

بررسی تاثیر دما، زمان و لایه واسط بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۲۱ با روش فاز مایع گذرا

محمد علی میثاقی^{۱*}، رضا بختیاری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۶، ش.ص ۹۵-۱۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹)

چکیده

با توجه به نیاز صنعت به فرایند اتصال مناسب در رابطه با قطعات ساخته شده از فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۲۱ که در تجهیزات نیروگاهی نظیر توربین‌ها کاربرد دارند، در این پژوهش، اتصال این فولاد از طریق فرایند اتصال فاز مایع گذرا (TLP) با دولایه واسط با نام تجاری MBF-30 و MBF-20 مورد بررسی قرار گرفت. فرایند اتصال در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۳۰ الی ۱۲۰ دقیقه در کوره خلا انجام پذیرفت. نمونه‌های اتصال داده شده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی ریز ساختاری قرار گرفتند. آنالیز عنصری و فازی ترکیبات مشاهده شده در اتصالات نیز با استفاده از سیستم طیف سنجی انرژی (EDS) میکروسکوپ الکترونی روبشی و روش تفرق اشعه ایکس (XRD) صورت پذیرفت. به منظور بررسی نحوه توزیع عناصر در عرض اتصال، آنالیز خطی مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال، نمونه‌ها تحت آزمون‌های استحکام برشی و ریزسختی سنجی قرار گرفتند. حداقل زمان لازم برای تکمیل انجماد همدمای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۷۵، ۴۵ و ۳۰ دقیقه به دست 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 همگن‌تر، سختی کم‌تر و استحکام برشی بیش‌تری به دست آمد. بیش‌ترین استحکام برشی برای لایه واسط MBF-30 به ترتیب معادل ۹۹ و ۹۸ در صد استحکام برشی فلز پایه و برای لایه واسط MBF-20 به ترتیب معادل ۹۵ و ۹۴ در صد استحکام برشی فلز پایه حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: فرایند اتصال فاز مایع گذرا، فولاد زنگ نزن ۳۲۱، لایه واسط MBF-30 و MBF-20، خواص مکانیکی.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

^۲ - استادیار، دکترای مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: ma.misaghi@yahoo.com

پیشگفتار

با توجه به اینکه بیش تر 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 می‌باشد. به کارگیری بهترین و جدیدترین روش اتصال یک موفقیت اساسی در تولید قطعات محسوب می‌شود. فرایند اتصال با فاز مایع گذرا (TLP)^۲، یکی از روش‌های اتصال با قابلیت‌های بالا و منحصر به فرد خود می‌باشد که می‌تواند در مواردی که اتصال و جوشکاری با روش‌های دیگر امکان پذیر نبوده و یا دارای مشکلات خاص خود می‌باشد، به کار گرفته شود. این مشکلات ممکن است عیوب به وجود آمده پس از فرایند جوشکاری ذوبی مانند ترک‌های گرم، پیچیدگی قطعه، وجود تنش‌های پسماند، ایجاد فازهای ناخواسته، کاهش خواص مکانیکی و غیره باشد. یکی از کاربردهای فولاد زنگ نزن ۳۲۱، در ساخت برخی از قطعات توربین‌های نیروگاهی است که نیاز به اتصال این فولاد می‌باشد. در حال حاضر اتصال این فولاد در توربین‌ها و در قسمت مربوطه با روش لحیم‌کاری سخت انجام می‌شود که استحکام خیلی بالایی ندارد، تغییر دادن اتصال این فولاد با برخی روش‌های جوشکاری با مشکلات خاص خود همراه می‌باشد [۱] (برای مثال عدم عمق نفوذ مناسب در جوش لیزر)، بنابراین سعی گردیده است که اتصال این قطعات جهت افزایش استحکام و خواص فیزیکی و مکانیکی، با روش فاز مایع گذرا انجام شود.

در رابطه با اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱، مقالات و تحقیقات زیادی وجود ندارد. در این رابطه مزار اتابکی^۴ به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ به آلیاژ زیرکونیوم Zircaloy-4 با روش فاز مایع گذرا به وسیله یک لایه واسط پایه تیتانیوم پرداخته است [۱] که ارتباط زیادی با اتصال متجانس فولاد ۳۲۱ که موضوع پژوهش است، ندارد. در مقاله دیگری از مزار اتابکی به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ به آلیاژ زیر کونیوم Zr-2.5Nb، با روش فاز مایع گذرا

به وسیله یک لایه واسط پایه تیتانیوم و دو لایه واسط پایه زیرکونیوم پرداخته شده است [۲] که کاربرد خاص خود را داشته و ارتباط زیادی با موضوع پژوهش ندارد. در مقاله دیگری که در رابطه با اتصال فولاد ۳۲۱ با روش فاز مایع گذرا می‌باشد، محمد آرفین^۵ به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ از طریق اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط BNi-2 پرداخته است. این مقاله بیش تر جنبه مدلسازی برای تصحیح برخی روابط داشته و ریزساختاری با تصاویر مربوطه در آن وجود ندارد. همچنین بر روی خواص مکانیکی اتصال کاری صورت نگرفته است [۳].

جهت به دست آوردن یک اتصال مطلوب در فرایند فاز مایع گذرا، می‌بایست بهترین دما و زمان تعیین گردد. هدف از این پژوهش، بررسی متغیرهای دما، زمان و لایه واسط در اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۲۱ از طریق اتصال فاز مایع گذرا می‌باشد.

مواد و روش‌ها

فلز پایه اتصال داده شده از فولاد زنگ نزن آستنیتی با کد ۳۲۱ می‌باشد. لایه‌های واسط استفاده شده، با نام‌های تجاری MBF-30 (AWS BNi-3) و MBF-20 (AWS BNi-2) می‌باشد. لایه واسط به ضخامت ۵۰ میکرون بوده است و به ابعاد 10×10 میلی متر بریده شد. آنالیز شیمیایی لایه‌های واسط و فلز پایه مورد استفاده در جدول (۱) درج شده است. نمونه‌های فلز پایه جهت قرار گرفتن در کوره آزمایشگاهی و گیره دستگاه‌های آزمایشگاهی، به ابعاد $4 \times 10 \times 10$ میلی متر بریده شد. جهت دقت در برش و جلوگیری از حرارت دیدن بیش از حد نمونه‌ها، برش توسط دستگاه وایرکات انجام گردید. نمونه‌ها پس از برش توسط سمباده جهت صاف شدن سطح و برطرف شدن آلودگی پولیش گردید. جهت چربی زدایی و تمیزی سطح اتصال، نمونه‌ها در محلول استن شست و شو داده شدند.

لایه واسط در بین دو نمونه آماده شده قرار گرفته و جهت جلوگیری از حرکت نمونه‌ها و ثابت شدن قطعات، نمونه‌ها در داخل یک فیکسچر قرار داده شد. جهت اتصال از کوره تحت خلاء با خلاء 10^{-4} torr استفاده گردید.

3- Transient Liquid Phase (TLP) bonding
4- M. Mazar Atabaki

روشنی (SEM) مورد مشاهده قرار گرفته و آنالیز خطی و نقطه‌ای از محل‌های مختلف اتصال و اطراف اتصال گرفته شد. جهت مشاهده فازهای موجود در مناطق مختلف اتصال، از آنالیز تفرق سنجی اشعه ایکس (XRD)^۷ استفاده گردید. نمونه‌هایی که از جهت اتصال و تشکیل انجماد همدمای دارای شرایط مناسب بودند و همچنین نمونه‌هایی که دارای ابهامات بودند، جهت تعیین استحکام مورد آزمون برش قرار گرفتند. برای انجام آزمون استحکام برشی از یک گیره مخصوص که جهت این امر ساخته شده بود، استفاده گردید. نمونه‌ها در داخل محفظه میانی گیره که دارای ابعاد ۱۰×۱۰ میلی متر بود، قرار داده شد و دو قسمت گیره جهت کشش به فک‌های دستگاه کشش وصل گردید. نمونه‌ها با نیروهای مختلف مورد برش قرار گرفتند و بیش‌ترین نیروی برشی به همراه افزایش طول نمونه‌ها تعیین گردید. نمونه‌هایی که نیاز به آزمون سختی داشت جهت بررسی میزان سختی و تغییرات سختی حاصله در طول فرایند حرارت دهی و اتصال در نقاط وسط اتصال، خط اتصال، منطقه اطراف اتصال و فلز پایه، مورد آزمون ریز سختی سنجی قرار گرفتند.

جدول ۳- آنالیز شیمیایی محلول‌های حکاکی استفاده شده

آنالیز شیمیایی			محلول آج
Water	Hcl	Cuso4	ترکیب شیمیایی
۱۰ آسی سی	۱۰ آسی سی	۲ گرم	مقدار
Water	KOH	K3Fe(CN)6	ترکیب شیمیایی
۱۰۰ میلی لیتر	۱۰ گرم	۱۰ گرم	مقدار

نتایج و بحث

اتصال در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه با لایه واسط MBF-20

با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱) مشخص می‌گردد که انجماد همدمای کامل نشده و ترکیبات

نمونه‌ها در زمان‌های مختلف و تحت دماهای تعیین شده در داخل کوره قرار داده شد و پس از اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

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

	Fe	C	Ma	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)
MBF-30		0.05				4.5		bal	3.2		
MBF-20	3	0.06				4.5	7	bal	3.2		

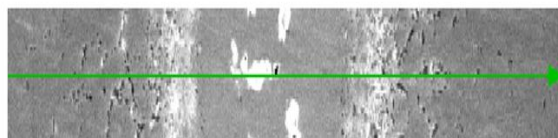
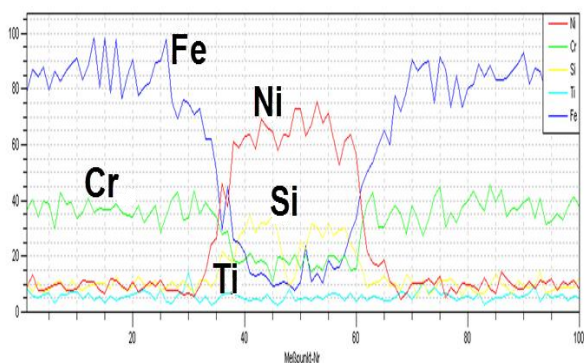
لایه واسط در بین دو نمونه آماده شده قرار گرفته و جهت جلوگیری از حرکت نمونه‌ها و ثابت شدن قطعات، نمونه‌ها در داخل یک فیکسچر قرار داده شد. جهت اتصال از کوره تحت خلاء، با خلاء 10^{-4} torr استفاده گردید. نمونه‌ها در زمان‌های مختلف و تحت دماهای تعیین شده در داخل کوره قرار داده شد و پس از اتصال مورد بررسی قرار گرفت. روند انجام آزمایش‌ها با دما و زمان‌های تعیین شده (به صورت ضربدر) در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- دما و زمان‌های انتخاب شده جهت انجام اتصال

نوع لایه واسط	درجه حرارت (سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)			
		۷۵	۶۰	۴۵	۳۰
MBF-20	۱۰۵۰				
	۱۱۰۰				
	۱۱۵۰				
MBF-30	۱۰۵۰				
	۱۱۰۰				
	۱۱۵۰				

نمونه‌های اتصال داده شده، ابتدا بریده و پس از صاف کردن و پولیش با سمباده‌های شماره ۸۰ الی ۲۰۰۰ و خمیر الماسه توسط محلول‌های حکاکی ذکر شده در جدول (۳) حکاکی شده و ریز ساختار و نحوه اتصال با میکروسکوپ نوری بررسی گردید. جهت بررسی بیش‌تر، نمونه‌های اتصال داده شده، با میکروسکوپ الکترونی

نیز به عنوان عنصر دیگر کاهنده نقطه ذوب دارای شعاع اتمی کوچک و نفوذ سریع می‌باشد؛ اما حلالیت کمی در فلز پایه دارد که این عنصر نیز در صورت کافی نبودن دما و زمان جهت نفوذ، به صورت ترکیبات یوتکتیک پس از اتمام انجماد غیر همدم، باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد. بوریدها و سیلیسیدهای حاصله با ایجاد فازهای ترد و مضر، باعث افت خواص مکانیکی اتصال می‌گردند. اگر چه نمودار فاز سه تایی B-Cr-Fe به طور کامل شناخته نشده است؛ ولی شش مرحله سه تایی در نمودار $B_{33}Cr_{13}Fe_{54}$ ، $B_{33}Cr_{33}Fe_{34}$ به صورت $B_{38}Cr_{55}Fe_7$ ، $B_{50}Cr_{20}Fe_{30}$ ، $B_{50}Cr_{35}Fe_{15}$ یافت می‌شود، بنابراین شکل گیری این مراحل غیر منتظره نیست [۵].



شکل ۲- آنالیز خطی اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-20 در دمای $1050^{\circ}C$ و زمان ۴۵ دقیقه

با بررسی میزان تغییرات عناصر در آنالیز خطی (شکل ۲) مشاهده می‌گردد که توزیع آهن در منطقه اتصال یکنواخت نبوده و مقدار کمی آهن از فلز پایه در لایه واسط نفوذ کرده است که علت آن، انحلال فلز پایه در لایه واسط بوده است. عنصر نیکل با مقدار زیاد در لایه واسط باقی مانده و مقدار جزئی نفوذ داشته است. توزیع کروم کمی یکنواخت تر از دو عنصر آهن و نیکل می‌باشد و همچنین در لایه واسط و در فلز پایه دیده می‌شود؛ اما مقدار آن در فلز پایه بیشتر می‌باشد. عنصر سیلیسیم، به عنوان یکی از عناصر کاهنده نقطه ذوب بیش تر در لایه

یوتکتیکی در وسط خط اتصال قابل مشاهده می‌باشد. این ترکیبات یوتکتیکی، ترکیبات فلزی و بین دانه‌ای ایجاد شده از عناصر فلز پایه و لایه واسط هستند که باعث کاهش استحکام اتصال می‌شوند.

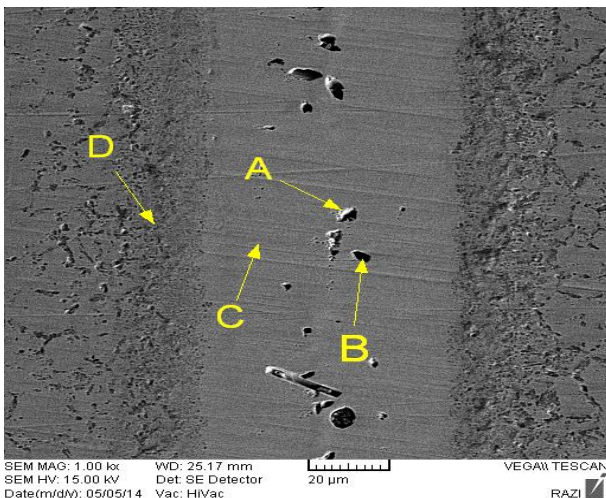


شکل ۱- تصویر میکروسکپ نوری اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-20 در دمای $1050^{\circ}C$ و زمان ۴۵ دقیقه

با اندازه گیری منطقه اتصال (پهنای لایه واسط) مشخص می‌گردد، این منطقه با توجه به ضخامت اولیه لایه واسط (۵۰ میکرومتر) افزایش یافته است (۶۰ میکرومتر) که علت آن انحلال فلز پایه می‌باشد. نیروی محرکه این مرحله، عدم تعادل ترمودینامیکی فلز پایه و لایه واسط مذاب در دمای اتصال می‌باشد.

با توجه به دمای یوتکتیک در نمودارهای فاز دوتایی عناصر آهن، نیکل، بور، کروم و سیلیسیم که به صورت B-Cr ۱۶۲۰ درجه سانتی گراد؛ B-Fe ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد؛ Ni-B ۱۱۹۳ درجه سانتی گراد؛ Ni-Si ۱۱۵۲ درجه سانتی گراد می‌باشد، احتمال وجود این ترکیبات در اتصالات ایجاد شده با توجه به درجه حرارت اتصال قابل پیش بینی است [۴]. سیلیسیم، به عنوان عنصر کاهنده نقطه ذوب دارای شعاع اتمی بزرگ می‌باشد و در صورتی که زمان کافی برای نفوذ وجود نداشته باشد، به صورت ترکیب یوتکتیک با سایر عناصر در اتصال باقی می‌ماند. بور

با توجه به نمودار فازی Ni-Si [۴] مشخص می‌گردد که با مقدار سیلیسیم بیش‌تر از ۸ درصد، ترکیبی با فرمول Ni_3Si به‌وجود می‌آید. با توجه به مقدار بیش‌تر از ۸ درصد سیلیسیم در نقطه B، وجود ترکیب Ni_3Si قابل پیش‌بینی می‌باشد. این ترکیب در آنالیز تفرق سنجی با اشعه ایکس اتصال فولاد ۳۰۴ که ترکیب آن نزدیک به فولاد ۳۲۱ می‌باشد. باروش فاز مایع گذرا و با لایه واسط MBF-20 گزارش شده است [۶].



MBF20-1050°C-45min-point A		MBF20 - 1050°C- 45min - point B	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	6.14	Iron	2.81
Nickel	69.9	Nickel	83.98
Silicon	5.84	Silicon	9.2
Chromium	18.13	Titanium	0.2
		Chromium	3.81
MBF20 - 1050°C- 45min - point C		MBF20 - 1050°C- 45min - point D	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	8.42	Iron	73.91
Nickel	80.03	Nickel	10.6
Silicon	5.15	Silicon	0.37
Titanium	0.07	Titanium	0
Chromium	6.33	Chromium	15.11

شکل ۳ - آنالیز نقطه ای اتصال فاز مایع گذرا

با لایه واسط MBF-20 در دمای $1050^\circ C$ و زمان ۴۵

دقیقه

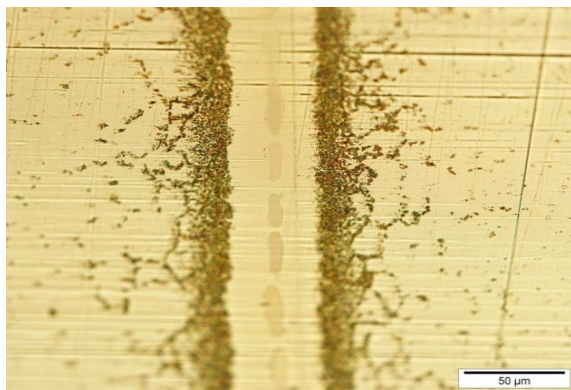
واسط متمرکز بوده و با توجه به کم بودن زمان و دما نتوانسته است به صورت کامل در فلز پایه نفوذ کند. با باقی ماندن سیلیسیم در مرکز اتصال، این عنصر با عناصر دیگر ترکیب شده و به صورت ترکیبات یوتکتیک در لایه واسط موجود می‌باشد. عنصر تیتانیوم با مقدار کم به عنوان عنصر تثبیت کننده در فولاد جهت جلوگیری از خوردگی فلز، به صورت یکنواخت‌تری در لایه واسط نفوذ کرده است.

جهت بررسی بیش‌تر نحوه نفوذ عناصر و ترکیبات به‌وجود آمده، از مناطق مختلف اتصال، آنالیز نقطه‌ای با استفاده از سیستم طیف سنجی انرژی (EDS) میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شد (شکل ۳). با توجه به نتایج آنالیز گرفته شده از نقاط مختلف اتصال، مشاهده می‌گردد که مقداری نفوذ عناصر از فلز پایه به لایه اتصال وجود داشته است. در مرکز اتصال نیز با توجه به کم بودن دما و زمان جهت تکمیل انجماد همدم و نفوذ برخی عناصر، مناطق غنی از کروم به همراه بوریدها و سیلیسیدهای مختلف وجود دارد. درصد بالای نیکل نشان می‌دهد که این ترکیبات بوراید و سیلیسید کروم و نیکل می‌باشند.

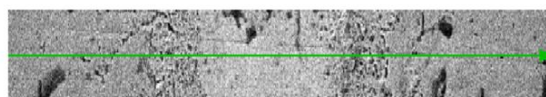
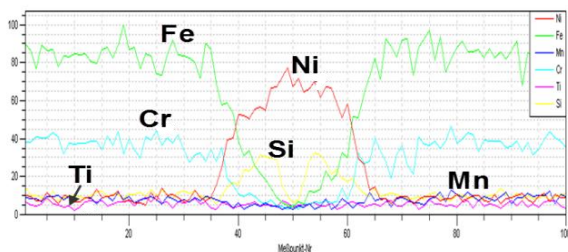
در نقاط A و B که در وسط اتصال بوده و آنالیز ترکیبات یوتکتیک موجود در منطقه انجماد غیر همدم و نواحی کناره این ترکیبات می‌باشند، مقداری نفوذ آهن از فلز پایه و مقداری نفوذ نیکل به فلز پایه حاصل شده است که علت آن همان‌گونه که ذکر شد، عدم تعادل ترمودینامیکی ترکیب شیمیایی بین لایه واسط مذاب و فلز پایه جامد می‌باشد. عنصر سیلیسیم نیز با توجه به ناکافی بودن دما و زمان نتوانسته است در فلز پایه نفوذ کند و با درصد بالا در نقطه B و درصد کم‌تر در نقطه A در مرکز اتصال وجود دارد. وجود سیلیسیم و بور (عنصر بور در آنالیز با میکروسکپ الکترونی روبشی به صورت دقیق مشخص نمی‌گردد و می‌بایست برای بررسی بیش‌تر از میکروسکپ الکترونی عبوری (TEM) و یا روش‌های آنالیز دیگر مانند تفرق سنجی اشعه ایکس استفاده نمود) باعث تشکیل ترکیبات Ni-B و Ni-Si و Fe-B و Cr-B می‌گردد. وجود این ترکیبات در مرکز اتصالات با عدم تکمیل انجماد کامل همدم، در مقالات متعددی با لایه واسط پایه نیکل گزارش شده است [۸،۷،۶].

اتصال در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه با لایه واسط MBF-30

با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۵) مشخص می‌گردد که زمان ۴۵ دقیقه جهت تکمیل انجماد همدمما در اتصال فولاد ۳۲۱ با لایه واسط MBF-30 از طریق اتصال فاز مایع گذرا کافی نبوده و ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال مشاهده می‌گردد. در این حالت انجماد همدمما نبوده و انجماد در اثر کاهش دما رخ داده است. با اندازه‌گیری پهنای منطقه اتصال (۵۵ میکرومتر) و مقایسه آن با ضخامت اولیه لایه واسط (۵۰ میکرومتر)، مشخص می‌گردد که انحلال لایه میانی و فلز پایه اتفاق افتاده و عرض لایه واسط پس از اتصال زیاد شده است؛ اما عناصر کاهنده نقطه ذوب، زمان کافی برای نفوذ از لایه میانی به فلز پایه را نداشته‌اند.



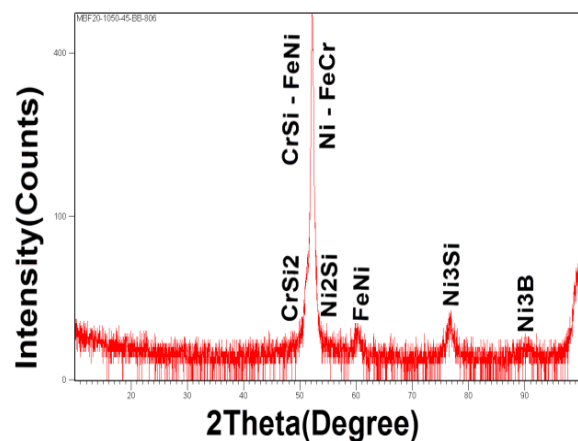
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-30 در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه



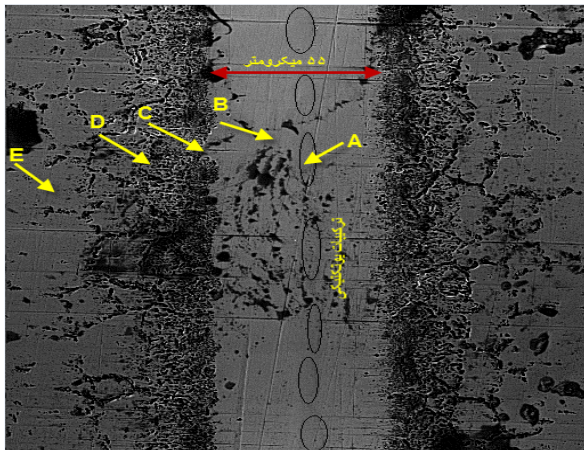
شکل ۶- آنالیز خطی اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-30 در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه

وجود درصد بالای کروم می‌تواند احتمال وجود ترکیبات Cr-C و Cr-B را در نقطه A زیاد گرداند. در صورتی که کاربید کروم به وجود آمده باشد، فقر کروم در آن منطقه، باعث خوردگی بین دانه‌ای می‌شود. این نوع کاربیدها از نوع $M_{23}C_6$ گزارش شده‌اند. با توجه به کم بودن مقدار کربن موجود در فولاد و لایه میانی احتمال وجود فاز کاربیدی کم می‌باشد. نقطه C در منطقه انجماد همدمما قرار دارد. این منطقه شامل محلول جامد نیکل می‌باشد. نقطه D در اطراف خط اتصال در فلز پایه و محل تجمع ذرات رسوبی کروی و سوزنی می‌باشد. حضور کم عنصر سیلیسیم در این نقطه، حضور ترکیب Ni-B را زیاد می‌کند.

جهت بررسی فازهای به وجود آمده در مناطق مختلف اتصال، از سطح شکست نمونه اتصال داده شده که از آزمون استحکام برشی حاصل شده بود، آنالیز با استفاده از روش تفرق سنجی اشعه ایکس گرفته شد. نتایج حاصله در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که پیش بینی گردید ترکیبات یوتکتیک مرکز اتصال و ترکیبات رسوبی مناطق اطراف خط اتصال، ترکیبات بورایدی و سیلیسیدی نیکل و کروم (CrSi_2 , Ni_3Si , Ni_2Si , CrSi) به همراه محلول جامد نیکل (در منطقه انجماد همدمما) می‌باشد.



شکل ۴- آنالیز تفرق سنجی اشعه ایکس اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه



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

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

MBF30 - 1050°C- 45min - point C		MBF30 - 1050°C- 45min - point D	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	58.21	Iron	77.85
Nickel	27.1	Nickel	9.44
Silicon	0.32	Silicon	0.35
Titanium	0	Titanium	0
Chromium	14.37	Chromium	10.94
Manganese	0.01	Manganese	1.42

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

شکل ۷ - آنالیز نقطه ای اتصال فاز مایع گذرا

با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه

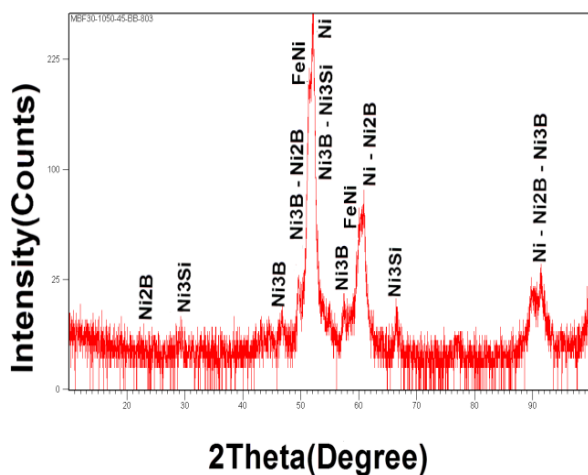
جهت بررسی بیشتر نحوه توزیع عناصر و ترکیبات به وجود آمده در حین فرایند اتصال، از نقاط مختلف اتصال آنالیز نقطه‌ای با سیستم طیف سنجی انرژی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد (شکل ۷). در نقطه

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 می‌شود. با توجه به وجود عناصر سیلیسیم و بور به نسبت مساوی در لایه واسط MBF-30 با MBF-20 به نظر می‌رسد، این ترکیبات مشابه، ترکیبات موجود در اتصال با لایه واسط MBF-20 باشد، با این تفاوت که ممکن است فقط مقدار آن تغییر کند؛ ولی در حالت کلی عدم وجود عناصر آهن و کروم در ترکیب اولیه لایه واسط MBF-30، باعث شده است که ترکیبات یوتکتیک باقی مانده در مرکز اتصال به صورت ناپیوسته بوده و نسبت به شرایط مشابه با لایه MBF-20 پیوستگی کم‌تری داشته باشد. این امر مشخص می‌کند که وسعت منطقه انجماد همدم با لایه واسط MBF-30 بیشتر بوده است. بدین معنی که سرعت انجماد همدم بیشتر بوده، یعنی در زمان مشابه به مقدار بیش‌تری رخ داده است. نفوذ متقابل عناصر آلیاژی بین فلز پایه و لایه واسط، کنترل کننده ریزساختار و نرخ انجماد همدم می‌باشد.

با مشاهده آنالیز خطی گرفته شده از فلز پایه تا مرکز اتصال (شکل ۶) مشخص می‌گردد که نفوذ عنصر آهن به عنوان عنصر اصلی فلز پایه در لایه میانی با توجه به انحلال فلز پایه، صورت پذیرفته است و تا مرکز اتصال ادامه داشته؛ اما مقدار آن در مرکز کم می‌باشد. 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 می‌باشد. کروم بیش‌تر در فلز پایه باقی مانده است و با مقداری نفوذ در خط اتصال به سمت مرکز اتصال مقدار آن بسیار ناچیز می‌شود. 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 داده‌اند. عناصر تیتانیوم و منگنز که مقدار آن‌ها در ترکیب اولیه کم می‌باشد، یک نفوذ مختصر با توزیع یکنواخت‌تر داشته‌اند.

استحکام برشی و ریز سختی سنجی به وضوح تاثیر گذار بوده است.

جهت بررسی فازهای به وجود آمده در مناطق مختلف اتصال، از سطح شکست نمونه اتصال داده شده که از آزمون استحکام برشی و با دستگاه کشش حاصل شده بود، آنالیز با استفاده از روش تفرق سنجی اشعه ایکس گرفته شد. نتایج حاصله در شکل (۸) قابل مشاهده می باشد. همان گونه که پیش بینی گردید، ترکیبات یوتکتیک مرکز اتصال و ترکیبات رسوبی مناطق اطراف خط اتصال ترکیبات بورایدی و سیلیسیدی نیکل (Ni_3B) انجاماد همدم (مانند Ni_2B , Ni_3Si) به همراه محلول جامد نیکل (در منطقه ترکیب $FeNi$ شده است. با توجه به عدم حضور عنصر کروم در ترکیب اولیه لایه واسط، این عنصر نسبت به لایه واسط MBF-20 ترکیباتی در منطقه اتصال ایجاد نکرده و یا ترکیبات ایجاد شده بسیار کم می باشد.



شکل ۸ - آنالیز تفرق سنجی اشعه ایکس اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-30 در دمای $1050^\circ C$ و زمان ۴۵ دقیقه

اتصال در دمای $1050^\circ C$ و زمان ۷۵ دقیقه با لایه واسط MBF-20 و MBF-30

با توجه به اینکه زمان ۴۵ دقیقه جهت نفوذ عناصر در اتصال فاز مایع گذرا کافی نبوده است، زمان افزایش داده شده و نمونه ها به مدت ۷۵ دقیقه در کوره نگهداری

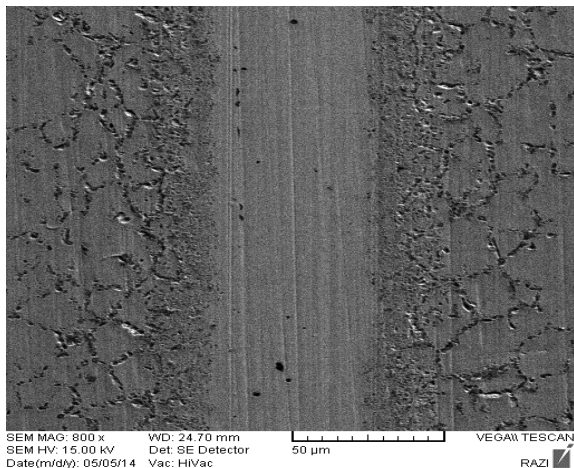
A که منطقه تشکیل ترکیبات یوتکتیک می باشد، وجود سیلیسیوم و نیکل، ممکن است باعث تشکیل ترکیب یوتکتیک Ni-Si شود. اندازه گیری مقدار عنصر بور با میکروسکوپ الکترونی روبشی امکان پذیر نبوده است؛ اما حضور بور در این منطقه و ترکیبات Ni-B با توجه به گزارشات تحقیقات دیگر، تقریباً قطعی می باشد. به عنوان مثال گال و والچ^۸ در اتصال فاز مایع گذرا نیکل خالص با لایه واسط MBF-30 با استفاده از بررسی های میکروسکوپ الکترونی عبوری دریافتند، فاز نیکل بوراید تشکیل شده در مرکز اتصال Ni_3B می باشد [۹]. همچنین ایدوئو و همکارانش^۹ در مورد ریز ساختار مرکز اتصال In738LC با لایه واسط Ni-15Cr-3.5B دریافتند، فاز نیکل بوراید تشکیل شده در مرکز اتصال $M_{23}B_6$ می باشد [۱۰]. نقطه B در منطقه ای است که در آنجا انجاماد همدم 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؛ اما عناصر دیگر نفوذ زیادی نداشته اند. نقطه C در منطقه خط اتصال و جایی که ترکیبات رسوبی کروی 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. در این منطقه ترکیبات رسوبی شکل گرفته اند؛ ولی مقدار آنها کم تر از نواحی نزدیک خط اتصال می باشد. با فاصله گرفتن از خط اتصال مقدار رسوبات کم و کم تر می شود. عنصر اصلی در این منطقه آهن بوده و عناصر نیکل، سیلیسیوم، کروم و منگنز نفوذ به اطراف نداشته اند. منطقه E 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 میکروسکپ الکترونی روبشی، ترکیبات یوتکتیک کم رنگ تر دیده می شوند؛ اما 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 آزمون های

8-Wallach and Gale

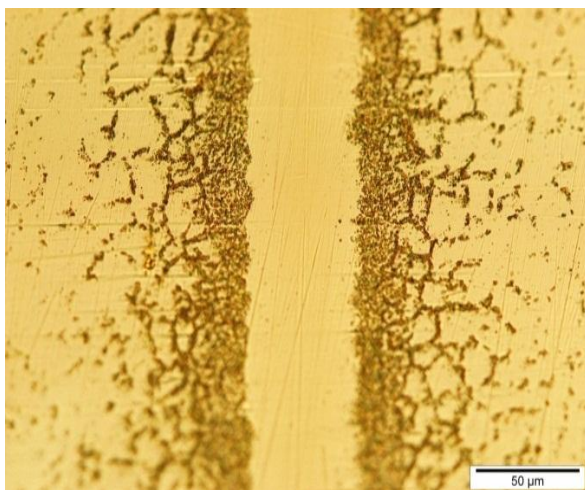
9- Idowu et al

اتصال در دمای 1050°C و زمان ۱۲۰ دقیقه با لایه واسط MBF-20 و MBF-30

جهت بررسی تاثیر افزایش زمان در اتصال فاز مایع گذرا، نمونه‌های دیگری آماده و در کوره خلا در همان دمای 1050°C درجه سانتی گراد ولی زمان بیش‌تر از ۱۲۰ دقیقه اتصال داده شدند. با مشاهده تصاویر گرفته شده (شکل ۱۱ و ۱۲) مشخص می‌گردد که افزایش زمان جهت یکنواخت‌تر شدن توزیع غلظت عناصر آلیاژی در منطقه اتصال بسیار مناسب بوده و باعث کم شدن ترکیبات اطراف خط اتصال شده است.



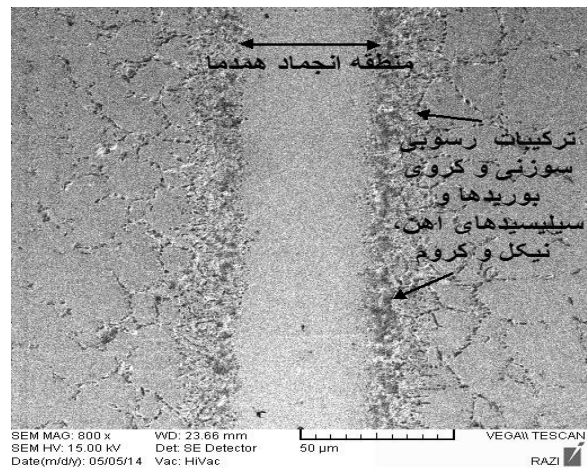
شکل ۱۱- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی اتصال با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۱۲۰ دقیقه



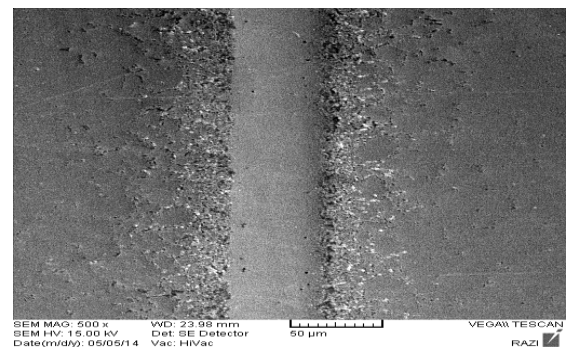
شکل ۱۲- تصویر میکروسکپ نوری اتصال با لایه واسط MBF-30 در دمای 1050°C و زمان ۱۲۰ دقیقه

گردید. با مشاهده تصاویر میکروسکپی نمونه‌ها (شکل ۹ و ۱۰) مشخص گردید که زمان ۷۵ دقیقه جهت ایجاد اتصال مناسب بوده و در طی این زمان عناصر کاهنده نقطه ذوب زمان کافی جهت نفوذ داشته و ترکیبات یوتکتیک در اتصال مشاهده نگردید.

عدم ایجاد ترکیبات در اتصال، مشخص کننده ایجاد یک جبهه انجماد همدمای در مرکز و خط اتصال می‌باشد. در انجماد همدمای به علت عدم پس زده شدن عناصر آلیاژی در شرایط تعادلی، از تشکیل ساختار یوتکتیک جلوگیری می‌شود. انجماد همدمای با نگهداری نمونه‌ها در دمای اتصال و نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب به فلز پایه از فصل مشترک لایه واسط مذاب و فلز پایه آغاز می‌شود و در صورت کافی بودن زمان برای نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در فاز جامد، در خط مرکز اتصال به پایان می‌رسد.



شکل ۹- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی اتصال با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۷۵ دقیقه

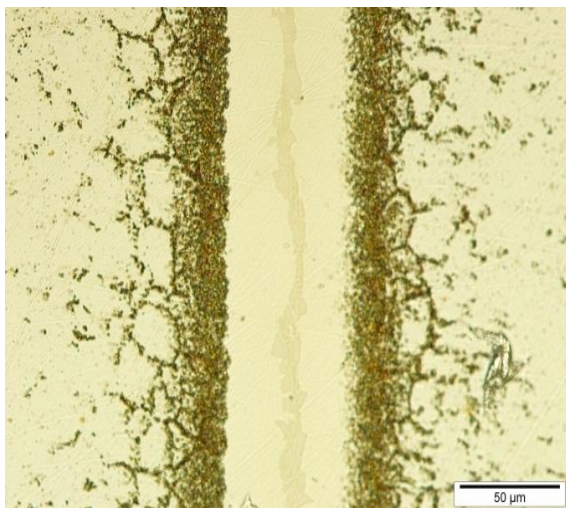


شکل ۱۰- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی اتصال با لایه واسط MBF-30 در دمای 1050°C و زمان ۷۵ دقیقه

اتصال در دمای 1100°C و زمان ۳۰ دقیقه با لایه واسط MBF-20 و MBF-30

جهت بررسی متغیر دما در اتصال فاز مایع گذرا در فولاد ۳۲۱، درجه حرارت تا 1100°C درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. با توجه به نسبت داشتن دما و زمان در اتصال فاز مایع گذرا، زمان کم‌تر و در حد ۳۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. پس از اتصال و مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱۴ و ۱۵) مشخص می‌گردد که زمان ۳۰ دقیقه در این درجه حرارت کم بوده و انجماد همدمای کامل نشده است. ترکیبات یوتکتیک در وسط خط اتصال قابل مشاهده می‌باشد.

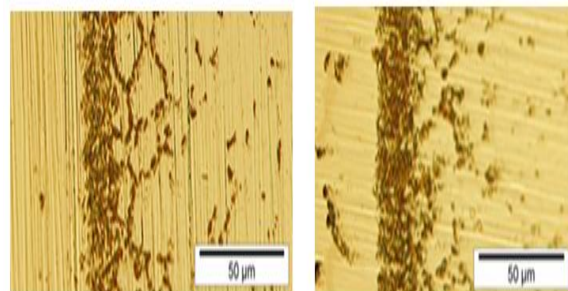
با توجه به عدم وجود عناصر کروم و آهن در ترکیب شیمیایی اولیه قبل از اتصال لایه واسط MBF-30 نسبت به لایه واسط MBF-20، مقدار ترکیبات یوتکتیک باقی مانده در مرکز اتصال با لایه واسط MBF-30 کم‌تر بوده و ترکیبات پراکنده‌تر هستند. این بدان معناست که عدم وجود عناصر آهن و کروم در ترکیب اولیه لایه واسط، احتمال تشکیل ترکیبات را کاهش می‌دهد. همچنین با نفوذ بیش‌تر بور و سیلیسیم، وسعت منطقه انجماد همدمای در اتصال افزایش یافته است.



شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپ نوری اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-20 در دمای 1100°C و زمان ۳۰ دقیقه

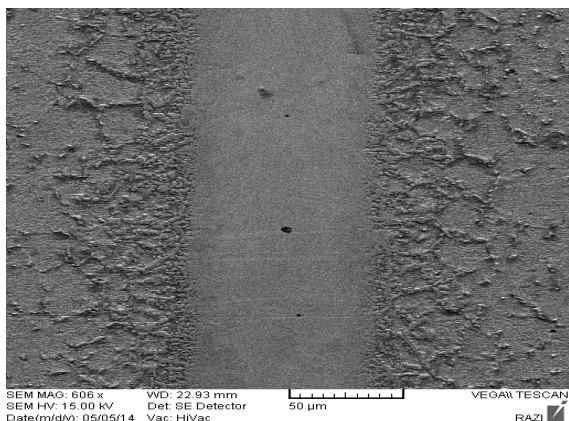
با توجه به اینکه زمان ۷۵ دقیقه برای تکمیل انجماد همدمای کافی بوده است؛ ولی افزایش زمان باعث بیش‌تر شدن نفوذ عناصر بین لایه واسط و فلز پایه و همچنین یکنواخت شدن توزیع غلظت عناصر می‌گردد که در واقع مترادف با همگن سازی ترکیب شیمیایی می‌باشد. همگن شدن عناصر و ترکیبات، باعث بهبود خواص مکانیکی مناسب در اتصال می‌شود. با افزایش زمان، غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در منطقه اتصال کاهش یافته در حالی که غلظت عناصر محلول فلز پایه در این منطقه افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۳) تصویر اتصال در زمان‌های ۴۵ دقیقه و ۱۲۰ دقیقه در دمای مشترک 1050°C درجه سانتی‌گراد با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (ب) مشخص است، با افزایش دما ترکیبات رسوبی اطراف خط اتصال کم‌تر شده است.



شکل ۱۳- تصویر اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C (الف) - زمان ۴۵ دقیقه (ب) - زمان ۱۲۰ دقیقه

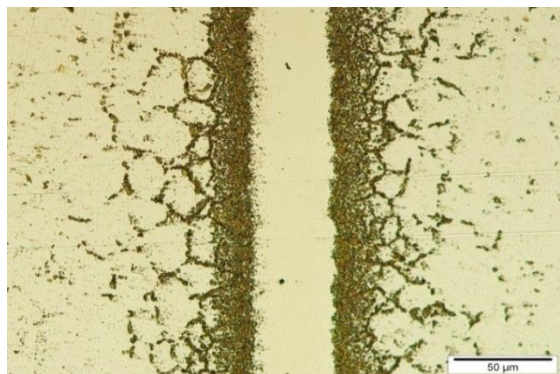
با مقایسه تصاویر میکروسکوپی اتصال با دو لایه واسط MBF-20 و MBF-30 در دما و زمان مشابه، مشاهده می‌گردد که در اتصال با لایه واسط MBF-30، میزان تجمع رسوبات اطراف خط اتصال کم‌تر می‌باشد که علت آن به احتمال زیاد، نبودن عناصر کروم و آهن در ترکیب اولیه لایه واسط MBF-30 نسبت به لایه واسط MBF-20 می‌باشد. نبود این عناصر، باعث کم‌تر شدن میزان ترکیبات بوریدی، سیلیسیدی کروم و آهن در اطراف خط اتصال (رسوبات موجود) می‌شود.



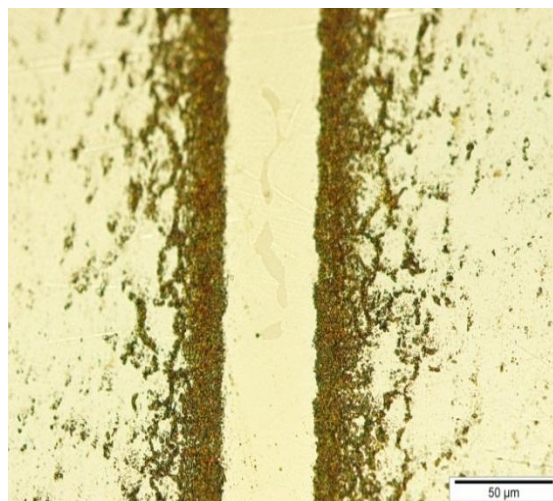
شکل ۱۷- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی اتصال
با لایه واسط MBF-30 در دمای 1100°C و زمان ۴۵ دقیقه

اتصال در دمای 1150°C و زمان ۳۰ دقیقه با لایه واسط MBF-20 و MBF-30

جهت بررسی تاثیر افزایش درجه حرارت و کم‌تر شدن زمان اتصال در فرایند اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱، درجه حرارت به 1150°C درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد و زمان ۳۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱۸ و ۱۹) مشخص می‌کند که اتصال انجام شده مطلوب و انجام همدمها در این زمان و دما، کامل شده است. زمان ۳۰ دقیقه در 1100°C درجه جهت تکمیل انجام همدمها کامل نبوده است؛ اما مشاهده می‌شود که با افزایش دما در همان زمان ۳۰ دقیقه، انجام همدمها کامل شده است. این حالت به خوبی نشان دهنده ارتباط داشتن دما و زمان برای کامل شدن انجام همدمها در اتصال فاز مایع گذرا می‌باشد.



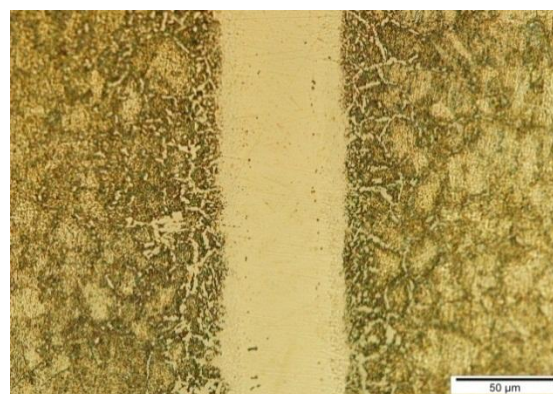
شکل ۱۸- تصویر میکروسکپ نوری اتصال فاز مایع گذرا
با لایه واسط MBF-20 در دمای 1150°C و زمان ۳۰ دقیقه



شکل ۱۵- تصویر میکروسکپ نوری اتصال فاز مایع گذرا
با لایه واسط MBF-30 در دمای 1100°C و زمان ۳۰ دقیقه

اتصال در دمای 1100°C و زمان ۴۵ دقیقه با لایه واسط MBF-30 و MBF-20

با توجه به کم بودن زمان ۳۰ دقیقه جهت اتصال در درجه حرارت 1100°C درجه سانتی گراد، زمان اتصال به ۴۵ دقیقه افزایش می‌یابد. با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱۶ و ۱۷) مشخص می‌گردد که این زمان به عنوان حداقل زمان مورد نیاز در اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱ با درجه حرارت 1100°C درجه سانتی گراد می‌باشد. در این زمان با نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب و سایر عناصر موجود در فلز پایه و لایه واسط، انجام همدمها انجام پذیرفته و ترکیبات مضر در اتصال تشکیل نشده و اتصال در حد مطلوب می‌باشد.



شکل ۱۶- تصویر میکروسکپ نوری اتصال فاز مایع گذرا
با لایه واسط MBF-20 در دمای 1100°C و زمان ۴۵ دقیقه

تکمیل انجماد همدمما مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر می‌باشد [۷]:

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

t_f : زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد همدمما
 D : ضریب نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در فلز پایه جامد

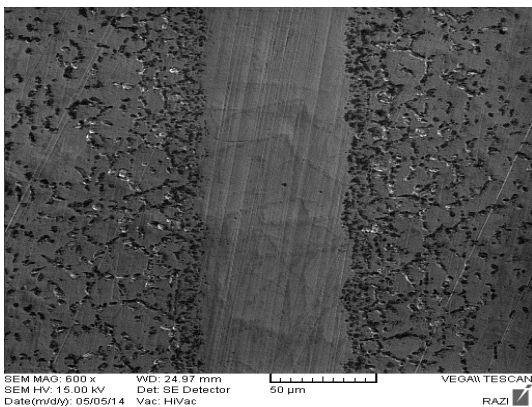
$2h$: عرض حداکثر لایه واسط مذاب در فصل مشترک مذاب/جامد در شرایط تعادلی

γ : یک پارامتر بدون بعد

زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد همدمما، تابعی از قابلیت نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در فلز پایه جامد می‌باشد که تابع دماست [۱۱]. بنابراین، با افزایش دمای اتصال زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد همدمما، کاهش می‌یابد. این تحلیل دقیقاً مطابق با شرایط اتصالات انجام گرفته می‌باشد.

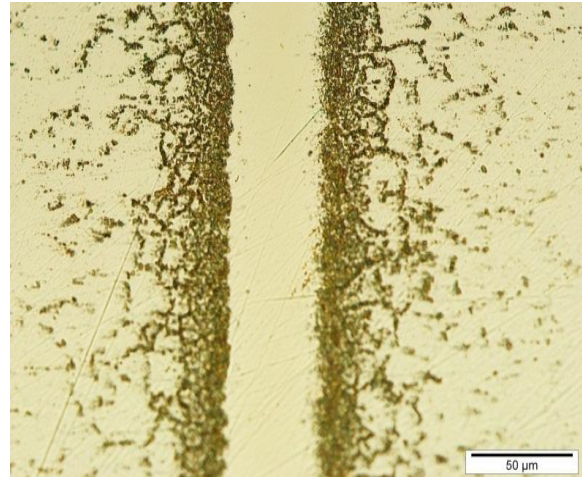
اتصال در دمای 1150°C و زمان ۶۰ دقیقه با لایه واسط MBF-20 و MBF-30

جهت بررسی تاثیر زمان در اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱، زمان نگهداری نمونه‌ها در کوره از ۳۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه افزایش یافت. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها (شکل ۲۰ و ۲۱) مشخص می‌کند که رسوبات و ترکیبات اطراف خط اتصال با افزایش زمان کم‌تر شده و با نفوذ این ترکیبات در اثر گذشت زمان ساختار همگن‌تر و در نتیجه استحکام نیز بالاتر می‌رود.



شکل ۲۰- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی اتصال

با لایه واسط MBF-20 در دمای 1150°C و زمان ۶۰ دقیقه



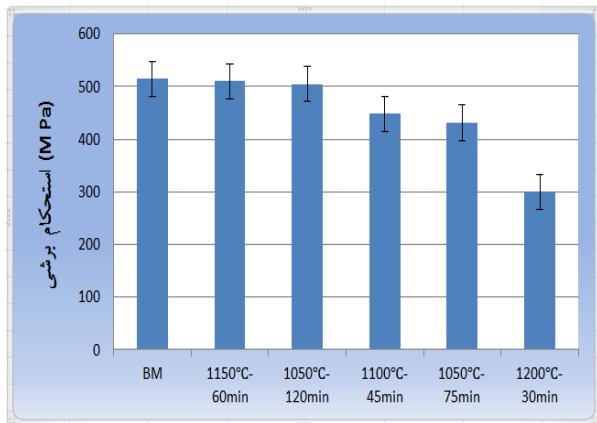
شکل ۱۹- تصویر میکروسکپ نوری اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-30 در دمای 1150°C و زمان ۳۰ دقیقه

در رابطه با ارتباط دما، زمان و غلظت عناصر در اتصال فاز مایع گذرا، توسط محققان مختلف روابطی بیان شده است. حل تحلیلی قانون دوم فیک در مورد نفوذ توسط کرانک، می‌تواند به منظور بررسی نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب از لایه واسط مذاب به فلز پایه حین اتصال، به صورت زیر مورد استفاده قرار بگیرد [۷]:

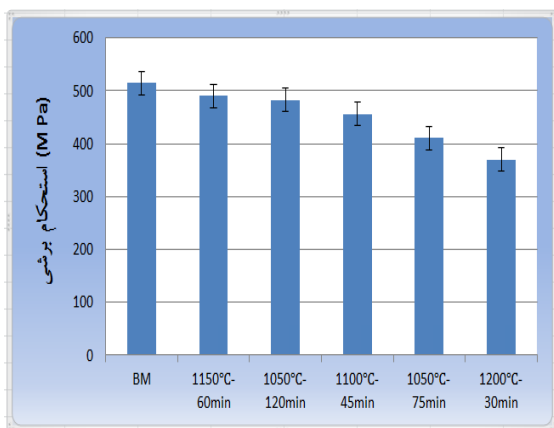
$$C(x,t) = C_m + \frac{1}{2}(C_0 - C_m) \left\{ \operatorname{erf} \frac{w-x}{\sqrt{4Dt}} + \operatorname{erf} \frac{w+x}{\sqrt{4Dt}} \right\} \quad (1)$$

$C(x,t)$: غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب به عنوان تابعی از فاصله از مرکز لایه میانی (x) و زمان (t)
 C_0 : غلظت اولیه عناصر کاهنده نقطه ذوب در لایه واسط
 C_m : غلظت اولیه عناصر کاهنده نقطه ذوب در فلز پایه
 D : ضریب نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در آلیاژ فلز پایه
 رابطه بالا نشان می‌دهد که در زمان ثابت، $C(x)$ ، به‌طور معکوس با D رابطه دارد. ضریب نفوذ با دما رابطه مستقیم دارد به گونه‌ای که افزایش دما، باعث افزایش ضریب نفوذ می‌شود. بنابراین افزایش دما، باعث کاهش غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب می‌شود [۱۱]. انجماد همدمما وقتی کامل می‌شود که غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در لایه میانی اتصال کاهش یابد. اتصالات انجام شده به خوبی شاهد این مطلب می‌باشد که با افزایش دما، می‌توان زمان اتصال را کم‌تر انتخاب نمود.

یکی از روابطی که جهت تخمین زمان مورد نیاز برای

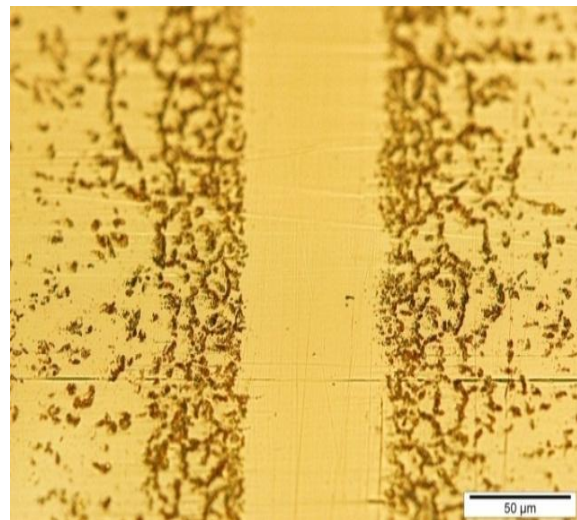


شکل ۲۲- نمودار استحکام برشی اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱ با لایه واسط MBF-30



شکل ۲۳- نمودار استحکام برشی اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱ با لایه واسط MBF-20

نتایج آزمایشات برش نمونه‌های اتصال داده شده با لایه واسط MBF-20 نشان داد (شکل ۲۳) که اتصال در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۶۰ دقیقه و همچنین دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه دارای استحکام بسیار مطلوب و در حد استحکام فلز پایه یعنی فولاد ۳۲۱ می‌باشد (به ترتیب برابر ۹۵ و ۹۴ 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 می‌باشد (به ترتیب برابر ۸۷ و ۸۰ 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 اول هستند. افزایش دما و به خصوص



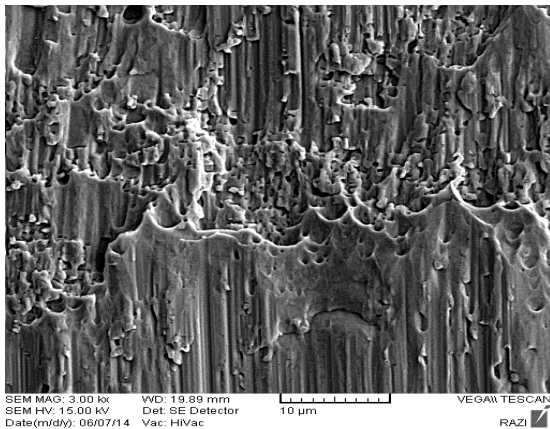
شکل ۲۱- تصویر میکروسکپ نوری اتصال با لایه واسط MBF-30 در دمای ۱۱۵۰ °C و زمان ۶۰ دقیقه

در همگن شدن، نفوذ متقابل عناصر آلیاژی بین فلز پایه و لایه واسط، براساس مکانیزم استحکام بخشی محلول جامد، موجب افزایش استحکام اتصال می‌شود [۱۲].

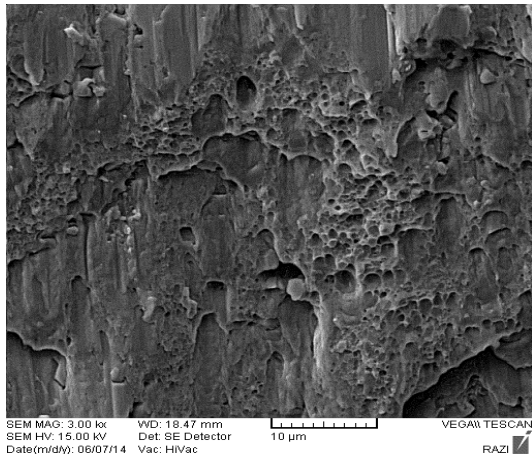
آزمون استحکام برشی

نتایج آزمون برش نشان داد (شکل ۲۲) 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 ضد زنگ آستنیتی ۳۲۱ می‌باشند (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 می‌باشد (به ترتیب برابر ۸۷ و ۸۴ درصد استحکام فلز پایه)؛ اما با توجه به اینکه ترکیبات بین فلزی و رسوبات موجود در منطقه اطراف اتصال آن‌ها بیش‌تر است، دارای استحکام کم‌تری نسبت به دو نمونه اول هستند. افزایش دما و به خصوص زمان با کم‌تر کردن رسوبات و ترکیبات فلزی مناطق اطراف اتصال، باعث افزایش استحکام می‌شود.

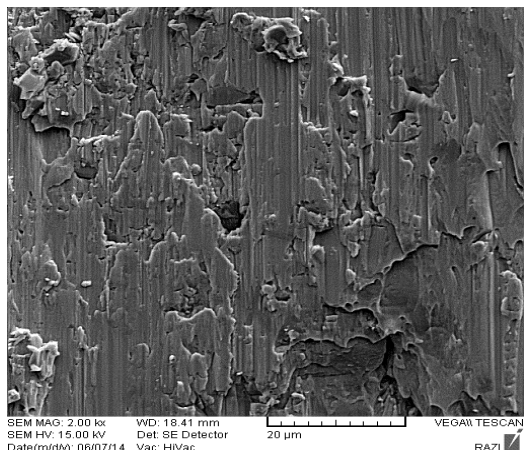
عناصر می‌باشد. با افزایش درجه حرارت و زمان، نفوذ عناصر بیش‌تر می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۴- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از سطح شکست اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-30

(الف) در دمای 1050°C و زمان ۷۵ دقیقه

(ب) در دمای 1150°C و زمان ۶۰ دقیقه

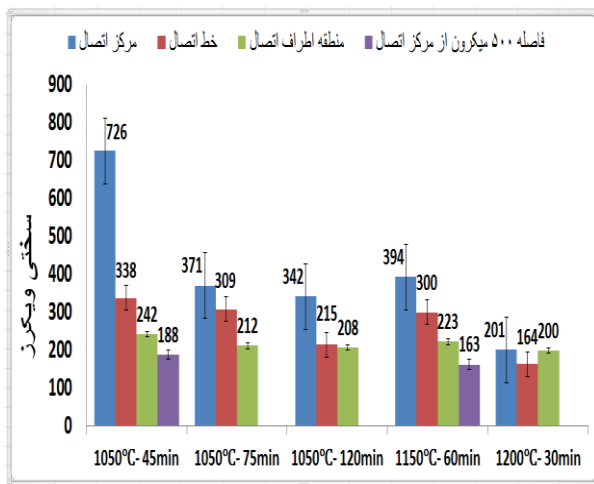
(ج) در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه

زمان با کم‌تر کردن رسوبات و ترکیبات فلزی مناطق اطراف اتصال، باعث افزایش استحکام می‌شود.

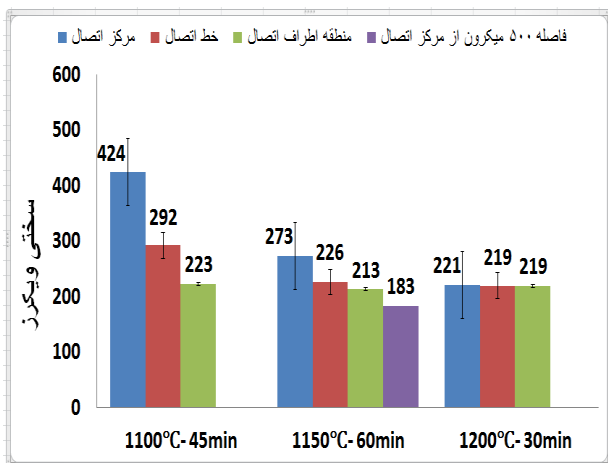
در نمونه‌های اتصال داده شده با لایه واسط MBF-20 نسبت به لایه واسط MBF-30 استحکام برشی کمی کم‌تر می‌باشد. با توجه به اینکه در لایه واسط MBF-20 عنصر کروم و آهن در ترکیب اولیه لایه واسط قبل از اتصال وجود دارد و این عنصر در لایه واسط MBF-30 وجود ندارد، مشخص می‌گردد که وجود این عناصر در لایه واسط، باعث کاهش استحکام شده است. حضور بیش‌تر عناصر آهن و کروم در هنگام انجماد غیر همدم، باعث افزایش تشکیل ترکیبات یوتکتیک می‌شود. ترکیبات یوتکتیک تشکیل شده که عموماً فازهای سخت و شکننده هستند، باعث کاهش استحکام اتصال می‌شوند. همچنین کم بودن درصد این عناصر در محدوده متاثر از نفوذ، باعث کم شدن میزان رسوبات تشکیل شده حین فرایند اتصال در این مناطق و افزایش استحکام می‌شود. نفوذ عناصر آلیاژی در منطقه اتصال، براساس مکانیزم مستحکم شدن محلول جامد، باعث افزایش سختی می‌شود. استحکام بخشی محلول جامد، یکی از اصلی‌ترین مکانیزم‌های استحکام بخشی در این اتصالات می‌باشد. وجود این عناصر در برخی موارد، باعث افزایش استحکام محلول جامد می‌شود؛ اما در این اتصالات، باعث افزایش استحکام محلول جامد در لایه واسط MBF-20 نسبت به لایه واسط MBF-30 نشده است.

مقایسه اتصالات در دمای 1050°C درجه و 75 دقیقه با 1100°C درجه و 45 دقیقه در هر دو لایه واسط، مشخص می‌کند که استحکام در اتصال با دمای بیش‌تر، بالاتر از استحکام اتصال در دمای کم‌تر می‌باشد (با توجه به اینکه در هر دو دما، انجماد همدم 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 می‌شود. با مشاهده استحکام اتصال در دمای 1050°C درجه با زمان‌های 75 و 120 دقیقه در هر دو لایه واسط، مشخص می‌گردد که افزایش زمان اتصال، باعث افزایش استحکام اتصال شده است که علت آن همگن‌تر شدن ساختار و کم‌تر شدن ترکیبات رسوبی در منطقه متاثر از نفوذ با توجه به نفوذ بیش‌تر

تکمیل شدن انجماد همدمها و حضور ترکیبات یوتکتیک بوریدها و سیلیسیدهای نیکل و شاید کروم 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 نمونه‌های دیگر به دلیل عدم حضور ترکیبات یوتکتیک کم‌تر می‌باشد. نتایج ریز سختی سنجی نشان می‌دهد که افزایش دما و زمان اتصال، باعث کاهش سختی و افزایش استحکام شده است.



شکل ۲۵- مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-30



شکل ۲۶- مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط MBF-20

تصاویر میکروسکوپی سطح شکست برخی از نمونه‌های برش خورده در شکل (۲۴) قابل مشاهده می‌باشد. مشاهده تصویر شکست شکل (۲۴- الف) مشخص کننده شکست نرم در برش اتصال انجام شده در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۷۵ دقیقه می‌باشد. در این اتصال ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال وجود نداشته و انجماد همدمها کامل شده بود. وجود دیمپل‌ها که مشخصه شکست نرم می‌باشد، در این سطح شکست قابل مشاهده می‌باشد [۱۳]. سطوح فنجانی که ناشی از تغییر شکل پلاستیک می‌باشد، در تصاویر مشخص است. شکست در دمای اتصال ۱۱۵۰ درجه و ۶۰ دقیقه با توجه به شکل (۲۴- ب) از نوع شکست نرم هستند. دیمپل‌ها به همراه سطوح فیبری ناشی از تغییر فرم پلاستیک در تصویر شکست قابل مشاهده می‌باشد. به هم پیوستن ریز ترک‌ها منجر به تشکیل مناطق فیبری شکل می‌گردد. در شکل (۲۴- ج) موارد شکست ترد و نرم با هم قابل مشاهده می‌باشد؛ ولی با توجه به استحکام کم‌تر این اتصال و وجود ترکیبات ترد در اتصال، به نظر می‌رسد سطوح کلیواژی و مکانیزم شکست ترد، در شکست علت گسیختگی اتصال باشد. شکست کلیواژ هنگامی تشکیل و گسترش می‌یابد که ترک‌های میکروسکوپی بدون لغزش‌های محسوس اشاعه پیدا کنند. در چنین حالتی بزرگ‌ترین تنش در رأس ترک بایستی بر تنش شکست غلبه کند [۱۲].

آزمون ریز سختی سنجی

نتایج آزمون‌های ریز سختی سنجی برخی از نمونه‌های اتصال داده شده در نمودارهای شکل (۲۵ و ۲۶) قابل مشاهده می‌باشد. هر ستون از سمت چپ برای هر اتصال که زمان و دما در زیر آن نوشته شده است، به ترتیب برابر ریز سختی سنجی از مرکز اتصال، منطقه تحت تاثیر اتصال و فاصله ۵۰۰ میکرون از مرکز اتصال (برای برخی نمونه‌ها) می‌باشد (شکل ۲۷).

همان‌گونه که قابل پیش بینی بود، سختی از مرکز اتصال به سمت فلز پایه کم‌تر می‌شود (شکل ۲۵ و ۲۶). علت آن حضور زیادتر عناصر نیکل، بور و سیلیسیم در مرکز اتصال می‌باشد که باعث سختی بیش‌تر این منطقه می‌گردد. در نمونه اتصال داده شده در درجه حرارت ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۴۵ دقیقه به علت عدم

- با افزایش زمان از ۳۰ به ۴۵ و ۷۵ دقیقه، دمای تکمیل انجماد همدمما برای هر دو لایه واسط MBF-20 و MBF-30 کاهش می‌یابد.

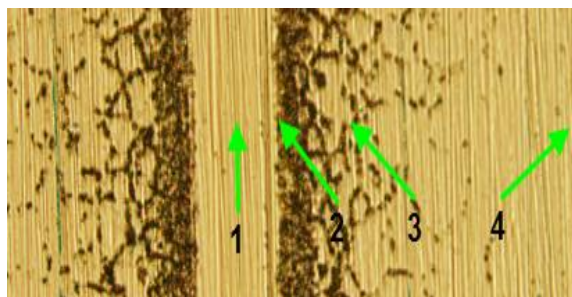
- در اتصالات انجام شده با شرایط ۱۱۵۰ درجه و ۶۰ دقیقه و همچنین ۱۰۵۰ درجه و ۱۲۰ دقیقه، بیشترین استحکام برشی برای هر دو لایه واسط مشاهده گردید که مقدار آن برای لایه واسط MBF-30 معادل ۹۹ و ۹۸ درصد فلز پایه و برای لایه واسط MBF-20 معادل ۹۵ و ۹۴ درصد فلز پایه تعیین گردید.

- با افزایش دما و زمان برای هر دو لایه واسط MBF-20 و MBF-30، ساختار همگن‌تر و با نفوذ عناصر، رسوبات منطقه متاثر از نفوذ کم‌تر و همگن‌تر شده و استحکام اتصال بیش‌تر گردید.

- ترکیبات یوتکتیک، باعث افزایش سختی اتصال در مناطق دارای این ترکیبات در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۳۰ دقیقه در هر دو لایه واسط استفاده شده MBF-20 و MBF-30 می‌شود.

- شکست در اتصالات با استحکام بالا که در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۱۲۰ دقیقه و دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه بوده است، برای هر دو لایه واسط MBF-20 و MBF-30 از نوع شکست نرم می‌باشد.

- وجود کروم و آهن در ترکیب اولیه لایه واسط MBF-20 نسبت به لایه واسط MBF-30 باعث بیش‌تر شدن ترکیبات یوتکتیکی و رسوبات اطراف خط اتصال و در نتیجه کاهش استحکام و افزایش سختی اتصال شده است.



شکل ۲۷- مناطق سختی سنجی شده
(۱) مرکز اتصال، (۲) خط اتصال، (۳) منطقه تحت تاثیر اتصال (۴) فاصله حدودی ۵۰۰ میکرومتر از مرکز اتصال

نتیجه گیری

- حداقل زمان لازم جهت تکمیل انجماد همدمما در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب برابر ۷۵، ۴۵ و ۳۰ دقیقه برای هر دو لایه واسط MBF-20 و MBF-30 می‌باشد.

- در صورت عدم تکمیل انجماد همدمما، ترکیبات بوریدی و سیلیسیدی نیکل، کروم و آهن در مرکز خط اتصال به‌وجود می‌آید.

- در شرایط مشابه دما و زمان، ترکیبات یوتکتیک تشکیل شده در مرکز اتصال در لایه واسط MBF-30 کم‌تر و ناپیوسته‌تر نسبت به لایه واسط MBF-20 می‌باشد.

- با افزایش دما از ۱۰۵۰ به ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان تکمیل انجماد همدمما برای هر دو لایه واسط MBF-20 و MBF-30 کاهش یافته و ترکیبات رسوبی منطقه متاثر از نفوذ کم‌تر و پراکنده‌تر می‌شود.

References:

1- M. Mazar Atabaki, "Partial transient liquid phase diffusion bonding of Zircaloy-4 to stabilized austenitic stainless steel 321 using active titanium filler metal", J.Manuf Sci Eng;133(5):99-110,2011.

2-M. Mazar Atabaki, M.E. Bajgholi, E.H. Dehkordi "Partial transient liquid phase diffusion bonding of zirconium alloy (Zr-2.5Nb) to stainless steel 321", Materials and

Design 42,172-183,2012.

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 106 , 109-11,2007.

4 -E.A. Brandes , G.B. Brook , "Smithells metal reference book" 7th edu,11-7-11-

485, Oxford, UK, Butterworth, Heinemann, 1992.

5- P. Villars, A Prince and H. Okamoto: "Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams", ASM International, Materials Park, OH, USA, 5508-5513, 1995.

6- J.S.C. Jang and H.P. Shih: "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, 2003.

7- R. Bakhtiari, A. Ekrami. "The effect of gap size on the microstructure and mechanical properties of the transient liquid phase bonded FSX-414 superalloy". Mat 40, 130-137, 2012.

8- M. Pouranvari, A. Ekrami, A.H. Kokabi "Microstructure-properties relationship of TLP-bonded GTD-111 nickel-base superalloy". Mater Sci Eng A; 490:229-34, 2008.

9- W.F. Gale and E.R. Wallach: "Wettability of nickel alloys by boron

containing brazes", Welding Research, 76s-79s, 1991.

10- O.A. Idowu, N.L. Richards, M.C. Chaturvedi, Mater. Sci. Eng. A 397, 98-112, 2005.

11- R. Bakhtiari, A. Ekrami, Khan, T.I. "The effect of TLP bonding temperature on microstructural and mechanical property of joints made using FSX-414 superalloy", Mat A546, 291-300, 2012.

12- R. Bakhtiari, "The effect of TLP bonding temperature on microstructural and mechanical property of joints made using FSX-414 superalloy". Ph.D Thesis on Materials Engineering. Sharif University. (In Persian), 2012.

۱۳- م. رحمانی، م. شمعانیان، م. کسیری " بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی جوشهای نامشابه فولاد زنگ نزن سوپر دو فازی UNS32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304L "مجله مواد نوین مروت، جلد ۳، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۱.

