

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ آستنیتی در فرآیند لحیم کاری سخت

آرمین امامی^{۱*}، مرتضی شمعیان^۲، مسعود کثیری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد- جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

* Email: armin1emami@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۱۲)

چکیده

در این مقاله به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس سوپر آلیاژ Inconel 625 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316L با لایه میانی پایه نیکل AWS B-Ni2 به ضخامت ۱۲۰ میکرون، در فرآیند لحیم کاری سخت پرداخته شده است. اتصال در دمای 1020°C در مدت زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ دقیقه و همچنین عملیات همگن سازی در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت بر روی نمونه اتصال یافته به مدت ۱۲۰ دقیقه در کوره موفلی تحت پوشش گاز محافظ آرگون انجام شده است. بررسی‌های به عمل آمده از ریزساختار و خواص مکانیکی درز اتصال نشان داده است که با افزایش زمان اتصال دهی از ۳۰ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه حجم ترکیبات بین فلزی و رسوبات در مرکز درز اتصال کاهش، و استحکام نهایی برشی از ۲۶۵ Mpa به ۳۶۰ Mpa افزایش یافته است. هم چنین بعد از عملیات همگن سازی، نمونه به ریز ساختاری یکدست نزدیک و استحکام نهایی برشی به ۵۲۰ Mpa افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی:

سوپر آلیاژ، فولاد زنگ نزن آستنیتی، لحیم کاری سخت، لایه میانی، انجماد همدم، همگن سازی

۱- مقدمه

عوامل مهم در انتخاب فرآیند اتصال می‌باشند. در فرآیندهای جوشکاری ذوبی به دلیل پایین بودن تمرکز حرارتی، انتقال حرارت به صورت غیرهمگن، ایجاد فاز سخت در منطقه تاثیر حرارتی (HAZ)، افت شدید خواص مکانیکی و هم چنین ایجاد پیچیدگی و تغییرات ابعادی، استفاده از فرآیندهای اتصال دهی کوره‌ای مثل لحیم کاری سخت مورد نیاز است [۱].

برای استفاده از موادی با کارایی مناسب در صنایع گوناگون و بهره‌مندی از خواص بهینه در موارد مختلف نیاز به ایجاد اتصال مناسب می‌باشد. با توجه به تنوع مواد مهندسی و نیاز به استفاده از این مواد برای کاربردهای مختلف، در هر مورد باید از اتصال مناسب برای آن ماده استفاده کرد. خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، اقتصاد مهندسی و مهم تر از همه توانایی ایجاد اتصال از

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- معرفی اتصال دهی به روش لحیم کاری سخت

اساس و روش این فرایند به گونه‌ای می‌باشد که لایه میانی یا همان ماده پرکننده به درجه حرارت ذوب می‌رسد اما دو ماده مورد اتصال، زیر درجه حرارت ذوب نگهداری می‌شود و از طریق پدیده نفوذ و انتقال جرم در حالت جامد لایه میانی ذوب شده به درون دو ماده جامد مورد اتصال نفوذ پیدا می‌کند و با ایجاد واکنش با فلزات پایه محکم می‌شود. نکته قابل توجه این است که به دلیل ذوب نشدن فلزات پایه، منطقه HAZ وجود ندارد و اگر از روش کوره‌ای استفاده شود انتقال حرارت نیز به طور کاملاً همگن اتفاق می‌افتد و اثرات نامطلوب ریزساختاری را به حداقل می‌رساند. در این روش به دلیل اینکه الزاماً لایه میانی باید ذوب شود و فلزات پایه در حالت جامد نگهداری می‌شود معمولاً عناصر آلیاژی به لایه میانی اضافه شده است که با ایجاد یک نقطه یوتکتیک، نقطه ذوب را کاهش می‌دهد و در حین نگهداری در دمای مورد نظر برای اتصال نسبت به میزان زمان، این عناصر آلیاژی در دو فلز پایه پس زده می‌شود یا در صورت کافی نبودن دما و زمان برای اتصال دهی در مذاب، باقی مانده و باعث تشکیل ترتیب انجام و ترکیبات بین فلزی می‌شود [۱].

۲-۲- معرفی فلزات پایه

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن AISI 316L کار شده و هم‌چنین از سوپر آلیاژ پایه نیکلی Inconel 625 کار شده استفاده شده است. ترکیب شیمیایی توسط آزمایش کوانتومتری بدست آمده و در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۳- معرفی لایه میانی پایه نیکل AWS B-Ni2

در فرایند اتصال دهی این دو ماده از لایه میانی پایه نیکلی به ضخامت ۱۲۰ میکرون به شکل خمیر رول شده (طیف)، دارای عناصر آلیاژی سیلیسیوم، بور، کرم، آهن استفاده شده است. نیکل عنصری می‌باشد که قابلیت ایجاد محلول جامد با بسیاری از عناصر آلیاژی را دارد. فلزات پرکننده پایه نیکلی معمولاً دارای تنوع وسیعی می‌باشند و مهم‌ترین علت استفاده از آن‌ها،

امکان اتصال دهی موادهای غیرهم‌جنس و انواع آلیاژهای مقاوم به حرارت با روش لحیم کاری سخت با انتخاب ماده پرکننده مناسب فراهم است. در روش‌های جوشکاری به علت ناسازگاری مذاب‌های غیرهم‌جنس در بسیاری از موارد علاوه بر ایجاد عیوبی مثل ترک، فازهای نامطلوب، خوردگی، ساختارهای ترد، مشکلات اجرایی نیز وجود دارد [۱].

در مورد اتصال بین سوپر آلیاژ Inconel 625 و فولاد زنگ‌نزن آستینیتی AISI 316L به دلیل غیرهم‌جنس بودن و تفاوت در شرایط انجماد و هم‌چنین مذاب ناسازگار در درز اتصال و ایجاد ترک داغ و ترک ناشی از گدازش، اتصال این دو ماده در فرایند جوشکاری ذوبی با مشکلات زیادی همراه است. به همین منظور روش‌های اتصال دهی دیگری همچون جوشکاری پرتوی لیزر، جوشکاری پرتوی الکترونی، لحیم کاری سخت مورد اهمیت قرار می‌گیرد، که در این تحقیق لحیم کاری سخت این دو ماده مورد بررسی قرار گرفته است [۲].

هیچ تحقیق و مقاله‌ای برای اتصال این دو ماده مهم صنعتی به روش لحیم کاری سخت یافت نشده است اما توسط آقای مدرج^۲ و همکارانش، بررسی معادل ریاضی قوانین نفوذ در اتصال دو فولاد زنگ‌نزن (AISI 321-410)^۳ و دو سوپر آلیاژ پایه نیکلی Inconel(625-718) به روش TLP^۴ انجام شده است. در این دو تحقیق با ایجاد اتصال در تعداد مشخصی از دما و زمان، انجماد هم‌دما در ضخامت‌های مختلف لایه میانی بررسی شده است و با مدل سازی، ایجاد انجماد هم‌دما در هر دما و هر زمان مشخص شده است ولی بررسی‌های ریز ساختاری و خواص مکانیکی در دما و زمان‌های مختلف در تحقیقشان انجام نشده است. از این رو تحقیق بر روی اتصال غیرهم‌جنس این دو ماده از نظر ریزساختاری و خواص مکانیکی در دستور کار قرار گرفته است [۳-۴].

کاربرد صنعتی اتصال این دو ماده در صنایع هوا فضا، پتروشیمی و موتور هواپیما می‌باشد. به دلیل عبور گاز داغ از لوله‌های تنظیم فشار در اطراف پوسته قسمت‌های داغ موتور هواپیما در بسیاری از موارد احتیاج به اتصال این دو ماده با هم است [۲].

بسیار صنعتی و پر کاربرد است. برای آنالیز عنصری از این لایه میانی از روش شیمی تر استفاده شده که در جدول (۲) به صورت درصد وزنی ارائه شده است [۷].

جدول (۲): درصد وزنی عناصر شیمیایی لایه پایه نیکل AWS BNi-2 [۸]

لیکونیدوس	سالیدوس	%C	%Fe	%B	%Cr	%Si	%Ni
۹۹۹	۹۷۱	۰/۰۶	۳/۰۰	۳/۲	۷/۰۰	۴/۵	۸۵/۲

۴-۲- گاز آرگون مصرفی

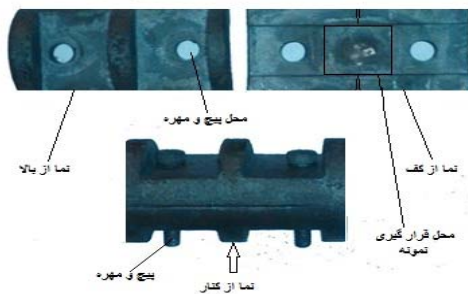
در این فرایند به منظور کاهش میزان اکسیژن در کوره از گاز بی اثر آرگون استفاده شده است که میزان خلوص گاز در جدول (۳) آورده شده است [۹].

جدول (۳): مشخصات گاز آرگون مصرفی به PPM [۹]

N ₂	CO ₂	H ₂ O	CnHm	O ₂	Ar
<۵ PPM	<۰/۱ PPM	<۳ PPM	<۰/۱ PPM	<۰/۲ PPM	%۹۹/۹۹

۵-۲- نگهدارنده جهت اتصال دهی

به منظور امکان اتصال دهی دو ماده مورد نظر برای ایجاد فشار لازم و نگهداری صحیح قطعات در کوره، یک نگهدارنده با شرایط خاص طراحی و ساخته شده است. به دلیل اینکه اتصال در دمای بالا صورت می پذیرد و امکان پیچیدگی ابعادی در نگهدارنده وجود دارد، جنس آن از فولاد زنگ نزن AISI 316L انتخاب شده است و طراحی ابعادی آن به صورتی می باشد که بتواند تنش پسماند ایجاد شده بعد از هر سیکل عملیات حرارتی را دفع کند. تصویر نگهدارنده در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): نگهدارنده ساخته شده جهت اتصال دهی

قابلیت کاربرد در دماهای بالاتر از 1100°C است که این شرایط حتی بر محیط های نیمه خورنده نیز قابل تعمیم می باشد و این ویژگی عمدتاً ناشی از مقاومت به خوردگی بالای نیکل و نقطه ذوب بالای آن در حدود 1450°C است. با استفاده از عناصر کاهش دهنده نقطه ذوب مثل بور، کربن، کرم، مس، منگنز، فسفر، گوگرد، آنتیموان، سیلیسیم و روی، نقطه ذوب فلزات پرکننده پایه نیکل کاهش داده می شود که از این میان فسفر و بور دارای جایگاه ویژه ای می باشند.

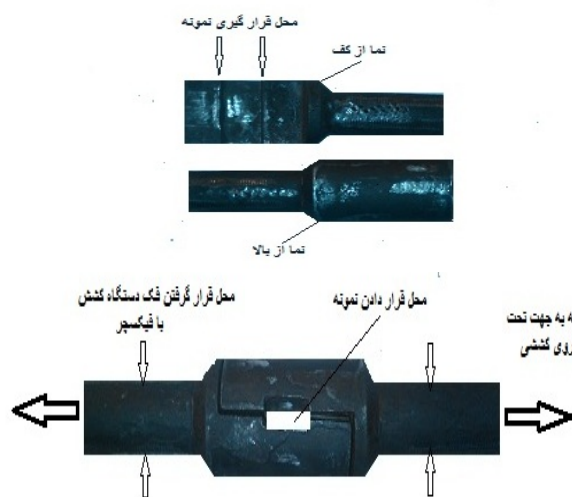
جدول (۱): درصد وزنی عناصر شیمیایی فلزات پایه مصرفی [۵-۶]

عناصر	اینکونل ۶۲۵ UNS N06625	اینکونل ۶۲۵ مصرفی	فولاد زنگ نزن ۳۱۶	فولاد زنگ نزن ۳۱۶ مصرفی
%Fe	۵/۰۰	۴/۱۲	بقیه	۶۶/۴۰
%Ni	بقیه	۵۹/۷۸	۱۰-۱۴	۱۰/۷۶
%Cr	۲۰-۲۳	۲۱/۷۶	۱۶-۱۸	۱۸/۰۱
%Mo	۸-۱۰	۹/۳۲	۲-۳	۲/۹۷
%Nb	۳/۱۵-۴/۱۵	۳/۳۵	-----	-----
%C	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۹
%Mn	۰/۵	۰/۲۲	۲/۰۰	۰/۹۷
%Si	۰/۵	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۵۵
%P	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۰/۰۴۵	۰/۰۱
%S	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱
%Al	۰/۴	۰/۲۴	-----	-----
%Ti	۰/۴	۰/۳۲	-----	-----
%Co	۱/۰۰	۰/۵۲	-----	-----
%N	-----	-----	۰/۱۰	۰/۰۳
سالیدوس	۱۲۹۰	-----	۱۳۷۱	-----
لیکونیدوس	۱۳۵۰	-----	۱۳۹۹	-----

در لایه میانی مصرفی برای اتصال این دو ماده عناصر سیلیسیم و بور نقش کاهنده نقطه ذوب (MPD) را بازی می کنند و عنصر کرم باعث افزایش مقاومت به خوردگی اتصال می شود. لایه میانی AWS B-Ni2 به علت پایین بودن نقطه ذوب، ترشوندگی مناسب، کم بودن دامنه انجماد و مقاومت در برابر خوردگی

۶-۲- نگهدارنده جهت انجام آزمایش استحکام برشی

برای کاهش میزان عیوب ناخواسته، ناشی از عملیات حرارت دهی و از طرف دیگر صرفه جویی در مواد اولیه، نمونه‌ها برای اتصال دهی با ابعاد کوچک تهیه شده است. به همین منظور برای بدست آوردن میزان استحکام برشی این نمونه‌های کوچک، یک نگهدارنده از جنس فولاد کربنی CK 45 با شرایط خاص طراحی شده است که بعد از ساخت تحت عملیات حرارتی کوینچ و تمپر قرار گرفته است تا بتواند نیروی اعمالی کششی را دقیقاً به طور برشی به درز اتصال اعمال کند که تصویر آن در شکل (۲) آورده شده است [۱۰-۱۱].



شکل (۲): نگهدارنده جهت انجام آزمایش استحکام برشی [۱۰]

۷-۲- آماده سازی نمونه‌ها جهت ایجاد اتصال

نمونه‌ها در هر دو ماده مورد اتصال به ابعاد (۱۵×۱۵×۲) میلی‌متر به وسیله برش و ایرکات تهیه و مقطع مورد اتصال تحت سمباده زنی از ۱۰۰ تا ۴۰۰ به وسیله سمباده SiC قرار گرفته است تا سطح اتصال از هر گونه اکسید و ناخالصی پاک شود و جهت چربی زدایی به مدت ۲۴ ساعت در حمام استن نگهداری شده است. در مرحله بعدی لایه میانی مورد نظر به ابعاد قطعات بریده شده و بین دو ماده مورد اتصال قرار گرفته و در نهایت، کل مجموعه درون نگهدارنده اتصال دهی با پیچ و مهره بسته شده است [۱۱].

۸-۲- متالوگرافی نمونه‌ها

بعد از عملیات اتصال دهی در دما و زمان‌های مختلف و هم چنین عملیات همگن سازی، فیلم رادیوگرافی تهیه شده از کلیه نمونه‌ها، مورد بازرسی قرار گرفته که در نهایت نمونه‌های بدون عیب برای آزمایش استحکام برشی و نمونه دیگر برای انجام متالوگرافی درون مانت گرم قرار گرفته است و به روش الکترو اچ با ولتاژ معین و با محلول اچ انتخابی مورد نظر که در جدول (۴) ارائه شده، عملیات متالوگرافی تکمیل شده است [۱۲].

جدول (۴): محلول اچ انتخابی برای ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول [۱۲]

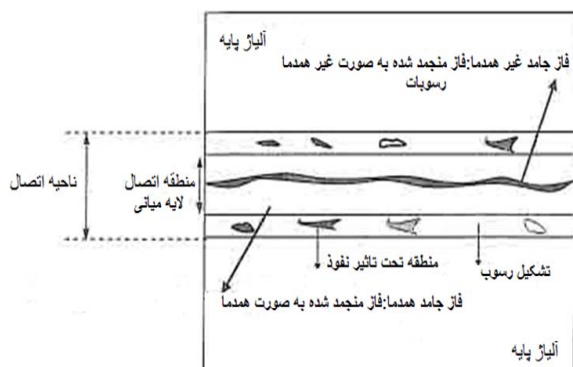
ولتاژ	H3PO4	HNO3	H2SO4
۴ ولت	۱۲ ml	۴۰ ml	۴۸ ml

۹-۲- میکروسکوپ الکترونی و آنالیز عنصری

بعد از عملیات متالوگرافی، نمونه‌ها برای بررسی ریزساختاری دقیق تر تحت آزمایش آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ الکترونی مدل Vegall ساخت کمپانی Tescan و آنالیز عنصری توسط مدل INCA ساخت کمپانی Oxford Instrument قرار گرفته است.

۱۰-۲- آزمایش ریزسختی سنجی

به منظور بدست آوردن تغییرات سختی از کلیه نمونه‌ها از فلز پایه (Inconel 625) تا فلز پایه (AISI 316L) توسط الماسه ویکرز با نیروی (No.100 (0.981N)) آزمایش ریزسختی سنجی با توجه به استاندارد ASTM E 384-00 انجام شده است.

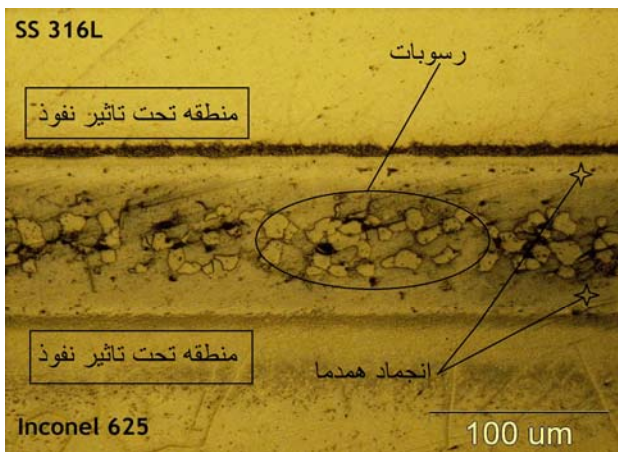


شکل (۳): شماتیکی از مناطق اتصال توسط فرایند لحیم کاری سخت [۱۲]

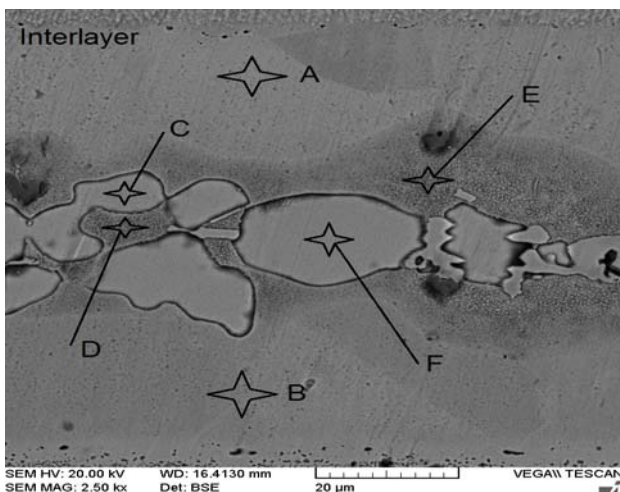
Inconel 625 و فولاد زنگ نزن AISI 316L هستند، دفع شده است [۱۳].

۳-۱-۱- منطقه A و B

مشهود است که اولین ترتیب انجماد به صورت همدمما شامل فریت نیکل می‌باشد که تحت محلول جامد فوق اشباع خود را در دو طرف فلزات پایه نشان داده است. با ایجاد ترتیب انجمادی اول، مذاب باقی‌مانده در وسط درز اتصال از عناصر MPD سازو کرم غنی شده و به نظر می‌رسد که تشکیل یوتکتیک‌های دو تایی را باعث شده است و با توجه به آنالیز عنصری به عمل آمده از ترتیب‌های انجمادی بعدی می‌توان ترکیبات بین فلزی احتمالی را مورد بررسی قرار داد.



شکل (۴): تصویر متالوگرافی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه



شکل (۵): تصویر SEM از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه

محدوده انجام این آزمایش بر روی هر نمونه شامل مناطق: ۱- فلزات پایه، ۲- مناطق تحت تاثیر نفوذ^۶ (DAZ)، ۳- مناطق انجماد همدمما و ۴- منطقه انجماد غیر همدمما (ترکیبات بین فلزی و رسوبات) بوده است که در شکل (۳) آورده شده است [۱۲].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه

در حین فرآیند اتصال‌دهی در دمای اتصال با ذوب شدن لایه میانی و چند لایه اتمی از فلزات پایه، مهاجرت عناصر آلیاژی از لایه میانی به درون فلز پایه و از فلز پایه به درون لایه میانی شروع می‌شود که این امر باعث تغییر در ترکیب شیمیایی لایه شده و با اتمام زمان نگهداری در دمای اتصال، انجماد با توجه به ترتیب‌های انجمادی آغاز می‌شود [۱۳].

با توجه به تصاویر متالوگرافی و (SEM-EDS)^۷ از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه (شکل ۵و۴) نشان می‌دهد که بعد از اتمام زمان اتصال‌دهی و نفوذ عناصر آلیاژی به خصوص MPD سازها (بور و سیلیسیوم) به درون دو ماده مورد اتصال، فاز اولیه انجماد در دو طرف فلزات پایه تشکیل شده است و عناصر آلیاژی که نتوانسته‌اند در این فاز حل شوند خود را به مذاب باقی‌مانده پس زده و شرایط را برای تشکیل ترتیب‌های انجماد بعدی آماده کرده و باعث تشکیل رسوبات و ترکیبات بین فلزی در مرکز درز اتصال شده‌اند که کاملاً در تصاویر قابل مشاهده است [۱۳]. با توجه به تصاویر متالوگرافی و SEM-EDS از درز اتصال شکل (۵)، سه ترتیب انجمادی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان مناطق A و B را ترتیب انجمادی اول، مناطق C و F را ترتیب انجمادی دوم و مناطق D و E را ترتیب انجمادی سوم دانست که آنالیز عنصری این مناطق در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که عنصر MPD ساز بور در مدت زمان نگهداری برای اتصال، با شعاع اتمی کوچک و قابلیت نفوذ بالا در دو عنصر نیکل و آهن که به ترتیب، عناصر اصلی در سوپر آلیاژ پایه نیکل

۳-۱-۲ - منطقه C و F

در این مناطق با توجه به آنالیز عنصری به عمل آمده و دیگرام‌های فازی دو تایی مربوطه، احتمال ترکیب‌های بین فلزی از نوع Ni-Si، Fe-Si، Fe-Ni وجود دارد و نکته قابل مشاهده این است که میزان سیلیسیوم در هر دو نقطه بالا می‌باشد، پس این دو نقطه و نقاط هم نوع دیگر که در تصویر SEM دیده می‌شوند، ترتیب انجماد جدیدی را تشکیل داده‌اند [۱۴].

جدول (۵): آنالیز عنصری از مناطق A-B-C-D-E-F به درصد وزنی

عنصر	Ni	Si	Cr	Fe	مجموع
منطقه	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %
A	۸۰/۸۸	۵/۹۵	۶/۱۹	۶/۹۸	۱۰۰/۰۰
B	۸۲/۵۹	۷/۹۵	۷/۴۸	۱/۹۸	۱۰۰/۰۰
C	۶۰/۲۷	۲۷/۱۷	۱/۰۱	۱۱/۵۵	۱۰۰/۰۰
D	۶۱/۵۸	۰/۲۳	۳۶/۵۸	۱/۶۱	۱۰۰/۰۰
E	۶۹/۹۲	۱/۵۲	۲۸/۳۱	۰/۲۵	۱۰۰/۰۰
F	۶۸/۲۱	۲۴/۶۷	۰/۴۱	۶/۷۱	۱۰۰/۰۰

۳-۱-۳ - منطقه D و E

در این مناطق با توجه به آنالیز عنصری به عمل آمده و دیگرام‌های فازی دو تایی مربوطه، احتمال تشکیل ترکیب‌های بین فلزی از نوع Cr-C زیاد می‌باشد، که اگر این فاز تحت عنوان $Cr_{23}C_6$ وجود داشته باشد، باعث خودگی بین دانه‌ایی در اطراف مرزدانه‌های خالی از کرم نوزاد می‌شود و نکته قابل توجه در آنالیز این دو نقطه این است که میزان کرم این بار بالا رفته است که خود ناشی از ترتیب انجماد دیگری در این مناطق و مناطق مشابه می‌باشد [۱۲].

پس در کل با توجه به تصویر SEM به وسیله آشکار ساز الکترون برگشتی مشاهده شد که ترتیب‌های مختلفی در انجماد لایه میانی بعد از اتمام زمان اتصال دهی ناکافی در دمای مورد نظر اتصال به وجود می‌آید، حال برای بررسی دقیق تر ترکیبات بین فلزی، تصویر SEM از یک ترتیب انجمادی به عنوان نمونه،

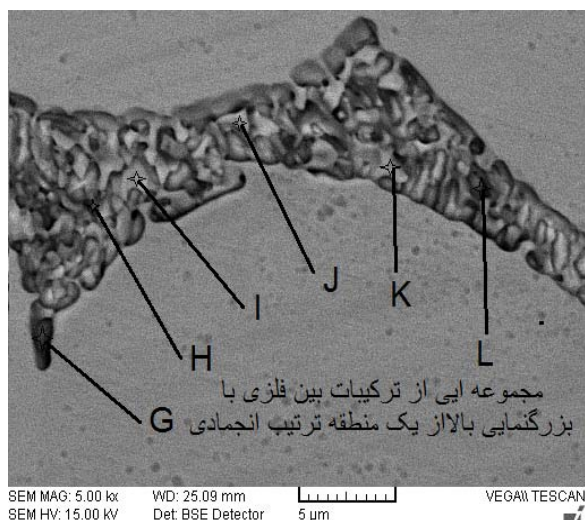
ارائه می‌شود که تصویر و آنالیز عنصری از مناطق مختلف آن در شکل (۶) و جدول (۶) ارائه می‌شود.

۳-۱-۴ - مناطق G-H-L

در این سه منطقه با توجه به آنالیز عنصری گرفته شده و میزان سیلیسیوم بالا در کنار نیکل و با توجه به دیگرام دو تایی Ni-Si احتمال تشکیل شدن فازی از نوع Ni-Si زیاد می‌باشد.

۳-۱-۵ - مناطق I-J-K

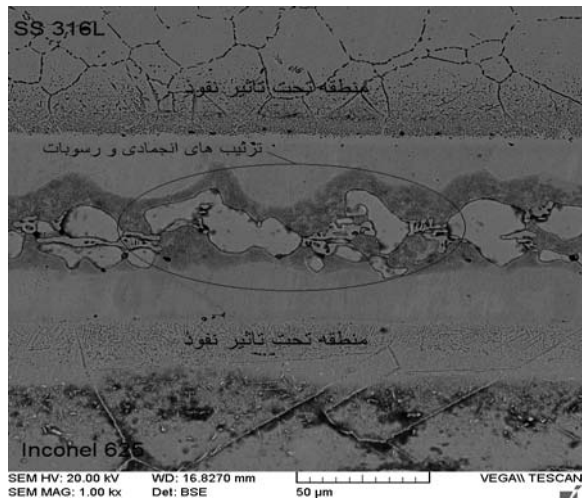
در این سه منطقه با توجه به آنالیز عنصری گرفته شده و میزان بالای آهن در کنار نیکل و دیگرام دو تایی Fe-Ni، احتمال تشکیل شدن فازی از نوع Fe-Ni زیاد می‌باشد.



شکل (۶): تصویر SEM در یکی از مناطق ترتیب انجمادی

جدول (۶): آنالیز عنصری از مناطق G-H-I-J-K-L به درصد وزنی

عنصر	Ni	Si	Cr	Fe	مجموع
منطقه	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %
G	۴۸/۱۴	۴۸/۳۱	۱/۴۴	۳/۲۶	۱۰۰/۰۰
H	۶۱/۸۱	۳۰/۲۲	۰/۷۱	۲/۵۸	۱۰۰/۰۰
I	۷۵/۴۲	۱/۱۷	۰/۹۸	۲۲/۴۳	۱۰۰/۰۰
J	۶۹/۰۰	۰/۷۱	۲/۰۷	۲۸/۲۲	۱۰۰/۰۰
K	۴۲/۲۱	۰/۱۲	۱/۹۱	۳۳/۷۶	۱۰۰/۰۰
L	۵۵/۹۱	۴۲/۹۷	۰/۱۱	۱/۰۱	۱۰۰/۰۰



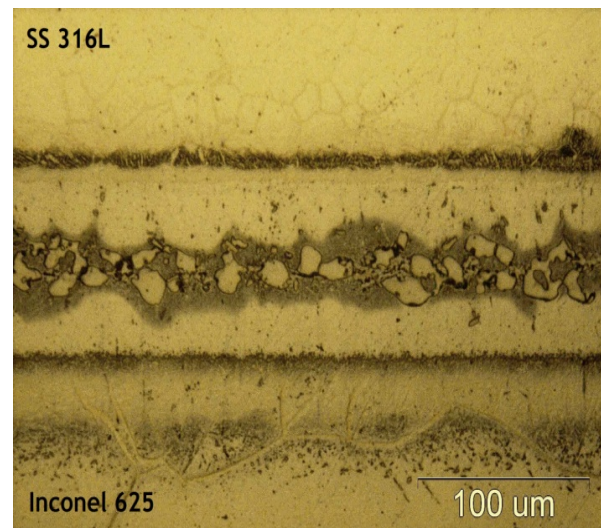
شکل (۸): تصویر SEM از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۶۰ دقیقه

۳-۲-۱ - آنالیز خطی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۶۰ دقیقه

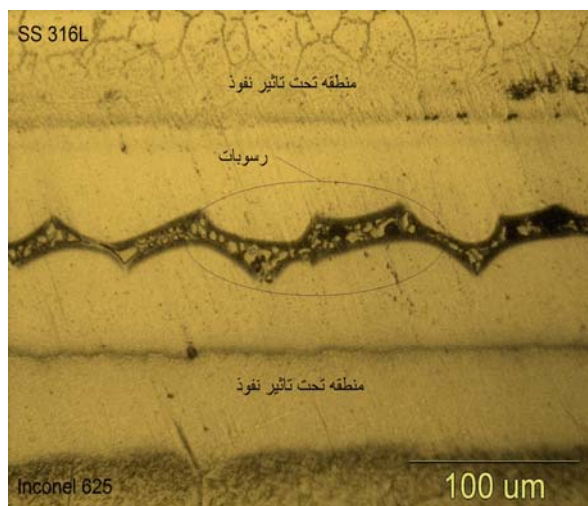
آنالیز خطی از این نمونه (شکل ۹) نشان می‌دهد که عنصر MPD ساز سیلیسیوم، با افزایش ۳۰ دقیقه‌ای زمان اتصال دهی به دلیل بزرگ بودن شعاع اتمی، نتوانسته است خود را در دو فلز پایه دفع کند و در درز اتصال به صورت غیر یکنواخت باقی مانده است و میزان آن در لایه میانی منجمد شده با توجه به ترتیب‌های انجمادی موجود، متفاوت است پس احتمال ایجاد ترکیبات بین فلزی با سیلیسیوم مثل Ni-Si و Fe-Si خیلی بیشتر است. عنصر کرم در بخشی از آنالیز دارای افزایش ناگهانی و شدید می‌باشد که این بار احتمال ایجاد ترکیبات بین فلزی با کرم، مخصوصاً ترکیباتی از نوع Cr-C را در این منطقه به شدت افزایش می‌دهد. در مورد عنصر اصلی MPD ساز بور، که دارای شعاع اتمی کوچکی می‌باشد می‌توان گفت این عنصر نتوانسته است در این زمان و حتی زمان‌های کمتر برای اتصال دهی نیز، خود را در دو فلز پایه دفع کند.

۳-۲ - نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۶۰ دقیقه

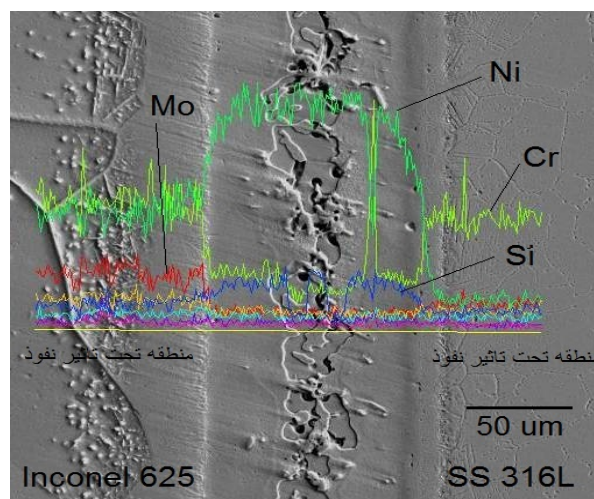
در دمای 1020°C اما به مدت ۶۰ دقیقه، به دلیل افزایش زمان اتصال دهی، فرصت برای نفوذ عناصر آلیاژی موجود در لایه میانی به خصوص MPD سازها و دفع شدن آنها در دو فلز پایه بیشتر شده است. با توجه به تصاویر متالوگرافی و SEM (شکل ۷ و ۸) از درز اتصال می‌توان مشاهده کرد که به دلیل افزایش نرخ نفوذ، فاز اولیه انجماد به صورت همدم، افزایش پیدا کرده و مذاب باقی مانده که در نهایت تشکیل انجماد غیر همدم نموده است با کاهش روبرو شده است. این پدیده باعث کاهش حجم ترکیبات بین فلزی و رسوبات می‌شود.



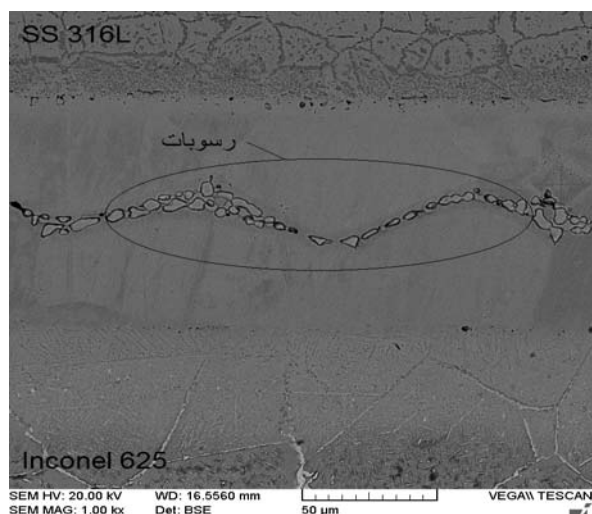
شکل (۷): تصویر متالوگرافی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۶۰ دقیقه



شکل (۱۰): تصویر متالوگرافی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه



شکل (۹): آنالیز خطی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۶۰ دقیقه به وسیله آشکار ساز الکترون ثانویه



شکل (۱۱): تصویر SEM از نمونه اتصال یافته در 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه

۴-۳ - همگن سازی در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت

به منظور یکنواخت شدن ریزساختار، توزیع یکنواخت سختی، از بین بردن تمرکز تنش و تنش پسماند، نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه تحت عملیات همگن سازی در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت قرار گرفته است.

۳-۳- نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه

تصاویر متالوگرافی و SEM (شکل ۱۰ و ۱۱) نشان می دهد که در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه با افزایش دو برابری زمان، فاز اولیه انجماد افزایش پیدا کرده است و عناصر آلیاژی MPD ساز موجود در لایه میانی به مقدار بیشتری در دو فلز پایه دفع شده اند اما بعد از اتمام زمان نگهداری در دمای اتصال همچنان رسوبات ترکیبات بین فلزی و رسوبات در وسط درز اتصال مشاهده می شوند که خود را به صورت غیر همدمنا منجمد کرده اند ولی مقدار آن نسبت به نمونه های قبلی با کاهش چشم گیری روبرو بوده است.

مشاهده می شود که افزایش چند برابری زمان نگهداری برای اتصال دهی در دمای ثابت باعث کاهش مذاب باقی مانده و ترکیبات بین فلزی می شود اما می توان به جای افزایش زمان، افزایش دما را جایگزین این پدیده کرد، زیرا با افزایش دمای اتصال دهی در زمان ثابت نیز نرخ نفوذ عناصر آلیاژی مخصوصا MPD سازها افزایش پیدا می کند و میزان ترکیبات بین فلزی با کاهش روبرو می شود و بدلیل اینکه از انجام عملیات حرارتی ناخواسته و اثرات مخرب بر فلزات پایه جلوگیری می کند، قابل

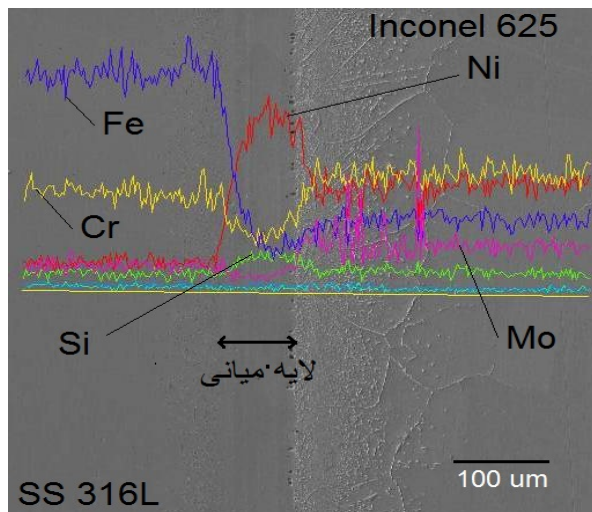
اهمیت است [۱۵].

لایه میانی قبل از مصرف کاملاً متفاوت است و این پدیده باعث می‌شود که درجه حرارت ذوب مجدد افزایش یابد به طوری که در دمای 1080°C هرگز ذوب نخواهد شد [۱۴].

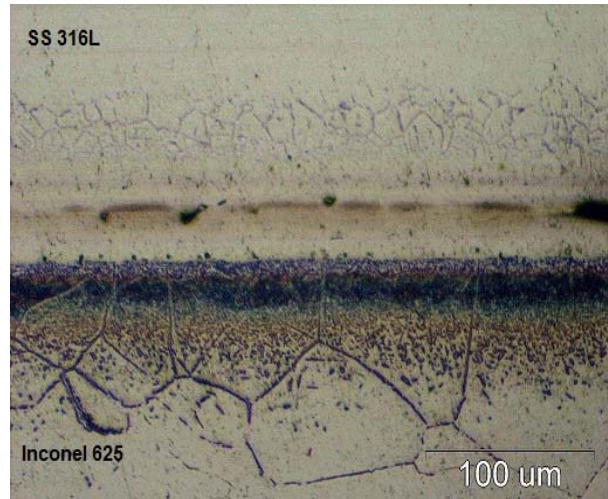
تصاویر متالوگرافی و SEM شکل (۱۲ و ۱۳) از مرکز درز اتصال نشان می‌دهد که، افزایش دما و زمان به منظور همگن سازی، باعث یکدست شدن ترکیبات در درز اتصال شده است و بعد از عملیات همگن سازی در وسط درز اتصال تجمع ترکیبات بین فلزی و رسوبات دیده نمی‌شود که این پدیده به دلیل انحلال ترکیبات بین فلزی در سرتا سر لایه میانی می‌باشد.

۳-۴-۱- آنالیز خطی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه و همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت

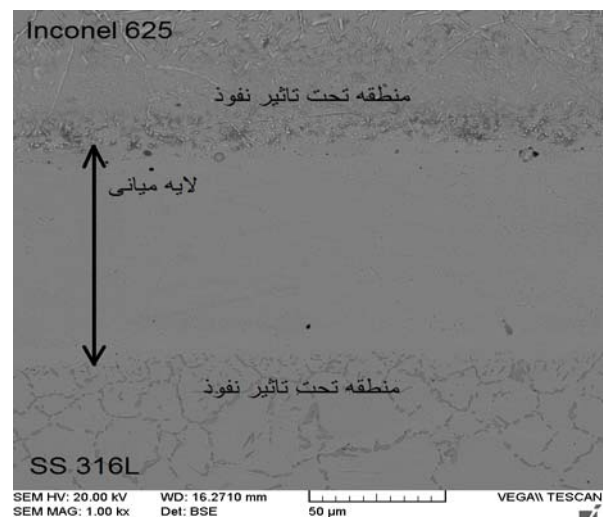
با توجه به آنالیز خطی از نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه و همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت (شکل ۱۴) می‌توان مشاهده کرد که عنصر MPD ساز (سیلیسیوم) در مرکز درز اتصال دارای پراکنندگی یکنواخت تری نسبت به نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه می‌باشد و در مورد عنصر کرم نیز این پدیده قابل مشاهده است.



شکل (۱۴): آنالیز خطی از نمونه همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت به وسیله آشکار ساز الکترون ثانویه



شکل (۱۲): تصویر متالوگرافی از نمونه همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت



شکل (۱۳): تصویر SEM از نمونه همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت

دما و زمان انتخابی برای همگن سازی، با توجه به محدوده انجمادی (Liquidus, Solidus) فلزات پایه، لایه میانی و همچنین دما و زمان اولیه اتصال دهی بوده است. نکته قابل توجه این است که لایه میانی ذوب شده در دما و زمان اتصال، به وسیله مهاجرت عناصر آلیاژی به درون فلزات پایه و از فلزات پایه به لایه میانی، لحظه به لحظه داری ترکیب شیمیایی متفاوتی می‌باشد و بعد از کامل شدن انجماد، ترکیب شیمیایی آن با

۳-۵-۵- آزمایش ریزسختی سنجی از کلیه نمونه‌ها**۳-۵-۱- آزمایش ریزسختی سنجی از نمونه اتصال یافته در دمای C ۱۰۲۰° به مدت ۳۰ دقیقه**

آزمایش ریزسختی سنجی شکل (۱۵ و ۱۶) نشان می‌دهد که در ترتیب اولیه انجماد تشکیل شده به صورت همدمای یعنی نقاط D و F (مناطق Braze SS316L و Braze inconel) در نمودار رسم شده، محلول جامدی تشکیل شده است که باعث کاهش سختی در این منطقه شده است. عناصر آلیاژی موجود در مذاب با توجه به شعاع اتمی خود نتوانسته‌اند در فاز اولیه انجماد حل شوند و در مذاب باقی‌مانده پس زده شده‌اند و انجماد غیرهمدمای و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد را به همراه داشته‌اند و سختی را نیز در این منطقه یعنی Braze Center در نمودار رسم شده و نقاط E، به شدت افزایش داده‌اند

علت بالا رفتن سختی در منطقه DAZ در دو طرف فلز پایه این است که، عناصر آلیاژی کاهنده نقطه ذوب و دیگر عناصر موجود در درز اتصال در حین عملیات اتصال‌دهی در دو فلز پایه نفوذ کرده و باعث تشکیل ترکیبات بین فلزی و رسوبات در مرزخانه‌ها شده است و یک منطقه غیرهمگن با تمرکز تنش بالا ایجاد کرده است [۱۲].

۳-۵-۲- آزمایش ریزسختی سنجی از نمونه اتصال یافته در دمای C ۱۰۲۰° به مدت ۶۰ دقیقه

آزمایش ریزسختی سنجی از این نمونه، شکل (۱۵) نشان می‌دهد که سختی در فلز پایه سوپر آلیاژ Inconel 625 به مقدار کمی افزایش و در فلز پایه فولاد زنگ‌نزن AISI 316L، کاهش پیدا کرده است. زیرا فولاد زنگ‌نزن به سمت آنیل و درشت شدن دانه‌ها پیشروی نموده است. میزان سختی در منطقه DAZ هر دو فلز پایه با افزایش روبرو شده زیرا با افزایش زمان فرصت برای نفوذ عناصر آلیاژی موجود در درز اتصال به درون فلزات پایه بیشتر شده است. میزان سختی در مرکز درز اتصال یعنی منطقه Braze center در نمودار رسم شده با کاهش مواجه شده است که به نظر می‌رسد این پدیده نیز به دلیل کم شدن عناصر آلیاژی در مذاب باقی‌مانده بوده است زیرا عناصر آلیاژی قبل از شکل‌گیری انجماد در دو فلز پایه نفوذ کرده‌اند [۱۳].

۳-۵-۳- آزمایش ریزسختی سنجی از نمونه اتصال یافته در دمای C ۱۰۲۰° به مدت ۱۲۰ دقیقه

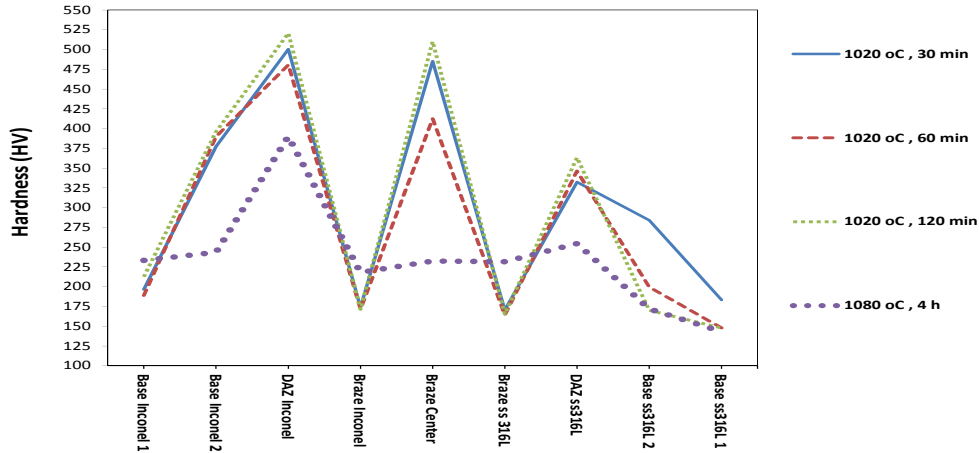
آزمایش ریزسختی سنجی از این نمونه شکل (۱۶ و ۱۵) نشان می‌دهد که، سختی در مناطق مورد نظر نسبت به نمونه قبلی تفاوت چندانی نداشته است و تقریباً همان روند را نشان می‌دهد زیرا افزایش زمان با ثابت نگه داشتن دما نتوانسته است نرخ نفوذ را بیشتر کند و همچنان عناصر آلیاژی تشکیل دهنده انجماد غیرهمدمای در درز اتصال باقی‌مانده‌اند اما یک نکته قابل توجه می‌باشد که سختی در منطقه Braze Center در نمودار رسم شده و نقطه E در تصاویر ریزسختی سنجی، نسبت به نمونه‌های قبلی با افزایش روبرو شده است که این پدیده به دلیل باریک شدن منطقه انجماد غیر همدمای و تراکم ترکیبات بین فلزی در مرکز درز اتصال می‌باشد [۱۶].

۳-۵-۴- آزمایش ریزسختی سنجی از نمونه همگن‌سازی شده در دمای C ۱۰۸۰° به مدت ۴ ساعت

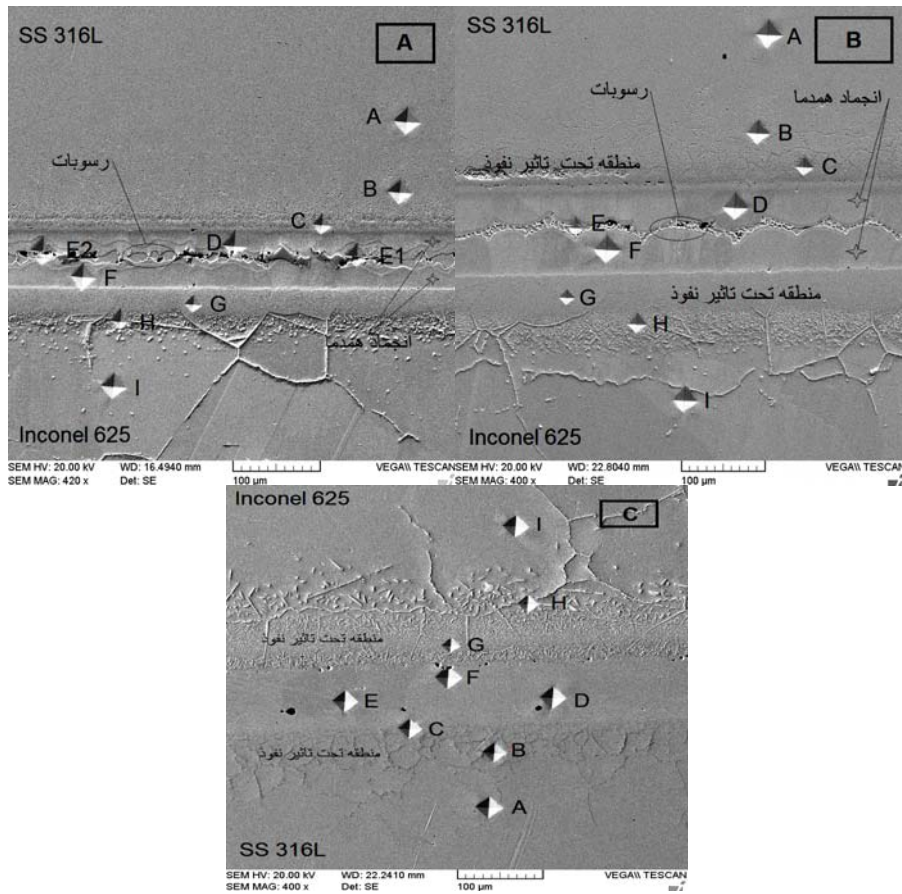
آزمایش ریزسختی سنجی از این نمونه (شکل ۱۶ و ۱۵) نشان می‌دهد که سختی از منطقه Braze Inconel تا منطقه Braze SS316L در نمودار رسم شده و نقاط D, E, F در تصاویر ریزسختی سنجی با کاهش چشم‌گیری مواجه شده است که این پدیده به دلیل انحلال و یکدست شدن ترکیبات بین فلزی موجود در درز اتصال می‌باشد. در مناطق تحت تاثیر نفوذ هر دو ماده مورد اتصال سختی نقاط C, G در تصاویر ریزسختی سنجی و مناطق مورد نظر DAZ SS 316L و DAZ Inconel 625 در نمودار رسم شده کاهش پیدا کرده است اما همچنان از مناطق دیگر بیشتر می‌باشد مخصوصاً در سوپر آلیاژ Inconel 625 که سختی بالایی را نشان می‌دهد.

در این عملیات حرارتی، فلز پایه فولاد زنگ‌نزن AISI 316L به روند آنیل شدن خود ادامه داده است و سختی آن کاهش پیدا کرده است، اما فلز پایه سوپر آلیاژ Inconel 625 در اثر پدیده پیر شدن با افزایش سختی روبرو شده است. در صورتی که زمان همگن‌سازی افزایش یابد این پدیده نیز مشهود تر دیده می‌شود. در کل می‌توان به یک روند یکنواختی سختی

و کاهش تمرکز تنش در سراسر نمونه اشاره کرد.



شکل (۱۵): آزمایش ریز سختی سنجی از کلیه نمونه های اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت زمانهای ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ دقیقه و همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت



شکل (۱۶): تصاویر ریز سختی سنجی، (A) نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه، (B) نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰، (C) نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه و همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت

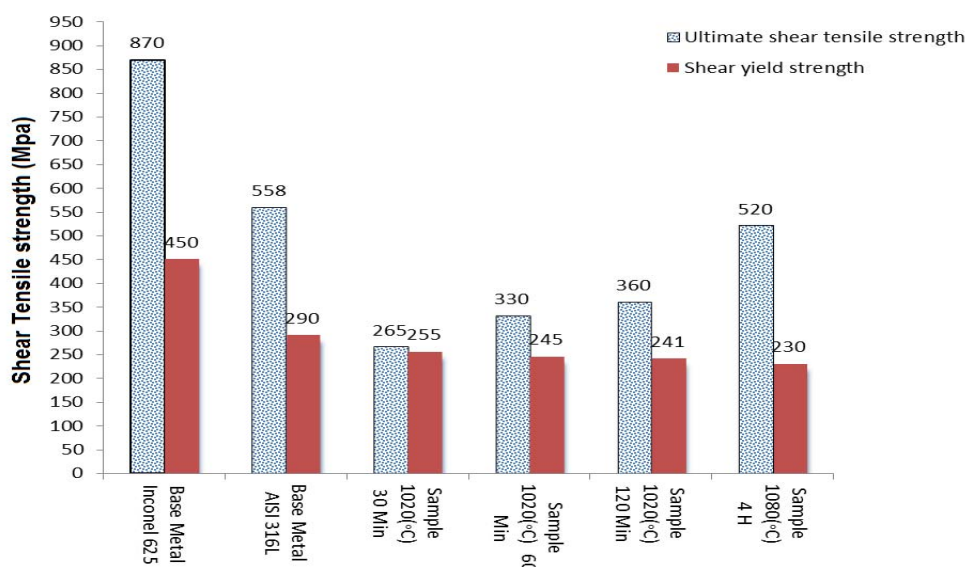
۳-۶- آزمایش استحکام برشی برای کلیه نمونه‌ها

آزمایش استحکام برشی برای کلیه نمونه‌ها در سه بار تکرار انجام شد است و بعد از تجزیه تحلیل داده‌های به دست آمده نمودار مربوطه نیز رسم گردیده است (شکل ۱۷).

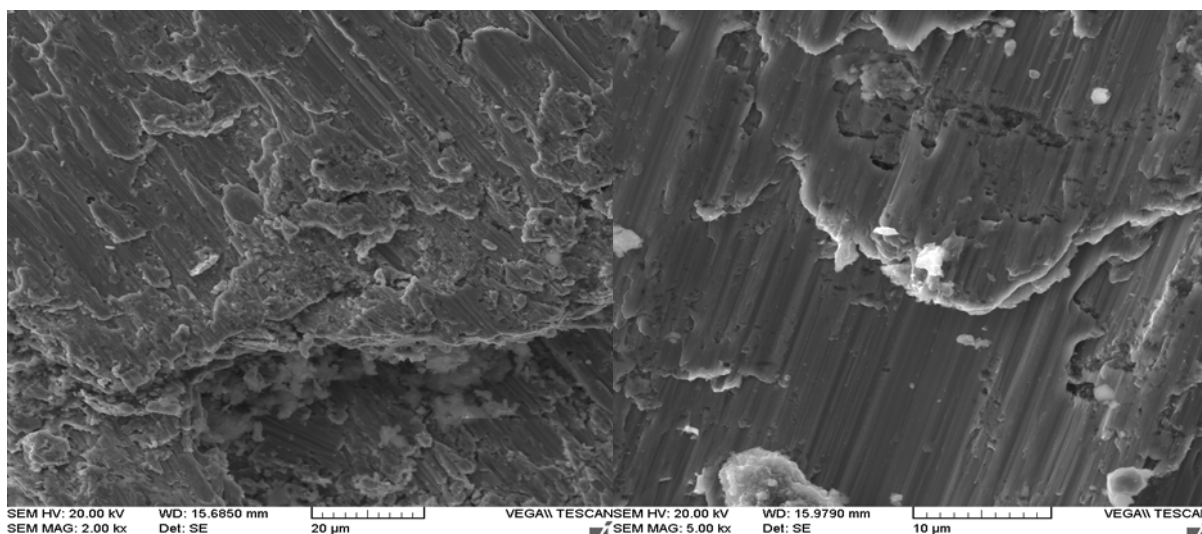
در نمودار رسم شده از استحکام برشی کلیه نمونه‌ها می‌توان مشاهده کرد که با کاهش ترکیبات بین فلزی و رسوبات در مرکز درز اتصال (انجماد غیرهمدم) استحکام تسلیم برشی (YS) کاهش و استحکام نهایی برشی (UTS) افزایش پیدا کرده است. مقدار عددی بین YS و UTS در نمونه‌های اتصال یافته بدون همگن سازی بسیار کم است که این پدیده نشان گر یک شکست ترد می‌باشد که تصویر SEM آن در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۶۰ دقیقه مشاهده می‌شود که استحکام تسلیم و نهایی فاصله عددی بیشتری با هم دارند که این پدیده نشانگر افزایش حد خمیری (Elongation) در اتصال این دو ماده است و

هم چنین در نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۱۲۰ دقیقه مشاهده می‌شود که، استحکام تسلیم و نهایی با نمونه قبلی فرق چندانی ندارد و تقریباً روند کلی را ادامه داده است اما در نمونه همگن سازی شده در دمای 1080°C به مدت ۴ ساعت مشاهده می‌شود که تفاوت بین YS و UTS با افزایش چشم گیری مواجه شده است، که این پدیده به دلیل عملیات حرارتی در دمای بالا و زمان بالا می‌باشد که در جهت یکدست شدن ساختار و کاهش تنش پسماند و تمرکز تنش انجام گرفته است.

در کلیه نمونه‌ها مشاهده می‌شود که، استحکام نهایی برشی اتصال کمتر از استحکام نهایی فلزات پایه می‌باشد. حتی در نمونه عملیات همگن سازی شده که می‌توان آن را بهترین حالت در نظر گرفت نیز این پدیده مشاهده می‌شود و استحکام نهایی برشی آن حدود 30Mpa کمتر از استحکام نهایی فولاد زنگ نزن AISI 316L است.



شکل (۱۷): نمودار استحکام تسلیم برشی و نهایی برشی برای کلیه نمونه‌ها



شکل (۱۸): تصاویر SEM از مقطع شکست نمونه اتصال یافته در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه با بزرگنمایی‌های متفاوت

۴- نتیجه گیری

اتصال دهی این دو ماده توسط لحیم کاری سخت به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی، ترد و شکننده می‌باشد که با عملیات حرارتی همگن سازی می‌توان شرایط را بهینه کرد به طوری که با انجام این عملیات، استحکام نهایی برشی به 520 Mpa رسیده است اما همچنان از استحکام نهایی فلزات پایه کمتر می‌باشد.

۱- در دمای 1020°C به مدت ۳۰ دقیقه بیشترین و در 120 دقیقه کمترین میزان ترکیبات بین فلزی و رسوبات ملاحظه شده است.
۲- با افزایش زمان اتصال دهی، فرصت برای نفوذ عناصر آلیاژی بخصوص MPD سازها از لایه میانی به درون فلزات پایه بیشتر شده و از تجمع آنها در مرکز درز اتصال جلوگیری شده است که این امر باعث افزایش انجماد همدمها و کاهش انجماد غیر همدمها شده است.

۳- با توجه به آنالیزهای عنصری و خطی گرفته شده از ترتیب‌های انجمادی در مرکز درز اتصال مشاهده می‌شود که عنصر سیلیسیوم به عنوان یک عنصر MPD ساز و کرم مهم‌ترین عناصر در تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد می‌باشند.

۴- با انجام عملیات حرارتی همگن سازی بر روی نمونه اتصال یافته می‌توان به ساختاری نسبتاً یکدست از نظر توزیع عناصر آلیاژی دست پیدا کرد و خواص مکانیکی را تا حدی افزایش داد اما با توجه به تصاویر متالوگرافی و SEM و آزمایش ریزسختی سنجی مشاهده می‌شود که میزان سختی در منطقه DAZ همچنان بالا می‌باشد که یکدست شدن ساختار را تحت تاثیر خود قرار داده است.

۵- آزمایش استحکام برشی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که ماهیت

۵- مراجع

- [1] G.Humpson, D.M.Jacobson "Principles of Soldering and Brazing" ASM Pub^{3rd}, Printing 1996.
- [2] M.J. Donachei and S.J. Donachei "Superalloys A Technical Guide" Materials Park, ASM International, 2002.
- [3] M.A.Arafin, M. Medraj, D.P. Turner, P. Bocher "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, A. 106, PP. 109-119, 2007.
- [4] 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. 447, PP. 125-133, 2007.
- [5] M. Durand Charre "Microstructure of Superalloys" Gordon and Breach Science Publisher, France, 1997.
- [6] "ASM Metal Handbook" Vol. 9, ASM International, Material Park, OH, PP. 279-296, 1985.

- No. 1, PP. 315-325, 1998.
- [15] M.Pouranvari, A.Ekrami, A.H. Kokabi "Microstructure Development During Transient Liquid Phasebonding of GTD-111 Nickel-Based Superalloy" *Journal of Alloys and Compounds*, 461, PP. 641-647, 2008.
- [7] Y. Gokkai "Brazability of Nickel Base Brazing Foil on a Nickel Base Alloy and Milled Steel" *Quarterly journal of Japan Welding society*, Vol.10, No. 3, PP. 50-56, Aug. 1992.
- [8] "Brazing Handbook" American Welding Society, 1990
- [9] R. Bakhtiari, A. Ekrami "The Effect of Gap Size on the Microstructure and Mechanical Properties of the Transient Liquid Phase Bonded FSX-414 Superalloy" *Materials and Design*, A. 40, PP. 130-137, 2012.
- [10] W.D. MacDonald and T.W. Eagar "Transient Liquid Phase Bonding Process" *Annual Reviews of Materials Science*, Vol. 22, pp. 23-46, 1992.
- [11] V.A Phillips "A Metallographic Study of Precipitation In a Ni-12.7 at.% Al Alloy" *Acta Metallurgica*, Vol. 14, No. 11, PP.1533-1547, 1966.
- [12] "Microstructural Aspects of Brazing a Ferritic Steel with Two Ni-Si-B Braze Filler Metals" *Welding.Journal*, PP. 93, Apr.1978.
- [13] Y.Hisamori "Joint Characteristics by Nickel Brazing Alloy" Vol. 10, No. 2, PP. 3-8, May 1992.
- [14] W.D. MacDonald and T.W. Eagar "Isothermal Solidification Kinetics of Diffusion Brazing" *Metallurgical and Materials Transactions, A*, Vol. 29A,

۶- پی نوشت

- 1- Heat Affected Zone
- 2- American Iron and Steel Institute
- 3- Medraj
- 4- Transient Liquid Phase
- 5- Melt Point Depressant
- 6- Diffusion Area Zone
- 7- Scaning Electron Microscope, Energy Dispersive Spectroscopy
- 8- Yield Strength
- 9- Ultimate Tensile Strength