

بررسی فرایند اتصال فاز مایع گذرا (TLP) برای فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI321 با استفاده از لایه واسط تجاری MBF-20

محمد علی میثاقی^{۱*}، رضا بختیاری^{۲،۳}

- ۱- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
- ۲- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

*ma.misaghi@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۳)

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 توربین ها کاربرد دارند، در این پژوهش، اتصال متجانس این فولاد از طریق فرایند اتصال فاز مایع گذرا (TLP) با لایه واسط با نام تجاری MBF-20 مورد بررسی قرار گرفت. فرایند اتصال در دماهای ۱۱۰۰، ۱۰۵۰، 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 میکروسکوپ SEM صورت گرفت. آنالیز فازی با استفاده از روش XRD 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 انجام هم دما در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۷۵، ۴۵ و ۳۰ دقیقه بدست آمد. در حالت انجام هم دمای ناقص، در مرکز اتصال و مناطق متأثر از نفوذ، ترکیبات Ni-B، Ni-Si، Cr-B و 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 ۹۵ و ۹۴ در صد استحکام برشی فلز پایه حاصل گردید.

واژه های کلیدی:

فرایند اتصال TLP، فولاد AISI 321، لایه واسط MBF-20، خواص مکانیکی، بررسی ریزساختاری.

۱- مقدمه

با توجه به اینکه بیشتر قطعات صنعتی به صورت سازه های ترکیبی با اتصالات مختلف می باشند، به دست آوردن یک اتصال با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب بدون هیچ گونه عیبی، امری ضروری در صنعت می باشد. انواع مختلف

توربین ها و در قسمت مربوطه با روش لحیم کاری گرم انجام می شود که استحکام خیلی بالایی ندارد، تغییر دادن اتصال این فولاد با برخی روشهای جوشکاری، با مشکلات خاص خود همراه بوده است (مانند جوش لیزر که عمق نفوذ مناسب را نداشته است)، بنابراین سعی گردید که اتصال این قطعات با روش TLP انجام شود. این پژوهش با هدف بررسی متغیرهای دما و زمان در اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 321 از طریق اتصال فاز مایع گذرا (TLP) با لایه واسط با نام تجاری MBF-20 جهت به دست آوردن بهترین دما و زمان در اتصال TLP این فولاد برای به دست آوردن بهترین شرایط اتصال و استفاده آن در صنعت، انجام گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

فلز پایه اتصال داده شده از فولاد زنگ نزن آستنیتی با کد AISI321 می باشد. لایه واسط استفاده شده، با نام تجاری MBF-20 (AWS BNi-2) 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 [۵]. نمونه های فلز پایه جهت قرار گرفتن در کوره های آزمایشگاهی و قرار گرفتن در قالبها و فیکسچرهای آزمایشگاهی به ابعاد $10 \times 10 \times 4$ 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 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.

فرایندهای اتصال و جوشکاری وجود دارد که هر یک کاربرد خاص خود ومزایا و معایب مربوط به خود را دارا می باشد. به کارگیری بهترین و جدیدترین روش اتصال یک موفقیت اساسی در تولید قطعات می باشد. فرایند اتصال با فاز مایع گذرا (TLP) یکی از روشهای اتصال با قابلیت های بالا و منحصر به فرد خود می باشد که می تواند در مواردی که اتصال و جوشکاری با روشهای دیگر امکان پذیر نبوده و یا مشکلات خاص خود را دارا می باشد، 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 [۱].

در رابطه با اتصال فاز مایع گذرا فولاد ۳۲۱ مقالات زیادی موجود نمی باشد و در رابطه با اتصال متجانس این فولاد تحقیقاتی صورت نگرفته است. در این رابطه مزار اتابکی به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ به آلیاژ زیر کونیوم Zircaloy-4 با روش فاز مایع گذرا بوسیله یک لایه واسط پایه تیتانیوم پرداخته است [۲] که ارتباط زیادی با اتصال متجانس فولاد ۳۲۱ با لایه MBF-20 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 بوسیله یک لایه واسط پایه تیتانیوم و دو لایه واسط پایه زیرکونیوم پرداخته است [۳] 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 TLP می باشد، محمد آرفین به بررسی اتصال فولاد ۳۲۱ از طریق اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط BNi-2 پرداخته است. این مقاله بیشتر جنبه مدلسازی برای تصحیح برخی روابط، داشته و ریز ساختاری با تصاویر مربوطه در آن وجود ندارد. همچنین بر روی خواص مکانیکی اتصال کاری صورت نگرفته است [۴].

یکی از کاربردهای فولاد AISI 321 در ساخت برخی از قطعات توربینهای نیروگاهی می باشد که در همین رابطه نیاز به اتصال متجانس این فولاد می باشد. در حال حاضر اتصال این فولاد در

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلز پایه و لایه 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-20	3	0.06				4.5	7	bal	3.2		

نمونه های اتصال داده شده، ابتدا بریده و پس از صاف کردن و پولیش با سمباده های مختلف از نمره ۸۰ الی ۲۰۰۰ و خمیر الماسه 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 شده و تصویر برداری گردید.

نمونه های برش خورده و پولیش و اچ شده جهت بررسی بیشتر با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مشاهده قرار گرفته و آنالیز خطی و نقطه ای از محل های مختلف اتصال و اطراف اتصال گرفته شد. میکروسکوپ مورد استفاده با مارک TESCAN و مدل VEGA می باشد. نمونه هایی که از جهت اتصال و تشکیل انجماد همدمای دارای شرایط مناسب بودند و همچنین نمونه هایی که دارای ابهامات بودند جهت تعیین استحکام مورد آزمون برش قرار گرفتند. جهت 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 گردید و بیشترین نیروی برشی به همراه افزایش طول نمونه ها تعیین گردید. دستگاه کشش مورد استفاده جهت آزمون استحکام برشی Santam Machine (STM) ۱۵ تنی و با سرعت کرنش ۱ mm/min می باشد. نمونه هایی 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 گرفت. آزمون ریزسختی سنجی باروش سختی سنجی

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 شد و پس از اتصال مورد بررسی قرار گرفت. روند انجام آزمایشها با دما و زمانهای تعیین شده در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): دما و زمانهای انتخاب شده جهت انجام اتصال

نوع لایه واسط	درجه حرارت (سانتی گراد)	زمان (دقیقه)				
		120	75	60	45	30
MBF-20	1050					
	1100					
	1150					
	1200					

جدول (۳): آنالیز شیمیایی محلولهای اچ استفاده شده

آنالیز شیمیایی				نام محلول اچ
Water	Hcl	Cuso4	ترکیب شیمیایی	ماربل
۲۰ سی	۲۰ سی	۴ گرم	مقدار	
Water	KOH	K3Fe(CN)6	ترکیب شیمیایی	مورا کامی
۱۰۰ میلی لیتر	۱۰ گرم	۱۰ گرم	مقدار	

سانتی گراد می باشد، احتمال وجود این ترکیبات در اتصالات ایجاد شده با توجه به درجه حرارت اتصال وجود دارد [۶]. 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 ال دما و زمان جهت نفوذ به صورت ترکیبات یوتکتیک پس از اتمام انجماد غیر هم دما، باعث کاهش استحکام اتصال می گردد. بوریدها 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 فاز سه تایی به صورت $B_{33}Cr_{33}Fe_{34}$, $B_{33}Cr_{13}Fe_{54}$, $B_{50}Cr_{20}Fe_{30}$, $B_{50}Cr_{35}Fe_{15}$ و $B_{38}Cr_{55}Fe_7$ یافت می شود، بنابراین

شکل گیری این مراحل غیر منتظره نیست [۷].

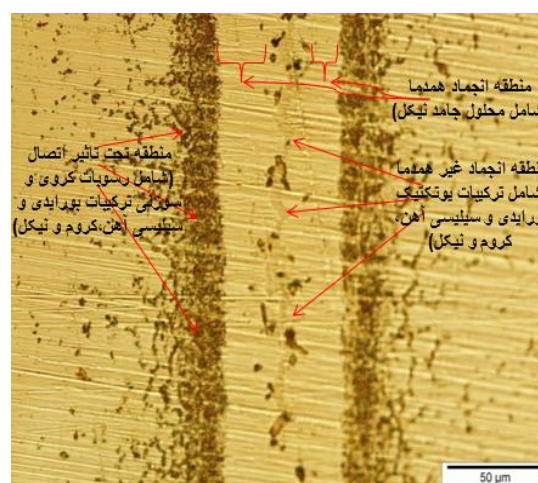
با بررسی میزان تغییرات عناصر در آنالیز خطی (شکل ۲) مشاهده می گردد که توزیع آهن در منطقه اتصال یکنواخت نبوده و مقدار کمی آهن از فلز پایه در لایه واسط نفوذ کرده است که علت آن انحلال فلز پایه در لایه واسط می باشد و مقدار آهن در لایه واسط و مرکز اتصال کم می باشد. عنصر نیکل نیز با مقدار زیاد در لایه واسط باقی مانده و مقدار جزئی نفوذ داشته است. توزیع کروم کمی یکنواخت تر از دو عنصر دیگر می باشد و هم در لایه واسط و هم در فلز پایه کروم دیده می شود ولی مقدار آن در فلز پایه بیشتر می باشد. عنصر سیلیسیم به عنوان یکی از عناصر کاهنده نقطه ذوب بیشتر در لایه 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 می باشد. عنصر تیتانیوم که عنصر تثبیت کننده در فولاد جهت جلوگیری از خوردگی فلز می باشد

ویکرز با دستگاه مدل MVK-H21 با نیروی ۵۰gf و استاندارد E-92-82 (Reattroved-1987) انجام پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اتصال در دمای $1050^{\circ}C$ و زمان ۴۵ دقیقه

با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱) مشخص می گردد که انجماد هم دما کامل نشده و ترکیبات یوتکتیکی در وسط خط اتصال قابل مشاهده می باشد. این ترکیبات یوتکتیکی که شامل ترکیبات فلزی و بین دانه ای می باشد و ترکیبات ایجاد شده عناصر فلز پایه و لایه واسط هستند باعث می شود که استحکام اتصال ایجاد شده در حد استحکام نهایی مطلوب نباشد. با اندازه گیری منطقه اتصال (پهنای لایه واسط) مشخص می گردد که این منطقه با توجه به ضخامت اولیه لایه واسط (۵۰ میکرومتر)، افزایش یافته است (۶۰ میکرومتر)، که علت آن انحلال فلز پایه می باشد. نیروی محرکه این مرحله عدم تعادل ترمودینامیکی فلز پایه و لایه واسط مذاب در دمای اتصال می باشد.



شکل (۱): تصویر میکروسکوپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای $1050^{\circ}C$ و زمان ۴۵ دقیقه

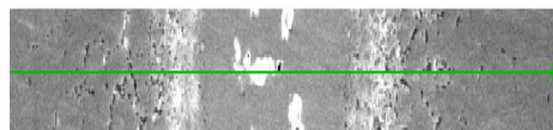
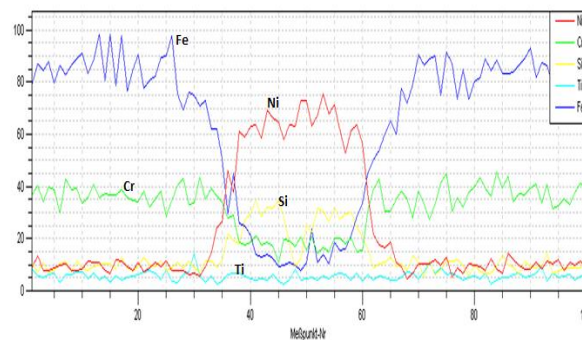
با توجه به نمودارهای فازی دوتایی عناصر آهن، نیکل، بور، کروم و سیلیسیم و مشاهده دمای یوتکتیک این عناصر که به صورت $B-Cr$ $1620^{\circ}C$ درجه سانتی گراد، $B-Fe$ $1180^{\circ}C$ درجه سانتی گراد، $Ni-B$ $1193^{\circ}C$ درجه سانتی گراد، $Ni-Si$ $1152^{\circ}C$ درجه

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 D		MBF20 - 1050°C- 45min - point C	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	73.91	Iron	8.42
Nickel	10.6	Nickel	80.03
Silicon	0.37	Silicon	5.15
Titanium	0	Titanium	0.07
Chromium	15.11	Chromium	6.33

شکل (۳): آنالیز نقطه ای اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه

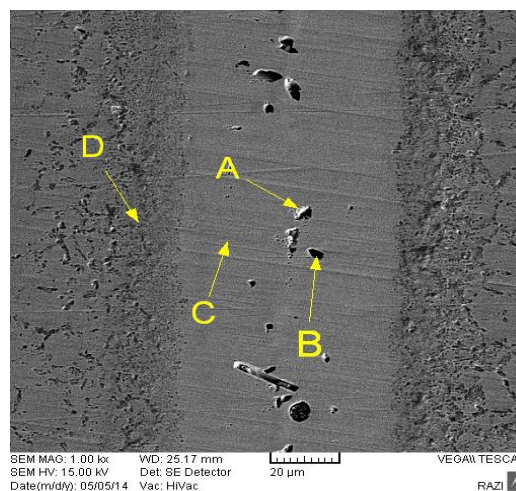
با توجه به نتایج آنالیز گرفته شده از نقاط مختلف اتصال مشاهده می گردد که مقداری نفوذ عناصر از فلز پایه به لایه اتصال وجود داشته است. در مرکز اتصال نیز با توجه به کم بودن دما و زمان جهت تکمیل انجماد همدمای و نفوذ برخی عناصر، مناطق غنی از کروم به همراه بوریدها و سیلیسیدهای مختلف وجود دارد. این مناطق در واقع می توانند ترکیبات بوراید و سیلیسید کروم باشند، البته درصد بالای نیکل نشان می دهد که در کل این ترکیبات بوراید و سیلیسید کروم و نیکل باشند. در نقاط A و B که در وسط اتصال بوده و آنالیز ترکیبات یوتکتیک موجود در منطقه انجماد غیر همدمای و نواحی کناره این ترکیبات می باشند مقداری نفوذ آهن از فلز پایه و مقداری نفوذ نیکل به فلز پایه حاصل شده است که علت آن همان گونه که ذکر شد عدم تعادل ترمودینامیکی ترکیب شیمیایی بین لایه واسط مذاب و فلز پایه جامد می باشد. 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 SEM به صورت دقیق مشخص نمی گردد و می بایست برای بررسی بیشتر با میکروسکپ TEM و یا روشهای آنالیز دیگر مانند XRD استفاده

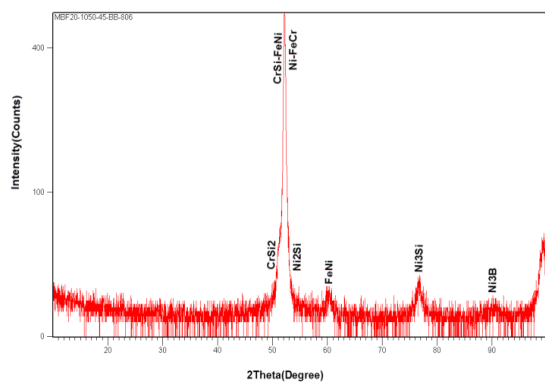
و مقدار آن بسیار کم می باشد، به صورت یکنواخت تری در لایه واسط نفوذ کرده است.



شکل (۲): آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای ۱۰۵۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه

جهت بررسی بیشتر نحوه نفوذ عناصر و ترکیبات بوجود آمده از مناطق مختلف اتصال آنالیز نقطه ای با استفاده از سیستم EDS میکروسکپ SEM گرفته شد (شکل ۳).

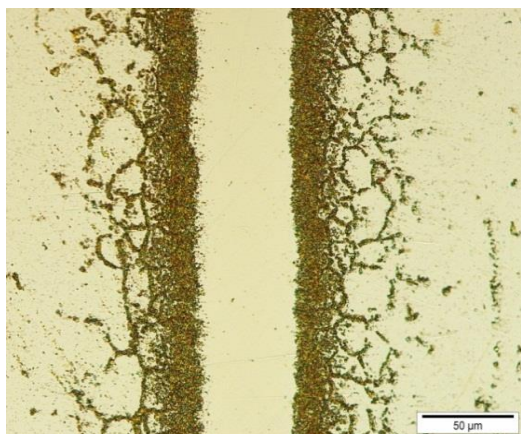




شکل (۴): آنالیز XRD اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۴۵ دقیقه

۲-۳- اتصال در دمای 1050°C و زمان ۷۵ دقیقه

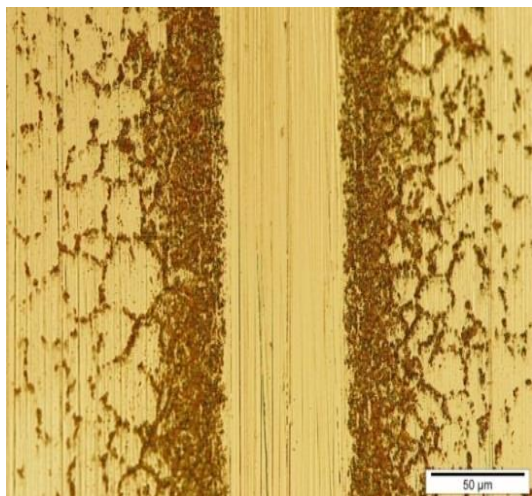
با توجه به اینکه زمان ۴۵ دقیقه جهت نفوذ عناصر در اتصال TLP کافی نبود، زمان افزایش داده شده و نمونه ها به مدت ۷۵ دقیقه در کوره خلا نگهداری گردید. با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۵ و ۶) این شرایط اتصال مشخص گردید که زمان ۷۵ دقیقه جهت ایجاد اتصال مناسب بوده و در طی این زمان عناصر کاهنده نقطه ذوب زمان کافی جهت نفوذ داشته و ترکیبات یوتکتیک در اتصال مشاهده نگردید. عدم ایجاد ترکیبات در اتصال، مشخص کننده ایجاد یک جبهه انجماد همدم در مرکز و خط اتصال می باشد.



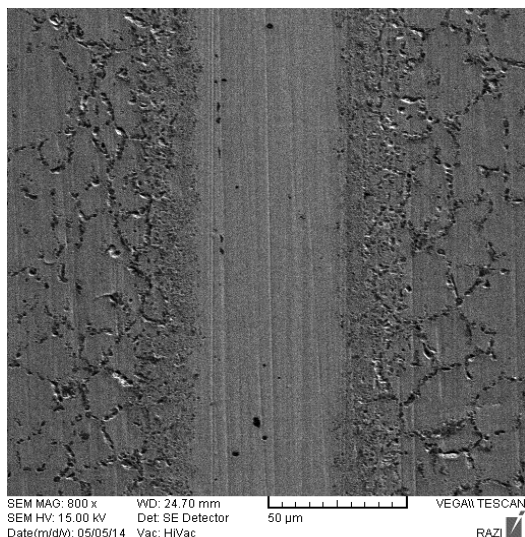
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۷۵ دقیقه

نمود) باعث تشکیل ترکیبات Ni-Si و Ni-B و Fe-B و Cr-B می گردد. وجود این ترکیبات در مرکز اتصالات با عدم تکمیل انجماد کامل همدم، در مقالات متعددی با لایه واسط پایه نیکل گزارش شده است [۸-۱۰]. با توجه به نمودار فازی Ni-Si مشخص می گردد که با مقدار سیلیسیم بیشتر از ۸ درصد، ترکیبی با فرمول Ni_3Si بوجود می آید. با توجه به مقدار بیشتر از ۸ درصد سیلیسیم در نقطه B وجود ترکیب Ni_3Si قابل پیش بینی می باشد. این ترکیب در آنالیز XRD اتصال فولاد AISI 304 که ترکیب آن نزدیک به فولاد AISI 321 می باشد باروش فازمایع گذرا و با لایه واسط MBF-20 گزارش شده است [۸]. وجود درصد بالای کروم می تواند احتمال وجود ترکیباتی مانند Cr-B و Cr-C را در نقطه A زیاد گرداند. در صورتی که کاربرد کروم بوجود آمده باشد، فقر کروم در آن منطقه باعث خوردگی بین دانه ای می باشد. این نوع کاربردها از نوع M_{23}C_6 گزارش شده اند. با توجه به کم بودن مقدار کربن موجود در فولاد و لایه میانی احتمال وجود فاز کاربیدی کم می باشد. نقطه C در منطقه انجماد همدم قرار دارد. این منطقه شامل محلول جامد نیکل می باشد. نقطه D در اطراف خط اتصال در فلز پایه و محل تجمع ذرات رسوبی کروی و سوزنی می باشد. حضور کم عنصر سیلیسیم در این نقطه، حضور ترکیب Ni-B را زیاد می کند. جهت مشاهده فازهای ایجاد شده در مناطق مختلف اتصال از سطح شکست اتصال (که در آزمون استحکام برشی نمونه ها حاصل شده است) آنالیز با روش XRD گرفته شد (شکل ۴). همانگونه که قابل پیش بینی بود ترکیبات یوتکتیک مرکز اتصال و ترکیبات رسوبی مناطق اطراف خط اتصال، ترکیبات بورایدی و سیلیسیدی نیکل و کروم (Ni_3B , Ni_3Si , Ni_2Si , CrSi , CrSi_2) به همراه محلول جامد نیکل (در منطقه انجماد هم دم) می باشد.

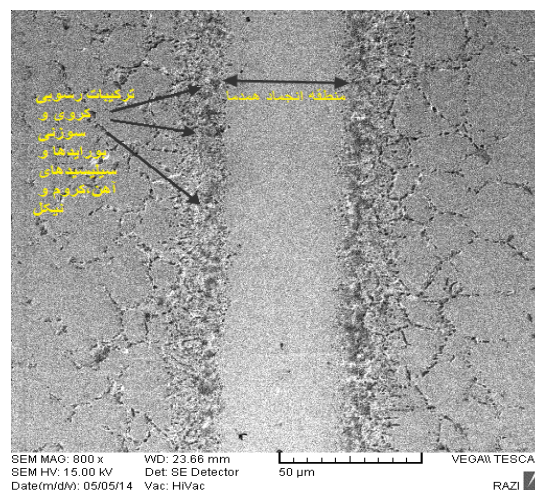
شیمیایی می باشد. همگن شدن عناصر و ترکیبات، باعث افزایش خواص مکانیکی مناسب در اتصال می شود. با افزایش زمان غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در منطقه اتصال کاهش یافته در حالیکه غلظت عناصر محلول فلز پایه در این منطقه افزایش می یابد.



شکل (۷): تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۱۲۰ دقیقه



شکل (۸): تصویر میکروسکپ SEM اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۱۲۰ دقیقه



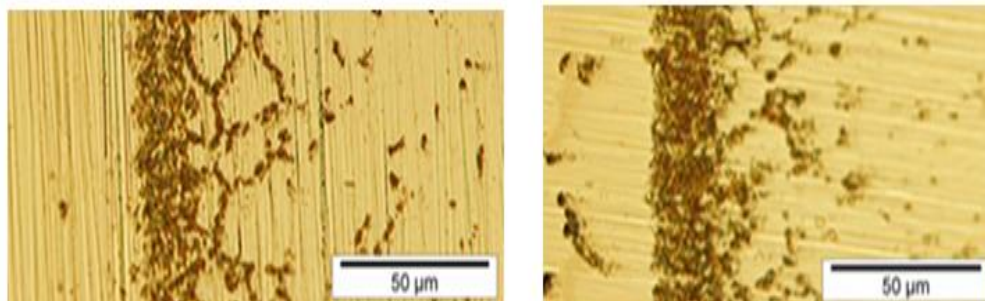
شکل (۶): تصویر میکروسکپ SEM اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1050°C و زمان ۷۵ دقیقه

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 خط مرکز اتصال به پایان می رسد.

۳-۳- اتصال در دمای 1050°C و زمان ۱۲۰ دقیقه

جهت بررسی تاثیر افزایش زمان در اتصال TLP نمونه های دیگری آماده و در کوره خلا در همان دمای 1050°C درجه سانتی گراد ولی زمان بیشتر ۱۲۰ دقیقه اتصال داده شدند. با مشاهده تصاویر میکروسکوپی تهیه شده (شکل ۷ و ۸) مشخص می گردد که افزایش زمان جهت یکنواخت تر شدن توزیع غلظت عناصر آلیاژی در منطقه اتصال ایجاد شده طی فرایند اتصال بسیار مناسب بوده و باعث کم شدن ترکیبات اطراف خط اتصال شده است.

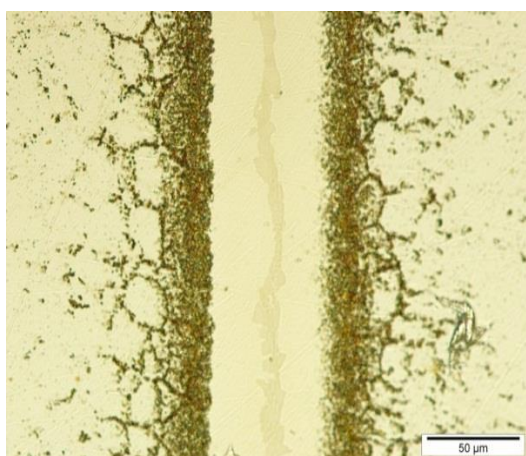
با توجه به اینکه زمان ۷۵ دقیقه برای تکمیل انجماد هم دما کافی بوده است، ولی افزایش زمان نگهداری باعث افزایش نفوذ عناصر بین لایه واسط و فلز پایه و یکنواخت شدن توزیع غلظت عناصر می گردد که در واقع مترادف با همگن سازی ترکیب



(ب)

(الف)

شکل (۹): تصویر اتصال TLP فولاد AISI 321 در دمای 1050°C : (الف): زمان ۴۵ دقیقه و (ب): زمان ۱۲۰ دقیقه



شکل (۱۰): تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1100°C و زمان ۳۰ دقیقه

با توجه به آنالیز مرکز اتصال (نقطه A) و مشاهده مقدار بالای عناصر نیکل و سیلیسیم در این نقطه که ترکیبات یوتکتیک در همین محل تشکیل شده اند، احتمال تشکیل ترکیب Ni-Si زیاد می باشد.

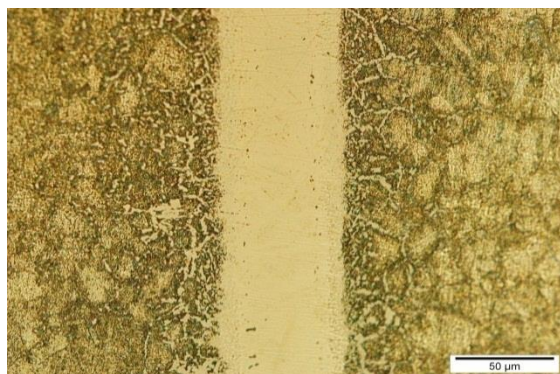
در شکل (۹) تصویر اتصال در زمانهای ۴۵ دقیقه و ۱۲۰ دقیقه در دمای مشترک 1050°C درجه سانتی گراد با هم مقایسه شده است. همانگونه که در شکل (ب) مشخص است با افزایش دما ترکیبات رسوبی اطراف خط اتصال کمتر شده است.

۴-۳- اتصال در دمای 1100°C و زمان ۳۰ دقیقه

جهت بررسی متغیر دما در اتصال فولاد AISI 321 درجه حرارت اتصال تا 1100°C درجه سانتی گراد افزایش می یابد. با توجه به رابطه دما و زمان در اتصال TLP، زمان کمتر و در حد ۳۰ دقیقه در نظر گرفته می شود. پس از اتصال و مشاهده تصاویر میکروسکپی (شکل ۱۰) مشخص می گردد که زمان ۳۰ دقیقه در این درجه حرارت کم بوده و انجام نشده است. ترکیبات یوتکتیک در وسط خط اتصال قابل مشاهده می باشد. آنالیز نقاط مختلف اتصال (شکل ۱۱) مشخص می کند که نفوذ عناصر به طور کامل انجام نشده است و زمان ۳۰ دقیقه جهت نفوذ کامل و اتصال کافی نبوده است. مقدار نفوذ آهن در لایه واسط و نیکل در فلز پایه که هر دو عنصر جزء عناصر اصلی فلز پایه و لایه واسط بوده اند، کم می باشد.

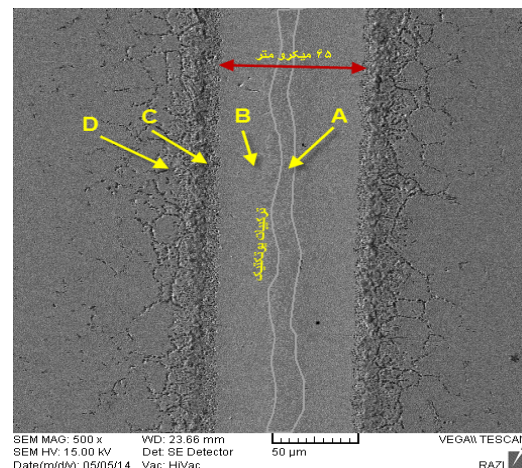
نیز با درصد کمتر از آنالیز اولیه فلز پایه و بیشتر از لایه واسط اولیه وجود دارد. حضور این عناصر احتمال اینکه رسوبات بوجود آمده، با ترکیب Fe-B و Ni-B و Cr-B باشند را زیاد می کند. در نقطه D با توجه به کم بودن زمان، نفوذی از عناصر صورت نگرفته و آنالیز موجود تقریباً همان آنالیز فلز پایه می باشد.

۵-۳- اتصال در دمای ۱۱۰۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه



شکل (۱۲): تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای ۱۱۰۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه

با توجه به کم بودن زمان ۳۰ دقیقه جهت اتصال در درجه حرارت ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد، زمان اتصال به ۴۵ دقیقه افزایش داده می شود. با مشاهده تصاویر میکروسکوپی (شکل ۱۲) مشخص می گردد که این زمان به عنوان حداقل زمان مورد نیاز در اتصال TLP فولاد AISI321 با درجه حرارت ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد می باشد. در این زمان انجماد همدمای تکمیل شده و اتصال در حد مطلوب می باشد. در نقاط A و B (شکل ۱۳) نفوذ آهن و کروم از فلز پایه صورت گرفته است. مقداری نیکل نیز به سمت فلز پایه نفوذ کرده است. سیلیسیم در حد مقدار اولیه موجود در لایه واسط باقی مانده است. در صورتی که مقدار بور با SEM قابل اندازه گیری بود، به احتمال زیاد شاهد نفوذ بور از لایه واسط به سمت فلز پایه خواهیم بود. این امر تاثیر زیاد بور در تشکیل ترکیبات یوتکتیک را با ناکافی بودن زمان و دمای اتصال در یک انجماد غیر هم دما می رساند.



MBF20 - 1100°C- 30min - point B		MBF20 - 1100°C- 30min - point A	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	7.53	Iron	2.26
Nickel	80.36	Nickel	88.66
Silicon	4.52	Silicon	6.7
Titanium	0	Titanium	0.03
Chromium	7.58	Chromium	2.36

MBF20 - 1100°C- 30min - point D		MBF20 - 1100°C- 30min - point C	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	74.26	Iron	55.18
Nickel	8.08	Nickel	32.25
Silicon	0.48	Silicon	0.96
Titanium	0.26	Titanium	0
Chromium	16.91	Chromium	11.61

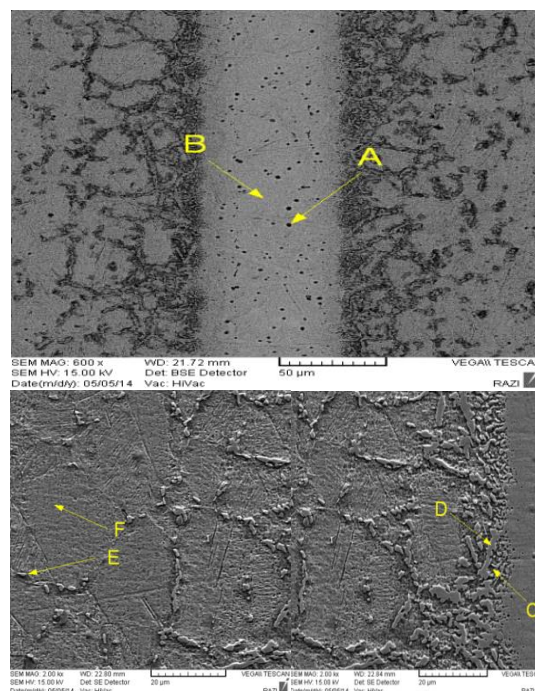
شکل (۱۱): تصویر آنالیز نقطه ای اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای ۱۱۰۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه

احتمال وجود ترکیبات بوریدی نیز با توجه به برخی تحقیقات صورت گرفته وجود دارد [۸-۱۰]. در نقطه A با توجه به آنالیز انجام شده نفوذ آهن از فلز پایه و نیکل به فلز پایه صورت نگرفته است. مقداری کروم به سمت خط اتصال نفوذ کرده و درصد کروم را نسبت به آنالیز اولیه لایه واسط، کاهش داده است. در نقطه B که قسمت اصلی آن محلول جامد نیکل می باشد، مقداری نفوذ آهن از فلز پایه صورت پذیرفته و کروم نفوذی نداشته است. در نقطه C که در مرز فلز پایه و لایه واسط (خط اتصال) می باشد، آهن و کروم با درصد بالایی قرار دارند. کروم

های سیاه فاز نمی باشند. نقطه C در اطراف ترکیبات رسوبی تشکیل شده و به عبارت دیگر در فلز پایه اطراف خط اتصال می باشد و همانگونه که از آنالیز این نقطه مشاهده می شود، دارای ترکیب فلز پایه می باشد و تغییرات زیادی در این نقطه بوجود نیامده است. در نقطه D که محل تشکیل رسوبات در اطراف خط اتصال می باشد، درصد بالای کروم مشاهده می گردد، که به احتمال زیاد ترکیبات بوریدی کروم در این نقطه بوجود آمده است. با توجه به حدودی بودن آنالیز عنصر کربن با سیستم EDS میکروسکپ SEM، فقط در جهت تعیین حدودی اینکه ترکیبات تشکیل شده کاربید کرم نباشد، درصد کربن در این نقطه اندازه گیری شده که با در نظر گرفتن همان مقدار حدودی، احتمال تشکیل کاربید کم می باشد. در نقطه E نیز که رسوبی دورتر از خط اتصال می باشد، با توجه به درصد بالای کروم، ترکیب احتمالی بور و کروم قابل پیش بینی است. از آنجایی که دمای اتصال دهی بالاتر از دمای یوتکتیک ترکیب Ni-Ni₃B (۱۰۹۳ درجه سانتی گراد) می باشند، این رسوبات نمی توانند نیکل بوراید باشند. نقطه F که در فلز پایه می باشد، با توجه به نزدیک بودن به نقطه E فقر کروم نداشته و تقریباً ترکیب اولیه فلز پایه را حفظ کرده است.

۳-۶- اتصال در دمای ۱۱۵۰ °C و زمان ۳۰ دقیقه

جهت بررسی تاثیر افزایش درجه حرارت در کمتر شدن زمان اتصال در فرایند TLP فولاد AISI321 درجه حرارت اتصال به ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد افزایش یافته و زمان اتصال، ۳۰ دقیقه تعیین می گردد. تصاویر میکروسکپی (شکل ۱۴) مشخص می کند که اتصال انجام شده مطلوب و انجماد هم دما در این زمان و دما، کامل شده است. زمان ۳۰ دقیقه در ۱۱۰۰ درجه جهت تکمیل انجماد هم دما کامل نبوده است ولی مشاهده می شود که با افزایش دما در همان زمان ۳۰ دقیقه، انجماد هم دما کامل شده است. این حالت به خوبی ارتباط داشتن دما و زمان لازم برای کامل شدن انجماد هم دما را در اتصال TLP نشان می دهد.



MBF20 - 1100°C- 45min - point B		MBF20 - 1100°C- 45min - point A	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	12.15	Iron	12.21
Nickel	73.95	Nickel	71.92
Silicon	4.82	Silicon	5.7
Titanium	0	Titanium	0.01
Chromium	9.08	Chromium	9.96
		Oxygen	0.2

MBF20 - 1100°C- 45min - point D		MBF20 - 1100°C- 45min - point C	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	53.6	Iron	73.03
Nickel	2.38	Nickel	11.63
Silicon	0	Silicon	0.47
Titanium	0.21	Titanium	0.52
Chromium	42.63	Chromium	12.64
Carbon	1.17		

MBF20 - 1100°C- 45min - point F		MBF20 - 1100°C- 45min - point E	
نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
Iron	71.67	Iron	57.47
Nickel	8.9	Nickel	5.51
Silicon	0.09	Silicon	0.36
Titanium	0.19	Titanium	0.01
Chromium	16.63	Chromium	32.27
Carbon	2.53	Carbon	4.38

شکل (۱۳): تصویر آنالیز نقطه ای اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای ۱۱۰۰ °C و زمان ۴۵ دقیقه

در مناطق اتصال برخی لکه های سیاه رنگ در تصاویر SEM مشاهده گردید که جهت اینکه این لکه ها اکسید نباشد، میزان اکسیژن این نقاط تعیین گردید و مشخص شد این لکه ها اکسید نبوده و احتمالاً آلودگی های سطحی می باشد. بنابراین این لکه

یکی از روابطی که جهت تخمین زمان مورد نیاز برای تکمیل انجماد هم دما مورد استفاده قرار می گیرد به صورت زیر می باشد:

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

t_f : زمان مورد نیاز جهت تکمیل انجماد هم دما

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

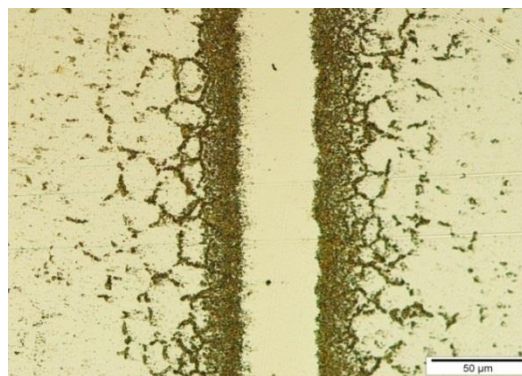
γ : یک پارامتر بدون بعد

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

۷-۳- اتصال در دمای 1150°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 ۱۵ و ۱۶) 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.

آنالیز نمونه ها در این شرایط دما و زمان (شکل ۱۷) نشان می دهد که نفوذ عناصر نیکل، کروم، سیلیسیم و همچنین بور در اتصال، نسبت به زمان ۳۰ دقیقه و دمای 1150°C درجه سانتی گراد بیشتر بوده و رسوبات و ترکیبات منطقه اطراف اتصال کمتر شده است.



شکل (۱۴): تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1150°C و زمان ۳۰ دقیقه.

در رابطه با ارتباط دما و زمان و غلظت عناصر در اتصال TLP، توسط محققان مختلف روابطی بیان شده است. حل تحلیلی قانون دوم فیک در مورد نفوذ توسط کرانک 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:

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

$C(x,t)$: 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

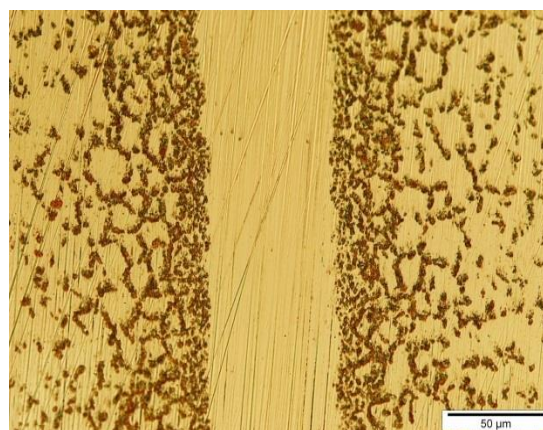
C_M : غلظت اولیه عناصر MPD در فلز پایه

D : ضریب نفوذ عناصر MPD در آلیاژ فلز پایه

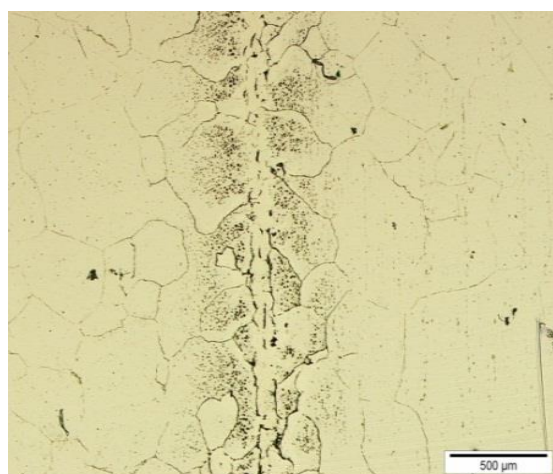
رابطه (۱) نشان می دهد که در زمان ثابت، $C(x)$ ، بطور معکوس با D رابطه دارد. ضریب نفوذ با دما رابطه مستقیم دارد به گونه ای که افزایش دما باعث افزایش ضریب نفوذ می شود. بنابراین افزایش دما باعث کاهش غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب می شود [۱۱]. انجماد هم‌دما وقتی کامل می شود که غلظت عناصر کاهنده نقطه ذوب در لایه میانی اتصال کاهش یابد. اتصالات انجام شده به خوبی شاهد این مطلب می باشد که با افزایش دما می توان زمان اتصال را کمتر انتخاب نمود.

۸-۳- اتصال در دمای 1200°C و زمان ۳۰ دقیقه

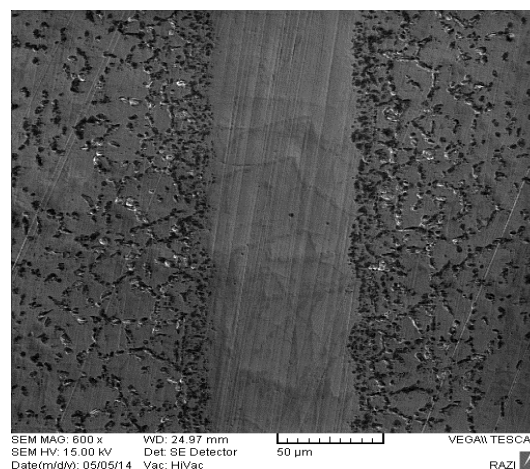
جهت رسیدن به حداکثر دمای قابل استفاده در اتصال TLP فولاد AISI321 در دما به 1200°C درجه سانتی گراد افزایش می یابد و نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در کوره خلا نگهداری می گردد. پس از تصویر برداری از نمونه ها (شکل ۱۸ و ۱۹) به خوبی مشخص می گردد که این دما برای اتصال زیاد بوده و در منطقه اتصال ذوب موضعی صورت گرفته است. در این حالت نفوذ عناصر آلیاژی در منطقه اتصال زیاد بوده و این امر باعث پایین آمدن استحکام اتصال می گردد.



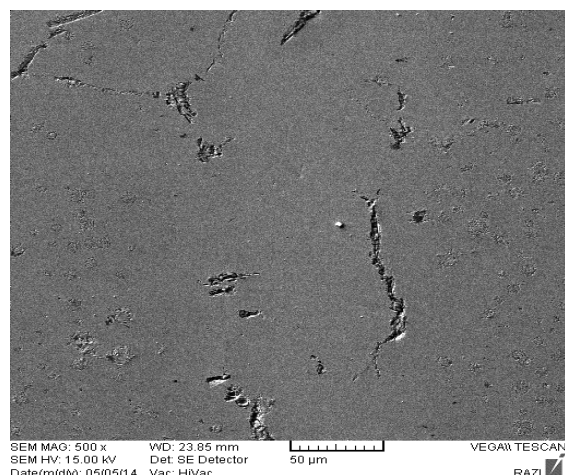
شکل (۱۵): تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1150°C و زمان ۶۰ دقیقه



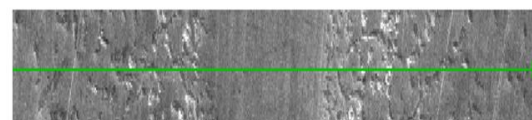
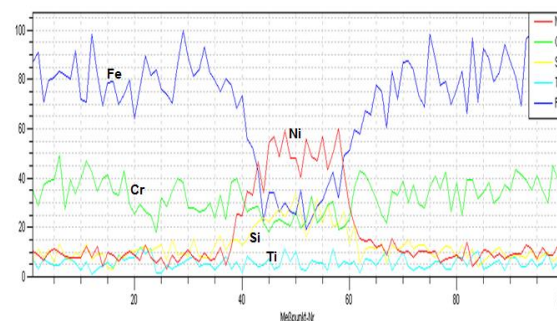
شکل (۱۸): تصویر میکروسکپ نوری اتصال TLP فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1200°C و زمان ۳۰ دقیقه



شکل (۱۶): تصویر میکروسکپ SEM اتصال TLP فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1150°C و زمان ۶۰ دقیقه



شکل (۱۹): تصویر میکروسکپ SEM اتصال TLP فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1200°C و زمان ۳۰ دقیقه



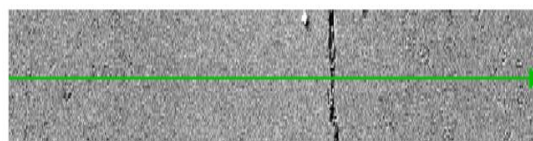
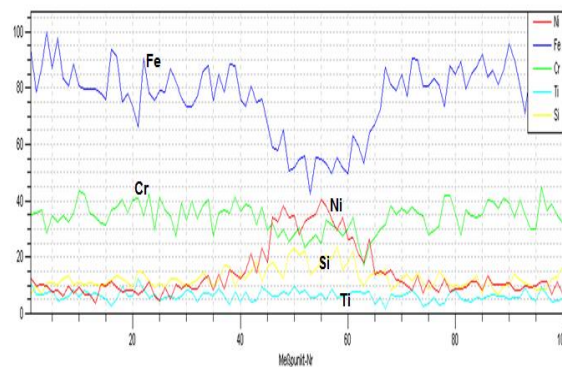
شکل (۱۷): تصویر آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای 1150°C و زمان ۶۰ دقیقه

از دمای بحرانی، زمان انجماد هم دما افزایش می یابد. در دمای بحرانی، نفوذ عناصر از فلز پایه در لایه واسط و تشکیل ترکیبات یوتکتیک ثانویه رخ می دهد. در تصاویر اتصال انجام شده این ترکیبات در مرکز اتصال مشاهده می شود. یوتکتیکهای تشکیل شده باعث کاهش نرخ انجماد هم دما می شود. یکی دیگر از مکانیزم ها جهت افزایش زمان انجماد همدمای، حضور عناصر ثانویه می باشد که می تواند از فلز پایه و لایه مشترک منتشر شود. این عناصر ممکن است به صورت ناخالصی در فلز پایه یا لایه واسط حضور داشته باشند [۱۱].

۳-۹- آزمون استحکام برشی

نمونه هایی که از نظر اتصال در حد مطلوب بودند و همچنین نمونه هایی که دارای ایراد زیاد بودند جهت تعیین مقدار استحکام برشی مورد آزمون برش قرار گرفتند. با مشاهده نتایج آزمایشات مشخص می گردد (شکل ۲۱) که اتصال در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۶۰ دقیقه و همچنین دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه با لایه واسط -MBF-20 دارای استحکام بسیار مطلوب و در حد استحکام فلز پایه یعنی فولاد AISI321 می باشد (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 می باشد (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 اولی هستند. 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.

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 رخ می دهد. عنصر بور از لایه واسط مذاب به فلز پایه نفوذ می کند و جدایش این عنصر در محل مرز دانه ها و مرزهای بین فلزی 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، ذوب شده و حین سرد شدن از دمای اتصال موجب تشکیل فازهای مشخصی می گردند [۱۲].

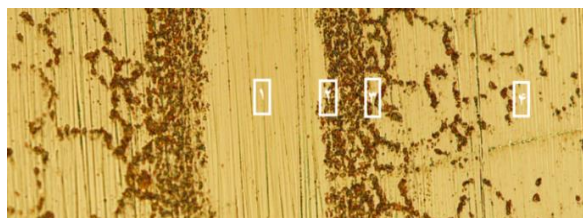


شکل (۲۰): تصویر آنالیز خطی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20 در دمای ۱۲۰۰°C و زمان ۳۰ دقیقه

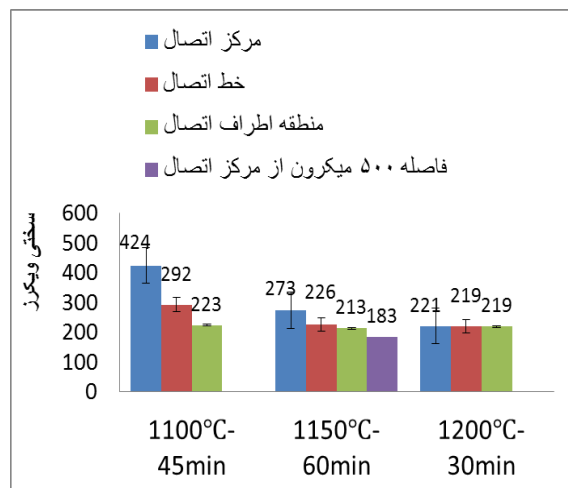
آنالیز خطی مناطق اتصال (شکل ۲۰) مشخص می کند که نفوذ آهن در منطقه اتصال زیاد می باشد. مقدار نیکل در منطقه اتصال کم شده و عناصر کروم و سیلیسیم نفوذ زیادی داشته اند. با افزایش دما به ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد مقدار عناصر آلیاژی زیاد شده و خواص اتصال کاهش می یابد. این دمای بحرانی اتصال و یا بالاتر از آن می باشد. با گذشتن دما از درجه حرارت بحرانی، رفتار معکوس در اتصال رخ می دهد و احتمال وجود ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال وجود دارد. در دمای بالاتر

مرکز اتصال، خط اتصال، منطقه تحت تاثیر اتصال و فواصل حدود ۵۰۰ میکرومتر از مرکز اتصال با روش ویکرز انجام شده است (شکل ۲۲). هر ستون از سمت راست برای هر اتصال که زمان و دما در زیر آن نوشته شده است، به ترتیب برابر ریز سختی سنجی از مرکز اتصال، خط اتصال، منطقه تحت تاثیر اتصال و فاصله ۵۰۰ میکرون از مرکز اتصال (برای برخی نمونه ها) می باشد.

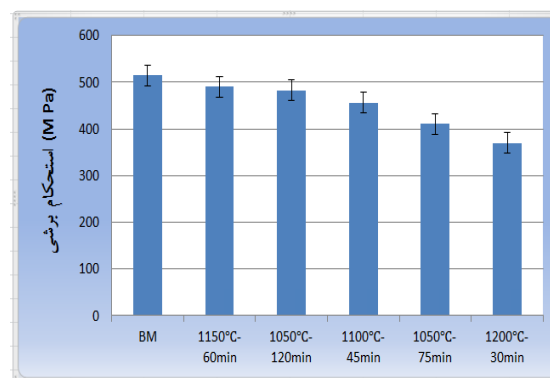
همان گونه که قابل مشاهده است (شکل ۲۲)، سختی از مرکز اتصال به سمت فلز پایه کمتر می شود. در نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد که دمای بحرانی اتصال می باشد به علت نفوذ زیاد عنصر آهن در منطقه اتصال و کمتر شدن عنصر نیکل در منطقه اتصال، میزان عناصر آلیاژی به مقدار بسیار زیادی تغییرات داشته است و این امر سبب کاهش سختی شده است.



شکل (۲۲): (۱): مرکز اتصال، (۲): خط اتصال، (۳): منطقه تحت تاثیر اتصال و (۴): فاصله حدودی ۵۰۰ میکرومتر از مرکز اتصال



شکل (۲۳): مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20



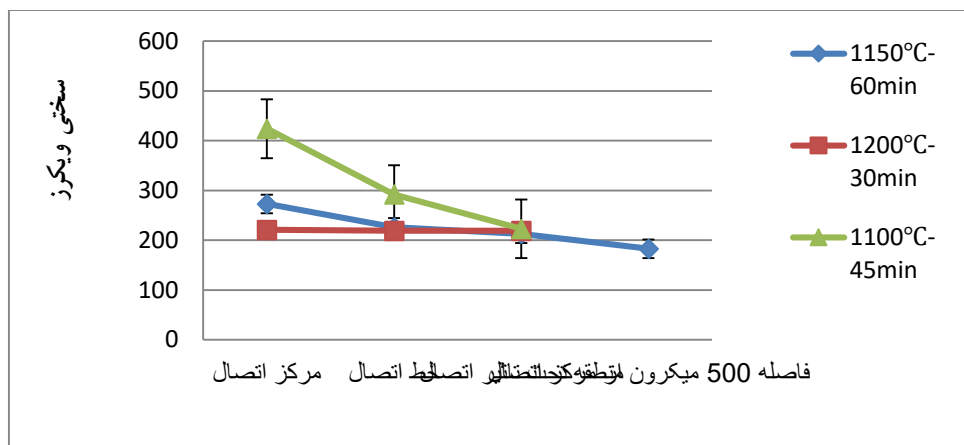
شکل (۲۱): نمودار استحکام برشی اتصال TLP فولاد AISI 321 با لایه واسط MBF-20

ترکیبات یوتکتیک شکل شده که عموماً فازهای سخت و شکننده هستند، باعث کاهش استحکام اتصال می شوند. 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.

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 هم دما 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 شود. با افزایش درجه حرارت و زمان، نفوذ عناصر بیشتر می شود.

۳-۱۰-۳-آزمون ریز سختی سنجی

در شکل (۲۳) نتایج سختی سنجی نمونه های بررسی شده به صورت نمودار ستونی با ذکر اعداد به دست آمده از سختی سنجی ویکرز آورده شده است. سختی سنجی از چهار منطقه



شکل (۲۴): نمودار مقایسه ای مقدار سختی ویکرز نمونه های اتصال TLP فولاد AISI 321 در سه دمای مختلف

20 کاهش یافته و ترکیبات رسوبی منطقه DAZ کمتر و پراکنده تر می شود.

۴- با افزایش زمان از ۳۰ به ۴۵ و ۷۵ دقیقه، دمای تکمیل انجماد هم دما برای لایه واسط MBF-20 کاهش می یابد.

۵- دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد، دمای بحرانی یا بالاتر از دمای بحرانی در اتصال فولاد AISI321 با لایه واسط MBF-20 می باشد. در این دما ذوب جزئی اتفاق می افتد و با برعکس شدن شرایط اتصال، خواص مکانیکی اتصال کاهش می یابد.

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

۷- با افزایش دما و زمان برای لایه واسط MBF-20 ساختار همگن تر و با نفوذ عناصر، رسوبات منطقه DAZ کمتر و همگن تر شده و استحکام اتصال بیشتر گردید.

۸- ترکیبات یونکتیک 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 در لایه واسط استفاده شده MBF-20 می شود.

۹- سختی در مرکز اتصال برای تمامی اتصالات انجام شده در دماهای استفاده شده ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در

در نمودارهای خطی شکل (۲۴) سه نمونه اتصال داده شده با لایه واسط MBF-20 با دما و زمانهای متفاوت با هم مقایسه شده است. جدا از نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد که نمونه کاملی نبوده و با کاهش سختی و وجود عناصر آلیاژی زیاد که کاهش دهنده استحکام است، سختی مربوط به نمونه ۱۱۵۰ درجه و زمان ۶۰ دقیقه کمتر از نمونه ۱۱۰۰ درجه و زمان ۴۵ دقیقه می باشد که در نتیجه استحکام نمونه ۱۱۵۰ درجه و زمان ۶۰ دقیقه بیشتر از استحکام نمونه ۱۱۰۰ درجه و زمان ۴۵ دقیقه می باشد و مشخص می باشد که افزایش دما و زمان اتصال باعث کاهش سختی و افزایش استحکام می گردد.

۴- نتیجه گیری

۱- حداقل زمان لازم جهت تکمیل انجماد هم دما در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، به ترتیب برابر ۷۵، ۴۵ و ۳۰ دقیقه برای لایه واسط MBF-20 می باشد.

۲- در صورت عدم تکمیل انجماد همدمای، ترکیبات بوریدی و سیلیسیدی نیکل، کروم و آهن در مرکز خط اتصال بوجود می آید.

۳- با افزایش دما در اتصال TLP از ۱۰۵۰ به ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، زمان تکمیل انجماد همدمای لایه واسط MBF-

- [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", Vol. 40, pp. 130-137, 2012.
- [10] M. Pouranvari, A. Ekrami & AH. Kokabi, "Microstructure-properties relationship of TLP-bonded GTD-111 nickel-base superalloy", Mater Sci Eng, Vol. 490A, pp. 229-34, 2008.
- [11] R. Bakhtiari, A. Ekrami & TI. Khan, "The effect of TLP bonding temperature on microstructural and mechanical property of joints made using FSX-414 superalloy", Vol. 546A, pp. 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, 2012.
- زمانهای ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه، برای لایه واسط MBF-20 بیشتر و به سمت فلز پایه کمتر می شود.
- ### ۵- مراجع
- [1] ر. نیسی و م. شمعیان، "ارزیابی خواص اتصال فولاد زنگ نزن دو فاز UNSS32205 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316L با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۴.
- [2] M. Mazar Atabaki, "Partial transient liquid phase diffusion bonding of Zircaloy- 4to stabilized austenitic stainless steel 321 using active titanium filler metal", JManuf Sci Eng, Vol. 133, No. 5, pp. 99-110, 2011.
- [3] M. Mazar Atabaki, ME. Bajgholi & EH. Dehkordi, "Partial transient liquid phase diffusion bonding of zirconium alloy (Zr-2.5Nb)to stainless steel 321", Materials and Design, Vol. 42, pp. 172-183, 2012.
- [4] MA. Arafin, M. Medraj, DP. 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, Vol. 106, pp. 109-11, 2007.
- [5] م. خانزاده، ح. بختیاری و ع. اکبری، "تاثیر عملیات حرارتی بر روی ریز ساختار، سختی و استحکام فصل مشترک جوش انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۲۱ به آلومینیم ۱۲۳۰"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۴.
- [6] EA. Brandes & GB. Brook, "Smithells metal reference book", 11-7-11-485, oxford, Butterworth, Heinemann, 1992.
- [7] P. Villars, A. Prince & H. Okamoto, "Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams", ASM International, Materials Park, OH, USA, pp. 5508-5513, 1995.
- [8] JSC. Jang, HP. 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, pp. 79-82, 2003.