



بررسی تأثیر زمان اتصال بر میکروساختار و خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرا بین اینکونل 718 و اینکونل 600

علی خرم¹، اکبر داودی جمالویی²، عابد جعفری³، محمود مرادی^{4*}

1- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- کارشناس ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

* ملایر، صندوق پستی 65719-95863، moradi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 اسفند 1395

پذیرش: 20 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 06 خرداد 1396

کلید واژگان:

اتصال فاز مایع گذرا

اینکونل 718

اینکونل 600

خواص مکانیکی

چکیده

در این مقاله فرآیند اتصال فاز مایع گذرا بین آلیاژهای اینکونل 718 و اینکونل 600 توسط لایه میانی BNi-2 به ضخامت 50 میکرون مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند اتصال فاز مایع گذرا در دمای 1050°C برای مدت زمان 5، 25 و 45 دقیقه انجام شد. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روشی نشر میدان (FE-SEM) انجام پذیرفت، همچنین استحکام برشی این اتصالات اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که ساختار اتصال از سه ناحیه منطقه انجماد هم‌دما، منطقه انجماد غیرهم‌دما و منطقه متأثر از نفوذ تشکیل شده بود. ترکیبات بین فلزی برایی در انجماد غیرهم‌دما در زمان 5 دقیقه تشکیل شد. با افزایش زمان از 5 به 45 دقیقه نواحی انجماد غیرهم‌دما از بین رفته و انجماد هم‌دما کامل شد. با افزایش زمان و افزایش نفوذ عنصر بور به فلز پایه، نواحی متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 718 پایدار بود و گسترش یافت، اما این نواحی برای آلیاژ اینکونل 600 با افزایش زمان از بین رفت و همگن سازی شد. در اثر حذف ترکیبات برایی در اثر افزایش زمان، تغییرات سختی در ناحیه اتصال یکنواخت تر شد و مقدار سختی ناحیه اتصال به حدود 280 ویکرز رسید. نتایج حاصل از استحکام برشی نشان داد با افزایش زمان اتصال دهی از 5 به 45 دقیقه، استحکام برشی از 250 به 410 مگاپاسکال افزایش یافت.

Investigation on the effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonding between Inconel 718 and Inconel 600

Ali Khorram¹, Akbar Davoodi Jamaloei², Abed Jafari³, Mahmoud Moradi^{4*}

1- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Material Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Esfahan, Iran

3- Department of Material and Metallurgy Engineering, Iran University of Industries and Mines (IUIM), Tehran, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

* P.O. B. 65719-95863, Malayer, Iran, moradi@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 March 2017

Accepted 10 May 2017

Available Online 27 May 2017

Keywords:

Transient liquid phase bonding (TLP)

Inconel 718

Inconel 600

mechanical properties

ABSTRACT

In this paper, transient liquid phase (TLP) bonding process between Inconel 718 alloy and Inconel 600 alloy using a BNi-2 interlayer with 50 μm thickness was investigated. Transient liquid phase bonding process was performed at 1050°C for 5, 25 and 45 min. Microstructure evaluation was carried out through optical microscopy, field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). Also, bonding shear strength was measured. The results showed that the joint microstructure was formed of three zones including isothermal solidification zone (ISZ), thermal solidification zone (ASZ) and diffusion affected zone (DAZ). At the time of 5 min, boride intermetallic compounds in thermal solidification zone were formed. Isothermal solidification was completed and thermal solidification zone vanished by increasing the bonding time from 5 to 45 min. Diffusion affected zone of the Inconel 718 alloy was persistent and expanded by increasing the time and diffusion of B element to parent metals, but this region in Inconel 600 alloy vanished and the homogenization process occurred by increasing the bonding time. Also, because of the removal of boride intermetallic compounds, changes in hardness in the joint region were smoother and the hardness value of joint region was about 280 HV. The results of shear strength showed that the bonding strength was increased from 250 MPa to 410 MPa with increasing the bonding time from 5 to 45 min, respectively.

1- مقدمه

به اکسیداسیون و خوردگی بالایی بوده و برای کاربردهای دما بالا و همچنین

محیط‌های تحت فشار و انرژی کینتیک بالا بسیار مناسب است [1]. در درجه

آلیاژهای اینکونل از خانواده محلول جامد نیکل- کروم است که دارای مقاوم

Please cite this article using:

A. Khorram, A. Davoodi Jamaloei, A. Jafari, M. Moradi, Investigation on the effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonding between Inconel 718 and Inconel 600, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 101-107, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برای اتصال دهی آلیاژهای نیکل به کار می‌رود. این روش بسیاری از محدودیت ها و معایب روش‌های معمول ذوبی را برای آلیاژهای پایه نیکل دربر ندارد. خرم و همکاران اتصال آلیاژهای اینکونل 718 به اینکونل 600 را با استفاده از لحیم‌کاری به کمک لیزر و با لایه میانی BNi-2 مورد بررسی قرار دادند. این محققین دریافتند که در ناحیه اتصال ترکیبات محلول جامد نیکل و براینیکل تشکیل شد و در ناحیه فصل مشترک بین فلز پایه با ناحیه اتصال ترکیبات براید کروم تشکیل شد [11]. خرم و همکارانش [12] در مقاله‌ای دیگر از ماده پرکننده BNi-2 برای اتصال فولادهای زنگ‌نزن 321 و 410 استفاده کردند. ایشان نتیجه گرفتند فازهای یوتکتیک مشاهده شده در اتصال به سبب انجماد هم‌دمای ناقص ماده پرکننده است. این فازها محلول جامد نیکل و بورید نیکل نزدیک سطح مشترک و بورید کروم در مرکز اتصال است. سرینواسان و همکاران فرایند لحیم‌کاری سخت را برای اینکونل 600 به فولاد زنگ‌نزن 316L با لایه واسط BNi-2 بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند با وجود حضور ترکیبات بین فلزی زیاد در ناحیه اتصال مشهود، ولی با این حال استحکام ناحیه اتصال مناسب و قابل قبول بود [13]. فرایند فاز مایع گذرا فرایندی است که سبب از بین رفتن ترکیبات بین فلزی و ترکیبات سخت در ناحیه اتصال فرایند لحیم‌کاری می‌شود. در تحقیق دیگری که روی سوپرآلیاژی پایه نیکلی انجام گرفت، تأثیر زمان پیونددهی بر عرض ناحیه اتصال و فازهای آن بررسی شد. در این مطالعه فلز پایه از جنس اینکونل 738 LC و لایه واسط از جنس AWS-BNi-3 بودند. گزارش داده شد که با افزایش زمان اتصال دهی مقدار ترکیبات یوتکتیکی و فازهای بین فلزی ناشی از انجماد غیرهم‌دمای کاهش می‌یابد، به‌طوری که در زمان 30 دقیقه به طور کامل از بین رفتند [14]. آرافین و همکاران به بررسی مدل اتصال فاز مایع گذرا آلیاژهای اینکونل 718 به اینکونل 625 پرداختند. آن‌ها زمان و دمای مناسب برای اتصال دهی این آلیاژها را با استفاده از مباحث مدل‌سازی پیشنهاد کردند که دمای مناسب برای انجام اتصال این دو آلیاژ در محدوده 1050 تا 1120 درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. بررسی‌های تجربی ریزساختاری در دماها و زمان‌های مختلف و همچنین بررسی‌های مکانیکی اتصال را گزارش کرده‌اند [15].

اهمیت اتصال آلیاژ اینکونل 718 به اینکونل 600 در موتوهای هوایی سبب تحقیق پیرامون یک اتصال بهینه با استحکام بالاتر از اتصال لحیم‌کاری سخت شده است. فرایند فاز مایع گذرا سبب از بین رفتن ترکیبات بین فلزی و سخت در ناحیه اتصال می‌شود و می‌توان این فرایند را به عنوان روش مناسبی برای از بین بردن ترکیبات مخرب گزارش داده شده در ناحیه اتصال ارائه کرد. حذف ترکیبات بین فلزی و مخرب در ناحیه اتصال سبب افزایش استحکام اتصال می‌شود. با توجه به گزارشات پیشین تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی پیرامون اتصال فاز مایع گذرا بین آلیاژ اینکونل 718 به آلیاژ اینکونل 600 به طور تجربی ارائه نشده است و گزارشی از استحکام، سختی و ساختار این اتصال موجود نیست؛ بنابراین بررسی این اتصال بسیار مهم و حائز اهمیت است. در این تحقیق بررسی تجربی ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ اینکونل 718 به اینکونل 600 مورد بحث قرار می‌گیرد.

2- روش انجام آزمون

در این مطالعه از ورق‌های آلیاژهای اینکونل 718 و اینکونل 600 به ضخامت 2 میلی‌متر، از لایه میانی BNi-2 با ضخامت 50 میکرون به عنوان لایه میانی استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و لایه میانی استفاده شده در این پژوهش در جدول 1 ارائه شده است. نمونه‌ها جهت آماده‌سازی برای اتصال در

های حرارت بالا روی سطح اینکونل لایه مقاوم، پایدار و غیرفعال از اکسید تشکیل می‌شود که از خوردگی بیشتر جلوگیری می‌کند [2]. آلیاژ اینکونل 718 جز آلیاژهای رسوب سخت‌شونده است که استحکام کششی این آلیاژ به وسیله فرایند آنیل انحلالی و پیرسختی از طریق کنترل رسوب‌گذاری فازهای γ' و γ'' در فاز γ افزایش می‌یابد. این آلیاژ بیشتر در دماهای متوسط (650°C) مورد استفاده قرار می‌گیرد و از جمله آلیاژهای پرمصرف پایه نیکل است که در دیسک‌های توربین گاز کاربرد ویژه‌ای دارد. از طرفی آلیاژ اینکونل 600 جز آلیاژهای محلول جامد محسوب می‌شود و در دماهای کاری بسیار بالا (1050°C) در صنایع برودتی، موتوهای هوایی و صنایع الکترونیکی به کار می‌روند [2,1]. استفاده از سوپرآلیاژها در صنعت روبه گسترش است؛ بنابراین فرایندهای مختلف مهندسی بر این مواد انجام می‌پذیرد [4,3].

جایگزینی و اتصال آلیاژ اینکونل 600 با آلیاژ اینکونل 718 در محیط‌های بسیار خورنده جهت کاهش جلوگیری از خوردگی و همچنین جایگزینی اینکونل 718 با اینکونل 600 برای افزایش خواص مکانیکی - سایشی ضرورت اتصال بین این دو آلیاژ را مطرح می‌سازد. جوشکارهای ذوبی معمول برای آلیاژهای پایه نیکل سبب جدایش کاربیدهای نیوبوم در مناطق بین دندریتی و حساسیت به ترک گرم، ریز ترک‌های انجمادی، تغییر ریزساختار تعادلی و افت خواص مکانیکی می‌شود [6,5]. مرتضایی و همکاران اتصال آلیاژ اینکونل 718 را به فولاد 310 به روش GTAW مورد بررسی قرار دادند. این محققین گزارش دادند که جهت جلوگیری از ترک ذوبی در منطقه متأثر از حرارت فلز پایه اینکونل 718 باید عملیات حرارتی پیش از جوشکاری انجام شود، همچنین گزارش شد که در منطقه جوش شیب غلظتی از عناصر آلیاژی اتفاق افتاد [7]. رام و همکاران اتصال آلیاژ اینکونل 718 را به روش جوشکاری لیزر مورد مطالعه قرار دادند. طبق گزارشات در ناحیه جوش ترکیبات بین فلزی غنی از نیوبوم تشکیل شد که سبب کاهش خواص مکانیکی شد. با عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای 980 درجه سانتی‌گراد میزان زیادی از این ترکیبات مخرب کاهش یافت و با عملیات حرارتی در دمای 1080 درجه سانتی‌گراد این ترکیبات به طور کامل از بین رفتند [8].

فرایند بریزینگ نفوذی یا اتصال فاز مایع گذرا زیر مجموعه‌ای از فرایندهای نفوذی است که سادگی فرایندهای معمول بریزینگ را با کارایی بالای اتصال نفوذی ترکیب کرده است که نتیجه آن اتصالی عالی با خواص بسیار مشابه فلز پایه است. در این فرایند از لایه میانی حاوی عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند بور، سیلیسیم و فسفر استفاده می‌شود. این عناصر با حرارت دهی نمونه و ذوب لایه میانی به فلز پایه نفوذ کرده و دمای ناحیه اتصال را افزایش می‌دهد که سبب انجماد هم‌دمای در ناحیه اتصال می‌شود [9,10]. در واقع انجماد هم‌دمای یکی از تفاوت‌های اصلی اتصال فاز مایع گذرا با فرایند لحیم‌کاری سخت است. از دیگر تفاوت‌های این دو فرایند می‌توان به تغییرات غلظتی کمتر عناصر فلز پایه و لایه میانی و دمای کاری بالاتر از دمای اتصال دهی برای اتصال فاز مایع گذرا نسبت به اتصال لحیم‌کاری سخت اشاره کرد [9]. فرایند اتصال فاز مایع گذرا برای اتصال بسیاری از سیستم‌های فلزی و سرامیکی که قادر به اتصال دهی به کمک روش‌های معمول جوشکاری ذوبی نیستند، به کار برده شده است. موارد استفاده از این روش اتصال دهی شامل موارد زیادی از جمله تولید و تعمیر توربین‌های گازی در صنایع هوافضا تا اتصال خطوط مدار در صنعت میکروالکترونیک می‌شود [10].

به طور کلی لحیم‌کاری توسط لایه میانی حاوی عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند بور و سیلیسیم به عنوان یکی از روش‌های شناخته شده و مؤثر

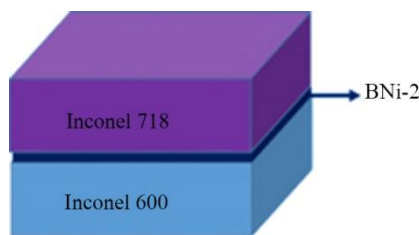
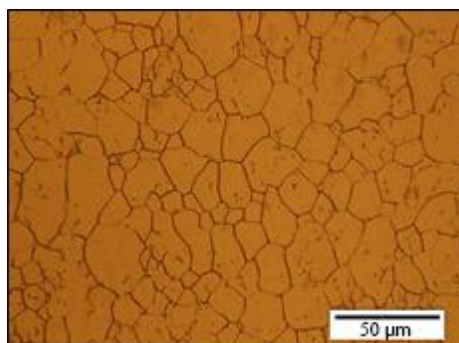


Fig. 1 Schematic drawing of the samples fixing

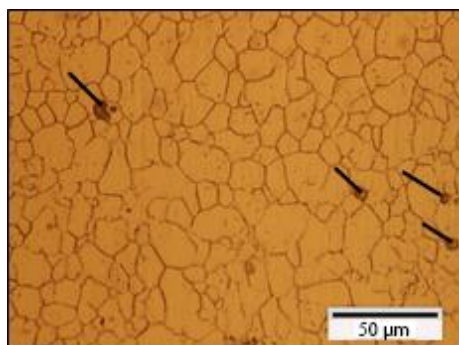
شکل 1 نحوه سرهم‌بندی نمونه‌ها به منظور اتصال دهی

محلول جامد فاز γ که دارای ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار³ است. البته محلول جامد γ در آلیاژ اینکونل 718 شامل عناصر حل‌شده بیشتری است که سبب افزایش استحکام فاز زمینه می‌شود، ولی در آلیاژ اینکونل 600 عناصر حل‌شونده غالب کمتر (کروم و آهن) هستند. وجود ذرات فاز γ در آلیاژ اینکونل 718 به دلیل وجود عناصر نیوبیوم و تیتانیوم سبب افزایش استحکام در این آلیاژ می‌شوند، اما این استحکام‌بخشی در آلیاژ اینکونل 600 به دلیل حضور بسیار جزیی عناصر غالب نیست.

تصویر نوری از اتصال در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 5 دقیقه در شکل 3 آورده شده است. به طور کلی نواحی اتصال حاصل از فرایند فاز مایع گذرا شامل منطقه انجماد هم‌دما (ISZ)⁴، منطقه انجماد غیرهم‌دما (ASZ)⁵ و منطقه متأثر از نفوذ (DAZ)⁶ است. براساس شکل 3 دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 5 دقیقه سبب بروز هر سه منطقه ASZ، ISZ و DAZ شده



الف



ب

Fig. 2 Optical microstructure of a- Inconel 600 alloy, b- Inconel 718 alloy

شکل 2 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار الف- آلیاژ اینکونل 600، ب- آلیاژ اینکونل 718

ابعاد $40 \times 10 \times 2$ میلی‌متر بریده شدند. سطوح نمونه‌ها جهت حذف آلودگی‌های سطحی با کمک سنباده شماره 80 تمیزکاری شد. یکی از سطوح نمونه‌ها با سنباده‌های شماره 120 تا 1200 آماده‌سازی شد. فویل لایه میانی نیز در ابعاد 30×10 میلی‌متر بریده شد. سپس لایه میانی و نمونه‌ها با دستگاه اولتراسونیک حاوی استن به مدت یک ساعت چربی‌زدایی شدند. پس از آن نمونه‌ها تا زمان پیونددهی در استون قرار گرفتند.

فویل BNi-2 در بین فلزات پایه قرار داده شد. شکل 1 نحوه سرهم‌بندی قطعات را نشان می‌دهد. دمای اتصال دهی 1050 درجه سانتی‌گراد براساس گزارشات آرافین و همکاران و همچنین استاندارد (AWS A5.8) جهت استفاده مناسب از لایه میانی) انتخاب شد. با توجه به گزارشات پیشین زمان اتصال دهی 5، 25 و 45 دقیقه نیز برای اتصال دهی انتخاب شد. عملیات اتصال دهی در کوره خلا با 10^{-5} Torr انجام شد و سرعت سرد و گرم شدن کوره برابر با 10 درجه بر دقیقه بود. برای ارزیابی ریزساختار بعد از فرایند اتصال دهی، نمونه‌ها با فرایند معمول متالوگرافی سنباده‌زنی و پولیش شدند. سطح مقطع اتصال توسط محلول 10% اسید اگزالیک به همراه 90% آب مقطر الکترواچ شد. پس از اچ نمودن نمونه، ریزساختار مناطق مختلف اتصال توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان¹ (FE-SEM) و میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز عنصری نیز توسط طیف‌سنجی اشعه X انرژی متفرق² (EDS) انجام شد. سختی بهترین و بدترین نمونه از ناحیه اتصال و فلز پایه نیز توسط آزمون ریزسختی‌سنجی و با نیروی 50 گرم انجام شد. در نهایت استحکام برشی ناحیه اتصال اندازه‌گیری شد. استحکام برشی بهترین و بدترین نمونه اتصال توسط فیکسچر طراحی شده برای اندازه‌گیری استحکام اتصالات فاز مایع گذرا که نیروی کششی دستگاه کشش را به نیروی برشی تبدیل می‌کند، اندازه‌گیری شد [17,16]. دستگاه کشش مورد استفاده مدل FM2750 ساخت شرکت Wolpert بود. مقادیر استحکام برشی گزارش شده میانگین تست 3 نمونه است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی‌های ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلزات پایه در شکل 2 آورده شده است. تصاویر ریزساختار اینکونل‌های 718 و اینکونل 600 شامل دانه‌های

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلزات پایه و لایه میانی (برحسب درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition (wt.%) of the base metals and the interlayer.

عناصر	اینکونل 718	اینکونل 600	لایه میانی BNi-2
کروم	18.03	14.7	7
آهن	Bal	10	3
سیلیسیم	16.01	0.13	4.5
مولیبدن	3.11	0.32	-
نیکل	53.16	Bal	Bal
بور	0.002	-	3.2
مس	0.07	0.24	-
تیتانیوم	1.15	0.34	9
نیوبیوم	5.48	0.03	-
کربن	0.07	0.02	0.06
منگنز	0.08	0.32	-

³ Face centered cubic

⁴ Isothermally Solidified Zone

⁵ A-thermally Solidified Zone

⁶ Diffusion Affected Zone

¹ Field Emission Scanning Electron Microscopy

² Energy dispersive X-ray spectroscopy

تکمیل فرایند انجماد هم‌دما بود. منطقه A و C در شکل 4 به ترتیب نشان‌دهنده ترکیبات برای کرم و برای نیکل است. گزارش شده است این ترکیبات برای سبب کاهش خواص مکانیکی و انعطاف‌پذیری اتصال می‌شوند و همچنین مقاومت به خوردگی کمی نیز دارند [10]. از طرفی دیگر دمای ذوب ناحیه اتصال به دلیل حضور این ترکیبات در ناحیه اتصال به شدت

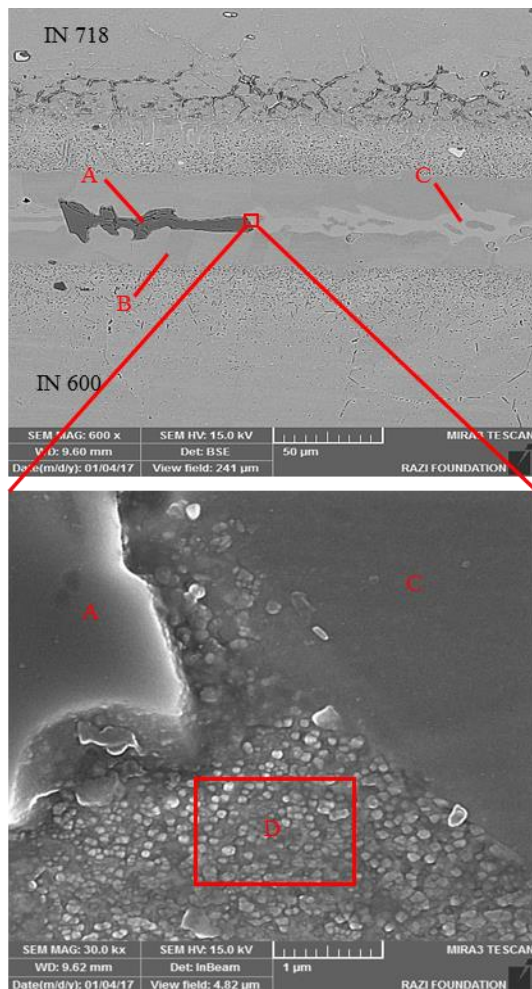


Fig. 4 SEM image of microstructure for TLP bonding of Inconel 718 to Inconel 600 at 1050°C for 5 min

شکل 4 تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ اینکونل 600 به 718 در دمای 1050°C و زمان 5 دقیقه

جدول 2 ترکیب شیمیایی نواحی مختلف در شکل 4

Table 2 Chemical composition of different regions in the Fig. 4

ناحیه	D	C	B	A	عنصر
	3.39	2.02	5.87	52.84	کرم
	2.52	1.94	4.36	0.24	آهن
	4.12	0.09	2.18	0.06	سیلیسیم
	-	-	-	2.09	مولیبدن
	60.40	62.5	60.92	0.47	نیکل
	27.71	29.96	24.99	42.57	بور
	0.04	0.08	0.06	0.09	تیتانیوم
	1.82	1.5	1.62	1.64	نیوبیوم
فاز پیشنهادی	Ni3Si+ γ	برای نیکل	γ	برای کرم	

است. در ابتدای فرایند لایه میانی ذوب شده و قسمتی از فلز پایه را نیز در خود حل می‌کند. در ادامه و با نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به درون فلز پایه منطقه ISZ در اثر انجماد هم‌دما به وجود می‌آید که از نواحی فلز پایه شروع شده و به سمت مرکز اتصال گسترش یافته است. منطقه انجماد غیرهم‌دما به دلیل عدم تکمیل انجماد هم‌دما به وجود می‌آید؛ بنابراین این منطقه با توجه به پس‌زده شدن عناصر آلیاژی و ترکیب غیریکنواخت در اثر انجماد شامل یوتکتیک‌های زود ذوب است که ضمن کاهش نقطه ذوب ناحیه اتصال می‌تواند سبب کاهش خواص مکانیکی ناحیه اتصال شود. نواحی متأثر از نفوذ در فلزات پایه نزدیک به ناحیه اتصال نیز در شکل 3 مشخص شده است. این نواحی در اثر نفوذ عناصر آلیاژی به درون فلز پایه به وجود می‌آید که در این مطالعه عنصر بور به عنوان عنصر کاهنده نقطه ذوب در اثر نفوذ به سمت فلزات پایه سبب به وجود آمدن ترکیبات مختلف در این نواحی می‌شود.

تصویر میکروسکوپ الکترونی اتصال در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 5 دقیقه در شکل 4، همچنین آنالیزهای عنصری از مناطق مختلف این اتصال در جدول 2 آورده شده است. نتایج حاصل از آنالیز عنصری نواحی مختلف نشان داد که در نواحی انجماد هم‌دما (ناحیه B در شکل 4) فاز پریوتکتیک محلول جامد γ تشکیل شده است. در فرایند انجماد هم‌دما پس‌زده شدن عناصر وجود ندارد، پس منطقی است که فاز تشکیل شده در این فرایند فاز محلول جامد γ باشد [18]. در واقع نیروی محرکه این اتفاق به وجود آمدن تغییرات ترکیبی در دمای ثابت به دلیل نفوذ عناصر آلیاژی است؛ بنابراین در ابتدا فاز اولیه محلول جامد غنی از نیکل تشکیل شده و هم‌زمان غلظت عنصر بور در ناحیه اتصال به واسطه نفوذ کاهش یافته است. اما نفوذ تا غلظت مورد نیاز به دلیل کافی نبودن زمان اتصال در این دما تا تکمیل انجماد هم‌دما ادامه نیافته و بدون تکمیل شدن انجماد هم‌دما ناحیه اتصال سرد شده است. در ضمن سرمایش انجماد غیرهم‌دما در ناحیه مرکزی اتصال حاصل شد. نتایج آنالیز عنصری از ناحیه انجماد غیرهم‌دما در مرکز اتصال (جدول 2) وجود فازهای برای نیکل، برای کرم به همراه فازهای سیلیسایدی را نشان داد که با پژوهش‌های پیشین در تطابق است [19]. نیروی محرکه انجماد غیرهم‌دما اختلاف دما و فرایند سرد شدن است؛ بنابراین فرایند پس‌زده شدن عناصر در این ناحیه وجود دارد که منجر به ایجاد ترکیبات مختلفی می‌شود. وجود ترکیبات برای دما در ناحیه مرکزی اتصال نشان‌دهنده انجماد غیرهم‌دما در این مناطق و عدم وجود زمان کافی برای

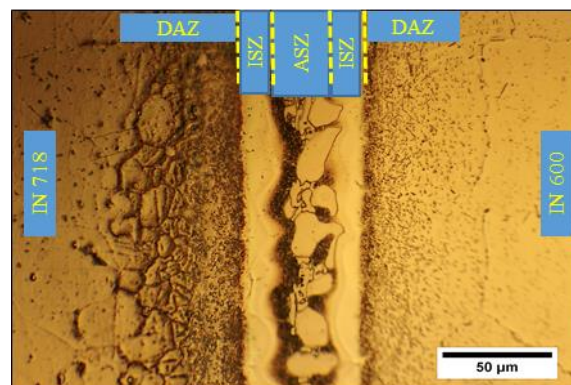
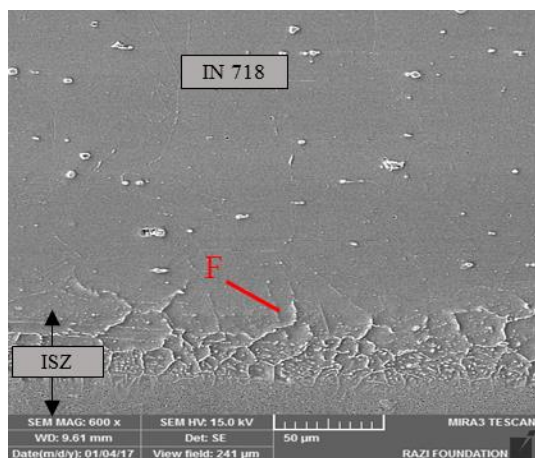


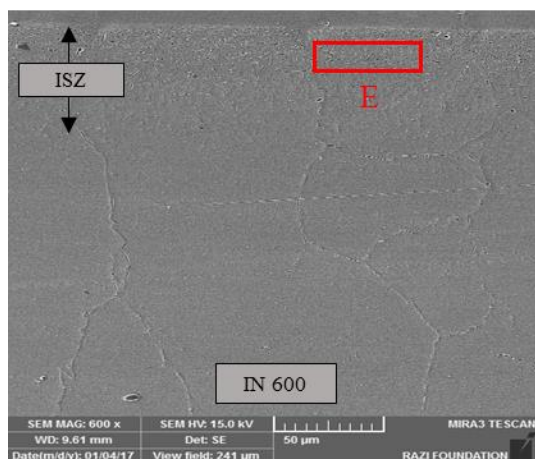
Fig. 3 Image of TLP bonding of Inconel 718 to Inconel 600 at 1050°C for 5 min

شکل 3 اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ اینکونل 718 به اینکونل 600 در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 5 دقیقه

منجمد شده‌اند و با توجه به توضیحات پیشین نواحی یوتکتیکی و بین‌فلزی در مرکز اتصال باقی مانده است. از آنجایی که مکانیزم نفوذ بسیار به زمان آن وابسته است، برای دستیابی به اتصال بهینه‌تر نیاز به زمان‌دهی بیشتر در فرآیند اتصال‌دهی است.



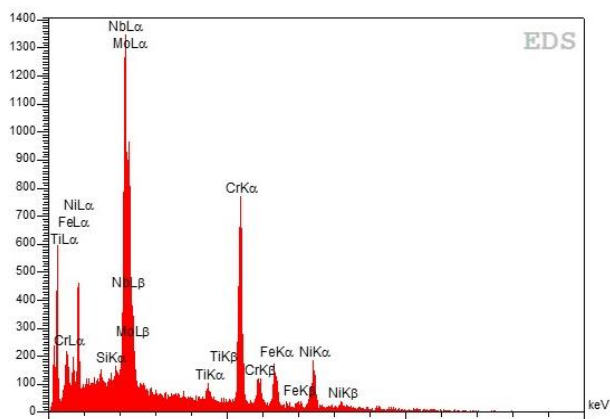
الف



ب

Fig. 6 SEM image of DAZ and base metal at 1050°C for 5 min, a- Inconel 718 side, b- Inconel 600 side

شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه متأثر از نفوذ و فلز پایه در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 5 دقیقه، الف- در سمت آلیاژ اینکونل 718، ب- در سمت آلیاژ اینکونل 600



الف

کاهش می‌یابد که امکان استفاده از این اتصال در دمای بالا کمتر می‌شود؛ بنابراین امکان نفوذ بیشتر بور و رشد ناحیه انجماد هم‌دمای شرایط برای افزایش نقطه ذوب ناحیه اتصال باید با زمان‌دهی بیشتر مهیا و در نتیجه امکان استفاده از این اتصال در دماهای بالاتر فراهم شود.

ذرات Ni_3Si در بزرگ‌نمایی‌های بیشتر در شکل 4 دیده می‌شود. با توجه به دیاگرام فازی Ni-Si (شکل 5) بدیهی است که حدود 15% اتمی سیلیسیم در محدوده دمایی اتصال در نیکل حل می‌شود؛ بنابراین زمانی که انجماد هم‌دمای کامل نشده است با پس‌زده شدن در حین انجماد غیرهم‌دمای عناصر ترکیبات Ni_3Si در ناحیه انجماد غیرهم‌دمای تشکیل می‌شود. از طرفی آنالیز عنصری ناحیه انجماد هم‌دمای مقدار قابل توجهی از سیلیسیم را در این ناحیه نشان می‌دهد که به صورت محلول جامد در نیکل وجود دارد. با این توضیحات می‌توان بیان کرد که عامل اصلی نفوذی و کاهنده نقطه ذوب عنصر بور است و سیلیسیم نقش بسیار کمی را ایفا می‌کند. تشکیل ریزساختارهای یادشده به دلیل جهت انجماد از سمت فلز پایه به مرکز اتصال قابل توجهی است.

مناطق متأثر از نفوذ و فلزات پایه دو آلیاژ اینکونل 718 و اینکونل 600 را در زمان 5 دقیقه و دمای 1050 درجه سانتی‌گراد در شکل 6 مشاهده می‌شود. حضور مقدار قابل توجهی از عناصر نیوبیوم و مولیبدن در ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 718 (شکل 7-الف) نشانگر وجود ترکیبات غنی از این عناصر در این منطقه است. این عنصر به دلیل نفوذ بالای عنصر بین نشین بور و حد حلالیت کم آن در محلول جامد نیکل به فلز پایه رسوب کرده و ترکیبات برآیدی غنی از نیوبیوم و مولیبدن را تشکیل دهد. گزارش شده است که نیوبیوم، مولیبدن میل ترکیبی زیادی با عنصر بور دارند؛ بنابراین وجود ترکیباتی از برآیدهای نیوبیوم و مولیبدن در این نواحی متحمل که این نتایج با مشاهدات محققین پیشین در توافق است [20,16]. در سمت دیگر ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 600 و دارای کروم و نیکل بیشتری در این ناحیه است (شکل 7-ب). با توجه به نفوذ سریع بور در این منطقه، به نظر می‌رسد در این منطقه ترکیبات برآیدهای کروم و نیکل تشکیل شده باشد.

با توجه به شکل 8 اتصال‌دهی در زمان 25 دقیقه نیز سبب حذف مقداری از نواحی مرکزی اتصال شامل ترکیبات برآیدی و یوتکتیکی می‌شود. در واقع در این زمان فرصت کافی برای نفوذ هر بیشتر عناصر وجود ندارد. در نتیجه انجماد هم‌دمای به طور کامل انجام نگرفته و نواحی مرکزی به صورت غیرهم‌دمای

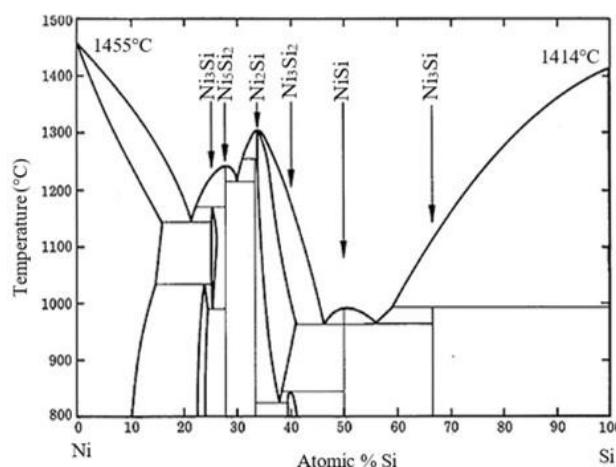


Fig. 5 Diagram phase of Ni-Si [19]

شکل 5 دیاگرام تعادلی نیکل - سیلیسیم [19]

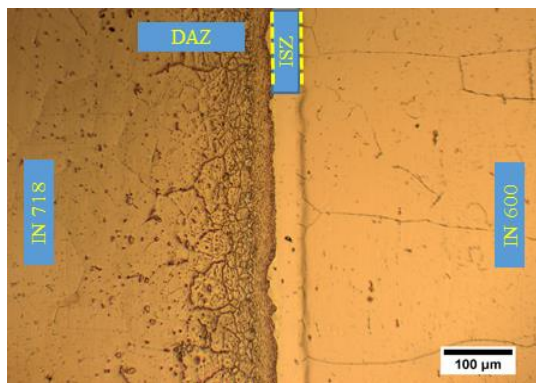


Fig. 9 Optical image of TLP bonding of Inconel 718 to Inconel 600 at 1050°C for 45 min

شکل 9 تصویر میکروسکوپ نوری از اتصال آلیاژ اینکونل 718 به 600 در دمای 1050 درجه سانتی گراد و زمان 45 دقیقه

است. با افزایش دما و از بین رفتن ناحیه انجماد غیرهم‌دما و در پی آن از بین رفتن ترکیبات برابری در این ناحیه سختی ناحیه اتصال کاهش یافت و یکنواخت شد. منطقه متأثر از نفوذ سمت آلیاژ اینکونل 718 به دلیل وجود ترکیبات بورایدی نیوبیوم و مولیبدن از سختی بالایی برخوردار است. ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 600 در زمان کم دارای ترکیبات بورایدی و دارای سختی بالایی است، اما ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 600 با افزایش زمان اتصال دهی تا 45 دقیقه به طور کامل از بین رفت و ترکیبات بورایدی در اثر نفوذ بور از بین رفته و سختی این ناحیه مانند فلز پایه شد. از طرف دیگر منطقه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 718 با افزایش زمان همگن‌تر و پهن‌تر شده، چرا که از غلظت ترکیبات برابری در این ناحیه کم شده و سختی این ناحیه کاهش یافت.

مقادیر استحکام برشی برای دو اتصال را در شکل 11 مشاهده می‌کنید. میزان استحکام برای اتصال در دمای 1050 درجه سانتی گراد و زمان 5 دقیقه برابر با 250 مگاپاسکال و برای زمان 45 دقیقه برابر با 410 مگاپاسکال حاصل شد. عدم وجود هرگونه ترکیبات یوتکتیک و بورایدی در ناحیه اتصال در اثر افزایش زمان از 5 تا 45 دقیقه سبب افزایش استحکام برشی به میزان قابل توجهی شد. در واقع می‌توان این‌گونه بیان کرد که مناطق ناحیه انجماد غیرهم‌دما که دارای ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده‌ای است، مناطق مستعد به شکست و رشد ترک است که سبب افت استحکام در ناحیه اتصال می‌شود؛ بنابراین حذف ناحیه انجماد غیرهم‌دما در اثر افزایش زمان و در پی

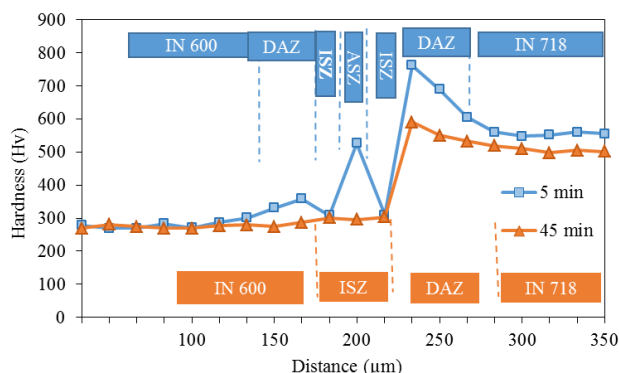


Fig. 10 micro hardness of joined samples at 1050°C for different times
شکل 10 تغییرات سختی در سطح مقطع نمونه‌های متصل شده در دمای 1050 درجه سانتی گراد و در زمان‌های مختلف

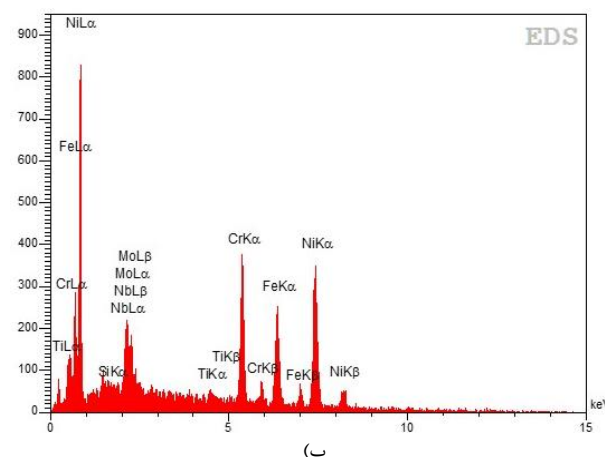


Fig. 7 Spectrum of EDS analysis for a- F region in the fig 6-a, b- E region in the fig 6-b

شکل 7 طیف نشری آنالیز عنصری الف- ناحیه F در شکل 6-الف، ب- ناحیه E در شکل 6-ب

ناحیه اتصال آلیاژ اینکونل 718 به اینکونل 600 را در دمای 1050 درجه سانتی گراد و در زمان 45 دقیقه در شکل 9 آورده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش زمان و ناحیه انجماد غیرهم‌دما به طور کامل از بین رفت. این موضوع به دلیل زمان‌دهی و افزایش نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به درون فلز پایه و تغییرات غلظتی عناصر اتفاق می‌افتد. نواحی متأثر از نفوذ تغییرات محسوس را نسبت به اتصال زمان 5 دقیقه (شکل 3) دارند. عرض ناحیه متأثر از نفوذ سمت آلیاژ اینکونل 718 از حدود 50 میکرون در زمان 5 دقیقه به حدود 130 میکرون در زمان 45 دقیقه افزایش داشت، همچنین به نظر می‌رسد تغییرات غلظتی در این ناحیه کمتر شده است. از طرفی دیگر در سمت آلیاژ اینکونل 600 هیچ اثری از ناحیه متأثر از نفوذ دیده نمی‌شود و این ناحیه به طور کامل همگن شده است. این تغییرات در ناحیه متأثر از نفوذ ناشی از افزایش زمان و در پی آن افزایش نفوذ عناصر درهم است.

3-2- خواص مکانیکی

شکل 10 تغییرات سختی ناحیه اتصال را برای نمونه‌های متصل شده در دمای 1050 درجه سانتی گراد در زمان‌های 5 و 45 دقیقه نشان می‌دهد. در ناحیه انجماد غیرهم‌دما به دلیل وجود ترکیبات سخت برابری دارای سختی بالایی

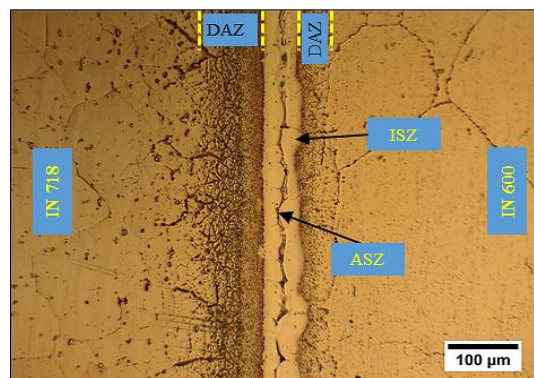


Fig. 8 Optical image of TLP bonding of Inconel 718 to Inconel 600 at 1050°C for 25 min

شکل 8 تصویر میکروسکوپ نوری از اتصال آلیاژ اینکونل 718 به 600 در دمای 1050 درجه سانتی گراد و زمان 25 دقیقه

- Advances in Mechanical & Automobile Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 18-21, 2015.
- [5] P. Mithilesh, D. Varun, A. R. G. Reddy, K. D. Ramkumar, N. Arivazhagan, S. Narayanan, Investigations on dissimilar weldments of Inconel 625 and AISI 304, *Procedia Engineering*, Vol. 75, pp. 66-70, 2014.
- [6] H. Shah Hosseini, M. Shamanian, A. Kermanpur, Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds, *Materials Characterization*, Vol. 62, No. 4, pp. 425-431, 2011.
- [7] A. Mortezaie, M. Shamanian, An assessment of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welds between Inconel 718 and 310S austenitic stainless steel, *Pressure Vessels and Piping*, Vol. 116, pp. 37-46, 2014.
- [8] G. J. Ram, A. V. Reddy, K. P. Rao, G. M. Reddy, J. S. Sundar, Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welds, *Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 1, pp. 73-82, 2005.
- [9] W. F. Gale, D. A. Butts, Transient liquid phase bonding, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 9, No. 4, pp. 283-300, 2004.
- [10] G. O. Cook, C. D. Sorensen, Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding, *Materials Science*, Vol. 46, No. 16, pp. 5305-5323, 2011.
- [11] A. Khorram, O. Fakhraei, M. J. Torkamany, Laser brazing of Inconel 718 and Inconel 600 with BNi-2 nickel-based filler metal *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 5-8, pp. 2075-2084, 2017.
- [12] A. Khorram, A. Jafari, M. Moradi, Laser brazing of 321 and 410 stainless steels using BNi-2 nickel-based filler metal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 129-135, 2017. (in Persian)
- [13] G. Srinivasan, A. K. Bhaduri, S. K. Ray, V. Shankar, Vacuum brazing of Inconel 600 sleeve to 316L stainless steel sheath of mineral insulated cable, *Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1, pp. 73-76, 2008.
- [14] G. Mosalayipour, G. Moshrei, A. Ekrami, Study of effective parameter on the Transient liquid phase of IN738LC, *1rd Mineral Industries Conference*, Bahonar Uni, Kerman, 2009. (in Persian)
- [15] M. A. Arafin, M. Medraj, D. P. Turner, P. Bocher, Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 447, No. 1, pp. 125-133, 2007.
- [16] V. Jalilvand, H. Omidvar, H. R. Shakeri, M. R. Rahimpour, Microstructural evolution during transient liquid phase bonding of Inconel 738LC using AMS 4777 filler alloy, *Materials Characterization*, Vol. 75, pp. 20-28, 2013.
- [17] R. Abdolvanda, M. Atapour, M. Shamanian, A. Allafchian, The effect of bonding time on the microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonding between SAF 2507 and AISI 304, *Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 172-180, 2107.
- [18] O. A. Idowu, O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi, Microstructural study of transient liquid phase bonded cast Inconel 738LC superalloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37, No. 9, pp. 2787, 2006.
- [19] ASM International Handbook Committee, *Alloy phase diagrams* Vol. 3, Materials Park, Ohio: ASM international, 1992.
- [20] M. Pouranvari, A. Ekrami, A. H. Kokabi, Transient liquid phase bonding of wrought IN718 nickel based superalloy using standard heat treatment cycles: Microstructure and mechanical properties, *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 694-701, 2013.

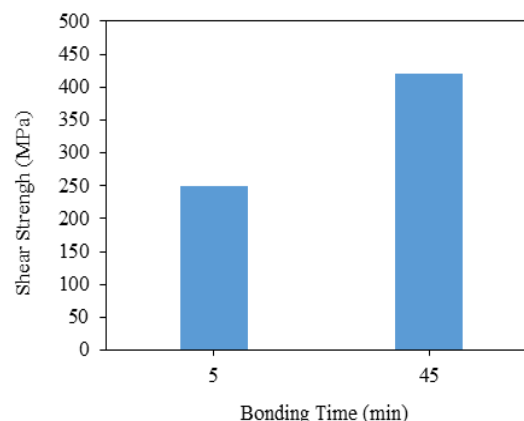


Fig. 11 Bonding shear strength of joints at 1050°C for different times
 شکل 11 استحکام برشی اتصالات در دمای 1050 °C در زمان‌های 5 و 45 دقیقه

آن حذف ترکیبات بین‌فلزی سبب افزایش استحکام ناحیه اتصال می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه انجماد هم‌دم با استحکام ناحیه اتصال رابطه مستقیم داشته و با افزایش این ناحیه استحکام اتصال افزایش می‌یابد [17].

4- نتیجه‌گیری

- ترکیبات براید نیکل، براید کروم و سیلیسید نیکل در نواحی انجماد غیرهم‌دم در دمای 5 دقیقه مشاهده شد.
- نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب (بور، سیلیسیم) در اثر فرصت‌دهی با افزایش زمان تا 45 دقیقه در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به فلز پایه به‌طور کامل انجام و انجماد هم‌دم کامل شد.
- ترکیبات برایدی در ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل 600 با افزایش زمان تا 45 دقیقه از بین رفت و این منطقه همگن شد، اما در آلیاژ اینکونل 718 تجمع ترکیبات برایدی ناحیه متأثر از نفوذ کمتر و این منطقه عریض‌تر شد.
- حذف ناحیه انجماد غیرهم‌دم و در پی آن حذف ترکیبات برایدی با افزایش زمان سبب افزایش قابل توجهی در استحکام برشی ناحیه اتصال از 250 مگاپاسکال به 410 مگاپاسکال شد.

5-مراجع

- M. Durand-Charre, *The Microstructure of Superalloys*, pp. 42-45, New York: CRC Press, 1998.
- M. J. Donachi, S. J. Donachi, *Superalloys: A Technical Guide*, second Edition, pp. 26-32, Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.
- M. Moradi, A. Mohazab Pak, A. Khorram, An experimental investigation of the effects of fiber laser percussion drilling: Influence of process parameters, *International Advanced Design and Manufacturing Technology (ADMT)*, Vol. 9, No. 4, pp. 7-12, 2016.
- A. Mohazab Pak, M. Moradi, Hole geometry features analysis in fiber laser percussion drilling process, *International Journal of*