E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 8, Number 1, 2022



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

M.J.Baghban[1], M.Mosallaee Pour[1], H. HajiSafari[1], A.Babanejad[1], A.Sabouri[2]

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 1050-1150ºC 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]

شاپا:2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره1، بهار و تابستان 1401

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

محمدجواد باغبان[1]، مسعود مصلایی‌پور[1*]، هانیه حاجی‌صفری[1]، افشین بابانژاد[1]، عبدالله صبوری[2]

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 1050-1150 °C و 5-20 min و تحت حفاظت گاز محافظ آرگون با خلوص99/9995% 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 همدما و ایجاد فاز گاما (γ) بصورت یکدست در موضع اتصال می‌شود. سرد نمودن نمونه‌ها قبل از تکمیل انجماد همدما 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، اینکونل625، 316L، انجماد همدما ریزساختار و سختی.

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

1- مقدمه

سوپرآلیاژها به‌دلیل دارابودن خواص منحصربفرد مانند استحکام، مقاومت به خزش و خوردگی داغ، به‌طور گسترده دردماهای 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 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 عمدتا با افزودن کربن، کروم، مولیبدن و نیوبیوم تقویت می‌شوند [4]. اینکونل625 (IN-625) یک سوپرآلیاژ پایه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]

نیکل است که در دماهای بالا (~1500ºC)، 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 خورندگی 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 آشپرخانه 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 صورت پودر ریز یا لایه نازک شامل عناصر کاهنده نقطه ذوب (Melting Point Depressant: MPD) مانند بور یا فسفر بین دو 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 همدما) و در ادامه با همگن شدن موضع اتصال، پیوندهی 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°C و بازه زمانی 30-120 min را بررسی و گزارش نمود که عدم تکمیل انجماد همدما موجب تشکیل ترکیباتی بین‌فلزی از قبیل Fe-B, Ni-B, Ni-Si, Cr-B, Fe-B در موضع مرکزی اتصال می‌شود. همچنین بیشترین استحکام برشی در نمونه اتصال‌داده 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 همدما می‌شود. به علاوه افزایش مدت زمان اتصال‌دهی موجب کاهش کسرحجمی 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 همدما 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 هم‌دما موجب‌افزایش استحکام برشی نمونه‌های پیوند داده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]

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, 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 MPa 610 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 ºC 1180 به مدت min 60 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 Cu40%+Ag54% یکنواخت‌تر می‌شود. افزایش‌زمان 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 عمدتا فازهای بین فلزی غنی از Cu و Ag شناسایی شد. افزایش مدت زمان اتصال‌دهی از min 60 و min 30 موجب افزایش استحکام برشی نمونه‌های اتصال داده شده از257/3 به MPa 322/9 شد.

تاثیر ضخامت لایه واسط نیکل خالص (2, 5, 10, 15, 30 µm) در اتصال TLP سوپرآلیاژ پایه نیکل (Ni_3Al-basedsuperalloy) به فولاد S31042، توسط Peng و همکاران [16] در دما و زمان اتصال‌دهی ºC 1150 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 µm 15، 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 شیری و همکاران [17] تاثیر زمان اتصال‌دهی TLP در مجموعه IN625/Cu/SS316L در دمای ºC 1100 و بازه زمانی min 60-15 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 min 30 (470MPa) می‌باشد.

براساس تحقیقات صورت گرفته توسط بینش و همکاران [18] بر اتصالTLP، AISI 304L/BNi2/AISI 304L در مدت زمان min 30، دمای ºC 1110 برای حذف ترکیبات یوتکتیکی در محل اتصال و تکمیل انجماد همدما مناسب می‌باشد. در دماهای پایین‌تر (1030ºC،1070 ºC) 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 ºC 1030 به ºC 1070 افزایش و با بیشتر شدن دمای اتصال‌دهی به ºC 1110 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 اتصال1050ºC با افزایش زمان از min 20 و 5 به min 45 انجماد همدما کامل می‌شود ولی در برخی مناطق ترکیبات یوتکتیکی کمی مشاهده گردیده‌است، همچنین در اتصالات با دمای1100 ºC در تمام زمان‌های اتصال هر سه ناحیه انجماد همدما، انجماد غیرهمدما و ناحیه متاثر 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]

دمای 1050 ºC و زمان 45 min برای این اتصال می‌باشد که از نظر ریزساختاری شامل ترکیبات بوراید نیکل در نواحی ناپیوسته انجماد غیرهمدما می‌باشد. همچنین سختی 511 HV به عنوان بیشترین میزان سختی برای نواحی انجماد غیرهمدما گزارش شده‌است.

امکان‌پذیری اتصال TLP فولاد زنگ‌نزن دوفازی UNS S32750به فولاد زنگ آستنیتی زنگ‌نزن 304 AISI با استفاده از لایه واسط BNi-2 در دمای 1050ºC و زمان 45 min توسط عبدالوند و همکاران [20] مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. ناحیه انجماد همدما شامل فاز پرویوتکتیک محلول جامد نیکل γ می‌باشد. با افزایش غلظت عناصر فلزات پایه در مذاب لایه واسط و نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به فلزات پایه، افزایش دمای لیکوییدوس رخ می‌دهد و جبهه انجماد همدما از فصل مشترک لایه واسط/ فلزپایه به سمت مرکز اتصال حرکت می‌کند. وجود درصدی از عناصر آهن، کرم و مولیبدن نیز دلیلی بر ذوب شدن فلزپایه در مرز می‌باشد. بر اساس مشاهدات ریزساختاری ناحیه‌ای فوق اشباع از بور در DAZ به دلیل ضریب نفوذ بور در نیکل تشکیل شده‌است. در DAZ ، فلز پایه AISI 304 بوراید و کربوبورایدهای آهن و کروم و در سمت فولاد زنگ نزن دوفازی بورایدهای نیکل، آهن، مولیبدن و نیترید بور مشاهده شده‌است. استحکام برشی اندازه‌گیری شده اتصال با این شرایط نسبت به فلزپایه 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 محیط‌هایی 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 هزینه‌ها از قبیل استفاده از آلیاژی ارزان قیمت‌تر از قبیل فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی همراه با سوپرآلیاژها شده است. در این شرایط اتصال غیرهمجنس سوپرآلیاژ / فولاد زنگ‌نزن نقش بسیار مهمی در توسعه مجموعه‌هایی کارآمد و باصرفه اقتصادی دارد. در این راستا، در تحقیق حاضر اتصال‌دهی سوپر آلیاژ پایه نیکل IN625 و فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L با استفاده از لایه واسط BNi-3 و فرایند TLP به منظور بهینه نمودن شرایط اتصال‌دهی و ایجاد اتصالی کارآمد مورد بررسی و پژوهش واقع شد.

2- روش انجام آزمایش

2-1- مواد مصرفی و جزئیات اتصال‌دهی

دراین تحقیق از فولاد زنگ‌نزن316L و سوپرآلیاژ پایه نیکل IN-625 با ترکیب‌شیمیایی ارائه شده در جدول(1) به‌عنوان فلزپایه و از BNi-3 با ترکیب شیمیایی Ni-%4.5Si-%3.2B و ضخامت 25µm (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 کاهش‌دهنده نقطه ذوب (Melting Point Depressant: MPD) عمل نموده و امکان پیونددهی در دماهای کمتر از درجه‌حرارت تخریب آلیاژپایه را فراهم می‌آورد. به‌علاوه عدم حضور برخی از عناصر آلیاژهای‌پایه از قبیل Cr، Mo و غیره در ترکیب لایه واسط امکان ایجاد اتصالی عاری از ترکیبات بین‌فلزی را افزایش می‌دهد. نمونه‌های لازم برای پیونددهی TLP با ابعاد 10×10×5 mm توسط وایرکات از آلیاژهای‌پایه دریافتی برش زده شد. برای زدودن لایه‌های اکسیدی و ریختگی ایجاد شده حین تهیه نمونه‌ها، سطوح مورد نظر برای پیونددهی با استفاده از سنباده‌های SiC شماره400-80 پولیش شدند. سپس درحمام استون به مدت 20 min از طریق آلتراسونیک چربی‌زدایی و بعد از آن توسط دمش هوای گرم به طور کامل خشک شدند. همچنین لایه‌واسط BNi-3 در ابعاد 10×10 mm برش و مشابه با آلیاژهای پایه چربی‌زدایی شد. برای تهیه یک مجموعه پیونددهیTLP، یک قطعه لایه‌واسط آماده‌سازی شده در بین دو آلیاژ پایه واقع و برای جلوگیری از جابجا شدن اجزاء اتصال، مجموعه آماده شده در بین نگهدارنده فولادی قرار می‌گیرد. عملیات پیونددهی TLP در کوره تیوبی در گستره دمایی 1250-1050 ºC به مدت زمان 20-5 min تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون با خلوص 99/995 انجام شد. نرخ گرمایش متوسط در حدود 5±15 ºC/min بود. بعد از پیـونددهی در دمای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]

جدول 1- درصد وزنی عناصر شیمیایی فلزات پایه مصرفی.

Fe	Cr	Mo	Si	B	Mn	C	Nb	Ti	P,S	Al	Co	Mo	Cr	Ni	عنصر آلیاژی / فلزات پایه
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%)

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 $HNO_3+HCL+C_3H_8O_3$ (برای بررسی فلزپایه 316L) و اچانت الکترو شیمیایی اگزالیک‌اسید20% (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 به‌منظور ارزیابی تاثیر شرایط اتصال‌دهی بر چگونگی توزیع فازها در ناحیه اتصال استفاده شد. آزمون میکروسختی طبق استاندارد ASTME 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 µm بین هر نقطه انجام شد. لازم به ذکر است ریزسختی هر منطقه حداقل 5 مرتبه تکرار و متوسط مقدار اندازه‌گیری شده، به‌عنوان ریزسختی آن منطقه گزارش شده است.

2-3- آزمایش استحکام‌برشی

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

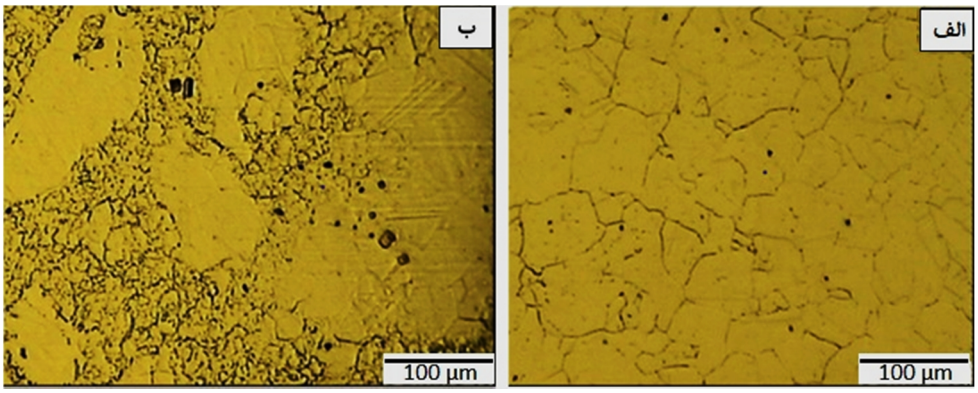
3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریزساختاری

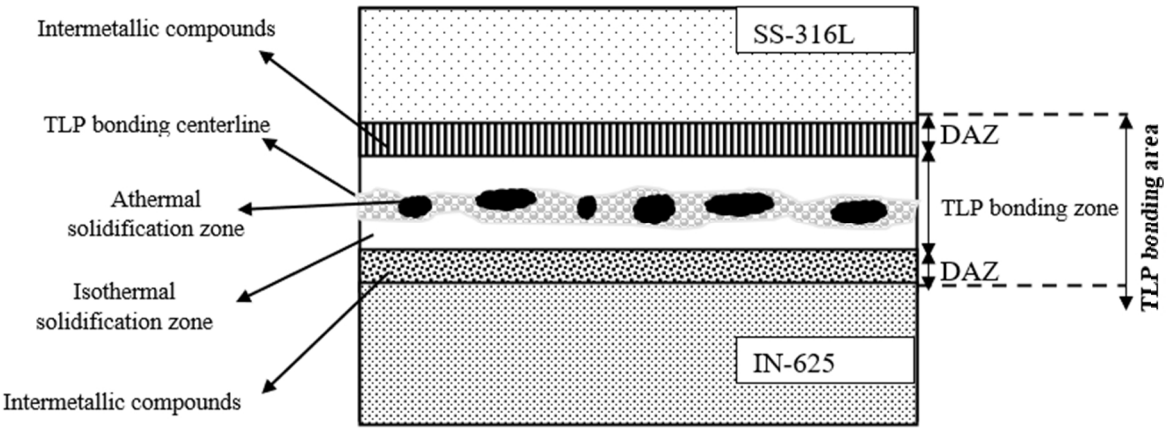
ریزساختار SS-316L و سوپرآلیاژ IN-625 درشکل(1) نشان داده شده است. حضور مقادیر قابل ملاحظه عنصر آستنیت‌زای نیکل (12wt.%) در ترکیب شیمیایی SS-316L موجب ایجاد ساختار آستنیتی (γ) شامل دانه‌های هم محور شده و دوقلویی‌های آنیل شده ناشی از فرایند آنیل انحلالی در زمینه آستنیتی می‌باشد. ریزساختار سوپرآلیاژ IN-625 شامل زمینه آستنیتی (γ) سخت شده توسط مکانیزم محلول جامد می‌باشد. همچنین حضور کاربیدهایی عمدتا غنی از مولیبدن، نیکل و نیوبیوم و همچنین فاز گاما پریم (فازهای غنی از نیکل-نیوبیوم '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 غیرهمدما (Athermal Solidified Zone: ASZ)، (ب) ناحیه انجماد همدما (Isothermal Solidified Zone: ISZ)، (ج) ناحیه متاثر 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 همدما، موضع مرکزی اتصال تنها شامل ISZ می‌باشد و سردنمودن نمونه‌های اتصال داده شده قبل از تکمیل انجماد همدما

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]



شکل1- ریزساختار نوری فلزهای پایه مورد استفاده در این پژوهش. الف-SS-316L ، ب- سوپرآلیاژIN-625 .



شکل2- شماتیک موضع اتصال TLP.

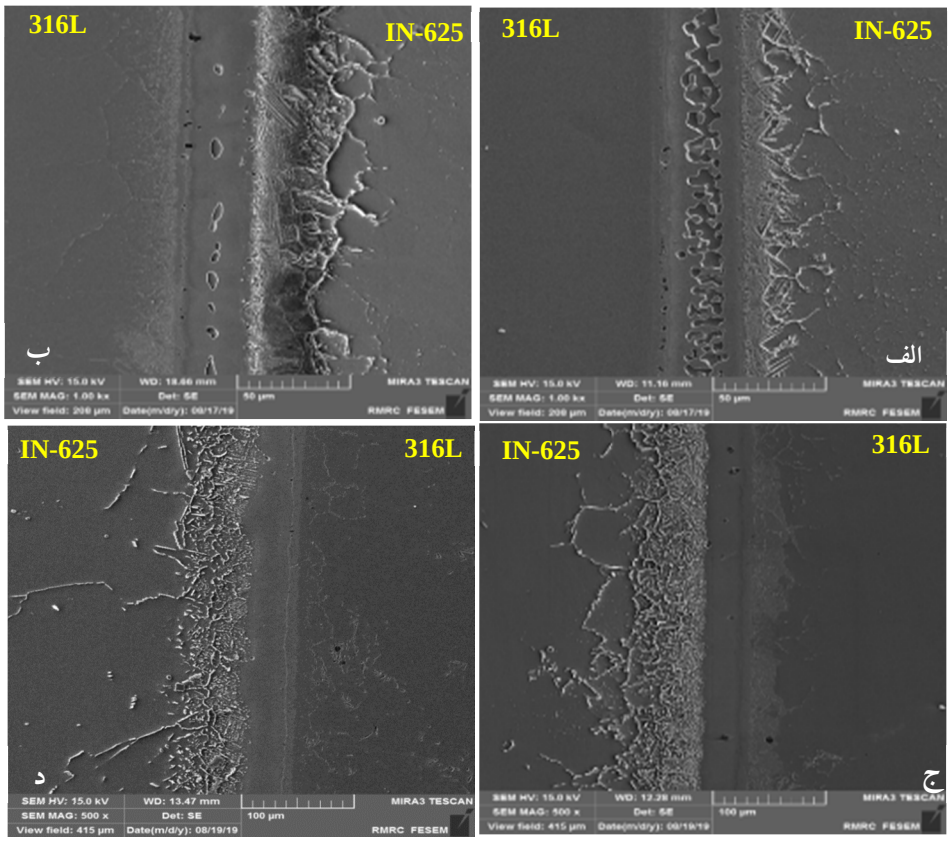
باعث انجماد غیرهمدمای مذاب باقیمانده در موضع مرکزی اتصال بواسطه استحاله یوتکتیکی می‌شود.

تاثیر دما و زمان اتصال‌دهی بر ریزساختار موضع اتصال SS-316L/BNi3/IN-625 در شکل3) نشان داده است. بررسی عنصری و فازی اجزاء موضع اتصال به ترتیب در شکل(4و5) نشان داده شده است.

براساس نتایج حاصل از XRD (شکل5) از ناحیه اتصال در نمونه 1050 ºC/5 min ترکیبات تشکیل شده عمدتا شامل نیکل عنصری می‌باشد که دلیل تشکیل آن‌ها عدم وجود دما و زمان کافی برای همگن‌سازی ترکیب فلزجوش می‌باشد و همچنین در نمونه 1050 ºC/20 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 1150ºC/5 min (شکل4-الف) و نمونه 1050 ºC/20min 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 ºC/20 min به شدت پیک ترکیبات سه‌تایی افزوده شده است (شکل4-ب).

در اتصال غیرهم‌جنس SS-316L/BNi-3/IN625، سرد نمودن نمونه‌ها قبل از تکمیل انجماد همدما موجب انجماد غیرهمدمای مذاب توسط استحاله یوتکتیکی $L \rightarrow \gamma + Ni_2B$ و تشکیل ASZ در خط مرکزی اتصال می‌شود. فرایند انجماد همدما به وسیله نفوذ عناصر MPD کنترل می‌شود و افزایش دما و زمان اتصال‌دهی بر نفوذ این عناصر تاثیرات مثبت دارد. پس از پایان زمان اتصال‌دهی و نفوذ عناصرآلیاژی به ویژه بور و سیلیسیم (عناصرکاهنده‌نقطه ذوب، MPD elements) به فلزات پایه اطراف

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]



شکل3- تاثیر دما و زمان اتصال‌دهی بر ریزساختار موضع اتصال SS-316L/BNi3/IN-625. الف- نمونه اتصال داده شده در 1050 ºC/5 min، ب- نمونه اتصال داده شده در 1050 ºC/20 min، ج- نمونه اتصال داده شده در 1150 ºC/5 min، د- نمونه اتصال داده شده در 1150 ºC/20 min.

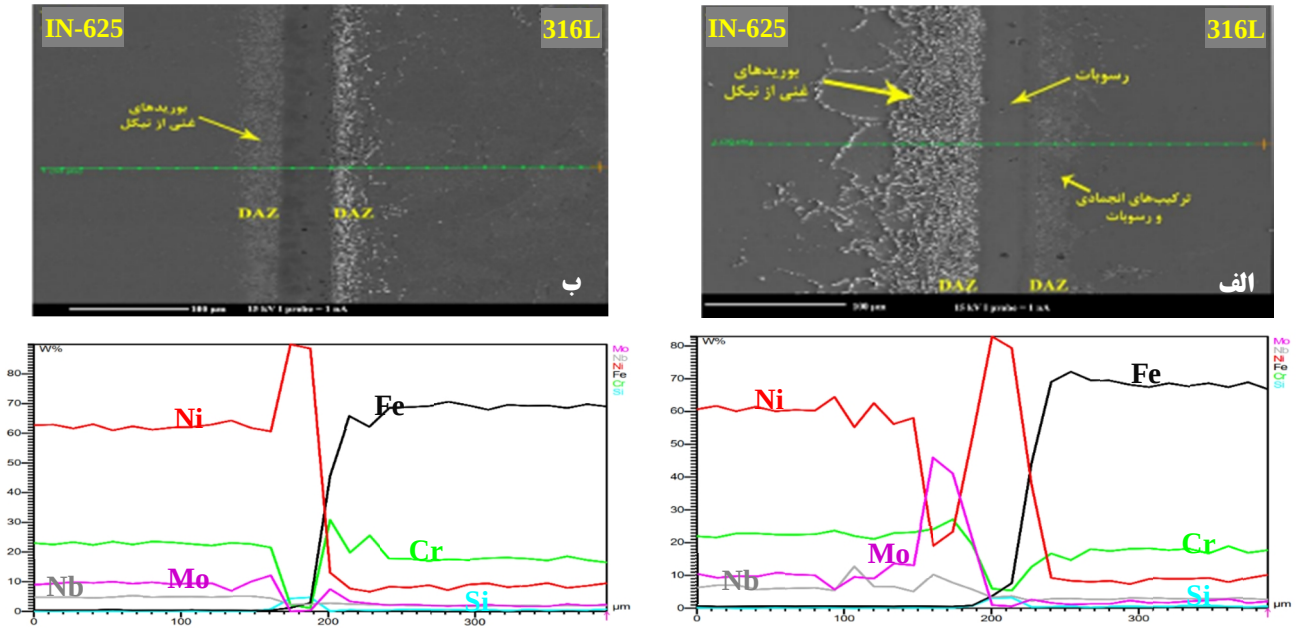
اطراف موضع اتصال، انجماد فازی مذاب به صورت هم‌نشستی (epitaxial) بر فصل مشترک مذاب/جامد (L/S interface) شروع و به سمت خط مرکزی اتصال پیشروی می‌نماید. سرد نمودن نمونه‌ها قبل از تکمیل انجماد همدما موجب پس‌زده شدن عناصرآلیاژی با ضریب توزیع کوچکتر از یک به مذاب باقیمانده در موضع مرکزی اتصال و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و اجزاء یوتکتیکی در مرکز محل‌اتصال می‌شوند (شکل6).

3-2- منطقه متاثر از نفوذ (DAZ)

تشکیل DAZ به دو عامل، نفوذ بور در مجاورت فلزپایه و حضور عناصر فعال برای تشکیل رسوبات بورایدی مانند بوراید کروم و مولیبدن بستگی دارد. پس از تکمیل انجماد همدما عناصر آلیاژی به ویژه عناصر کاهنده نقطه ذوب به فلزات پایه نفوذ کرده و ترکیبات بین فلزی تشکیل می‌دهند. حلالیت کربن با نفوذ بور در زمینه آستنیتی کاهش می‌یابد، بنابراین، تشکیل کربوبورایدهای غنی از آهن و کروم را با نفوذ بور از لایه واسط به فلزات پایه و حضور آهن و کروم، که بورایدهای قوی تشکیل می‌دهند توضیح داد. به دلیل تشکیل رسوبات بورایدی DAZ از عناصر آزاد کروم و مولیبدن تخلیه می‌گردد. با افزایش زمان پیوند در دمای ثابت، عرض ناحیه اتصال تقریبا ثابت است اما DAZ افزایش می‌یابد. با کاهش زمان اتصال‌دهی عناصر آلیاژی لایه واسط زمان کافی جهت نفوذ به فلزپایه فراهم نمی‌گردد.

در نمونه‌ها با افزایش زمان اتصال‌دهی 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 دقیق‌تر و بیشتر DAZ و ناحیه اتصال نمونه‌های 1200 ºC و 1240 ºC مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب این نمونه‌ها به این دلیل بوده‌است که میزان تغییرات DZA را در نمونه‌ای که انجماد همدما تقریبا کامل‌شده و نمونه‌ای که انجماد همدما کامل شده است مورد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]



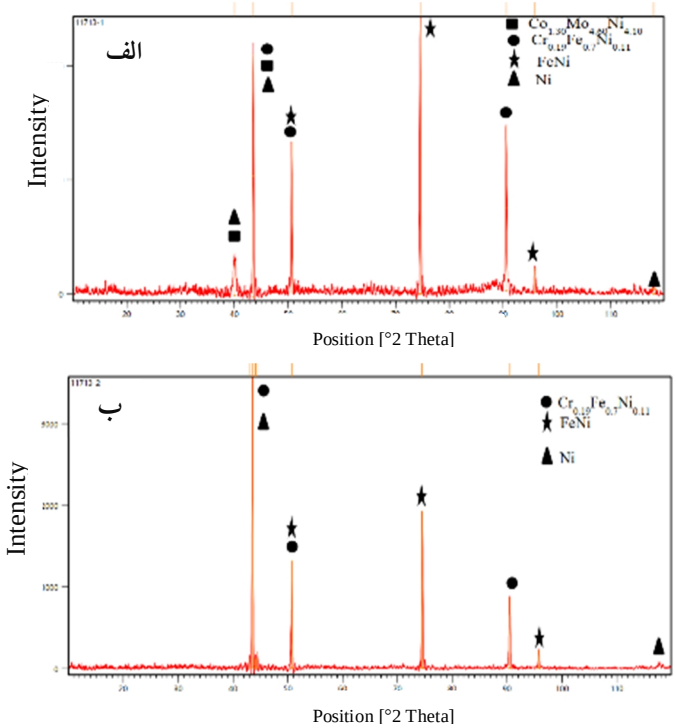
شکل4 – پروفایل توزیع عناصرآلیاژی در امتداد موضع اتصال مجموعه SS-316L/BNi3/IN-625 اتصال داده شده در .شرایط:
الف- 1150 ºC/5 min، ب- 1150 ºC/20 min.

بررسی قرار گیرد. ترکیبات عمده تشکیل شده در DZA پس از انجماد همدما شامل نیکل، کروم، اکسیژن و نیوبیوم 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 ºC با نمونه 1200 ºC در زمان برابر، درصد عناصرآلیاژی افزایش داشته‌است که دلیل این پدیده را می‌توان به کامل شدن پدیده انجماد همدما و افزایش ضریب نفوذ در این دما مربوط دانست. به‌صورتی که فلزجوش و DZA به سمت یکسان شدن ترکیبات و همگن‌شدن کامل پیش رفته‌است (شکل6).

3-3- ارزیابی خواص مکانیکی اتصال

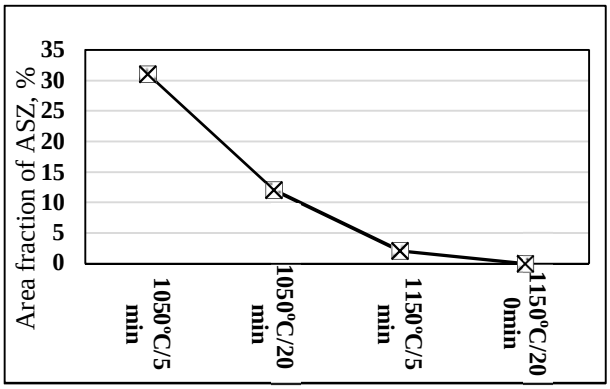
الف- بررسی پروفیل سختی

شماتیکی از مسیر انجام میکروسختی در شکل (7) نشان داده شده‌است. براساس پروفیل سختی بدست آمده افزایش سختی در فلزات پایه به واسطه نفوذعناصر مشاهده می‌گردد. وجود درصد بالای ترکیبات یوتکتیکی بسیار سخت و شکننده در مرکز اتصال نمونه‌های 1050 ºC، 5-20 min دلیلی بر افزایش چشمگیر مقادیر سختی می‌باشد. درنمونه‌های 1150 ºC، 5-20min با پیشروی به سمت کامل‌شدن انجماد همدما و کاهش درصد ترکیبات یوتکتیکی در مرکز اتصال از مقادیر سختی اندازه‌گیری شده کاسته شده‌است (شکل9).

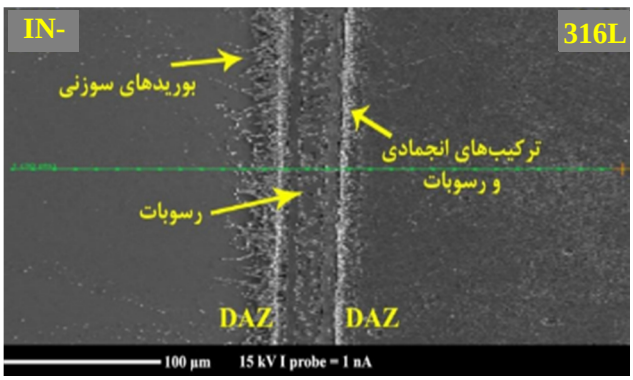


شکل5- بررسی XRD موضع اتصال. الف- قبل از تکمیل انجماد همدما (1050 ºC/5 min)، ب- بعد از تکمیل انجماد همدما (1050 ºC/20 min).

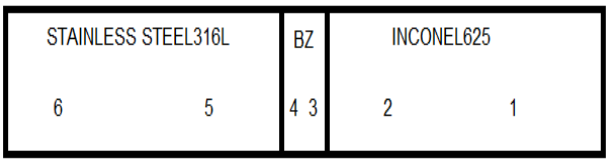
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]



شکل6- تاثیر شرایط پیونددهی بر کسر حجمی ترکیبات یوتکتیکی تشکیل شده در خط مرکزی اتصال.



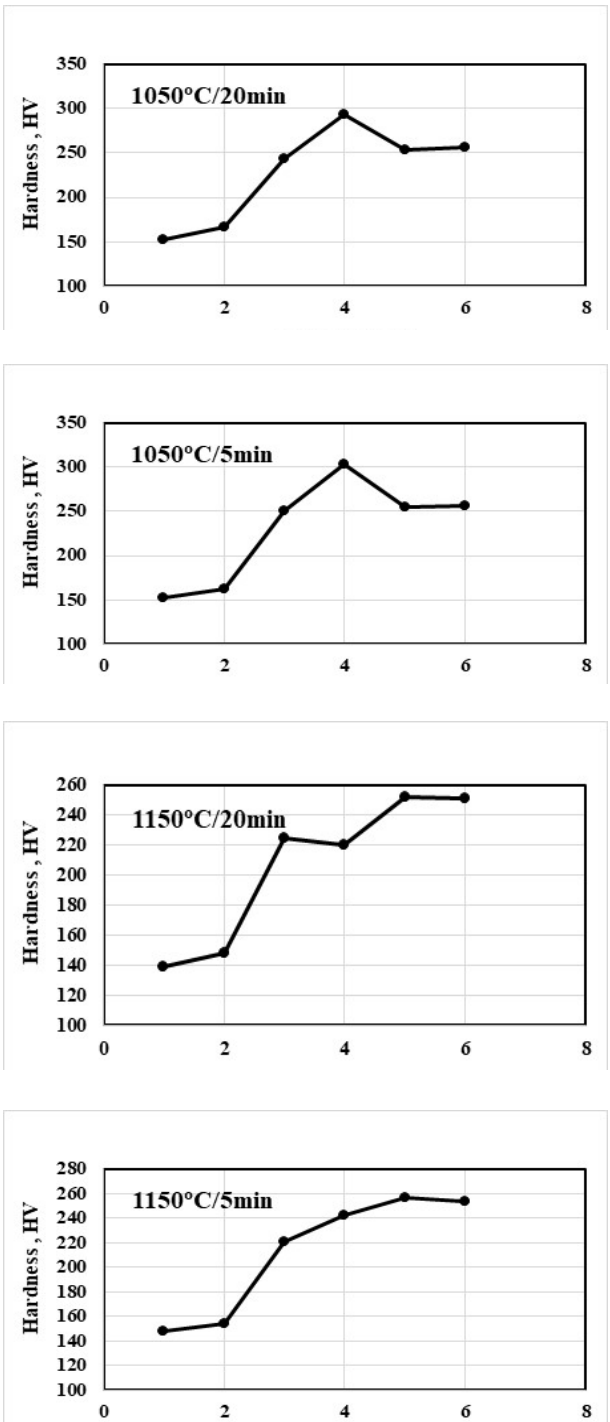
شکل 7 – تصویرمیکروسکوپ الکترونی از ترکیبات ناحیه DAZ



شکل8- شماتیکی از نقاط میکروسختی سنجی.

ب- بررسی استحکام برشی

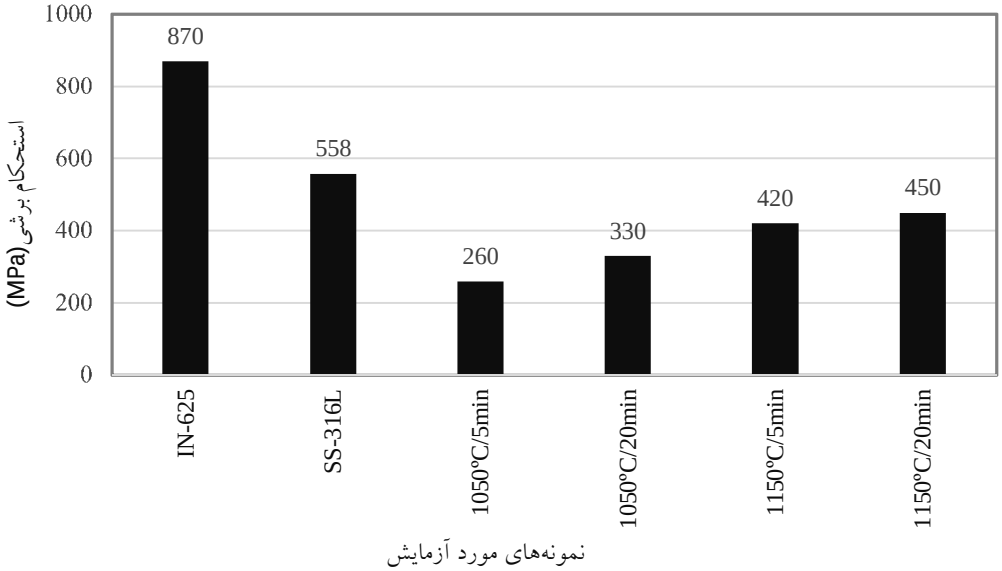
شکل (10) نتایج استحکام برشی نمونه‌های 1050°C و1150°C در زمان‌های 5-20min را نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود با افزایش مدت زمان پیونددهی از 5min به 20min در نمونه‌های اتصال داده شده در دمای 1050°C، استحکام برشی از 260MPa به 330MPa افزایش می‌یابد که این افزایش استحکام برشی در نمونه اتصال‌داده شده در دمای 1150°C با افزایش مدت زمان پیونددهی از 5min به 20min از 420MPa به 450MPa می‌باشد. با توجه به بررسی‌های ریزساختاری افزایش استحکام برشی با افزایش مدت زمان پیونددهی را می‌توان به فراهم شدن امکان نفوذ درهم بین لایه مذاب و فلزجامد اطراف و در نتیجه پیشرفت انجماد همدما و کاهش محسوس مقدار ترکیبات یوتکتیکی تشکیل شده در موضع مرکزی اتصال نسبت داد.



شکل9- تاثیر شرایط اتصال‌دهی بر پروفیل سختی موضع اتصال.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]



شکل10- تاثیر شرایط اتصال‌دهی بر استحکام برشی نمونه‌های اتصال داده شده.

۴- نتیجه‌گیری

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 غیرهمدما درموضع مرکزی اتصال استحکام برشی نمونه‌های اتصال داده شده به شدت کاهش می‌یابد.

در این پژوهش اتصال غیرهم‌جنس سوپرآلیاژ Inconel625 (IN-625) به آلیاژ AISI316L (316L) توسط فرایند اتصال‌دهی 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 مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش معرفی نمود:

- اتصال‌دهی IN-625 به 316L توسط فرایند TLP امکان‌پذیر می‌باشد و اتصال حاصله عاری از عیوب متداول همراه با فرایندهای جوشکاری قوسی می‌باشد.

- سرد نمودن نمونه‌ها تا قبل از تکمیل انجماد همدما 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 و کاهش استحکام برشی نمونه‌های اتصال‌دهی شده می‌شود.

- افزایش دمای اتصال‌دهی از 1050°C به 1150°C موجب افزایش ضریب نفوذ عناصر و کامل شدن انجماد همدما بعد از 20min اتصال‌دهی شده که موجب افزایش استحکام برشی نمونه اتصال‌دهی شده (از 330MPa به 450MPa) می‌شود.

- براساس مطالعات ریزساختاری، ریزسختی موضع اتصال و استحکام برشی نمونه‌های اتصال‌دهی شده، شرایط اتصال‌دهی بهینه اتصال غیرهم‌جنس 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]

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 زنگ نزن، 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 زنگ نزن آستنیتی 321 AISI 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 زنگ نزن 316، مجله علمی – پژوهشی علوم و فناوری جوشکاری ایران، دوره 2، شماره1، جلد 2، صفحات 21- 31، 1395.

14- Cao, J., et al., Effects of post-weld heat treatment on 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- بینش، ب.، میرزایی، س.، تقی اهری، ا.، تأثیر دمای اتصال بر ریزساختار و رفتار خوردگی الکتروشیمیایی اتصال TLP فولاد زنگ‌نزن آستنیتی304L، 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 زنگ‌نزن دوفازی UNSS32750 به فولاد آستنیتی AISI 304، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، جلد 3، صفحات 8-1، 1396.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.12.0]