

## بررسی اثر همگن سازی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرا بین اینکونل ۷۱۸ و اینکونل ۶۰۰

علی خرم<sup>۱\*</sup>، اکبر داودی جمالویی<sup>۲</sup>، عابدجعفری<sup>۳</sup>

۱- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

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

\*alikhorram@ymail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۲)

### چکیده

در این مقاله، اثر همگن سازی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرا بین اینکونل ۷۱۸ و اینکونل ۶۰۰ با استفاده از لایه میانی BNi-2 مورد بررسی قرار گرفت. همگن سازی بر روی نمونه های اتصال داده شده در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و زمان ۴۵ دقیقه که هیچ گونه ترکیب یوتکتیکی در ناحیه اتصال نداشتند، انجام گرفت. همگن سازی در دمای  $1080^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶ و ۱۲ ساعت و در دمای  $1180^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱، ۲ و ۳ ساعت انجام شد. نتایج نشان داد که در دمای  $1080^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۲ ساعت ترکیبات ناحیه متاثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به طور کامل از بین نرفت. از طرف دیگر، در دمای  $1180^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ ساعت همگن سازی کامل شد و هیچ گونه ترکیبات برای دیدی در نواحی متاثر از نفوذ آلیاژهای اینکونل ۷۱۸ و اینکونل ۶۰۰ مشاهده نشد. با کامل شدن فرآیند همگن سازی، سختی نواحی متاثر از نفوذ کاهش یافت و میزان سختی برابر سختی فلز پایه شد. نتایج استحکام برشی ناحیه اتصال نشان داد که با از بین رفتن نواحی متاثر از نفوذ، استحکام به طور قابل توجهی افزایش یافت.

### واژه های کلیدی:

اتصال فاز مایع گذرا، همگن سازی، اینکونل ۷۱۸، اینکونل ۶۰۰، ریزساختار، خواص مکانیکی.

### ۱- مقدمه

استفاده در مخازن و لوله های شیمیایی، موتورها و بدنه هواپیماها کرده است [۱]. ویژگی های منحصر به فرد هر یک از این آلیاژها سبب شده است که اتصال بین این دو آلیاژ و جایگزینی آنها در صنایع مختلف اهمیت زیادی داشته باشد. خرم و همکارانش [۴-۷] اتصال آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را با استفاده از لحیم کاری به کمک لیزر و با لایه میانی پایه نقره (BAG-8) و ماده پرکننده پایه نیکل (BNi-2) مورد بررسی قرار دادند. خرم و همکارانش [۸]

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به عنوان یک آلیاژ رسوب سخت شونده پایه نیکلی کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، ماشین سازی و صنایع نفت و گاز دارد [۱-۳]. از طرفی دیگر سوپر آلیاژ اینکونل ۶۰۰ به عنوان یک آلیاژ محلول جامد، با توجه به درصد نیکل بالای آن مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون عالی را در بسیاری از محیط های خورنده در دمای بالا ارائه می کند که این آلیاژ را مستعد به

علاوه بر نواحی انجماد همدم‌ها و انجماد غیر همدم‌ها، ناحیه مهم دیگری که در فرآیند فاز مایع گذرا تشکیل می‌گردد، ناحیه متاثر از نفوذ<sup>۳</sup> است. این ناحیه در فلز پایه در نزدیکی فصل مشترک اتصال به وجود می‌آید. نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به درون فلز پایه و میل ترکیبی این عناصر با عناصر موجود در فلز پایه سبب تشکیل ترکیبات بخصوصی در این ناحیه می‌شود. بنابراین نوع فازهایی که در این ناحیه به وجود می‌آید بشدت به عناصر کاهنده نقطه ذوب در لایه میانی بستگی دارد [۱۲]. بطور کلی در اتصالات حاوی عنصر بور در لایه میانی، نفوذ آن به فلز پایه سبب وجود ترکیبات برایدی در ناحیه متاثر از نفوذ پدیده‌ایی غالب است. در اغلب گزارش‌ها عنوان شده است که ترکیبات بین‌فلزی برایدی در ناحیه متاثر از نفوذ می‌شود [۱۳-۱۴]. بنابراین حذف این نواحی برای افزایش استحکام ناحیه اتصال و بهبود خواص اتصال ضروری به نظر می‌رسد.

خزایی و همکاران [۱۵] تاثیر عملیات همگن‌سازی را بر ناحیه اتصال غیرهمجنس فاز مایع گذرا بین آلیاژ اینکونل ۷۳۸ و آلیاژ پایه کبالت FSX-414 بررسی کردند. این محققین از لایه میانی MBF-80 با ضخامت ۵۰ میکرون استفاده کردند و گزارش دادند که با همگن‌سازی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت، ترکیبات بین‌فلزی در ناحیه اتصال همچنان وجود داشته و از بین نرفتند. آنها بهترین شرایط را در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد و زمان یک ساعت مشاهده کردند و گزارش دادند که در این شرایط منطقه متاثر از نفوذ به طور کامل حذف شد و دانه‌بندی جدیدی نیز در ناحیه اتصال ایجاد شد. نیکدین و همکاران [۱۶] همگن‌سازی اتصال همجنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با استفاده از لایه میانی پایه نیکل MBF-30 را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که با اعمال فرآیند همگن‌سازی در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۸۰ دقیقه، ناحیه متاثر از نفوذ همگن‌تر شد و یکنواختی در سختی ناحیه اتصال و فلز پایه مشاهده گردید. جلیوند و همکاران [۱۷] به بررسی اتصال همجنس فاز مایع گذار سوپر آلیاژ IN 738 با لایه میانی AMS4777 پرداختند. این محققین دریافتند که فرآیند

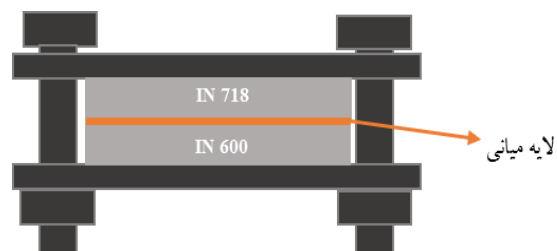
در مقاله‌ای دیگر، از ماده پرکننده BNi-2 برای اتصال فولادهای زنگ‌نزن ۳۲۱ و ۴۱۰ استفاده نمودند. آنها نتیجه گرفتند فازهای یوتکتیک مشاهده شده در اتصال به سبب انجماد هم‌دمای ناقص ماده پرکننده می‌باشد. این فازها محلول جامد نیکل و بورید نیکل نزدیک سطح مشترک و بورید کروم در مرکز اتصال می‌باشد. آلیاژهای اینکونل در اتصال‌دهی به روش‌های معمول ذوبی دچار معایبی مانند ایجاد ریزترک‌های انجمادی، جدایش کاربیدهای نیویوم در مناطق بین‌دندریتی و ایجاد فاز لایه میانی-گردند [۹-۱۰]. بنابراین توجه به فرآیندهای جوشکاری حالت جامد برای این سری از آلیاژها از اهمیت بالایی برخوردار است. فرآیند اتصال‌دهی فاز مایع گذرا، جزء فرآیندهای اتصال‌دهی حالت جامد محسوب می‌شود که به دلیل مزیت‌های ویژه‌ایی که نسبت به دیگر روش‌های اتصال‌دهی دارد، اخیراً توجه زیادی از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در واقع، این فرآیند بهینه شده روش اتصال‌دهی لحیم‌کاری سخت می‌باشد. در روش لحیم‌کاری سخت به دلیل عدم وجود زمان در حین اتصال‌دهی، فرآیند نفوذ قابل توجهی در حین اتصال‌دهی صورت نمی‌گیرد. در حقیقت لایه میانی ذوب شده در اثر کاهش دما، به صورت غیر همدم‌ها<sup>۱</sup> منجمد می‌گردد. اما زمان‌دهی در فرآیند فاز مایع گذرا سبب می‌شود نفوذ عناصر از لایه میانی به فلز پایه و بالعکس رخ داده و یکنواختی در غلظت عناصر موجود از فلز پایه به ناحیه اتصال رخ دهد. این پدیده سبب رخداد انجماد همدم‌ها می‌گردد که شاخصه اصلی فرآیند فاز مایع گذرا است. با زمان‌دهی و در اثر نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند عناصر بور و سیلیسیم از لایه میانی به درون فلز پایه، نقطه ذوب ناحیه اتصال افزایش یافته و انجماد به صورت همدم‌ها<sup>۲</sup> در دمای اتصال رخ می‌دهد. این موضوع سبب از بین رفتن ترکیبات یوتکتیکی و فازهای سخت می‌گردد که در اثر انجماد غیر همدم‌ها در ناحیه مرکزی اتصال به وجود آمده بودند. در نتیجه این اتفاقات، افزایش و بهبود در خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرا نسبت به لحیم‌کاری سخت حاصل خواهد شد [۱۱-۱۲].

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

در این پژوهش از آلیاژهای اینکونل ۶۰۰ و ۷۱۸ به شکل ورق استفاده شد که با استفاده از فرآیند نورد تولید شده بودند. فلزات پایه پس از عملیات نورد، تحت عملیات تنش زدایی قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی آلیاژهای اینکونل ۷۱۸، اینکونل ۶۰۰ مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ مشاهده می‌شود. از لایه میانی BNi-2 برای اتصال‌دهی استفاده شد که ترکیب آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه و لایه میانی (برحسب % وزنی)

عناصر	اینکونل 718	اینکونل 600	لایه میانی BNi-2
کروم	۱۸/۰۳	۱۴/۷	۷
آهن	Bal	۱۰	۳
سیلیسیم	۱۶/۰۱	۰/۱۳	۴/۵
مولیبدن	۳/۱۱	۰/۳۲	-
نیکل	۵۳/۱۶	Bal	Bal
بور	۰/۰۰۲	-	۳/۲
مس	۰/۰۷	۰/۲۴	-
تیتانیوم	۱/۱۵	۰/۳۴	۹
نیوبیوم	۵/۴۸	۰/۰۳	-
کربن	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۶
منگنز	۰/۰۸	۰/۳۲	-



شکل (۱): نحوه سرهم بندی نمونه‌ها به منظور اتصال‌دهی

ابتدا نمونه‌هایی با ابعاد  $۲ \times ۱۰ \times ۴۰$  توسط وایرکات بریده و آماده‌سازی شدند. سطح اتصال نمونه‌ها تا سنباده ۱۲۰۰ آماده‌سازی شد و نمونه‌ها به همراه فویل لایه میانی درون محلول استون و به مدت یک ساعت با دستگاه آلتراسونیک تحت شستشو قرار گرفتند. پس از آن، نمونه‌ها تا زمان پیونددهی در

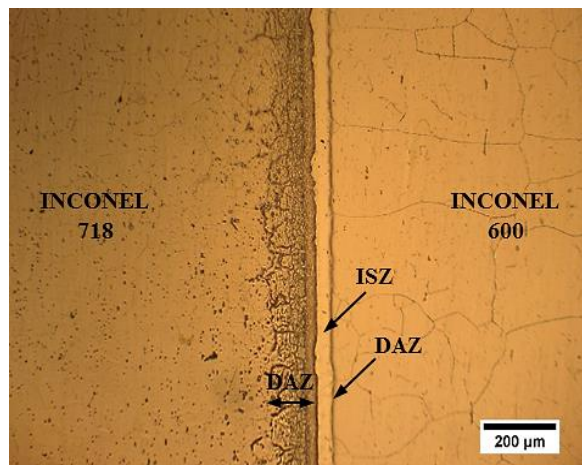
همگن‌سازی در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه سبب از بین رفتن فازهای بین‌فلزی در این ناحیه می‌گردد و همچنین باعث افزایش دو برابری استحکام نسبت به نمونه اتصال داده شده می‌شود. آنها همچنین مشاهده کردند که به دلیل نفوذ بالای تیتانیوم و آلومینیوم از فلز پایه به این نواحی، ترکیبات ۷ در این ناحیه به وجود آمدند. تاثیر فرآیند همگن‌سازی بر اتصال آلیاژ FSX-414 با لایه میانی MBF-80 توسط بختیاری [۱۸] و همکاران بررسی شد. آنها دریافتند که در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان یک ساعت، ترکیبات برآید کروم و برآید کبالت در ناحیه متأثر از نفوذ وجود دارد و این ناحیه از بین نرفت. با انجام فرآیند همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ ساعت، ترکیبات برآیدی به طور کامل از بین رفتند و خواص مکانیکی اتصال افزایش یافت. پورانوری و همکاران [۱۹]، تاثیر عملیات حرارتی را بر روی اتصال همجنس آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش فاز مایع گذرا مطالعه کردند. این محققین گزارش دادند که در عملیات حرارتی پیرسازی در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت، ناحیه متأثر از نفوذ به طور کامل همگن شده و ترکیبات بین‌فلزی در این شرایط از بین رفتند. آنها گزارش دادند که توسط عملیات حرارتی پیرسازی دوتایی، استحکام ناحیه اتصال در این شرایط برابر با ۹۶ درصد فلز پایه گردید.

با توجه به اهمیت اتصال سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به اینکونل ۶۰۰ و کاربرد مهم آن در صنعت، بهبود هر چه بیشتر اتصال فاز مایع گذرا بین این دو آلیاژ ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش بررسی تاثیر پارامترهای دما و زمان بر همگن‌سازی ریزساختار و تغییرات فازی ناحیه متأثر از نفوذ می‌باشد. فرآیند همگن‌سازی بر اتصال انجام شده عاری از هر گونه ترکیب یوتکتیکی در مرکز ناحیه اتصال صورت گرفت و تمرکز این پژوهش به حذف نواحی متأثر از نفوذ در دو سیکل دمایی ۱۰۸۰ و ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد معطوف شد. در نهایت به بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های همگن‌سازی شده پرداخته شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار ناحیه اتصال فاز مایع گذرا در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۵ دقیقه در شکل ۳ ارائه شده است.

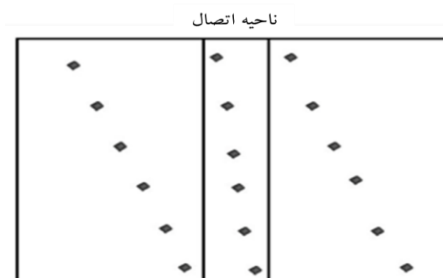


شکل (۳): اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به اینکونل ۶۰۰ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۵ دقیقه

همانطور که مشخص است دو ناحیه مجزا در این ساختار وجود دارد. نواحی نزدیک به فصل مشترک اتصال در فلزات پایه، ناحیه متأثر از نفوذ (DAZ) است و ناحیه اتصال یکنواخت، ناحیه انجماد همدم (ISZ) می‌باشد. در واقع در این اتصال هیچ‌گونه اثری از ناحیه انجماد غیر همدم نیست و انجماد ناحیه اتصال تماماً بطور همدم انجام گرفته است. دلیل تکمیل انجماد همدم در این شرایط را می‌توان به نفوذ عنصر اصلی کاهنده نقطه ذوب (بور) در اثر زمان‌دهی نسبت داد. در واقع با نفوذ عنصر بور به فلز پایه، تحت انجماد ترکیبی رخ داده و دمای انجماد ناحیه اتصال افزایش یافته و انجماد بطور همدم انجام می‌گیرد [۱۳ و ۱۵]. بنابراین عدم وجود مناطق حاوی فازهای سخت و شکننده ناشی از انجماد غیر همدم حاکی از اتصال قابل قبول و مناسب می‌باشد. اما هنوز نواحی متأثر از نفوذ در این ساختار وجود دارد که می‌تواند باعث افت خواص گردد. در نتیجه، هدف اصلی این تحقیق بررسی بر روی این نواحی و تلاش برای حذف آن است.

از مزایای فرآیند اتصال فاز مایع گذرا انجماد در شرایط همدم

استون قرار گرفتند. لایه میانی در بین نمونه‌ها قرار داده شد و مجموعه درون فیکسچر طراحی شده جهت اتصال‌دهی (شکل ۱) قرار داده شد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده و آزمون‌های اولیه، دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۵ دقیقه که انجماد همدمی کامل در آن رخ داد، برای اتصال ابتدایی انتخاب شد [۱۳ و ۲۰]. سپس همگن‌سازی در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ و ۱۲ ساعت، و همچنین در دمای ۱۱۸۰ به مدت ۱، ۲ و ۳ ساعت بر روی نمونه اتصال داده شده، انجام شد. دماهای فرآیند همگن‌سازی با توجه به پژوهش‌های قبلی [۱۹ و ۲۱-۲۲] و آزمون‌های اولیه و همچنین در نظر داشتن عدم تخریب فلزات پایه انتخاب شد. عملیات اتصال‌دهی در کوره تحت اتمسفر خلاء با توان  $10^{-5}$  Torr انجام شد. بعد از انجام فرآیندهای معمول متالوگرافی شامل سنباده‌زنی و اچ کردن سطح مقطع اتصال، به منظور بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان مجهز به طیف‌سنجی آنالیز اشعه X استفاده شد. لازم به ذکر است که دستگاه آنالیزی دارای محدودیت در آنالیز عنصر بور بود و این عنصر را با خطا آنالیز می‌کرد. در واقع حضور مقدار بالای بور تنها نشان‌دهنده وجود عنصر بور در منطقه آنالیز شده بود. به منظور ارزیابی استحکام برشی نواحی اتصال از روش معمول مورد استفاده توسط دیگر محققین استفاده گردید [۱۳ و ۱۸-۱۹]. برای این منظور از فیکسچری که نیروی کششی را به نیروی برشی تبدیل می‌کند استفاده گردید و استحکام نواحی اتصال اندازه‌گیری شد. سختی ناحیه اتصال و فلز پایه توسط آزمون ریزسختی سنجی با نیرو ۵۰ گرم به مدت زمان ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. نحوه انجام ریزسختی سنجی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل (۲): نحوه انجام ریزسختی سنجی از ناحیه اتصال

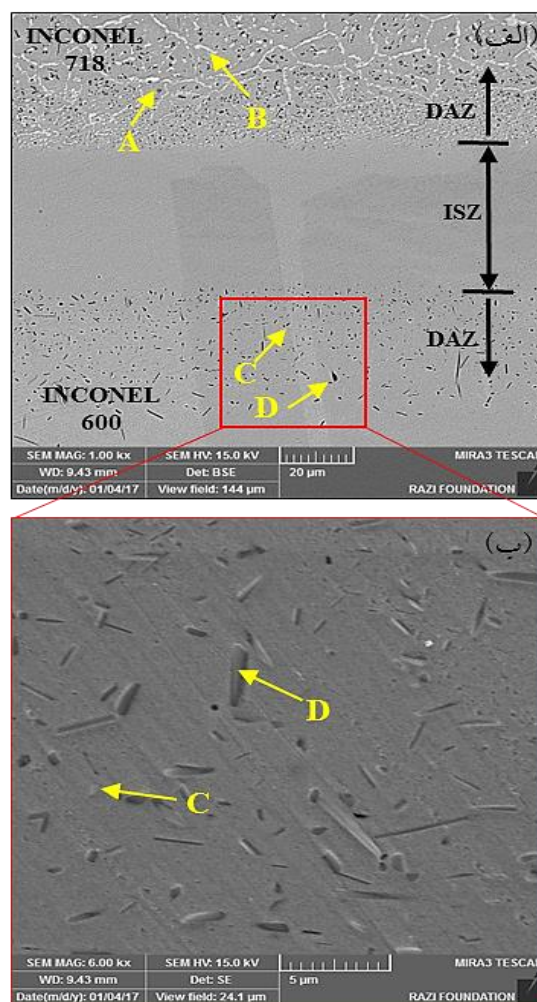
همانطور که مشاهده می شود در سمت هر دو آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و ۶۰۰ ناحیه متاثر از نفوذ به وجود آمده است. نواحی متاثر از نفوذ سمت آلیاژ اینکونل ۷۱۸ شامل ترکیبات هم محور و شاخه- ایی در مرزدانه هاست اما در سمت اینکونل ۶۰۰ ترکیبات ریز غالباً هم محور بطور پراکنده وجود دارد. نتایج آنالیز عنصری این رسوبات در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی نواحی مختلف در شکل ۴

عنصر	ناحیه			
	D	C	B	A
کروم	۲۵/۳۰	۸/۸۲	۱۶/۷۶	۶/۴۸
آهن	۳/۵۶	۴/۷۸	۴/۲۹	۱۲/۰۱
سیلیسیم	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۰۹	۰/۱۸
مولیبدن	-	-	۸/۰۸	۰/۳۰
نیکل	۲۶/۹۳	۴۹/۱۹	۸/۸۹	۴۱/۹۶
بور	۴۳/۹۳	۳۶/۳۳	۴۴/۸۸	۳۶/۸۱
تیتانیوم	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۶۰	۰/۴۳
نیوبیوم	-	-	۱۶/۴۲	۱/۸۳
فاز پیشنهادی	Ni-Cr غنی از بور	Ni غنی از بور	-Nb-Cr Mo غنی از بور	Ni-Fe Cr غنی از بور

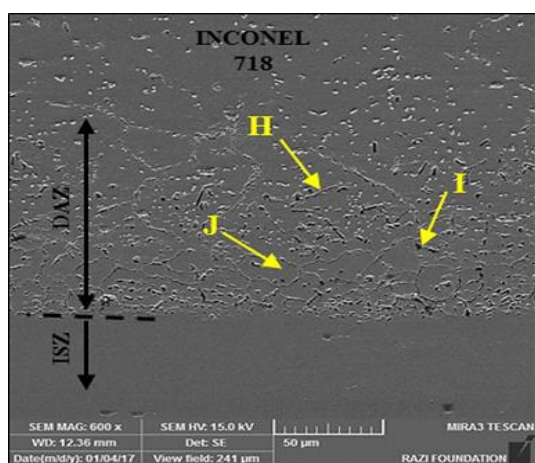
نتایج حاصل از آنالیز عنصری در ناحیه متاثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ نشان می دهد که ترکیبات نیکل و آهن غنی از بور در ناحیه A در درون دانه ایجاد شد. آنالیز نقطه B نشان داد که ترکیب کروم-نیوبیوم-مولیبدن غنی از بور در مرزدانه ها و درون دانه به میزان زیادی تشکیل شد. بنابراین می توان بیان کرد که میل ترکیبی شدید نیوبیوم، کروم و مولیبدن با بور سبب ایجاد ترکیبات برابری غنی از این عناصر شد و در نتیجه سبب فقیر شدن زمینه از این عناصر می گردد. کاهش شدید عناصر کروم و مولیبدن در اطراف رسوبات برابری غنی از کروم و مولیبدن در ناحیه متاثر از نفوذ سبب کاهش مقاومت به خوردگی در این مناطق می گردد [۲۳]. عناصر آهن و مولیبدن دارای شعاع اتمی نزدیک به نیکل هستند که سبب پایداری این محلول جامد و افزایش سختی و استحکام آن می شود. حال با توجه به فقیر شدن

است که سبب می گردد دمای کاری ناحیه اتصال بیشتر از دمای اتصال دهی شود. این مشخصه مهم در اثر نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب از لایه میانی به فلز پایه و افزایش محدوده انجمادی (لیکویدوس - سالیدوس) ناحیه اتصال رخ می دهد. عنصر بور در لایه میانی نقش کاهنده نقطه ذوب را دارد [۱۳]. بنابراین قرارگیری نمونه ها بالاتر از دمای اتصال دهی جهت افزایش نفوذ عناصر به منظور انجام فرآیند همگن سازی توجیه پذیر است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه اتصال آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به اینکونل ۶۰۰ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۴۵ دقیقه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): (الف): تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ اینکونل ۶۰۰ به ۷۱۸ در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه و (ب): ناحیه متاثر از نفوذ اینکونل ۶۰۰ با بزرگنمایی بالاتر

در این سیکل حرارتی است. رسوبات هم محور در درون دانه‌ها نیز ترکیب نیکل-کروم، آهن غنی از بور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۶۰۰ در این شرایط بطور کامل از بین رفت.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی اتصال همگن سازی شده در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶ ساعت

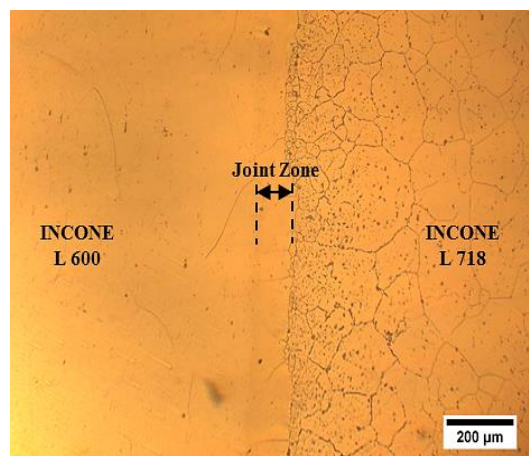
جدول (۲): ترکیب شیمیایی نواحی مختلف در شکل ۵

ناحیه		عنصر
I	H	
۱۳/۴۱	۹/۸۰	کروم
۱۴/۸۰	۴/۰۴	آهن
-	۰/۰۴	سیلیسیم
۰/۸۵	۱۷/۳۶	مولیبدن
۴۲/۴۹	۶/۴۹	نیکل
۲۴/۵۴	۴۴/۰۹	بور
۰/۶۷	۰/۴۴	تیتانیوم
۳/۲۴	۱۷/۷۳	نیوبیوم

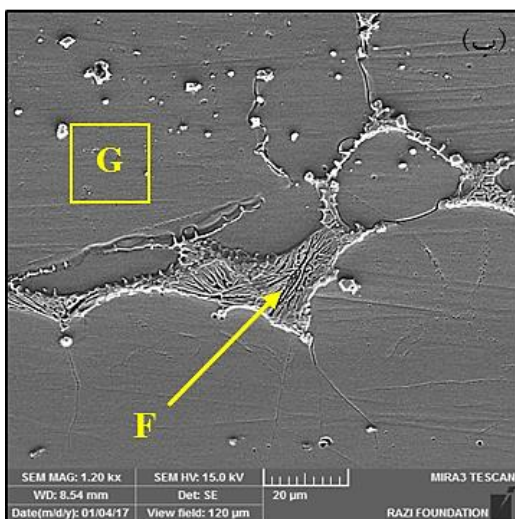
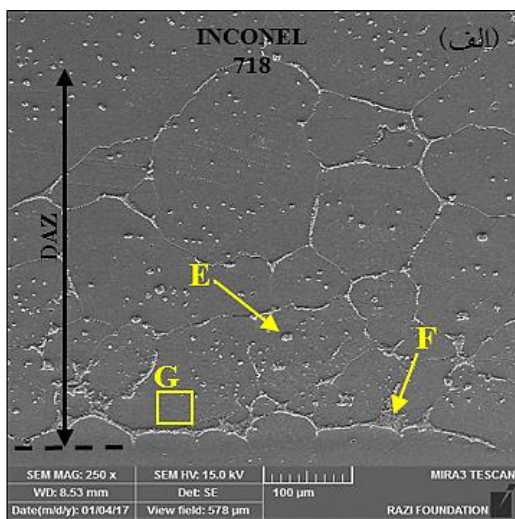
تصویر نمونه همگن سازی شده در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت در شکل ۶ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که ترکیبات براییدی ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تا حدود بسیار زیادی از بین رفته‌اند و ناحیه‌ای تقریباً مشابه با فلز پایه حاصل شده است.

ناحیه متأثر از نفوذ از این عناصر در اثر تشکیل ترکیبات براییدی، محلول جامد نیکل این مناطق دچار افت در سختی و استحکام می‌شود. از طرفی عناصر نیوبیوم، تیتانیوم و آلومینیوم می‌توانند با فرایند عملیات حرارتی مناسب، فازهای  $\gamma'$  و  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti, Al})$ ) را تشکیل دهند که سبب افزایش قابل توجه در استحکام فلز پایه می‌شود. بنابراین، با فقیر شدن این عناصر در ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸، احتمال تشکیل این فازها در این نواحی کم شده و در نتیجه کاهش در خواص مکانیکی این ناحیه رخ خواهد داد. نکته بسیار مهم این است که ماهیت این ترکیبات براییدی که در ناحیه متأثر از نفوذ تشکیل شده‌اند بسیار ترد و شکننده است و سبب افت هر چه بیشتر خواص در این ناحیه می‌گردند. منطقه متأثر از نفوذ سمت آلیاژ اینکونل ۶۰۰ دارای دو نوع ترکیب بود که آنالیز آن در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که مشهود است ترکیبات براید غنی از نیکل و کروم در این نواحی تشکیل شد. تشکیل این ترکیبات را می‌توان با دیاگرام سه تایی نیکل، کروم، بور مورد ارزیابی قرار داد. عدم وجود عناصر استحکام بخش مانند نیوبیوم و مولیبدن در این ناحیه به وضوح دیده می‌شود. ترکیبات براییدی به وجود آمده در این ناحیه علاوه بر کاهش مقاومت به خوردگی این ناحیه، سبب کاهش خواص مکانیکی به واسطه ماهیت ترد و شکننده این ترکیبات می‌شود. به منظور بهبود نواحی متأثر از نفوذ، فرآیند همگن سازی در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ و ۱۲ ساعت و در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱، ۲ و ۳ ساعت انجام شد. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه متأثر از نفوذ اتصال همگن شده در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶ ساعت را نشان می‌دهد. در شرایط قبل از همگن سازی، مرز دانه‌های منطقه متأثر از نفوذ توسط ترکیبات براییدی قفل شده و اجازه رشد پیدا نکردند. آنالیز عنصری از رسوبات مرزدانه و درون‌دانه نمونه همگن شده در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶ ساعت در جدول ۳ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در مرزدانه‌ها، درصد بالایی از نیوبیوم-کروم و مولیبدن غنی از بور وجود دارد که نشان دهنده عدم نفوذ زیاد

بین فلزی این ناحیه افزوده شدند. در واقع فرایند همگن سازی در اثر نفوذ عناصر از نواحی با غلظت بالا به نواحی با غلظت کمتر به وضوح مشاهده می شود. این موضوع با میزان عناصر موجود در ناحیه زمینه منطقه متاثر از نفوذ (منطقه G در شکل ۷) در تطابق است.



شکل (۶): تصویر نوری اتصال همگن سازی شده در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۲ ساعت

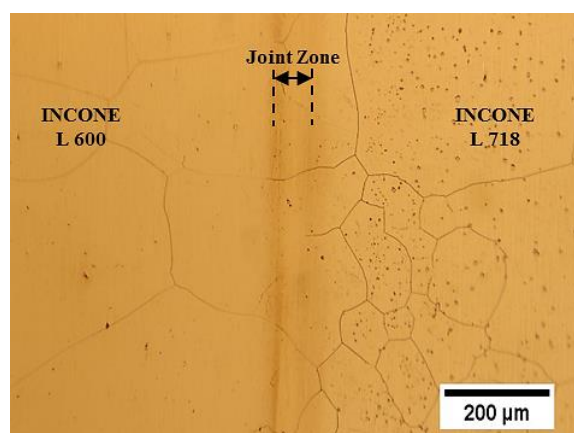


شکل (۷): (الف): تصویر میکروسکوپ الکترونی اتصال همگن سازی شده در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد و زمان ۲ ساعت و (ب): تصویر ناحیه متاثر از نفوذ اینکونل ۷۱۸ با بزرگنمایی بالا

همچنین مشاهده شد که درون دانه‌ها ترکیبات هم محور ریزی به طور پراکنده تشکیل شده است. نتایج آنالیز عنصری از این رسوبات (نقطه E در جدول ۴) نشان می دهد که ترکیب برایدی

با توجه به این نتایج، می توان گفت که غلظت بالای ترکیبات برایدی در ناحیه متاثر از نفوذ نیازمند افزایش دما و زمان برای نفوذ بیشتر عناصر در جهت همگن سازی این مناطق است. تاثیر گذاری دما در اثر افزایش پتانسیل نفوذی عناصر بسیار بیشتر از تاثیر گذاری زمان در فرایند نفوذ حالت جامد است [۲۴]. بنابراین در ادامه پژوهش با افزایش دما از ۱۰۸۰ به ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد، سعی بر حذف منطقه متاثر از نفوذ و نحوه تاثیر گذاری دما بر این ناحیه شد. با انجام فرآیند همگن سازی در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد و زمان ۲ ساعت، ترکیبات موجود در نواحی متاثر از نفوذ سمت آلیاژ اینکونل ۶۰۰ به طور کامل از بین رفت. اما ترکیبات برایدی سمت آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به میزان زیادی کاهش یافت ولی بطور کامل از بین نرفتند. شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی ناحیه متاثر از نفوذ سمت آلیاژ اینکونل ۷۱۸ همگن شده در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت را نشان می دهد. مشاهده می شود که ترکیبات برایدی در نواحی مرزدانه همچنان پابرجا هستند اما مقدار و تراکم آنها بشدت کاهش یافته است. آنالیز عنصری از ترکیبات موجود در مرزدانه‌ها که در جدول ۴ آورده شده است، نشان می دهد که غلظت عناصر نیوبیم و مولیبدن در ترکیب‌های برایدی ناحیه متاثر از نفوذ کاهش پیدا کرده و به فلز پایه نفوذ می کنند و همچنین عناصر موجود در فلز پایه مانند آهن و نیکل به ترکیب

های منطقه متاثر از نفوذ در این دو شرایط است. با قرارگیری نمونه در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، رشد دانه در اثر نفوذ سریع در این منطقه به وضوح مشاهده می‌شود اما در نمونه همگن شده در دمای ۱۰۸۰ به مدت ۶ ساعت ملاحظه می‌شود که نفوذ آرام‌تر عناصر از مرز دانه‌های ناحیه متاثر از نفوذ سبب شده تا دانه‌ها در پرتوی ترکیبات برآیدی محبوس باشند و اجازه رشد نداشته باشند. تصویر نمونه همگن شده در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ ساعت در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل (۸): تصویر نوری اتصال همگن سازی شده در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ ساعت

مناطق متاثر از نفوذ در آلیاژهای فلز پایه بطور کامل از بین رفت. ترکیبات برآیدی موجود در مرز دانه برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ نیز به طور کامل انحلال یافت و دانه‌های منطقه متاثر از نفوذ از حالت قفل شدگی خارج شده و کمی رشد کردند. ناحیه اتصال نیز دارای مرز دانه‌های پیوسته بین دو آلیاژ است. بنابراین، همگن‌سازی در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت سبب حذف کامل ترکیبات برآیدی ناحیه متاثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ شد و خواص مکانیکی اتصال را بهبود داد. دلیل این امر افزایش قابل توجه عناصر افزایش دهنده استحکام (Ti, Al, Nb) در ناحیه اتصال در اثر نفوذ می‌باشد [۱۹].

غنی از کروم، نیکل و آهن هستند که به صورت پراکنده در زمینه پخش شده‌اند. ایجاد ترکیبات بیشتر در مرز دانه‌ها نسبت به درون دانه‌ها به این دلیل بود که مرز دانه‌ها مناطق پر انرژی‌تر هستند و نفوذ حالت جامد از این طریق بسیار آسان‌تر نسبت به نفوذ درون دانه‌ها انجام می‌گیرد.

جدول (۳): ترکیب شیمیایی نواحی مختلف در شکل ۷

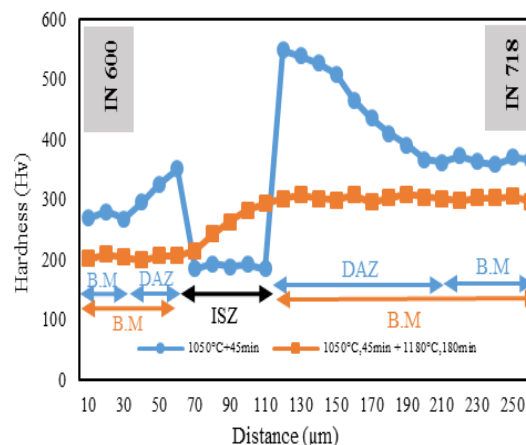
عنصر	ناحیه		
	G	F	E
کروم	۱۴/۰۶	۱۱/۳۱	۹/۱۰
آهن	۱۴/۷۶	۹/۹۶	۸/۵۷
سیلیسیم	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۶
مولیبدن	۲/۵۶	۳/۵	۳/۹۰
نیکل	۴۰/۴۸	۳۵/۷۱	۳۱/۵۸
بور	۲۲/۲۸	۲۷/۰۲	۳۰/۵۴
تیتانیوم	۰/۵۹	۰/۸۵	۰/۷۷
نیوبیوم	۴/۸۹	۱۱/۶۰	۱۵/۲۷

با مقایسه نمونه‌های همگن‌سازی شده در شرایط دمایی ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت و نمونه همگن سازی در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، می‌توان بیان کرد که تراکم ترکیبات در شرایط دمایی پایین‌تر بسیار بیشتر از شرایط دمایی ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است. در واقع این موضوع اهمیت دما را برای نفوذ حالت جامد این عناصر نشان می‌دهد. بطوری که اثرگذاری دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۲ ساعت بسیار بیشتر از اثرگذاری دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۶ ساعت است. با در نظر گرفتن اینکه عنصر بور که عامل اصلی به وجود آمدن ترکیبات برآیدی در منطقه متاثر از نفوذ است، می‌توان گفت که بین نشین بودن این عنصر تاثیرگذاری دما بر نفوذ این عنصر و حذف ناحیه متاثر از نفوذ را دوچندان می‌کند. گزارش شده است که برای لایه میانی عاری از عنصر بور که سیلیسیم نقش کاهندگی نقطه ذوب را بر عهده داشت؛ به منظور حذف ناحیه متاثر از نفوذ، نمونه‌ها به مدت چند روز در دمای بالا قرار گرفتند [۲۵]. موضوع قابل تامل دیگر، اندازه دانه-



## ۳-۲- سختی سنجی

نمودار پروفیل سختی برای نواحی متأثر از نفوذ برای حالت‌های قبل از همگن سازی و بعد از همگن سازی (در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت) در شکل ۹ آورده شده است.

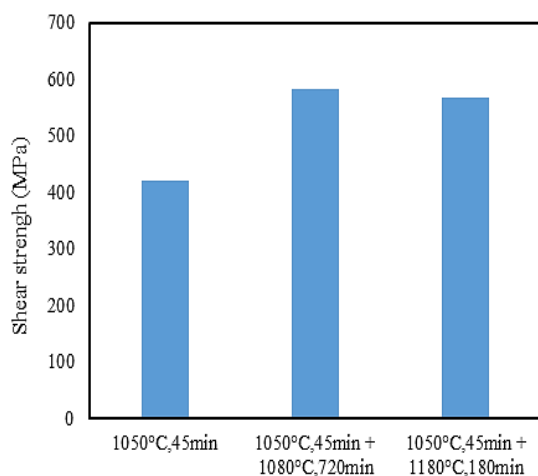


شکل (۹): تغییرات سختی در سطح مقطع نمونه های متصل شده

مشاهده می شود که قبل از فرآیند همگن سازی در ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۶۰۰ به دلیل حضور ترکیبات برآیدی، سختی کمی بیشتر بوده است. از طرفی ترکیبات برآید بسیار سخت در ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ سبب ایجاد ناحیه با سختی بالا شده است که در نواحی نزدیکتر به منطقه اتصال سختی بیشتر و با پیشروی به سمت فلز پایه مقدار سختی کاهش یافته است. این موضوع به دلیل وجود ترکیبات برآیدی بیشتر در ناحیه نزدیکتر به ناحیه اتصال می باشد. بعد از فرآیند همگن سازی این نواحی به طور کامل از بین رفتند و سختی مناطق متأثر از نفوذ هر دو آلیاژ برابر سختی فلزات پایه شد. کاهش سختی در فلزات پایه در اثر همگن سازی را می توان به درشت شدن دانه ها نسبت داد. از طرفی، افزایش سختی در ناحیه انجماد همدمای در نمونه همگن سازی شده نسبت به نمونه اولیه را می توان به نفوذ عناصر استحکام بخش مانند مولیبدن و آهن به محلول جامد ناحیه انجماد هم دما و همچنین نفوذ عنصر نیوبوم که می تواند سبب تشکیل فاز های استحکام بخش در این ناحیه شود نسبت داد.

## ۳-۳- استحکام برشی

نواحی متأثر از نفوذ هموار مناطق شکست و رشد ترک در اتصالاتی می باشد که انجماد همدمای در آن ها کامل شده است [۱۳]. در این تحقیق نیز به نظر می رسد که برای اتصال همگن سازی نشده که دارای ناحیه اتصال انجماد همدمای کامل و مناطق متأثر از نفوذ بود، شکست از ناحیه متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به واسطه وجود ترکیبات برآیدی ترد و شکننده رخ داد. طبیعتاً حذف این مناطق سبب افزایش استحکام ناحیه اتصال می گردد. نمودار تغییرات استحکام برشی اتصالات در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل (۱۰): استحکام برشی اتصالات در شرایط مختلف

همانطور که مشخص است با انجام فرآیند همگن سازی استحکام برشی به میزان قابل توجهی افزایش یافت. میزان استحکام اتصالات همگن شده در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ ساعت و ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت به ترتیب برابر با ۵۸۳ و ۵۶۸ مگاپاسکال می باشد. در صورتی که اعداد بدست آمده از استحکام برشی با زمان انجام فرآیند همگن سازی (۱۲ و ۳ ساعت) در دماهای مذکور مقایسه گردد، نتیجه می شود که همگن سازی در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت مطلوب تر از همگن سازی در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۱۲ ساعت است. این موضوع به ملاحظات

- [2] M. Sundararaman, P. Mukhopadhyay & S. Banerjee, "Precipitation of the  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb phase in two nickel base superalloys", Metallurgical transactions, Vol. 19A, No. 3, pp. 453-465, 1988.

[۳] ع. مرتضایی و م. شمعیان، "اثر عملیات حرارتی پیرسازی بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۸"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره چهارم، صفحه ۲۰۵-۲۱۳، ۱۳۹۴.

- A. Khorram, M. Ghoreishi, M. J. Torkamany & M. M. Bali, "Laser brazing of Inconel 718 alloy with a silver based filler metal", Optics & Laser Technology, Vol. 56, pp. 443-450, 2014.

- [4] Khorram & M. Ghoreishi, "Comparative study on laser brazing and furnace brazing of inconel 718 alloys with a silver based filler metal", Optics & Laser Technology, Vol. 68, pp. 165-174, 2015.

- [5] Khorram & M. Ghoreishi, "Laser Assisted Brazing of Inconel 718: The Effects of Process Parameters and Subsequent Optimization", Lasers in Engineering, Vol. 31, pp. 333-350, 2015.

- [6] Khorram, O. Fakhraei & M. J. Torkamany, "Laser brazing of Inconel 718 and Inconel 600 with BNi-2 nickel-based filler metal", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 58, No. 5-8, pp. 2075-2084, 2017.

[۷] ع. خرم، ع. جعفری و م. مرادی، "الجم کاری سخت به کمک لیزر فولادهای زنگ نزن ۳۲۱ و ۴۱۰ با ماده پرکننده پایه نیکل BNi-2"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۱۷، ۱، صفحه ۱۲۹-۱۳۵، ۱۳۹۶.

- [8] 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.

- [9] 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.

- [10] W. F. Gale & D. A. Butts, "Transient liquid phase bonding", Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 9, No. 4, pp. 283-300, 2004.

اقتصادی زمان استفاده از کوره در مقایسه با استحکام نزدیک به هم در دو شرایط همگن سازی برمی گردد. علاوه بر این، چنانچه که مشاهده شد ترکیبات برآیدی در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی-گراد و زمان ۱۲ ساعت به طور کامل از بین نرفت و نیازمند زمان‌دهی بیشتر برای از بین رفتن کامل این ترکیبات در ناحیه متأثر از نفوذ است که صرفه اقتصادی را پایین می‌آورد. این موضوع برای دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ ساعت به گونه‌ای بود که منطقه متأثر از نفوذ بطور کامل از بین رفت.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بهبود ناحیه اتصال فاز مایع گذرا آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به اینکونل ۶۰۰، فرآیند همگن سازی در دما و زمان‌های مختلف انجام شد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- تاثیر دمای همگن سازی نسبت به زمان بسیار بیشتر می‌باشد بطوری که در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۳ ساعت فرآیند همگن سازی کامل شد اما در دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۱۲ ساعت اتصال به میزان زیادی همگن شد.

۲- به دلیل عدم وجود عناصر برآیدزای قوی در آلیاژ اینکونل ۶۰۰، نواحی متأثر از نفوذ آلیاژ اینکونل ۶۰۰ نسبت به آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بسیار سریع تر همگن شد.

۳- در اثر نفوذ عناصر استحکام بخش به منطقه انجماد همدمای، سختی این ناحیه بعد از فرآیند همگن سازی افزایش پیدا کرد.

۴- بهترین نتایج همگن سازی برای اتصالات در دماهای ۱۰۸۰ و ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب برای زمان‌های ۱۲ و ۳ ساعت حاصل شد که میزان استحکام برشی آنها به ترتیب برابر با ۵۸۳ و ۵۶۸ مگاپاسکال بدست آمد.

#### ۵- مراجع

- [1] M. J. Donachi & S. J. Donachi, "Superalloys a technical guide", second Edition, ASM International, Materials Park, ohio, 2002.

- [20] J. Cao, Y. F. Wang, X. G. Song, C. Li & J. C. Feng, "Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of TLP bonded Inconel718 super alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 590A, pp. 1-6, 2014.
- [۲۱] ع. جهانبخش، ب. عباسی خزایی و ر. بختیاری، "تاثیر عملیات همگن سازی بر بهبود ریزساختار ناحیه اتصال نامتجانس TLP برای سیستم FSX-414MBF-80/IN-738"، *مجله مهندسی متالورژی*، شماره ۵۵، صفحه ۱۹-۲۷، ۱۳۹۳.
- [22] O. A. Idowu, O. A. Ojo & C. Chaturvedi, "Microstructural study of transient liquid phase bonded cast INCONEL 738LC superalloy", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 36A, pp. 2787-2796. 2006.
- [23] A. L. Laskar, J. L. Bocquet, G. Brebec & C. Monty, "Diffusion in materials", Springer Science & Business Media, UK, 2012.
- [24] D. S. Duvall, W. A. Owczarski & F. D. Paulonis, "TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloy", *Welding Journal*, Vol. 53, No. 4, pp. 203-214, 1974.
- [11] G. O. Cook & C. D. Sorensen, "Overview of Transient Liquid Phase and Partial Transient Liquid Phase Bonding", *Journal of Materials Science*, Vol. 46, pp. 5305-5323, 2011.
- [12] R. Abdolvand, 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", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 172-180, 2107.
- [۱۳] م.ع. میثاقی و ر. بختیاری، "بررسی فرایند اتصال فاز مایع گذرا TLP برای فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI321 با استفاده از لایه واسط تجاری MBF-20"، *فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد*، سال دهم، شماره چهارم، صفحه ۷۳-۸۸، ۱۳۹۵.
- [14] Khazaei, A. Jahanbakhsh & R. Bakhtiari, "TLP bonding of dissimilar FSX-414/IN-738 system with MBF-80 interlayer: The effect of homogenizing treatment on microstructure and mechanical properties", *Materials Science & Engineering*, Vol. 651A, pp. 93-101, 2016.
- [۱۵] ه. نیکدین و ع. اکرامی، "اثر اتصال به روش فاز مایع گذرا بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن"، *فصلنامه علمی و پژوهشی شریف*، شماره ۲۳، صفحه ۵-۹، ۱۳۸۶.
- [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. Bakhtiari, A. Ekrami & T. I. Khan, "Microstructure-mechanical properties relation of TLP-bonded FSX-414 superalloy: effect of homogenization design", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol 24, pp. 1687-1696, 2015.
- [18] M. Pouranvari, A. Ekrami & A. H. Kokabi, "Aging response of transient liquid phase bonded wrought IN718 superalloy: influence of post-bond heat treatment", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 19, No. 2, pp. 105-110, 2014.
- [19] 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*, Vol. 447A, pp. 125-133, 2007.

### ۶- پی نوشت

- [1] A-Thermally solidification
- [2] Isothermal solidification
- [3] Diffusion affected zone