علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۹۵، صفحه ۳۱-۲۱

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

رسول قاسمی*[۱]، ابراهیم حشمت دهکردی[۲]، مرتضی شمعانیان اصفهانی[۳]

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 نسخهٔ 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 ۶۲۵استفاده شده است. نمونه ها پس از برش و آماده سازی، به روش جوشکاری قوسی تنگستن- گاز پالسی با جریان پیک ۲۲۰ و جریان زمینه ی 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 محوربود. فلز جوش اینکونل ۶۲۵ دارای ظریف ترین ساختار دندریتی بود. بررسی‌های 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 اینکونل۶۲۵ 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[1], E. HeshmatDehkordi[2], M. Shamanian[3]**

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

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

**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**

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 می‌افتد ترک و نهایتاً شکست اتصال است [۵-۳].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 فولاد زنگ نزن آستنیتی316L 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 جوش‌پذیری و خواص اتصال بین اینکونل ۶۱۷ و فولاد زنگ نزن ۳۱۰پرداخته شده است[۶]. نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد فلزپرکننده پایه نیکل (اینکونل) در بین چهار فلزپرکننده بهترین انتخاب است. در تحقیقی دیگرکه توسط سیریشا انجام شده است نشان داده شد که فلزات پرکننده اینکونل ۱۸۲/۸۲ بهترین خواص را در جوشکاری اتصال غیرمشابه316LN به آلیاژ ۸۰۰ ایجاد می‌کنند[۹-۷].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 می‌شود[۱۰]. ریزساختار و جوش‌پذیری 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 جوش‌پذیری

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

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 می‌توان به ساختار مناسبی رسید[۱۱].

این تحقیق به سازندگان وکارفرمایان 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 می‌آید.

## 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 جدول۱ و جدول۲ آورده شده است. ورق های اولیه با ضخامت ۶ میلیمتر به ورق هایی با ابعاد ۳۰۰ میلیمتر طول و۶۰ 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 پاس ریشه و در ادامه جهت رونشانی پاس های دوم و سوم بهره برده شد. در جدول۳ 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 ۳۰۰ * ۶۰ * ۶ میلی متربریده شد. لبه سازی نمونه ها به صورت شکل Vبا زاویه ۷۰ درجه براساس ASME Sec IXدر نظر گرفته شد. عرض ریشه جوش تقریبا 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 الکتریک 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٪و با استفاده از الکترود تنگستن توریم دار به قطر ۲/۴ میلی متر انجام گرفت. جوشکاری نمونه ها بدون پیشگرم و با استفاده از روش جوشکاری قوسی الکترود تنگستنی 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

جدول۱-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 |

جدول۲- 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 |

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

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 | – |

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 فولادAISI 316L و Incoloy 825خریداری شده آنالیز کوانتومتری انجام گرفت. نمونه ها در محلول ماربل ($50cc\ H_2O + 10gr\ CuSO_4 + 50cc\ HCL$) 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 نوریNIKON-EPIPHOTO300جهت 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 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 وبر 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 سنجیLESTZ 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.

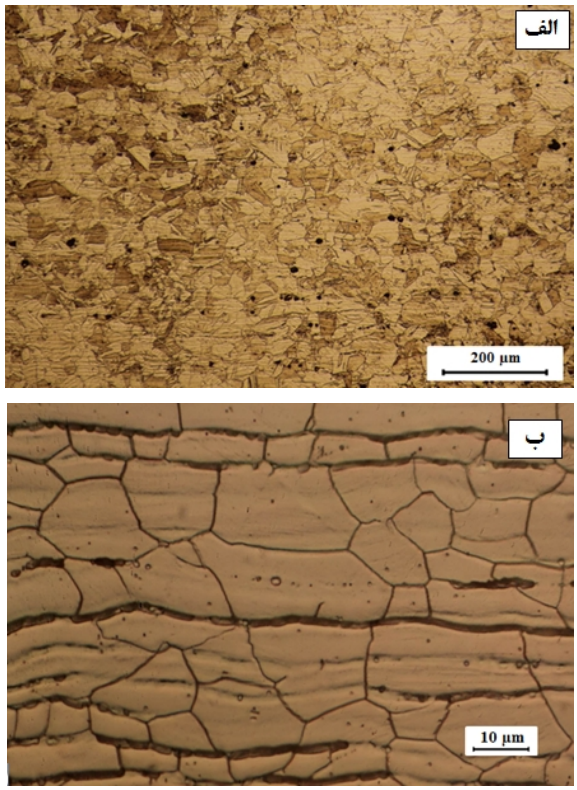
## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱ بررسی ریزساختار فلزات پایه

شکل۱ (الف) تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار اینکولوی۸۲۵ 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

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

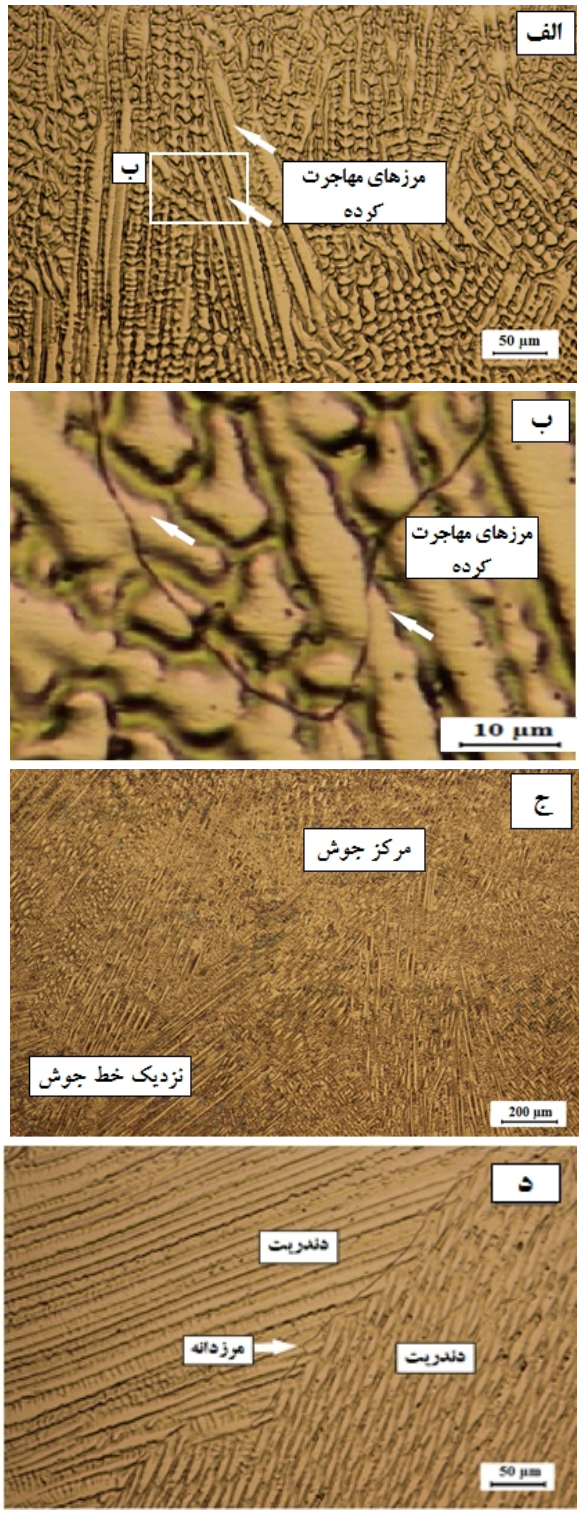
دلتا کاملا مشخص است (تصویر ب شکل ۱).




شکل ۱- الف) ریزساختار اینکولوی ۸۲۵ اچ شده با ماربل، ریزساختاری با دانه های هم محور گاما ب) ریزساختار میکروسکوپی نوری فولاد زنگ نزن316L با زنجیره فریت دلتا.

### ۳-۲- ریزساختار فلزات جوش

ساختار دانه بندی فلز جوش در شکل۲ نشان داده شده است. ریزساختار مربوط به اینکونل ۸۲ در تصویر الف کاملا آستنیتی بوده و از دانه هایی تشکیل شده است که تقریبا 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 اینکونل ۸۲ بصورت گسترده وجود دارد که نمونه ای از آن در شکل۲(ب) نشان داده شده است[۶].تصویر (ج)ریزساختار فلز جوش مربوط به فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵ را پس از جوشکاری نشان می‌دهد.




شکل ۲- ریزساختار فلز جوش اینکونل ۸۲ در نزدیکی خط جوش الف) نحوه ی رشد رقابتی ب) تصویر مرزهای مهاجرت کرده در بزرگنمایی بالا، ج) ریزساختار فلز جوش اینکونل 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

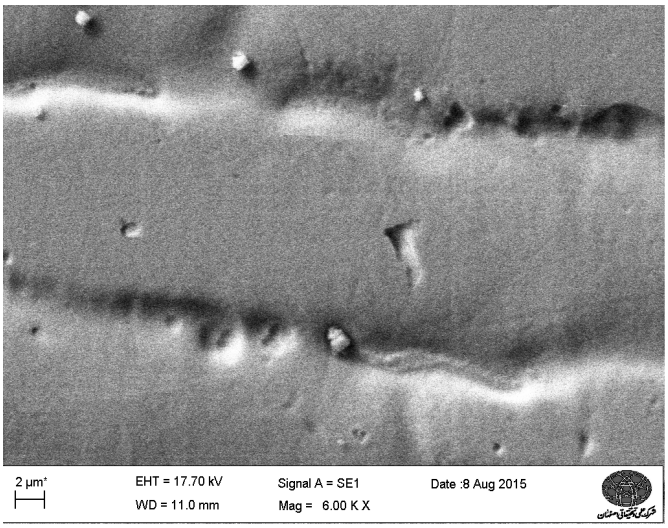
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

مطابق انتظار فلز جوش دارای زمینه آستنیتی بوده و در مرکز جوش ساختار به صورت دانه‌های هم‌محور با دندریت‌های هم‌محور است. این در حالی است که با حرکت به سمت خط ذوب دانه‌ها، دندریت‌های ستونی نیز در ساختار دیده می‌شود. در تصویر (د) ریزساختار فلز جوش با فلز پر کننده 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 کاملا قابل مشاهده است.

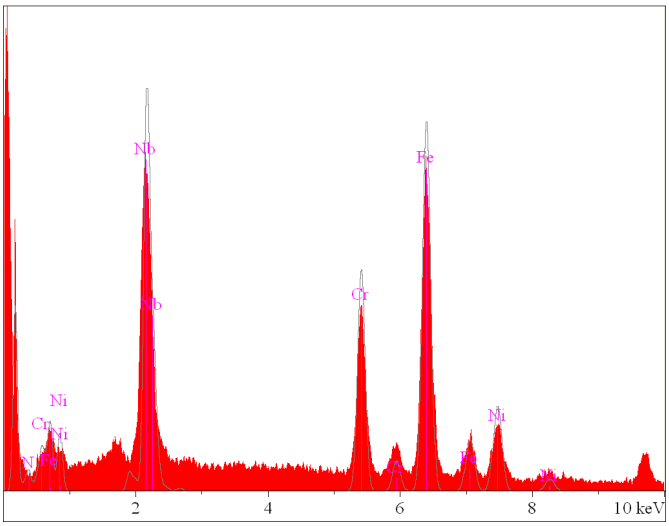
در مقایسه با فلز جوش اینکونل ۸۲ و فلز جوش فولاد زنگ نزن 316 L ، فلز جوش اینکونل ۶۲۵ از دانه‌بندی ریزتری برخوردار است. ایجاد شرایط تحت انجماد ترکیبی در اثر اعمال حرارت ورودی کم و سرعت بالای جوشکاری در حوضچه مذاب باعث بوجود آمدن ساختار دندریتی هم‌محور ظریف می شود. بنظر می رسد شرایط فوق در نمونه های جوشکاری 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 شکل۳نشان داده شده است. نتایج آنالیز این نوع از رسوبات (رسوب شماره ۱)نشان می دهد که این رسوب غنی از عنصر نیوبیوم(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 (شکل۴).

اما با توجه به نتایج تحقیقات انجام گرفته توسط محققان دیگر به نظر می رسد که نوع این رسوبات به شکل کاربید نیوبیوم(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 لاوه وجود دارد که به نظر می رسد این فاز نیز غنی از Nb می باشد [۶،۴].




شکل۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی از فلز جوش اینکونل ۸۲ ، تصویر بازوهای دندریتی با بزرگ نمایی بالا و حضور رسوبات مختلف در ساختار.



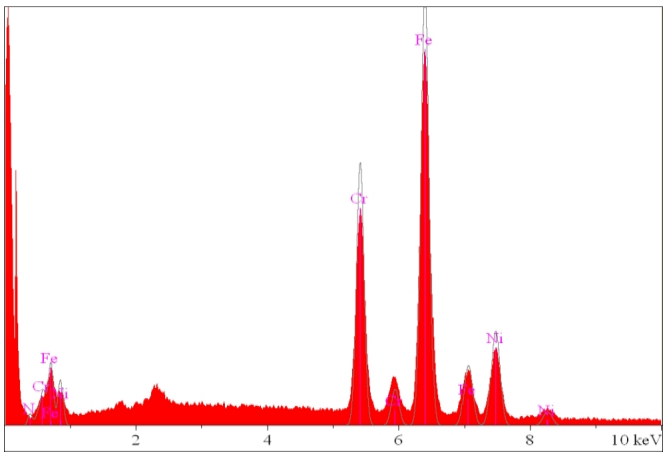

| Elt. | Atomic% | Conc | Units |
|---|---|---|---|
| N | 8.98 | 2.10 | wt.% |
| Cr | 16.81 | 14.56 | wt.% |
| Fe | 39.16 | 36.43 | wt.% |
| Ni | 12.88 | 12.59 | wt.% |
| Nb | 22.17 | 34.32 | wt.% |
| Total | 100.00 | 100.00 | wt.% |

شکل ۴- نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی(EDS) رسوب موجود در شکل۳ (نقطه ۱).

نتایج آنالیز عنصری مربوط به رسوب شماره ۲ در شکل۳ نشان از غنی بودن این رسوب از دو عنصر کروم و آهن است (شکل۵). به نظر می رسد که رسوب حاضر از نوع رسوبات

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

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



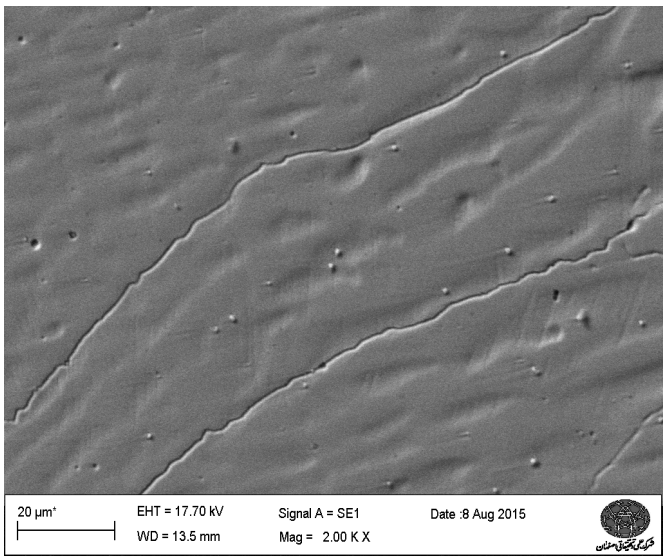

| Elt. | Atomic % | Conc | Units |
|---|---|---|---|
| N | 8.25 | 2.22 | wt.% |
| Cr | 20.61 | 20.57 | wt.% |
| Fe | 53.50 | 57.35 | wt.% |
| Ni | 17.63 | 19.87 | wt.% |
| Total | 100.00 | 100.00 | wt.% |

شکل ۵-نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) رسوب موجود در شکل۳ (نقطه ۲).

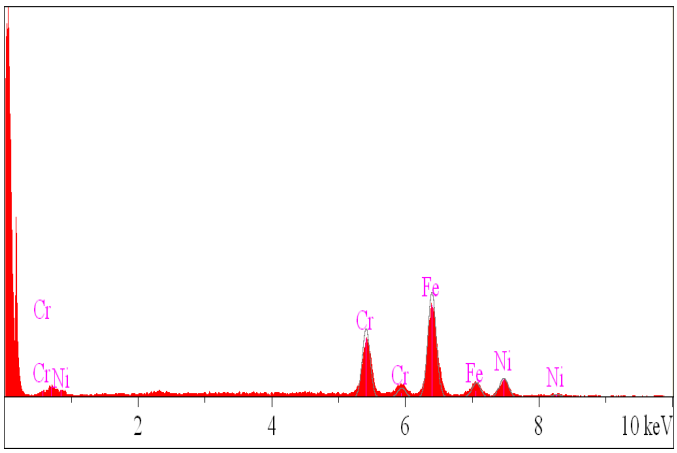
تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن316L در شکل۶نشان داده شده است. رسوباتی با اندازه‌های متفاوت در زمینه آستنیتی مشاهده می شود. به دلیل آن که کروم مهم‌ترین عنصر فعال در ترکیب شیمیایی است، لذا تشکیل کاربید کروم محتمل بوده و نتایج آنالیز طیف سنجیEDS آن را تایید می‌کند (شکل۷).

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

ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۸۲ و فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ در شکل۸ (الف) نشان داده شده است. یک فصل مشترک کاملا پیوسته در سراسر مرز جوش مشاهده می‌شود.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




شکل۶-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.% |

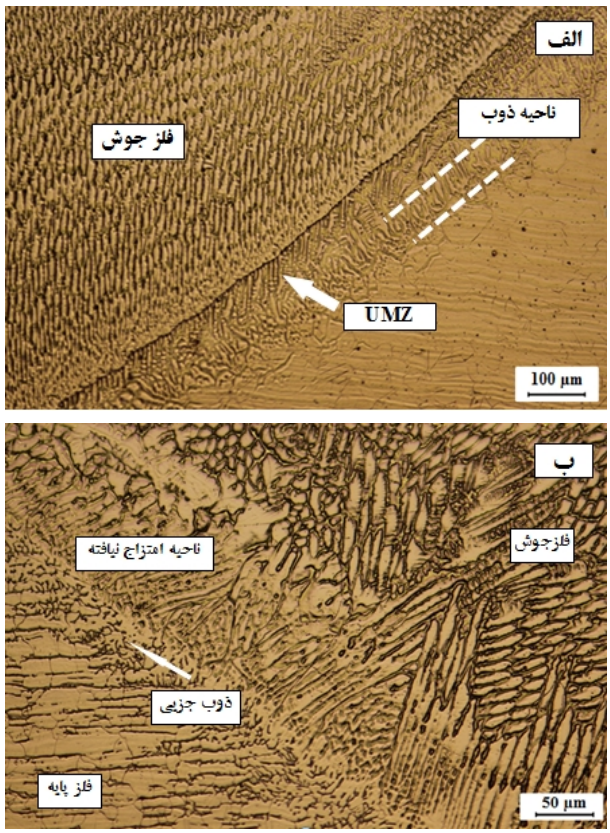
شکل۷- نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) رسوبات موجود در فاز زمینه آستنیتی فولاد 316L

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

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

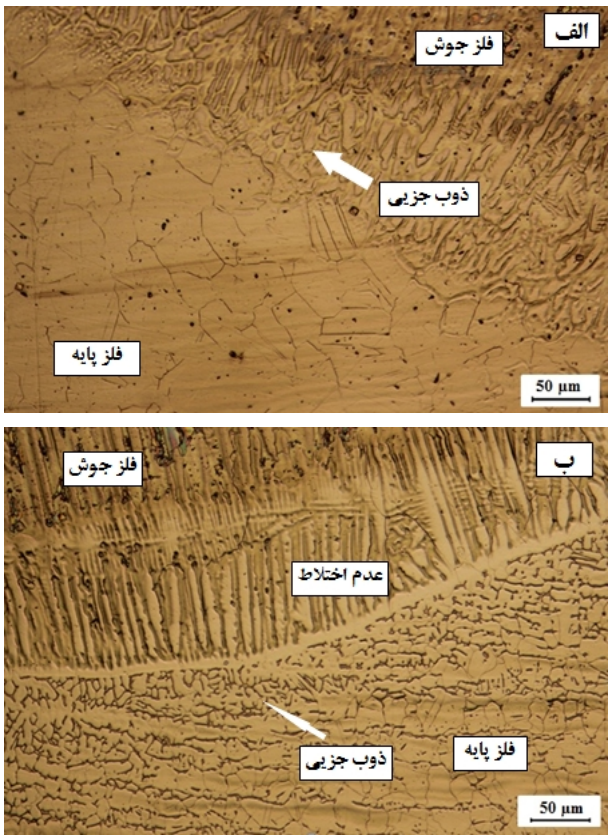
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

پایه ذوب شده کافی بوده است. فصل مشترک در سمت دیگر اتصال بین فلزجوش اینکونل ۸۲ و فولادزنگ 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 آن‌که 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 وسیع‌تر شده و منطقه ذوب جزیی در این فصل مشترک است[۱۲].




شکل۸- 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 می‌گیرد، فلز جوش اینکونل ۶۲۵ است. شکل۹(الف) فصل مشترک این فلز جوش با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ را نشان می‌دهد که منطقه مخلوط نشده در این سمت از اتصال، عرض چندانی ندارد و این بدان معنی است که عمل اختلاط به خوبی انجام شده است. فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با فلز پایه فولاد زنگ نزن 316 L در شکل۹ (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 جزیی به چشم می خورد.

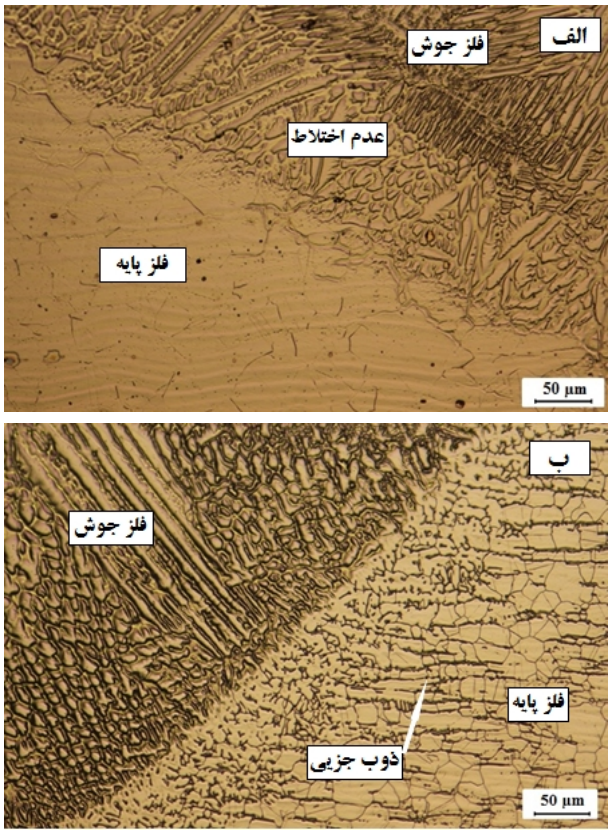



شکل۹- فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ (الف) و با فلز پایه فولاد316L (ب)

فصل مشترک اتصال فلز پرکننده 316 L با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ در شکل۱۰(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 فلزپایه 316 L در شکل۱۰ (ب) نشان داده شده است. یک فصل مشترک یکنواخت، بدون

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

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 (اپی‌تکسیال) در فلز جوش به خوبی مشخص است.



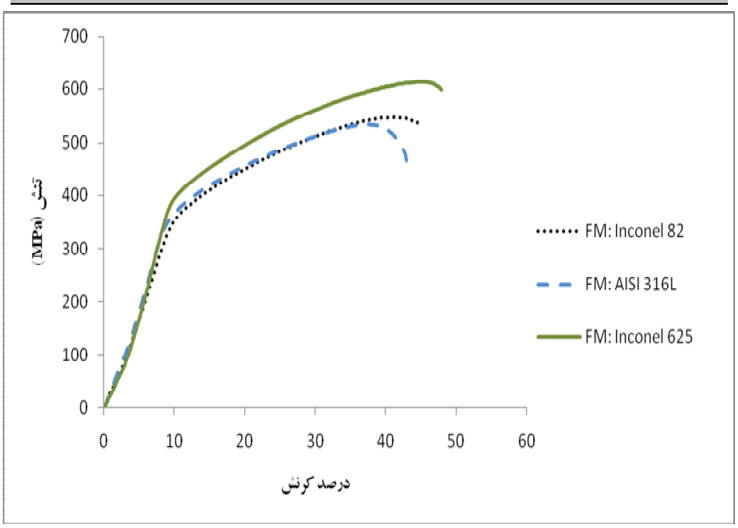

شکل۱۰- فصل مشترک فلز جوش فولاد 316 L با فلز پایه اینکولوی ۸۲۵
ب) فصل مشترک فلز جوش فولاد 316 L با فلز پایه فولاد 316 L.

### ۳-۴- ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات

نتایج حاصل از انجام آزمون مکانیکی کشش در شکل۱۱ 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 اینکونل۸۲ 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 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 فولاد316L) 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 جدول۴ ارایه شده است. به منظور مقایسه بهتر اطلاعات بدست آمده از آزمون کشش فلزات پایه نیز در مقایسه آورده شده است.

جدول۴- نتایج حاصل از آزمون کشش

| نوع فلز پر کننده | استحکام تسلیم (MPa) | استحکام کششی (MPa) | ازدیاد طول (%) |
|---|---|---|---|
| اینکونل ۸۲ | ۳۴۰ ± ۱۰ | ۵۴۵ ± ۹ | ۴۵ ± ۳ |
| فولاد ۳۱۶L | 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 ۳۱۶L | ۲۸۰ ± ۵ | ۵۴۵ ± ۷ | ۶۵ ± ۶ |




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

درجدول۵مقدار 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 فرایند مناسب جوشکاری و سرعت سرد شدن بالا

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

باعث بدست آمدن این میزان سختی در فلز جوش شده است.همان طور که مشاهده می شود اختلاف سختی فلز جوش اینکونل۶۲۵ 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.

جدول۵- میانگین سختی در فلزات پایه و فلزات جوش

| میانگین سختی (ویکرز) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| فلز جوش اینکونل ۸۲ | فلز جوش فولاد ۳۱۶L | فلز جوش اینکونل ۶۲۵ | فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ | فلز پایه فولاد ۳۱۶L |
| ۲۲۷ | ۲۲۵ | ۲۳۲ | ۲۰۵ | ۱۸۸ |

## ۴- نتیجه گیری

- بررسی ریزساختار فلز پایه اینکولوی ۸۲۵ نشان داد که ساختار زمینه به صورت فاز آستنیت همرا ه با رسوبات ریز و پراکنده در سراسر ساختار می باشد. همچنین مشاهدات ریزساختاری فلز پایه فولاد زنگ نزن 316 L 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 مرزدانه 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 نیوبیوم را داد. همچنین بررسی 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 وسرعت 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 فولادL 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 نزنL 316 (۲۲۴ ویکرز) می باشد .

-با تجزیه وتحلیل کلیه نتایج وآزمون های انجام گرفته می‌توان چنین نتیجه گرفت که از لحاظ خواص مکانیکی (استحکام کششی)فلز پرکننده ی اینکونل ۶۲۵ می‌تواند 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 Ashrafizadeh, 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,

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

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.
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 vibrationon unmixed zone formation", Scripta Materialia,Vol. 55, No. 11, pp. 975-978, 2006.

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]