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

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

Volume 10, Number 1, 2024

The effect of diffusion welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of dissimilar joint between AISI 418 stainless steel and Inconel 738 superalloy using nickel interlayer

A.Khorram*, H. Habibi, A. Yazdipour
Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran.

Received 18 March 2024 ; Accepted 4 May 2024

Abstract

This study aimed to investigate the effect of diffusion welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of the dissimilar joint between AISI 418 stainless steel and Inconel 738 superalloy using Ni interlayer with a thickness of 50 µm. The experiments were performed in a vacuum furnace at three temperatures of 1000, 1050 and 1150 °C for 45, 60, 75 and 90 min under the pressure of 5 MPa.The results show that voids and non-bonded areas are seen in the samples that were bonded at a lower temperature (1000 °C). By increasing the joining temperature from 1000 °C to 1050 °C, all micro discontinuities have disappeared, which shows that the microplastic deformation of roughness has improved. Then, by increasing the temperature to 1150 °C,non-bonded areas are observed in the joint due to the reduction of pressure on the contact surfaces. When pure nickel is used as an interlayer, intermetallic compounds of γ' [Ni_3(Al, Ti)] are formed in the γ matrix phase on the side of Inconel 738 superalloy while compounds of FeNi3 and γ (γFe, Ni) are formed on the side of AISI 418 stainless steel. According to the results of line scan analysis, the slope and penetration of elements in Inconel 738 superalloy is lower than AISI 418 stainless steel , which indicates less penetration in Inconel 738 superalloy. In the sample welded at the temperature of 1050 °C and the time of 90 Min, the penetration value of the nickel interlayer in AISI 418 stainless steel and Inconel 738 superalloy was 40 µm and 35 µm, respectively. By comparing the maximum hardness, it can be concluded that the joint at the temperature of 1050 °C and the time of 90 Min has a lower maximum hardness than other samples. Therefore, it has better joint characteristics than other samples in terms of intermetallic compounds. The highest value of shear strength was obtained at the temperature of 1050 °C and the time of 90 Min, which is equal to 270 MPa.

Keywords:Diffusion Welding; AISI 418 stainless steel ; Inconel 738 alloy; Microstructure; Shear strength.

*Corresponding Author: A.Khorram, a_khorram@mut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403

تاثیر پارامترهای اتصال نفوذی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی 418 به سوپرآلیاژ اینکونل 738 با استفاده از لایه واسط نیکل

علی خرّم*، حسن حبیبی، علیرضا یزدی‌پور

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران

دریافت مقاله: 1402/12/28 ؛ پذیرش مقاله: 1403/02/15

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر پارامترهای اتصال نفوذی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد مارتنزیتی 418 به سوپرآلیاژ اینکونل 738 با استفاده از لایه واسط نیکل خالص با ضخامت 50 میکرومتر می‌باشد. آزمایش‌ها در کوره خلاء در سه دمای 1000،1050 و 1150 درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان 45 ، 60 ، 75 و 90 دقیقه و تحت فشار 5 مگاپاسکال انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که حفره‌ها و نواحی بدون پیوند در نمونه‌هایی‌که در دمای پایین‌تر (1000 درجه سانتی‌گراد) به هم متصل شده‌اند دیده می‌شوند. با افزایش دمای اتصال از 1000 درجه سانتی‌گراد به 1050 درجه سانتی‌گراد، تمام ناپیوستگی‌های میکرو از بین رفته‌اند که نشان می‌دهد تغییر شکل میکروپلاستیک زبری‌ها بهبود یافته است. سپس با افزایش دما به 1150 درجه سانتی‌گراد، نواحی بدون پیوند در اتصال مشاهده می‌شوند که به علت کاهش فشار اعمالی از سوی فیکسچر بر روی سطوح در تماس به علت افزایش دما می‌باشد. هنگام استفاده از نیکل خالص به‌عنوان لایه واسط، در سمت سوپرآلیاژ اینکونل 738 ترکیباتی بین فلزی γ' [Ni_3Al, Ti] در فاز زمینه γ تشکیل می‌شوند در حالی‌که در سمت فولاد مارتنزیتی418 ترکیبات مخلوط فازی $FeNi_3$ و γ(γFe,Ni) تشکیل می‌شوند. با توجه به نتایج آنالیز اسکن خطی، شیب و نفوذ عناصر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 کمتر از فولاد مارتنزیتی 418 می‌باشد که نشان دهنده نفوذ کمتر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 است. در نمونه جوشکاری شده در دمای1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه، میزان نفوذ لایه نیکل در فولاد مارتنزیتی 418 برابر 40 میکرومتر و در سوپرآلیاژ اینکونل 738 برابر 35 میکرومتر می‌باشد. با مقایسه بیشینه سختی می‌توان نتیجه گرفت اتصال در شرایط دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه از بیشینه سختی کمتری نسبت به دیگر نمونه‌ها برخوردار است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ ترکیبات بین‌فلزی از شرایط بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است. بیشترین مقدار استحکام برشی در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه به میزان 270 مگاپاسکال بدست آمد.

کلمات کلیدی: جوشکاری نفوذی، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 418، سوپرآلیاژ اینکونل 738، ریز ساختار، استحکام برشی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: علی خرّم، a_khorram@mut.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری غیرهمجنس سوپرآلیاژهای پایه نیکل به فولادهای مارتنزیتی دشواری‌های خاصی دارد و این موضوع به دلیل تفاوت‌های این دو آلیاژ درترکیب شیمیایی، ضریب انبساط حرارتی و نقطه ذوب و به طور کلی خواص فیزیکی و متالوژیکی آن‌ها می‌باشد ولی صرفه اقتصادی ناشی از اتصال این دو آلیاژ موجب استقبال از جوشکاری آن‌ها شده است[1]. اتصال نفوذی یک روش اتصال مناسب برای کاربردهای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

هوافضا، الکترونیکی و هسته‌ای می‌باشد که در آن به دست آوردن یک پیوند متالورژیکی سالم و خواص مکانیکی مناسب در ناحیه اتصال حائز اهمیت می‌باشد[1]. اتصال نفوذی یک فرایند جوشکاری حالت جامد می‌باشد که در آن سطوح تماس تحت فشار در دماهای بالا (بین 0/7 تا 0/9 دمای ذوب مواد) با حداقل تغییر شکل ماکروسکوپی به هم متصل شوند. این فرایند جوشکاری دارای مزایایی‌نسبت‌به روش‌های جوشکاری معمولی می‌باشد از آن‌جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- تنش‌های پسماند در روش اتصال نفوذی بسیار کمتر از روش‌های دیگر جوشکاری است.

- می‌توان با استفاده از روش جوشکاری نفوذی، از تشکیل ترک، اعوجاج و جدایش که معمولا در روش‌های جوشکاری ذوبی ایجاد می‌شود اجتناب نمود [2].

نگمیا و همکاران [3] تاثیر پارامترهای فرایند نفوذی اتصال فلزات غیرهمجنس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 410 و سوپرآلیاژ پایه نیکل 718 را بررسی کردند. تعداد 15 اتصال در دمای 920 تا 1000 درجه سانتی‌گراد و فشار 10 تا 18 مگاپاسکال و زمان نگهداری 30 تا 90 دقیقه تولید شدند. نتایج نشان می‌دهد که دمای اتصال به طور قابل توجهی بر کیفیت اتصال تأثیر می‌گذارد. فشار اتصال 16 مگاپاسکال برای به دست آوردن یک اتصال پربار کافی بود. استفاده از فشارهای اتصال بالاتر منجر به اعوجاج بیش از حد اتصال می‌شود.

پایدار و همکاران [4] لحیم کاری نفوذی Inconel 617 و فولاد زنگ‌نزن AISI 321 را با لایه واسط AMS 4772 با ضخامت 50 میکرومتر در دمای لحیم کاری ثابت 750 درجه سانتی‌گراد تحت زمان نگهداری متغیر (30 و 60 دقیقه) مورد مطالعه قرار داد. آن‌ها دریافتند که مدت زمان لحیم کاری طولانی در تشکیل محلول جامد γ (Ni) در سمت IN617 و غنی سازی Ni و Fe در سمت AISI 321 کمک می‌کند. حداکثر مقادیر سختی HV 125 وHV 134 در درزهای ذوب شده اتصال در زمان نگهداری به ترتیب از 30 به 60 دقیقه به دست آمد. پایدار و همکاران [5] اتصال غیرهمجنسInconel 738 و فولاد زنگ نزن AISI 321 را با استفاده مخلوط پودر 54Ag40Cu-5.0Zn-1.0Ni به روش لحیم‌کاری نفوذی تحت زمان نگهداری60دقیقه و دمای ثابت900 درجه سانتی‌گراد و فشار نگهداری متغیر1و 2 مگاپاسکال مورد بررسی قرار دادند.

نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که به دلیل خاصیت موینگی بالای نقره، هیچ ناپیوستگی آشکاری درمناطق‌ذوب‌شده نمونه‌ها IN738/54Ag-40Cu-5.0Zn1.0Ni/AISI 321 مشاهده نشد. افزایش فشار اتصال سبب افزایش استحکام برشی می‌شود. افزایش فشار باعث بهبود نفوذ بین اتمی شده و تشکیل یک منطقه تحت تأثیر نفوذ یکنواخت‌تر و گسترده‌تر را در دو طرف IN738 و AISI 321 تسهیل می‌کند.

قادری و همکاران [6] تاثیر فشار، دما و همگن‌سازی پس از پیوند را بر رفتار انحلال و خواص مکانیکی پیوند فاز مایع گذار بین IN718 و AISI304 با استفاده از لایه واسط BNi-2 را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که اتصال بدست آمده در نمونه تحت فشار 5 مگاپاسکال به وضوح گسترده‌تر از نمونه 1 مگاپاسکال است. فصل مشترک / مواد پایه در نمونه تحت فشار 1 مگاپاسکال نسبتاً مستقیم است، در حالی‌که این فصل مشترک در نمونه تحت فشار 5 مگاپاسکال موجدار و ناهموار است که می‌تواند مربوط به نفوذ و انحلال بالاتر عناصر در نمونه 5 مگاپاسکال باشد. نتایج آزمون استحکام برشی حاکی از آن است که اتصالات 5 دقیقه‌ای/ 1 مگاپاسکال و 5 مگاپاسکال، به‌ترتیب دارای تنش‌شکست 331 مگاپاسکال و 420 مگاپاسکال می‌باشند. این اختلاف آشکار ناشی از انحلال و شرایط نفوذ بهتر و میزان کمتر رسوبات در منطقه اتصال در نمونه دوم می‌باشد.

امامی و همکاران [7] از لایه میانی آمورف MBF-20 برای اتصال نفوذی سوپرآلیاژ IN 718 و فولادزنگ‌نزن AISI 316L استفاده کردند و تاثیر ضخامت لایه (150-50 میکرومتر) را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات مطالعه کردند. بررسی‌های ریزساختاری نشان‌داد که فازهای یوتکتیک شامل محلول جامد Cr_2B_3، CrB، Ni_3B، γ و Ni_6Si_2B در خط مرکزی مشترک نمونه با انجماد همدما ناقص در طول نگه‌داری در دمای اتصال تشکیل شدند. حداکثر استحکام برشی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

440 مگاپاسکال برای نمونه با انجماد کامل همدما به‌دست‌آمد. شمعانیان و همکاران [8] مکانیزم تشکیل ترکیبات بین فلزی را در طول اتصال غیرهمجنس IN 718/ BNi-2/ AISI 316L توسط فرایند فاز مایع گذرا بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیبات بین فلزی غنی از بور و سیلیسیم هستند. این عناصر، پس از نفوذ با نیکل و نیوبیوم ترکیب شدند و منجر به تشکیل بوراید نیکل و بوراید نیوبیوم شدند. پورانوری و همکاران [9] تأثیر چرخه‌های عملیات حرارتی استاندارد را بر روی اتصالات فرایند فاز مایع گذرا Inconel 718 با استفاده از ماده پرکننده Ni-7Cr-4.5Si-3.2B-3Fe بررسی کردند. آن‌ها دریافتند استحکام مکانیکی اتصالات به میزان زیادی توسط عملیات حرارتی پس از اتصال بدون کاهش شدید استحکام فلزپایه بهبود یافت. این عمدتا به کاهش کسر بورایدهای نوع Ni_3B در طول عملیات حرارتی پس از اتصال و افزایش تشکیل فازهای تقویتی نوع γ' و γ'' در طول پیرسازی نسبت داده شد. اتصالات همگن بدون یوتکتیک و بدون بوراید پس از اتصال در دمای 1050 درجه‌سانتی‌گراد به مدت 1 ساعت و سپس عملیات‌حرارتی‌در دمای 1150درجه‌سانتی‌گراد به مدت12ساعت به دست آمد. ثابت قدم و همکاران [10] اتصال‌دهی صفحات فولاد زنگ نزن410 به صفحات مسی را از طریق فرایند اتصال نفوذی با استفاده از یک لایه میانی از جنس نیکل در محدوده دمایی 800 تا 950 درجه سانتی‌گراد بررسی نمودند. اتصال از طریق فشار دادن نمونه‌ها تحت نیروی فشاری 12 مگاپاسکال و خلا 4 تا 10 تور به مدت 60 دقیقه انجام شد. نتایج، تشکیل نواحی نفوذ مجزا هم در فصل مشترک Cu / Ni و هم در فصل مشترک Ni/SS را در طول فرایند اتصال نفوذی نشان داد.

ضخامت لایه واکنش در هر دو سطح مشترک با زیاد شدن دما افزایش یافت. حفره‌های کرکندال در هر دو فصل مشترک به دلیل ضرایب نفوذ ذاتی مختلف دو ماده تشکیل شد.

مشکل متالورژیکی اصلی در اتصال سوپرآلیاژ پایه نیکل 738 به فولاد مارتنزیتی 418 تشکیل ترکیبات ترد بین‌فلزی شامل Fe_2Ti، $FeNi_3$، $NiTi_2$، Cr_2Ti و $NbNi_3$ می‌باشد. این ترکیبات بین‌فلزی بسیار ترد در قطعات جوشکاری شده با روش‌های ذوبی، خود به خود منجر به ترک می‌شوند. می‌توان برای حل مشکلات به وجود آمده، با استفاده از لایه‌های میانی از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی پیوسته که موجب شکست ترد می‌شوند ممانعت نموده و استحکام اتصال را افزایش داد [12و11]. لایشنسکی [13] به دنبال یافتن معیارهایی برای انتخاب جنس لایه میانی در اتصال نفوذی بودند. در بیشتر موارد، لایه‌های میانی از فلزات انعطاف‌پذیر طلا، نقره، مس، نیکل، آلومینیوم و غیره به شکل فویل، سیم، پودر، فیلم‌هایی که بر روی سطوح چسبنده به‌وسیله آبکاری الکتریکی یا به شکل میعانات خلاء رسوب می‌کنند ساخته می‌شدند. آن‌ها دریافتند که پوشش‌های پالادیوم، کروم، کبالت، آهن و نقره با ایجاد تنش‌های کششی داخلی که منجر به ترک خوردگی، برش، پوسته شدن، افزایش استحکام خستگی فلز و شکستگی اجزا می‌شود، همراه است و پوشش‌های روی، کادمیوم، سرب و قلع باعث ایجاد تنش‌های فشاری می‌شود که ممکن است منجر به کمانش و جدا شدن شود. گودا و همکارانش [14] به موضوع اتصال نفوذی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 در دمای پایین (محدوده دمایی 623 تا773 درجه کلوین) با استفاده از لایه‌های میانی از جنس نیکل، مس و نقره پرداختند. عدم وجود مواد بین فلزی شکننده در سطوح‌مشترک و استحکام پیوند رضایت‌بخش (130±10 مگاپاسکال) از نتایج این تحقیق بود.

یکی از کاربردهای ویژه اتصال فولاد 418 به اینکونل 738 در موتورهای توربینی برای اتصال قطعات دوار می‌باشد. به دلیل وجود مشکلات فراوان در جوشکاری سوپرآلیاژهای اینکونل و فولادهای مارتنزیتی، فرایندهای جوشکاری حالت جامد برای این دو آلیاژ بیشتر مورد استقبال قرار گرفته‌اند. از این بین، فرایند اتصال نفوذی می‌تواند برای اتصال دائم فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 418 و اینکونل 738 مورد استفاده قرار گیرد که یکی از دلایل آن داشتن کنترل کامل بر میزان پیشروی واکنش می‌باشد، که می‌تواند با استفاده دقیق از دما و زمان صورت گیرد. در این مقاله، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 418 به سوپرآلیاژ اینکونل 738 با استفاده از روش اتصال نفوذی و لایه واسط نیکل خالص به یکدیگر متصل شدند. هدف از این پژوهش،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

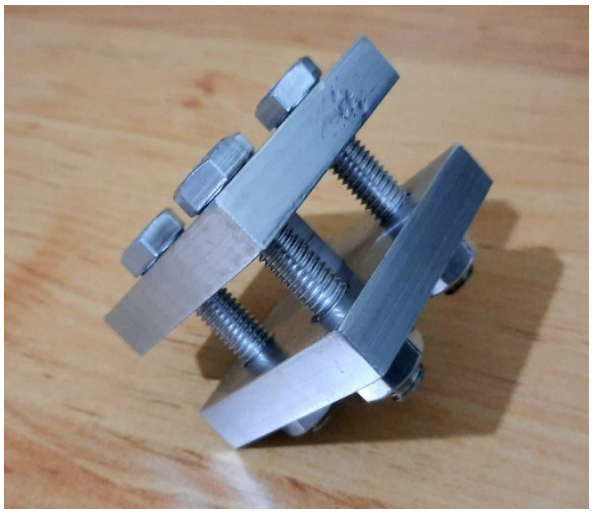
بررسی تاثیر تغییرات دما و زمان بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال می‌باشد. برای این منظور آزمایش‌ها در دماهای1000،1050 و 1150 درجه سانتی‌گراد و زمان‌های 45، 60، 75و 90 دقیقه انجام شد. روش‌های میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، سختی سنجی و آزمون برش جهت ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

2- انجام آزمایش

در این‌تحقیق یک میلگرد آلیاژ اینکونل 738 به قطر200 میلی‌متر و یک میلگرد فولاد مارتنزیتی 418 به قطر 150 میلی‌متر تهیه شد. 18 نمونه به قطر 15 میلی‌متر و طول 30 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات از هر یک از مواد اولیه بریده شد. از روش کوانتومتری برای تعیین ترکیب شیمیایی مواد اولیه استفاده شد. در جداول 1و2 ترکیب شیمیایی این آلیاژها ارائه شده است. از نیکل خالص به شکل فویل با ضخامت 50 میکرومتر به‌عنوان لایه واسط استفاده‌شد.

بعد از انجام برشکاری و آماده‌سازی نمونه‌های اولیه، فیلم‌های اکسیدی موجود بر روی سطوحی از نمونه‌ها که در معرض اتصال قرار می‌گیرند با استفاده از سمباده 400 حذف شدند. سپس سطوح نمونه‌ها با سمباده‌های 80 تا 2400 به صورت مکانیکی پولیش شدند. از پودر Al_2O_3 و خمیر الماس برای پرداختکاری استفاده شد. بعد از عملیات سمباده‌زنی و پرداختکاری سطوح اتصال، نمونه‌ها در داخل استون به مدت زمان 15 دقیقه تحت عملیات شستشو قرار گرفتند تا از حذف تمام آلودگی‌های سطحی اطمینان حاصل شود.

پس از انجام عملیات آماده سازی، نمونه‌ها داخل یک فیکسچر (سیستم اعمال نیرو) قرار داده شدند تا سطوح تماس کاملا بر روی یکدیگر قرار گیرند و ثابت شوند. در شکل(1) طرح سیستم اعمال نیرو توسط پیچ و مهره نمایش داده شده است که شامل صفحات نگه دارنده، پیچ‌ها، ابزار انتقال نیرو و قطعات نمونه می‌باشد. به منظور اعمال فشار یکسان در سطوح نمونه‌ها و اعمال نیروی بیشتر از سیستمی شامل چهار پیچ استفاده شد. پیچ‌های ابزار توسط گشتاور سنج سفت شدند تا بتوان میزان گشتاور اعمالی توسط پیچ‌ها را کنترل نمود تا به میزان برابر اعمال شود. جنس فلز مورد استفاده برای ساخت این فیکسچر، فولاد نسوز 1/4841 انتخاب شد. به منظور ثابت نگهداشتن نمونه‌ها، در مرکز هر صفحه پله ای به عمق سه میلی‌متر ایجاد شد



شکل1- طرح سیستم اعمال نیرو در فرایند اتصال نفوذی.

کل مجموعه داخل کوره مافلی با حداکثر دمای 1200 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. اتصال نفوذی در سه دمای 1000،1050 و 1150 درجه سانتی‌گراد و زمان‌های 45،60، 75 و 90 دقیقه با فشار 5 مگا پاسکال و با استفاده از لایه واسط نیکل خالص با ضخامت 50 میکرومتر انجام پذیرفت (جدول3). هوای داخل کوره توسط پمپ‌های روتاری و نفوذی تخلیه گردید تا به فشار 10^{-5} میلی بار برسد. سپس با شیب دمایی 20 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه دما افزایش یافت تا به دمای مورد نظر برسد. بعد از انجام فرایند اتصال، نمونه‌ها در کوره خنک شدند. در شکل(2) نمونه‌های جوشکاری شده بعد از وایرکات نشان داده شده است. بعد از انجام اتصال به منظور بررسی ریزساختار و فازهای تشکیل شده، نمونه‌ها توسط وایرکات بصورت قائم مقطع زده شدند و تحت عملیات سمباده‌زنی تا 2500 قرار گرفتند.

به دلیل متفاوت بودن فلزات پایه، برای اچ کردن اتصال از دوماده متفاوت استفاده شد و هر یک از فلزات پایه بصورت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

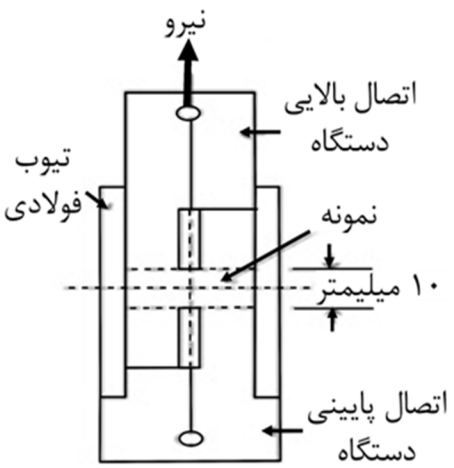
جداگانه اچ شدند. به همین منظور برای اچ اینکونل 738 از محلول ماربل($4gCu_2SO_4$+20ml HCl+20ml H_2O) به مدت زمان 30 ثانیه و نیز برای اچ فولاد از محلول 3 ml HCl+1 ml HNO_3 به مدت زمان 100 ثانیه استفاده شد. برای بررسی ریزساختار و آنالیز فازها و مناطق مختلف سطوح اتصال از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (مدلTescan Mira3) مجهز شده به دستگاه سنجش شدت انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد.

شکل 2- تصویر نمونه‌های جوشکاری شده بعد از وایرکات.

سختی فصل مشترک اتصال توسط دستگاه میکروسختی سنجی مدل Easy way برمبنای ویکرز مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله طبق استاندارد ASTM E384-05 فرورونده‌ای از جنس الماس با بار اعمالی 0/025 کیلوگرم و زمان 25 الی 30 ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. استحکام برشی نمونه‌های متصل شده در دمای اتاق طبق استاندارد ASTM D2295-96 ارزیابی شدند. برای این منظور هریک از نمونه‌های تست برش بصورت استوانه‌هایی به قطر 8 میلی‌متر و ارتفاع 10 میلی‌متر تهیه شدند [15]. نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط نیکل در نگهدارنده نشان داده شده در شکل(3) قرار داده شدند و به فک‌های دستگاه تست کشش بسته شدند تا نیروی قائم و کششی توسط فک بصورت برشی و موازی با فصل مشترک به نمونه‌ها اعمال شود.

3- بحث و نتایج

رژیم دمایی در فرایند اتصال نفوذی هم در خود آلیاژها و هم نفوذ متقابل در منطقه اتصال موثر می‌باشد. وجود فازهای تقویت کننده در سوپرآلیاژ اینکونل 738، دمای گرمایش را به دلیل تغییرات ساختاری غیرقابل برگشت احتمالی محدود می‌کند. سوپرآلیاژ اینکونل 738 نسبت به گرمای بیش از حد حساس‌تر است بنابراین گرمایش بالاتر از دمای 1200 درجه سانتی‌گراد منجر به تغییرات ساختاری غیرقابل برگشت می‌شود. این امر منجر به کاهش قابل توجه استحکام و مقاومت حرارتی این ماده می‌گردد. وجود تعداد زیادی از عناصر آلیاژی در سوپرآلیاژ 738 مانع از وقوع فرایند نفوذ و همچنین آزاد شدن تنش‌های داخلی می‌شود. برای تحریک نفوذ متقابل آلیاژهای جوشکاری شده توصیه می‌شود تا دمای کمتر از950 درجه سانتی‌گراد گرم نشود. لازم به ذکر است که کاهش دمای جوشکاری زیر 1000 درجه سانتی‌گراد منجر به افت شدید استحکام اتصال می‌شود. بنابراین تغییرات دمای جوشکاری را از 1000 تا 1200 درجه سانتی‌گراد باید نظر گرفت تا امکان گرم شدن بیش از حد آلیاژ به طور کامل از بین رود [16]. لایه‌های واسط به طور کلی باید ناهمگنی شیمیایی و ناپایداری ترمودینامیکی را در ناحیه اتصال کاهش دهند و این لایه باید به طور هدفمند برای جلوگیری یا کاهش شدید اثر تغییر شکل حرارتی بر روی مواد و ترکیبات استفاده شوند. افزایش سختی، تردی موضعی و تشکیل فازهای مخرب در فصل مشترک اتصال دلالت بر ایجاد ترکیبات بین‌فلزی نامطلوب در نواحی بین دو آلیاژ دارد. یکی از بهترین پیشنهادها برای جلوگیری از تشکیل این ترکیبات بین‌فلزی ترد، استفاده از لایه‌های واسط نیکل خالص می‌باشد [16].



شکل 3- شماتیکی از نگهدارنده آزمون استحکام برشی استفاده شده [15].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

جدول 1-آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه آلیاژ اینکونل 738 برحسب درصد وزنی.

Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Fe	Co	Ti	Al	Nb
<۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۱۶/۲۰	۱/۹۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۸/۷۸	۳/۶۴	۳/۳۰	۰/۸۴
W	V	C	P	S	Sn	Ta	Zr	Ni	
۲/۴۰	<۰/۰۰۵	۰/۰۹	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۱/۵۰	۰/۰۰۲	پایه	

جدول 2-آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه فولاد مارتنزیتی 418 برحسب درصد وزنی.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
۰/۲۰	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۱۴/۴۰	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۳
Cu	Nb	Ti	V	W	Zr	Sn	Fe		
۰/۱۷	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۸	۲/۹۶	<۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	پایه		

جدول3- جدول انجام آزمایش‌ها.

کد نمونه	دما (°c)	زمان (Min)	کد نمونه	دما (°c)	زمان (Min)
S1	۱۰۰۰	۶۰	S6	۱۰۵۰	۹۰
S2	۱۰۰۰	۷۵	S7	۱۱۵۰	۴۵
S3	۱۰۰۰	۹۰	S8	۱۱۵۰	۶۰
S4	۱۰۵۰	۶۰	S9	۱۱۵۰	۷۵
S5	۱۰۵۰	۷۵			

3-1-تاثیر تغییرات زمان بر ریزساختار اتصال در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد

نمونه S1 در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد به مدت 60 دقیقه و نمونه S2 به مدت 75 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. با توجه به این که دما و زمان کافی برای اتصال جوشکاری وجود ندارد اتصال به طور کامل برقرار نشده است. نمونهS3 در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد به مدت 90 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ نوری درز اتصال نمونه S3، در شکل(4) نشان داده شده است. منطقه تیره سوپرآلیاژ اینکونل 738 و منطقه روشن مربوط به فولاد مارتنزیتی 418 می‌باشد. در این نمونه با توجه به این که زمان بیشتری برای اتصال نسبت به نمونه‌های S1 و S2 وجود دارد قطعات به یکدیگر جوش شده‌اند اما میزان دما برای اتصال سالم و بدون عیب کافی نبوده است و نفوذ و اتصال به خوبی برقرار نشده است و درز اتصال قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این که تعداد تخلخل‌ها در نمونه‌هایی که در دما و زمان‌های پایین‌تر به هم متصل شده‌اند زیاد می‌باشد بنابراین باید دما و زمان اتصال افزایش یابد تا چگالی منافذ کاهشی شوند. از این رو نمونه‌های بعدی دارای دمای بالاتری نسبت به نمونه S3 می‌باشند. با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از نمونه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که حفره‌ها و نواحی بدون پیوند در نمونه‌هایی که در دمای پایین‌تر (1000 درجه سانتی‌گراد) به هم متصل شده‌اند دیده می‌شوند. در دماهای پایین، تغییر شکل میکروپلاستیک سطوحی‌که باید به یکدیگر متصل شوند، توسط رفتار مقاومت غیرعادی سوپرآلیاژ اینکونل 738 (به دلیل وجود کسر حجمی بالا از فاز γ') محدود شد. بنابراین، به دلیل تماس ناکافی بین سطوح ناهموار، حفره‌ها در سطح مشترک اتصال مشاهده می‌شوند [16].

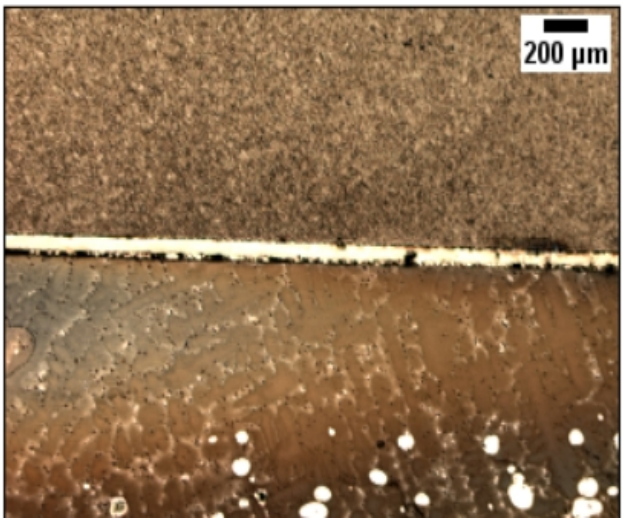
3-2- اثیر تغییرات زمان بر ریزساختار اتصال در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد

نمونه S4 در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 60 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. با توجه به این که دما و زمان کافی برای اتصال جوشکاری وجود ندارد اتصال به طور

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

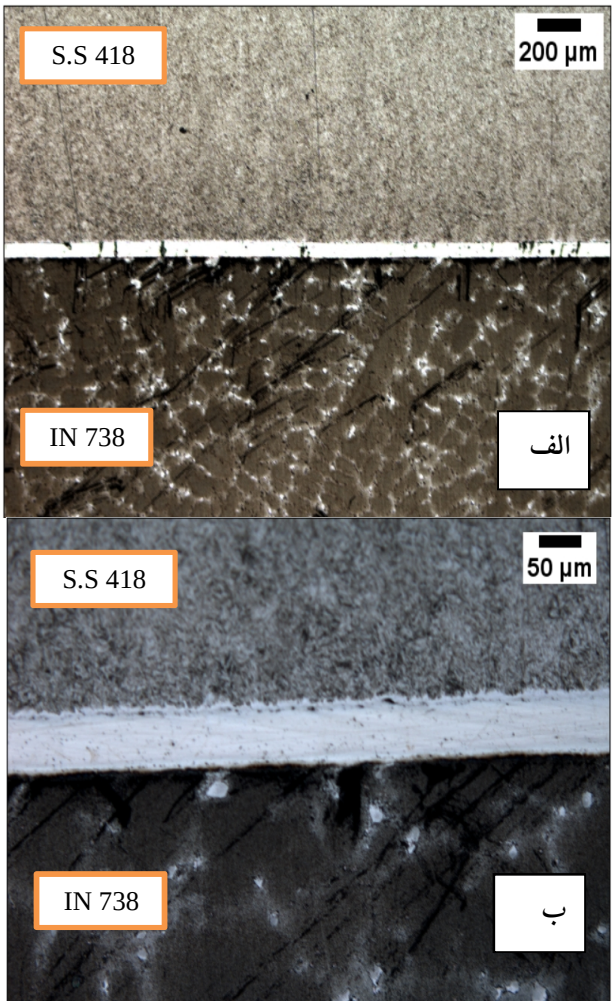
کامل برقرار نشده است.



شکل 4- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه S3 در بزرگنمایی 5X.

نمونه S5 در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 75 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ نوری درز اتصال نمونه S5 در شکل(5) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اتصال سالم، با تخلخل کم در هر دو طرف لایه واسط شکل گرفته است. در این نمونه با توجه به میزان زمان و دمای مناسب، جوشکاری به طور کامل انجام پذیرفته و اتصال برقرار شده است.

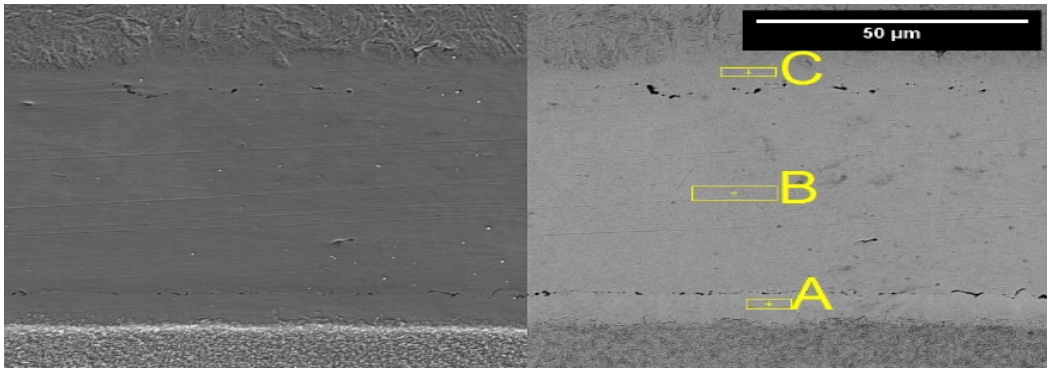
در شکل(6) تصویر سطوح فصل مشترک نمونه S5 به همراه آنالیز EDS از سه منطقه آن (A، B و C) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود لایه واسط میان فولاد زنگ نزن و سوپرآلیاژ اینکونل به صورت صفحه‌ای بوده و یک لایه نفوذ نازک قابل رویت است. همچنین مشاهده می‌شود که اتصال به صورت خالی از حفرات حاصل نشده است و حفره‌های ریز نامنظم تیره در بزرگنمایی‌های بالا وجود دارند. در جدول(4) میزان درصد وزنی عناصر سه منطقه A، B و C ارائه شده است. در منطقه A که نزدیک به سوپرآلیاژ اینکونل 738 می‌باشد مشاهده می‌شود که عناصر کرم، کبالت، آلومینیوم، مولیبدن، تیتانیوم، تنگستن، نیوبیم و آهن از بیشترین مقدار به کمترین مقدار، به درون لایه واسط نیکل خالص نفوذ کرده است. با توجه به این که مقدار بسیار کمی عنصر منیزیم در ترکیب سوپرآلیاژ اینکونل 738 وجود دارد، نفوذی از این عنصر مشاهده نمی‌شود. با توجه به این که فاز نیکل خالص آستنیت بوده است و سوپرآلیاژ 738 از فازهای γ' [$Ni_3(Al, Ti)$] و γ تشکیل شده است، فاز جدیدی تشکیل نمی‌شود و در این قسمت فاز γ' [$Ni_3(Al, Ti)$] و γ وجود دارد.



شکل 5- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه S5 در بزرگنمایی الف- 5X ب- 20X.

با توجه به جدول(4)می‌توان بیان نمود که منطقه B همان لایه واسط نیکل می‌باشد که کمی نفوذ عناصر آلیاژی در آن روی داده است. در منطقه C که در نزدیکی فولاد مارتنزیتی 418 قرار دارد، عناصر آهن، کرم، مولیبدن، تنگستن، کبالت و آلومینیوم بسیار بیشتر از عناصر تیتانیوم و نیوبیم به درون این منطقه نفوذ کرده‌اند. با توجه به نمودار Fe_Cr_Ni که در شکل(7) نشان داده شده است می‌توان به پیش‌بینی فازهای تشکیل شده در این منطقـه پرداخت. همان طور که می‌شود که ناحیه C بیشتر از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]



شکل 6- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نمونه S5 و آنالیز EDS از سه منطقه B،A و C.

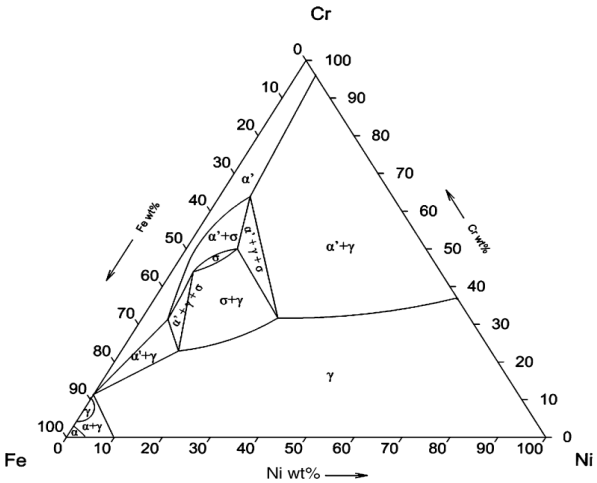
جدول 4- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 6 برحسب درصد وزنی.

منطقه	Ni	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Nb	Mo	W	فاز پیشنهادی
A	۷۳/۳۹	۴/۴۱	۱/۴۸	۱۱/۴۵	۰	۰/۰۶	۵/۷۷	۰/۴۴	۱/۵۰	۱/۴۶	γ γ' [Ni_3(Al, Ti)]
B	۹۸/۹۶	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۳۳	۰	Ni(s,s)
C	۲۳/۱۳	۰/۳۳	۰/۰۸	۱۰/۱۸	۰	۶۴/۲۳	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۹۶	$NiTi_2$، $FeNi_3$ و γ(γFe,Ni)

فازهای $NiTi_2$، $FeNi_3$ و γ(γFe,Ni) تشکیل شده است. با توجه به تصاویر می‌توان نتیجه گرفت که فصل مشترک لایه واسط نیکل خالص با سوپرآلیاژ اینکونل 738 و لایه واسط نیکل خالص با فولاد مارتنزیتی 418 دارای اتصالی کامل با ساختار مناسب و بدون جدایش می‌باشد. فازهای مشابهی توسط نگمیا و همکاران [3] در اتصال فلزات غیرهمجنس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 410 و سوپرآلیاژ پایه نیکل 718 مشاهده شد.

در شکل(8-الف) آنالیز اسکن خطی نمونه شماره S5 در سمت فولاد مارتنزیتی 418 نشان داده شده است. با توجه شکل می‌توان بیان نمود با حرکت به سمت مرکز نیکل خالص، میزان نیکل افزایش می‌یابد. از عناصر دیگری که در ناحیه اتصال میزان متفاوتی دارند می‌توان به کروم و آهن اشاره کرد که با حرکت به سمت نیکل خالص، میزان این عناصر کاهش می‌یابند. در شکل(8-ب) آنالیز اسکن خطی نمونه شماره S5 در سمت سوپرآلیاژ اینکونل 738 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با حرکت به سمت مرکز نیکل خالص، میزان نیکل افزایش می‌یابد. از عناصر دیگری که در ناحیه اتصال میزان متفاوتی دارند می‌توان به کروم و کبالت اشاره کرد که با حرکت به سمت نیکل خالص، میزان آن‌ها کاهش می‌یابند.

با توجه به سطح جدایش در آنالیز خطی که دارای شیب عنصری است، شیب و نفوذ عناصر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 کمتر از فولاد مارتنزیتی 418 می‌باشد که نشان‌دهنده نفوذ کمتر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 است. در نمونه S5، میزان نفوذ نیکل در فولاد مارتنزیتی 418 برابر 30 میکرومتر و در سوپرآلیاژ اینکونل738 برابر 25 میکرومتر می‌باشد.

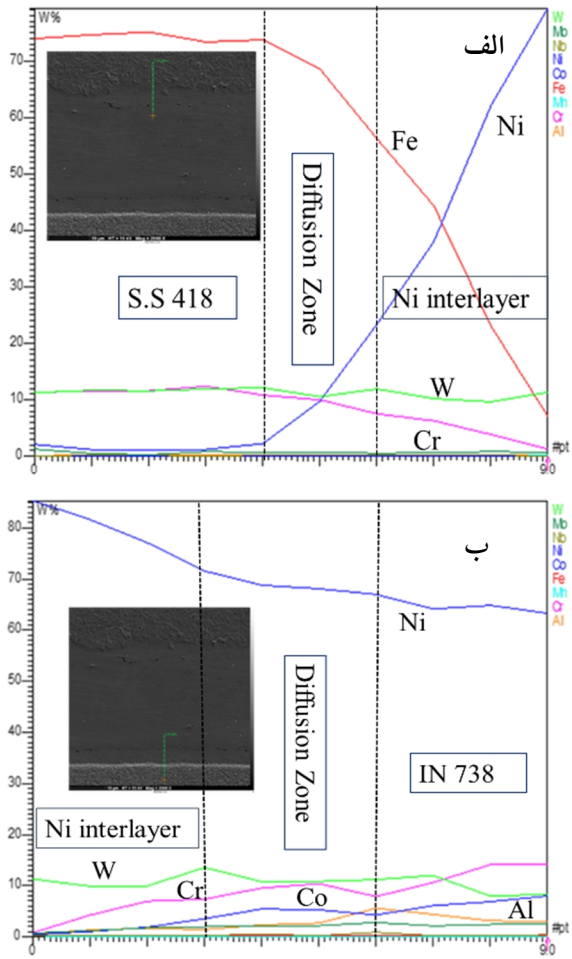


شکل 7- قسمت همدما سیستم سه تایی Fe-Cr-Ni در دمای 850 درجه سانتی‌گراد [17].

نمونه S6 در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 90 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ

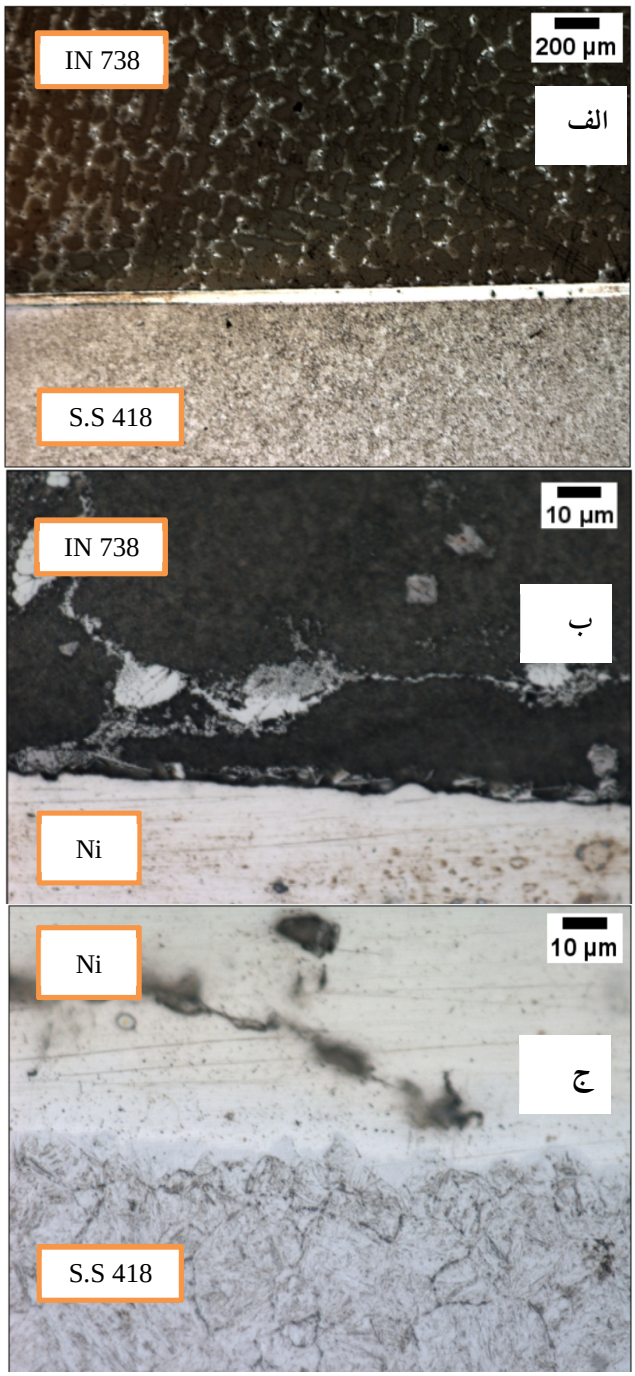
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

نوری درز اتصال نمونه S6، در شکل(9) نشان داده شده است. در تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود که اتصال لایه واسط به سوپرآلیاژ پایه نیکل 738 (شکل 9 ب) و فولاد زنگ‌نزن 418 (شکل9-ج) به صورت کامل اتفاق افتاده است. در این نمونه نسبت به نمونه شماره S5 اتصال بهتری برقرار شده است که علت آن می‌تواند زمان بیشتر این نمونه در انجام تست باشد. این نمونه با توجه به زمان و دمای انتخاب شده، بهترین اتصال را نسبت به نمونه‌های دیگر موجود دارا می‌باشد.



شکل 8- آنالیز اسکن خطی نمونه S5 الف- سمت فولاد مارتنزیتی 418 ب- سوپر آلیاژ اینکونل 738.

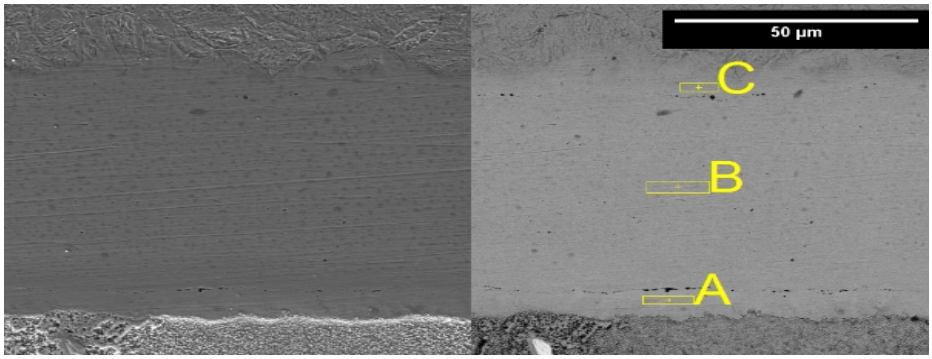
با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از نمونه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دمای اتصال از 1000 درجه سانتی‌گراد به 1050 درجه سانتی‌گراد، تمام ناپیوستگی‌های میکرو از بین رفته‌اند که نشان می‌دهد تغییر شکل میکروپلاستیک زبری‌ها بهبود یافته است.



شکل 9- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه S6 در بزرگنمایی الف- 5X، ب- 100X و ج- 100X.

در شکل(10) به بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه S6 به همراه آنالیز EDS از سه منطقه آن (A، B و C) پرداخته می‌شود. بررسی سطوح فصل مشترک حاکی از نفوذ نیکل به درون دو فلز سوپرآلیاژ اینکونل 738 و فولاد مارتنزیتی 418 می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که فصل مشترک لایه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]



شکل 10- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نمونه S6 و آنالیز EDS از سه منطقه A،B و C

جدول 5- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 10 برحسب درصد وزنی.

منطقه	Ni	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Nb	Mo	W	فازپیشنهادی
A	۷۲/۴۳	۴/۶۷	۱/۵۷	۱۲/۱۱	۰	۰/۰۸	۶/۰۸	۰/۲۷	۱/۴۳	۱/۳۷	γ γ' [Ni_3(Al, Ti)]
B	۹۹/۲۳	۰/۱۷	۰	۰/۰۸	۰	۰/۲۱	۰	۰	۰/۳	۰	Ni(s,s)
C	۳۵/۲۴	۱/۱۲	۰/۰۳	۸/۹۳	۰/۲۷	۵۱/۴۸	۰/۳۴	۰/۵۱	۰/۷۴	۱/۰۶	γ (γFe,Ni) و $FeNi_3$

واسط نیکل خالص با سوپرآلیاژ اینکونل 738 و فصل مشترک لایه واسط نیکل خالص با فولاد مارتنزیتی 418 دارای اتصالی با ساختار مناسب و بدون جدایش است و اتصال به صورت کامل و خالی از حفرات به دست آمده است.

در نمونه S6 که فرایند در زمان بیشتری نسبت به نمونه S5 انجام شده است، پیوستگی اتصال بسیار بیشتر از این نمونه می‌باشد. با مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه S6 با نمونه S5 می‌توان نتیجه گرفت که با انتخاب مناسب دو عامل نفوذ یعنی دما و زمان (با توجه به این که فشار ثابت 20 مگاپاسگال است)، عناصر در سرتاسر فصل مشترک نفوذ کرده و اتصال کامل ایجاد شده است که حاکی از دستیابی به اتصال بهینه می‌باشد. افزایش دما و زمان اتصال باعث می‌شود اتم‌های بیشتری در فصل مشترک پخش شوند و در نتیجه لایه‌های واکنش گسترده‌تر شوند.

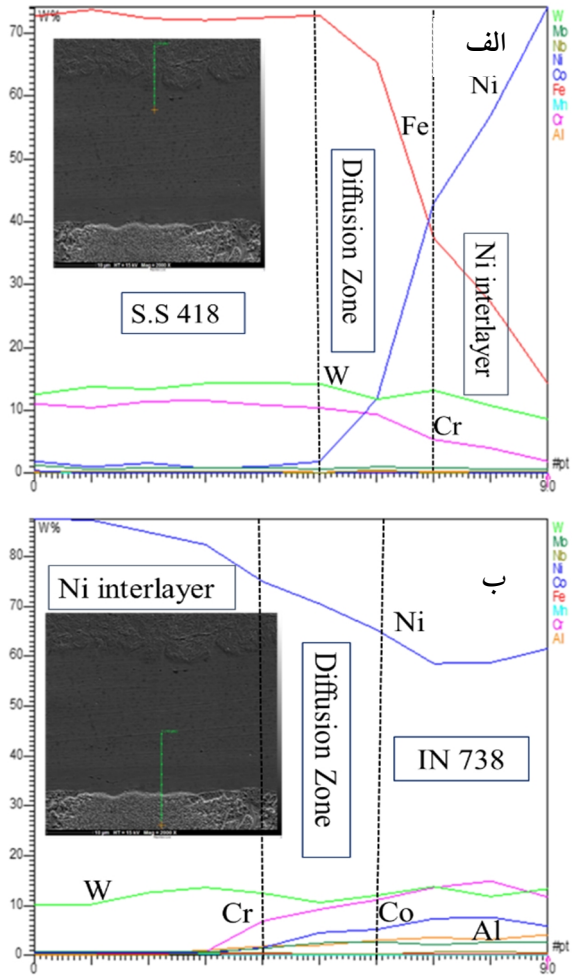
در جدول(5) میـزان درصد وزنی عناصر در این سه منطـقه ارائه شده است. با توجه به جدول می‌توان بیان نمود در منطقه A که نزدیک به سوپرآلیاژ اینکونل 738 می‌باشد عناصر کروم، کبالت، آلومینیوم، مولیبدن، تیتانیوم، تنگستن، نیوبیم و آهن از بیشترین مقدار به کمترین مقدار، به درون لایه واسط نیکل خالص نفوذ کرده‌اند.

با مقایسه منطقه A این نمونه با منطقه A نمونه S5 می‌توان بیان نمود که با توجه به زمان نگهداری بیشتر در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد در نمونه S6، میزان نفوذ عناصر ذکر شده بیشتر شده است. با توجه به این که منطقه B مربوط به لایه واسط نیکل خالص می‌باشد، از درصد عناصر ذکر شده در جدول(5) می‌توان نتیجه گرفت که کمی نفوذ عناصر آلیاژی در آن روی داده است. در منطقه C که در نزدیکی فولاد مارتنزیتی 418 قرار دارد، عناصر آهن، کروم، مولیبدن، تنگستن، کبالت و آلومینیوم بسیار بیشتر از عناصر تیتانیوم و نیوبیم به درون این منطقه نفوذ کرده‌اند و میزان نفوذ این عناصر با توجه به افزایش دما به نسبت منطقه C در نمونه S5 بیشتر شده است.

در منطقه A فازهای γ' [Ni_3(Al, Ti)] و γ و در منطقه C فازهای $FeNi_3$ و (γFe,Ni) γ تشکیل شده است و با توجه به این که مقدار Ti در این منطقه بسیار کم بوده است فاز $NiTi_2$ تشکیل نشده است. این نتایج با نمودارهای فاز Fe-Ni، Cr-Ni که انحلال پذیری متقابل گسترده‌ای از این عناصر را نشان می‌دهند، مطابقت دارد. لازم به ذکر است که عنصر منگنز نیز با توجه به بیشتر شدن زمان در دمای 1050 سانتی‌گراد، به درون نیکل خالص نفوذ داشته است که این مقدار برای نمونه S5 صفر به دست آمده بود. به طور کلی می‌توان بیان نمود

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

هنگامی‌که زمان اتصال از 75 دقیقه به 90 دقیقه (با حفظ دمای اتصال در 1050 درجه سانتی‌گراد) افزایش می‌یابد، ریزحفره‌ها ناپدید می‌شوند و رشد دانه‌های تبلور مجدد در سرتاسر سطح مشترک اتصال ارتقا می‌یابد. نگمیا و همکاران [3] فازهای مشابهی را در مطالعه خود گزارش داده‌اند.



شکل11- آنالیز اسکن خطی نمونه S6 در الف- سمت فولاد مارتنزیتی 418 ب- سوپرآلیاژ اینکونل 738.

در شکل(11-الف) آنالیز اسکن خطی نمونه شماره S6 در سمت فولاد مارتنزیتی 418 نشان داده شده است. با توجه شکل می‌توان بیان نمود با حرکت به سمت مرکز نیکل خالص، میزان نیکل افزایش می‌یابد. از عناصر دیگری که در ناحیه اتصال میزان متفاوتی دارند می‌توان به کروم و آهن اشاره کرد که با حرکت به سمت نیکل خالص، میزان این عناصر کاهش می‌یابند. با مقایسه آنالیز اسکن خطی نمونه S6 با نمونه S5 مشاهده می‌شود با افزایش زمان اتصال، میزان و عمق نفوذ عناصر افزایش یافته است. در شکل(11-ب) آنالیز اسکن خطی نمونه S6 در سمت سوپرآلیاژ اینکونل 738 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با حرکت به سمت سوپر آلیاژ اینکونل 738، میزان نیکل کاهش می‌یابد. از عناصر دیگری که در این مسیر کمی افزایش می‌یابند می‌توان به کبالت، کروم و آلومینیم اشاره کرد که با حرکت به سمت سوپر آلیاژ اینکونل 738، میزان آن‌ها افزایش یافته است. با توجه به نتایج آنالیز اسکن خطی گرفته شده، نفوذ عناصر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 کمتر از فولاد مارتنزیتی 418 می باشد. میزان نفوذ لایه نیکل در فولاد مارتنزیتی 418 برابر 40 میکرومتر و در سوپرآلیاژ اینکونل 738 برابر 35 میکرومتر می‌باشد. با مقایسه میزان نفوذ نمونه S6 با نمونه S5 می‌توان نتیجه گرفت که نفوذ در این نمونه بیشتر می باشد. این امر می‌تواند به این واقعیت نسبت داده شود که میزان انتقال جرم توسط زمان فرایند دیکته می‌شود. افزایش زمان اتصال باعث می‌شود اتم‌های بیشتری در سطح مشترک پخش شوند و در نتیجه لایه‌های واکنش گسترده‌تر شوند.

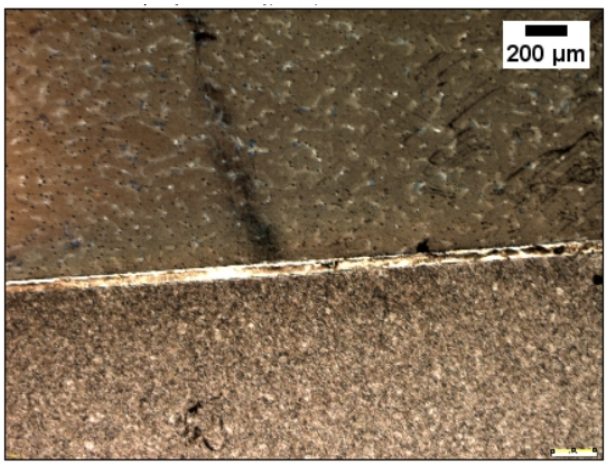
3-3- تاثیر تغییرات زمان بر ریزساختار اتصال در دمای 1150 درجه‌سانتی‌گراد

نمونه S7 در دمای 1150 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی با لایه واسط نیکل خالص قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ نوری درز اتصال نمونه S7، در شکل(12) نشان داده شده است. با توجه به این که در این نمونه دما بالاتر رفته است ولی چون میزان زمان به اندازه کافی نبوده است، اتصال به طور کامل شکل نگرفته است و درز اتصال قابل مشاهده می‌باشد. شایان ذکر است اتصال لایه واسط نیکل با سوپرآلیاژ اینکونل 738 بهتر صورت گرفته است که می‌توان این پدیده را به هم‌جنس بودن لایه واسط با اینکونل 738 نسبت داد.

در شکل(13)به بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه S7 به همراه آنالیز EDS از سه منطقه آن (A، B و C) پرداخته شده است. علی‌رغم اینکه تصویر سطوح فصل مشترک

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

حکایت از نفوذ نیکل به درون دو فلز سوپرآلیاژ اینکونل 738 و فولاد مارتنزیتی 418 دارد، اما اتصال به صورت کامل و خالی از حفرات حاصل نشده است و در قسمت‌های زیادی از فصل مشترک لایه واسط نیکل خالص و سوپرآلیاژ اینکونل 738 و فصل مشترک لایه واسط نیکل خالص و فولاد مارتنزیتی 418 دچار جدایش شده است. در نمونه S7 مشاهده می‌شود که نفوذ خوب عناصر با توجه به زمان و دمای انتخاب شده به وجود آمده است اما اتصال همراه با حفرات حاصل شده است. با توجه به مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه S7 با نمونه‌های S5 و S6 می‌توان بیان نمود که اتصال در این زمان و دما با توجه به میزان فشار 20 مگاپاسگال امکان پذیر نشده است و پیوستگی اتصال بسیار کمتر از دو نمونه دیگر بدست آمده است. علت این موضوع، میزان زمان ناکافی برای رفع حفرات و عیوب مطرح شده، می‌باشد.

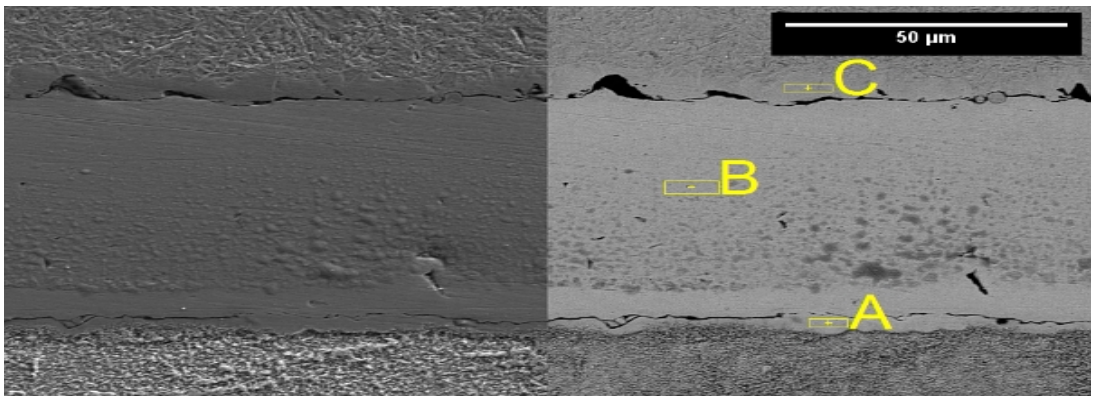


شکل 12- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه S7 در بزرگنمایی 5X.

در جدول(6) میزان درصد وزنی عناصر در این سه منطقه ارائه شده است. در منطقه A (نزدیک به سوپرآلیاژ اینکونل 738) مشاهده می‌شود که عناصر کروم، کبالت، آلومینیوم، مولیبدن، تیتانیوم، تنگستن، نیوبیم و آهن به درون لایه واسط نیکل خالص نفوذ کرده اند. با مقایسه منطقه A نمونه S7 با منطقه A نمونه‌های S5 و S6 می‌توان نتیجه گیری نمود که با توجه به این که دما در نمونه S7 بالاتر از دو نمونه S5 و S6 می‌باشد (دما 1150 سانتی‌گراد) میزان نفوذ عناصر افزایش یافته است زیرا نفوذ به صورت نمایی با دما تغییر می‌کند. منطقه B مربوط به لایه واسط نیکل خالص می‌باشد. از نتایج ارائه شده در جدول(6) مشاهده می‌شود که عناصر تنگستن و مولیبدن بیشتر از عناصر دیگر همچون نیوبیوم، کبالت، آهن، کروم، تیتانیوم و آلومینیوم از آلیاژهای سوپر آلیاژ اینکونل 738 و فولاد مارتنزیتی 418 به درون نیکل خالص نفوذ کرده‌اند. در منطقه C (نزدیک به فولاد مارتنزیتی 418)، عناصر آهن، کروم و تنگستن بسیار بیشتر از عناصر مولیبدن، کبالت، منگنز و آلومینیوم به درون این منطقه نفوذ کرده‌اند. فازهای تشکیل شده در منطقه A و B همانند نمونه S5 و S6 می‌باشد اما در منطقه C نمونه S7 به علت نبود عنصر Ti، فازهای $FeNi_3$ و $\gamma(\gamma Fe,Ni)$ تشکیل شده و فاز $NiTi_2$ به وجود نیامده است. لازم به ذکر است که عنصر منگنز نیز با توجه به افزایش دما به 1150 سانتی‌گراد، به درون نیکل خالص نفوذ داشته است که این مقدار برای نمونه S5 صفر به دست آمده بود.

در شکل(14-الف) آنالیز اسکن خطی نمونه S7 در سمت فولاد مارتنزیتی 418 ارائه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با حرکت به سمت مرکز نیکل خالص، میزان نیکل افزایش می‌یابد. از عناصر دیگری که در ناحیه اتصال میزان متفاوتی دارند می‌توان به آهن و کروم اشاره کرد که میزان آن‌ها با حرکت به سمت نیکل خالص، کاهش می‌یابند. با مقایسه آنالیز اسکن خطی نمونه S7 نمونه‌های S5 و S6 مشاهده می‌شود با افزایش دمای اتصال، میزان و عمق نفوذ عناصر افزایش یافته است. در شکل(14-ب) آنالیز اسکن خطی نمونه شماره S7 در سمت سوپرآلیاژ اینکونل 738 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با حرکت به سمت سوپر آلیاژ اینکونل 738، میزان نیکل کاهش و میزان کبالت، کروم و آلومینیم افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آنالیز گرفته شده، میزان نفوذ لایه نیکل در فولاد مارتنزیتی 418 برابر 45 میکرومتر و در سوپرآلیاژ اینکونل 738 برابر 40 میکرومتر می‌باشد. با مقایسه میزان نفوذ نمونه S7 با نمونه‌های S5 و S6 می‌توان نتیجه گرفت که نفوذ در این نمونه افزایش یافته است. این امر می‌تواند به افزایش دمای فرایند نمونه S7 نسبت داده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]



شکل 13- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نمونه S7 و آنالیز EDS از سه منطقه B،A و C

جدول 6- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 13 برحسب درصد وزنی.

منطقه	Ni	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Nb	Mo	W	فاز پیشنهادی
A	۷۰/۸۳	۵/۶	۱/۶۵	۱۱/۶۲	۰	۰/۲۶	۶	۰/۶۴	۱/۷۲	۱/۶۹	γ γ' [Ni_3(Al, Ti)]
B	۹۷/۸۱	۰/۱۹	۰/۸	۰/۱۶	۰	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۴۱	۰/۹۶	Ni(s,s)
C	۲۳/۳۷	۰/۰۵	۰	۹/۵۸	۰/۲۷	۶۴/۹۸	۰/۴۴	۰	۰/۳۶	۱/۲۲	γ (Fe, Ni) $FeNi_3$

شود زیرا دما انرژی اصلی اتم‌ها برای حرکت و جا به جا شدن را تامین می‌کند. همچنین نفوذ به صورت نمایی با دما تغییر می‌کند و تغییرات اندک دما باعث ایجاد تغییرات عمده‌ای در سینتیک فرایند می‌شود.

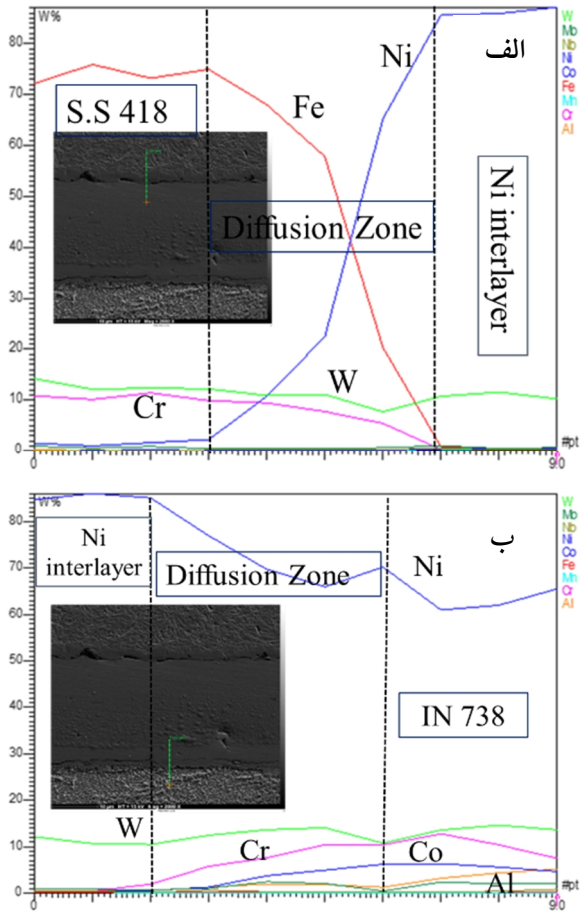
نمونه S8 در دمای 1150 درجه سانتی‌گراد به مدت 60 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ نوری درز اتصال نمونه S8، در شکل(15) نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود اتصال برقرار نشده است و جدایش بین نیکل خالص و فولاد مارتنزیتی 418 به وجود آمده است اما نیکل خالص به اینکونل 738 به خوبی متصل شده است و نفوذ عناصر شکل گرفته است. در این نمونه با توجه به این که هم دما و هم زمان افزایش یافته است می‌توان نتیجه گرفت که این افزایش دما بر روی فشار اولیه تنظیم شده بر روی پیچ‌ها تاثیر گذاشته است. به علت دمای بالای فرایند، فشار پیچ‌ها کاهش یافته و این فشار باید برای ایجاد تماس فیزیکی در کل سطح قطعات مورد اتصال کافی نبوده است بنابراین اتصال برقرار نشده است

نمونه S9 در دمای 1150 درجه سانتی‌گراد به مدت 75 دقیقه تحت فرایند اتصال نفوذی قرار گرفت. در این نمونه با توجه به این که جدایش بسیار بزرگی در سمت لایه واسط نیکل خالص و فولاد مارتنزیتی 418 یا سوپرآلیاژ پایه نیکل 738 به وجود آمده است اتصال برقرار نشده است. افزایش دما و زمان فرایند، باعث کاهش فشار اولیه تنظیم شده بر روی پیچ‌ها و کاهش میزان تماس فیزیکی لازم در کل سطح قطعات شده است در نتیجه اتصال به طور کامل برقرار نشده است.

با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از نمونه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دما به 1150 درجه سانتی‌گراد، نواحی بدون پیوند در اتصال مشاهده می‌شوند که به علت کاهش فشار بر روی سطوح در تماس می‌باشد. بایستی اشاره نمود که اعمال فشار، مرحله مهمی در تکنیک اتصال نفوذی می‌باشد. در این مرحله، نزدیک کردن سطوح مشترک برای نفوذ با ایجاد تغییر شکل پلاستیک موضعی انجام می‌شود. افزایش فشار معمولاً منجر به ایجاد یک پیوند با کیفیت بالا می‌شود، اما باید با توجه به دمای اتصال کنترل شود. معمولاً مشاهده می‌شود که فشار بالاتر، اتصالات با کیفیت خوبی را برای همه شرایط ایجاد می‌کند. فشار با له کردن نابجایی‌های روی سطوح و افزایش طول مسیر نفوذ به افزایش استحکام اتصال منجر می‌شود. هنگامی‌که فشار به مقادیری زیاد می‌رسد،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

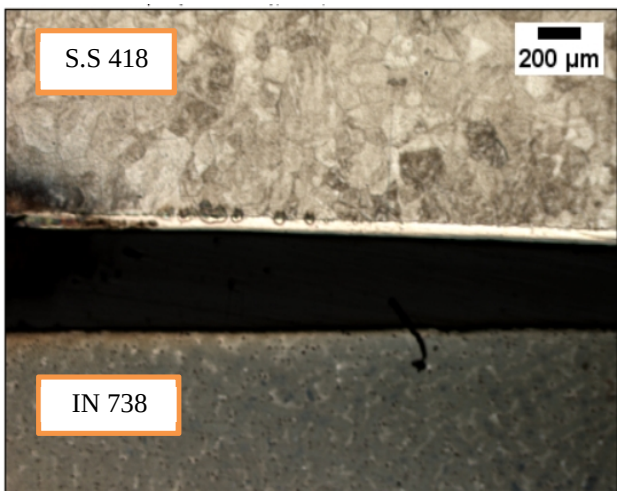
جریان پلاستیک گسترده‌ای را در لایه‌های زیرسطحی ایجاد می‌کند و تماس کامل برقرار می‌شود [16].



شکل 14- آنالیز اسکن خطی نمونه S7 در الف- سمت فولاد مارتنزیتی 418 ب- سوپرآلیاژ اینکونل 738.

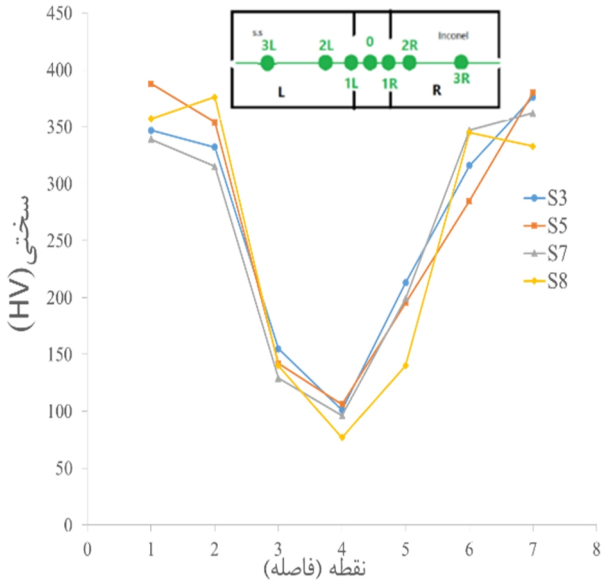
3-4- بررسی خواص مکانیکی اتصال

میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده توسط دستگاه میکروسختی سنج با مقدار نیروی وارده 0/025 کیلوگرم و زمان نشست 10 ثانیه اندازه‌گیری شدند. میکروسختی سنجی در راستای عمود برخط اتصال از سمت فلز سوپرآلیاژ اینکونل 738 به سمت فلز فولاد مارتنزیتی 418 انجام شد و نتایج بصورت ویکرز گزارش شدند. محل‌های سختی سنجی بگونه‌ای انتخاب شدند که نقاط 3R، 0 و 3L به ترتیب در سوپرآلیاژ اینکونل 738، نیکل خالص و فولاد مارتنزیتی 418 قرار دارند. نقطه 2R در حوالی فصل مشترک سوپرآلیاژ اینکونل 738 و نیکل خالص (بیشتر در داخل سوپرآلیاژ اینکونل 738) و نقطه 2L در حوالی فصل مشترک فولاد مارتنزیتی 418 و نیکل خالص انتخاب شدند. همچنین نقاط 1R و 1L به ترتیب روی فصل مشترک نیکل خالص و سوپرآلیاژ اینکونل 738 و روی فصل مشترک نیکل خالص و فولاد مارتنزیتی 418 قرار دارند.



شکل 15- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه S8 در بزرگنمایی 5X.

در شکل(16) نتایج سختی مناطق مختلف برای نمونه‌های S3، S5، S6 و S7 ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سختی در منطقه لایه واسط نیکل خالص به دلیل نرمی و انعطاف پذیری بالای نیکل کمتر از مناطق دیگر می‌باشد. مقدار میکروسختی در فصل مشترک نیکل خالص-سوپرآلیاژ اینکونل 738 بیشتر از نیکل خالص-فولاد مارتنزیتی می‌باشد.



شکل 16- سختی مناطق مختلف برای نمونه‌های S3، S5، S6 و S7.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

بیشنه سختی در فصل مشترک نیکل خالص-سوپرآلیاژ اینکونل 738 به 213 ویکرز می‌رسد در حالی‌که در فصل مشترک نیکل خالص- فولاد مارتنزیتی 155 ویکرز می‌باشد. افزایش سختی در این منطقه می‌تواند به وجود رسوبات γ' نسبت داده شود. میکروسختی در دو طرف زیرلایه‌ها به طور پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش زمان نگهداری، عرض ناحیه نفوذ در اتصال افزایش می‌یابد و مشاهده می‌شود که سختی کاهش می‌یابد. بیشینه سختی بعنوان شاخصی برای ارزیابی میزان تردی اتصال می‌باشد.

با توجه به این که افزایش سختی با افزایش تردی همراه است، در آزمون‌های مکانیکی منطقه با سختی بالا می‌تواند به عنوان منطقه تمرکز تنش عمل نماید و با جوانه‌زنی و رشد ترک از همین ناحیه، اتصال جدا شود. بنابراین با مقایسه بیشینه سختی در شکل(16) می‌توان نتیجه گرفت اتصال نمونه S6 از بیشینه سختی کمتری نسبت به دیگر نمونه‌ها برخوردار است، لذا شاید بتوان چنین نتیجه گرفت که از لحاظ ترکیبات بین‌فلزی از شرایط بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است (هرچند که اختلاف بین بیشینه سختی نمونه‌ها اندک بوده است).

همچنین استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری شده برای بررسی خواص مکانیکی اتصال‌ها مورد بررسی قرار گرفت. استحکام اتصال در دماهای پایین فرایند (نمونه‌های S1 تا S4) به دلیل تماس نامطلوب بین سطوح اتصال حداقل است یا اصلا وجود ندارد. دمای پایین فرایند همچنین ممکن است منجر به حداقل فعال‌سازی حرارتی شود و در نتیجه میزان نفوذ عناصر را از طریق فصل مشترک به حداقل می‌رساند.

فعال شدن حرارتی بیشتر به دلیل افزایش دمای اتصال باعث سرعت بالاتر انتقال جرم و ضخامت بیشتر لایه واکنش در ناحیه نفوذ خواهد شد و می‌تواند منجر به پیوند اتمی قوی‌تر شود (نمونه‌های S5 و S6). با افزایش بیشتر دمای اتصال، تماس بین سطوح اتصال در مقایسه با دمای پایین‌تر اتصال افزایش می‌یابد. با این حال، کسر حجمی ترکیبات بین فلزی نیز افزایش می‌یابد که ممکن است به تدریج استحکام اتصال را کاهش دهد.

جدول(7) نتایج استحکام برشی نمونه‌های S5 و S6 را نشان می‌دهد که میانگین اندازه‌گیری 3 نمونه می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود نمونه S6 استحکام برشی بیشتری نسبت به نمونه S5 دارد. با توجه به این که هر دو نمونه در یک دما تحت فرایند جوشکاری قرار گرفتند اما زمان‌های انجام تست متفاوت هستند (زمان نمونه S6 برابر 90 دقیقه و زمان نمونه S5 برابر 75 دقیقه) فرصت نفوذ عناصر در نمونه S6 بیشتر بوده و حجم بیشتری از اتم‌ها می‌توانند نفوذ کنند.

این افزایش عمق نفوذ منجر به افزایش استحکام برشی می‌شود. طبق نتایج بدست آمده بیشترین مقدار استحکام برشی در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه به میزان 270 مگاپاسگال بدست آمد. نتایج تست برش نشان می‌دهد که شکست در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک نیکل و فولاد مارتنزیتی 418 اتفاق افتاد که نشان می‌دهد ضعیف‌ترین ناحیه اتصال، این مرز مشترک است. وجود ترکیبات ترد بین‌فلزی شامل $FeNi_3$ و $NiTi_2$ منجر به ایجاد ترک و شکست نمونه‌ها می‌گردد.

جدول 7- میانگین استحکام برشی نمونه های S5 و S6.

نمونه	دما(سانتی‌گراد)	زمان (ثانیه)	استحکام برشی (مگاپاسکال)
S5	1050	75	250
S6	1050	90	270

نگمیا و همکاران [3] به استحکام کششی 263 مگاپاسکال در اتصال فلزات غیرهمجنس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 410 و سوپرآلیاژ پایه نیکل 718 دست یافتند. همچنین پایدار و همکاران [5] استحکام کششی 285 مگاپاسکال را در اتصال غیرهمجنس Inconel 738 و فولاد زنگ نزن AISI 321 با استفاده از روش لحیم کاری نفوذی گزارش دادند همان طور که مشاهده می‌شود نتایج استحکام برشی به دست آمده در تطابق با نتایج سایر محققین می‌باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر پارامترهای اتصال نفوذی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد مارتنزیتی 418 به سوپرآلیاژ اینکونل 738 با استفاده از لایه واسط نیکل خالص با ضخامت 50 میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌ها در کوره خلاء در سه دمای 1000،1050 و 1150 درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان 45 ، 60 ، 75 و 90 دقیقه تحت عملیات اتصال نفوذی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

-اتصال بین سوپرآلیاژ اینکونل 738 و فولاد مارتنزیتی 418 به روش اتصال نفوذی در محیط خلاء با استفاده از لایه واسط نیکل خالص انجام پذیر بوده است.

-با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از نمونه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که حفره‌ها و نواحی بدون پیوند در نمونه‌هایی که در دمای پایین‌تر (1000 درجه سانتی‌گراد) به هم متصل شده‌اند دیده می‌شوند. در دماهای پایین، تغییر شکل میکروپلاستیک سطوحی که باید به یکدیگر متصل شوند، توسط رفتار مقاومت غیرعادی سوپرآلیاژ اینکونل 738 (به دلیل وجود کسر حجمی بالا از فاز γ') محدود شد. بنابراین، به دلیل تماس ناکافی بین سطوح ناهموار، حفره‌ها در سطح مشترک اتصال مشاهده می‌شوند. با افزایش دمای اتصال از 1000 درجه سانتی‌گراد به 1050 درجه سانتی‌گراد، تمام ناپیوستگی‌های میکرواز بین رفته‌اند که نشان می‌دهد تغییر شکل میکروپلاستیک زبری‌ها بهبود یافته است. سپس با افزایش دما به 1150 درجه سانتی‌گراد، نواحی بدون پیوند در اتصال مشاهده می‌شوند که به علت کاهش فشار بر روی سطوح در تماس می‌باشد.

-هنگام استفاده از نیکل خالص به عنوان لایه واسط، در سمت سوپرآلیاژ اینکونل 738 ترکیباتی بین فلزی γ' $[Ni_3(Al, Ti)]$ در فاز زمینه γ تشکیل می‌شوند در حالی‌که در سمت فولاد مارتنزیتی 418 ترکیبات مخلوط فازی $FeNi_3$ و $\gamma(\gamma Fe,Ni)$ تشکیل می‌شوند.

-دما و زمان، همزمان در افزایش و کاهش استحکام اتصال سوپرآلیاژ اینکونل 738 به فولاد مارتنزیتی 418 تأثیرگذار می‌باشند. باتوجه به این که عامل فشار در همه نمونه‌ها ثابت بوده، هر دو عامل دما و زمان، جزء تشدید کننده نفوذ بوده و با افزایش آن‌ها می‌توان نفوذ را افزایش داد. با افزایش این دو پارامتر علاوه بر افزایش نفوذ، ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده تغییر خواهد کرد. بنابراین افزایش این دو پارامتر تا جایی می‌تواند موجب بهبود استحکام اتصال شود. بنابراین لازمه رسیدن به استحکام مناسب در این اتصال استفاده از دما و زمان بهینه شده است.

-با توجه به نتایج آنالیز اسکن خطی، شیب و نفوذ عناصر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 کمتر از فولاد مارتنزیتی 418 می‌باشد که نشان دهنده نفوذ کمتر در سوپرآلیاژ اینکونل 738 است. در نمونه جوشکاری شده در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه، میزان نفوذ لایه نیکل در فولاد مارتنزیتی 418 برابر 40 میکرومتر و در سوپرآلیاژ اینکونل738 برابر 35میکرومتر می‌باشد.

-ترکیباتی که در فصل مشترک لایه واسط با سوپرآلیاژ اینکونل 738 و فصل مشترک لایه واسط با فولاد مارتنزیتی 418 تشکیل می‌شود دارای سختی بالاتری از نیکل خالص می‌باشد و با حرکت به سمت فلزات پایه، سختی افزایش می‌یابد.

-با مقایسه بیشینه سختی می‌توان نتیجه گرفت اتصال در شرایط دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه از بیشینه سختی کمتری نسبت به دیگر نمونه‌ها برخوردار است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ ترکیبات بین‌فلزی از شرایط بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است. بیشترین مقدار استحکام برشی در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه به میزان 270 مگاپاسگال بدست آمد.

منابع

1-Chaudhary, K., "A Review on Advance Welding Processes". *Int J Eng Tech.* vol.3, pp. 86-96, 2017.

2-Kundu, S., Sam, S., "Diffusion Bonding of Microduplex Stainless Steel and Ti Alloy with and without Interlayer: Interface Microstructure and Strength Properties". *Metall Mater Trans A.* vol.45, pp.371-383, 2013.

3-Negemiya Arulsamy A. A., Rajakumar, S., Balasubramanian, V., "Influence of high temperature diffusion bonding process parameters on mechanical and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]

heat treatment cycle". *Mater Sci Technol.* vol. 30, pp. 109-115, 2013.
10- Sabetghadam, A., Zarei Hanzaki, A., Araee, A.,"Diffusion bonding of 410 stainless steel to copper using a nickel interlayer". *Mater charact.* vol. 61, pp. 626-634, 2010.
11- Akca, A., Gürsel, A., "The importance of interlayers in diffusion welding-A review". *Period Eng Nat Sci.* vol. 3, pp. 12-16, 2015.
12- Reeks, W., Davies, H., Marchisio, S., "A review: Interlayer joining of nickel base alloys". *J Adv Join Process.* vol. 2, 100030, 2020
13- Lyushinskii, A.V., "Criteria for selecting interlayers in diffusion bonding dissimilar metals". *Weld Int.* vol. 15, pp. 830-832, 2009.
14-Gawde, R., Pappachan, A.L., Kale, G.B., Dey, G.K.,"Low temperature diffusion bonding of stainless steel". *Trans Indian Inst Met.* vol. 63, pp. 853-857,, 2010.
15-Kundu, S., Sam, S., Chatterjee, S., "Interface microstructure and strength properties of Ti64 and microduplex stainless steel diffusion bonded joints". *Mater Des.* vol. 32, pp. 2997-3003, 2011.
16- Barvinok, V.A., Vashukov, Y.A., "Experimental research methods technological processes in aircraft production devices", Samara state aerospace university named after academician s. p. korolev (national research university), PhD Thesis, 2012
17-Okamoto, H., Schlesinger, M.E., Mueller, E.M., "ASM Handbook (Volume 3): Alloy Phase Diagrams", *ASM International*, Materials Park, 2016.

metallurgical characteristics of nickel superalloy to martensitic stainless steel". *Microsc Res Tech.* vol.83, pp. 318-328, 2020.
4- 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". *J Manuf Process.* vol. 61, pp. 383-395, 2021.
5- Paidar, M., Ravikumar, M.M.,Ojo, O.O., Mehrez, S., Mohanavel, V., Ravichandran, M., "Diffusion brazing of 321 stainless steel to IN738 using 54Ag-40Cu-5.0 Zn-1.0 Ni powder-mixture interlayer". *Mater Lett.* vol. 297, 129919, 2021.
6-Ghaderi, S., Karimzadeh, F., Ashrafi, A., Hosseini, S.H., "Effect of pressure, temperature and homogenization on the dissolution behavior and mechanical properties of IN718/AISI 304 during transient liquid phase bonding". *J Manuf. Process.* vol. 60, pp. 213-226, 2020.
7-Emami, M., Binesh., B., Heydarzadeh, J.M., "Analysis of microstructure, kinetics of isothermal solidification and mechanical properties of IN718/MBF-20/SS316L TLP joints". *Mater Sci.* vol. 101, pp. 1726-1749, 2021.
8-Shamanian, M., Shamanian , M.,"Formation mechanism of intermetallic components during dissimilar diffusion bonding of IN718/BNi-2/AISI 316 L by TLP process". *J Heat Mass Transf.* vol. 55, pp. 2083-2093 2019.
9-Pouranvari, A., Ekrami, A., Kokabi, A. H., "Diffusion brazing of cast Inconel 718 superalloy utilizing standard

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.17]