

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Transient liquid phase (TLP) bonding of AISI321 stainless steel using MBF-30 commercial interlayer

Abstract:

According to the industry's need to an appropriate bonding process for components made of AISI 321 austenitic stainless steel, which is used in power-plant parts such as turbines, transient liquid phase (TLP) bonding of AISI 321 steel using MBF-30 interlayer was studied in this research. TLP bonding was performed in a vacuum furnace at 1050, 1100, 1150 and 1200°C for 30-120 minutes. The microstructural studies were conducted on the joints using an optical microscope and an scanning electron microscope (SEM). Phase analysis of the joints was also performed a SEM/EDS system. To investigate the distribution of elements across the joints, line scan analysis was used. The shear strength test and the microhardness measurement test were conducted on the joints, in order to study the joints' mechanical properties.

The minimum time of complete isothermal solidification at 1050, 1100 and 1150°C was obtained as 75, 45 and 30 minutes, respectively. At the incomplete isothermal solidification condition, Fe-B, Cr-B, Ni-Si and Ni-B phases were observed at the joint centerline and diffusion affected zone (DAZ). With increasing bonding temperature and time, more homogenous joint, lower hardness at the different zones of the joints and higher shear strength were obtained. But for the joints made at 1200°C, higher than the critical bonding temperature, the joint shear strength was reduced. For the joints made at 1150°C for 60 minutes and also at 1050°C for 120 minutes, the maximum shear strength was obtained as 99 and 98 percent of that of the base metal, respectively.

Keywords: TLP bonding , AISI 321 steel, MBF-30 interlayer, Mechanical properties, Microstructural studies

بررسی فرایند اتصال فاز مایع گذرا (TLP) برای فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI321 با استفاده از لایه واسط تجاری MBF-30

چکیده:

با توجه به نیاز صنعت به فرایند اتصال مناسب در رابطه با قطعات ساخته شده از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 321 که در تجهیزات نیروگاهی نظیر توربینها کاربرد دارند، در این پژوهش، اتصال متجانس این فولاد از طریق فرایند اتصال فاز مایع گذرا (TLP) با لایه واسط با نام تجاری MBF-30 مورد بررسی قرار گرفت. فرایند اتصال در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و به مدت زمان ۳۰ الی ۱۲۰ دقیقه در یک کوره خلا انجام پذیرفت. نمونه های اتصال داده شده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی ریز ساختاری قرار گرفتند. آنالیز عنصری ترکیبات مشاهده شده در اتصالات نیز با استفاده از سیستم EDS میکروسکپ SEM صورت گرفت. جهت بررسی نحوه توزیع عناصر در عرض اتصال، آنالیز خطی مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال، نمونه های اتصال یافته تحت آزمونهای استحکام برشی و ریز سختی سنجی قرار گرفتند. حداقل زمان لازم برای تکمیل انجماد همدمای در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۷۵، ۴۵ و ۳۰ دقیقه بدست آمد. در حالت انجماد همدمای ناقص، در مرکز اتصال و مناطق متأثر از نفوذ، ترکیبات Ni-B, Ni-Si, Cr-B, Fe-B مشاهده گردید. با افزایش دما و زمان اتصال، ساختار اتصال همگن تر، سختی کمتر در مناطق مختلف اتصال و استحکام برشی اتصال بیشتر بدست آمد. البته در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد، که بالاتر از دمای بحرانی اتصال می باشد، با توجه به ذوب جزئی فلز پایه، استحکام برشی اتصال کاهش یافت. در اتصالات انجام شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و ۶۰ دقیقه و همچنین ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و ۱۲۰ دقیقه، بیشترین استحکام برشی به ترتیب معادل ۹۹ و ۹۸ در صد استحکام برشی فلز پایه حاصل گردید.

واژه های کلیدی: فرایند اتصال TLP، فولاد AISI 321، لایه واسط MBF-30، خواص مکانیکی، بررسی ریز ساختاری

مقدمه

با توجه به اینکه بیشتر قطعات صنعتی به صورت سازه‌های ترکیبی با اتصالات مختلف می‌باشند، به دست آوردن یک اتصال با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب بدون هیچ گونه عیبی، امری ضروری در صنعت می‌باشد. انواع مختلف فرایندهای اتصال و جوشکاری وجود دارد که هر یک کاربرد خاص خود و مزایا و معایب مربوط به خود را دارا می‌باشند. به کارگیری بهترین و جدیدترین روش اتصال یک موفقیت اساسی در تولید قطعات می‌باشد. این پژوهش با هدف بررسی اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 321^۱ از طریق اتصال فاز مایع گذرا (TLP)^۲ با لایه واسط با نام تجاری MBF-30 انجام گرفت. فرایند اتصال با فاز مایع گذرا (TLP) یکی از روشهای اتصال با کارایی بالا و منحصر به فرد می‌باشد که می‌تواند در مواردی که اتصال و جوشکاری با روشهای دیگر امکان پذیر نبوده و یا مشکلات خاص خود را دارا می‌باشد، به کار گرفته شود. این مشکلات ممکن است عیوب بوجود آمده پس از فرایند جوشکاری ذوبی مانند ترکهای گرم، پیچیدگی قطعه، وجود تنشهای پسماند، ایجاد فازهای ناخواسته، کاهش خواص مکانیکی و غیره باشد.

مبانی نظری پژوهش

فرایند اتصال TLP ترکیبی از فرایندهای اتصال نفوذی و لحیم کاری سخت می‌باشند، بطوریکه در این فرایند فصل مشترک بین دو قطعه به وسیله یک مذاب ایجاد می‌شود، اما در نهایت اتصالی شبیه اتصال نفوذی ایجاد می‌گردد. در فرایند TLP، یک لایه واسط با نقطه ذوب پایین تر از اجزای متصل شونده در بین دو قطعه قرار می‌گیرد. لایه واسط بطور معمول، آلیاژی یوتکتوئید از فلز پایه است که دارای عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند B، Si و P است. پس از قرار دادن لایه واسط در بین دو قطعه ای که باید به هم متصل شوند مجموعه را تا دمای اتصال که معمولاً کمی بالاتر از نقطه ذوب لایه واسط است در کوره خلا یا اتمسفر محافظ آرگون حرارت می‌دهند. با رسیدن دمای کوره به دمای اتصال، لایه واسط ذوب می‌شود. با نگهداری قطعات در این دما، عناصر آلیاژی بین مذاب و فلز پایه نفوذ می‌کنند و موجب تغییر در ترکیب شیمیایی محل اتصال می‌شوند. با این تغییر در ترکیب شیمیایی دمای انجماد مذاب افزایش و مذاب به صورت هم دما (ایزوترم) منجمد می‌شود. اتصال ایجاد شده از نظر ترکیب شیمیایی و ریزساختار نزدیک به فلز پایه است. برای همگن شدن ساختار اتصال نیز، معمولاً قطعات متصل شده را به مدتی طولانی تر در دمای اتصال یا زمانی کوتاه تر در دماهای بالاتر نگهداری می‌کنند (Ally Digest SourceBook, ASM International).

فولاد های زنگ نزن آستنیتی، معرف عام ترین فولاد های زنگ نزن هستند و در مقیاس بالاتری نسبت به سایر گروه ها تولید می شوند. این فولاد ها دارای مقاومت به خوردگی خوبی در بیشتر محیط ها هستند. استحکام این فولاد ها برابر با فولاد های نرم می باشد به طوری که حداقل استحکام تسلیم آن ها در دمای محیط ۲۱۰ MPa است و قابلیت سختی پذیری استحاله ای را ندارند. خواص ضربه ای دمای پایین برای این آلیاژ ها خوب است به طوری که باعث استفاده از آن ها در کاربردهای سرمازایی شده است. دمای کاری می تواند تا ۷۶۰ درجه سانتیگراد و یا حتی بالاتر باشد. فولاد های زنگ نزن آستنیتی به طور قابل توجهی با کار سرد، استحکام دهی می شوند. آنها اغلب در کاربردهایی استفاده می شوند که نیازمند مقاومت به خوردگی خوب در اتمسفر و یا دمای بالا می باشند. فولاد های زنگ نزن آستنیتی معمولاً دارای انعطاف پذیری و چقرمگی خوبی هستند و تحت بار گذاری کششی، افزایش طول قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهند. فولاد AISI 321 از انواع فولادهای زنگ نزن آستنیتی می باشد که حاوی مقادیر اندک Ti و Nb هستند و با کربن

1- American Iron and Steel Institute
2-Transient Liquid Phase (TLP) bonding

ترکیب شده و بدین ترتیب تمایل به خوردگی بین دانه ای ناشی از رسوبات کاربید کروم را کاهش می دهند. کاربرد این فولاد برای قطعات جوشکاری شده تحت خوردگی شدید، در گستره دمایی از ۳۹۶- تا ۶۰۴ درجه سانتی گراد، قطعات توربین های نیروگاهی، پوسته دیگ بخار، گرم کننده های کابین، ظروف تحت فشار، دیواره های آتش، اتصالات قابل تعمیر می باشد.

پیشینه پژوهش

در رابطه با اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱ مقالات زیادی موجود نمی باشد. در این رابطه مزار اتابکی^۱ (۲۰۱۱) در مقاله ای به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ به آلیاژ زیر کونیوم Zircaloy-4 با روش فاز مایع گذرا بوسیله یک لایه واسط پایه تیتانیوم پرداخته است. در مقاله دیگری از مزار اتابکی^۲ (۲۰۱۲) به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ به آلیاژ زیر کونیوم Zr-2.5Nb با روش فاز مایع گذرا بوسیله یک لایه واسط پایه تیتانیوم و دو لایه واسط پایه زیرکونیوم پرداخته است. در مقاله دیگری در رابطه با اتصال فولاد ۳۲۱ با روش TLP، محمد آرفین^۴ (۲۰۰۷) در مقاله ای به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ از طریق اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط BNi-2 پرداخته است. این مقاله بیشتر جنبه مدلسازی داشته و ریز ساختاری در آن وجود ندارد. همچنین بر روی خواص مکانیکی اتصال کاری صورت نگرفته است.

روش پژوهش

فلز پایه اتصال داده شده از فولاد زنگ نزن آستنیتی با کد AISI321 می باشد. لایه واسط استفاده شده، با نام تجاری MBF-30 (AWS BNi-3) می باشد. لایه واسط به ضخامت ۵۰ میکرون بوده است که به ابعاد ۱۰ میلی متر در ۱۰ میلی متر بریده شد. آنالیز شیمیایی لایه واسط و مواد پایه مورد استفاده در جدول (۱) درج شده است. تصویر شماتیک اتصال فولاد AISI321 با لایه واسط BNi-3 با روش فاز مایع گذرا در شکل (۱) قابل مشاهده می باشد. نمونه های فلز پایه جهت قرار گرفتن در کوره های آزمایشگاهی و قرار گرفتن در قالبها و فیکسچرهای آزمایشگاهی به ابعاد ۱۰×۱۰×۵ میلی متر بریده شد. جهت دقت در برش و جلوگیری از حرارت دیدن بیش از حد نمونه ها، برش توسط دستگاه وایر کات و برش لیزر انجام گردید. نمونه ها پس از برش توسط سمباده های با شماره های مختلف (از شماره ۸۰ تا ۲۰۰۰) و خمیر الماسه، جهت صاف شدن سطح و برطرف شدن آلودگی ها پولیش گردید. جهت چربی زدایی و تمیزی سطح اتصال، نمونه ها در محلول استن شست و شو گردید.

لایه واسط در بین دو نمونه آماده شده قرار داده شد و جهت جلوگیری از حرکت نمونه ها و ثابت شدن قطعات، نمونه ها در داخل یک فیکسچر قرار داده شد. جهت اتصال دو قطعه فولاد زنگ نزن، از کوره تحت خلاء با خلاء 10^{-4} torr استفاده گردید. نمونه ها در زمانهای مختلف و تحت دماهای تعیین شده در داخل کوره قرار داده شدند و پس از اتصال مورد بررسی قرار گرفتند. روند انجام آزمایشها با دما و زمانهای تعیین شده در جدول (۲) آورده شده است. نمونه های اتصال داده شده، ابتدا بریده و پس از صاف کردن و پولیش، توسط محلولهای اچ ذکر شده در جدول (۳) اچ شده و جهت مشاهده ریز ساختار و چگونگی اتصال و انجماد همدمای انجام شده در زیر میکروسکوپ نوری با کیفیت و بزرگ نمایی مناسب، قرار داده شدند و تصویر برداری انجام شد. نمونه ها جهت بررسی بیشتر با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مشاهده قرار گرفتند و آنالیز خطی و نقطه ای از محل های مختلف اتصال گرفته شد. میکروسکوپ مورد استفاده با مارک TESCAN و مدل VEGA می باشد. نمونه هایی که از جهت اتصال و تشکیل انجماد همدا دارای شرایط مناسب بودند و همچنین نمونه هایی که دارای ابهامات بودند، جهت تعیین استحکام برشی مورد آزمون برش قرار گرفتند. جهت

1- M. Mazar Atabaki

2-M.A. Arafin

آزمون استحکام برشی از یک فیکسچر مخصوص که جهت این امر ساخته شده بود، استفاده گردید. نمونه ها در داخل محفظه میانی فیکسچر که دارای ابعاد ۱۰ در ۱۰ میلیمتر بود، قرار داده شد و دو قسمت فیکسچر جهت کشش به فکهای دستگاه کشش وصل گردید. نمونه ها با نیروهای مختلف مورد برش قرار گرفتند و بیشترین نیروی برشی به همراه افزایش طول نمونه ها تعیین گردید. دستگاه کشش مورد استفاده با مارک Santam Machine (STM) و از نوع ۱۵ تنی و با سرعت کرنش ۱ mm/min آزمون، انجام شد. نمونه هایی که نیاز به آزمون سختی داشت جهت بررسی میزان سختی و تغییرات سختی حاصله حین اتصال در نقاطی در مرکز اتصال، خط اتصال، منطقه اطراف اتصال و فلز پایه، مورد آزمون ریز سختی سنجی قرار گرفت. آزمون ریزسختی سنجی با روش سختی سنجی ویکرز با دستگاه مدل MVK-H21 با نیروی ۵۰ gf و استاندارد E-92-82 (Reattroved-1987) انجام پذیرفت.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه و لایه واسط (درصد وزنی)

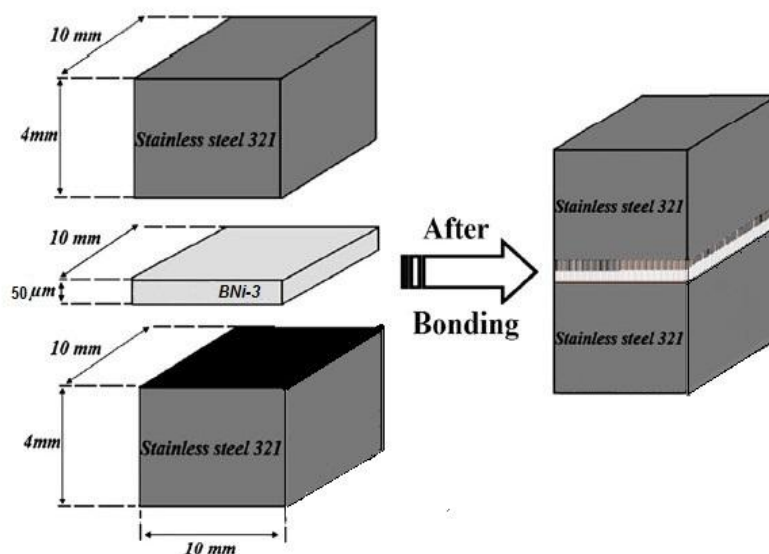
	Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	B	N	Ti
AISI 321	bal	0.08	2	0.045	0.03	0.75	17-19	9-12		0.1	5*(C+N)
BNi-3		0.05				4.5		bal	3.2		

جدول ۳- آنالیز شیمیایی محلولهای اچ استفاده شده

آنالیز شیمیایی				نام محلول اچ
Water	HCl	CuSO ₄	ترکیب شیمیایی	ماربل
۲۰ سی سی	۲۰ سی سی	۴ گرم	مقدار	
Water	KOH	K ₃ Fe(CN) ₆	ترکیب شیمیایی	موراکلمی
۱۰۰ میلی لیتر	۱۰ گرم	۱۰ گرم	مقدار	

جدول ۲- دما و زمانهای انتخاب شده جهت انجام اتصال

نوع لایه واسط	درجه حرارت (سانتی گراد)	زمان (دقیقه)				
		۱۲۰	۷۵	۶۰	۴۵	۳۰
MBF-30	۱۰۵۰					
	۱۱۰۰					
	۱۱۵۰					
	۱۲۰۰					



شکل ۱- تصویر شمایینیک اتصال فولاد AISI321 با لایه واسط BNi-3 با روش فاز مایع گذرا.

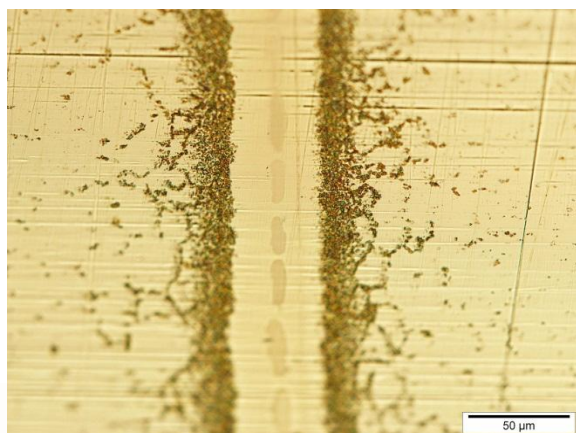
تجزیه و تحلیل داده ها

الف- اتصال در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه

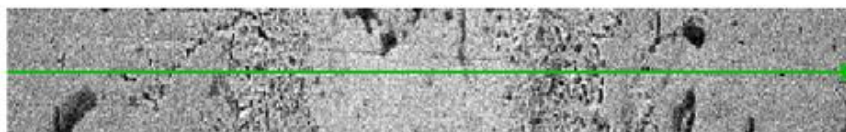
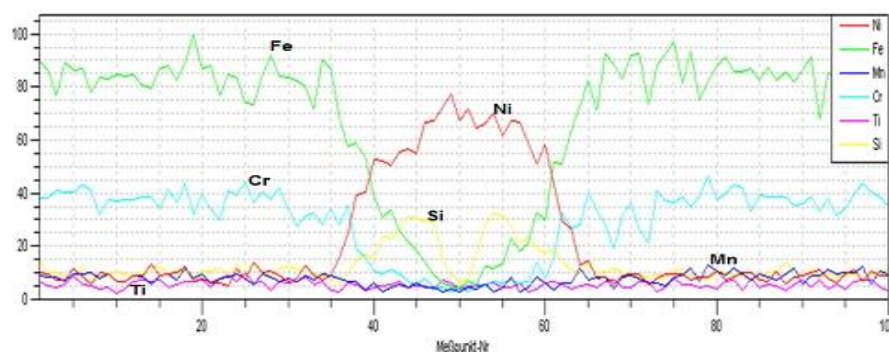
با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۲) مشخص می گردد که زمان ۴۵ دقیقه جهت تکمیل انجماد همدمای در اتصال فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-30 از طریق اتصال TLP کافی نبوده و ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال مشاهده می گردد. در این حالت انجماد، همدمای نبوده و در اثر کاهش دما رخ داده است. با اندازه گیری پهنای منطقه اتصال (۵۵ میکرومتر) و مقایسه آن با ضخامت اولیه لایه واسط (۵۰ میکرومتر)، مشخص می گردد که انحلال لایه میانی و فلز پایه اتفاق افتاده است و عرض لایه واسط پس از اتصال زیاد شده است ولی عناصر کاهنده نقطه ذوب زمان کافی برای نفوذ از لایه میانی به فلز پایه را نداشته اند. نیروی محرکه این مرحله عدم تعادل ترمودینامیکی فلز پایه و لایه واسط مذاب در دمای اتصال می باشد. انرژی اکتیواسیون مرحله انحلال بسیار کم است و در نتیجه این مرحله سریعاً به پایان می رسد. با توجه به عدم تعادل ترمودینامیکی ترکیب شیمیایی لایه واسط مذاب و فلز پایه جامد مجاور آن در دمای اتصال، فرایند انحلال فلز پایه در لایه واسط آغاز می شود. این فرایند تا هنگامی که ترکیب مذاب و جامد مجاور هم به ترکیب لیکوئیدوس و سالییدوس تعادلی خود در دمای اتصال برسند، ادامه دارد. فرایند انحلال موجب وسیع تر شدن منطقه مذاب و ایجاد یک آلیاژ با ترکیب شیمیایی جدید می شود. حین این فرایند و پس از آن عناصر کاهنده نقطه ذوب در لایه واسط (MPD)^۵ به درون فلز پایه نفوذ می کنند. با خروج عناصر کاهنده نقطه ذوب (بور و سیلیسیم) از لایه واسط و نفوذ آنها به فلز پایه و کاهش مقدار آنها در لایه واسط دمای لیکوئیدوس آلیاژ لایه واسط افزایش یافته تا اینکه دمای لیکوئیدوس به دمای اتصال می رسد. در این لحظه، انجماد همدمای آغاز می شود. با توجه به نمودارهای فاز دوتایی عناصر آهن، نیکل، بور، کروم و سیلیسیم و مشاهده دمای یوتکتیک این عناصر (سیستم دو تایی B-Cr: ۱۶۲۰ درجه سانتی گراد؛ سیستم دو تایی B-Fe: ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد؛ سیستم دوتایی Ni-B: ۱۱۹۳ درجه سانتی گراد؛ سیستم دوتایی Ni-Si: ۱۱۵۲ درجه سانتی گراد) احتمال وجود این ترکیبات در اتصالات ایجاد شده، با توجه به درجه حرارت اتصال، وجود دارد (براندس و بروک، ۱۹۹۲). سیلیسیم به عنوان عنصر کاهنده نقطه ذوب دارای شعاع اتمی بزرگ می باشد که در صورتی که زمان کافی برای نفوذ وجود نداشته باشد به صورت ترکیب یوتکتیک با سایر عناصر در اتصال باقی می ماند. بور نیز به عنوان عنصر دیگر کاهنده نقطه ذوب دارای شعاع اتمی کوچک و نفوذ سریع می باشد ولی دارای حلالیت کم در فلز پایه می باشد که این عنصر نیز در صورت عدم وجود شرایط ایده آل دما و زمان جهت نفوذ، به صورت ترکیبات یوتکتیک پس از اتمام انجماد غیر همدمای باعث کاهش استحکام اتصال می گردد. بورایدها و سیلیسیدهای حاصله با ایجاد فازهای ترد و مضر باعث افت خواص مکانیکی اتصال می گردند.

اگر چه نمودار فاز سه تایی B-Cr-Fe به طور کامل شناخته نشده است ولی شش مرحله سه تایی در نمودار به صورت ترکیبات BCrFe , $\text{B}_{33}\text{Cr}_{13}\text{Fe}_{54}$, $\text{B}_{33}\text{Cr}_{33}\text{Fe}_{34}$, $\text{B}_{38}\text{Cr}_{55}\text{Fe}_7$, $\text{B}_{50}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{30}$, $\text{B}_{50}\text{Cr}_{35}\text{Fe}_{15}$ یافت می شود، بنابراین شکل گیری این مراحل غیر منتظره نیست (ویلارس، پرینس، اوکاموتو، ۱۹۹۵). وجود سیلیسیم و بور در آنالیز با میکروسکپ SEM به صورت دقیق مشخص نمی گردد و می بایست برای بررسی بیشتر از میکروسکپ TEM و یا روشهای آنالیز دیگر مانند XRD استفاده نمود) باعث تشکیل ترکیبات Cr-B و Fe-B-Ni-B، Ni-Si می گردد. وجود این ترکیبات در مرکز اتصالات با عدم تکمیل انجماد کامل همدمای، در مقالات متعددی با لایه واسط پایه نیکل گزارش شده است (بختیاری و اکرامی، ۲۰۱۲)، (جانگ و شی، ۲۰۰۳) و (پورانوری، اکرامی، کوکبی، ۲۰۰۸). با توجه به نمودار فاز Ni-Si مشخص می گردد که با مقدار سیلیسیم بیشتر از ۸ درصد، ترکیبی با فرمول Ni_3Si بوجود می آید. این ترکیب در آنالیز XRD اتصال فولاد AISI304 که ترکیب آن بسیار نزدیک به فولاد AISI 321 می باشد با روش فاز مایع گذرا و با لایه واسط

MBF-20 گزارش شده است (جانگ و شی، ۲۰۰۳). حین اتصال دهی با یک سیکل حرارتی کوتاه، مقدار کمی از عناصر بور و سیلیسیم به درون فلز پایه نفوذ کرده و موجب رشد یک لایه گامای غنی از نیکل در مجاورت فلز پایه به سمت مرکز لایه واسط می شود.

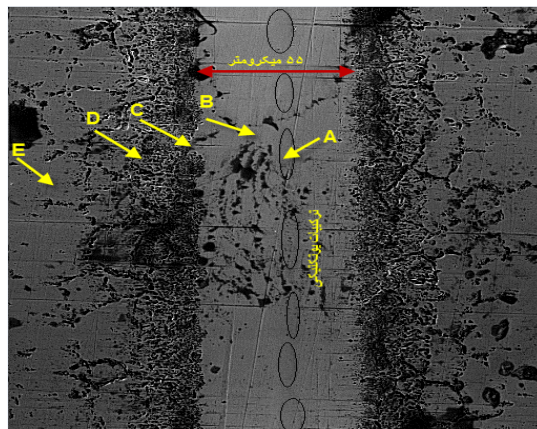


شکل ۲- تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه.



شکل ۳- آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه.

با مشاهده آنالیز خطی گرفته شده از فلز پایه تا مرکز اتصال (شکل ۳) مشخص می گردد که نفوذ عنصر آهن به عنوان عنصر اصلی فلز پایه در لایه واسط با توجه به انحلال فلز پایه، صورت پذیرفته است و تا مرکز اتصال ادامه داشته، ولی مقدار آن در مرکز اتصال کم می باشد. عنصر نیکل به عنوان عنصر اصلی لایه واسط نیز در فلز پایه نفوذ کرده است ولی مقدار نفوذ تنها در مناطق اطراف خط اتصال بوده و به سمت فلز پایه مقدار نفوذ بسیار کم می باشد. کروم بیشتر در فلز پایه باقی مانده است و با مقداری نفوذ در خط اتصال به سمت مرکز اتصال مقدار آن بسیار ناچیز می شود. عنصر سیلیسیم به عنوان عنصر کاهنده نقطه ذوب، با توجه به شعاع اتمی بزرگ آن و کم بودن زمان، فرصت کافی برای نفوذ به فلز پایه نداشته و در مرکز اتصال باقی مانده و با عنصر بور و عناصر دیگر تشکیل ترکیبات یوتکتیک داده اند. عناصر تیتانیوم و منگنز که مقدار آنها در ترکیب اولیه کم می باشد یک نفوذ مختصر با توزیع یکنواخت تر داشته اند.



SEM MAG: 1.00 kx
SEM HV: 15.00 kV
Date(m/d/y): 06/07/14
WD: 28.25 mm
Det: SE Detector • BSE Detector
Vac: HiVac

MBF30 - 1050°C- 45min - point A		MBF30 - 1050°C- 45min - point B		MBF30 - 1050°C- 45min - point C	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	3.73	Iron	21.13	Iron	58.21
Nickel	89.51	Nickel	72	Nickel	27.1
Silicon	6.15	Silicon	2.95	Silicon	0.32
Titanium	0.04	Titanium	0.67	Titanium	0
Chromium	0.57	Chromium	2.97	Chromium	14.37
Manganese	0	Manganese	0.28	Manganese	0.01

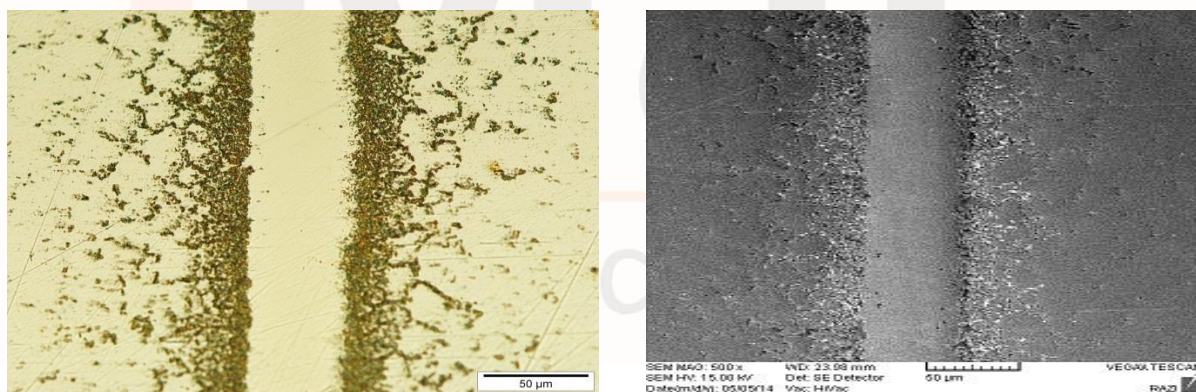
MBF30 - 1050°C- 45min - point D		MBF30 - 1050°C- 45min - point E	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	77.85	Iron	73.4
Nickel	9.44	Nickel	8.38
Silicon	0.35	Silicon	0
Titanium	0	Titanium	0
Chromium	10.94	Chromium	16.48
Manganese	1.42	Manganese	1.73

شکل ۴ - آنالیز نقطه ای اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه.

جهت بررسی بیشتر نحوه توزیع عناصر و ترکیبات بوجود آمده در حین فرایند اتصال، از نقاط مختلف اتصال، آنالیز نقطه ای با سیستم EDS میکروسکپ SEM گرفته شد (شکل ۴). در نقطه A که منطقه تشکیل ترکیبات یوتکتیک می باشد، وجود سیلیسیوم و نیکل، احتمال وجود ترکیب یوتکتیک Ni-Si را بیان می کند. اندازه گیری مقدار عنصر بور با SEM امکان پذیر نبوده است، ولی حضور بور در این منطقه و ترکیبات Ni-B با توجه به گزارشات تحقیقات دیگر، را می توان در نظر گرفت. به عنوان مثال گال و والچ^۶ (۱۹۹۱) در اتصال TLP نیکل خالص با لایه واسط MBF-30 با استفاده از بررسی های TEM دریافتند فاز نیکل بوراید تشکیل شده در مرکز اتصال

از نوع Ni_3B می باشد. همچنین ایدئو و همکارانش^۷ (۲۰۰۵) در مورد ریز ساختار مرکز اتصال In738LC با لایه واسط $Ni-15Cr-3.5B$ دریافتند فاز نیکل بوراید تشکیل شده در مرکز اتصال از نوع $M_{23}B_6$ می باشد. نقطه B در منطقه ای است که در آنجا انجماد همدمای تکمیل شده است. در این منطقه محلول جامد نیکل موجود می باشد. آنالیز نقطه B نشان می دهد که در این نقطه نفوذ آهن از فلز پایه در لایه واسط صورت پذیرفته است ولی عناصر دیگر نفوذ زیادی نداشته اند. نقطه C در منطقه خط اتصال و جایی که ترکیبات رسوبی کرومی تشکیل شده اند می باشد. آنالیز این نقطه نشان دهنده نفوذ نیکل و عدم نفوذ سیلیسیوم می باشد. در این نقطه می تواند ترکیبات $Ni-B$ و $Fe-B$ و $Cr-B$ تشکیل شود. نقطه D در منطقه ایست که متاثر از نفوذ می باشد و در این منطقه ترکیبات رسوبی شکل گرفته اند ولی مقدار آنها کمتر از نواحی نزدیک خط اتصال می باشد. با فاصله گرفتن از خط اتصال مقدار رسوبات کاهش می یابد. عنصر اصلی در این منطقه آهن بوده و عناصر نیکل، سیلیسیوم، کروم و منگنز نفوذ نداشته اند. مطابق آنالیز فلز پایه می باشد که در این منطقه با توجه به فاصله داشتن از خط اتصال و کم بودن زمان، نفوذی انجام نشده است. لازم به ذکر است که در برخی تصاویر SEM، ترکیبات یوتکتیک کمرنگ تر دیده می شوند، ولی حضور این ترکیبات در هنگام تصویر برداری، مشخص بوده است. حضور این ترکیبات در آنالیزهای خطی و نقطه ای گرفته شده نیز نمایان می باشد. همچنین ترکیبات یوتکتیک حاصله در آزمونهای استحکام برشی و ریز سختی سنجی به وضوح تاثیر گذار بوده است.

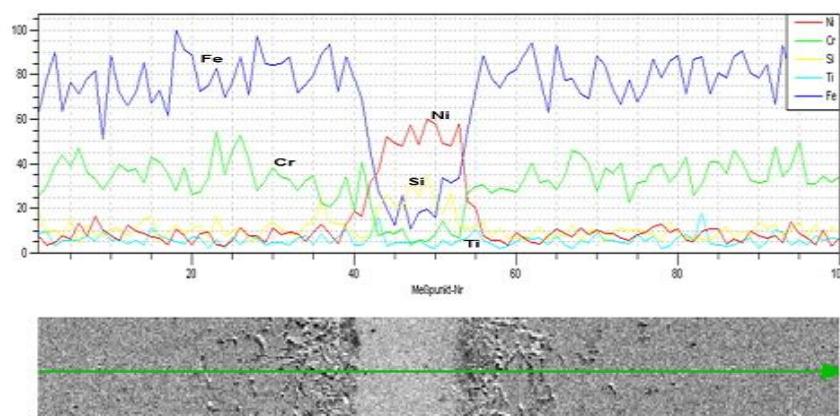
ب- اتصال در دمای $1050^{\circ}C$ و زمان ۷۵ دقیقه



شکل ۵- تصویر میکروسکپ نوری و SEM اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای $1050^{\circ}C$ و زمان ۷۵ دقیقه.

افزایش زمان از ۴۵ دقیقه به ۷۵ دقیقه در همان دمای $1050^{\circ}C$ درجه سانتی گراد باعث نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب و جلوگیری از ایجاد ترکیبات یوتکتیک شده است. با مشاهده تصاویر میکروسکوپی و آنالیز خطی از اتصال (شکل ۵، ۶)، مشخص می گردد که انجماد همدمای کامل شده و با نفوذ مناسب عناصر، زمان ۷۵ دقیقه برای حداقل زمان ایجاد اتصال TLP در دمای $1050^{\circ}C$ درجه سانتی گراد جهت فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-30 مناسب می باشد. در انجماد همدمای به علت عدم پس زده شدن عناصر آلیاژی در شرایط تعادلی، از تشکیل ساختار یوتکتیک جلوگیری می شود. انجماد همدمای با نگهداری نمونه ها در دمای اتصال و نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به فلز پایه از فصل مشترک لایه واسط مذاب و فلز پایه آغاز می شود و در صورت کافی بودن زمان برای نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در

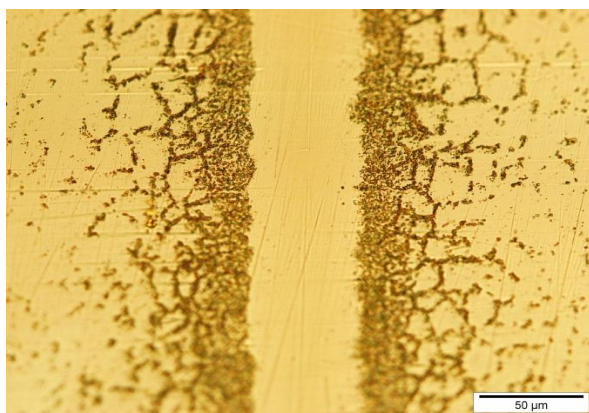
فاز جامد، در مرکز اتصال به پایان می رسد. افزایش زمان باعث نفوذ بیشتر عناصر می شود. با مقایسه آنالیز خطی اتصالات در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمانهای ۷۵ و ۴۵ دقیقه نسبت به هم، مشخص می شود با گذشت زمان بیشتر، مقدار نفوذ آهن از فلز پایه به لایه واسط بیشتر شده است به گونه ای که در مناطق اطراف خط اتصال، آهن بیشتری وجود دارد. با گذشت زمان به ۷۵ دقیقه، میزان نفوذ نیکل در فلز پایه بیشتر شده است، به گونه ای که مقدار کمتری نیکل نسبت به زمان ۴۵ دقیقه در محدوده اتصال وجود دارد. با گذشت زمان نفوذ عنصر کروم نیز بیشتر شده است. توزیع عنصر سیلیسیوم نیز در منطقه اتصال یکنواخت تر شده است.



شکل ۶- تصویر آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۷۵ دقیقه.

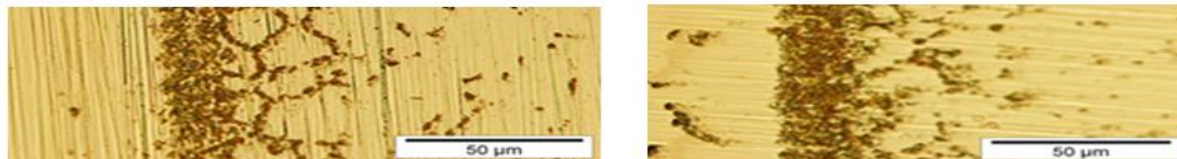
ج - اتصال در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۱۲۰ دقیقه

با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۷) مشخص می گردد که افزایش زمان باعث کاهش ترکیبات اطراف منطقه اتصال شده است. این کاهش و یکنواختی ساختار باعث بالا رفتن استحکام اتصال و کاهش سختی می گردد. با توجه به اینکه زمان ۷۵ دقیقه برای تکمیل انجماد همدمای کافی بوده است، ولی افزایش زمان نگهداری باعث افزایش نفوذ عناصر بین لایه واسط و فلز پایه و یکنواخت شدن توزیع غلظت عناصر می گردد که در واقع مترادف با همگن سازی ترکیب شیمیایی می باشد. همگن سازی اتصال، باعث افزایش خواص مکانیکی مناسب در اتصال می شود. با افزایش زمان، غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در منطقه اتصال کاهش یافته در حالیکه غلظت عناصر محلول فلز پایه در این منطقه افزایش می یابد.



شکل ۷- تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۱۲۰ دقیقه.

در شکل (۸) تصویر اتصال در زمانهای ۴۵ دقیقه و ۱۲۰ دقیقه در دمای مشترک ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد با هم مقایسه شده است. همانگونه که در شکل (ب) مشخص است، با افزایش دما ترکیبات رسوبی اطراف خط اتصال کمتر شده است.

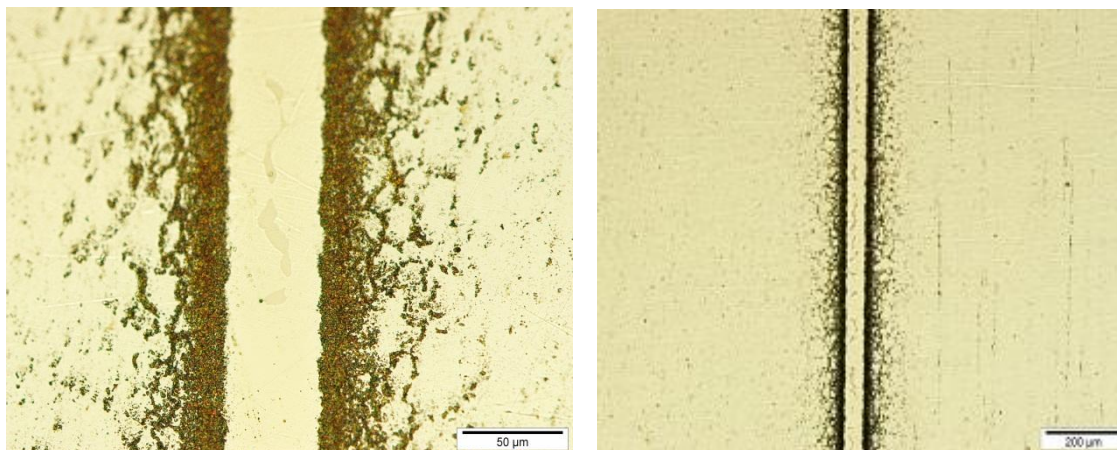


شکل ۸- تصویر اتصال TLP فولاد AISI 321 در دمای ۱۰۵۰ °C (الف) - زمان ۴۵ دقیقه (ب) - زمان ۱۲۰ دقیقه.

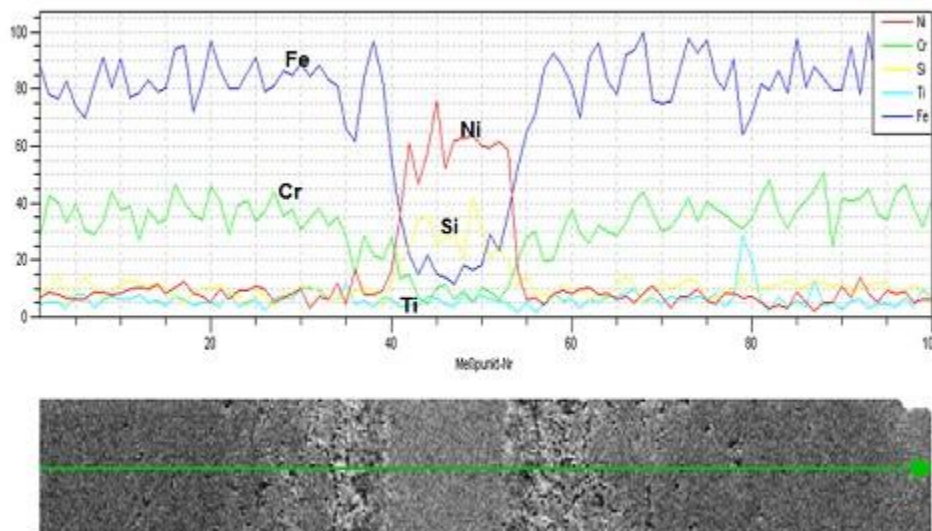
د- اتصال در دمای ۱۱۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه

جهت بررسی متغیر دما در اتصال فولاد AISI321 درجه حرارت تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد افزایش داده شد. با توجه به نسبت معکوس دما و زمان در اتصال TLP، زمان کمتر و در حد ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اتصال و مشاهده تصاویر میکروسکوپی مشخص گردید انجماد همدم کامل نشده است و ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال قابل مشاهده شدند (شکل ۹). با توجه به حضور عناصر نیکل و سیلیسیم احتمال تشکیل ترکیب یوتکتیک Ni-Si زیاد می باشد. احتمال وجود ترکیبات بورایدی نیز با توجه به برخی تحقیقات صورت گرفته وجود دارد (بختیاری و اکرامی، ۲۰۱۲)، (جانگ و شی، ۲۰۰۳) و (پورانوری، اکرامی، کوکبی، ۲۰۰۸). احتمال اینکه رسوبات بوجود آمده در اطراف خط اتصال، با ترکیب Fe-B و Ni-B و Cr-B باشند، زیاد می باشد.

با مقایسه آنالیز قسمتهای مختلف اتصال در این دما و زمان با دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۴۵ دقیقه، مشاهده می گردد که آنالیز مناطق اتصال دو حالت مقایسه شده، تقریباً نزدیک می باشد. در هر دو حالت، انجماد همدم کامل نبوده و ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال وجود دارد و با توجه به آنالیز مشابه نقاط به نظر می رسد ترکیبات مشابه در هر دو حالت اتصال تشکیل شده باشد و نفوذ عناصر مختلف تقریباً به یک میزان رخ داده است. این مقایسه به خوبی رابطه دما و زمان را در اتصال TLP نشان می دهد، به گونه ای که با کاهش زمان و افزایش دما در حالت ۳۰ دقیقه و ۱۱۰۰ درجه نتایج تقریباً یکسانی در حالت ۴۵ دقیقه و ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد به دست آمده است.



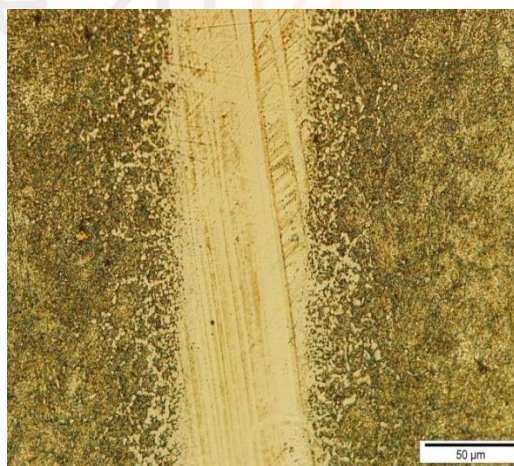
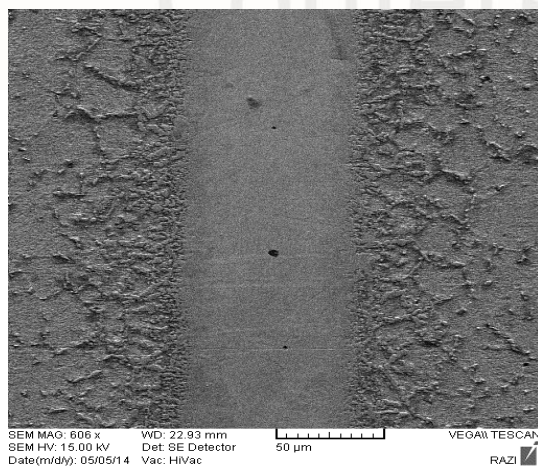
شکل ۹- تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۱۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه.



شکل ۱۰- تصویر آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای 1100°C و زمان ۳۰ دقیقه.

ه- اتصال در دمای 1100°C و زمان ۴۵ دقیقه

با توجه به کم بودن زمان ۳۰ دقیقه جهت انجماد همدمای کامل در درجه حرارت 1100°C درجه سانتی گراد، زمان اتصال به ۴۵ دقیقه افزایش داده شد. تصاویر میکروسکوپی مناطق اتصال (شکل ۱۱) مشخص می کند که زمان ۴۵ دقیقه با دمای 1100°C درجه سانتی گراد جهت اتصال TLP فولاد AISI321 کافی بوده و با نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب و سایر عناصر موجود در فلز پایه و لایه واسط، انجماد همدمای کامل انجام پذیرفته و ترکیبات نامطلوب در اتصال تشکیل نشده است.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکپ نوری و SEM اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای 1100°C و زمان ۴۵ دقیقه.

و- اتصال در دمای ۱۱۵۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه

جهت بررسی تاثیر افزایش درجه حرارت و کمتر شدن زمان اتصال در فرایند اتصال فاز مایع گذرا فولاد AISI321 درجه حرارت به ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد افزایش داده شد و زمان اتصال نیز ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱۱) مشخص می کند که اتصال انجام شده مطلوب و انجماد همدم در این زمان و دما، کامل شده است. زمان ۳۰ دقیقه در ۱۱۰۰ درجه جهت تکمیل انجماد همدم کامل نبوده است ولی مشاهده می شود که با افزایش دما در همان زمان ۳۰ دقیقه، انجماد همدم کامل شده است. این حالت به خوبی ارتباط معکوس دما و زمان لازم برای کامل شدن انجماد همدم را در اتصال TLP نشان می دهد.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۱۵۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه.

در رابطه با ارتباط دما و زمان و غلظت عناصر در اتصال TLP، با حل تحلیلی قانون دوم فیک در مورد نفوذ توسط کرانک^۸ می تواند به منظور بررسی نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب از لایه واسط مذاب به فلز پایه حین اتصال، به صورت زیر مورد استفاده قرار بگیرد:

$$C(x,t) = C_m + \frac{1}{2}(C_0 - C_m) \left\{ \operatorname{erf} \frac{w-x}{\sqrt{4Dt}} + \operatorname{erf} \frac{w+x}{\sqrt{4Dt}} \right\} \quad (1)$$

که در آن:

$C(x,t)$: غلظت عناصر MPD به عنوان تابعی از فاصله از مرکز لایه میانی (x) و زمان (t)

C_0 : غلظت اولیه عناصر MPD در لایه واسط

C_m : غلظت اولیه عناصر MPD در فلز پایه

D : ضریب نفوذ عناصر MPD در آلیاژ فلز پایه

رابطه بالا نشان می دهد که در زمان ثابت، $C(x)$ ، بطور معکوس با D رابطه دارد. ضریب نفوذ با دما رابطه مستقیم دارد به گونه ای که افزایش دما باعث افزایش ضریب نفوذ می شود. بنابراین افزایش دما باعث کاهش غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در یک نقطه مشخص

و تحت یک زمان مشخص، می شود (بختیاری و اکرامی، ۲۰۱۲). انجماد همدمای وقتی کامل می شود که غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در لایه میانی اتصال کاهش یابد. اتصالات انجام شده به خوبی شاهد این مطلب می باشند که با افزایش دما می توان زمان اتصال را کمتر انتخاب نمود. مقایسه حداقل زمان انجماد همدمای در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، مشخص می کند که با افزایش دما، زمان انجماد همدمای کاهش می یابد. یکی از روابطی که جهت تخمین زمان مورد نیاز برای تکمیل انجماد همدمای مورد استفاده قرار می گیرد به صورت زیر می باشد:

$$t_f^{\frac{1}{2}} = \frac{2h}{4\gamma D^2} \quad (2)$$

که در آن:

t_f : زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد همدمای

D : ضریب نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در فلز پایه جامد

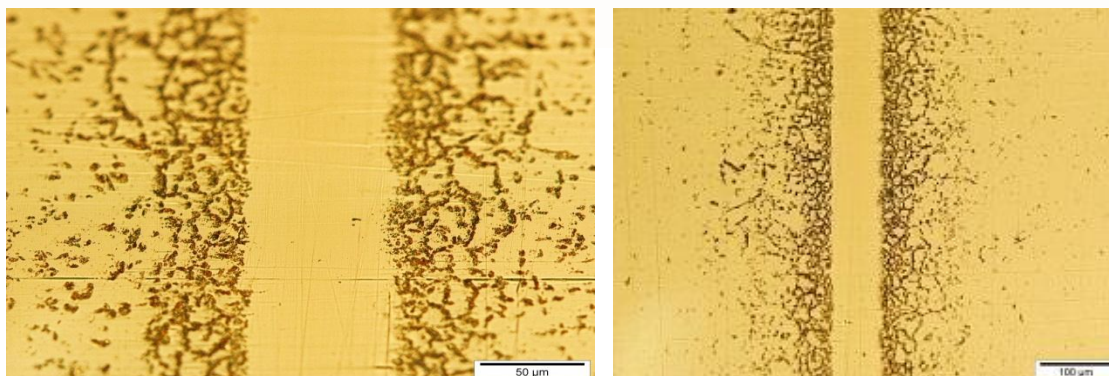
$2h$: عرض حداکثر لایه واسط مذاب در فصل مشترک مذاب/جامد در شرایط تعادلی

γ : یک پارامتر بدون بعد

زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد همدمای، تابعی از قابلیت نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در فلز پایه جامد می باشد که تابع دماست (بختیاری و اکرامی، ۲۰۱۲). بنابراین با افزایش دمای اتصال زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد همدمای، کاهش می یابد. این تحلیل دقیقاً مطابق با شرایط اتصالات انجام گرفته می باشد.

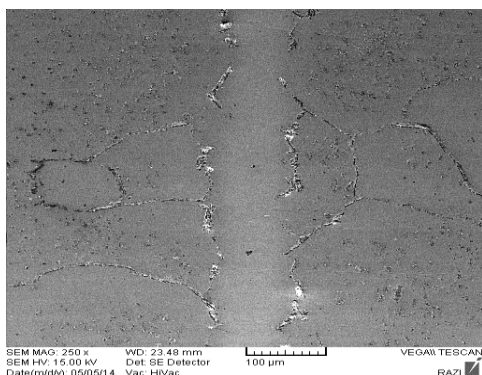
ز- اتصال در دمای ۱۱۵۰ °C و زمان ۶۰ دقیقه

جهت بررسی تاثیر زمان در اتصال TLP فولاد AISI321 زمان نگهداری نمونه ها در کوره از ۳۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه افزایش یافت. تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱۲) مشخص می کند که رسوبات و ترکیبات اطراف خط اتصال با افزایش زمان کمتر شده و با نفوذ این ترکیبات در اثر گذشت زمان و دادن فرصت نفوذ به آنها، ساختار همگن تر شده و در نتیجه استحکام نیز بالاتر می رود. نفوذ موثرتر عناصر و همگن تر شدن ساختار مناطق اطراف اتصال باعث افزایش استحکام اتصال می گردد. حین همگن شدن، نفوذ متقابل عناصر آلیاژی بین فلز پایه ولایه واسط، براساس مکانیزم استحکام بخشی محلول جامد، موجب افزایش استحکام اتصال می شود.

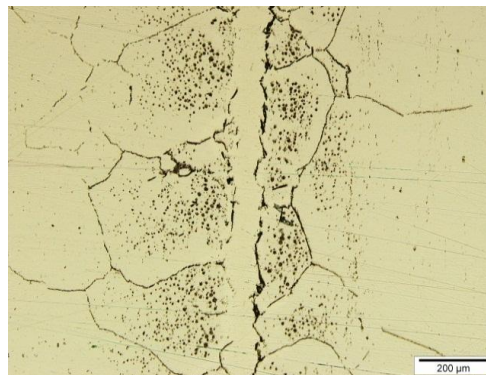


شکل ۱۲- تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۱۵۰ °C و زمان ۶۰ دقیقه.

ح- اتصال در دمای ۱۲۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه

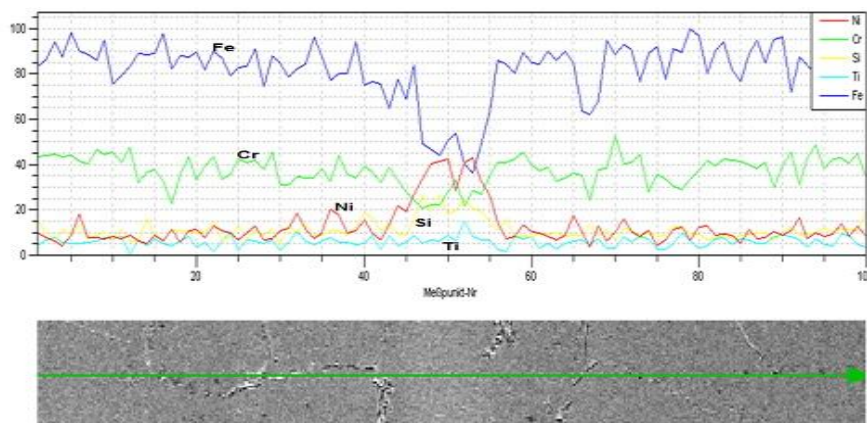


شکل ۱۴- تصویر میکروسکپ SEM اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۲۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه.



شکل ۱۳- تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۲۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه.

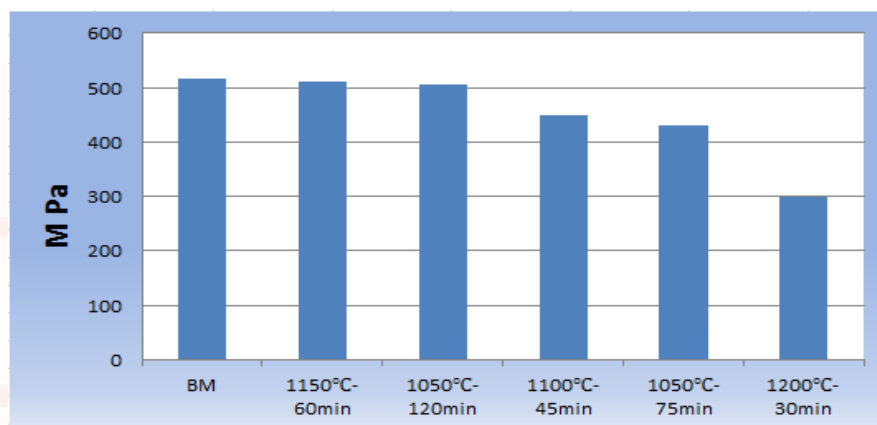
جهت رسیدن به حداکثر دمای قابل استفاده در اتصال TLP فولاد AISI321 دما به ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت و نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در کوره خلا نگهداری شدند. پس از تصویر برداری از نمونه ها مشخص گردید در منطقه اتصال، ذوب موضعی صورت گرفته است. در این حالت نفوذ عناصر آلیاژی در منطقه اتصال زیاد بوده و این امر باعث پایین آمدن استحکام اتصال می گردد. با افزایش دما از یک حد مشخص در اتصال TLP، نفوذ مذاب به مرز دانه های فلز پایه در مجاورت اتصال رخ می دهد. در این هنگام، ذوب جزئی در فلز پایه رخ داده و اختلاط مذاب لایه واسط و ذوب جزئی فلز پایه انجام می گردد. عنصر بور از لایه واسط مذاب به فلز پایه نفوذ می کند و جدایش این عنصر در محل مرز دانه ها و مرزهای بین فاز فلز پایه موجب کاهش نقطه ذوب این مناطق می گردد. در صورتی که نقطه ذوب این مناطق به مقادیر کمتر از دمای اتصال کاهش یابد، این مناطق ذوب شده و حین سرد شدن از دمای اتصال موجب تشکیل فازهای مشخصی می گردند (بختیاری، ۱۳۹۱). یکی دیگر از مکانیزمها جهت افزایش زمان انجماد همدم، حضور عناصر ثانویه می باشد که می تواند از فلز پایه و لایه مشترک منتشر شوند. این عناصر ممکن است به صورت ناخالصی در فلز پایه یا لایه واسط حضور داشته باشند (بختیاری و اکرامی، ۲۰۱۲).



شکل ۱۵- تصویر آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۲۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه.

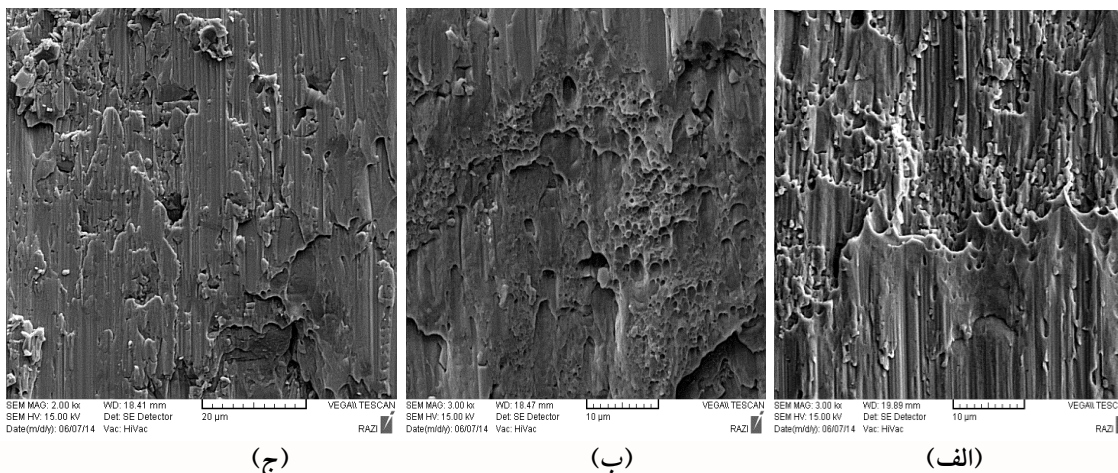
ط - نتایج آزمون استحکام برشی

بر روی نمونه های مورد نظر پس از آماده سازی، جهت تعیین حداکثر استحکام برشی، آزمون برش انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۱۶) قابل مشاهده می باشد. نتایج آزمون برش نشان داد که اتصال در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۶۰ دقیقه و همچنین دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه با لایه واسط MBF-30 دارای استحکام بسیار مطلوب و در حد استحکام فلز پایه یعنی فولاد AISI321 می باشند (به ترتیب برابر ۹۹ و ۹۸ درصد استحکام فلز پایه). استحکام اتصال در دمای ۱۱۰۰ درجه و زمان ۴۵ دقیقه و همچنین دمای ۱۰۵۰ درجه و زمان ۷۵ دقیقه نیز در حد مطلوب می باشد (به ترتیب برابر ۸۷ و ۸۴ درصد استحکام فلز پایه)، ولی با توجه به اینکه ترکیبات بین فلزی و رسوبات موجود در منطقه اطراف اتصال آنها بیشتر است، دارای استحکام کمتری نسبت به دو نمونه اولی هستند.



شکل ۱۶- نمودار استحکام برشی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30

افزایش دما و به خصوص زمان با کمتر کردن رسوبات و ترکیبات فلزی مناطق اطراف اتصال باعث افزایش استحکام می شود. در اتصال انجام شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد که دمای بحرانی می باشد، نفوذ بیش از حد عناصر آلیاژی باعث کاهش استحکام شده است. ترکیبات یوتکتیک تشکیل شده که عموماً فازهای سخت و شکننده هستند، باعث کاهش استحکام اتصال می شوند. همچنین کم بودن درصد این عناصر در محدوده DAZ، باعث کم شدن میزان رسوبات تشکیل شده حین فرایند اتصال در این مناطق می شود، که با افزایش استحکام همراه است. نفوذ عناصر آلیاژی در منطقه اتصال، بر اساس مکانیزم مستحکم شدن محلول جامد، باعث افزایش سختی می شود. استحکام بخشی محلول جامد، یکی از اصلی ترین مکانیزمهای استحکام بخشی در این اتصالات می باشد. وجود این عناصر در برخی موارد باعث افزایش استحکام محلول جامد می شود. مقایسه اتصالات در دمای ۱۰۵۰ درجه و ۷۵ دقیقه با ۱۱۰۰ درجه و ۴۵ دقیقه، مشخص می کند که استحکام در اتصال با دمای بیشتر، بالاتر از استحکام اتصال در دمای کمتر می باشد (با توجه به اینکه در هر دو دما، انجماد همدا کامل شده است). این امر بدین علت است که همانگونه که اشاره گردید، در درجه حرارت بالاتر، میزان ترکیبات رسوبی تشکیل شده در اطراف خط اتصال کمتر می شود. با مشاهده استحکام اتصال در دمای ۱۰۵۰ درجه با زمانهای ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه، مشخص می گردد که افزایش زمان اتصال باعث افزایش استحکام اتصال شده است که علت آن همگن تر شدن ساختار و کمتر شدن ترکیبات رسوبی در منطقه DAZ با توجه به نفوذ بیشتر عناصر می باشد. با افزایش درجه حرارت و زمان، نفوذ عناصر بیشتر می شود.



شکل ۱۷- تصویر میکروسکپ SEM از سطح شکست اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30
(الف) در دمای ۱۰۵۰°C و زمان ۷۵ دقیقه- (ب) در دمای ۱۱۵۰°C و زمان ۶۰ دقیقه- (ج) در دمای ۱۵۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه.

تصاویر میکروسکوپی SEM سطح شکست برخی از نمونه های آزمون برش در شکلهای ۱۷ (الف)، (ب) و (ج) قابل مشاهده می باشد. مشاهده شکل (۱۷- الف) مشخص کننده شکست نرم در سطح شکست اتصال انجام شده در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۷۵ دقیقه می باشد. در این اتصال ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال وجود نداشته و انجماد همدم کامل شده بود. وجود دیمپل ها که مشخصه شکست نرم می باشد، در این سطح شکست قابل مشاهده می باشد. شکست در دمای اتصال ۱۱۵۰ درجه و ۶۰ دقیقه با توجه به شکل (۱۷- ب) از نوع شکست نرم می باشد. دیمپل ها به همراه سطوح فیبری ناشی از تغییر فرم پلاستیک در تصویر سطح شکست، قابل مشاهده می باشد. به هم پیوستن ریز ترکها منجر به تشکیل مناطق فیبری شکل می گردد. در شکل (۱۷- ج) موارد شکست ترد و نرم با هم قابل مشاهده می باشد، ولی با توجه به استحکام کمتر این اتصال و وجود ترکیبات ترد در این اتصال، به نظر می رسد سطوح کلیواژی و مکانیزم شکست ترد، علت گسیختگی اتصال باشد. شکست کلیواژ هنگامی تشکیل شده و گسترش می یابد که ترکهای میکروسکوپی بدون لغزش های محسوس اشاعه پیدا کنند. نهایتاً، بزرگترین تنش در رأس ترک بایستی بر تنش شکست غلبه کند.

ی- نتایج آزمون ریز سختی سنجی

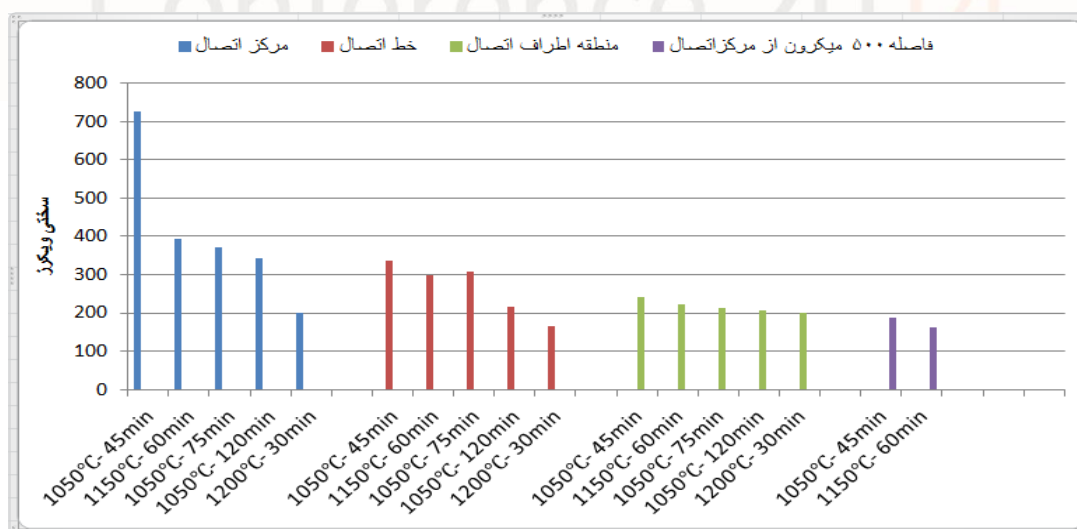
نتایج آزمون ریزسختی سنجی برخی از نمونه های اتصال داده شده از طریق فرایند TLP فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-30 در نمودارهای شکل های (۱۹) الی (۲۱) قابل مشاهده می باشد. سختی سنجی از چهار منطقه مرکز اتصال، خط اتصال، منطقه تحت تاثیر اتصال و فواصل حدود ۵۰۰ میکرومتر از مرکز اتصال با روش ویکرز انجام شده است (شکل ۱۸).



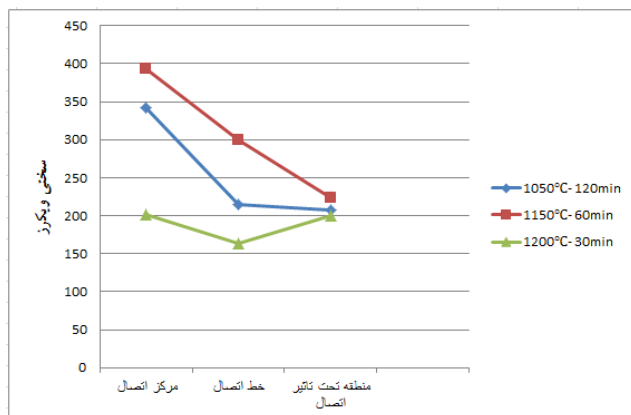
شکل ۱۸- مناطق سختی سنجی شده

(۱) مرکز اتصال، (۲) خط اتصال، (۳) منطقه تحت تاثیر اتصال، (۴) فاصله حدودی ۵۰۰ میکرومتر از مرکز اتصال.

در شکل (۱۹) اعداد به دست آمده از ریز سختی سنجی نمونه های اتصال داده شده با لایه واسط MBF-30 به صورت تفکیک اعداد به دست آمده از سختی سنجی مرکز اتصال، خط اتصال، منطقه تحت تاثیر اتصال و فواصل حدود ۵۰۰ میکرون از مرکز اتصال جهت مقایسه آمده است. همانگونه که قابل پیش بینی بود، سختی از مرکز اتصال به سمت فلز پایه کمتر می شود. در نمونه اتصال داده شده در درجه حرارت ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۴۵ دقیقه به علت عدم تکمیل شدن انجماد همدم و حضور ترکیبات یوتکتیک بورایدها و سیلیسیدهای نیکل و شاید کرم و آهن که ترکیباتی سخت و شکننده هستند، در مرکز اتصال سختی بالا رفته است و با دور شده از مرکز اتصال به علت کمتر شدن حضور این ترکیبات، سختی نیز کاهش داشته است. سختی در مرکز اتصال نمونه های دیگر به دلیل عدم حضور ترکیبات یوتکتیک کمتر می باشد. در نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد که دمای بحرانی اتصال می باشد به علت نفوذ زیاد عنصر آهن در منطقه اتصال و کمتر شدن عنصر نیکل در منطقه اتصال، میزان عناصر آلیاژی به مقدار بسیار زیادی تغییرات داشته است و این امر سبب کاهش سختی شده است. در نمودارهای خطی شکل (۲۰) مقدار سختی سه نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد با زمانهای متفاوت با هم مقایسه شده است. در هر سه نمونه مقدار سختی از مرکز اتصال به سمت انتهای فلز پایه کاهش یافته است. بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه نگهداری شده در زمان ۴۵ دقیقه می باشد که ترکیبات یوتکتیک هنوز در آن وجود داشته است. با افزایش زمان به ۷۵ دقیقه و تکمیل انجماد همدم، سختی نیز کاهش یافته و نگهداری در زمان ۱۲۰ دقیقه در کوره نیز مفید بوده و با نفوذ بیشتر عناصر مجدداً سختی کاهش یافته است و در نتیجه استحکام بالا می رود. با مشاهده سختی های به دست آمده به خوبی قابل مشاهده است که افزایش زمان باعث کاهش سختی و افزایش استحکام می شود. در نمودارهای خطی شکل (۲۱) سه نمونه دیگر با دما و زمانهای متفاوت با هم مقایسه شده است. جدا از نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۲۰۰ که کاهش سختی آن در ارتباط با رفتار متفاوت و ذوب جزئی است، کمترین سختی مربوط به نمونه ۱۱۵۰ درجه و زمان ۶۰ دقیقه می باشد که بیشترین استحکام را دارا می باشد. نمونه ۱۰۵۰ درجه و زمان ۱۲۰ دقیقه که استحکام خوبی دارد، دارای سختی بیشتری نسبت به نمونه ۱۱۵۰ درجه و زمان ۶۰ دقیقه است و در نتیجه استحکام آن به مقدار ناچیزی کمتر می باشد. در اینجا قابل مشاهده می باشد که تاثیر افزایش درجه حرارت بر روی کاهش سختی و افزایش استحکام، بیشتر از افزایش زمان بوده است.



شکل ۱۹- نمودار مقایسه ای مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-30.



شکل ۲۱- نمودار مقایسه ای مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال TLP در سه زمان و دمای مختلف.



شکل ۲۰- مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال TLP در سه زمان مختلف با درجه حرارت ۱۰۵۰°C.

نتیجه گیری

- فرایند اتصال TLP برای فولاد زنگ نزن AISI321 با استفاده از لایه واسط BNi-3 در دماها و زمان های مختلف انجام شد. نتایج بررسی های ریزساختاری و آزمون های خواص مکانیکی نشان داد که:
- حداقل زمان لازم جهت تکمیل انجماد همدم در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، به ترتیب برابر ۷۵، ۴۵ و ۳۰ دقیقه بدست آمد.
- در حالت عدم تکمیل انجماد همدم، ترکیبات بوریدی و سیلیسیدی نیکل، کروم و آهن در مرکز خط اتصال تشکیل گردید.
- با افزایش دمای اتصال از ۱۰۵۰ به ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، زمان تکمیل انجماد همدم برای لایه واسط MBF-30 کاهش یافته و ترکیبات رسوبی منطقه DAZ کمتر و پراکنده تر گردید.
- دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد، دمای بحرانی یا بالاتر از دمای بحرانی جهت اتصال فولاد AISI321 بدست آمد. در این دما ذوب جزیی رخ داد و خواص مکانیکی اتصال یافت.
- در اتصالات انجام شده با شرایط ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و ۶۰ دقیقه و همچنین ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و ۱۲۰ دقیقه، بیشترین استحکام برشی مشاهده گردید که مقدار آن به ترتیب معادل ۹۹ و ۹۸ در صد فلز پایه تعیین گردید.
- ترکیبات یوتکتیک باعث افزایش سختی اتصال در مناطق دارای این ترکیبات در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد در زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد در زمان ۳۰ دقیقه گردید.
- سختی برای تمامی اتصالات انجام شده در دماهای استفاده شده ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در زمانهای ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه، در مرکز اتصال بیشتر و به سمت فلز پایه کمتر می شود.
- شکست در اتصالات با استحکام بالا که در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد در زمان ۱۲۰ دقیقه و دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۶۰ دقیقه بوده است، از نوع شکست نرم تشخیص داده شد.

مراجع

- بختیاری، رضا. (۱۳۹۱). تاثیراتصال TLP برریز ساختار و خستگی حرارتی سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-414. پایان نامه دکتری. دانشکده مهندسی و علم مواد. دانشگاه صنعتی شریف.

- Ally Digest SourceBook :Stainless Steel.200. ASM International.
- Arafin,MA. Medraj,M. Turner,DP.Bocher,P .(2007).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 106 , 109–111.
- Bakhtiari,R.Ekrami,A . Khan,TI.(2012). The effect of TLP bonding temperature on microstructural and mechanical property of joints made using FSX-414 superalloy,Mat A546,291-300.
- Bakhtiari,R.Ekrami,A.(2012).The effect of gap size on the microstructure and mechanical properties of the transient liquid phase bonded FSX-414 superalloy. Mat 40,130-137
- Brandes,EA.Brook,GB.(1992).Smithells metal reference book.11-7-11-485,oxford, Butterworth,Heinemann.
- Gale,Wf.Wallach,ER.1991.Wettability of nickel alloys by boron containing brazes. Welding Research, 76s-79s.
- Idowu,OA.Richards,NL. Chaturvedi,MC.(2005). Mater. Sci. Eng. A 397, 98–112.
- Jang,JSC. Shih,HP.(2003).Evolution of Microstructure of AISI 304 Stainless Steel Joint Brazed by Mechanically Alloyed Nickel Base Filler with Different Silicon Content. Journal of Material Science Letters, Vol. 22, 79-82.
- Maza Atabaki, M.(2011). Partial transient liquid phase diffusion bonding of Zircaloy- 4to stabilized austenitic stainless steel 321 using active titanium filler metal, Manuf Sci Eng:133 (5):99-110
- Mazar Atabaki,M.Bajgholi,ME.Dehkordi,EH.(2012).Partial transient liquid phase diffusion bonding of zirconium alloy (Zr–2.5Nb)to stainless steel 321.Materials and Design 42 , 172–183.
- Pouranvari,M.Ekrami,A.Kokabi, AH.(2008). Microstructure–properties relationship of TLP-bonded GTD-111 nickel-base superalloy. Mater Sci Eng A.490:229–34.
- Villars,P.Prince,A.Okamoto,H.(1995).Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams. ASM International, Materials Park, OH, USA, 5508-5513.