



مطالعات فازی، ریزساختاری و رفتار شکست اتصال فاز مایع گذرا در آلیاژ نایمونیک ۷۵ در دماهای مختلف

حسین مستعان^{*}، امیرحسین محبوبی، بهمن میرزاکhani، فردین نعمت‌زاده

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، مرکزی، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳

پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

کلیدواژه‌ها:

اتصال فاز مایع گذرا،

نایمونیک ۷۵،

رفتار شکست،

تحولات فازی

چکیده در این پژوهش، فرایند اتصال فاز مایع گذرا، روی آلیاژ نایمونیک ۷۵، توسط لایه واسط AWS BNi-2، به ضخامت ۳۲ میکرون، مورد بررسی قرار گرفت. فرایند اتصال فاز مایع گذرا، در سه دمای مختلف ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، به مدت ۶۰ دقیقه، انجام شد. از پراش پرتو ایکس، برای شناسایی مشخصات فازهای بورایدی در اتصال، استفاده شد. نتایج آزمون‌ها برای آلیاژ نایمونیک ۷۵، نشان داد که زمان و درجه حرارت، تأثیر قابل مشاهده‌ای، روی تشکیل فازهای بورایدی، مانند بوراید کروم و بوراید نیکل دارد. همچنین، استحکام برشی این اتصالات، اندازه‌گیری شد. نتایج، حاکی از آن است که ساختار اتصال، از سه منطقه انجماد هم‌دما، منطقه انجماد غیرهم‌دما و منطقه متأثر از نفوذ، تشکیل شده بود. نواحی متأثر از نفوذ نیز، با افزایش دما، از بین رفت و همگن‌سازی نسبی، در اتصالات، ایجاد گردید. نتایج حاصل از استحکام برشی، نشان داد با افزایش دمای اتصال‌دهی، از ۱۰۵۰ به ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، استحکام برشی، از ۶۳ به ۱۵۲ مگاپاسکال، افزایش یافت. بررسی سطوح شکست اتصالات در آلیاژ نایمونیک ۷۵، نشان داد که با افزایش دمای اتصال، حالت شکست، از ترد به نیمه ترد و در نهایت، نرم، تغییر می‌یابد که این موضوع، ناشی از کاهش ترکیبات بین‌فلزی و ساختار یوتکتیکی است.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.223401.1082>URL: http://www.jamt.ir/article_122067.html

JAMT: Vol. 9, No. 3, (Autumn 2020), 37-49

Phase and Microstructural Evolutions and Fracture Behavior of Nimonic 75 Transient Liquid Phase Joints at Different Temperatures

Hossein Mostaan^{*}, Amir Hassan Mahboubi, Bahman Mirzakhani, Fardin Nematzadeh

Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, P. O. Box: 38156-8-8349, Arak, Markazi, Iran

Paper History:

Received: 2020-04-11

Revised in revised form: 2020-06-12

Accepted: 2021-01-05

Keywords:

Transient Liquid Phase Bonding,
Nimonic 75,
Fracture Behavior,
Phase Evolutions

Abstract In this research, the transient liquid phase bonding process on Nimonic alloy 75 was investigated using an AWS BNi-2 interlayer with a 32 μm thickness. The transient liquid phase bonding process was performed at 1050 $^{\circ}\text{C}$, 1100 $^{\circ}\text{C}$, and 1150 $^{\circ}\text{C}$ for 60 min. X-ray diffraction (XRD) technique was employed to identify the Boride phases in the joint area. For the Nimonic 75 alloy, the experimental results showed that the temperature and time have an evident effect on the phase constituents of the Boride phases, i.e., CrB and Ni₂B. Also, the shear strength of TLP joints was measured. The results indicated that the joint microstructure consisted of three zones, including isothermal solidification zone (ISZ), thermal solidification zone, and diffusion affected zone. The diffusion affected zone of the Nimonic 75 alloy was vanished and the homogenization process occurred by increasing the bonding time. The results of shear strength showed that the bonding strength was increased from 63 MPa to 152 MPa with increasing the bonding temperature from 1050 to 1150 $^{\circ}\text{C}$, respectively. Analysis of fracture surfaces showed that the fracture mode changed from brittle, semi-brittle and finally ductile mode by increase in bonding temperature which is due to the decrease in volume fraction of brittle intermetallic phases and eutectic structure any sort of image, illustration, figure, or table.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.223401.1082>URL: http://www.jamt.ir/article_122067.html

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، مرکزی، اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، تلفن: ۰۸۶-۳۲۶۲۵۵۲۶، دورنگار: ۰۸۶-۳۲۶۲۵۵۲۶

پیام نگار: h-mostaan@araku.ac.ir

Please cite this article as: Mostaan, H., Mahboubi, A. H., Mirzakhani, B., Nematzadeh, F., "Phase and microstructural evolutions and fracture behavior of Nimonic 75 transient liquid phase joints at different temperatures", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 3, (2020), 37-49. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.223401.1082>).

۱- مقدمه

در سال ۱۹۴۰، پیشرفت زیادی در توربین‌های گازی صورت گرفت و نیاز به آلیاژی با استحکام بالا که توانایی کار در درجه حرارت‌های بالا را داشته باشند، بوجود آمد. مشخص بود که دمای خروجی کمپرسور و ورودی توربین، رابطه مستقیمی با بالا بردن راندمان موتور دارد؛ بنابراین، موادی با خواص بالاتر، مورد نیاز بود. لذا، موادی با عنوان سوپرآلیاژ، ابداع شد. سوپرآلیاژها، موادی هستند که برای کار در دمای بالا، طراحی شده‌اند و شامل آلیاژهای پایه نیکل، نیکل-آهن، کبالت و تیتانیوم هستند. تاریخچه توسعه موتورهای توربین جت، با توسعه سوپرآلیاژها، درهم تنیده است. از این مواد، در کاربردهای دیگری، نظیر جاهایی که نیاز به استحکام بالا یا توانایی تحمل درجه حرارت بالا و مقاومت به خوردگی و اکسایش وجود داشت، استفاده به عمل آمد که می‌توان به مبدل‌های حرارتی، کوره‌ها و تجهیزات گاز ترش اشاره کرد. از این رو، سوپرآلیاژها، در اثر بهبود ریزساختار مواد، بوجود آمده‌اند. به هر حال، محیط‌های خشن، عمر کارکرد سوپرآلیاژ را کم می‌کند. وجود ترکیبات با کارایی بالا و هزینه‌های ساخت و مونتاژ زیاد، باعث می‌شود هزینه‌های تعمیر، تا دو سوم هزینه یک قطعه نو برسد [۱]. روش‌های متعددی جهت تعمیر و بازایی اجزاء موتور وجود دارد که از آن جمله، می‌توان جوشکاری ذوبی، لحیم‌کاری سخت و در این اواخر، روش فاز مایع گذرا^۱ را نام برد. فرایند فاز مایع گذرا، فرایندی تعمیری است که از لحیم‌کاری، در درجه حرارت بالا، منتج شده است [۲ و ۳].

فرایند اتصال فاز مایع گذرا، فرایندی است که در سال‌های اخیر، توجه زیادی را به خود، جلب کرده است. فرایند فاز مایع گذرا، روشی جدید است که به صورت اقتصادی، می‌تواند در تولید اتصالاتی با استحکام بالا، در مواد مقاوم در برابر حرارت، بدون نیاز به اعمال فشار قابل توجه در زمان ایجاد اتصال، به کار برده شود. این فرایند، با استفاده از قرار دادن لایه واسطی میان دو قطعه، انجام می‌شود [۴]. این روش اتصال، برای دامنه گسترده‌ای از مواد، مانند سوپرآلیاژها، آلیاژهای مستحکم شده با ذرات اکسیدی، کامپوزیت‌ها،

ترکیبات بین‌فلزی سازه‌ها، نیمه هادی‌ها و اتصال فلزات به سرامیک‌ها، کاربرد دارد [۵ و ۶]. فرایند TLP، به‌عنوان لحیم‌کاری سخت نفوذی نیز، شناخته می‌شود چرا که ترکیبی از فرایندهای اتصال لحیم‌کاری سخت و نفوذی است. برای اتصال در این روش، از لایه واسط حاوی عناصر زود ذوب با سرعت نفوذ بالا در حالت جامد، استفاده می‌شود و نفوذ در حالت جامد این عناصر به فلز پایه، منجر به انجماد هم‌دمای لایه مذاب می‌شود که ناحیه اتصال، با انجام انجماد هم‌دمای کامل، فاقد فازهای بین‌فلزی است و مجموعه، در دمایی کمتر از نقطه ذوب قطعه، حرارت داده می‌شود. اتصال، با ذوب لایه واسط و رخداد انجماد هم‌دمای، با خواص متالورژیکی نزدیک به فلز پایه و با مشخصات نزدیک به اتصال ایده‌آل، تشکیل می‌گردد. این ویژگی، تفاوت اصلی و برتری اتصال TLP، نسبت به لحیم‌کاری سخت است و TLP را به‌عنوان اتصال مناسب برای کاربردهای دما بالا، تبدیل کرده است [۷]. همچنین، در این روش، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال، تطابق مناسبی با فلز پایه دارد و همین امر، موجب به‌کارگیری این روش، برای آلیاژهای حساس به روش‌های جوشکاری دیگر شده است. اصلی‌ترین و مهم‌ترین مزیت این فرایند، بالاتر بودن نقطه ذوب اتصال ایجاد شده، نسبت به دمای اتصال است. از دیگر مزیت‌های این روش، آن است که اتصال ایجاد شده، دارای ریزساختاری شبیه به فلز پایه بوده و لذا، خواص مکانیکی آن نیز، همانند خواص مکانیکی فلز پایه خواهد بود. درحقیقت، در برخی مواقع، ناحیه اتصال، از دیگر مناطق، غیرقابل تشخیص است که این امر، به دلیل انجام پدیده نفوذ در دمای بالا است. گاهی، فلز پایه، زودتر از اتصال ایجاد شده، تخریب می‌شود [۸-۱۳]. این فرایند اتصال، مابین فرایند اتصال نفوذی و لحیم‌کاری سخت بوده و می‌توان آن را لحیم‌کاری نفوذی نامید [۱۴]. اما این فرایند اتصال، در بعضی مواقع، کارآمد نبوده و نمی‌توان از آن، استفاده کرد. گاهی لایه‌ای از یک ترکیب بین فلزی ترد که تمایل به کاهش خواص اتصال دارد، با انجام این فرایند، در محل اتصال تشکیل می‌گردد. در چنین مواقعی، نمی‌توان از این فرایند، جهت ایجاد اتصال، استفاده کرد. همچنین، در اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی، در خط مرکزی اتصال، ممکن است جدایش ذرات، رخ دهد که این امر، باعث ضعف خواص اتصال خواهد شد. در چنین

¹ Transient Liquid Phase

مینگ^۱ و همکاران [۱۹]، فرآیند انجماد هم‌دما برای اتصال Mar-M247 که یک سوپرآلیاژ پایه نیکل است را به روش TLP، مورد بررسی قرار دادند. نتایج، نشان داد که بالاترین استحکام، ۴۴۳ مگاپاسکال، در شرایط عملیات حرارتی دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴۰ دقیقه، بدست آمده است. در این حالت، انجماد هم‌دما، به‌طور کامل، صورت پذیرفته است. در مناطق غنی از بوراید، استحکام و سختی، کاهش پیدا کرده و ماده، ترد شده است. در ضمن، عملیات حرارتی، جهت بهبود خواص مکانیکی، پیشنهاد شده است. عباسی خزایی^۲ و همکاران [۲۰]، تأثیر زمان و درجه حرارت همگن‌سازی را بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیر مشابه IN-738 و FSX 414 با لایه واسط MBF-80، مورد بررسی قرار دادند. نتایج، نشان داد که بعد از عملیات حرارتی در ۱۲۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت، فازهای نامطلوب در اتصال، از بین رفتند. در ماده FSX 414، در این دما، تبلور مجدد، مشاهده شد. در این درجه حرارت، مرزدانه‌ها، ذوب شده و رسوبات درشت، بوجود آمد. نتایج حاصل از آزمون استحکام برشی، نشان داد که استحکام برشی اتصال، به‌وسیله دوقلویی که بعد از همگن‌سازی در ۱۲۰۰ درجه سلسیوس بوجود آمده، افزایش یافته است [۲۰].

هدف اصلی این تحقیق، توسعه روش اتصال فاز مایع گذرا، جهت اتصال سوپرآلیاژ پایه نیکلی نایمونیک ۷۵ است؛ چرا که تاکنون، گزارشی مبنی بر استفاده از این فرآیند، جهت اتصال فلز نایمونیک ۷۵، وجود ندارد. ضمن آن‌که تمرکز این تحقیق، روی بررسی و ارزیابی مکانیزم حاکم بر ریزساختار فرآیند اتصال فاز مایع گذرا است. همچنین، در این تحقیق، اهدافی نظیر مطالعه نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب بر کیفیت اتصال، بررسی میزان استحکام کششی برشی اتصال و بررسی رفتار شکست اتصالات ایجاد شده، دنبال می‌شود.

جهت بررسی دقیق ریزساختار و تغییرات فازی ایجاد شده در منطقه اتصال، از آنالیز پراش پرتو ایکس، استفاده شد. یکی از مهم‌ترین اهداف این مقاله، توسعه روش آنالیز پراش پرتو ایکس، در مشخصه‌یابی و بررسی ریزساختاری اتصالات ایجاد شده به‌روش فاز مایع گذرا است.

موقعی، باید از این فرآیند نیز، اجتناب گردد [۱۵]. در دو دهه اخیر، تحقیقات و پژوهش‌های خوبی، روی این فرآیند، انجام شده است. در زیر، به مواردی اشاره می‌شود:

نیکدین و همکاران [۱۶]، به بررسی اثر اتصال به روش فاز مایع گذرا، بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ پرداختند. نتایج بررسی‌های ریزساختاری، حاکی از وجود حفره‌ها و تخلخل‌ها، در محل اتصالات ایجاد شده، در اتمسفر کوره و گاز آرگون است. این تخلخل‌ها و حفره‌ها، در اثر اکسیدشدن لایه واسط و فصل مشترک اتصال فلز پایه، به‌هنگام عملیات اتصال، تشکیل می‌شوند. در اتصالات ایجاد شده در خلأ، این حفره‌ها و تخلخل‌ها، مشاهده نشد. نتایج آزمایش‌های مکانیکی، نشان داد که اتصال ایجاد شده در خلأ به مدت ۱۸۰ دقیقه، بهترین استحکام برشی را ارائه می‌کند که به استحکام برشی فلز پایه، بسیار نزدیک است.

هادی‌بیگ و همکاران [۱۷]، تأثیر دما و اتمسفر محافظ اتصال را بر ریزساختار سوپرآلیاژ Inconel 738 و سوپرآلیاژ پایه-کبالت FSX 414، به روش TLP، با استفاده از لایه میانی MBF-30، بررسی کردند. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری، نشان داد که پیش از کامل شدن انجماد هم‌دما، محل اتصال، از سه منطقه ریزساختاری، تشکیل شده است: الف) محلول جامد گاما، غنی از نیکل، ناشی از انجماد هم‌دما، ب) ساختار یوتکتیک، شامل یک فاز بورایدی غنی از نیکل و محلول جامد گاما، ناشی از انجماد هم‌دما، پ) رسوب ناشی از نفوذ غیر تعادلی بور. همچنین، از مقایسه ریزساختار منطقه اتصال، برای دماهای متفاوت اتصال، استنتاج شد که با افزایش دمای اتصال، انجماد هم‌دما، تکمیل و ریزساختار محل اتصال، عاری از فازهای یوتکتیک و ترد است. بینش و همکاران [۱۸]، تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال TLP ایجاد شده با استفاده از ورقه نازک آمورف MBF-20 در سوپرآلیاژ IN-738LC را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های ریزساختاری، نشان داد که فازهای یوتکتیک تشکیل شده در ناحیه انجماد غیرهم‌دما، ذرات فازهای ثانویه بورایدی غنی از نیکل و کروم و سیلیسید نیکل هستند و رسوبات ریز سیلیسید نیکل، در اثر تحول جامد، در حین سرد شدن، در زمینه محلول جامد گاما، رسوب می‌کنند.

¹ Ming

² Abbasi-Khazaei

۲- روش تحقیق

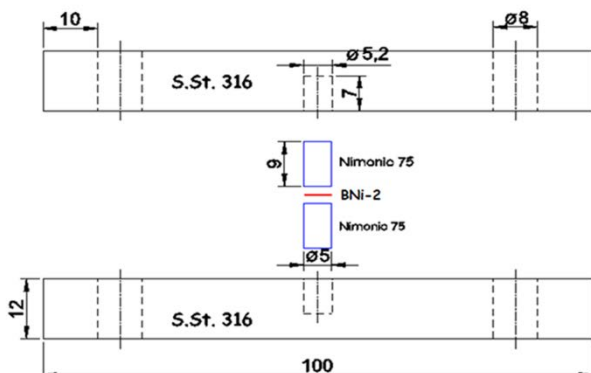
فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش، آلیاژ پایه نیکل، با نام تجاری نایمونیک ۷۵ (UNS N.06075/W.Nr. 2.4951) است که دارای نسبت کروم به نیکل، ۲۰ به ۸۰ بوده و حاوی عناصر افزودنی تیتانیوم و کربن، به صورت کنترل شده است. اغلب از این آلیاژ، جهت تولید ورق، برای جاهایی که کار در

درجه حرارت‌های بالا و نیاز به مقاومت به اکسایش و پوسته-شدن با استحکامی متوسط باشد، استفاده می‌شود [۲۱]. در جدول ۱، ترکیب شیمیایی عناصر، برای آلیاژ نایمونیک ۷۵، بر حسب درصد وزنی، ارائه شده است. لازم به ذکر است که نتایج مندرج در این جدول، بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز طیف‌سنجی نشر نوری است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فلز پایه و لایه واسط

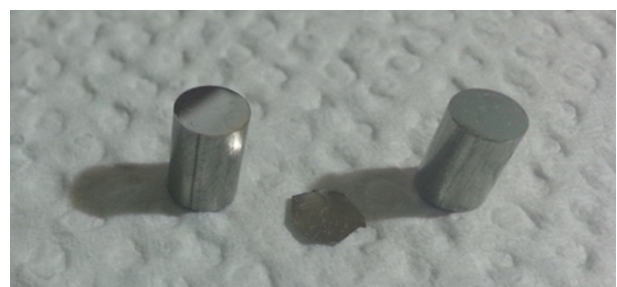
عناصر	C	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Ti	B	Ni
نایمونیک ۷۵	۰/۰۸	۱۸/۸	۰/۰۳	۲/۵۵	۰/۰۲	۰/۱	۰/۴۲	-	مابقی
لایه واسط	۰/۰۵	۷	-	۲/۸	-	۴/۳	۰/۰۵	۳/۲	مابقی

به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر نواحی مختلف، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱، استفاده شد. نمونه‌ها، جهت متالوگرافی (آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM E3-17) و مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی، با محلول کالینگ^۲، اچ شدند.



شکل ۲. تصویر و ابعاد نگهدارنده استفاده شده در این پژوهش

لایه واسط، در بین نمونه‌های آماده شده، قرار داده شد و به منظور اتصال دهی قطعات و نگهداری صحیح قطعات در کوره، از نگهدارنده‌های طراحی شده مناسب این کار، استفاده شد. نگهدارنده‌ها، مطابق شکل ۲، از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L، طراحی شد که پس از قرارگیری قطعات، درون آن، با پیچ و مهره زنگ‌نزن، بسته می‌شود. دلیل انتخاب فولاد AISI 316L، در ساخت نگهدارنده قطعات، مقاومت به اکسایش و عدم پیچیدگی در درجه حرارت بالا است. فرایند اتصال فاز مایع گذرا در کوره خلأ دما بالا، تحت اتمسفر خلأ و با فشار خلأ 10^{-5} تور و در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، به مدت ۶۰ دقیقه، انجام شد. نرخ گرمایش متوسط کوره خلأ مورد استفاده، ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه، تنظیم شد. کوره، پس از اتمام زمان نگهداری قطعات در دمای مورد نظر، خاموش شد و قطعات، به آرامی، درون کوره، تا دمای محیط، سرد شدند.



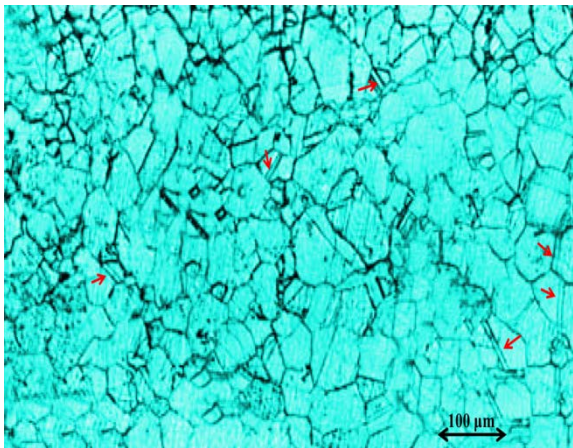
شکل ۱. نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمایش به همراه لایه

واسط آمورف BNi-2

¹ FEG-SEM

² Kalling

حالت نومارسکی^۱، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، فلز پایه، آستنیت آنیل شده تک‌فاز است که در آن، دوقلوهای حرارتی نیز، قابل مشاهده است. ریزساختارهای بدست آمده در شکل ۵، نشان داده شده است. ریزساختار کامل اتصال، شامل یک فاز محلول جامد است. هنگامی که در فرایند اتصال، انجماد هم‌دمای، اتفاق نیافتد، در مرکز اتصال، فاز یوتکتیک، مشاهده می‌شود. مرکز اتصال، با L، نشان داده شده است. فاز یوتکتیک مرکز اتصال، توسط منطقه انجماد هم‌دمای، احاطه شده است که در این منطقه، محلول جامد، مابقی ناحیه اتصال را در بر می‌گیرد.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار اولیه فلز پایه آلیاژ نایمونیک ۷۵

در هر دو ناحیه اتصال، انجماد هم‌دمای کامل و غیرکامل رسوب، مشاهده می‌شود که این رسوب، به صورت کروی و سوزنی است و با P، نشان داده شده است. ناحیه دور از اتصال که تحت تأثیر اتصال قرار نگرفته، مربوط به فلز پایه است که با B، نشان داده شده است. پهنای انحلال، در تصویر، با پیکان، نشان داده شده است. در مجموعه تصاویر نشان داده شده در شکل ۶، ریزساختار اتصال، در دمای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، برای مدت ۶۰ دقیقه، نشان داده شده است. نواحی مختلف اتصال که شامل نواحی انجماد هم‌دمای، انجماد غیرهم‌دمای و ناحیه متأثر از نفوذ است، در هر یک از تصاویر، نشان داده است. با مقایسه تصاویر SEM شکل ۶ که مربوط به درجه حرارت‌های مختلف است، به خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش درجه حرارت اتصال، نفوذ عناصر کاهنده

ترکیب شیمیایی این محلول، به صورت ۵ گرم دی کلرید مس به همراه ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک و ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول است. تا اثر دمای اتصال، روی ریزساختار، مورد بررسی قرار گیرد. جهت بررسی استحکام کششی برشی اتصالات، از استاندارد ASTM D1002، استفاده شد. سرعت کشش قطعه، ۱/۳ میلیمتر بر دقیقه است. برای این منظور، نگهدارنده‌ای از جنس فولاد کم‌آلیاژ ۴۱۴۰، طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. این نگهدارنده، در شکل ۳، نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر نگهدارنده نمونه‌های کشش جهت انجام آزمون کشش برشی

هدف از این آزمون‌ها، تعیین تأثیر درجه حرارت اتصال، بر تحولات فازی، تغییرات ریزساختاری، رفتار شکست و کیفیت اتصال فاز مایع‌گذرای بوجود آمده سوپرآلیاژ نایمونیک ۷۵ بوده است. در این آزمایش‌ها، هدف، بدست آوردن درجه حرارتی بود که نتیجه آن، تولید اتصالی باشد که به صورت کامل، در آن، انجماد هم‌دمای، رخ دهد. نمونه‌ها، به صورت اتصال لب به لب، در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، به مدت زمان ۶۰ دقیقه نگه داشته شدند.

۳- نتایج و بحث

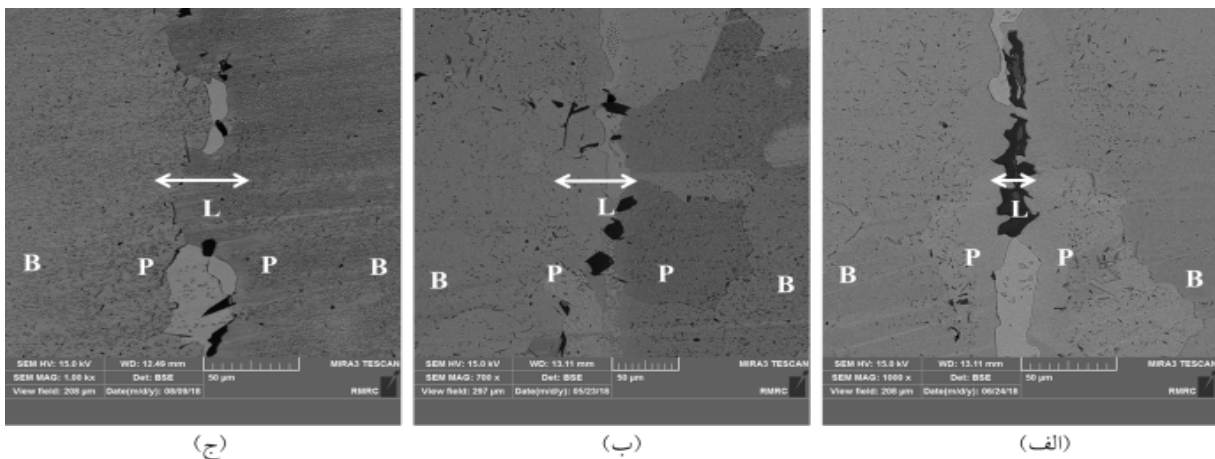
در شکل ۴، تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری در

¹ Nomarski

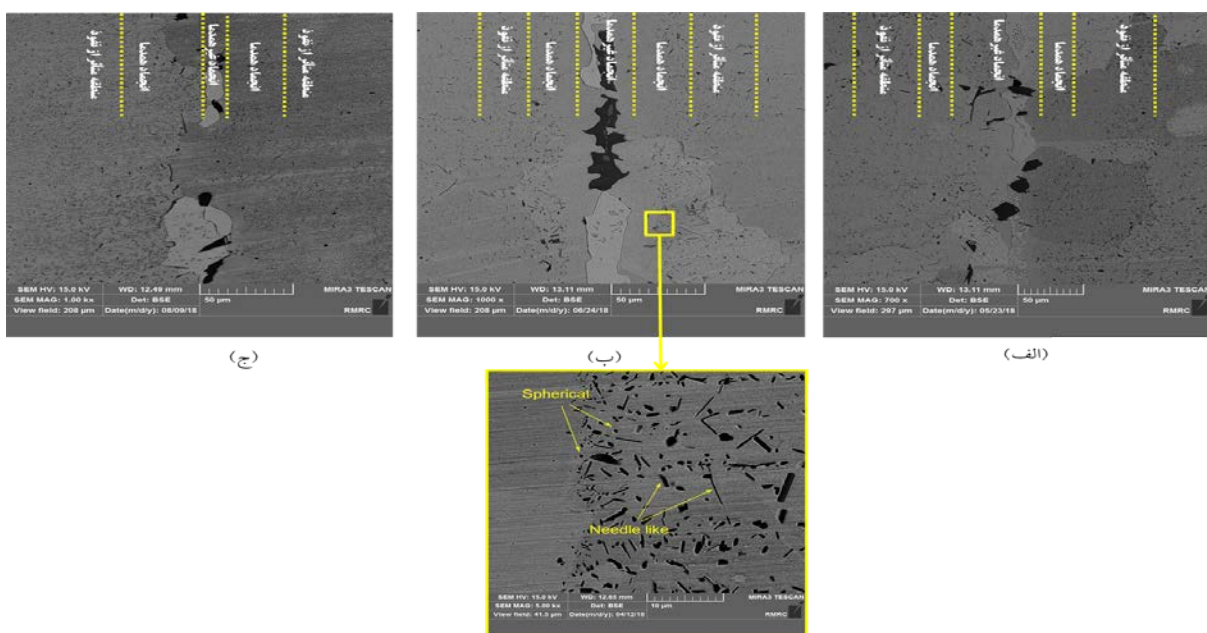
ساختار همگن شود و ترکیبات بورایدی در ناحیه متأثر از نفوذ نیز مشاهده نگردد، لازم است نمونه در این دما، به مدت زمان-های بالاتری قرار داده شود تا ساختاری همگن تر، بوجود آید. ساختار یوتکتیکی خط مرکزی، در نتیجه انجماد مذاب باقیمانده در اتصال، به هنگام سرد کردن قطعه تا دمای اتاق، شکل می گیرد. در شکل ۵، یوتکتیک خط مرکزی که با L، نشان داده شده است، در مرکز ریزساختار اتصال، یافت می شود. مشاهده می شود پهنای مذاب باقیمانده در اتصال، با افزایش دمای نگهداری در درجه حرارت اتصال، کاهش می یابد.

نقطه ذوب، شامل بور و سیلیسیوم، به داخل فلز پایه نایمونیک ۷۵، افزایش یافته و موجب شده است که مذاب باقی مانده در درز اتصال، پس از تکمیل انجماد، قسمت های قابل توجهی از حجم ترکیبات یوتکتیکی خود را از دست داده و بر پهنای ناحیه انجماد هم دما، افزوده شود.

مشاهده می شود که با رسیدن به دمای اتصال ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، ترکیبات یوتکتیکی در ناحیه درز اتصال، به حداقل میزان خود رسیده و این ناحیه، در شرایط نزدیک به انجماد هم دمای کامل، منجمد شده است. با توجه به شکل ۶ قسمت (ج)، می توان به این نتیجه رسید که در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، انجماد هم دما، اتفاق می افتد ولی برای این که



شکل ۵. انواع ریزساختار اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ نایمونیک ۷۵ در درجه حرارت های (الف) ۱۰۵۰، (ب) ۱۱۰۰ و (ج) ۱۱۵۰ درجه سلسیوس



شکل ۶. نواحی مختلف شامل منطقه انجماد غیر هم دما، انجماد هم دما و ناحیه متأثر از نفوذ در اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ نایمونیک ۷۵ در درجه حرارت های (الف) ۱۰۵۰، (ب) ۱۱۰۰ و (ج) ۱۱۵۰ درجه سلسیوس

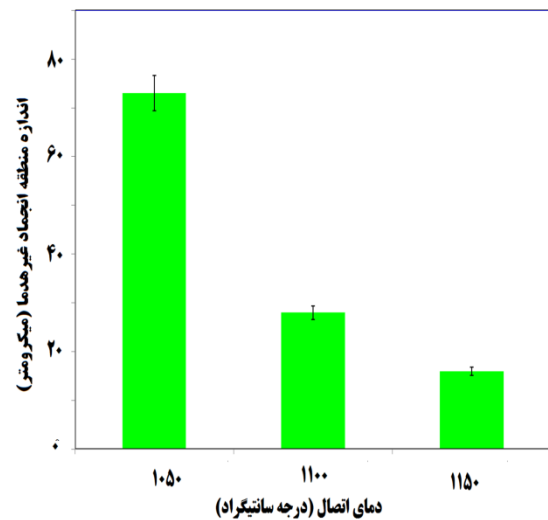
از ۶۰ دقیقه نگهداری اتصال در این دما، انجماد هم‌دما صورت می‌گیرد؛ چرا که نرخ نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب، بالاتر است.

آنالیز EDS، به منظور بررسی و تعیین فازهای تشکیل شده در دماهای مختلف اتصال و تعیین مسیر انجماد، روی نمونه‌های مختلف اتصال داده شده در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، انجام شد. نتایج EDS مذاب باقی‌مانده در ساختار انجماد، دو نوع فاز یوتکتیک را مشخص می‌کند: فاز غنی از نیکل و فاز غنی از کروم؛ آنچه که از ریزساختار مشخص است، فاز غنی از نیکل، درصد بزرگی از ساختار را به خود اختصاص داده و به صورت پیوسته و زنجیره‌ای، در طول اتصال، وجود دارد و فاز غنی از کروم، به صورت جزایر جدا از هم، در ساختار مشاهده می‌شود. آنالیز EDS نقطه‌ای این فازها، وجود غلظت بور را در این فازها، مشخص می‌کند. با استفاده از EDS، می‌توان نواحی پرکروم را در فاز یوتکتیک خط مرکزی که مطابق با بوراید کروم است، مشخص کرد.

شکل‌های ۸ تا ۱۰، نواحی پرکروم ریزساختار بوجود آمده در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد؛ در ضمن، وجود بور در هر دو فاز یوتکتیک، توسط این شکل‌ها، نشان داده شده است. بررسی‌های مشابهی که توسط اوساسا^۱ و همکاران [۲۵] صورت گرفته، رفتار انجمادی مذاب باقیمانده در اتصال TLP فلز پایه نیکل خالص را با استفاده از فلز پرکننده Ni-Cr-B، مشخص کرده است. او نشان داد که در درجه حرارت ۱۱۰۰ درجه سلسیوس، فاز محلول جامد غنی از نیکل، به وسیله انجماد هم‌دما، شکل گرفته است. به محض سردکردن تا ۱۰۴۲ درجه سلسیوس، واکنش یوتکتیک محلول جامد نیکل و Ni_3B ، بوجود آمد.

در دمای ۹۹۷ درجه سلسیوس، واکنش یوتکتیک، باعث بوجود آمدن محلول جامد نیکل، Ni_3B و CrB شد. از آنجاکه این فازها، نقطه ذوب پایین‌تر از فلز پایه دارند، وجود فازهای یوتکتیک، می‌تواند تاثیر زیان‌آوری در این دمای کاری مورد استفاده داشته باشد. به علاوه، این فازها، تردند و در طول اتصال، به صورت پیوسته‌ای، قرار دارند و باعث تضعیف خواص مکانیکی می‌شوند. در تصویر نشان داده شده در شکل

نمودار نشان داده شده در شکل ۷، اثر زمان اتصال را بر ضخامت انجماد غیرهم‌دما، در دماهای مختلف، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضخامت انجماد غیرهم‌دما، با افزایش دمای اتصال، کاهش می‌یابد؛ چرا که عنصر بور، به عنوان مهم‌ترین عنصر کاهنده نقطه ذوب، به داخل فلز پایه، نفوذ می‌کند. وجود ارتباط خطی بین پهنای ناحیه انجماد غیرهم‌دما و دمای اتصال فاز مایع گذرا، در تحقیقات مختلف، به اثبات رسیده است؛ در این راستا، می‌توان به پژوهش عبدالوند و همکاران [۲۲] روی اتصال فولاد زنگ‌نزن دو فازی به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴، پژوهش خاکیان و همکاران [۲۳] روی اتصال IN 738LC به نایمونیک ۷۵ و پژوهش یان و همکاران [۲۴] روی اتصال فولاد زنگ‌نزن دوفازی با لایه واسط پایه نیکلی، اشاره نمود.

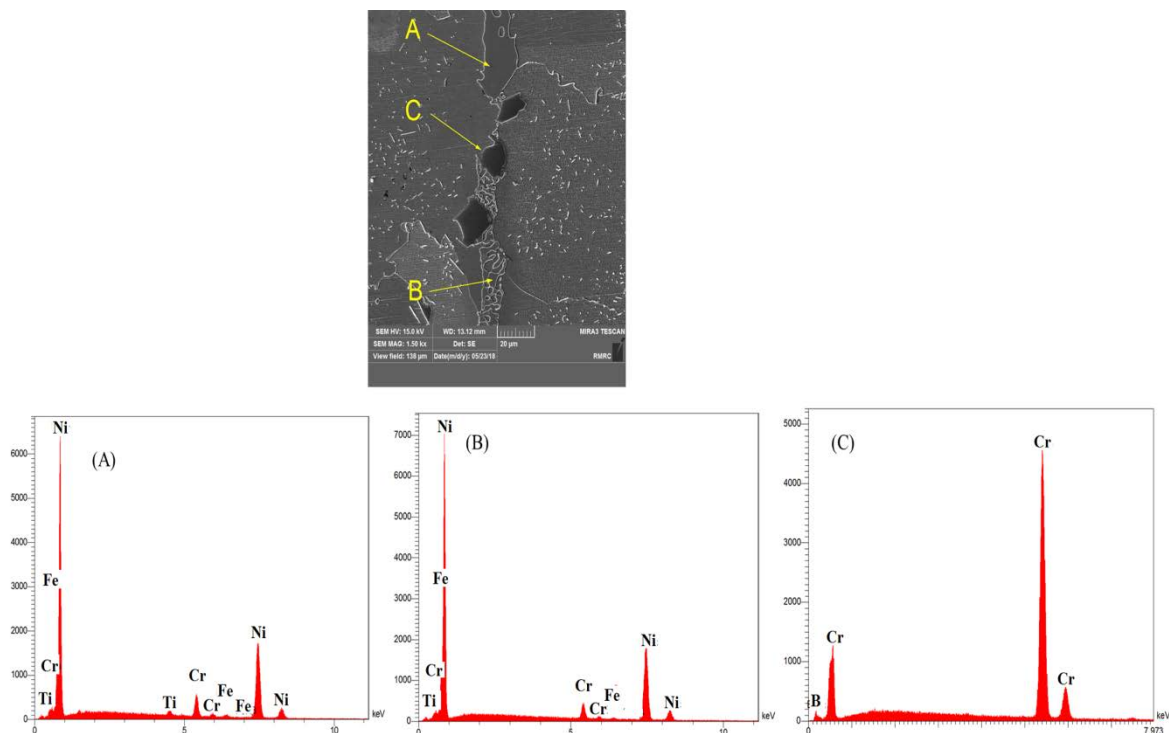


شکل ۷. تغییرات اندازه منطقه انجماد غیرهم‌دما در دماهای مختلف اتصال در مدت ۶۰ دقیقه

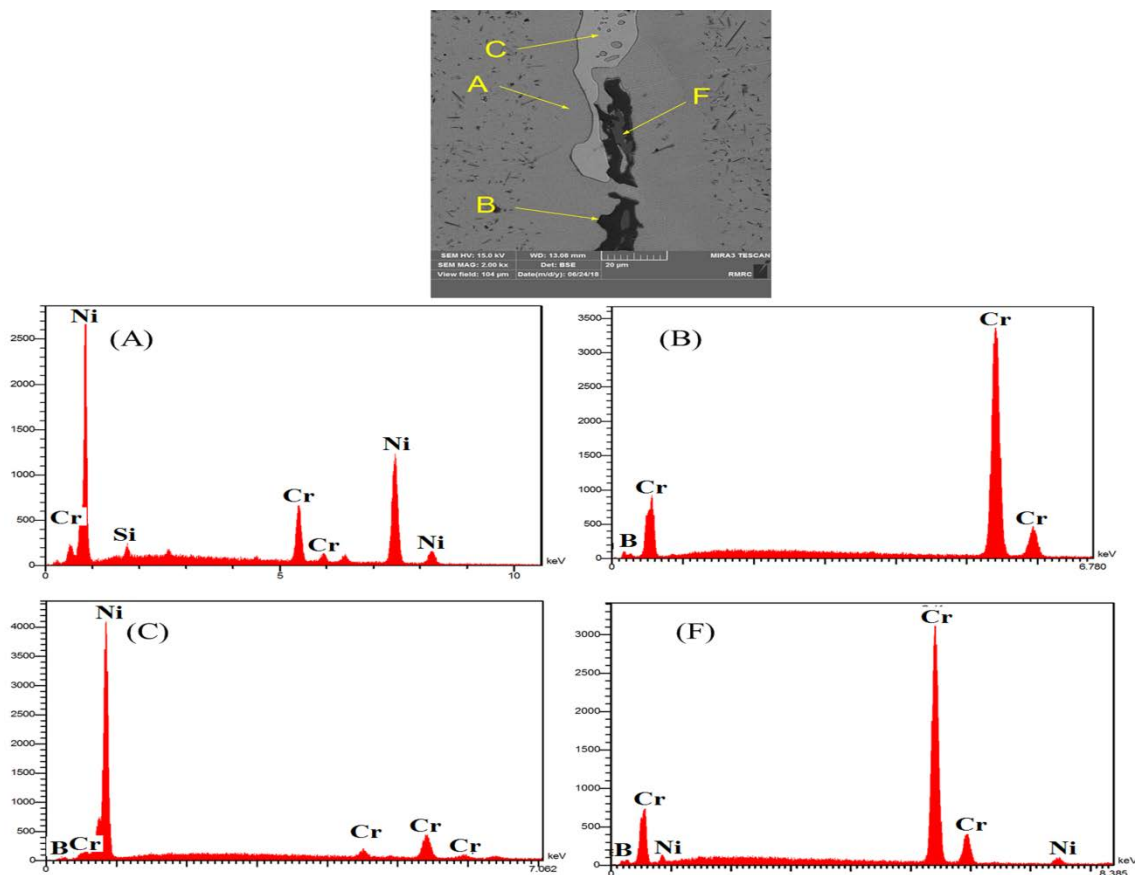
در اتصال بوجود آمده در دمای ۱۰۵۰ درجه سلسیوس که پایین‌ترین دمای اتصال است، نرخ نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب، آهسته‌تر است. اتصال، در پایان ۶۰ دقیقه انجام فرایند، هنوز شامل ساختار یوتکتیک خط مرکزی با پهنای اندکی باریک‌تر از اتصال در مدت زمان‌های کوتاه‌تر است. در اتصالاتی که در درجه حرارت بالاتری انجام شده، نرخ انجماد هم‌دمای بیشتری، مشاهده می‌شود که باعث می‌شود زمان تکمیل انجام اتصال، کاهش یابد. برای مثال، در اتصالی که در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شده، به‌طور تقریبی، بعد

¹ Ohsasa et al.

۸، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، قسمت تیره رنگ (نقطه C)، نیز، در آن، وجود دارد. لذا، می‌توان ادعا نمود که این قسمت، نشان دهنده فازهای بورایدی غنی از کروم است. فاز غنی از کروم است که عنصر کاهنده نقطه ذوب، یعنی بور



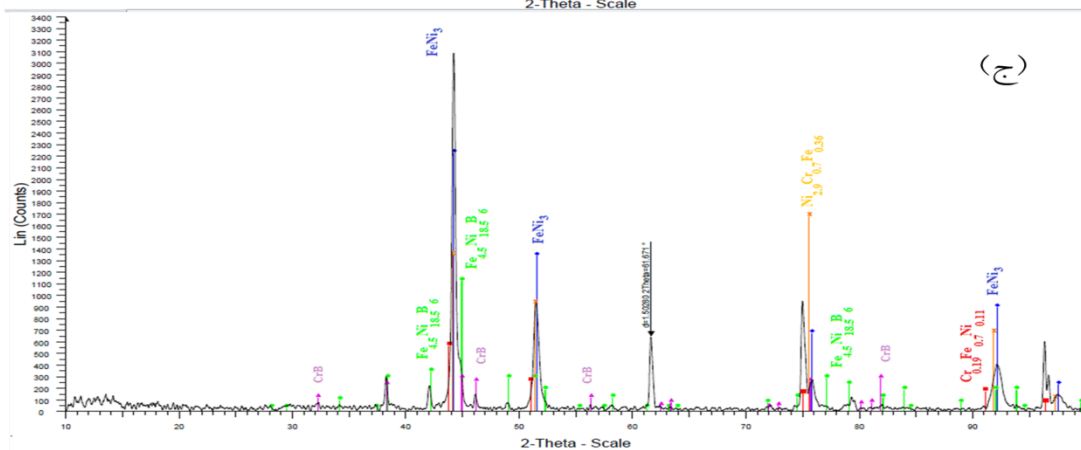
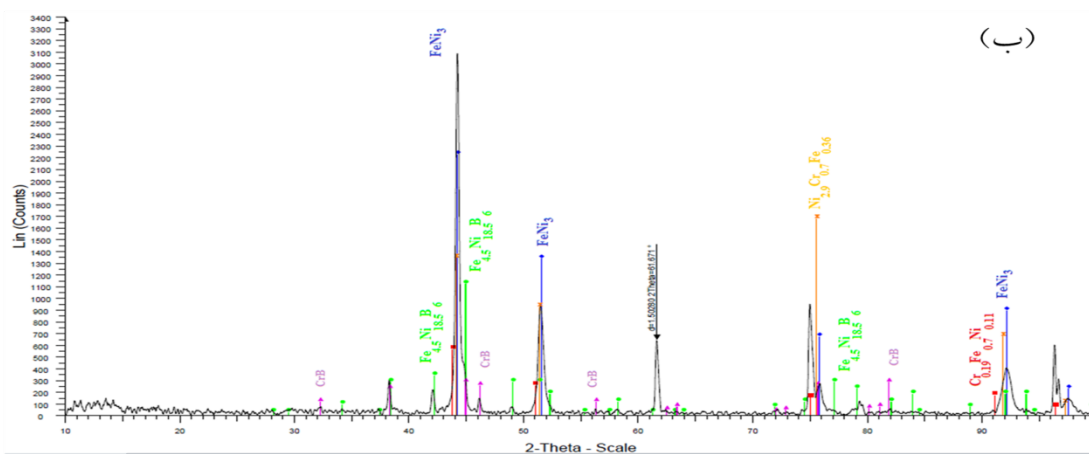
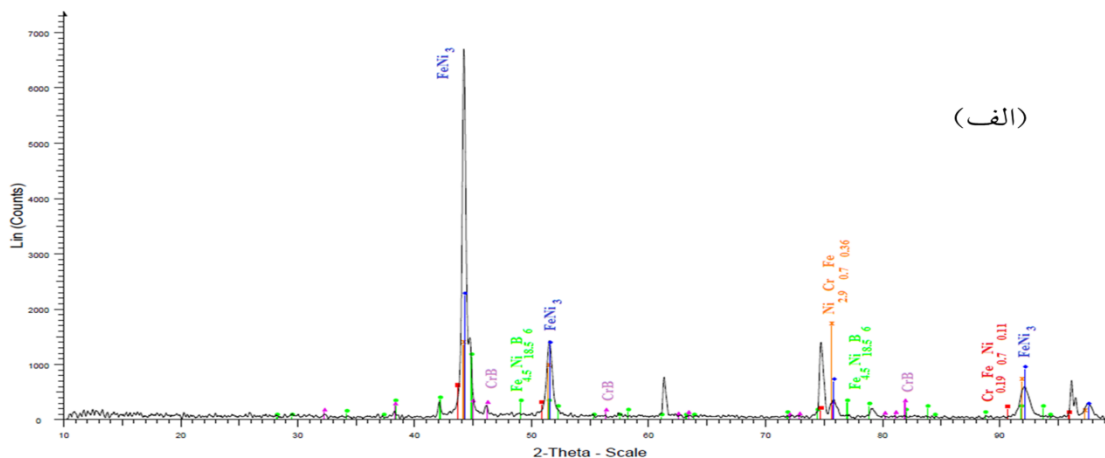
شکل ۸. آنالیز EDS فاز یوتکتیک خط مرکزی در اتصالی که در درجه حرارت ۱۰۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده شده است



شکل ۹. نتایج آنالیز EDS فاز یوتکتیک خط مرکزی در اتصالی که در درجه حرارت ۱۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده شده است

کاهش یافته‌اند به طوری که در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، ترکیبات بین فلزی مشاهده نمی‌شود و این، حاکی است که با افزایش دما، انجماد هم‌دما و همگن‌سازی، اتفاق افتاده است.

۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، در مدت زمان ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در آنالیز مشاهده می‌شود، ترکیبات بین فلزی غنی از نیکل و غنی از کروم، با افزایش دما،



شکل ۱۱. آنالیز پراش پرتو ایکس از ناحیه اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ نایمونیک ۷۵ در دماهای (الف) ۱۰۵۰، (ب) ۱۱۰۰ و (ج) ۱۱۵۰ درجه سلسیوس

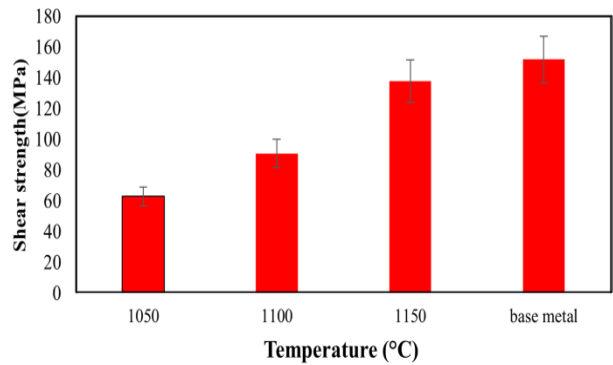
اتصال نایمونیک ۷۵ با لایه واسط BNi-2 در دمای ۱۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه (شکل ۱۱ (ب))، نشان‌دهنده آن است که در این اتصال، ترکیبات بورایدی، از جمله CrB، تشکیل شده است. آنالیز XRD مربوط به اتصال نایمونیک ۷۵

با دقت در آنالیز XRD (شکل ۱۱ (الف))، در اتصال نایمونیک ۷۵ با لایه واسط BNi-2، در دمای ۱۰۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه، ترکیبات بورایدی، از جمله CrB و $Fe_{4.5}Ni_{18.5}B_6$ ، مشاهده می‌گردد. آنالیز XRD مربوط به

برشی فلز پایه، برابر با ۱۵۲ مگاپاسکال بدست آمده است، می‌توان نتیجه گرفت که بالاترین استحکام کششی برشی اتصال، هنگامی‌که زمان، ثابت نگه داشته شود و دما، افزایش یابد، حدود ۹۱ درصد استحکام کششی برشی فلز پایه بدست خواهد آمد. همان‌گونه که توضیح داده شد، با افزایش دمای اتصال‌دهی در زمان ثابت، انتظار می‌رود که نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب، به درون فلز پایه، بیشتر شود و تشکیل انجماد هم-دما، اتفاق بیفتد که این امر، باعث کاهش حجم ترکیبات یوتکتیکی و بین‌فلزی، در مرکز اتصال می‌شود. نتیجه، آن است که در نمونه‌هایی که انجماد هم‌دما، به‌صورت کامل صورت گرفته و یا میزان انجماد هم‌دما، بیشتر است، استحکام کششی برشی بیشتری، حاصل گردد.

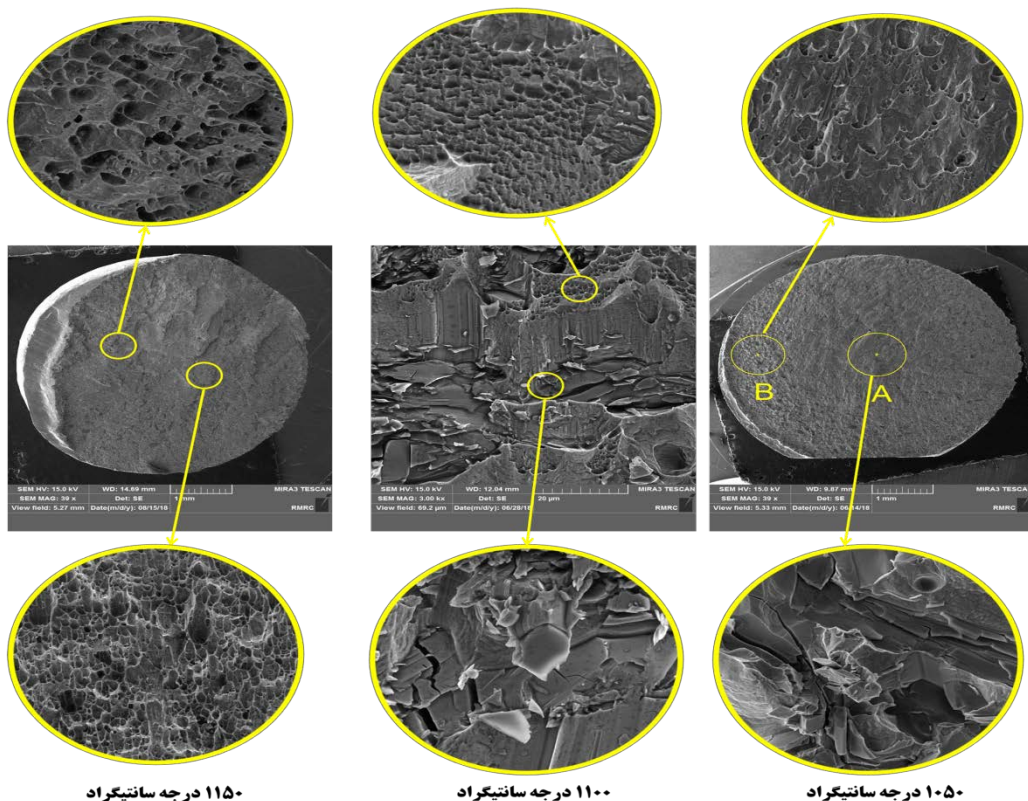
تصاویر موجود در شکل ۱۳، سطح مقطع شکست اتصالات در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، وجود حفرات و کشیدگی دانه‌ها، در اتصال ایجادشده در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، نشان از شکست نرم دارد. این بدان معناست که ساختارهای ترد، در این دما، از بین رفته و ترکی، مشاهده نشده است که شکست ترد، اتفاق بیافتد.

با لایه واسط BNi-2 در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه (شکل ۱۱ ج)، بیان‌گر آن است که در این اتصال، هیچ‌گونه ترکیبات بوراید دیگری وجود ندارد که نشان از تکمیل تقریبی انجماد هم‌دما است.



شکل ۱۲. استحکام کششی برشی نمونه‌های اتصال در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس در زمان ۶۰ دقیقه

در نمودار شکل ۱۲، استحکام کششی برشی در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس در زمان ثابت ۶۰ دقیقه، نشان داده شده است. استحکام کششی برشی، به‌ترتیب در دمای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، برابر با ۶۳، ۹۱ و ۱۳۸ مگاپاسکال، بدست آمد. با توجه به اینکه استحکام کششی



شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست اتصالات فاز مایع گذرا در دماهای مختلف به مدت ۶۰ دقیقه

۴- نتیجه گیری

نویسندگان این مقاله از مدیریت امور پژوهشی دانشگاه اراک به واسطه حمایت‌های مالی برای انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1. Chaturvedi M. C., Richards N., *Repair and overhaul of hot end gas turbine components*, Montreal, Quebec, (2002).
2. Lin, T. -S., Li, H. -X., He, P., Yang, X., Huang, Y. -D., Li, L., Han, L., "Effect of bonding parameters on microstructures and properties during TLP bonding of Ni-based super alloy", *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, Vol. 22, No. 9, (2012), 2112-2117. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61436-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61436-2)
3. Bakhtiari, R., Ekrami, A., "Transient liquid phase bonding of FSX-414 superalloy at the standard heat treatment condition", *Materials Characterization*, Vol. 66, (2012), 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.02.002>
4. Zhang, B., Sheng, G., Jiao, Y., Gao, Z., Gong, X., Fan, H., Zhong, J., "Precipitation and evolution of boride in diffusion affected zone of TLP joint of Mar-M247 superalloy", *Journal of Alloys & Compounds*, Vol. 695, (2017), 3202-3210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.306>
5. Zhang, G., Zhang, J., Pei, Y., Li, S., Chai, D., "Joining of Al₂O₃/Al composites by transient liquid phase (TLP) bonding and a novel process of active-transient liquid phase (A-TLP) bonding", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 488, No. 1, (2008), 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.084>
6. Huang, J., Dong, Y., Wan, Y., Zhao, X., Zhang, H., "Investigation on reactive diffusion bonding of SiCp/6063 MMC by using mixed powders as interlayers", *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 190, No. 1, (2007), 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.028>
7. Roh, S., Lee, C., Rhee, B., "Effects of austenite regeneration heat treatment on the TLP bonding of duplex stainless steel UNS S32750 using Fe-B-Si insert metal", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 207, (2018), 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.019>
8. Arafin, M. A., Medraj, M., Turner, D. P., Bocher, P., "Effect of alloying elements on the isothermal solidification during TLP bonding of SS 410 and SS 321 using a BNi-2 interlayer", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 106, No. 1, (2007), 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.05.049>
9. Khazaei, B. A., Asghari, G., Bakhtiari, R., "TLP bonding of dissimilar FSX-414/IN738 system with MBF80 interlayer: Prediction of solid/liquid interface location", *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, Vol. 24, No. 4, (2014), 996-1003. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63154-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63154-X)
10. Zhang, L. X., Chang, Q., Sun, Z., Xue, Q., Feng, J. C., "Effects of boron and silicon on microstructural evolution and mechanical properties of transient liquid phase bonded GH3039/ IC10 joints", *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 38, (2019), 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.016>
11. Amirkhani, A., Beidokhti, B., Shirvani, K., Rahimipour, M. R., "Two-step heating transient liquid phase bonding of Inconel 738LC", *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 266, (2019) 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.008>
12. Vazirian, S., Farzadi, A., "Dissimilar transient liquid phase bonding of Ti-6Al-4V and Co-Cr-Mo biomaterials using a Cu interlayer: Microstructure and mechanical properties", *Journal of Alloys & Compounds*, Vol. 105, (2020), 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154510>
13. Xu, Z., Li, Z., Peng, L., Yan, J., "Ultra-rapid transient liquid phase bonding of Mg alloys within 1 s in air by ultrasonic assistance", *Materials and Design*, Vol. 161, (2019) 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.015>
14. Cook, G., Sorensen, C., "Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding", *Journal of Materials Science*, Vol. 46, (2011), 5305-5323. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5561-1>

اتصال غیرمشابه سوپرآلیاژ پایه نیکل نایمونیک ۷۵، با استفاده از فرایند فاز مایع گذرا و لایه میانی BNi-2، در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، با موفقیت انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- در مقایسه مراحل انجام گرفته، مشاهده شد که با افزایش دما، نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب، به درون فلز پایه، بیشتر شده و در نتیجه ترکیبات یوتکتیکی، بین‌فلزی و رسوبات کمتری، در درز اتصال، مشاهده گردید و ناحیه انجماد غیرهم‌دما، کاهش یافت.
- افزایش دما، باعث می‌شود پهنای ناحیه متأثر از نفوذ، به دلیل نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب، افزایش یابد؛ اما وقتی که دما به ۱۱۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد، به علت انحلال بور و همگن شدن ساختار، ناحیه متأثر از نفوذ، از بین می‌رود.
- نتایج EDS از نواحی مختلف اتصال، نشان داد که ناحیه انجماد غیرهم‌دما، دارای ترکیبات بورایدی غنی از کروم و غنی از نیکل است. نواحی غنی از بوراید کروم تیره و غنی از بوراید نیکل، روشن است.
- بیشترین میزان استحکام کششی برشی، مربوط به دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، بدست آمد.
- در زمان اتصال‌دهی ثابت، با افزایش دما، استحکام کششی برشی، افزایش یافت. در این حالت، کاهش ترکیبات یوتکتیک و انجام انجماد هم‌دما، باعث این افزایش شد. بیشترین استحکام کششی برشی، در زمان ثابت، با افزایش دما، نسبت به استحکام کششی برشی فلز پایه، ۹ درصد کاهش نشان می‌دهد.
- بررسی شکست نگاری اتصالات در دماهای مختلف، نشان می‌دهد که با افزایش دمای اتصال، نوع شکست، از ترد به نیمه ترد و سپس نرم، تغییر می‌یابد. این موضوع، به کاهش ساختار یوتکتیکی و ترکیبات ترد بین‌فلزی، نظیر بورایدها، با افزایش دما، نسبت داده شد.

۵- سپاسگزاری

- microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 651, (2016), 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.087>
21. Harris, K., Erickson, G., Schwer, R., "MAR M 247 derivations - CM 247 LC DS alloy and CMSX single crystal alloys: Properties & performance", *Superalloys*, Vol. 27, (1984), 12-24. https://doi.org/10.7449/1984/Superalloys_1984_221_230
 22. Abdolvand, R., Atapour, M., Shamanian, M., Allafchian, A., "The effect of bonding time on the microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonding between SAF 2507 and AISI 304", *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 25, (2017), 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.013>
 23. Khakian, M., Nategh, S., Mirdamadi, S., "Microstructural evolution during the transient liquid-phase bonding of dissimilar nickel-based superalloys of IN738LC and NIMONIC 75", *Materials and Tehnology*, Vol. 50, (2016) 365-371. <https://doi.org/10.17222/mit.2015.072>
 24. Yuan, X., Kim, M. B., Kang, C. Y., "Microstructural evolution and bonding behavior during transient liquid-phase bonding of a duplex stainless steel using two different Ni-B-based filler materials", *Metallurgical and Materials Transaction A*, Vol. 42, No. 5, (2011), 1310-1324. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0534-6>
 25. Ohsasa, K., Narita, T., Shinmura, T., "Numerical modeling of the transient liquid phase bonding process of Ni using Ni-B-Cr ternary filler metal", *Journal of Phase Equilibria*, Vol. 20, No. 3, (1999), 199-210. <https://doi.org/10.1361/105497199770335721>
 15. de Portu, G. Glaeser, A. M., Reynolds, T. B., Takahashi, Y., Boffelli, M., Pezzotti, G., "A comparative assessment of metal-Al₂O₃ joints formed using two distinct transient-liquid-phase-forming interlayers", *Journal of Materials Science*, Vol. 50, No. 6, (2015), 2467-2479. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8803-1>
 16. Nikdin, H., Ekrami, A. A., "Effect of transient liquid phase diffusion bonding on mechanical properties of aisi 304 stainless steel", *Materials Science & Engineering Sharif*, Vol. 23, No. 39, (2007), 5-9. http://sjme.journals.sharif.edu/article_5867.html?lang=en
 17. Hadibeyk, S., Beidokhti, B., Sajadi, A., "Investigation of TLP bonded microstructure between Inconel 738 and FSX 414", *Proceedings of 4th International Engineering Materials & Metallurgy Conference*, Tehran, (2015). <http://4.imatconf.cnf.ir/en/>
 18. Binesh, B., Jazayeri Gharehbagh, A., Foroghi, A. R., "Microstructure evolution and mechanical properties of TLP bonded joint of IN-738LC superalloy using MBF-20 amorphous foil TT IN-738LC", *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 35, No. 3, (2016), 123-137. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jame.35.3.123>
 19. Liu, M., Sheng, G., He, H., Jiao, Y., "Microstructural evolution and mechanical properties of TLP bonded joints of Mar-M247 superalloys with Ni-Cr-Co-W-Ta-B interlayer", *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 246, (2017), 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.021>
 20. Abbasi-Khazaei, B., Jahanbakhsh, A., Bakhtiari, R., "TLP bonding of dissimilar FSX-414/IN-738 system with MBF-80 interlayer: The effect of homogenizing treatment on