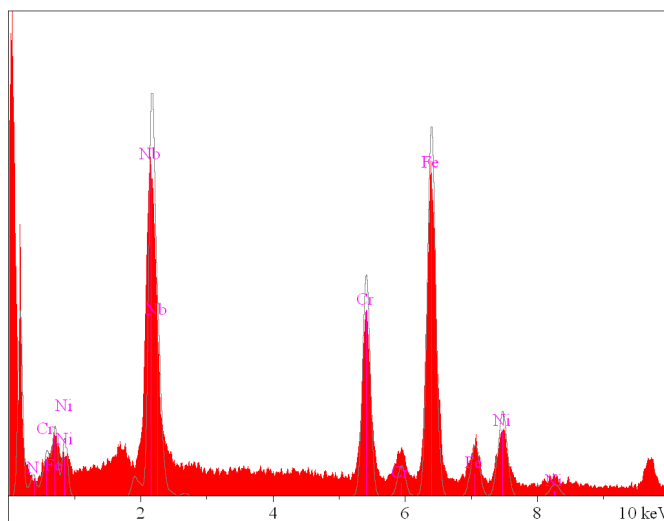
### ۲-۳- ریزساختار فلزات جوش

ساختار دانه بندی فلز جوش در شکل ۲ نشان داده شده است. ریزساختار مربوط به اینکول ۸۲ در تصویر الف کاملاً آستنیتی بوده و از دانه هایی تشکیل شده است که تقریباً هم محور هستند. در درون دانه ها ساختار دندریتی سلولی ساختار غالب است. جهت گیری رشد دندریت ها در هر دانه متفاوت است و در واقع یک نوع رشد رقابتی در بین دانه های مختلف وجود دارد. مرزدانه های انجمادی (SGB) در ساختار کاملاً مشخص هستند (نوک پیکان ها). مرزدانه های مهاجرت کرده در ساختار فلز جوش اینکول ۸۲ بصورت گسترده وجود دارد که نمونه ای از آن در شکل ۲(ب) نشان داده شده است [۶]. تصویر (ج) ریزساختار فلز جوش مربوط به فلز پرکننده اینکول ۶۲۵ را پس از جوشکاری نشان می دهد.

شکل ۲- ریزساختار فلز جوش اینکول ۸۲ در نزدیکی خط جوش الف) نحوه ی رشد رقابتی ب) تصویر مرزهای مهاجرت کرده در بزرگنمایی بالا، ج) ریزساختار فلز جوش اینکول ۶۲۵ از نزدیکی خط ذوب تا مرکز فلز جوش د) ساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن 316 L نحوه ی رشد دندریتی در دو پاس مختلف



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی از فلز جوش اینکونل ۸۲، تصویر بازوهای دندردیتی با بزرگ نمایی بالا و حضور رسوبات مختلف در ساختار.



Elt.	Atomic%	Conc	Units
N	8.98	2.10	wt.%
Cr	16.81	14.56	wt.%
Fe	39.16	36.43	wt.%
Ni	12.88	12.59	wt.%
Nb	22.17	34.32	wt.%
Total	100.00	100.00	wt.%

شکل ۴- نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) رسوب موجود در شکل ۳ (نقطه ۱).

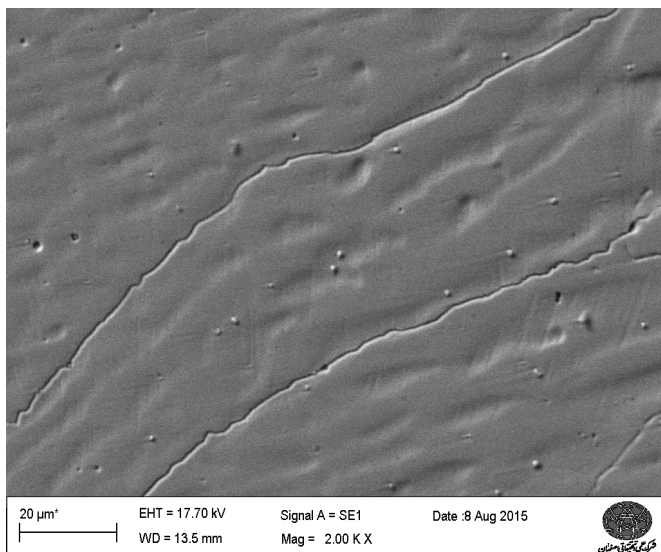
نتایج آنالیز عنصری مربوط به رسوب شماره ۲ در شکل ۳ نشان از غنی بودن این رسوب از دو عنصر کروم و آهن است (شکل ۵). به نظر می رسد که رسوب حاضر از نوع رسوبات

مطابق انتظار فلز جوش دارای زمینه آستنیتی بوده و در مرکز جوش ساختار به صورت دانه‌های هم‌محور با دندردیتی‌های هم‌محور است. این در حالی است که با حرکت به سمت خط ذوب دانه‌ها، دندردیتی‌های ستونی نیز در ساختار دیده می‌شود. در تصویر (د) ریزساختار فلز جوش با فلز پرکننده ی فولاد زنگ نزن 316 L را نشان داده شده است. در این تصویر مرز بین دو دانه مشاهده می شود که این دو دانه با مرفولوژی متفاوت نسبت به هم منجمد شده به صورتی که در آن ها دو نوع رشد سلولی و ستونی کاملاً قابل مشاهده است.

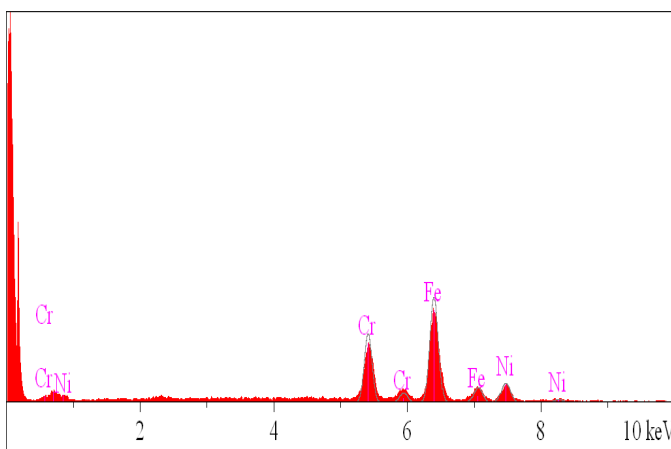
در مقایسه با فلز جوش اینکونل ۸۲ و فلز جوش فولاد زنگ نزن 316 L، فلز جوش اینکونل ۶۲۵ از دانه‌بندی ریزتری برخوردار است. ایجاد شرایط تحت انجماد ترکیبی در اثر اعمال حرارت ورودی کم و سرعت بالای جوشکاری در حوضچه مذاب باعث بوجود آمدن ساختار دندردیتی هم‌محور ظریف می شود. بنظر می رسد شرایط فوق در نمونه های جوشکاری شده با فلز پرکننده ی اینکونل ۶۲۵ بصورت کامل تر انجام گرفته و باعث ایجاد ساختاری ظریف شده است.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فلز جوش اینکونل ۸۲ در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج آنالیز این نوع از رسوبات (رسوب شماره ۱) نشان می دهد که این رسوب غنی از عنصر نیوبوم (Nb) بوده است. با توجه به اینکه در انجام آزمون EDS به دلیل محدودیت تجهیزات دستگاه قادر به آنالیز دقیق عنصر کربن نبود؛ لذا پیک مربوط به عنصر کربن در نتایج مشخص نشده است (شکل ۴).

اما با توجه به نتایج تحقیقات انجام گرفته توسط محققان دیگر به نظر می رسد که نوع این رسوبات به شکل کاربید نیوبوم (NbC) باشد. هرچند کروم و نیکل موجود در ترکیب، مربوط به مقدار بالای آن ها در زمینه می باشد. علاوه بر این رسوبات، در مرزها و به ویژه محل تلاقی آن ها فاز یوتکتیک لاه وجود دارد که به نظر می رسد این فاز نیز غنی از Nb می باشد [۴، ۶].



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی الکترونی از ریزساختار فلز جوش فولاد 316L و حضور رسوبات ریز در زمینه ی آستنیتی.



Elt.	Atomic%	Conc	Units
Cr	24.33	22.84	wt.%
Fe	59.30	59.80	wt.%
Ni	16.38	17.36	wt.%
Total	100.00	100.00	wt.%

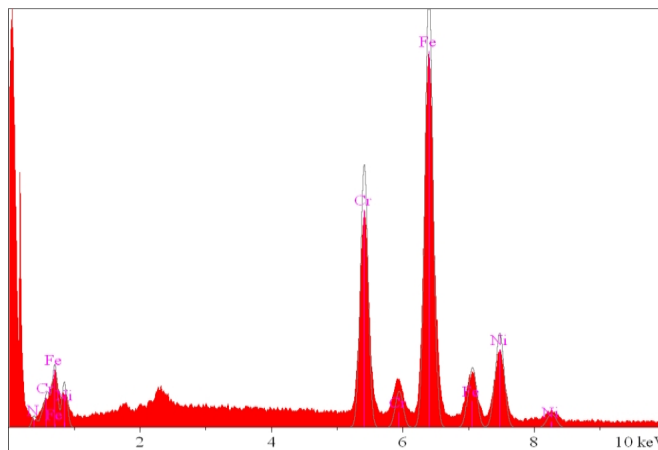
شکل ۷- نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) رسوبات

موجود در فاز زمینه آستنیتی فولاد 316L

دارد ذوب گردیده ولی بدون این که با فلز جوش مخلوط شود، منجمد گردیده است، بنابراین این منطقه ترکیب شیمیایی فلز پایه را دارا می باشد.

در واقع جریان موضعی سیال برای مخلوط شدن به اندازه کافی قوی نبوده است، ولی برای حرکت دادن قسمت هایی از فلز

MC باشد. شدت پیک عنصر آهن و درصد آن بیان می دارد که به احتمال خیلی زیاد این رسوب کاربید آهن (سمانتیت) می باشد.



Elt.	Atomic %	Conc	Units
N	8.25	2.22	wt.%
Cr	20.61	20.57	wt.%
Fe	53.50	57.35	wt.%
Ni	17.63	19.87	wt.%
Total	100.00	100.00	wt.%

شکل ۵- نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS)

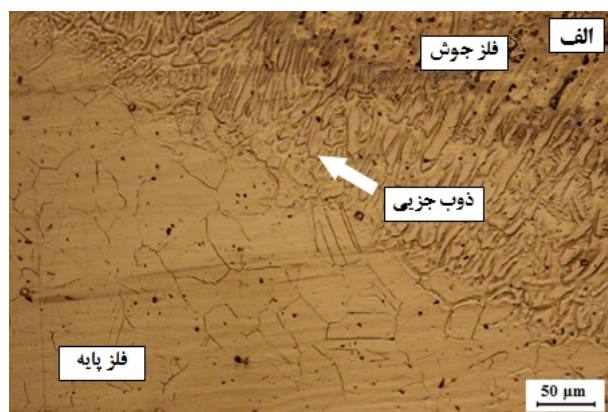
رسوب موجود در شکل ۳ (نقطه ۲).

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن 316L در شکل ۶ نشان داده شده است. رسوباتی با اندازه های متفاوت در زمینه آستنیتی مشاهده می شود. به دلیل آن که کروم مهم ترین عنصر فعال در ترکیب شیمیایی است، لذا تشکیل کاربید کروم محتمل بوده و نتایج آنالیز طیف سنجی EDS آن را تایید می کند (شکل ۷).

### ۳-۳- ریزساختار فصل مشترک فلزات جوش و فلز پایه

ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۸۲ و فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است. یک فصل مشترک کاملاً پیوسته در سراسر مرز جوش مشاهده می شود. در حد فاصل بین فلز جوش و فلز پایه یک منطقه مخلوط نشده (UMZ) وجود دارد. دلیل ایجاد این منطقه آن است که بخشی از فلز پایه ۸۲۵ که در مجاورت حوضچه وجود

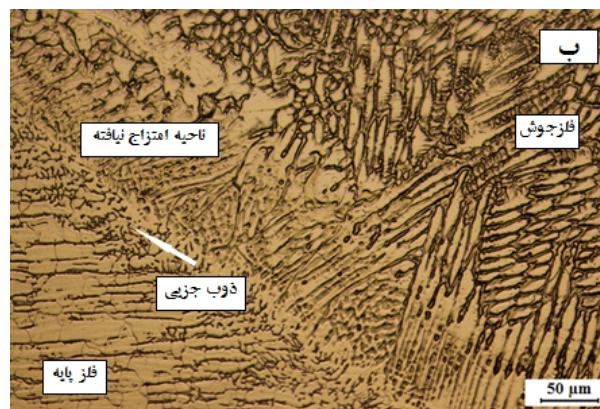
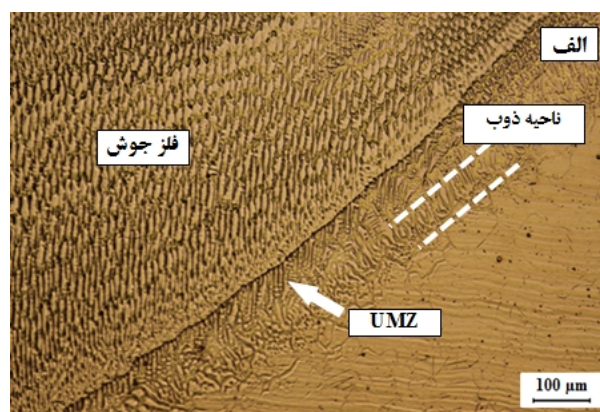
اختلاط به خوبی انجام شده است. فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با فلز پایه فولاد زنگ نزن 316 L در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است. مشاهدات حاکی از وجود ناحیه ی عدم اختلاط دو فلز است. از جمله دلایل آن اختلاف در ترکیب شیمیایی دو فلز و به نحوه و سرعت جوشکاری می توان اشاره نمود. همانند نتایج گفته شده در قبل در این فصل مشترک نیز حضور ناحیه ی ذوب جزئی به چشم می خورد.



شکل ۹- فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ (الف) و با فلز پایه فولاد 316 L (ب)

فصل مشترک اتصال فلز پرکننده 316 L با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است. عرض ناحیه ی عدم اختلاط وسعت بیشتری نسبت به دو فلز پرکننده قبلی دارد. از جمله دلایل مهم و اصلی در این زمینه می توان به اختلاف در ترکیب شیمیایی دو فلز اشاره نمود که باعث عدم اختلاط مذاب بین دو فلز در ناحیه ی فصل مشترک شده است. فصل مشترک فلز پرکننده 316 L و فلز پایه 316 L در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شده است. یک فصل مشترک یکنواخت، بدون

پایه ذوب شده کافی بوده است. فصل مشترک در سمت دیگر اتصال بین فلز جوش اینکونل ۸۲ و فولاد زنگ نزن 316 L می باشد. همان طور که در تصویر (ب) نشان داده شده است؛ نتایج حاصل از تحقیقات نشان می دهد که به دلیل آن که فلز پرکننده پایه نیکل بوده و فلز پایه در اینجا پایه آهن است، اختلاف در ترکیب شیمیایی آن‌ها قابل توجه بوده و عامل ایجاد منطقه مخلوط نشده وسیع تر شده و منطقه ذوب جزئی در این فصل مشترک است [۱۲].



شکل ۸- فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۸۲ با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ (الف) با فلز پایه فولاد 316 L (ب).

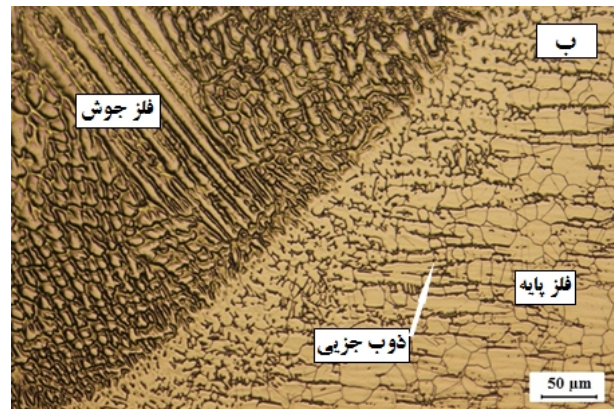
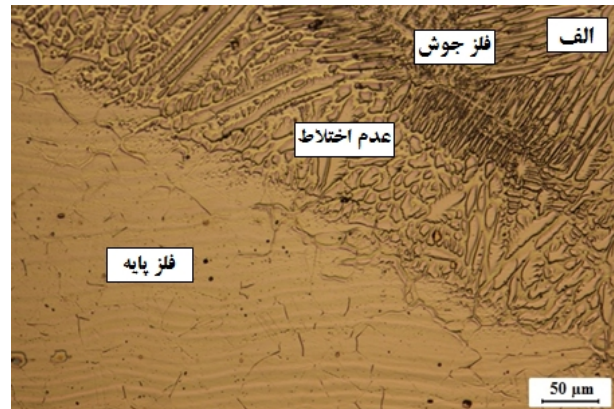
فلز جوش بعدی که فصول مشترک آن با فلزات پایه مورد بررسی قرار می گیرد، فلز جوش اینکونل ۶۲۵ است. شکل ۹ (الف) فصل مشترک این فلز جوش با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ را نشان می دهد که منطقه مخلوط نشده در این سمت از اتصال، عرض چندانی ندارد و این بدان معنی است که عمل



کلی محل شکست در نمونه های جوشکاری شده به استحکام نسبی اجزای مختلف نمونه در اتصال بستگی دارد. در مورد بهتر شدن نتایج آزمون کشش در رابطه با اینکونل ۶۲۵ میتوان گفت در محل اتصال یک فلز نرم تر (در اینجا فولاد 316L) به فلز سخت تر (اینکونل ۶۲۵) در حین فرآیند آزمون کشش یک کار سختی در فلز پایه (نرم) اتفاق می افتد که این کار سختی باعث افزایش میزان استحکام در ناحیه شکست می شود. داده های حاصل شده از نمودارهای تنش- کرنش در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور مقایسه بهتر اطلاعات بدست آمده از آزمون کشش فلزات پایه نیز در مقایسه آورده شده است.

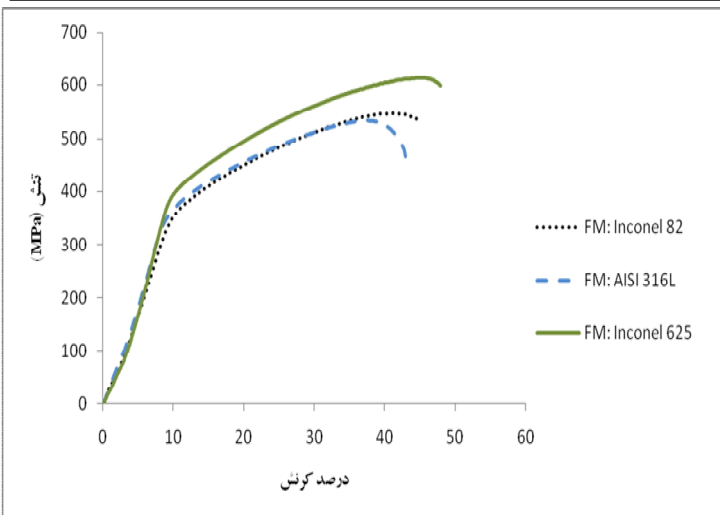
جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون کشش

هیچ گونه ناحیه ی عدم اختلاط می باشد. دلیل این امر ناشی از یکسان بودن ترکیب شیمیایی هر دو فلز پرکننده و فلز پایه می باشد. همان طور که پیداست در این قسمت از فصل مشترک رشد رونشستی (اپی تکسیال) در فلز جوش به خوبی مشخص است.



شکل ۱۰- فصل مشترک فلز جوش فولاد 316 L با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ (ب) فصل مشترک فلز جوش فولاد 316 L با فلز پایه فولاد 316 L.

نوع فلز پرکننده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدباده طول (%)
اینکونل ۸۲	۳۴۰ ± ۱۰	۵۴۵ ± ۹	۴۵ ± ۳
فولاد 316L	۳۵۰ ± ۷	۵۳۵ ± ۱۱	۴۳/۲ ± ۲
اینکونل ۶۲۵	۳۷۰ ± ۱۰	۶۱۰ ± ۱۵	۴۷/۸ ± ۳
فلز پایه اینکولوی ۸۲۵	۳۴۷ ± ۶	۶۶۰ ± ۸	۳۵ ± ۷
فلز پایه فولاد 316L	۲۸۰ ± ۵	۵۴۵ ± ۷	۶۵ ± ۶



شکل ۱۱- نمودارهای تنش بر حسب کرنش مربوط به اتصالات جوشکاری شده با فلزات پرکننده ی مختلف.

در جدول ۵ مقدار سختی مربوط به نمونه ی جوشکاری شده آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود میزان سختی در فلزات جوش نسبت به فلزات پایه اینکولوی و فولاد زنگ نزن 316 L بالاتر است. وجود ساختار دندریتی ریز در اثر اعمال فرآیند مناسب جوشکاری و سرعت سرد شدن بالا

### ۴-۳- ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات

نتایج حاصل از انجام آزمون مکانیکی کشش در شکل ۱۱ آورده شده است. در این شکل نمودار تنش بر حسب کرنش اتصالات جوشکاری شده با فلزات جوش مختلف آورده شده است. در ابتدا باید گفت که نمونه های کشش در قطعات جوشکاری شده با همه ی فلزات پرکننده شامل اینکونل ۸۲، اینکونل ۶۲۵ و فولاد زنگ نزن 316L از قسمت فلز پایه فولاد 316 L و ناحیه HAZ آن دچار شکست شدند. با توجه به متفاوت بودن شرایط و پارامترهای اعمالی در جوشکاری نمی توان با قطعیت در مورد محل شکست نمونه های کشش اظهار نظر نمود. به طور

مناطق فصل مشترک فلز جوش و فلزات پایه نشان از حضور ناحیه ای به نام منطقه اختلاط نیافته می دهد که از جمله دلایل حضور آن عدم یکسانی ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و فلزات پایه جوشکاری شده و نحوه و سرعت جوشکاری می باشد.

نتایج آزمون کشش هر سه نمونه نشان از شکست نرم نمونه ها و بالا بودن درصد ازدیاد طول داد. همچنین مشاهده شد که بیشترین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول مربوط به جوش با فلز پرکننده ی اینکونل ۶۲۵ به ترتیب ۶۱۰ مگاپاسکال و ۴۸٪ و کمترین آن مربوط به جوش با فلز پرکننده فولاد L 316 با استحکام ۵۳۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۴۳٪ می باشد. نتایج ریز سختی سنجی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان سختی فلز جوش به ترتیب مربوط به فلز جوش اینکونل ۶۲۵ (۲۳۵ ویکرز) و فولاد زنگ نزن L 316 (۲۲۴ ویکرز) می باشد.

با تجزیه و تحلیل کلیه نتایج و آزمون های انجام گرفته می توان چنین نتیجه گرفت که از لحاظ خواص مکانیکی (استحکام کششی) فلز پرکننده ی اینکونل ۶۲۵ می تواند انتخاب مناسبی در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن گاز با جریان پالسی جهت جوشکاری اینکولوی ۸۲۵ به فولاد L 316 باشد.

#### منابع

- 1-Lippold, J. C., Kiser, S. D., and DuPont, J. N., *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*, John Wiley & Sons, 2011.
- 2-Kotecki, D., and Lippold, J., "Welding metallurgy and weldability of stainless steels," John Wiley, Hoboken, New Jersey, 2005.
- 3-Kou, S., *Welding metallurgy*, Cambridge University Press, 1987.
- 4-Naffakh, H., Shamanian, M., and Ashrafzadeh, F., "Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 20, No. 7, pp. 3628-3639, 2009.
- 5-Mortezaie, A., and Shamanian, M., "An assessment of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welds between Inconel 718 and 310S austenitic stainless steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 116, No 3, pp. 37-46,

باعث بدست آمدن این میزان سختی در فلز جوش شده است. همان طور که مشاهده می شود اختلاف سختی فلز جوش اینکونل ۶۲۵ نسبت به فلز جوش اینکونل ۸۲ و فولاد زنگ نزن 316L به مقدار حدود ۷-۵ ویکرز بالاتر است. وجود ساختار ریختگی در ناحیه فلز جوش در همه نمونه ها باعث ایجاد اختلاف کم در مقدار سختی ها در ناحیه فلز جوش شده است.

جدول ۵- میانگین سختی در فلزات پایه و فلزات جوش

میانگین سختی (ویکرز)

فلز جوش اینکونل	فلز جوش فولاد	فلز جوش اینکونل	فلز پایه اینکولوی	فلز پایه فولاد
۸۲	۳۱۶L	۶۲۵	۸۲۵	۳۱۶L
۲۲۷	۲۲۵	۲۳۲	۲۰۵	۱۸۸

#### ۴- نتیجه گیری

- بررسی ریزساختار فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ نشان داد که ساختار زمینه به صورت فاز آستنیت همراه با رسوبات ریز و پراکنده در سراسر ساختار می باشد. همچنین مشاهدات ریزساختاری فلز پایه فولاد زنگ نزن L 316 نشان از حضور ساختار زمینه آستنیتی همراه با فریت دلتا در ساختار بود.

- ریزساختار حاصل از فلز جوش در تمامی نمونه های جوشکاری شده به صورت فاز زمینه ی آستنیتی همراه با رشد دندریت های ستونی در کناره ی جوش و دندریت های هم محور در مرکز جوش بود. علت این نوع رشد به نحوه انجماد و سرعت سرد شدن فلز جوش بر می گردد. و در بین فلزات جوش اینکونل ۶۲۵ دارای ظریف ترین ساختار دندریتی بود. همچنین در فلز جوش اکثر نمونه ها مرزخانه های مهاجرت کرده قابل مشاهده بود.

- نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیکی انرژی از رسوبات موجود در ساختار فلز جوش اینکونل ۸۲ نشان از حضور برخی کاربیدها از جمله کاربید نیویوم را داد. همچنین بررسی

- 9-Sireesha, M., Albert, S. K., Shankar, V., and Sundaresan, S., "A comparative evaluation of welding consumables for dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and Alloy 800", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 279, No. 1, pp. 65-73, 2000
- 10-Lee, H.-T., Jeng, S.-L., Yen, C., and Kuo, T.-Y., "Dissimilar welding of nickel-based Alloy 690 to SUS 304L with Ti addition", *Journal of nuclear materials*, Vol. 335, No. 1, pp. 59-69, 2004.
- 11-Dupont, J., Banovic, S., and Marder, A., "Microstructural evolution and weldability of dissimilar welds between a super austenitic stainless steel and nickel-based alloys", *Welding Journal*, Vol. 82, No. 6, pp. 125-129, 2003.
- 12-Cui, Y., Xu, C., and Han, Q., "Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation", *Scripta Materialia*, Vol. 55, No. 11, pp. 975-978, 2006.
- 2014.
- 6-Shah Hosseini, H., Shamanian, M., and Kermanpur, A., "Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds", *Materials Characterization*, Vol. 62, No. 4, pp. 425-431, 2011.
- 7-Sireesha, M., Shankar, V., Albert, S. K., and Sundaresan, S., "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 292, No. 1, pp. 74-82, 2000.
- 8-Sireesha, M., Albert, S. K., and Sundaresan, S., "Influence of high-temperature exposure on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal welds between modified 9Cr-1Mo steel and Alloy 800", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 36, No. 6, pp. 1495-1506, 2005.