



Structural and Mechanical Evaluation of Dissimilar Transient Liquid Phase Bonded IN-625/SS-316L

M.J.Baghban¹, M.Mosallae Pour¹, H. HajiSafari¹, A.Babanejad¹, A.Sabouri²

1-Material Science and Engineering Faculty, Yazd University.

2-Integrated Additive Manufacturing center, Department Management and Production Engineering, Politecnico di Torino, Corso Duca Degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy

Received 1 June 2022 ; Accepted 25 July 2022

Abstract

In the present study, the microstructure and mechanical properties of the dissimilar joint of Inconel 625 (IN-625) superalloy to austenitic stainless steel AISI316L (SS-316L) via AWS-BNi3 interface layer and transient liquid phase (TLP) bonding process were evaluated and necessary conditions for creating an efficient joint were determined. TLP bonding was performed in temperature and time range of 1050-1150°C and 5-20min, respectively, under the protection of argon shielding gas with a purity of 99.9995%. Microstructural (OM and SEM) and phase (XRD) studies revealed that bonding at 1150 ° C for 20 min results in completion of isothermal solidification and develops a uniform gamma (γ) phase at the bonding zone. Cooling the samples before completion of isothermal solidification results in the formation of chromium and molybdenum-rich eutectic compounds at the bonding centerline. The continuous morphology of the eutectic compounds caused a sharp drop in the shear strength of the specimens (~50% reduction of shear strength). The inter-diffusion of alloying elements between the bonding area and the surrounding base metal results in the formation of chromium carbide in the IN-625 and chromium- boron compounds in the SS-316L, which increased the microhardness of these areas compared to the base metals and the bonding zone.

Keywords: TLP, Inconel 625, 316L, isothermal solidification, microstructure and hardness.



Corresponding Author: mosal@yazd.ac.ir



ارزیابی ساختاری و مکانیکی اتصال غیرهمجنس SS-316L/IN-625 پیوند داده شده توسط فرایند فاز مایع نافذ گذرا

محمدجواد باغبان^{1*}، مسعود مصلائی پور^{1*}، هانیه حاجی صفری¹، افشین بابانژاد¹، عبدالله صبوری²

1- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

2- مرکز فرایندهای ساخت افزایشی، دانشکده مدیریت و مهندسی تولید، دانشگاه پلی تکنیک تورین، ایتالیا.

دریافت مقاله: 1401/03/11؛ پذیرش مقاله: 1401/05/03

چکیده

در پژوهش حاضر، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس سوپر آلیاژ اینکونل 625 (IN-625) به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316L (SS-316L) با استفاده از لایه واسط AWS-BNi3 و فرایند فاز مایع نافذ گذرا (TLP) مورد ارزیابی و شرایط لازم برای ایجاد یک اتصال کارآمد مورد مطالعه و بررسی واقع شد. اتصال‌دهی TLP در گستره دمایی و زمانی به ترتیب 1150-1050 °C و 5-20 min و تحت حفاظت گاز محافظ آرگون با خلوص 99/9995% انجام شد. مطالعات ریزساختاری (OM و SEM) و فازی (XRD) آشکار نمود که اتصال‌دهی در دمای 1150°C و مدت زمان 20 min موجب تکمیل انجماد همدم و ایجاد فاز گاما (γ) بصورت یکدست در موضع اتصال می‌شود. سرد نمودن نمونه‌ها قبل از تکمیل انجماد همدم موجب تشکیل ترکیبات یوتکتیکی غنی از کروم و مولیبدن در موضع مرکزی اتصال می‌شود. مورفولوژی پیوسته ترکیبات یوتکتیکی موجب افت شدید استحکام برشی نمونه‌ها شد (کاهش استحکام برشی 50%~). نفوذ درهم عناصر آلیاژی بین موضع اتصال و فلزپایه اطراف موجب تشکیل کاربید کروم در IN-625 و ترکیبات بورایدی کروم-مولیبدن در SS-316L گردید که موجب افزایش ریزسختی نواحی مذکور نسبت به فلزپایه و موضع اتصال شد.

کلمات کلیدی: TLP، اینکونل 625، 316L، انجماد همدم ریزساختار و سختی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mosal@yazd.ac.ir

1- مقدمه

کبالت قابل تقسیم می‌باشند. سوپرآلیاژهای پایه نیکل به‌عنوان پرمصرف‌ترین گروه در صنایع مختلف مانند صنایع نفت و گاز، پالایشگاه‌ها و پتروشیمی، هوافضا، هسته‌ای، نیروگاه‌های تولید برق و تجهیزات پزشکی شناخته می‌شوند [2و3]. سوپرآلیاژهای پایه نیکل عمدتاً با افزودن کربن، کروم، مولیبدن و نیوبیم تقویت می‌شوند [4]. اینکونل 625 (IN-625) یک سوپرآلیاژ پایه

سوپرآلیاژها به دلیل دارا بودن خواص منحصر بفرد مانند استحکام، مقاومت به خزش و خوردگی داغ، به‌طور گسترده در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. سوپرآلیاژها از لحاظ ترکیب شیمیایی به سه گروه عمده (الف) سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل، (ب) سوپرآلیاژهای پایه نیکل و (ج) سوپرآلیاژهای پایه

صورت پودر ریز یا لایه نازک شامل عناصر کاهنده نقطه ذوب فلزپایه واقع و مجموعه تحت سیکل حرارتی واقع می‌شود. در دمای پیونددهی، لایه واسط ذوب و نفوذ درهم بین فاز مذاب و فلزپایه اطراف موجب انجماد فاز مذاب در دمای پیونددهی می‌شود (انجماد همدمای) و در ادامه با همگن شدن موضع اتصال، پیونددهی مشابه با فلزپایه در موضع اتصال ایجاد می‌شود [10].

میثاقی [11] اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 321 از طریق فرایند TLP با استفاده از دو لایه واسط MBF-30 و MBF-20 در گستره دمایی $1050-1200^{\circ}\text{C}$ و بازه زمانی 30-120 min را بررسی و گزارش نمود که عدم تکمیل انجماد همدمای موجب تشکیل ترکیباتی بین فلزی از قبیل Fe-B, Ni-B, Ni-Si, Cr-B, در موضع مرکزی اتصال می‌شود. همچنین بیشترین استحکام برشی در نمونه اتصال داده شده با استفاده از لایه واسط MBF-30 در حدود 99% استحکام برشی فلزپایه می‌باشد.

امامی و همکاران [10] اتصال غیرهمجنس IN625 و 316L با لایه واسط BNi-2 و فرایند اتصالدهی TLP را بررسی و گزارش نمودند که با افزایش زمان اتصالدهی از 30min به 120min، بدلیل نفوذ درهم عناصر آلیاژی بین فازمذاب و فلزپایه اطراف و خروج عناصر MPD از محل اتصال، فاز مذاب تشکیل شده در موضع اتصال دستخوش انجماد همدمای می‌شود. به علاوه افزایش مدت زمان اتصالدهی موجب کاهش کسر حجمی ترکیبات بین فلزی در موضع اتصال و افزایش استحکام برشی از 265 MPa به 360 MPa می‌شود.

درودی و همکاران [12] گزارش نمودند که با افزایش دمای پیونددهی، میزان و سرعت نفوذ اتم‌های MPD در فلزپایه مجاور موضع اتصال بیشتر و در نتیجه پهنای موضع اتصال افزایش می‌یابد. عدم تکمیل انجماد همدمای در موضع اتصال Inconel625 با لایه واسط BNi2 موجب تشکیل ترکیبات یوتکتیکی غنی از بور و افزایش سختی و کاهش استحکام برشی موضع اتصال می‌شود. این محققین نشان دادند که تکمیل انجماد همدمای موجب افزایش استحکام برشی نمونه‌های پیوند داده

نیکل است که در دماهای بالا ($\sim 1500^{\circ}\text{C}$)، از استحکام، مقاومت به خوردگی، استحکام خزشی و مقاومت در برابر خستگی حرارتی، ویژه‌ای برخوردار است [5]. IN-625 در صنایع هوافضا، هوانوردی، دریایی، شیمیایی و پتروشیمی مورد استفاده گسترده‌ای می‌باشد [4]. حضور مقادیر قابل ملاحظه Ti و Al در ترکیب شیمیایی IN-625 موجب حساسیت شدید آن به ترکیدگی حین جوشکاری قوسی می‌شود [6]. حضور عناصر نیکل و کروم، مقاومت بالایی را در برابر اکسیداسیون در محیط‌هایی با خوردگی بالا ایجاد می‌کند. همچنین مقادیر بالای مولیبدن در سوپرآلیاژ IN-625، مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای و شیاری آن را افزایش می‌دهد [2].

گسترده‌ترین گروه از فولادهای زنگ نزن را فولادهای زنگ نزن آستنیتی تشکیل می‌دهند که دارای ریزساختار آستنیتی هستند. عناصر اصلی فولادهای زنگ نزن آستنیتی، کروم و نیکل است. این فولادها به دلیل استحکام تسلیم مطلوب، داکتیلیتی و چقرمگی بالا، مقاومت به خوردگی عالی و جوش‌پذیری خوب در صنایع مختلفی از قبیل پزشکی و ساخت ظروف آشپزخانه کاربرد گسترده‌ای دارد. فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L از پرکاربردترین فولادهای زنگ نزن آستنیتی است و به دلیلی خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی مطلوب محیط‌های آبی کاربرد فراوانی دارد. همچنین حضور حداقل 2% مولیبدن در ترکیب این فولاد، موجب افزایش مقاومت به خوردگی در معرض اسیدها و به طور ویژه مقاومت به خوردگی حفره‌ای می‌شود [7-9].

فرایند پیوندی فاز مایع گذرا (Transient Liquid Phase: TLP) ترکیبی از فرتیند لحیم‌کاری سخت و نفوذی است به همین جهت تحت عنوان لحیم‌کاری سخت نفوذی نیز شناخته می‌شود و در سال‌های اخیر به عنوان روشی موثر برای اتصال انواع مختلفی از فلزات و آلیاژهای مشابه و غیر مشابه، سوپرآلیاژها و سرامیک‌ها مورد توجه واقع شده‌است. فرایند اتصالدهی TLP، انتخابی مناسب برای اتصالدهی و تعمیر آلیاژهای حساس به ترکیدگی داغ و بهم‌ریختگی شدید ریزساختاری حین فرایندهای جوشکاری قوسی می‌باشد. در فرایند TLP یک لایه واسط به

شده تا 560 MPa می‌شود.

قاسمی و همکاران [13] تاثیر ترکیب شیمیایی فلزجوش بر رفتار خوردگی اتصال غیرهم‌جنس SS310/ IN-718 ایجاد شده توسط فرایند GTAW و فلزات پرکننده Inconel 625 و Inconel 82 و stainless steel 310 را بررسی نمودند و گزارش کردند ریزساختارهای حاصل در تمامی نمونه‌ها آستنیتی با موفولوژی دندریت‌های ستونی و هم‌محور می‌باشد که ظریف‌ترین ریزساختار دندریتی مربوط به فلزجوش ایجاد شده با فلزپرکننده Inconel 625 می‌باشد. براساس نتایج حاصل از آزمون کشش، شکست تمامی نمونه‌ها از نوع نرم و بیشترین استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی به ترتیب 610 MPa و 48% مربوط به فلز پرکن Inconel 625 حاصل گردیده‌است.

Cao و همکاران [14] تاثیر عملیات حرارتی پس از پیونددهی (PWHT) بر سوپرآلیاژ IN-718 اتصال داده شده توسط فرایند TLP و لایه واسط Ni-Cr-Si-B را بررسی و گزارش نمودند PWHT در دمای 1180 °C به مدت 60 min موجب انحلال ترکیبات بین‌فلزی غنی از Ni-Si-Nb و Cr-Mo-Nb از ناحیه اتصال و افزایش استحکام کششی اتصال تا 1130MPa می‌شود. براساس مطالعات صورت گرفته توسط پایدار و همکاران [15]، با افزایش مدت زمان اتصال‌دهی از 30min به 60min، اتصال غیرمتشابه Inconel 617 / AISI 321SS به همراه لایه واسط 40Cu+54Ag% یکنواخت‌تر می‌شود. افزایش زمان اتصال‌دهی موجب تشکیل محلول جامد آستنیت غنی از نیکل در IN-617 و آستنیت غنی از نیکل و آهن در AISI 321 می‌گردد. بعلاوه در موضع مرکزی اتصال عمدتاً فازهای بین فلزی غنی از Cu و Ag شناسایی شد. افزایش مدت زمان اتصال‌دهی از 60 min و 30 min موجب افزایش استحکام برشی نمونه‌های اتصال داده شده از 257/3 به 322/9 MPa شد.

تاثیر ضخامت لایه واسط نیکل خالص (2, 5, 10, 15, 30 μm) در اتصال TLP سوپرآلیاژ پایه نیکل (Ni₃Al-based superalloy) به فولاد S31042، توسط Peng و همکاران [16] در دما و زمان اتصال‌دهی 1150 °C و 2hr بررسی شد. تشکیل فاز γ' و نفوذ درهم بین موضع اتصال و فلزپایه اطراف موجب افزایش

خواص مکانیکی اتصال شد. آن‌ها گزارش نمودند که لایه واسط با ضخامت 15 μm، بیشترین استحکام کششی استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی به ترتیب 96% و 320% نسبت به سوپرآلیاژ پایه نیکل و 129% و 60% نسبت به استحکام کششی و ازدیاد طول S31042 حاصل شد.

عجب شیر و همکاران [17] تاثیر زمان اتصال‌دهی TLP در مجموعه IN625/Cu/SS316L در دمای 1100 °C و بازه زمانی 15-60 min را بررسی و بر اساس آنالیز عنصری ناحیه مرکزی اتصال گزارش نمودند، رسوبات غنی از Ni, Cr, Fe در زمینه مس تشکیل شده‌است. بیشترین استحکام برشی مربوط به زمان اتصال‌دهی 30 min (470MPa) می‌باشد.

براساس تحقیقات صورت گرفته توسط بینش و همکاران [18] بر اتصال TLP، AISI 304L/BNi2/AISI 304L در مدت زمان 30 min، دمای 1110 °C برای حذف ترکیبات یوتکتیکی در محل اتصال و تکمیل انجماد هم‌دما مناسب می‌باشد. در دماهای پایین‌تر (1030°C, 1070°C) به دلیل انجماد غیرهم‌دما فازهای غنی از نیکل - سیلیسیوم، بوراید کروم و بوراید نیکل در ناحیه اتصال (ASZ) شکل گرفته‌اند. خواص خوردگی اتصال با افزایش دمای اتصال‌دهی از 1030 °C به 1070 °C افزایش و با بیشتر شدن دمای اتصال‌دهی به 1110 °C کاهش می‌یابد.

در پژوهشی اتصال هم‌جنس سوپرآلیاژ اینکونل 600 با لایه واسط BNi-2 از طریق فاز مایع گذرا توسط خرم و همکاران [19] از نظر ریزساختاری و خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج در نمونه‌ها با دمای اتصال 1050°C با افزایش زمان از 20 min و 5 به 45 min انجماد هم‌دما کامل می‌شود ولی در برخی مناطق ترکیبات یوتکتیکی کمی مشاهده گردیده‌است، همچنین در اتصالات با دمای 1100°C در تمام زمان‌های اتصال هر سه ناحیه انجماد هم‌دما، انجماد غیرهم‌دما و ناحیه متأثر از نفوذ دیده شد و با افزایش دما بر پهنای ناحیه اتصال افزوده شد. براساس دیاگرام فازی نیکل - بور این افزایش دما موجب افزایش فاز مذاب و کاهش انحلال بور در نیکل می‌گردد که دلیلی بر این مشاهدات می‌باشد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مناسب‌ترین شرایط اتصال‌دهی در

فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L با استفاده از لایه واسط BNi-3 و فرایند TLP به منظور بهینه نمودن شرایط اتصالدهی و ایجاد اتصالالی کارآمد مورد بررسی و پژوهش واقع شد.

2- روش انجام آزمایش

2-1- مواد مصرفی و جزئیات اتصالدهی

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن 316L و سوپرآلیاژ پایه نیکل IN-625 با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (1) به عنوان فلز پایه و از BNi-3 با ترکیب شیمیایی $4.5\text{Si}-3.2\text{B}-\text{Ni}$ ضخامت $25\mu\text{m}$ (تولید شده توسط فرایند انجماد سریع) به عنوان لایه واسط استفاده شد. حضور عناصر B و Si در ترکیب شیمیایی لایه واسط به عنوان عناصر کاهش دهنده نقطه ذوب (Melting Point Depressant: MPD) عمل نموده و امکان پیونددهی در دماهای کمتر از درجه حرارت تخریب آلیاژ پایه را فراهم می آورد. به علاوه عدم حضور برخی از عناصر آلیاژهای پایه از قبیل Cr، Mo و غیره در ترکیب لایه واسط امکان ایجاد اتصالالی عاری از ترکیبات بین فلزی را افزایش می دهد. نمونه های لازم برای پیونددهی TLP با ابعاد $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ توسط وایرکات از آلیاژهای پایه دریافتی برش زده شد. برای زدودن لایه های اکسیدی و ریختگی ایجاد شده حین تهیه نمونه ها، سطوح مورد نظر برای پیونددهی با استفاده از سنباده های SiC شماره 400-80 پولیش شدند. سپس در حمام استون به مدت 20 min از طریق آلتراسونیک چربی زدایی و بعد از آن توسط دمش هوای گرم به طور کامل خشک شدند. همچنین لایه واسط BNi-3 در ابعاد $10 \times 10 \text{ mm}$ برش و مشابه با آلیاژهای پایه چربی زدایی شد. برای تهیه یک مجموعه پیونددهی TLP، یک قطعه لایه واسط آماده سازی شده در بین دو آلیاژ پایه واقع و برای جلوگیری از جابجا شدن اجزاء اتصال، مجموعه آماده شده در بین نگهدارنده فولادی قرار می گیرد. عملیات پیونددهی TLP در کوره تیوبی در گستره دمایی $1050-1250^\circ\text{C}$ به مدت زمان 20-5 min تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون با خلوص 99/995 انجام شد. نرخ گرمایش متوسط در حدود $5 \pm 15^\circ\text{C}/\text{min}$ بود. بعد از پیونددهی در دمای

دمای 1050°C و زمان 45 min برای این اتصال می باشد که از نظر ریزساختاری شامل ترکیبات بوراید نیکل در نواحی ناپیوسته انجماد غیرهمدمای می باشد. همچنین سختی HV 511 به عنوان بیشترین میزان سختی برای نواحی انجماد غیرهمدمای گزارش شده است.

امکان پذیری اتصال TLP فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S32750 به فولاد زنگ آستنیتی زنگ نزن AISI 304 با استفاده از لایه واسط BNi-2 در دمای 1050°C و زمان 45 min توسط عبدالوند و همکاران [20] مورد ارزیابی قرار گرفته است. ناحیه انجماد همدمای شامل فاز پرویوتکتیک محلول جامد نیکل γ می باشد. با افزایش غلظت عناصر فلزات پایه در مذاب لایه واسط و نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به فلزات پایه، افزایش دمای لیکویدوس رخ می دهد و جبهه انجماد همدمای از فصل مشترک لایه واسط / فلز پایه به سمت مرکز اتصال حرکت می کند. وجود درصدی از عناصر آهن، کرم و مولیبدن نیز دلیلی بر ذوب شدن فلز پایه در مرز می باشد. بر اساس مشاهدات ریزساختاری ناحیه ای فوق اشباع از بور در DAZ به دلیل ضریب نفوذ بور در نیکل تشکیل شده است. در DAZ، فلز پایه AISI 304 بوراید و کربو بوراید های آهن و کروم و در سمت فولاد زنگ نزن دوفازی بوراید های نیکل، آهن، مولیبدن و نیتريد بور مشاهده شده است. استحکام برشی اندازه گیری شده اتصال با این شرایط نسبت به فلز پایه UNS S32750 و AISI 304 به ترتیب 1/1 و 0/7 برابر است.

خواص خوردگی مطلوب سوپرآلیاژهای پایه نیکل موجب توجه به خصوص به این دسته از سوپرآلیاژها برای کاربرد در محیط هایی خورنده و دما بالا گردیده است. از سویی هزینه بالای مربوط به تولید، نگهداری و تعمیرات این گروه از مواد موجب توجه به راهکارهای کاهش هزینه ها از قبیل استفاده از آلیاژی ارزان قیمت تر از قبیل فولادهای زنگ نزن آستنیتی همراه با سوپرآلیاژها شده است. در این شرایط اتصال غیرهمجنس سوپرآلیاژ / فولاد زنگ نزن نقش بسیار مهمی در توسعه مجموعه هایی کارآمد و باصرفه اقتصادی دارد. در این راستا، در تحقیق حاضر اتصالدهی سوپر آلیاژ پایه نیکل IN625 و

جدول 1- درصد وزنی عناصر شیمیایی فلزات پایه مصرفی.

عناصر آلیاژی فلزات پایه																
Fe	Cr	Mo	Si	B	Mn	C	Nb	Ti	P,S	Al	Co	Mo	Cr	Ni		
5	20-23	8-10	0.5	-	0.5	0.1	3-4	0.4	0.15	0.4	1	8-10	20-23	58	Inconel-625 (wt%)	
balance	16	2.5	1	-	2	0.03	-	-	<0.07	-	-	2.5	16	12	AISI 316L (wt%)	

توسط دستگاه کشش SANTAM مدل STM-150 با سرعت 5mm/min انجام شد. لازم به ذکر است، آزمون برش برای هر نمونه سه مرتبه تکرار و متوسط مقادیر مذکور به عنوان استحکام برشی گزارش شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریزساختاری

ریزساختار SS-316L و سوپرآلیاژ IN-625 در شکل (1) نشان داده شده است. حضور مقادیر قابل ملاحظه عنصر آستنیت‌زای نیکل (12wt.%) در ترکیب شیمیایی SS-316L موجب ایجاد ساختار آستنیتی (γ) شامل دانه‌های هم محور شده و دوقلویی‌های آیل شده ناشی از فرایند آنیل انحلالی در زمینه آستنیتی می‌باشد. ریزساختار سوپرآلیاژ IN-625 شامل زمینه آستنیتی (γ) سخت شده توسط مکانیزم محلول جامد می‌باشد. همچنین حضور کاربیدهایی عمدتاً غنی از مولیبدن، نیکل و نیوبیم و همچنین فاز گاما پریم (فازهای غنی از نیکل - نیوبیم γ') در زمینه IN-625، موجب استحکام‌دهی IN-625 توسط مکانیزم رسوب‌سختی می‌گردد.

در شکل (2) شماتیک موضع اتصال نشان داده شده است، به طور کلی موضع اتصال TLP از سه منطقه مجزا شامل (الف) ناحیه انجماد غیرهمدم (Athermal Solidified Zone: ASZ)، (ب) ناحیه انجماد همدم (Isothermal Solidified Zone: ISZ)، (ج) ناحیه متأثر از نفوذ (Diffusion Affected Zone: DAZ) می‌باشد. برخلاف ASZ که ناشی از انجماد غیرهمدمای مذاب حین سرد شدن از دمای پیونددهی تا دمای اتاق می‌باشد، ISZ بدلیل انجماد همدمای مذاب در موضع اتصال در دمای پیونددهی تشکیل می‌شود. بنابراین با پیشروی و تکمیل انجماد همدمای، موضع مرکزی اتصال تنها شامل ISZ می‌باشد و سردنمودن نمونه‌های اتصال داده شده قبل از تکمیل انجماد همدمای

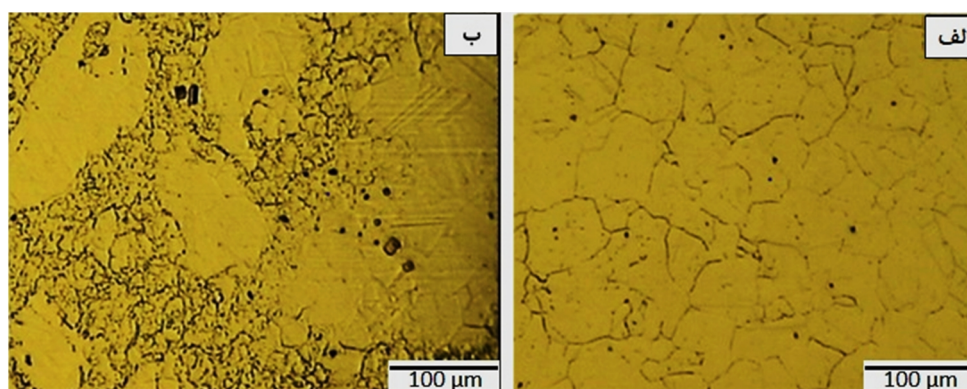
مورد نظر، با خاموش نمودن کوره نمونه‌ها در کوره تا دمای محیط سرد شدند. بعد از پیونددهی، نمونه‌ها عمود بر موضع اتصال با استفاده از وایرکات برش و مطابق با اصول استاندارد (ASTM E3) متالوگرافی و آماده‌سازی سطحی شدند. سپس نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده، با استفاده از محلول اچ $\text{HNO}_3 + \text{HCL} + \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ (برای بررسی فلزپایه 316L) و اچانت الکترو شیمیایی اگزالیک‌اسید 20% (20ml اگزالیک‌اسید + 100ml آب مقطر) در ولتاژ 6 V به مدت 10 sec الکترواچ شدند. بررسی ریزساختاری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM) انجام شد. مطالعات SEM با بکارگیری میکروسکوپ MIRA3 مجهز به آنالیزگر EDS و با ولتاژکاری 20 KV انجام شد. آزمایش تفرق اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه XRD مدل X'pert PRO MPD به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در موضع اتصال در محدوده 10° - 120° با گام زمانی 1min/degree انجام شد.

2-2- آزمایش میکروسختی

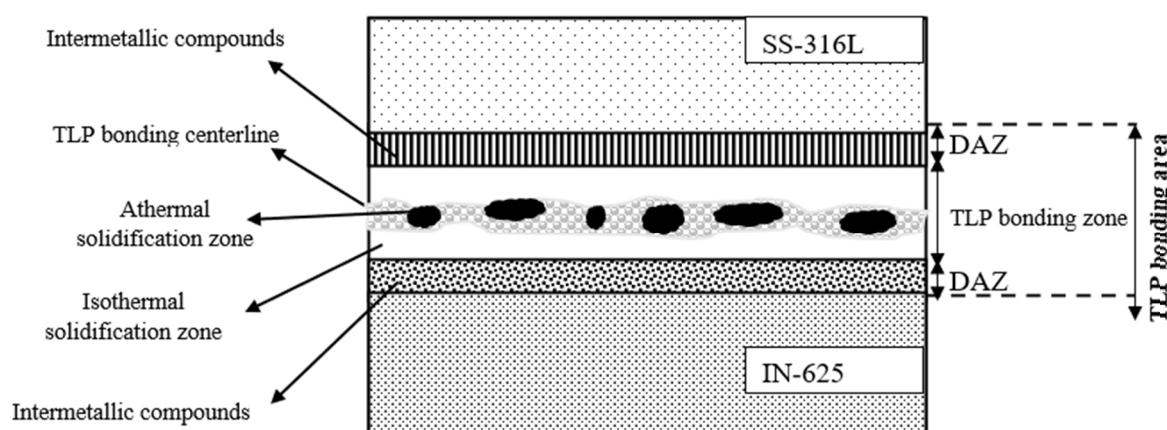
از آزمون میکروسختی به منظور ارزیابی تاثیر شرایط اتصال‌دهی بر چگونگی توزیع فازها در ناحیه اتصال استفاده شد. آزمون میکروسختی طبق استاندارد ASTM E 384-16 توسط دستگاه میکروسختی مدل MH3 تحت بار 200 gr و مدت زمان باردهی 15 s انجام شد. آزمون میکروسختی از سرتاسر ناحیه اتصال، با فاصله حداقل $50 \mu\text{m}$ بین هر نقطه انجام شد. لازم به ذکر است ریزسختی هر منطقه حداقل 5 مرتبه تکرار و متوسط مقدار اندازه‌گیری شده، به عنوان ریزسختی آن منطقه گزارش شده است.

3-2- آزمایش استحکام برشی

آزمایش کشش-برش تک محوره برای ارزیابی تاثیر شرایط اتصال‌دهی بر استحکام برشی نمونه‌ها استفاده شد. آزمایش برش



شکل 1- ریزساختار نوری فلزهای پایه مورد استفاده در این پژوهش. الف- SS-316L، ب- سوپرآلیاژ IN-625.



شکل 2- شماتیک موضع اتصال TLP.

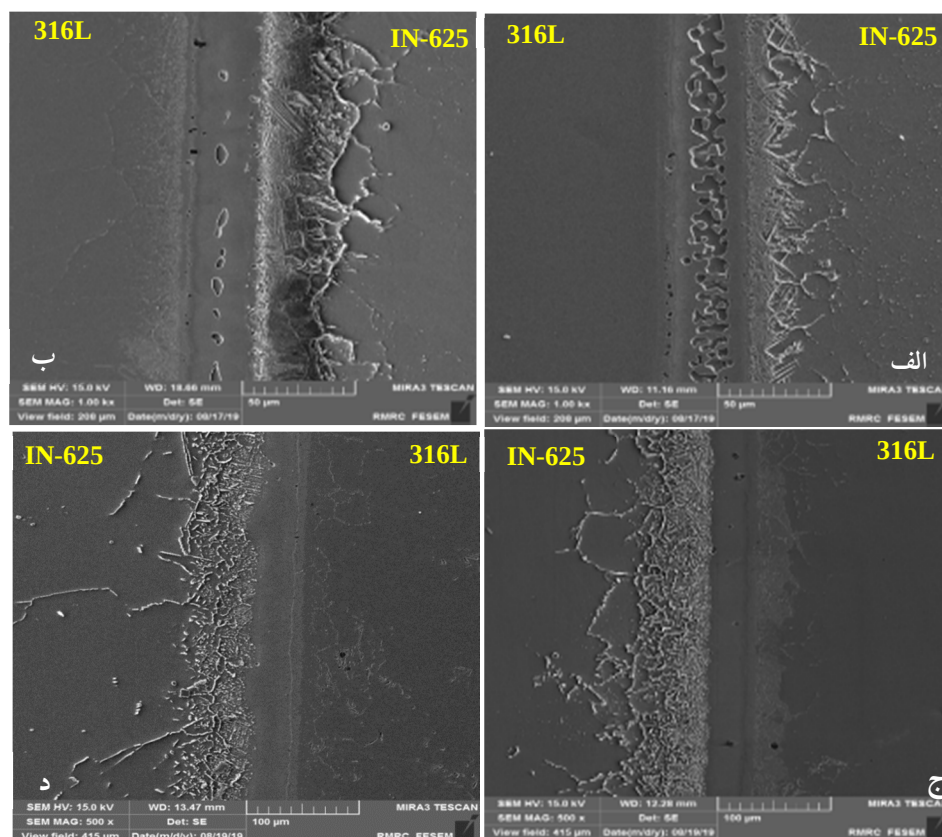
می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما نفوذ نیکل افزایش یافته و پیک مربوط به نیکل عنصری حذف گردیده و به دلیل انحلال بهتر نیکل و همگن‌سازی بهتر فلزجوش، پیک ترکیبات سه‌تایی افزایش یافته‌است. به دلیل افزایش زمان اتصال‌دهی در نمونه $1150^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$ به شدت پیک ترکیبات سه‌تایی افزوده شده است (شکل 4-ب).

در اتصال غیرهم‌جنس SS-316L/BNi-3/IN625، سرد نمودن نمونه‌ها قبل از تکمیل انجماد هم‌دما موجب انجماد غیرهم‌دما می‌شود. فرایند انجماد هم‌دما به واسطه نفوذ عناصر MPD کنترل می‌شود و افزایش دما و زمان اتصال‌دهی بر نفوذ این عناصر تأثیرات مثبت دارد. پس از پایان زمان اتصال‌دهی و نفوذ عناصر آلیاژی به ویژه بور و سیلیسیم (عناصر کاهنده نقطه ذوب، MPD elements) به فلزات پایه اطراف

باعث انجماد غیرهم‌دما می‌شود. باقیمانده در موضع مرکزی اتصال بواسطه استحاله یوتکتیکی می‌شود.

تأثیر دما و زمان اتصال‌دهی بر ریزساختار موضع اتصال SS-316L/BNi3/IN-625 در شکل (3) نشان داده است. بررسی عنصری و فازی اجزاء موضع اتصال به ترتیب در شکل (4و5) نشان داده شده است.

براساس نتایج حاصل از XRD (شکل 5) از ناحیه اتصال در نمونه $1050^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$ ترکیبات تشکیل شده عمدتاً شامل نیکل عنصری می‌باشد که دلیل تشکیل آن‌ها عدم وجود دما و زمان کافی برای همگن‌سازی ترکیب فلزجوش می‌باشد و همچنین در نمونه $1050^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$ به دلیل زمان کافی برای نفوذ نیکل، ترکیبات دوتایی و سه‌تایی نیکل افزایش یافته و از شدت پیک مربوط به نیکل عنصری کاهش یافته‌است. با مقایسه نتایج XRD نمونه $1150^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$ (شکل 4-الف) و نمونه $1050^{\circ}\text{C}/20\text{min}$



شکل 3- تاثیر دما و زمان اتصال دهی بر ریزساختار موضع اتصال SS-316L/BNi3/IN-625. الف- نمونه اتصال داده شده در $1050^{\circ}\text{C}/5 \text{ min}$.

ب- نمونه اتصال داده شده در $1050^{\circ}\text{C}/20 \text{ min}$ ، ج- نمونه اتصال داده شده در $1150^{\circ}\text{C}/5 \text{ min}$ ، د- نمونه اتصال داده شده در $1150^{\circ}\text{C}/20 \text{ min}$.

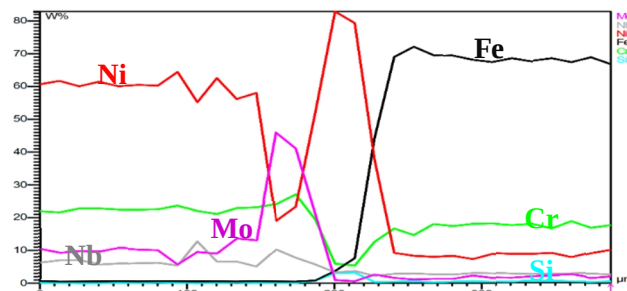
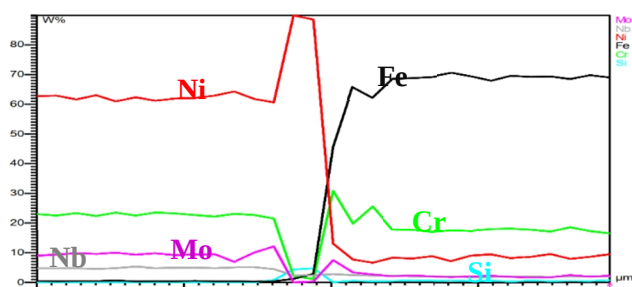
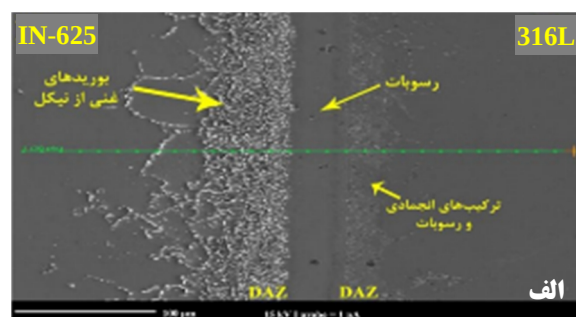
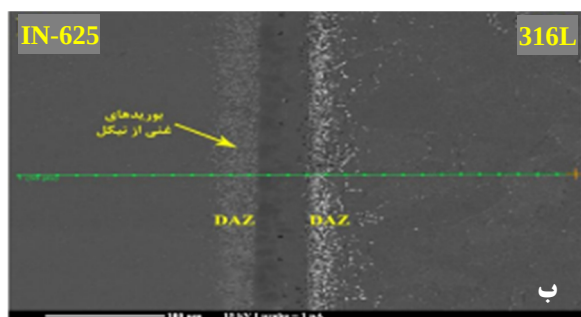
کربوبوراید های غنی از آهن و کروم را با نفوذ بور از لایه واسط به فلزات پایه و حضور آهن و کروم، که بوراید های قوی تشکیل می دهند توضیح داد. به دلیل تشکیل رسوبات بورایدی DAZ از عناصر آزاد کروم و مولیبدن تخلیه می گردد. با افزایش زمان پیوند در دمای ثابت، عرض ناحیه اتصال تقریباً ثابت است اما DAZ افزایش می یابد. با کاهش زمان اتصال دهی عناصر آلیاژی لایه واسط زمان کافی جهت نفوذ به فلز پایه فراهم نمی گردد.

در نمونه ها با افزایش زمان اتصال دهی از 5 min به 20 min، نیکل زمان بیشتری برای نفوذ داشته و ترکیبات این ناحیه بیشتر شامل بور، کربن، کروم و آهن است. به منظور بررسی دقیق تر و بیشتر DAZ و ناحیه اتصال نمونه های 1200°C و 1240°C مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب این نمونه ها به این دلیل بوده است که میزان تغییرات DAZ را در نمونه ای که انجماد همدم تقریباً کامل شده و نمونه ای که انجماد همدم کامل شده است مورد

اطراف موضع اتصال، انجماد فازی مذاب به صورت هم نشستی (epitaxial) بر فصل مشترک مذاب/جامد (L/S interface) شروع و به سمت خط مرکزی اتصال پیشروی می نماید. سرد نمودن نمونه ها قبل از تکمیل انجماد همدم موجب پس زده شدن عناصر آلیاژی با ضریب توزیع کوچکتر از یک به مذاب باقیمانده در موضع مرکزی اتصال و تشکیل ترکیبات بین فلزی و اجزاء یوتکتیکی در مرکز محل اتصال می شوند (شکل 6).

2-3- منطقه متاثر از نفوذ (DAZ)

تشکیل DAZ به دو عامل، نفوذ بور در مجاورت فلز پایه و حضور عناصر فعال برای تشکیل رسوبات بورایدی مانند بوراید کروم و مولیبدن بستگی دارد. پس از تکمیل انجماد همدم عناصر آلیاژی به ویژه عناصر کاهنده نقطه ذوب به فلزات پایه نفوذ کرده و ترکیبات بین فلزی تشکیل می دهند. حلالیت کربن با نفوذ بور در زمینه آستنیتی کاهش می یابد، بنابراین، تشکیل



شکل 4- پروفایل توزیع عناصر آلیاژی در امتداد موضع اتصال مجموعه SS-316L/BNi3/IN-625 اتصال داده شده در شرایط: الف - $1150^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$ ، ب - $1150^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$.

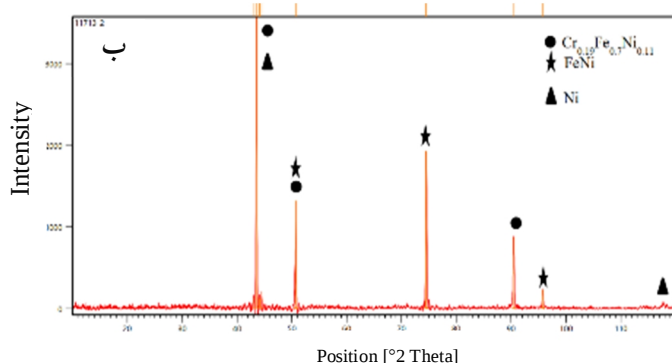
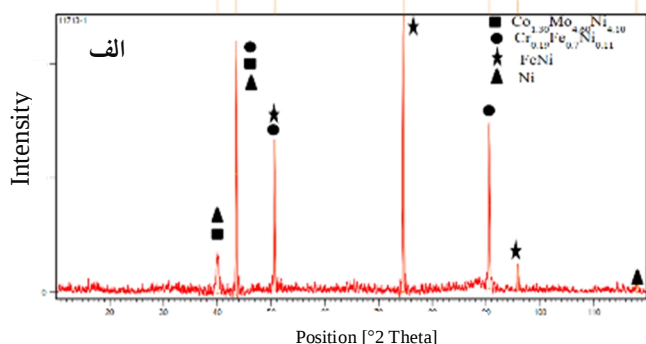
چشمگیر مقادیر سختی می‌باشد. در نمونه‌های 1150°C ، 5-20min با پیشروی به سمت کامل شدن انجماد همدا و کاهش درصد ترکیبات یوتکتیکی در مرکز اتصال از مقادیر سختی اندازه‌گیری شده کاسته شده‌است (شکل 9).

بررسی قرار گیرد. ترکیبات عمده تشکیل شده در DZA پس از انجماد همدا شامل نیکل، کروم، اکسیژن و نیوبیم می‌باشد. دلیل افزایش میزان کروم در ترکیبات این ناحیه نسبت به ترکیبات ناحیه اتصال را می‌توان به نزدیک‌تر بودن این ناحیه به فلزات پایه و راحت‌تر بودن نفوذ در این ناحیه مرتبط نمود. با مقایسه ترکیبات این ناحیه نمونه 1240°C با نمونه 1200°C در زمان برابر، درصد عناصر آلیاژی افزایش داشته‌است که دلیل این پدیده را می‌توان به کامل شدن پدیده انجماد همدا و افزایش ضریب نفوذ در این دما مربوط دانست. به‌صورتی که فلزجوش و DZA به سمت یکسان شدن ترکیبات و همگن شدن کامل پیش رفته‌است (شکل 6).

3-3- ارزیابی خواص مکانیکی اتصال

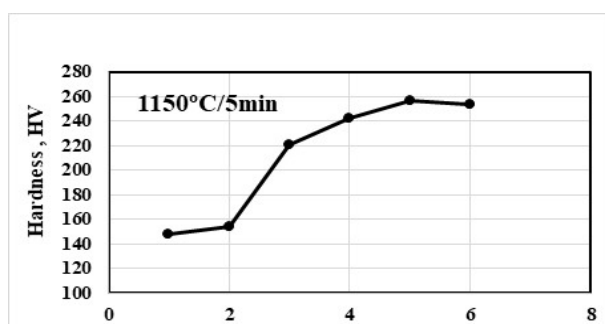
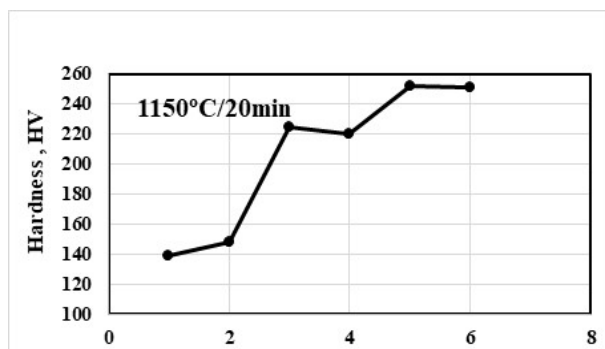
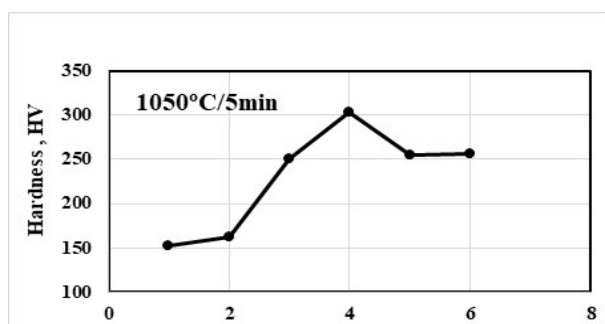
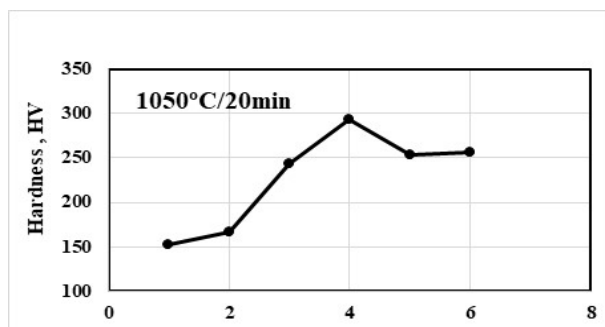
الف - بررسی پروفیل سختی

شماتیکی از مسیر انجام میکروسختی در شکل (7) نشان داده شده‌است. براساس پروفیل سختی بدست آمده افزایش سختی در فلزات پایه به واسطه نفوذ عناصر مشاهده می‌گردد. وجود درصد بالای ترکیبات یوتکتیکی بسیار سخت و شکننده در مرکز اتصال نمونه‌های 1050°C ، 5-20 min، دلیلی بر افزایش

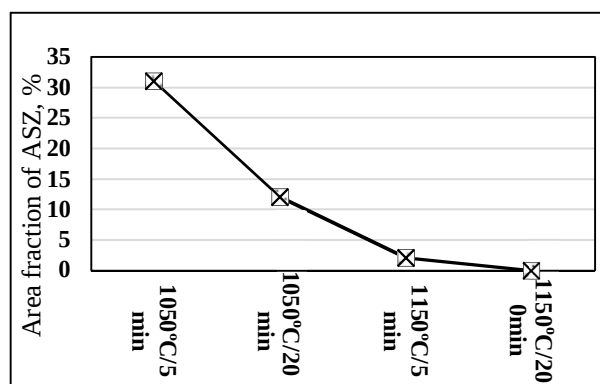


شکل 5- بررسی XRD موضع اتصال. الف - قبل از تکمیل انجماد همدا ($1050^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$)، ب - بعد از تکمیل انجماد همدا ($1050^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$).

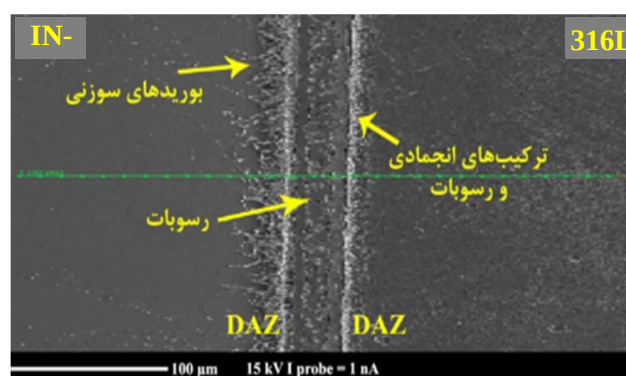
ریزساختاری افزایش استحکام برشی با افزایش مدت زمان پیونددهی را می‌توان به فراهم شدن امکان نفوذ درهم بین لایه مذاب و فلز جامد اطراف و در نتیجه پیشرفت انجماد همدمها و کاهش محسوس مقدار ترکیبات یوتکتیکی تشکیل شده در موضع مرکزی اتصال نسبت داد.



شکل 9- تاثیر شرایط اتصالدهی بر پروفیل سختی موضع اتصال.



شکل 6- تاثیر شرایط پیونددهی بر کسر حجمی ترکیبات یوتکتیکی تشکیل شده در خط مرکزی اتصال.



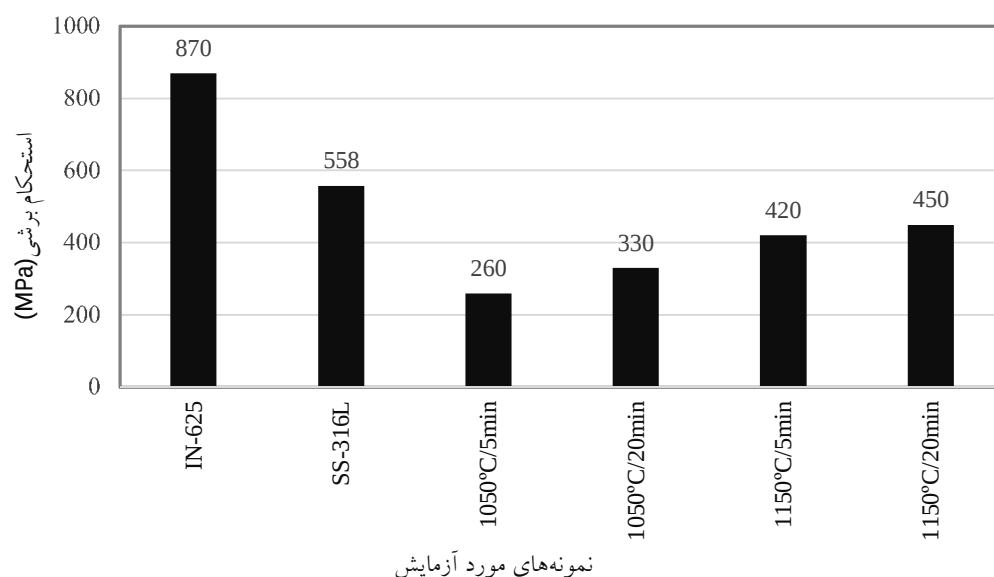
شکل 7- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ترکیبات ناحیه DAZ

STAINLESS STEEL 316L		BZ	INCONEL 625	
6	5	4 3	2	1

شکل 8- شماتیکی از نقاط میکروسختی سنجی.

ب- بررسی استحکام برشی

شکل (10) نتایج استحکام برشی نمونه‌های 1050°C و 1150°C در زمان‌های 5-20min را نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود با افزایش مدت زمان پیونددهی از 5min به 20min در نمونه‌های اتصال داده شده در دمای 1050°C استحکام برشی از 260MPa به 330MPa افزایش می‌یابد که این افزایش استحکام برشی در نمونه اتصال داده شده در دمای 1150°C با افزایش مدت زمان پیونددهی از 5min به 20min از 420MPa به 450MPa می‌باشد. با توجه به بررسی‌های



شکل 10- تاثیر شرایط اتصال دهی بر استحکام برشی نمونه‌های اتصال داده شده.

۴- نتیجه گیری

و کاهش استحکام برشی نمونه‌های اتصال دهی شده می‌شود.
- افزایش دمای اتصال دهی از 1050°C به 1150°C موجب افزایش ضریب نفوذ عناصر و کامل شدن انجماد همدمها بعد از 20min اتصال دهی شده که موجب افزایش استحکام برشی نمونه اتصال دهی شده (از 330MPa به 450MPa) می‌شود.
- براساس مطالعات ریزساختاری، ریزسختی موضع اتصال و استحکام برشی نمونه‌های اتصال دهی شده، شرایط اتصال دهی بهینه اتصال غیرهم جنس IN-625/BNi3/SS-316L دمای 1150°C و مدت زمان 20min تعیین شد.

منابع

- 1- Donachie, M.J., Donachie, S.J., "Superalloys A Technical Guide", 2nd Edition, ASM International, 2002.
- 2- Ren, W., Swideman, R., "A review paper on aging effects in Alloy 617 for Gen IV Nuclear Reactor applications", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 131, 2009.
- 3- Rahman, S., Priyadarshan, G., Raja, K.S., Nesbitt, C., Misra, M., "Investigation of the secondary phases of alloy 617 by scanning kelvin probe force microscope", Materials letters, Vol. 62, pp. 2263-2266, 2008.
- 4-Shankar, V., K.B.S. Rao, and S. Mannan, Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. Journal of nuclear materials, pp. 222-232, 2001.
- 5- Mortezaie, A. and M. Shamanian, An assessment of microstructure, mechanical properties and corrosion

لازم به ذکر است که ترکیبات یوتکتیکی، ترکیباتی با سختی بالا و چقرمگی کمی هستند که باعث ایجاد یک مسیری با مقاومت کم در مقابل اشاعه ترک شده که در نتیجه با تشکیل ترکیبات یوتکتیکی حاصل از انجماد غیرهمدمها درموضع مرکزی اتصال استحکام برشی نمونه‌های اتصال داده شده به شدت کاهش می‌یابد.

در این پژوهش اتصال غیرهم جنس سوپرآلیاژ Inconel625 (IN-625) به آلیاژ AISI316L (316L) توسط فرایند اتصال دهی فاز مایع نافذ گذرا (TLP) انجام و تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال حاصل مورد بررسی و پژوهش واقع شد. براساس نتایج حاصله می‌توان موارد زیر را به عنوان مهم ترین یافته‌های این پژوهش معرفی نمود:

- اتصال دهی IN-625 به 316L توسط فرایند TLP امکان پذیر می‌باشد و اتصال حاصله عاری از عیوب متداول همراه با فرایندهای جوشکاری قوسی می‌باشد.
- سرد نمودن نمونه‌ها تا قبل از تکمیل انجماد همدمها موجب تشکیل ترکیبات یوتکتیکی غنی از بور و سیلیسیم در موضع مرکزی اتصال می‌شود. تشکیل این ترکیبات بین فلزی موجب افزایش شدید سختی موضع اتصال از 220HV (نمونه 1150 °C/20 min) به 304HV (نمونه 1050 °C/5 min)

microstructure and mechanical properties of TLP bonded Inconel718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, pp. 1-6, 2014.

15- Paidar, M., Ashraff Ali, K.S., Ojo, O.O., Mohanavel, V., Vairamuthu, J., Ravichandran, M., Diffusion brazing of Inconel 617 and 321 stainless steel by using AMS 4772 Ag interlayer, *Journal of Manufacturing Processes* 61, pp. 383-395, 2021.

16- Peng, Y., Li, C., Li, H., Liu, Y., Effect of interlayer on microstructure and mechanical properties of diffusional-bonded Ni3Al-based superalloy/S31042 steel joint, *Journal of Manufacturing Processes* 72, pp. 252-261, 2021.

17- Ajabshir, M., Shamanian, M., Ashrafi, A., Karimi, M.A., The Effect of Bonding Time on Dissimilar Joint Properties Between Inconel 625 and AISI 316L Using Transient Liquid Phase Bonding Method with Cu Interlayer, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 3, pp. 3311-3325, 2022.

18- بیش، ب، میرزایی، س، تقی اهری، ا، تأثیر دمای اتصال

بر ریزساختار و رفتار خوردگی الکتروشیمیایی اتصال فولاد زنگ‌زن آستنیتی 304L، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره 2، جلد 7، صفحات 87 – 73، 1400.

19- خرم، ع، داوودی جمالویی، ا، جعفری، ع، ارزیابی ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال مشابه ورق سوپر آلیاژ اینکونل 600 به روش فاز مایع گذرا، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، جلد 3، صفحات 104-90، 1396.

20- عبدالوند، ر، عطاپور، م، شمعانیان، م، علافچیان، ع، امکان‌پذیری اتصال فاز مایع گذرای فولاد زنگ‌زن دوفازی UNS32750 به فولاد آستنیتی AISI 304، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، جلد 3، صفحات 8-1، 1396.

resistance of dissimilar welds between Inconel 718 and 310S austenitic stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 37-46, 2014.

6- Ramkumar, K.D., et al., Investigations on the microstructure, tensile strength and high temperature corrosion behaviour of Inconel 625 and Inconel 718 dissimilar joints. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 306-32, 2017.

7- لیپولد، ج، و کوتکی، د، ترجمه شمعانیان، م، و رحمتی، م، متالورژی جوشکاری و جوش‌پذیری فولادهای زنگ‌زن، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، 1378.

8- Kim, Y. J., Phase transformations in cast duplex stainless steels, *Materials Science and Technology*, pp. 685-700, 1992.

9- Nilsson, J.-O., *Super duplex stainless steels*. *Materials science and technology*, pp. 685-700, 1992.

10- Emami, M., B. Binesh, and J.M. Heydarzadeh, Analysis of microstructure, kinetics of isothermal solidification and mechanical properties of IN718/MBF-20/SS316L TLP joints. *Philosophical Magazine*, pp. 1726-1749, 2021.

11- میثاقی، م، اتصال فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 321 از طریق اتصال فاز مایع گذرا با دولایه واسط MBF20 و MBF30، پایان نامه کارشناسی ارشد، 1393.

12- Doroudi, A., et al., Effect of the isothermal solidification completion on the mechanical properties of Inconel 625 transient liquid phase bond by changing bonding temperature. *Journal of Materials Research and Technology*, pp. 10355-10365, 2020.

13- قاسمی، ر، و حشمت دهکردی، ا، و شمعانیان اصفهانی، م، ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهم‌جنس اینکونل 825 به فولاد زنگ‌زن 316، مجله علمی – پژوهشی علوم و فناوری جوشکاری ایران، دوره 2، شماره 1، جلد 2، صفحات 21-31، 1395.

14- Cao, J., et al., Effects of post-weld heat treatment on