



## ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶

پویا بصیر<sup>۱</sup>، مرتضی شمعیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران  
۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸  
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

### کلمات کلیدی:

اینکونل ۷۱۸  
اتصال غیر مشابه  
AISI ۳۱۶  
فلز پرکننده ۷۱۸  
فلز پرکننده ۶۲۵

**خلاصه:** در پژوهش حاضر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با دو فلز پرکننده ۷۱۸ (ERNiFeCr-۲) و ۶۲۵ (ERNiCrMo-۳) مورد بررسی قرار گرفت. پس از جوشکاری، ریزساختار و خواص مکانیکی نواحی مختلف اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت. ترکیب و رسوبات فصل مشترک با استفاده از آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس مشخص شدند. همچنین خواص مکانیکی اتصال با استفاده از آزمایش کشش، ضربه و ریز سختی سنجی بررسی شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که ساختار انجمادی فلز پرکننده ۷۱۸ ریزساختار آستنیتی با شبکه دندریتی همراه با توزیع کاربرد و فلز پرکننده ۶۲۵ نیز ریزساختار آستنیتی با شبکه دندریتی ایجاد کرده است. در آزمایش کشش، فلز پرکننده ۷۱۸ دارای بیشترین استحکام کششی به میزان ۵۲۸ مگا پاسکال و شکست تمامی نمونه‌های مورد آزمایش از ناحیه فلز پایه زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ رخ داد. نتایج آزمایش ضربه نشان داد که بیشترین مقدار انرژی شکست به میزان ۵۰ ژول برای فلز پرکننده ۶۲۵ است. آزمایش ریز سختی نیز مشخص کرد که فلز پرکننده ۷۱۸ دارای بیشترین سختی به میزان ۲۱۴ ویکرز است.

### ۱- مقدمه

سوپر آلیاژها بر پایه عناصر آلیاژی به سه دسته پایه نیکل، پایه آهن-نیکل و پایه کبالت تقسیم‌بندی می‌شوند، که در محیط‌های اکسیدی بسیار شدید و دمای بالا برای مدت زمان طولانی به کار برده می‌شوند [۱]. از ویژگی‌های سوپر آلیاژ پایه نیکل به پایداری حرارتی و افزایش استحکام ناشی از رسوب سختی می‌توان اشاره کرد [۲]. اینکونل ۷۱۸ به عنوان یک سوپر آلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده با استحکام بالا در صنایع نفت و گاز، زبردربایی و توربین‌های گازی به کار برده می‌شود. ویژگی‌هایی نظیر مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون، مقاومت به خزش مناسب، سبب شده است که در صنعت مورد توجه بیشتری قرار گیرد [۳]. عناصر آلیاژی موجود در این سوپر آلیاژ مانند تیتانیوم، آلومینیوم، نیوبیوم می‌باشد که از ترکیب با نیکل یک رسوب تقویت‌شده ایجاد می‌کند که این رسوب در بیشتر شرایط با زمینه آستنیتی همخوانی دارد و استحکام را افزایش می‌دهد. از مهم‌ترین رسوبات این سوپر آلیاژها می‌توان به  $Ni_3Nb/Ni_3(Ti-Al)$  و ترکیبات

کاربرد نیوبیوم و کربونیت‌ریدها و فاز لاه اشاره کرد [۴].

فولادهای زنگ نزن آستنیتی یکی از پرمصرف‌ترین گروه‌های فولاد زنگ نزن محسوب می‌شوند که علاوه بر استحکام مناسب و مقاومت به خوردگی از انعطاف‌پذیری و چقرمگی خوب تحت بارگذاری کششی و مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون برخوردار هستند و با رعایت یکسری شرایط در جوشکاری آن‌ها، در ردیف فولادهای جوش پذیر قرار می‌گیرند [۵]. از لحاظ استحکام نیز با فولادهای نرم برابری می‌کنند به طوری که حداقل استحکام تسلیم این فولادها در دمای محیط ۲۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. به خاطر فواید و کاربردهای مهندسی این فولادها از لحاظ جوش‌پذیری و انعطاف‌پذیری بر خلاف قیمت بالای آن‌ها، هزینه کلی در مقایسه با سایر گروه‌های فولاد زنگ نزن کاهش پیدا می‌کند. عناصری همچون نیکل (بیش از ۸ درصد وزنی)، کربن، نیتروژن و مس محدوده آستنیت را افزایش می‌دهند. کربن مقاومت به خزش در دماهای بالا را افزایش می‌دهد، نیتروژن در دمای محیط و سرمازایی به آلیاژ اضافه می‌شود و باعث افزایش استحکام در حدود ۲ برابر می‌شود. استفاده از فولادهای زنگ نزن

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shamanian@cc.iut.ac.ir



آستینیتی در محیط‌های قلیایی و کلردار مناسب نیست [۶]. از دیگر خواص این فولادها می‌توان از بکارگیری آن‌ها از دمای برودتی تا دمای بالا اشاره کرد. کاربیدهای  $M_{23}C_6$  و نیتريد های CrN مرسوم‌ترین رسوبات در این آلیاژها می‌باشند. این رسوبات معمولاً در مرز دانه‌ها و در صورت وجود فریت در فصل مشترک فریت آستینیت شکل می‌گیرند. در جوشکاری این فولادها یکسری تدابیر باید در نظر گرفته شود تا از بروز مشکلاتی نظیر ترک خوردن انجمادی، ترک ذوبی، کاهش انعطاف پذیری، ترک بازگرمایش، آلودگی مس، تشکیل کاربید و فاز سیگما جلوگیری شود [۷]. فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به‌عنوان یکی از پرکاربردترین فولادهای زنگ نزن آستینیتی در صنایع پتروشیمی، ساخت لوله، ورق‌های مقاوم در محیط‌های اسیدی و محیط‌های خورنده و آب‌شور و پروانه‌های پمپ آب دریا کاربرد دارند [۸].

با توجه به شرایط تلفیقی در محیط‌های خورنده و استحکام در دمای بالا لازم است که طراحی ساخت قطعات به‌گونه‌ای باشد که مواد مورد اتصال با ترکیب، خواص مکانیکی و فیزیکی متفاوت جهت کارایی در سرویس یا تغییر در خواص مکانیکی به هم اتصال یابند [۹]. اتصالات غیرمشابه به دلیل فوایدی از جمله کاهش هزینه‌های مواد و قابلیت انعطاف‌پذیری مورد توجه صنایع قرار گرفته‌اند. ولی یک موضوع چالش برانگیز در این زمینه مسئله تفاوت در ترکیب شیمیایی و ضریب انبساط حرارتی مواد مورد اتصال می‌باشد. روش‌های اتصال مختلفی از جمله روش‌های جوشکاری قوسی، نفوذی و اصطکاکی اغتشاشی در اتصال قطعات غیرمشابه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در یک اتصال غیرمشابه علاوه بر سازگاری فلزهای پایه، فلز پرکننده مناسب می‌تواند بر یک جوش موفقیت‌آمیز اثرگذار باشد. سازگاری متالورژیکی فلز پایه و پرکننده از اهمیت بسزایی برخوردار است تا از تشکیل فازهای مضر، ترک داغ، ترک ذوبی و انجمادی جلوگیری شود. در جوشکاری غیرمشابه آلیاژهای پایه نیکلی و زنگ نزن آستینیتی معمولاً از فلز پرکننده پایه نیکلی یا فلز پرکننده زنگ نزن استفاده می‌شود تا ترکیب شیمیایی فلز پرکننده با آلیاژ پایه نیکلی نزدیک باشد و ترک انجمادی رخ ندهد. هم‌چنین مسئله ضریب انبساط حرارتی متفاوت این دو آلیاژ باید مد نظر قرار گیرد و فلزهای پرکننده باید از انعطاف‌پذیری مناسب برخوردار باشند تا بتوانند تنش‌های داخلی را تحمل کنند. بنابراین انتخاب فلز پرکننده مناسب به‌عنوان یکی از مواردی که باید در یک اتصال بهینه در نظر گرفته شود لازم و ضروری است. با توجه به پژوهش‌های سال اخیر جهت انتخاب فلز پرکننده مناسب در جوشکاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل و فولاد زنگ نزن آستینیتی پیشرفت‌هایی مشاهده

گردیده است. در این زمینه قاسمی و همکاران [۱۰] به ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه اینکولوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با سه فلز پرکننده اینکونل ۸۲، اینکونل ۶۲۵ و L۳۱۶ پرداختند. نتایج نشان داد ریزساختار در تمامی نمونه‌ها، آستینیتی همراه با رشد دندریت ستونی و هم‌محور بود. بیشترین استحکام کششی مربوط به فلز پرکننده ۶۲۵ به میزان ۶۱۰ مگاپاسکال گزارش شد. بیشترین سختی فلزجوش مربوط به فلزجوش اینکونل ۶۲۵ با میانگین سختی ۲۳۲ ویکرز و کمترین سختی مربوط به فلز پرکننده زنگ نزن L۳۱۶ به میزان ۲۲۴ ویکرز گزارش شد. مرتضایی و شمعیان [۱۱] نیز به بررسی نوع فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرمشابه اینکونل ۷۱۸ به فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۰ با فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن گاز با سه فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵، اینکونل ۸۲ و فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۰ پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که با فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵، شرایط انجمادی ساختار دندریتی به وجود آورده است و فلز جوش ۳۱۰ دارای ترک انجمادی در امتداد مرز دانه فرعی انجماد می‌باشد و فلز پرکننده ۸۲، کمترین حساسیت به ترک انجمادی را نشان داد. دکم و همکاران [۱۲] به بررسی خصوصیات ریزساختاری و مکانیکی جوشکاری فلزات غیرمشابه اینکونل ۶۲۵ و L۳۱۶ با فرآیندهای قوسی تنگستن-گاز پالسی<sup>۱</sup> و پیوسته<sup>۲</sup> با فلز پرکننده ERNiCr-۳ پرداختند نتایج نشان داد یک منطقه نیمه ذوب شده در سمت L۳۱۶ ایجاد شد و رشد دانه در تمامی نمونه‌ها از سمت فولاد زنگ نزن ۳۱۶ مشاهده شد. هم‌چنین روش پالسی، رسوبات یا فازهای شکننده کمتری را نشان داد. رامکومار و همکاران [۱۳] به بررسی اتصال غیرمشابه سوپر آلیاژ پایه نیکل ۷۱۸ به فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶ کم‌کربن با فرآیند ذوبی قوسی تنگستن‌گاز با سه فلز پرکننده ERNiCrMo-۱/۴/ER۲۵۹۴/ERNiCrMo-۱ پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که فلز پرکننده ERNiCrMo-۴ دارای انرژی ضربه بالاتر است. شکست تمامی نمونه‌ها از فولاد زنگ نزن آستینیتی رخ داد. در پژوهش دیگری رامکومار و همکاران [۱۴] به بررسی اثر دو فلز پرکننده ERNiCr-۳، ER۲۲۰۹ در اتصال اینکونل ۶۲۵ و فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶ پرداختند. مهاجرت مرز دانه با فلز پرکننده ERNiCr-۳ و رشد دانه با فلز پرکننده ER۲۲۰۹ گزارش شد و نتایج حاصل از آزمایش کشش مشخص کرد که شکست همه نمونه‌ها از فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶ رخ داد. رامکومار و همکاران [۱۵] به تأثیر فلزهای پرکننده ER۲۵۵۳ و ERNiCu-۵ در اتصال غیرمشابه

1 Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding (PCGTAW)  
2 Constant Current Gas Tungsten Arc Welding (CCGTAW)

مرحله‌ای می‌باشد که چهار مرحله نهایی فشار بالا از آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و مراحل فشار پایین‌تر از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ استفاده می‌شود. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده و ضرورت اتصال غیرمشابه این دو آلیاژ و انتخاب فلز پرکننده مناسبی که حساسیت به ترک انجمادی و ترک بازگرمی را به حداقل برساند و در اتصال‌های غیرمشابه منعطف باشد از فلزهای پرکننده پایه نیکلی استفاده شد. به طور خلاصه مطالعه جوشکاری غیر مشابه این دو آلیاژ از نظر نوآوری جهت بهبود عملکرد مشترک بین این دو ماده غیرمشابه با استفاده از فلز پرکننده مناسب است. در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از دو نوع فلز پرکننده پایه نیکلی از نوع اینکونل ۶۲۵ و اینکونل ۷۱۸ بر ریزساختار و خواص اتصال مورد نظر پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها، طراحی اتصال و جوشکاری نمونه‌ها

در این پژوهش از دو ورق غیرمشابه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ به ضخامت ۳ میلی متر در شرایط کار شده و آنیل استفاده شد. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی فلزات پایه، دستگاه طیف سنج مدل فاندری مستر<sup>۲</sup> استفاده شد و ترکیب شیمیایی فلزهای پرکننده بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده ثبت شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جوشکاری نمونه‌ها با طرح اتصال لب‌به‌لب مطابق شکل ۱ انجام شد. آماده‌سازی نمونه‌ها توسط وایرکات در ابعاد  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  صورت گرفت. قبل از جوشکاری نمونه‌ها، ناصافی‌ها روی سطوح با استفاده از سنباده برطرف شدند، همچنین برای حذف لایه‌های اکسیدی و آلودگی‌های سطحی، محل اتصال با برس سیمی و استون چربی زدایی شد.

اتصال غیرمشابه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ با استفاده از فلزات پرکننده به قطر  $2/4$  میلی‌متر و فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، انجام شد. فرآیند جوشکاری در دو پاس (یک پاس ریشه و یک پاس رویه) و بدون دمای بین پاسی از یک سمت اتصال انجام گرفت. لازم به ذکر است قطعه سرامیکی نازل ۹ میلی‌متر، قطر الکتروود تنگستنی  $2/4$  میلی‌متر با انتهای قرمز، شدت جریان ۹۰ آمپر، ولتاژ  $11/7$  ولت و میانگین سرعت جوشکاری ۱ میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶ پرداختند. نتایج نشان داد یک ناحیه غیر ممزوج از سمت فلز پایه اینکونل ۷۱۸ در ناحیه متأثر از حرارت برای همه نمونه‌ها رخ داد و جوش پالسی با فلز پرکننده مکانیکی بهتری را نشان داد. در تحقیق دیگری رامکومار و همکاران [۱۶] به مطالعه خواص سازه، روابط مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال غیرمشابه آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶ L توسط جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بدون استفاده از فلاکس فعال پرداختند. نتایج نشان داد جوش‌های اتصال غیر مشابه از این دو ماده دارای میزان سختی بالاتری هستند و حضور آخال‌ها در نواحی متأثر از حرارت براستحکام اثر منفی دارد. در پژوهش سیلوا و همکاران [۱۷] تجزیه و تحلیل اتصال جوشی غیرمشابه اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن L ۳۱۶ توسط فرایند قوسی تنگستن گاز چند پاسه مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق خصوصیات ریزساختاری، کسر حجمی فریت دلتا، فازهای لاوه، فاصله بین دندریت‌ها، میکروسختی و ابعاد نواحی جوش بررسی شد. نتایج نشان داد که گرمای ورودی بالاتر سبب افزایش فاصله بین دندریت‌ها و رقت می‌شود و کسر حجمی فریت با افزایش حرارت ورودی کاهش یافت در حالی که فازهای لاوه افزایش یافتند. همه نمونه‌های جوش رقت بالای ۸۵ درصد را نشان دادند. ضرورت انجام پژوهش در بحث اتصال غیرمشابه آلیاژهای پایه نیکل به فولاد زنگ نزن آستنیتی به طور خاص از نوع اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ به دلیل مشابهت‌های ساختاری مکعبی مرکز سطحی<sup>۱</sup> و تحمل درجه حرارت بالا که به طور همزمان می‌توانند در محیط‌های خورنده به کار برده شوند و جوش پذیری مناسبی دارند و به طور گسترده در صنایع هوا و فضا، هسته‌ای و توربین‌ها کاربرد عملی دارند. این نوع اتصال غیرمشابه ترکیبی از خواص را ارائه می‌دهند و امکان تطبیق مواد با محیط را آسان‌تر می‌کنند. از دیگر موارد قابل ذکر در زمینه اتصال غیرمشابه این دو آلیاژ طبق پژوهش رامکومار و همکاران [۱۶] این هست که اتصال غیرمشابه این دو آلیاژ استحکام بیشتری نسبت به اتصالات مشابه هر دو آلیاژ دارد. فرتی و همکاران [۱۸] گزارش کردند که اتصال غیرمشابه کانکتور اینکونل ۷۱۸ و تیوب آلیاژ ۳۱۶ برای انتقال آمونیاک به ایستگاه فضایی کاربرد دارد. هندرسون و همکاران [۱۹] نیز کاربرد اتصال غیرمشابه اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در موتورهای توربین گاز را گزارش نمودند که این اتصال مقاومت خوبی در برابر خوردگی حفره‌ای دارد. بر اساس گزارش پرابهاران و همکاران [۱۳] از ترکیب دو فلز سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶ در موتور توربین گازی استفاده شده است، این موتور دارای روتور کمپرسور ۱۰

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فلزهای پایه برحسب درصد وزنی

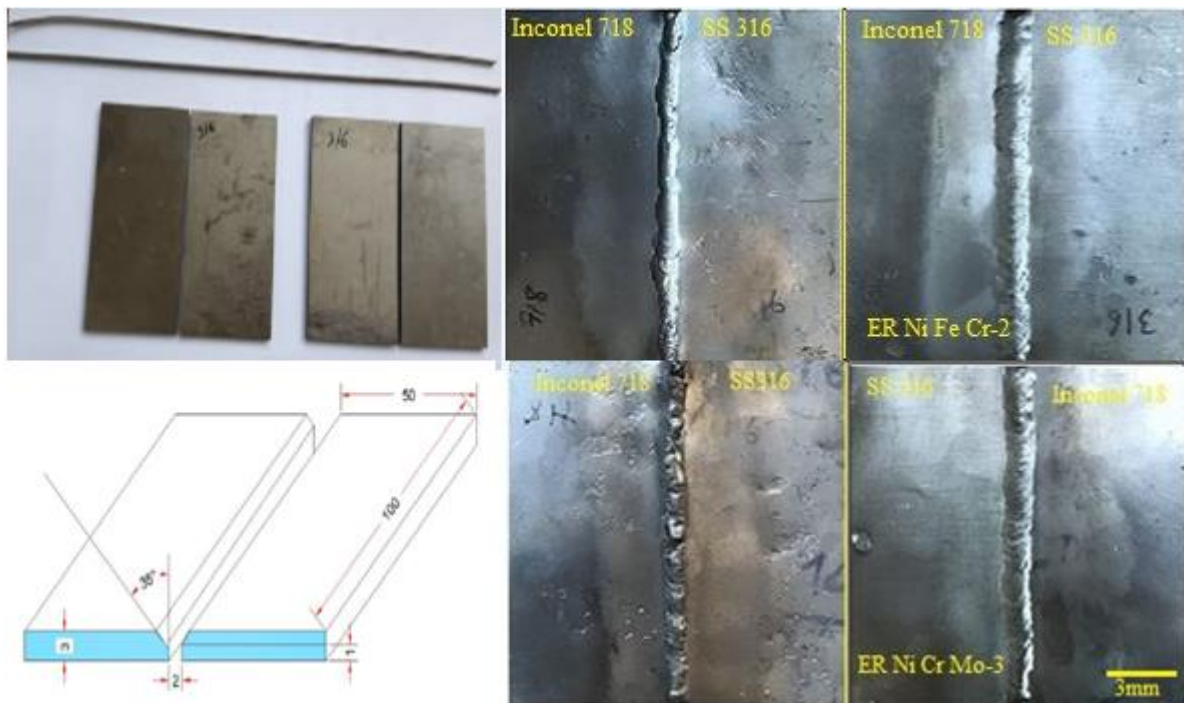
Table 1. Chemical composition of base metals by weight percentage

| عنصر        | نیکل | مس    | نیوبیوم | آلومینیوم | مولیبدن | کروم  | تیتانیوم | منگنز | آهن   | گوگرد | سیلیسوم | کربن  |
|-------------|------|-------|---------|-----------|---------|-------|----------|-------|-------|-------|---------|-------|
| اینکونل ۷۱۸ | پایه | ۰/۱۰۳ | ۴/۵۱۰   | ۰/۳۱۵     | ۲/۸۲۰   | ۱۷/۰۲ | ۰/۷۹۷    | ۰/۱۲۵ | ۱۸/۴۱ | ۰/۰۱۰ | ۰/۴۲۹   | ۰/۰۳۳ |
| زنگ نزن ۳۱۶ | ۱۴/۲ | ۰/۱۵۹ | ۰/۰۰۴   | ۰/۰۷۹     | ۲/۶۲    | ۱۷/۴۰ | -        | ۱/۴۵  | پایه  | ۰/۰۵  | ۰/۴۹۶   | ۰/۱۲۶ |

جدول ۲. ترکیب شیمیایی فلزهای پرکننده برحسب درصد وزنی طبق کاتالوگ شرکت سازنده (ESAB)

Table 2. Chemical composition of filler metals by weight percentage according to the manufacturer's catalog (ESAB)

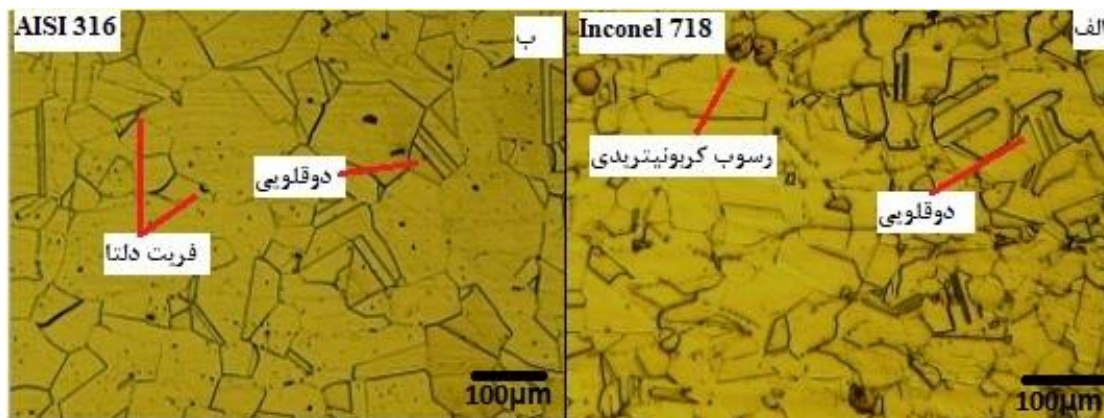
| عنصر            | نیکل | مس   | نیوبیوم + تانتالم | آلومینیوم | مولیبدن | کروم | تیتانیوم | منگنز | آهن       | گوگرد | سیلیسوم | کربن |
|-----------------|------|------|-------------------|-----------|---------|------|----------|-------|-----------|-------|---------|------|
| فلز پرکننده ۷۱۸ | ۵۵   | ۰/۳۰ | ۵/۵               | ۰/۸       | ۳/۳۰    | ۲۱   | ۱/۱۵     | ۰/۳۵  | باقیمانده | ۰/۰۱۵ | ۰/۳۵    | ۰/۰۸ |
| فلز پرکننده ۶۲۵ | ۵۰   | ۰/۵۰ | ۴/۷۵              | ۰/۲       | ۲/۸۰    | ۱۷   | ۱/۶۵     | ۰/۳۵  | باقیمانده | ۰/۰۱۵ | ۰/۳۵    | ۰/۰۸ |
| فلز پرکننده ۶۲۵ | ۵۰   | ۰/۵۰ | ۴/۱۵              | ۰/۴۰      | ۱۰      | ۲۳   | ۰/۴۰     | ۰/۵۰  | ۵         | ۰/۰۱۵ | ۰/۵۰    | ۰/۱۰ |
| فلز پرکننده ۶۲۵ | ۵۰   | ۰/۵۰ | ۳/۱۵              | ۰/۴۰      | ۸       | ۲۰   | ۰/۴۰     | ۰/۵۰  | ۵         | ۰/۰۱۵ | ۰/۵۰    | ۰/۱۰ |



شکل ۱. مواد اولیه، نمونه قطعات جوشکاری شده با فلزات پرکننده و طرح اتصال

Fig. 1. Raw materials, examples of welded parts with filler metals and joint scheme





شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فلزات پایه

Fig. 2. Optical microscope images of the microstructure of base metals

## ۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری و مکانیکی

به منظور ارزیابی ریزساختاری، مناطق مختلف آلیاژ مورد اتصال شامل؛ فلز پایه، فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت، از قطعه‌های جوشکاری شده رادیوگرافی گرفته شد و با استفاده از نتایج رادیوگرافی از قسمت‌های مختلف اتصال نمونه‌های متالوگرافی بدون عیب با ابعاد  $30 \times 10$  میلی‌متر، توسط وایرکات تهیه و با سنباده ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ سنباده‌زنی و توسط پودر آلومینای  $0/3$  میکرون پرداخت نهایی شدند. از محلول اسید هیدروکلریک، اسید نیتریک و اسید استیک جهت ظاهرسازی استفاده شد. به‌منظور مشخصه یابی و بررسی دقیق‌تر ریزساختار، از میکروسکوپ الکترونی مدل میرا<sup>۱</sup> ساخت شرکت تی‌اسکن<sup>۲</sup> مجهز به آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۳</sup> استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی اتصال، از آزمایش‌های کشش، ضربه و سختی سنجی استفاده شد. قبل از انجام آزمایش‌های مکانیکی، به کمک نتایج رادیوگرافی، جهت تعیین استحکام کششی نمونه‌های آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8 آماده‌سازی و تهیه شدند. بارگذاری با نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه مدل اینسترن<sup>۴</sup> ۴۴۸۶ صورت گرفت. آزمایش مقاومت در برابر ضربه ۳ نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده اینکونل ۷۱۸ و ۳ نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵ مطابق استاندارد ASTM E۲۳ توسط دستگاه شرکت سنتام مدل سیت ۳۰۰<sup>۵</sup> و در دمای محیط صورت گرفت. آزمایش سختی سنجی ویکرز نیز ۳ مرتبه از

هر ناحیه با هر فلز پرکننده مطابق با استاندارد ASTM E۹۲ و با وزنه  $grf300$  به مدت زمان بارگذاری ۵ ثانیه صورت گرفت. آزمون سختی سنجی روی محل جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه نمونه‌ها انجام و اطلاعات آن‌ها ثبت شد.

## ۳- نتایج و بحث

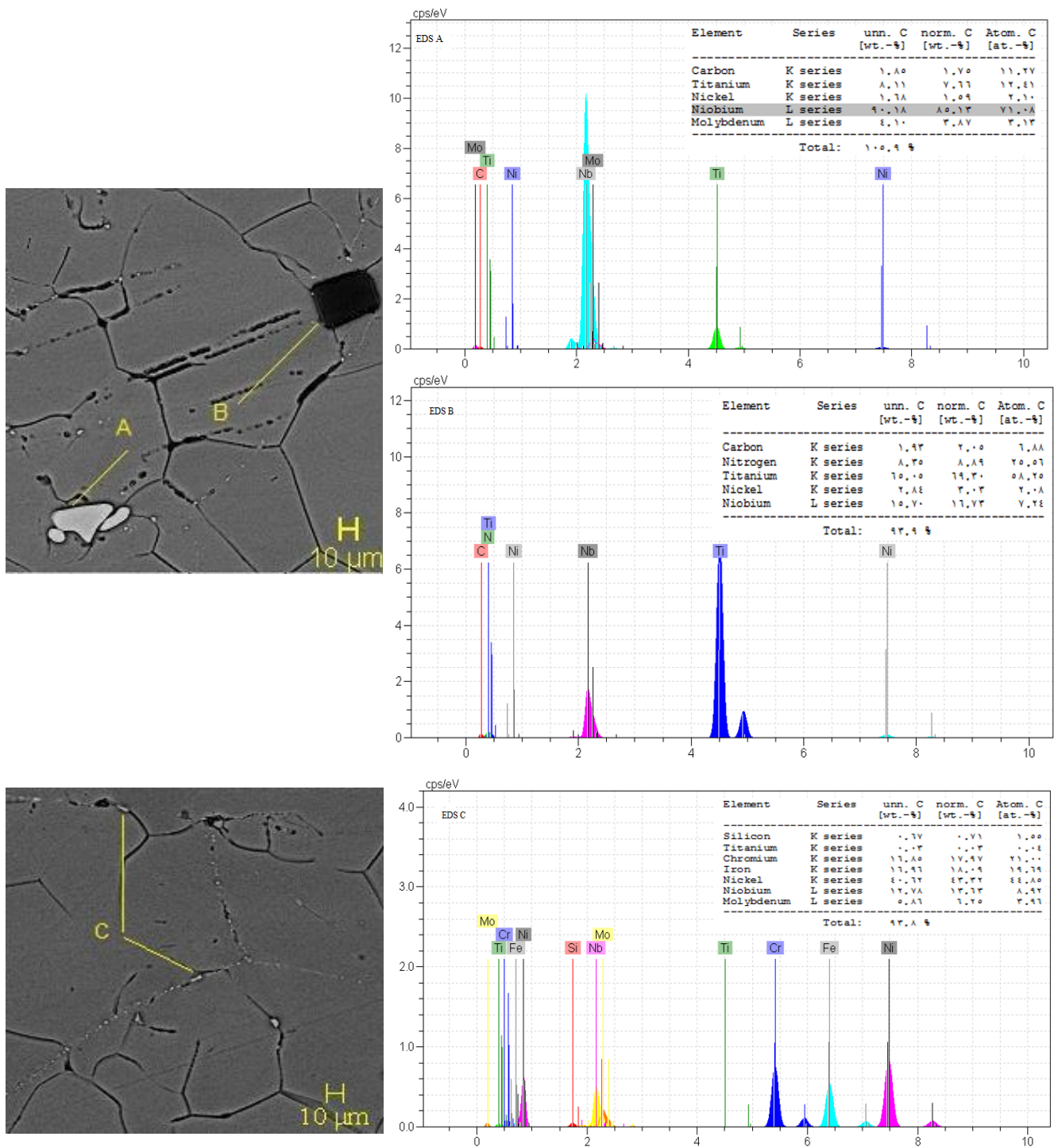
### ۳-۱- ریزساختار فلزات پایه

تصاویر میکروسکوپ نوری<sup>۶</sup> و الکترونی<sup>۷</sup> فلز پایه اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶ و رسوبات تشکیل شده، در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. آلیاژ اینکونل ۷۱۸ دارای ساختاری آستنیتی به همراه دوقلویی‌های ناشی از عملیات آنیل، رسوبات کربونیتربیدی، کاربید نیوبیم و فاز لاهه می‌باشد. عملیات آنیل این آلیاژ سبب عدم حرکت نابجایی‌ها شده و تا حدودی استحکام را افزایش می‌دهد. این آلیاژ در حالت آنیل و رسوب سخت شونده جوشکاری می‌شود که حالت آنیل مانع از ترک ذوبی در نواحی ذوب جزئی و هم چنین مانع از نرم شدن در منطقه متأثر از حرارت می‌شود.

فلز پایه زنگ نزن ۳۱۶ دارای دانه‌های آستنیت به همراه نواحی دوقلویی، ذرات فریت دلتا در ساختار می‌باشد. ذرات فریت دلتا در ساختار می‌تواند سبب بوجود آمدن فاز سیگما شود و انعطاف پذیری را کم کند. رسوبات احتمالی به همراه آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس هر دو فلز پایه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

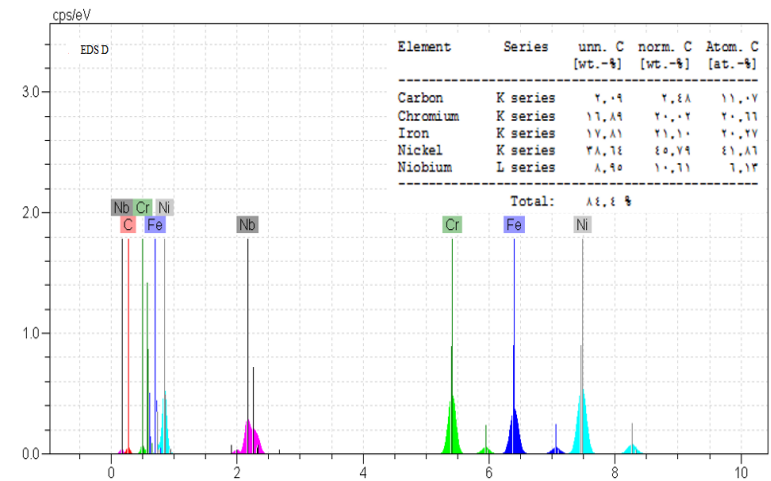
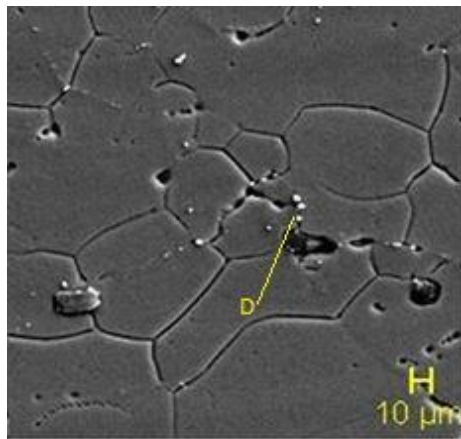
6 Optical Microscope  
7 Scanning Electron Microscope

1 MIRA3  
2 TE-SCAN  
3 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)  
4 INSTRON-4486  
5 SANTAM- SIT 300



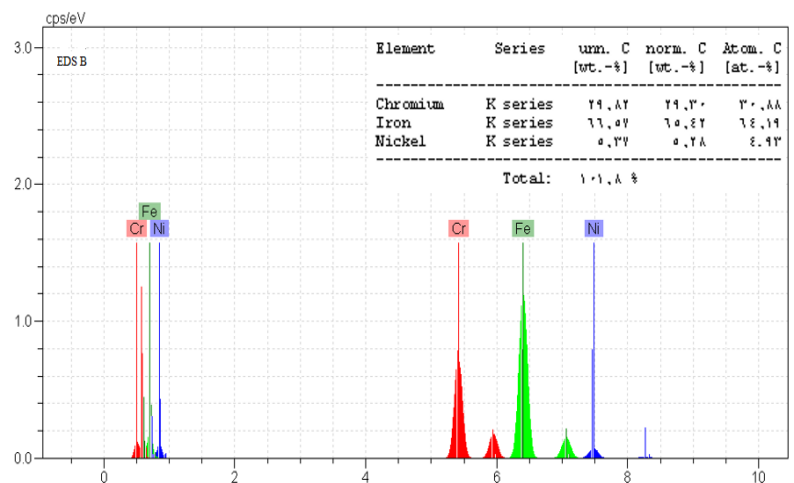
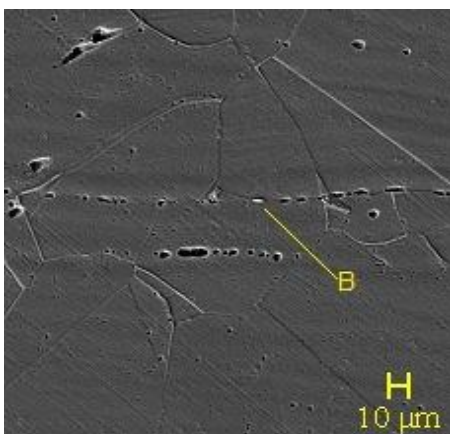
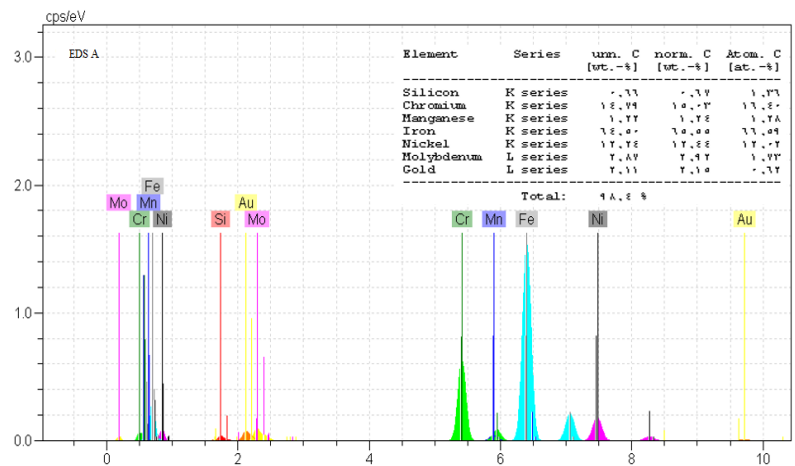
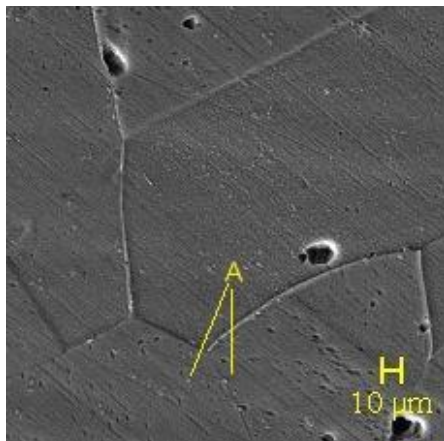
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار فلز پایه اینکونل ۷۱۸ و EDS فازهای احتمالی، A: کاربید نیوبیوم، B: کربونیتراید، C: فاز لاه

Fig. 3. SEM images of Inconel 718 base metal structure and EDS of possible phases, A: niobium carbide, B: carbonitride, C: Laves phase



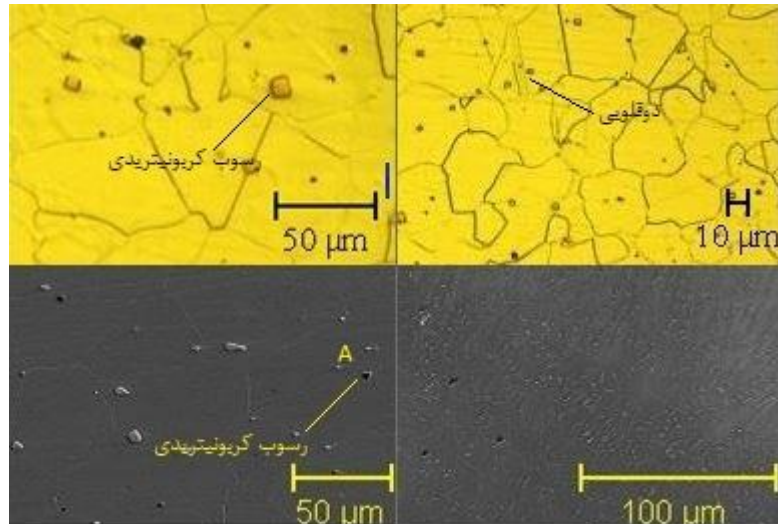
ادامه شکل ۳. تصاویر SEM از ساختار فلز پایه اینگونل ۷۱۸ و EDS فازهای احتمالی، D: کاربید کروم

Continuation of Fig. 3. SEM images of Inconel 718 base metal structure and EDS of possible phases, D: chromium carbide



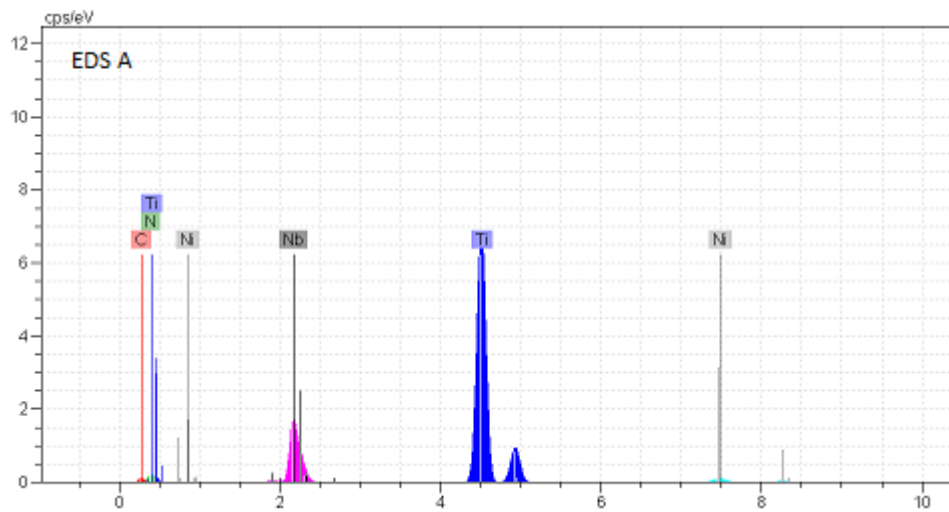
شکل ۴. تصاویر SEM از ساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی و EDS فازهای احتمالی، A: رسوب کاربیدی، B: فریت دلتا

Fig. 4. SEM images of the structure of austenitic stainless steel and EDS of possible phases, A: Carbide deposit, B: Delta ferrite



شکل ۵. دوقلویی و رسوب کربونیتريد در ناحیه متأثر از حرارت اینکونل ۷۱۸

Fig. 5. Twinning and carbonitride deposition in the heat-affected zone of Inconel 718



شکل ۶. EDS نقطه A (رسوب کربونیتريدی) بر روی شکل ۵، در ناحیه متأثر از حرارت اینکونل ۷۱۸

Fig. 6. EDS point A (carbonitride deposition) on Fig. 5, in the heat affected area of Inconel 718

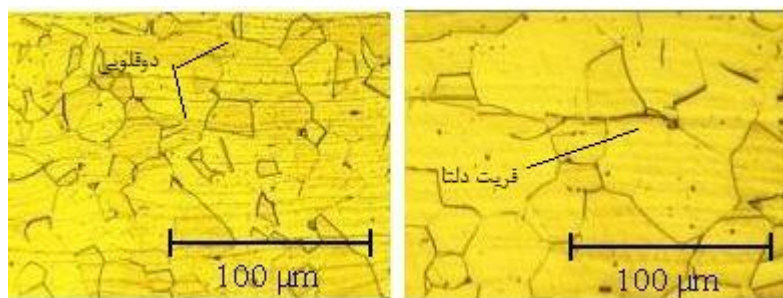
۳-۲-۲- ریزساختار میکروسکوپی در ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه ۳۱۶ در منطقه متأثر از حرارت این آلیاژ ساختار درشت‌دانه آستنیت حاوی نواحی دوقلویی به همراه ذرات و رشته‌های فریت دلتای بین دندریتی مطابق با شکل ۷ و ۸ مشاهده شد.

المرو و همکاران [۲۰] گزارش کردند که کاهش سرعت سرد شدن منجر به افزایش میزان فریت دلتا شد. لازم به ذکر است که حضور فاز فریت دلتا در ریزساختار می‌تواند تأثیری دوچندان داشته باشد. ریزساختار آستنیتی- فریتی مقاومت بهبود یافته‌ای را در برابر ترک خوردگی انجماد نشان می‌دهد. با این

۳-۲-۳- ریزساختار در ناحیه متأثر از حرارت فلزات پایه ۳-۲-۱- ریزساختار میکروسکوپی در ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه اینکونل ۷۱۸

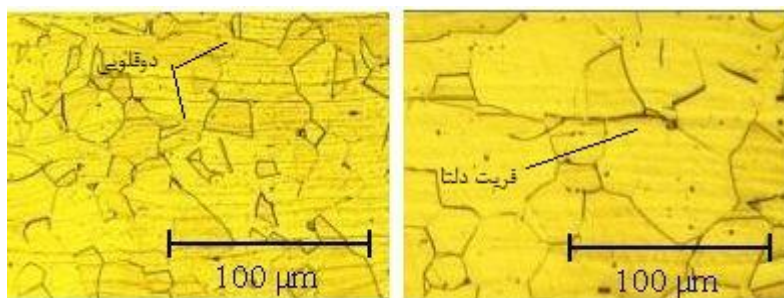
دانه‌های محلول جامد گاما حاوی نواحی دوقلویی و توزیع رسوبات کربونیتريد در تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی مشاهده شد. تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه نشان می‌دهد که رسوبات در فاز زمینه به ویژه مرزدانه‌ها توزیع شده‌اند. آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس از رسوب کربونیتريد (نقطه A در شکل ۵) در شکل ۶ نشان داده شده است.





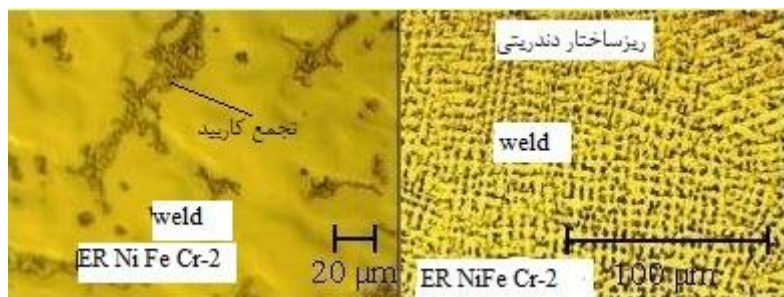
شکل ۷. فریت دلتا و نواحی دوقلویی در ناحیه متأثر از حرارت زنگ نزن ۳۱۶

Fig. 7. Delta ferrite and twin regions in the heat affected zone of AISI 316 stainless steel



شکل ۸. حضور فریت دلتا در ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶

Fig. 8. The presence of delta ferrite in the heat affected zone of AISI 316 austenitic stainless steel



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار دندریتی فلز جوش اینکونل ۷۱۸ و تجمع کاربید

Fig. 9. Optical microscope images of dendritic microstructure of Inconel 718 weld metal and carbide accumulation

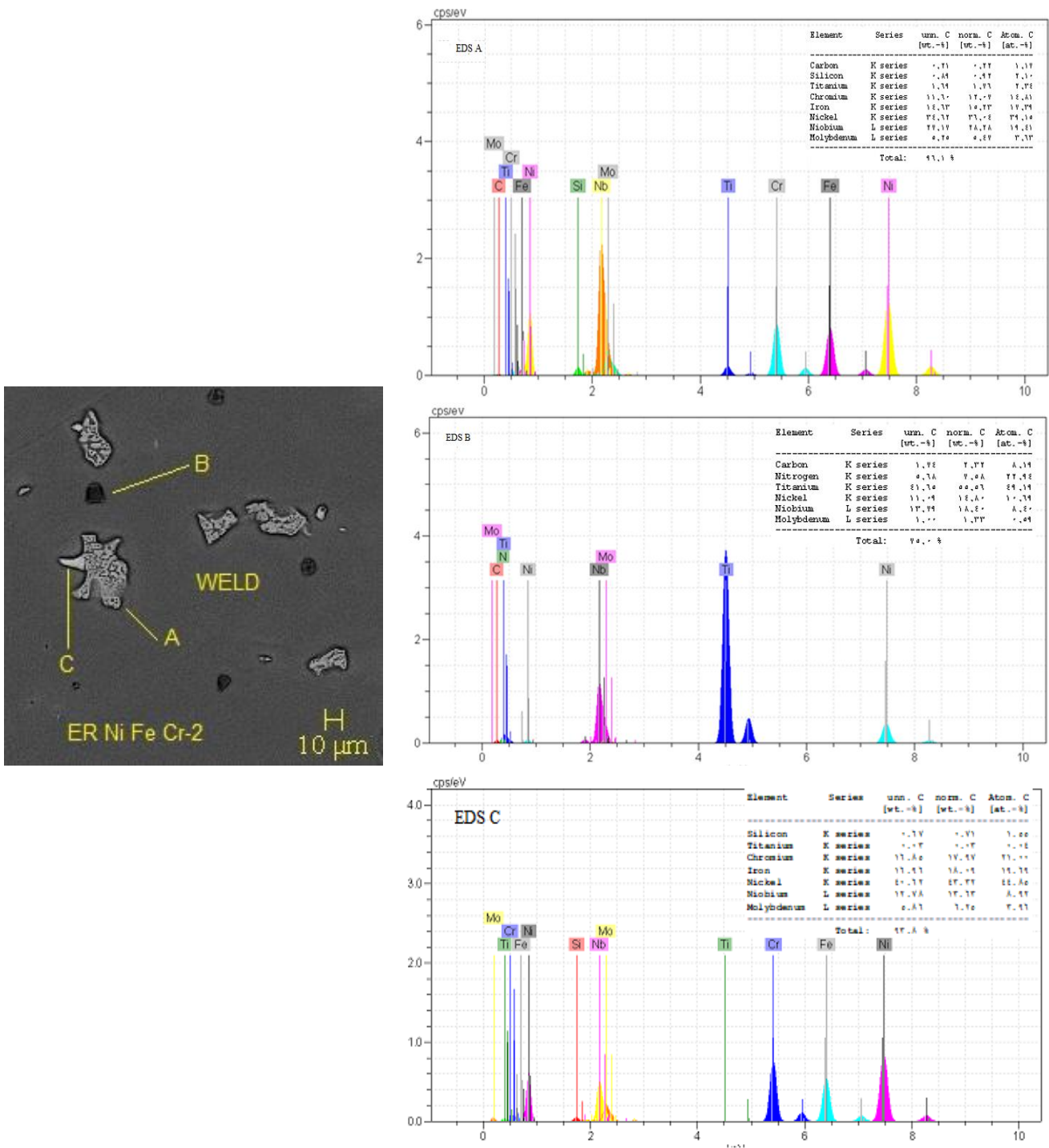
جوش، ساختار دندریتی محلول جامد گاما شامل فاز کاربید مشاهده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی به همراه آنالیز نقطه‌ای بیانگر این مطلب است که کاربیدهای نیوبیوم، کربونیتريد تیتانیوم و کربونیتريد نیوبیوم از مهم‌ترین کاربیدهای تشکیل شده در ریزساختار است. مطابق با آنالیز عنصری فلزهای پرکننده میزان عنصر آلیاژی نیوبیوم در حدود ۵ درصد است که از مهم‌ترین عناصری است که تمایل شدیدی به جدایش دارد. علت این جدایش به نسبت جدایش تعادلی مرتبط می‌شود. اگر ضریب

حال، پس از قرار گرفتن در معرض دماهای بالا، دلتا فریت می‌تواند به فاز  $\sigma$  شکننده تبدیل شود که خواص مکانیکی جوش‌ها را مختل می‌کند.

۳-۳- ریزساختار فلزات جوش

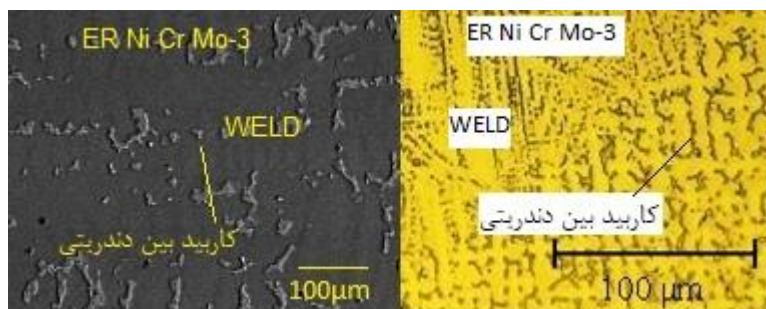
۳-۳-۱- ریزساختار فلز جوش اینکونل ۷۱۸

ریزساختار جوش حاصل از فلز پرکننده ۷۱۸ با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در ناحیه



شکل ۱۰. SEM از ساختار فلز جوش اینکونل ۷۱۸ و EDS فازهای احتمالی: (A) کاربید کمپلکس، B: رسوب کربونیتريد، C: فاز لاه

Fig. 10. SEM of Inconel 718 weld metal structure and EDS of possible phases: (A) carbide complex, B: carbonitride deposition, C: laves phase



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی ریزساختار دندریتی همراه با کاربید بین دندریتی فلز جوش اینکونل ۶۲۵

Fig. 11. Optical and electron microscope image of dendritic microstructure with interdendritic carbide of Inconel 625 weld metal.

### ۳-۳-۲- ریزساختار فلز جوش اینکونل ۶۲۵

ریزساختار فلز جوش اینکونل ۶۲۵ مطابق تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این فلز جوش دارای ریزساختاری دندریتی حاوی کاربید بین دندریتی در زمینه محلول جامد گاما می‌باشد.

با توجه به نسبت توزیع تعادلی عناصری مانند آهن، کروم و نیکل که بزرگ‌تر از یک است و مانع جدایش این عناصر می‌شود، حضور دو عنصر اثرگذار نظیر نیوبیوم و مولیبدن در فلز پرکننده در بحث جدایش آن‌ها که ناشی از ضریب توزیع تعادلی کمتر از یک در آلیاژ است در طی فرایند انجماد می‌تواند ساختار را دچار تغییرات شیب غلظتی کند و در اثر تحت انجماد ناشی از تغییر ترکیب شیمیایی و بر اساس نسبت  $\frac{G}{R}$  کمتر از  $\frac{\Delta T}{Dl}$  فصل مشترک صفحه‌ای از بین می‌رود و منجر به ساختار دندریتی خواهد شد.

مهم‌ترین عناصر تأثیرگذار در توزیع تعادلی در حین انجماد حضور عناصری نظیر نیوبیوم، مولیبدن، آهن و کربن است. با توجه به حضور ۵ درصدی آهن در فلز پرکننده ۶۲۵ با توجه به جدول ۲، هر چه میزان آهن در ترکیب فلز پرکننده بیشتر باشد نسبت توزیع تعادلی نیوبیوم و مولیبدن را تحت تأثیر قرار داده و سبب کاهش آن می‌شود. بنابراین نیوبیوم به مقدار کمی در مذاب حل می‌شود و عناصر دیگری از سمت فلز پایه غیرمشابه به سمت فاز مذاب هدایت می‌شوند و جدایش می‌کند و عنصر مولیبدن نیز در اثر ضریب نفوذ پایی که دارد به سمت هسته دندریت نمی‌تواند هدایت شود بنابراین در فضای بین دندریت‌ها قرار می‌گیرد [۲۲].

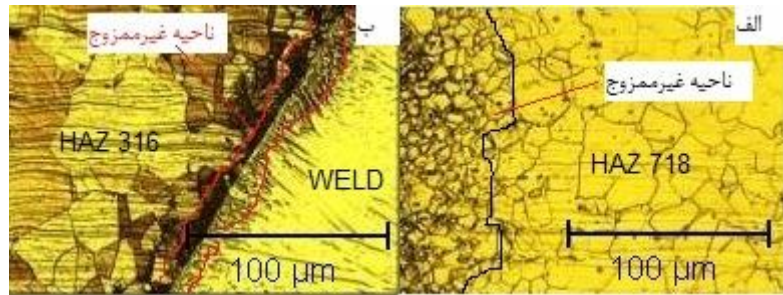
### ۳-۴- ریزساختار فصل مشترک فلزات جوش با فلزات پایه

ریزساختار فلز جوش در فصل مشترک از مهم‌ترین مواردی هست که در یک اتصال غیرمشابه مدنظر هست و در تعیین خواص یک اتصال نقش

جدایش تعادلی کمتر از یک باشد میزان جدایش به مراتب بیشتر خواهد بود. این ضریب برای اینکونل ۷۱۸ در حدود ۰/۴۸ در نظر گرفته شده است. بنابراین نتیجه حاصله از ضریب جدایش تعادلی کمتر از یک، سبب کاهش دمایی در جلوی فصل مشترک خواهد شد و گرایش به توزیع مجدد در حین انجماد را افزایش خواهد داد و در اثر تحت انجماد بیشتر فصل مشترک دیگر حالت صفحه‌ای ندارد و به مورفولوژی دندریتی سوق پیدا خواهد کرد [۲۱]. شیب غلظتی ایجاد شده در ساختار می‌تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی، خوردگی و نهایتاً در حین انجماد منجر به ترک شود [۱۱]. با در نظر گرفتن تمهیدات لازم از جمله مهار اتصال و پیش گرم می‌توان مانع از ترک در ساختار فلز جوش شد.

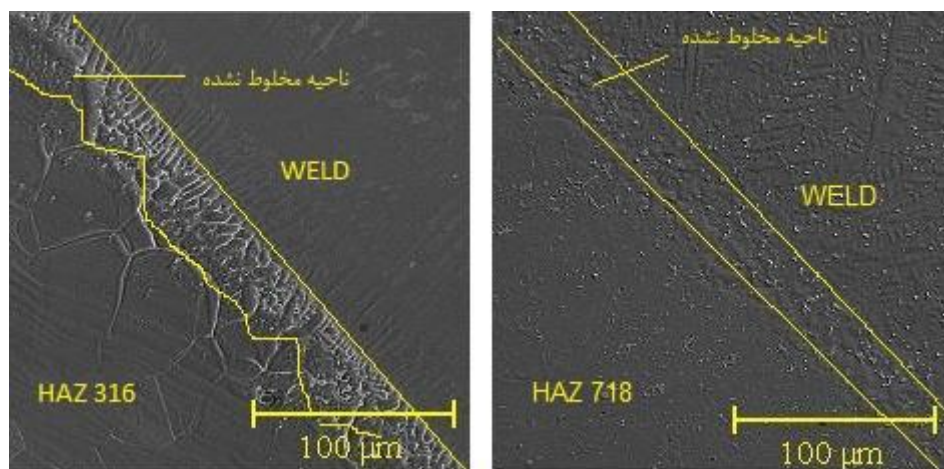
عنصر نیوبیوم نیز به دلیل ضریب نفوذ پایین نمی‌تواند شیب غلظتی را از بین ببرد و نفوذ برگشتی صورت گیرد، بنابراین در پایان عملیات انجماد در فرایندهای ذوبی با فاز ثانویه کاربید نیوبیوم در فضای بین دندریت‌ها، نمایان می‌شود. از طرفی کربن نیز به دلیل نسبت توزیع تعادلی در محدوده ۰/۲۷-۰/۲۱ به دلیل جدایش، تشکیل فازهای کاربیدی می‌دهد. علاوه بر نیوبیوم، درصد مولیبدن طبق آنالیز عنصری در حدود ۳ درصد است که تمایل به جدایش دارد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز نقطه‌ای مربوط به فازهای کاربیدی از نوع کمپلکس ناشی از فلز جوش اینکونل ۷۱۸ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در آلیاژهای پایه نیکل قابل عملیات حرارتی، تیتانیوم یکی از عناصر اصلی ایجاد رسوب سختی می‌باشد که می‌تواند نقش بسزایی در افزایش استحکام داشته باشد. با افزایش دما میزان تیتانیوم در زمینه گاما به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. ایجاد رسوب احتمالی مطابق با نتایج EDS که در شکل ۱۰ نشان داده شده به عنوان فاز استحکام بخش تأثیری مثبت بر استحکام دارد.





شکل ۱۲. فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با الف: فلز پایه اینکونل ۷۱۸ ب: زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶

Fig. 12. Inconel 625 weld metal interface with A: Inconel 718 base metal B: Austenitic stainless steel 316



شکل ۱۳. منطقه مخلوط نشده فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با منطقه متأثر از حرارت فلزهای پایه

Fig. 13. The unmixed zone of Inconel 625 weld metal with heat affected zone of the base metals

همان گونه که در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است یک ناحیه غیر ممزوج (مخلوط نشده) ایجاد شده است، علت این موضوع می تواند ناشی از عوامل مختلف از جمله حرارت ورودی، میزان سرعت سرد شدن، نوع طرح اتصال و جریان سیال درون مذاب باشد.

با دقت در ناحیه مخلوط نشده مشاهده می شود که عرض این ناحیه در سرتاسر اتصال یکسان نیست. در قسمت هایی که جریان همرفتی مذاب زیاد هست عمل ذوب به خوبی صورت گرفته و ناحیه مخلوط نشده کمتری ایجاد کرده است. با توجه به اینکه نرخ رشد<sup>۱</sup> از خط مرکزی به سمت خط ذوب کم می شود و شیب حرارتی<sup>۲</sup> از خط مرکزی به سمت خط ذوب افزایش می یابد، بنابراین نسبت  $\frac{G}{R}$  در خط مرکزی کمتر از خط ذوب است و مورفولوژی را

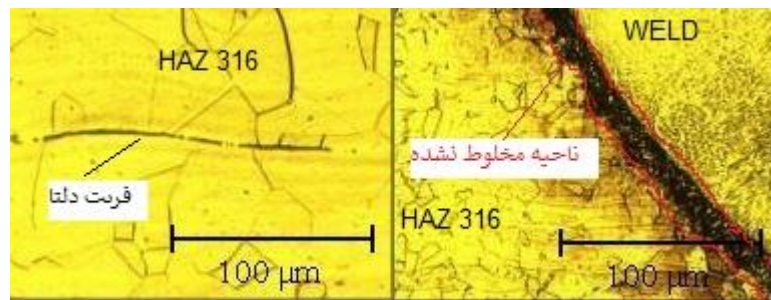
1 R  
2 G

اساسی را ایفا می کند و می توان با تحلیل فصل مشترک خواص نامطلوب را حذف یا کاهش داد.

### ۳-۴-۱- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵

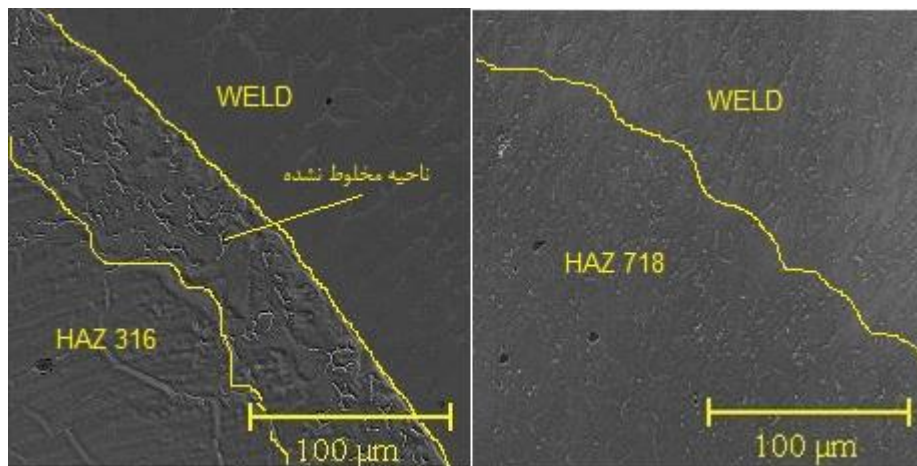
ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۶۲۵ با فلزات پایه در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. در این ریزساختارها نواحی غیر ممزوج (مخلوط نشده) مشاهده می گردد. علت به وجود آمدن این نواحی، یکسان نبودن ترکیب شیمیایی و متفاوت بودن نقطه ذوب فلز پرکننده با فلزهای پایه می باشد. هنگامی که محدوده دمای ذوب مواد پرکننده مشابه یا بالاتر از فلز پایه باشد، تنها بخش کوچکی از فلز پایه را می توان ذوب کرد و در مرحله انجماد مجدد رقت اتفاق نمی افتد. بنابراین، یک ناحیه غیر ممزوج بین دو منطقه تشکیل می شود.





شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۷۱۸ با فولاد زنگ نزن ۳۱۶

Fig. 14. Optical microscope images of Inconel 718 weld metal interface with 316 stainless steel.



شکل ۱۵. ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۷۱۸ با فلزات پایه

Fig. 15. Microstructure of Inconel 718 weld metal interface with base metals

۳-۵- بررسی خواص مکانیکی فلزات پایه و فلزات جوش  
۳-۵-۱- آزمایش کشش

با انجام آزمایش کشش در اتصال غیرمشابه اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶، شکست همه نمونه‌ها از فلز پایه زنگ نزن ۳۱۶ رخ داد. شکست نمونه‌های آزمایش کشش در شکل ۱۶ نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین دلایل شکست در اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ نزن و سوپر آلیاژهای پایه نیکل که در سمت فولاد زنگ نزن اتفاق می‌افتد موضوع رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت در فولاد زنگ نزن می‌باشد که این رشد دانه می‌تواند اثر منفی بر استحکام بگذارد. در یک اتصال غیرمشابه

از مسطح به سلولی، دندریتی ستونی و دندریتی هم‌محور سوق می‌دهد [۲۳] و [۲۴].

۳-۴-۲- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۷۱۸ با فلزات پایه ریزساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل ۷۱۸ در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نزدیک بودن ترکیب شیمیایی فلز پرکننده اینکونل ۷۱۸ و فلز پایه اینکونل ۷۱۸ هیچ‌گونه عدم امتزاجی مشاهده نمی‌گردد، درحالی‌که در سمت فلز پایه زنگ نزن آستنیتی با فلز پرکننده ۷۱۸ درشت‌دانگی همراه با رشته‌های فریت و ناحیه مخلوط نشده دیده می‌شود.



شکل ۱۶. شکست نمونه‌های آزمایش کشش

Fig. 16. Fracture of tensile test specimens

### ۳-۵-۲- آزمایش ضربه

متوسط انرژی شکست فلزات پایه و فلزات جوش در جدول ۴ آمده است. با مقایسه داده‌های به دست آمده از نتایج آزمایش ضربه می‌توان گفت که فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵ دارای بیشترین جذب انرژی بوده و به صورت کاملاً نرم شکسته شده است. این نوع شکست از به هم پیوستن حفره‌ها، تحت تأثیر تنش یا کرنش پلاستیک، ترک به وجود می‌آید. حفره، ترک و مسیره‌های رودخانه‌ای بیانگر این نوع شکست می‌باشند. در مورد فلز پرکننده اینکونل ۷۱۸ مشاهده می‌شود که شکست توأمان نرم و ترد رخ داده است. صفحات تورق بیانگر شکست ترد و حفره بیانگر شکست نرم در فلز جوش اینکونل ۷۱۸ می‌باشد. سطح شکست فلزات جوش در شکل ۱۸ آورده شده است.

### ۳-۵-۳- ریز سختی سنجی

نتایج پروفیل سختی سنجی افقی از فلز پایه اینکونل ۷۱۸ به سمت فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ در شکل ۱۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد سختی فلز پایه اینکونل ۷۱۸ بیشتر از سختی فلز پایه زنگ

پارامترهای مهمی از جمله ترکیب شیمیایی، خواص متفاوت طرفین اتصال و ضریب انبساط فلز جوش، فلز پایه و فلز پرکننده بر فرآیند شکست اثرگذار است. در اتصالات غیرمشابه فلزات پایه و فلزات جوش استحکام و در مواردی ترکیب متفاوتی دارند. بنابراین این عدم تطابق منجر به ایجاد یک ناسازگاری در حین آزمایش شده و تغییر شکل ناهمسانی در طرفین اتصال ایجاد می‌شود که جدی‌ترین مسئله در شکست است. در جدول ۳ خواص آزمایش کشش اتصال اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶ نشان داده شده است. دلیل شکست از طرف فلز پایه زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ می‌تواند ناشی از ریز ساختار درشت دانه مناطق مجاور خط جوش فلز ۳۱۶ و نیز افزایش ریزسختی در ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه زنگ نزن ۳۱۶ به دلیل هم‌محور شدن دانه‌ها و حضور فاز فریت باشد. لازم به ذکر است که فرآیندهای شکست در نمونه‌های جوشکاری پیچیده‌تر است، به ویژه در جوشکاری‌های غیر مشابه که شامل مناطق مختلف با خواص متفاوت است و رفتار یک ناحیه می‌تواند بر روی مناطق مجاور آن تأثیر بگذارد. جدول خواص آزمایش کشش در جدول ۳ و نمودار تنش، کرنش در شکل ۱۷ آمده است.

جدول ۳. خواص آزمایش کشش اتصال اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ نزن ۳۱۶

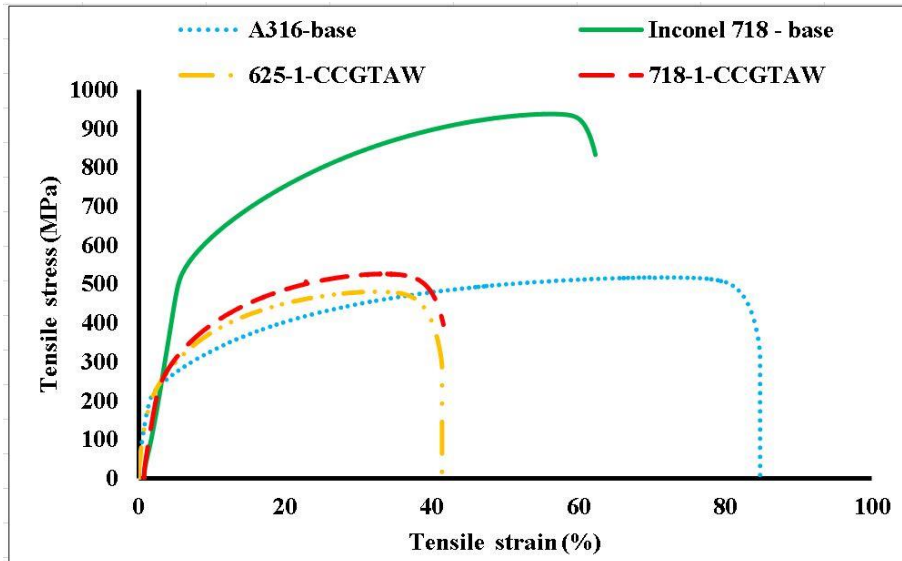
Table 3. Tensile test properties of Inconel 718 and stainless steel 316

| ناحیه شکست           | درصد افزایش طول | استحکام کششی نهایی (Mpa) | شماره آزمایش | فلز پرکننده/فلز پایه |
|----------------------|-----------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۴۱              | ۴۸۱                      | ۱            |                      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۴۳              | ۵۲۹                      | ۲            | فلز پرکننده ۶۲۵      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۴۱              | ۵۰۵                      | ۳            |                      |
|                      | ۴۱±۱            | ۵۰۵±۲۴                   | میانگین      |                      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۴۲              | ۵۲۷                      | ۱            |                      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۴۲              | ۵۲۹                      | ۲            | فلز پرکننده ۷۱۸      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۴۳              | ۵۲۹                      | ۳            |                      |
|                      | ۴۲/۵±۰/۵        | ۵۲۸±۱                    | میانگین      |                      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۸۵              | ۵۷۵                      | ۱            |                      |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۸۱              | ۵۷۱                      | ۲            | فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ |
| فلز پایه زنگ‌نزن ۳۱۶ | ۸۳              | ۵۷۴                      | ۳            |                      |
|                      | ۸۳±۲            | ۵۷۳±۲                    | میانگین      |                      |
| فلز پایه اینکونل ۷۱۸ | ۶۲              | ۹۳۸                      | ۱            |                      |
| فلز پایه اینکونل ۷۱۸ | ۵۹              | ۹۳۶                      | ۲            | فلز پایه اینکونل ۷۱۸ |
| فلز پایه اینکونل ۷۱۸ | ۵۴              | ۹۳۲                      | ۳            |                      |
|                      | ۵۸±۴            | ۹۳۵±۳                    | میانگین      |                      |

جدول ۴. متوسط انرژی شکست فلزات پایه و فلزات جوش

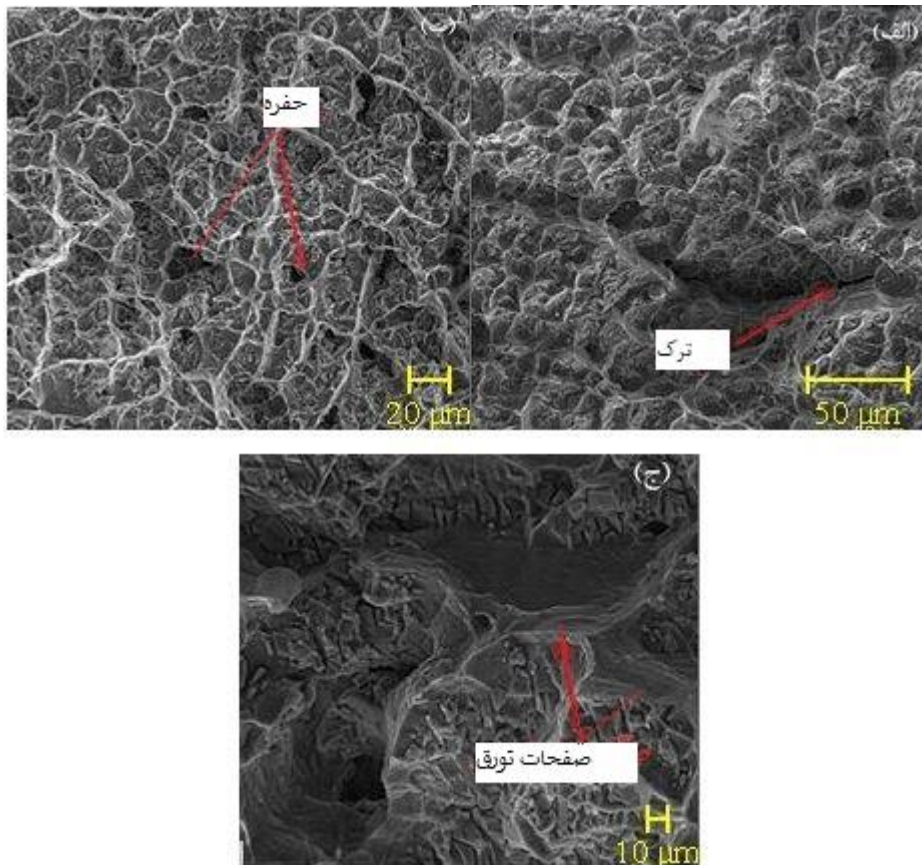
Table 4. Average fracture energy of base metals and weld metals

| میانگین انرژی ضربه (ژول) | آلیاژ                        |
|--------------------------|------------------------------|
| ۵۲±۲                     | فلز پایه زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ |
| ۳۱±۳                     | فلز پایه اینکونل ۷۱۸         |
| ۵۰±۱                     | فلز جوش ۶۲۵ در حالت CCGTA    |
| ۲۷±۲                     | فلز جوش ۷۱۸ در حالت CCGTA    |



شکل ۱۷. نمودار تنش-کرنش نمونه فلزات جوش و فلزات پایه

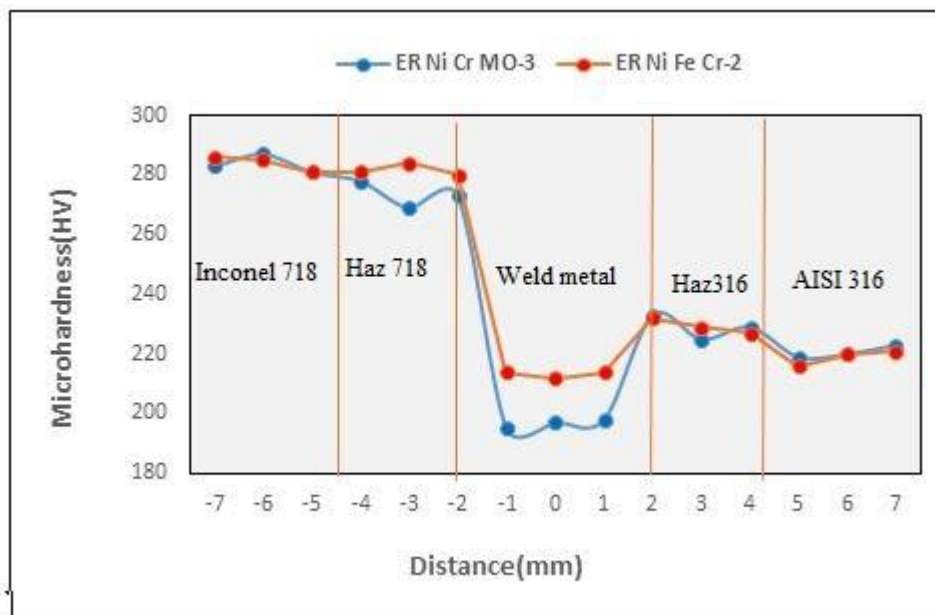
ig. 17. Stress - strain diagram of welding metal and base metal samples



شکل ۱۸. سطح شکست فلزات جوش در آزمایش ضربه، الف و ب: اینکونل ۶۲۵، ج: اینکونل ۷۱۸

Fig. 18. The fracture surface of weld metals in the impact test, A and B: Inconel 625, C: Inconel 718





شکل ۱۹. پروفیل ریز سختی سنجی در نواحی مختلف اتصال.

Fig. 19. Microhardness profile in different joint areas.

جدول ۵: نتایج ریز سختی سنجی عمودی

Table 5. Results of vertical microhardness measurement

| میانگین ریز سختی (HV) | موقعیت سختی سنجی | فلز پرکننده       |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| ۱۹۸                   | Cap (رویه)       | اینکونل ۶۲۵       |
|                       |                  | <b>ERNiCrMo-۳</b> |
| ۱۹۵                   | Root (ریشه)      |                   |
| ۲۱۴                   | Cap (رویه)       | اینکونل ۷۱۸       |
|                       |                  | <b>ERNiFeCr-۲</b> |
| ۲۰۷                   | Root (ریشه)      |                   |

نتایج ریز سختی سنجی عمودی از پاس ریشه تا رویه در جدول ۵ آورده شده است. پاس‌های رویه به علت اعمال حرارت و سرمایش سریع، باعث کند شدن استحاله آستنیتی شده در حالی که در پاس ریشه به دلیل اعمال مجدد حرارت توسط پاس رویه آستنیت‌های ثانویه به وجود می‌آید که سبب کاهش سختی می‌شود.

نزن آستنیتی ۳۱۶ است. هم‌چنین در ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه زنگ نزن ۳۱۶ به دلیل هم‌محور شدن دانه‌ها و حضور فاز فریت ریز سختی افزایش یافته است. مطابق نمودار دیده می‌شود که میزان سختی فلز جوش اینکونل ۷۱۸ در ناحیه جوش بیشتر از سختی فلز جوش اینکونل ۶۲۵ است. از فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت اینکونل ۷۱۸ تا ناحیه جوش یک تفاوت بسیار فاحش ناشی از جدایش پراکنده کروم، مولیبدن و نیوبیوم نیز مشاهده می‌شود.

#### ۴- بحث پایانی و نتیجه گیری

بررسی اتصالات غیرمشابه در صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اتصالات‌های غیرمشابه آلیاژهای پایه نیکلی و زنگ نزن آستنیتی به خاطر خواص تلفیقی و مشترک مناسب، مورد توجه صنعتگران مخصوصاً در صنایع هوایی، توربین‌های گازی و کاربردهای دما بالا می‌باشد. توجه به گسترش و کیفیت این اتصال و برآوردن نیازهای مرتبط با خواست صنعتگران جهت بهبود عملکرد اشتراکی با فلزهای پرکننده مناسب قابل بررسی می‌باشد. لذا حضور فازهای ثانویه نظیر کربونیتريدها، فاز لایه و هم چنین حضور یک ناحیه غیرمزوج در اتصال می‌تواند اتصال را از لحاظ استحکام کششی، سختی و مقاومت به ضربه تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با استفاده از فلزهای پرکننده اینکونل ۷۱۸ و اینکونل ۶۲۵ پرداخته شد که نتایج به طور خلاصه ارائه می‌شود.

مشاهدات ریزساختاری نشان داد که هر دو فلزجوش (اینکونل ۷۱۸ و اینکونل ۶۲۵) دارای ریزساختار دندریتی همراه با ذرات و فازهای ثانویه هستند. رسوبات کربو نیتريد، کاربید نیوبوم، نیتريد تیتانیوم و کاربیدهای کمپلکس در ساختار فلزجوش اینکونل ۷۱۸ مشاهده شد. هم چنین کاربیدهای بین دندریتی در ریزساختار فلزجوش اینکونل ۶۲۵ مشاهده شد. در فصل مشترک فلزجوش اینکونل ۷۱۸ با فلز پایه زنگ نزن یک ناحیه غیرمزوج مشاهده شد ولی در سمت فلز پایه اینکونل ۷۱۸ هیچگونه عدم امتزاجی مشاهده نشد. هم چنین در فصل مشترک فلزجوش اینکونل ۶۲۵ با هر دو فلز پایه (اینکونل ۷۱۸ و زنگ نزن ۳۱۶) ناحیه غیرمزوج مشاهده شد. بر طبق نتایج آزمون کشش، فلزجوش اینکونل ۷۱۸ بیشترین استحکام کششی به میزان میانگین ۵۲۸ مگاپاسکال را از خود نشان داد.

بر اساس نتایج آزمون ضربه (چارپی) فلزجوش اینکونل ۶۲۵ بیشترین مقاومت در برابر ضربه را به میزان میانگین ۵۰ ژول از خود نشان داد. نتایج آزمایش ریزسختی نیز نشان داد که فلز جوش اینکونل ۷۱۸ دارای بیشترین ریزسختی به میزان ۲۱۴ ویکرز است.

بررسی سطح شکست در آزمایش ضربه نیز نشان داد که فلز جوش اینکونل ۶۲۵ به صورت کاملاً نرم، شکست صورت گرفته و فلزجوش اینکونل ۷۱۸ شکست توأمان نرم و ترد را از خود نشان داد.

#### منابع

- [1] M.J. Donachie, S.J. Donachie, Superalloys: a technical guide, ASM international, 2002.
- [3] H.-T. Lee, W.-H. Hou, Development of fine-grained structure and the mechanical properties of nickel-based Superalloy 718, Materials Science and Engineering: A, 555 (2012) 13-20.
- [4] B. Sreenu, R. Sarkar, S.S. Kumar, S. Chatterjee, G.A. Rao, Microstructure and mechanical behaviour of an advanced powder metallurgy nickel base superalloy processed through hot isostatic pressing route for aerospace applications, Materials Science and Engineering: A, 797 (2020) 140254.
- [5] M. Ziętała, T. Durejko, M. Polański, I. Kunce, T. Płociński, W. Zieliński, M. Łazińska, W. Stępniewski, T. Czujko, K.J. Kurzydłowski, The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping, Materials Science and Engineering: A, 677 (2016) 1-10.
- [6] R. Castro, Historical Background to Stainless Steel (Chapter 1), Stainless steels. P. Lacombe, B. Baroux, and G. Beranger (Eds.), les editions de physique, Les Ulis, France, (1993) 1-12.
- [7] S. Biabani, A. Saatchi, The Corrosion Of St37 Carbon Steel And 316 Stainless Steel In Molten Zinc Bath, Advanced Processes In Materials, 7(1(24)) (2013) 55-63.
- [8] T. Glover, Application of stainless steels in chemical plant corrosive environments, Anti-Corrosion Methods and Materials, 29 (1982) 11-12.
- [9] M. Shakil, M. Ahmad, N. Tariq, B. Hasan, J. Akhter, E. Ahmed, M. Mehmood, M. Choudhry, M. Iqbal, Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stainless steel 304L, Vacuum, 110 (2014) 121-126.
- [10] R. Ghasemi, E. Heshmat Dehkordi, M. Shamanian, Investigation of microstructures and mechanical properties of dissimilar welds between Incoloy 825 and 316 stainless steel, Journal of Welding Science and Technology of Iran, 2(1) (2016) 21-31. (in persian)

- 718 and AISI 316L by GTAW Multipass Process, Soldagem & Inspeção, 27 (2022).
- [18] S. Ferretti, G. Valenzano, W. Cugno, International space station external active thermal control system lines manufacturing, in: 57th International Astronautical Congress, 2006, pp. B4. 2.09.
- [19] M. Henderson, D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel, G. Marchant, Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications, Science and technology of welding and joining, 9(1) (2004) 13-21.
- [20] J. Elmer, S. Allen, T. Eagar, Microstructural development during solidification of stainless steel alloys, Metallurgical transactions A, 20(10) (1989) 2117-2131.
- [21] V. Patel, A. Sali, J. Hyder, M. Corliss, D. Hyder, W. Hung, Electron beam welding of inconel 718, Procedia Manufacturing, 48 (2020) 428-435.
- [22] G. Li, J. Huang, Y. Wu, An investigation on microstructure and properties of dissimilar welded Inconel 625 and SUS 304 using high-power CO2 laser, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5) (2015) 1203-1214.
- [23] A. Athiroj, P. Wangyao, F. Hartung, G. Lothongkum, Low heat input welding of nickel superalloy GTD-111 with Inconel 625 filler metal, Materials Testing, 60(1) (2018) 22-30.
- [24] T. Artaza, T. Bhujangrao, A. Suárez, F. Veiga, A. Lamikiz, Influence of heat input on the formation of laves phases and hot cracking in plasma arc welding (PAW) additive manufacturing of inconel 718, Metals, 10(6) (2020) 771.
- [11] A. Mortezaei, M. Shamanian, A. Saatchi, Evaluation of microstructure and weldability of dissimilar joining of Inconel 718 superalloy to S310 austenitic stainless steel, New Processes in Materials Engineering, 9(1) (2015) 73-85. (in Persian)
- [12] F. Dokme, M.K. Kulekci, U. Esme, Microstructural and mechanical characterization of dissimilar metal welding of Inconel 625 and AISI 316L, Metals, 8(10) (2018) 797.
- [13] P. Prabakaran, K.D. Ramkumar, N. Arivazhagan, Characterization of microstructure and mechanical properties of Super Ni 718 alloy and AISI 316L dissimilar weldments, Journal of Materials Research, 29(24) (2014) 3011-3023.
- [14] K.G. Kumar, K.D. Ramkumar, N. Arivazhagan, Characterization of metallurgical and mechanical properties on the multi-pass welding of Inconel 625 and AISI 316L, Journal of Mechanical Science and Technology, 29(3) (2015) 1039-1047.
- [15] K.D. Ramkumar, S.D. Patel, S.S. Praveen, D.J. Choudhury, P. Prabakaran, N. Arivazhagan, M.A. Xavier, Influence of filler metals and welding techniques on the structure-property relationships of Inconel 718 and AISI 316L dissimilar weldments, Materials & Design (1980-2015), 62 (2014) 175-188.
- [16] T. Ramkumar, M. Selvakumar, P. Narayanasamy, A.A. Begam, P. Mathavan, A.A. Raj, Studies on the structural property, mechanical relationships and corrosion behaviour of Inconel 718 and SS 316L dissimilar joints by TIG welding without using activated flux, Journal of Manufacturing Processes, 30 (2017) 290-298.
- [17] R.d.S. Silva, R. Demarque, L.M.d. Silva, J.A.d. Castro, Analysis of Dissimilar Welding Joint between Inconel

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Basir, M. Shamanian, Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Joining of Inconel 718 Superalloy to 316 Austenitic Stainless Steel, Amirkabir J. Mech Eng., 54(12) (2023) 2917-2936.

DOI: 10.22060/mej.2023.21643.7482



