نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 88-81

# تاثیر دمای اتصال بر ریزساختار و خواص مکانیکی سوپر آلیاژ 939 به روش پیوند فاز مایع گذرا

**حمید تازیکه، سیداحسان میرصالحی*، علی شمسی پور**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(دریافت مقاله: 1400/04/23؛ پذیرش مقاله: 1400/06/03)

**چکیده**

در این تحقیق به بررسی اثر دمای اتصال بر ریزساختار و خواص مکانیکی سوپر آلیاژ اینکونل 939 به روش پیوند فاز مایع گذرا پرداخته شده است. بدین منظور از لایه میانی از جنس MBF20 با ضخامت50 میکرون و سه دمای 1180°C، 1120°C و 1060°Cو زمان 45 دقیقه استفاده شده است. به منظور ارزیابی ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز عنصری استفاده شده است. همچنین به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از روش سختی سنجی ویکرز و آزمایش استحکام برشی استفاده شده است. یافته‌های پژوهشی نشان داد که با افزایش دما از 1060 °C به 1120 °C عرض ناحیه انجماد غیرهمدما از 38µm به 35µm کاهش یافته و با افزایش دما در 1180 °C ناحیه انجماد غیرهمدما به طور کامل حذف شده و ناحیه انجماد همدما جایگزین آن شده است. در ضمن با افزایش دما سختی در مرکز اتصال کاهش و استحکام برشی افزایش یافته است.

**کلمات کلیدی**: پیوند فاز مایع گذرا، سوپرآلیاژ اینکونل 939، ریزساختار، میکروسختی، استحکام برشی.

# The effect of bonding temperature on the microstructure and mechanical properties of 939 super alloy by transient liquid phase bonding method

**H. Tazikeh, S. E. Mirsalehi*, A. Shamsipoor**

Faculty of Materials Engineering , Amirkabir University of Technology.

(Received 14 July 2021 ; Accepted 25 August 2021)

**Abstract**

In this research, the effect of bonding temperature on the microstructure and mechanical properties of Inconel 939 super alloy by transient liquid phase bonding method. For this purpose, the middle layer of MBF20 with a thickness of 50 microns and three temperatures of 1060 °C, 1120 °C, 1180 °C and a time of 45 minutes have been used. In order to evaluate the microstructure, a scanning electron microscope equipped with an elemental analysis system has been used. Vickers hardness test and shear strength test have been used to evaluate the mechanical properties. The research

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mirsalehi@aut.ac.ir

findings showed that with increasing temperature from 1060 °C to 1120 °C, the width of the athermal solidification zonedecreased from 38µm to 35µm and with increasing temperature at 1180 °C, the athermal solidification zone was completely removed and isothermal solidification zone was replaced. In addition, with increasing temperature, the hardness in the joint center decreases and the shear strength increases.

**Keywords**: Transient liquid phase, Inconel 939 super alloy, Microstructure, Micro hardness, Shear strength.

## 1- مقدمه

استحکام کششی، مقاومت خزشی و سایر خواص مکانیکی دما بالا و همچنین مقاومت به خوردگی عالی سوپرآلیاژهای پایه نیکل، باعث شده است که این آلیاژها برای استفاده در تجهیزات مربوط به بخش‌های داغ توربین‌های گازی تولید نیروی زمین پایه یا موتورهای توربینی هوا پایه مورد استفاده قرار گیرند [1و2]. سوپر آلیاژ ها عمدتا آلیاژهایی بر پایه عناصر گروه VIII جدول تناوبی هستند و برای کاربردهای دما بالا که تنش مکانیکی نسبتا بالایی وجود دارد و پایداری سطحی بالایی مورد نیاز است توسعه داده شده‌اند [3و4]. سوپر آلیاژها برطبق عنصر اصلی آلیاژی در ترکیب شیمیایی به سه گروه پایه نیکل-آهن، پایه کبالت و پایه نیکل تقسیم بندی می‌شوند [5] .

سوپر آلیاژهای پایه نیکل قابلیت کاربرد در بالاترین دما را داشته و دارای بهترین استحکام در میان کلیه سوپر آلیاژهای ریختگی و کار شده هستند و به عنوان پر اهمیت‌ترین گروه سوپر آلیاژها شناخته می‌شوند [6]. اینکونل 939 یک سوپر آلیاژ پایه نیکل ریختگی است که برای بکار گرفته شدن در توربین‌های گازی زمینی (صنعتی) و دریایی که در دمای نزدیک به°C850 کار می‌کنند توسعه داده شده‌اند [7]. پیوند فاز مایع گذرا یا لحیم‌کاری نفوذی برای غلبه کردن بر محدودیت‌های موجود در اتصال دهی سوپرآلیاژهای پایه نیکل توسعه داده شده است [8]. این فرایند شامل چهار مرحله است:

حرارت‌دهی اتصال تا دمای ذوب فلز پرکننده، انحلال فلز پایه، انجماد هم دمای فاز مذاب و همگن سازی ریزساختار یک اتصال فاز مایع گذرا [9] در سوپرآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت‌شونده از سه ناحیه تشکیل شده‌اند، ناحیه منجمد شده همدما (ISZ1)، ناحیه منجمد شده غیرهمدما (ASZ2) و ناحیه متاثر نفوذ [10] در این تحقیق از روش پیوند فاز مایع گذرا جهت اتصال سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 939 در حضور لایه میانی MBF20 استفاده شده و اثر دما مورد بررسی قرار گرفته است. ارحمی و همکاران بررسی کردند با افزایش زمان اتصال، خواص مکانیکی اتصال سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 939 به روش پیوند فاز مایع گذرا افزایش می‌یابد [11].

نوروزی و همکاران بررسی کردند در اتصال غیرمشابه Ti-6Al-4V به AISI 304 به‌روش پیوند فاز مایع گذرا با افزایش دمای اتصال، ریزساختار و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [12]، اما در زمینه اثر دمای اتصال بر ریزساختار و خواص مکانیکی سوپر آلیاژ 939 به روش پیوند فاز مایع گذرا، مقاله‌ای انتشار نیافته است، لذا اثر دمای اتصال بر ریزساختار و خواص مکانیکی سوپر آلیاژ 939 به روش پیوند فاز مایع گذرا هدف تحقیق در این مقاله قرار گرفت.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از سوپرآلیاژ اینکونل 939 به عنوان فلزپایه و فلزپرکننده MBF20 ارایه شده در جدول (2) به عنوان لایه میانی استفاده شده که ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول (1) ارایه شده است. نمونه‌ها به ابعاد 5×10×10 میلی‌متر توسط وایرکات از شمش اولیه بریده شدند.

فرایند اتصال فاز مایع گذرا TLP در یک کوره خلا و تحت فشار حدودا $1/33\times10^{-2}$ پاسکال درسه دمای °C1060، °C1120 و °C1180 که بالاتر از دمای لیکوئیدوس فلز پرکننده و پایین‌تر از دمای سالیدوس فلزپایه بودند انجام گرفت.به منظور اعمال نیروی کافی10MPa به سیستم اتصال و در کنار آن جلوگیری از هرگونه جابه‌جایی نمونه‌ها در حین اتصال، از یک مهار فولادی از جنس فولاد زنگ‌نزن استفاده شد (شکل1).

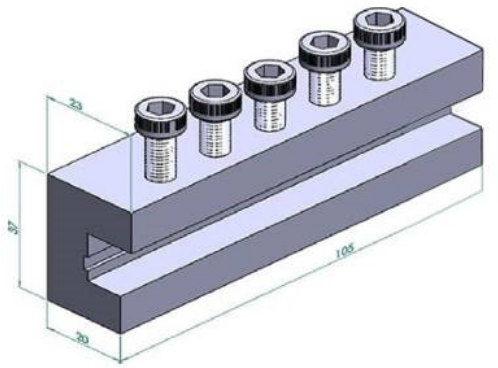
به منظور بررسی‌های ریزساختاری بدنه‌های متصل شده از

جدول1- ترکیب شیمیایی فلز پایه (%وزنی).

| | Ni | Cr | Co | Al | Ti | Nb | Mo | W | Ta | Mn | Zr | Fe | C | Si | B |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| اینکونل ۹۳۹ | پایه | ۲۲/۱ | ۱۸/۸ | ۱/۹ | ۳/۷ | ۰/۹۵ | ۰/۰۸ | ۲/۰ | ۱/۲ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۱۵ | ۰/۰۴ | ۰/۰۱ |

جدول2- مشخصات فلز پرکننده MBF20 [11].

| آلیاژ MBF | طبقه‌بندیAWS و ASM | ترکیب شیمیایی (٪ وزنی) | | | | | | دمای ذوب(°C) | | چگالی ($g/cm^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | B | Si | Fe | Cr | Ni | سالیدوس | لیکوئیدوس | |
| ۲۰ | AWS BNi2 / AMS 4777 | ۰/۰۶ | ۳/۲ | ۴/۵ | ۳/۰ | ۷/۰ | پایه | ۹۶۹ | ۱۰۲۴ | ۷/۸۸ |



شکل1- مهار فولادی طراحی شده جهت اعمال فشار و جلوگیری از جابجایی نمونه‌ها در حین اتصال (ابعاد بر حسب میلی متر).

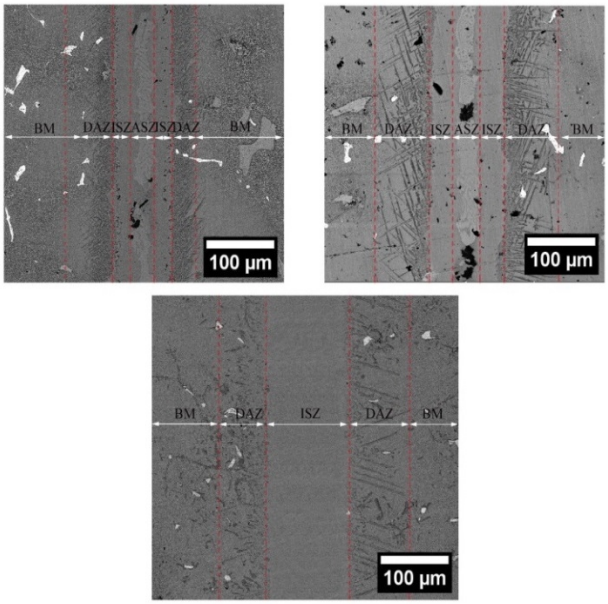
میکروسکوپ نوری استفاده شد، که بدین منظور نمونه‌ها پس از رسیدن به دمای اتاق در جهت عمود به سطح اتصال مقطع زده شده و سپس تا سمباده 2000 سمباده زنی و توسط ذرات آلومینا با اندازه 1 میکرومتر پولیش نهایی شده و در ادامه نمونه‌ها به وسیله محلول خورنده Kallings NO.2 با ترکیب شیمیایی 1gr $CuCl_2$ و 20ml HCl و 20ml اتانول اچ شدند. بررسی سطح اتصال توسط میکروسکوپ نوری بازتابشی Olympus صورت گرفت. مشاهده فازهای تشکیل شده و همچنین آنالیز شیمیایی شبه کمی اتصالات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از نوع Tescan Mia3 مجهز به آنالیزور تفکیک انرژی پرتو (EDS) انجام شد.

تصاویر سطوح شکست پس از آزمون برش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips XL30 بررسی شد. جهت شناسایی فازهای تشکیل شده در محل اتصال از آنالیز پراش‌پرتو ایکس XRD توسط دستگاه مدل Inel Equinox 300 استفاده شد. به منظور ارزیابی ریزسختی در عرض ناحیه اتصال، آزمون ریز سختی ویکرز براساس استاندارد ASTM E384.09 وتحت بار اعمالی 25 گرم مورد استفاده قرار گرفت. جهت ارزیابی استحکام اتصال، آزمون برشی توسط دستگاه کشش Instron 8502 و با سرعت حرکت فک 15 mm/min در دمای اتاق انجام گرفت.

## 3- نتایج و بحث

شکل (2) محل اتصال نمونه‌های TLP برقرار شده در دماهای 1060°C، 1120°Cو1180°C و زمان 45 دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه اتصال یافته در دمای 1180°C دارای اتصال کامل است در حالی‌که ناحیه ASZ همچنان در زمان 45دقیقه در نمونه‌های 1060°C و1120°C وجود دارد هرچند عرض این ناحیه در نمونه 1120°C از نمونه 1060 °C کم‌تر است (38 µm در مقایسه با 35 µm). با افزایش دما ضریب نفوذ بور به فلزپایه و ضریب نفوذ عناصر آلیاژی به فلز پرکننده مذاب افزایش می‌یابد و در نتیجه انجماد همدما در زمان کوتاه‌تری به پایان می‌رسد. این مطلب که با مدل استاندارد TLP مطابق است به‌وسیله اوجو و همکاران [14] نیز گزارش شده است. برخی دیگر از محققین کاهش نرخ انجماد همدما با افزایش دمای اتصال را گزارش کرده‌اند. افزایش دمای اتصال مطابق با قانون دوم فیک هم بر ضریب نفوذ و هم بر گرادیان غلظتی اثرگذار است هر چند همانطور که اشاره شد با افزایش دما ضریب نفوذ افزایش می‌یابد اما از گرادیان غلظتی کاسته می‌شود.

اگر تأثیر افزایش دما مانند سیستم حاضر بر ضریب نفوذ بیش از تأثیر آن بر گرادیان غلظتی باشد با افزایش دما انجماد همدما سریع‌تر کامل خواهد شد اما در حالتی‌که افزایش دما بیشتر بر گرادیان غلظتی تأثیر گذار باشد افزایش دما منجر به کاهش نرخ انجماد همدما می‌گردد مانند موردی که توسط هادی بیک و همکاران [15] در اتصال TLP بین GTD-111 و FSX-414 گزارش شده است. از شکل(2) همچنین مشخص است با افزایش دما از چگالی رسوبات DAZ کاسته می‌شود و پراکندگی آن‌ها بیشتر می‌شود که به دلیل فاصله نفوذ بیشتر بور در فلز پایه است. این مسئله توسط ملکان و همکاران [16] دراتصال TLP هستلوی X نیز مشاهده شده است.




شکل2- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از محل اتصال نمونه‌های متصل شده در دمای الف- 1060 °C، ب- 1120 °C، ج- 1180 °C و زمان 45 دقیقه.

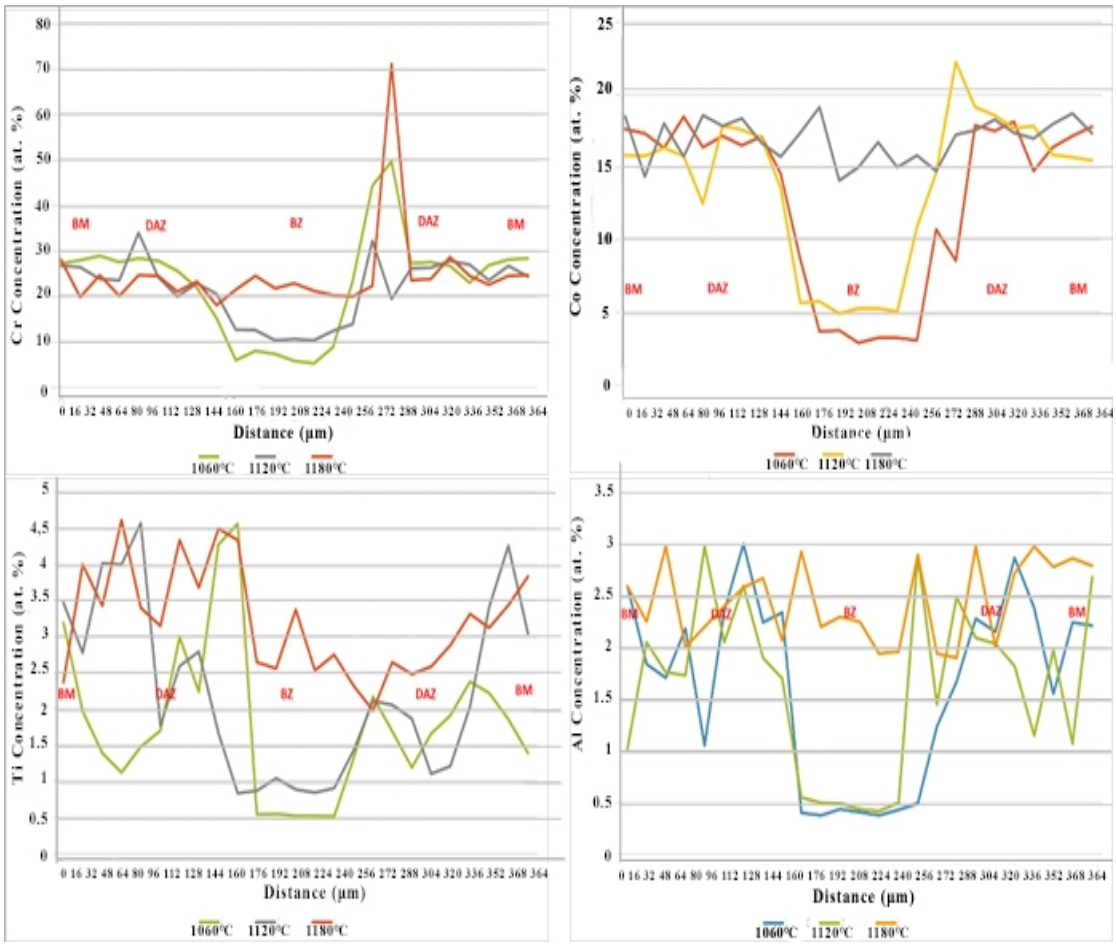
اثر دما بر زمان کامل شدن انجماد همدما می‌تواند با کمک رابطه(1) پیش‌بینی شود:

$$C_S-C_{BM} = (C_0-C_{BM})\ [\mathrm{erf}\frac{\frac{W_0}{2}}{(4Dt_{IS})^{\frac{1}{2}}}] \qquad (1)$$

با مقایسه مقادیر پیش بینی شده از این رابطه و آزمایش‌های تجربی زمان انجماد همدما تطابق خوب نتایج مشاهده شد. مدل گیل و والاچ پیش بینی می‌کند با افزایش دمای اتصال از 1060°C به 1120°C و سپس 1180°C ضریب نفوذ بور در نیکل افزایش یافته و در نتیجه زمان اتمام انجماد همدما کاهش‌یافته و از 164 دقیقه به 68 دقیقه و در نهایت 31 دقیقه در 1180°C می‌رسد. شکل(2) نیز اتمام انجماد همدما در نمونه 45 و در دمای 1180°C را نشان می‌دهد در حالی که در این زمان در دماهای پایین‌تر مقدار قابل توجهی فاز یوتکتیک حضور دارد. آنالیز خطی عناصر آلیاژی در نمونه متصل شده در دمای 1060°C، 1120°C و 1180°C و زمان 45 دقیقه در شکل(3) آمده است. از مقایسه این آنالیزهای خطی در شکل(3) مشخص می‌گردد که افزایش دما سبب یکسان‌تر شدن توزیع عناصر شیمیایی در عرض ناحیه اتصال شده است. شکل(4) میانگین غلظت چهار عنصر Cr، Co، Al و Ti در ناحیه ISZ نمونه‌های متصل شده در دماهای 1060°C، 1120°C و 1180°C را نشان می‌دهد. در شکل (4) نیز مشخص است که افزایش دما در زمان یکسان (45 دقیقه) باعث افزایش غلظت عناصر آلیاژی در ناحیه ISZ می‌گردد.

تغییر ضخامت ناحیه ASZ، ISZ و DAZ با تغییر دما از 1060°C به 1120°C و سپس 1180°C در شکل (5) آورده شده است. ضخامت ناحیه ASZ با افزایش دما در زمان 45 دقیقه کاهش می‌یابد و همانطور که در شکل(2) نیز مشخص است در نمونه متصل شده در دمای 1180°C به طور کامل محو می‌گردد. به طور طبیعی با کاهش ضخامت ASZ ناحیه ISZ جایگزین آن می‌گردد و کل ناحیه اتصال را به خود اختصاص می‌دهد. عرض ناحیه DAZ در نمونه متصل شده در دمای 1120°C افزایش یافته است که ناشی از نفوذ سربالایی اتم‌های بور است. ضخامت کل ناحیه اتصال نیز ثابت مانده است زیرا تنها به ضخامت اولیه فلز پرکننده و میزان بور موجود در آن بستگی دارد و نه دمای اتصال.

شکل(6) ناحیه DAZ نمونه متصل شده در دمای 1060°C و 1180°C را با بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. با وجود اینکه عرض ناحیه DAZ در هر دو این نمونه‌ها تقریباً برابر است با افزایش دما چگالی رسوبات DAZ کم شده و پراکندگی آن‌ها بیشتر شده است در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت در دمای 1180 °C در حال محو شدن است.




شکل3- آنالیز خطی در عرض ناحیه اتصال در نمونه متصل شده در دمای 1060°C ، 1120°C و 1180°C و زمان اتصال 45 دقیقه برای چهار عنصر Cr، Co، Al و Ti.

## 3-1- اثر دما بر خواص مکانیکی

### ۳-۱-۱- بررسی توزیع ریز سختی در اتصالات ایجاد شده

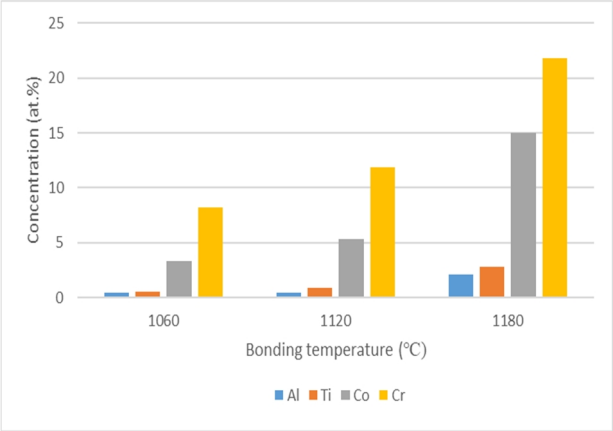
در نیمرخ ریز سختی ارایه شده در شکل (7) مناطق زیر را می‌توان مشاهده کرد:

ناحیهASZ محصولات یوتکتیکی- فاز بورید غنی از نیکل ناحیه ISZ سختی این منطقه از سختی فلزپایه نیز پایین‌تر است. محلول جامد تک فاز غنی از نیکل γ- تنها مکانیزم غالب سخت شوندگی در این منطقه سخت شوندگی ناشی از محلول جامد است. سختی پایین این منطقه در مقایسه با فلز پـایه به‌علت نفوذ ناکـــافی عنـاصر استحکام‌بخش محلول جامد مانند Co و عناصر تشکیل دهنده رسوبات γ همانند AL, Ti, Nb به درون ناحیه ISZ است.

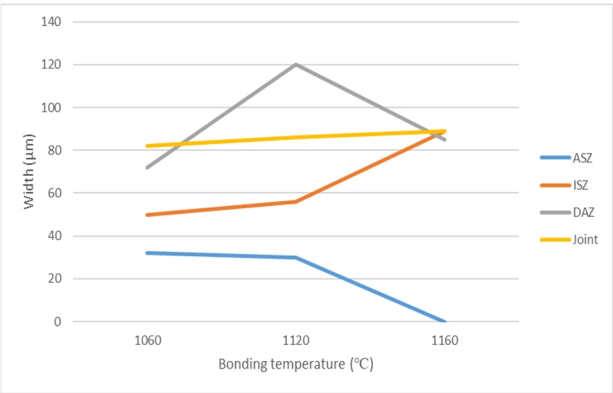
- ناحیه DAZ تجمع بوریدهای کربنی غنی از کروم.
- ناحیه BM دو مکانیزم: مکانیزم اول سخت شـــدن نـاشی از محلول جامد و مکانیزم دوم رسوب سخت شوندگی ناشی از حضور رسوبات γ در IN-939 است.

در ناحیه ASZ سختی این ناحیه با افزایش دمای اتصال از 1060°C به 1120°C کاهش می‌یابد. این مسئله به علت کاهش عرض ناحیه یوتکتیک با افزایش دمای اتصال است. در واقع جزایر یوتکتیکی و فازهای ترد بین فلزی تشکیل شده در مرکز اتصال نمونه 1120°C بسیار کوچک و ظریف بوده و فرورونده آزمون ویکرز با نواحی اطراف این فازهای ثانویه (محلول جامد γ ) که دارای سختی کمتری است تماس می‌یابد.

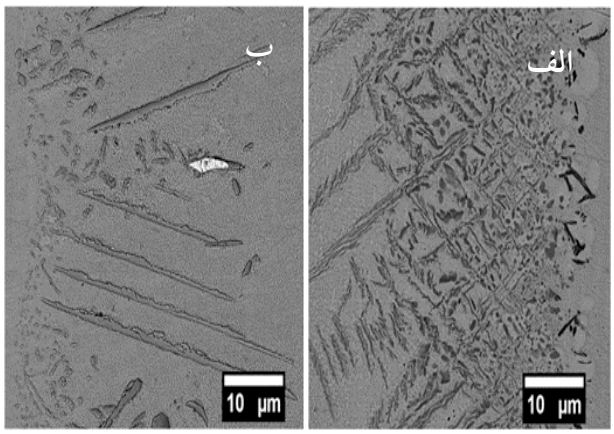
این موضوع می‌تواند علت کاهش سختی ASZ در دمای اتصال 1120°Cباشد.ترکیب شیمیایی فازهای ترد بین فلزی تشکیل‌شده در این ناحیه که در شکل (8) نشان داده شده است مطابق جدول (3) و شکل (9) می‌باشد.




شکل4- میانگین غلظت چهار عنصر Cr، Co، Al و Ti در ناحیه ISZ نمونه‌های متصل شده در دماهای 1060°C، 1120°C و 1180°C.




شکل5- اثر دمای اتصال بر ضخامت نواحی ISZ، ASZ و DAZ و کل ناحیه اتصال.

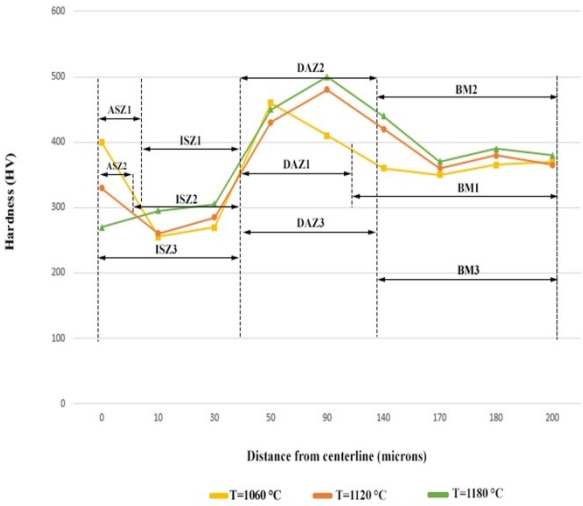



شکل6- مقایسه ناحیه DAZ در دمای الف) 1060°C و ب) 1180°C.

### 3-1-2- استحکام برشی

شکل (10) منحنی استحکام برشی را برای فلز پایه و اتصالات TLP در دماهای متفاوت اتصال از دمای 1060 تا دمای 1180 درجه سانتی‌گراد و زمان ثابت 45 دقیقه را نشان می‌دهد.

با افزایش دما ضریب نفوذ بور به فلزپایه و ضریب نفوذ عناصر آلیاژی به فلز پرکننده مذاب افزایش می‌یابد و در نتیجه انجماد همدما در زمان کوتاه‌تری به پایان می‌رسد.

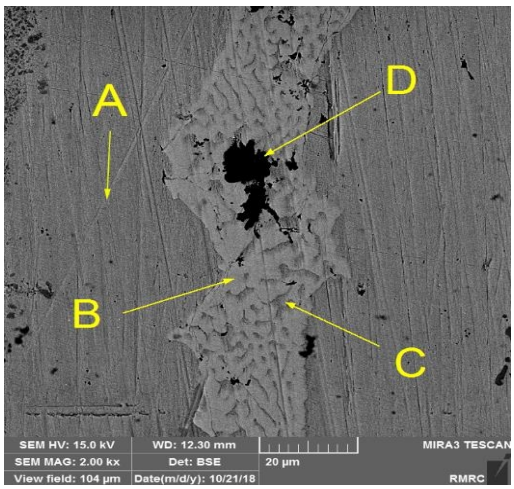



شکل 7- نیمرخ سختی در مناطق مختلف اتصال.

جدول3- ترکیب شیمیایی فازهای تشکیل شده در ناحیه ASZ در نمونه دمای 1120°C و زمان 45 دقیقه (% اتمی).

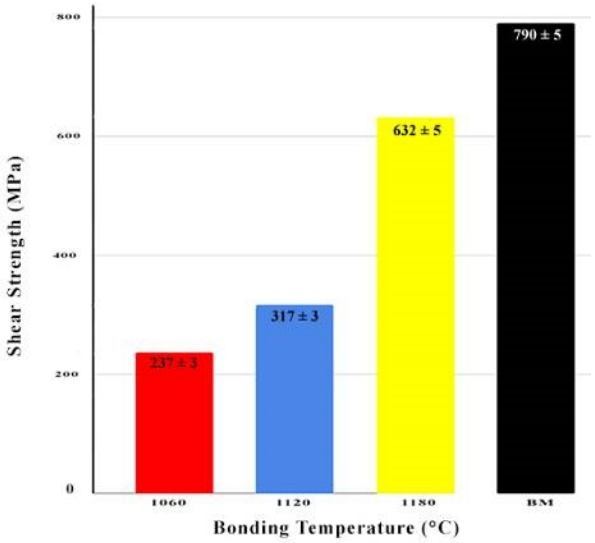
| ناحیه | فاز | ترکیب احتمالی | Ni | Cr | Co | Al | Ti | Nb | Ta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ASZ | A | پرویونکتیک-γ | ۶۵/۴۷ | ۱۳/۶۱ | ۶/۰۲ | ۲/۹۳ | ۱/۴۲ | ۰/۴ | ۰/۴۲ |
| | B | بورید غنی از نیکل | ۷۶/۰۷ | ۳/۸۹ | ۵/۸۵ | ۱/۷ | ۷/۶۵ | ۲/۰۴ | ۱/۰۵ |
| | C | یوتکتیک-γ | ۷۰/۹۴ | ۱۰/۳۶ | ۴/۵۴ | ۱/۰۸ | ۱/۲۵ | ۰/۱۶ | ۰/۳۹ |
| | D | بورید غنی از کروم | ۲/۴۳ | ۸۶/۶۳ | ۰/۳۱ | ۱/۵۱ | ۱/۰۶ | ۰/۸۲ | ۰/۶۳ |

ضخامت ناحیه ASZ با افزایش دما در زمان 45 دقیقه کاهش می‌یابد همینطور که در شکل (2) نیز مشخص است در نمونه متصل شده در دمای 1180 درجه سانتی‌گراد به طور کامل محو می‌گردد و ناحیه ISZ جایگزین آن می‌گردد و کل ناحیه اتصال را به خود اختصاص می‌دهد. در اتصالات با انجماد همدمای جزیی (اتصالات ایجاد شده با دماهای 1060 و 1120 درجه سانتی‌گراد)، مهمترین دلیل پایین بودن استحکام، حضور ذرات سخت و شکننده و شبکه بهم پیوسته در مرکز اتصال بوده که مستعد رشد ترک می‌باشند. افزایش جزیی استحکام از دمای 1060 به 1120 درجه سانتی‌گراد به دلیل کاهش پهنای منطقه ASZ می‌باشد. در واقع در این نوع اتصال‌ها پهنای منطقه ASZ به‌عنوان فاکتوراصلی کنترل استحکام کششی اتصال می‌باشد.




شکل 8 - تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محل اتصال نمونه متصل شده در دمای 1120°C و زمان 45 دقیقه. فازهای A، B، C و D در تصویر مشخص هستند که به ترتیب فازهای پرویوتکتیک-$\gamma$، بورید غنی از نیکل، یوتکتیک-$\gamma$ و بورید غنی از کروم هستند.

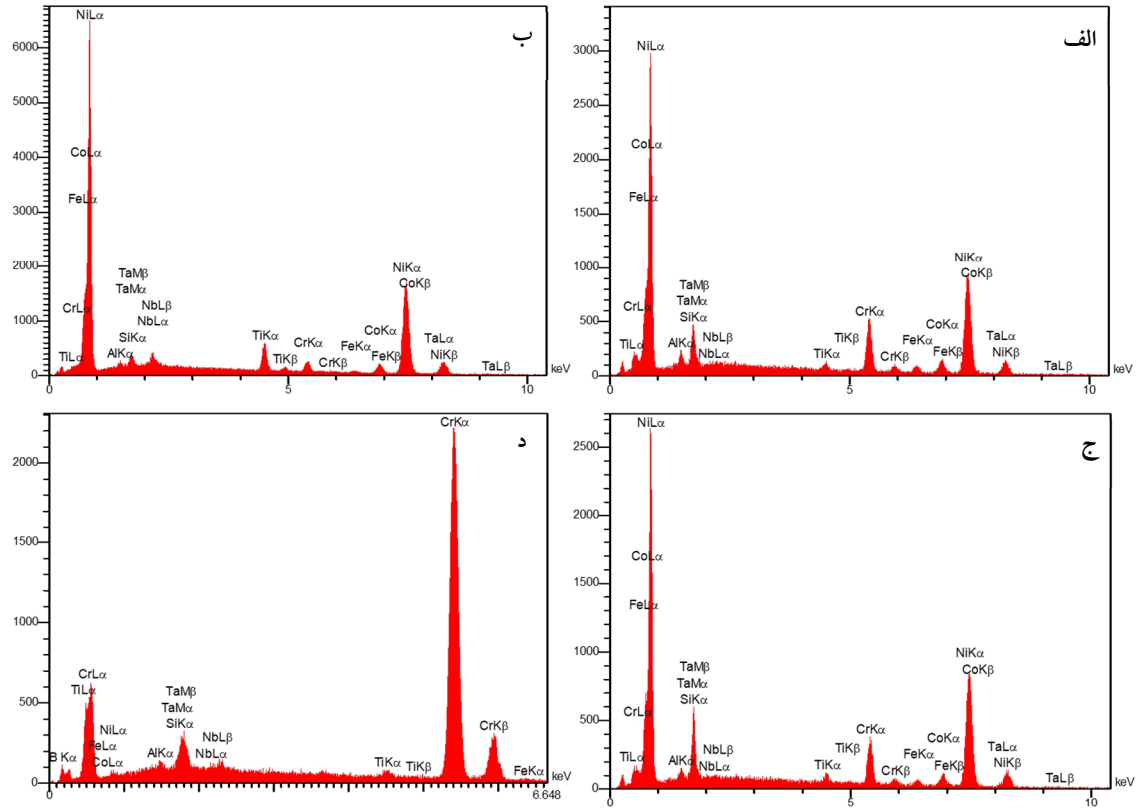
در اتصال با انجماد دهنده‌های کامل (اتصال با دمای 1180 درجه سانتی‌گراد) تنها فاز شکل گرفته در مرکز اتصال تک فاز داکتیل گاما است، در این نوع اتصال به دلیل عدم شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی در مرکز اتصال، استحکام برشی به طور محسوس افزایش می‌یابد.




شکل10- استحکام برشی اتصال برای دماهای مختلف اتصال.

## 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سوپر آلیاژ پایه نیکل، اینکونل 939 به وسیله فلزپرکننده MBF20 فویلی شکل و با استفاده از فرایند TLP اتصال داده شد. تحولات ریزساختاری و تاثیر تکامل ریزساختار بر خواص مکانیکی در سه دمای 1060، 1120 و




شکل9- تصویر طیف EDS فازهای تشکیل شده در ناحیه ASZ الف- پرویوتکتیک-$\gamma$، ب- بورید غنی از نیکل، ج- یوتکتیک-$\gamma$ و د- بورید غنی از کروم.

1180درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- در زمان 45 دقیقه و دمای اتصال 1180 درجه سانتی‌گراد پدیده انجماد همدما کامل شد. ناحیه اتصال عاری از ترکیبات بین فلزی بوده و تنها از محلول تک فاز $\gamma$ تک فاز تشکیل شده است.

- استحکام برشی اتصالات با افزایش دمای برقراری اتصال، افزایش می‌یابد. مکانیزم استحکام بخشی در این نوع اتصالات، استحکام بخشی ناشی از محلول جامد است. در نتیجه با افزایش غلظت عناصر محلول استحکام بخش مانند Al, Ti, Co در ناحیه ISZ سختی این ناحیه در نمونه با دمای اتصال 1180 درجه سانتی‌گراد بالاتر از نمونه با دمای اتصال 1120 درجه سانتی‌گراد است.

## منابع


[1] Malekan, A., Farvizi, M., Mirsalehi, S.E., Saito, N., Nakashima, K., Influence of bonding time on the transient liquid phase bonding behavior of Hastelloy X using Ni-Cr-B-Si-Fe filler alloy, *Mater. Sci. Eng. A. 755 (2019)* 37–49. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.124.

[2] Arhami, F. Mirsalehi, S.E., Sadeghian, A.H., Johar, M.H., The joint properties of a high-chromium Ni-based superalloy made by diffusion brazing: Microstructural evolution, corrosion resistance and mechanical behavior, *J. Manuf. Process. 37* (2019) 203–211. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.025.

[3] Sims, C.T., N.S. Stoloff, and W.C. Hagel, *superalloys II. 1987*: Wiley New York.

[4] Geddes, B., H. Leon, and X. Huang, *Superalloys*: alloying and performance. 2010: Asm International.

[5] Lamb, S., *Practical handbook of stainless steels and nickel alloys*. 1999.

[6] Eliaz, N., G. Shemesh, and R.M. Latanision, Hot corrosion in gas turbine components. *Engineering Failure Analysis*, 2002. 9(1): p. 31-43.

[7] Jahangiri, M., H. Arabi, and S. Boutorabi, Development of wrought precipitation strengthened IN939 superalloy. *Materials Science and Technology*, 2012. 28(12): p. 1470-1478.

[8] Paulonis, D.F., D.S. Duvall, and W.A. Owczarski, Diffusion bonding utilizing transient liquid phase, D.U.S.P.a.T.O. Washington, Editor. 1972, *U.S. Patent 3,678,570*.

[9] Jalilvand, V., et al., Influence of bonding variables on transient liquid phase bonding behavior of nickel based superalloy IN-738LC. *Materials & Design (1980-2015)*, 2013. 52(Supplement C): p. 36-46.

[10] Pouranvari, M., A. Ekrami, and A. Kokabi, Effect of bonding temperature on microstructure development during TLP bonding of a nickel base superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009. 469(1): p. 270-275.

[11] Arhami, F. Mirsalehi, S.E., Sadeghian, A.H., Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of diffusion brazed IN-939, *Journal of Materials Proccesing Technology 265, 2019.*

[12] Norouzi, E., Atapour, M., Shamanian, M., Allafchian, A., Effect of bonding temprature on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V to AISI 304 transient liqiod phase bonded joint, *Materials and Design 99, 2016*

[13] Metglas, I., Amorphous Brazing Foil. 2015, *Metglas, Inc: U.S.A.*

[14] Ojo, O.A., N.L. Richards, and M.C. Charturvedi, Effect of gap size and process parameters on diffusion brazing of Inconel 738. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2004. 9(3): p. 209-220.

[15] Hadibeyk, S., B. Beidokhti, and S.A. Sajjadi, The effect of interlayer thickness, bonding temperature and atmosphere on transient liquid phase bonding of GTD-111 to FSX-414. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018. 255: p. 673-678.

[16] Malekan, A., Effect of bonding temprature on microstructure and mechanical properties of Hastelloy X, supperalloy joints bonded with a Ni-Cr-B-Si-Fe interlayer, *Jounral of Manufactruing Processes, 2019.* 47: p. 129-140