

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 88-77

# تاثیر دمای اتصال دهی بر خصوصیات اتصال TLP مجموعه AISI 2205/BNi-3/AISI 2205

سید علیرضا بهشتی بافقی و مسعود مصلایی پور

دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد (دریافت مقاله: 1399/07/07 ؛ پذیرش مقاله: 1399/09/30)

چکیدہ

در تحقیق حاضر از فرآیند اتصال دهی فاز مایع گذرا برای اتصال دهی فولاد زنگنزن دوفازی AISI 2205 با لایهی واسط آمورف BNi-3 استفاده شد. بر اساس بررسی های تجربی و تحلیلی اولیه، پارامترهای دما و زمان پیونددهی تعیین گردید. به منظور بررسی تاثیر دمای پیونددهی بر تغییرات ریزساختاری موضع اتصال، پیونددهی در گستره یدمایی <sup>2</sup>° 1050-1050 به مدت min 20 انجام شد. مطالعات ریزساختاری و فازی انجام شده حاکی از تکمیل انجماد هم دما و تشکیل محلول جامد یکدست نیکل در موضع مرکزی اتصال (منطقه یمتاثر از نفوذ) گردید. نفوذ درهم بین منطقهی اتصال و فلز پایه یاطراف، موجب تشکیل ترکیبات برایدی و نیتریدی در فلز پایه یاطراف موضع اتصال بود که با افزایش دما از <sup>2</sup>° 1050 به <sup>2</sup>° 1000 مقدار ترکیبات بین فلزی مذکور به طور چشمگیری کاهش یافت (کاهش کسر سطحی رسوبات مذکور از 85% به شدت متاثر از مقدار و مورفولوژی ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در منطقه یمتاثر از نقوذ می باشد. با افزایش دمای پیونددهی به <sup>2</sup>° 1000 شدت متاثر از مقدار و مورفولوژی ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در منطقه متاثر از نقوذ می باشد. با افزایش دمای پیونده می به <sup>2</sup>° 1000 مقدار و مورفولوژی توکیبات بین فلزی تشکیل شده در منطقه متاثر از نقوذ می باشد. با افزایش دمای پیونده موده به <sup>2</sup>°000 به <sup>2</sup>° شدت متاثر از مقدار و مورفولوژی ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در منطقه متاثر از نقوذ می باشد. با افزایش دمای پیونده می <sup>1</sup><sup>3</sup><sup>3</sup> و در تمامی نمونه ما استحکام برشی نمونه های اتصال داده شده به شدت متاثر از مقدار و مورفولوژی ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در منطقه متاثر از نقوذ می باشد. با افزایش دمای پیونده م

كلمات كليدى: اتصال فاز مايع گذرا، منطقه متاثر از نفوذ، AISI 2205، بورايد كروم، ريزساختار.

# The effect of bonding temperature on the characteristics of TLP bonded joints in AISI 2205/BNi-3/AISI 2205 assembly

### S. A. Beheshti Bafqi, M. Mosallaee

Department of Materials Engineering, Yazd university (Received 28 September 2020; Accepted 20 December 2020)

#### Abstract

In the present study, the transient liquid phase bonding of AISI 2205 dual phase stainless steel with amorphous BNi-3 interlayer was carried out. Based on the initial experimental and analytical studies, the parameters of temperature and bonding time were determined. In order to investigate the effect of bonding temperature on the microstructural changes of the joint, bonding was performed in the temperature range of 1050-1200°C for 20 min. The microstructural and phase analyses indicated the completion of isothermal solidification and the formation of a uniform Ni-solid solution in the bonding zone centerline. The interdiffusion between the bonding zone and the adjacent base metal resulted in the

\* نويسنده مسئول، پست الكترونيكي: <u>mosal@yazd.ac.ir</u>

formation of boride and nitride intermetallic compounds in the base metal adjacent to the bonding zone, which the area fraction of this intermetallics significantly decreased with increasing bonding temperature from 1050°C to 1200°C (reduction of the intermetallic area fraction from 85% to 40%). Evaluation of shear strength of samples showed that despite the completion of isothermal solidification in all samples and shear strength of bonded samples significantly depends of amount and morphology of intermetallic compounds on the transient liquid phase bonding shear strength. By increasing the bonding temperature to 1200°C and reducing the area fraction of intermetallic compounds up to 40% of the shear strength of the samples increased from 450 MPa of TLP bonded specimen of 1050°C to about 85% of base metal shear strength.

Keywords: Transient liquid phase bonding, Diffusion affected zone, AISI 2205, Cr-Boride, Microstructure.

مشابه [7]. یورتیسیک و همکاران گزارش نمودند که استفاده از فرایندهای جوشکاری قوسی از قبیل GMAW، GMAW و PAW در فولاد 2205 AISI موجب برهم خوردن تعادل فازی در موضع اتصالدهی میشود. بنابراین گرادیان شدید حرارتی، گرم و سرد شدن بسیار سریع و موضعی و انجماد غیرتعادلی فلز جوش در فرایندهای جوشکاری ذوبی موجب تغییرات شدید ریزساختاری منطقهی جوش ایجاد شده توسط فرآیندهای جوشکاری قوسی میشود که این تغییرات افت خصوصیات ناحیهی جوش قوسی را به همراه دارد [8].

از طرفی هرچند فرآیندهای جوشکاری حالت جامد از قبیل جوشکاری نفوذی قابلیت ایجاد اتصالاتی بسیار کارآمد را دارا میباشند [9]، ولی مشکلات زیاد انجام این فرآیند، از قبیل مدت زمان بالای جوشکاری، نیاز به کیفیت بالای سطوح تماس و ... موجب محدودیت هایی در استفاده ی صنعتی از فرآیند جوشکاری حالت جامد می شود [10].

کنترل دقیق چرخه حرارتی و عدم نیاز به اعمال فشار زیاد و غیره، فرآیند اتصال دهی فاز مایع گذار (TLP) را به عنوان یک فرآیند با قابلیت بالا برای اتصال دهی فولادهای دوفازی مطرح نموده است. همچنین نظر به امکان انجماد همدما حین این فرآیند موجب عدم تشکیل فازهای غیر تعادلی به دلیل جدایش حین سرد شدن و انجماد غیر تعادلی می گردد. بنابراین می توان انتظار داشت با انتخاب صحیح پارامترهای اتصال دهی و حواص بتوان اتصالی مشابه با فلز پایه (از نظر ساختاری و خواص شیمیایی و مکانیکی) ایجاد نمود [11و12]. فولاد AISI 2205 کی فولاد زنگنزن دوفازی آستنیتی - فریتی فولاد AISI 2205 کی مجموعهای از خواص هر دوفاز  $\alpha$  و فاز  $\gamma$  را با هم دارا می باشد. از مهم ترین خصوصیات این فولاد AISI 2205 می توان به استحکام بالا، مقاومت به خوردگی حفرهای مطلوب بخصوص در محیطهای کلریدی و غیره اشاره نمود [1]. این خواص منحصر به فرد، فولاد 2205 AISI را به عنوان فولادی مناسب برای کاربرد در صنایع مختلف مانند نیروگاهها، صنایع نفت و گاز، کاغذسازی و ... معرفی نموده است[2].

1- مقدمه

اتصال دهی فولاد 2005 AISI در صنعت عمدتا توسط فرآیندهای جوشکاری قوسی انجام می شود، اما سیکل حرارتی شدید و موضعی همراه با این دسته از فرایندهای جوشکاری تاثیر مخربی بر توزیع یکنواخت فازهای α و γ در موضع اتصال دارد و در نتیجه افت خصوصیات ناحیهی جوشکاری، مقاومت به خوردگی و استحکام را موجب می شود [3 و 4]. به عنوان مثال لی و همکاران [5]. در اتصال فولاد دوفازی DP780 با روش GMAW، رفتار تسلیم ناپیوسته اتصالات (جوش ایجاد شده) و تشکیل ناخالصی ها در موضع جوشکاری را گزارش در خصوص جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولاد دوفازی ای DP1000 حاکی از تشکیل فاز مارتنزیت به واسطهی سردشدن سریع و ایجاد عیوبی از قبیل تخلخل و ترک در دکمهی جوش و ناحیه متاثر از حرارت دکمهی جوش بود که افت شدید خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده را موجب می گردد. به طور

در فرآیند TLP یک لایه واسط با ترکیب شیمیایی همخانواده با فلز پایه که حاوی عناصر کاهنده نقطه ذوب (MPD) میباشد، در بین سطح فلز پایهی آمادهسازی شده، واقع و این مجموعه تا دمای اتصالدهی حرارت داده میشود. با نگهداری کافی در دمای اتصالدهی لایه واسط ذوب شده، نفوذ درهم با فلز پایه موجب میشود انجماد در دمای پیونددهی (انجماد همدما) رخ دهد[13].

تحقیقات محدودی در خصوص اتصالدهی TLP فولادهای دوفازی انجام شده است که می توان به موارد زیر اشاره نمود: یوآن و همکاران [14] با بررسی اتصال فولاد 2205 AISI با استفاده از لایه واسط MBF-30 توسط روش اتصالدهی TLP گزارش نمودند که قبل از تکمیل انجماد همدما سه ناحیه ریزساختاری در موضع اتصال ایجاد می شود که عبارتند از: ناحیهی انجماد همدما، ناحیه انجماد غیر همدما و ناحیهی متاثر از اتصالدهی. ناحیهی انجماد غیرهمدما به دلیل سرد شدن مذاب باقی مانده در خط مرکزی اتصال (به زمان ناکافی برای انجماد همدما) تشکیل می شود. ناحیهی متاثر از اتصالدهی شامل رسوبات عنصر بور می باشد که حین اتصالدهی مجاور ناحیه دلیل نفوذ عنصر بور از لایهی واسط به فلز پایهی مجاور ناحیه اتصال، تشکیل می شود.

رهی و همکاران [15] اتصال فولاد AISI 2205 با استفاده از لایه واسط AISI 2205-3%Fe-4.5%Si-3.2%B به روش اتصال دهی TLP را مورد بررسی قرار داده و گزارش نمودند فازهای تشکیل شده در ناحیه اتصال بورایدهای کروم و مولیبدن هستند و نیز پیشرفت انجماد همدما با مجذور زمان اتصال دهی رابطه خطی نسبی دارد که به وسیلهی نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب کنترل می شود. همچنین با بررسی میکروسکوپی ناحیه ی اتصال، نشان دادند افزایش دما از 2°1010 تا 2°0801 (و ثابت بودن زمان اتصال دهی) موجب کاهش مقدار ترکیبات تشکیل شده در ناحیه اتصال می شود.

یوآن و همکاران [16] تاثیر ترکیب شیمیایی لایه واسط بر تغییرات ساختاری موضع اتصال TLP فولاد دوفازی AISI 2205 را مورد تحقیق قرار دادند. آنها گزارش نمودند با

استفاده از لایه واسط Ni-15.2%Cr-4%B رسوبات BN در فصل مشترک فلز پایه و منطقهی اتصال ایجاد شده که با افزایش زمان اتصالدهی مقدار فاز BN افزایش مییابد.

روه و لــى [17] در پــژوهش اتصـالدهــى فـولاد دوفـازى UNS S32750 بـا اسـتفاده از لايـه واسـط Fe-B-Si، گـزارش نمودند خواص مكانيكى اتصالات ايجاد شده با افـزايش دمـاى اتصالدهى از 2°1150 به C 1200 بهبود مىيابد، سختى ناحيه اتصال از حدود HV 330 به 250 المش مـىيابـد و نيـز استحكام برشى اتصال ايجاد شده در دماى 2° 1200 نسبت بـه دماى 2°1150، % 28 افزايش يافته است.

تحقیقات انجام شده در مورد فرآیند TLP در فولادهای دوفازی بیشتر معطوف به تاثیر زمان اتصال دهی بر ویژگی های اتصال میباشد. با توجه به تحقیقات محدود ارائه شده در خصوص تاثیر دمای اتصال دهی بر اتصال TLP فولاد زنگنزن دوفازی AISI 2205 مدا اتصال دهی بر اتصال TLP فولاد زنگنزن دوفازی تاثیر دمای اتصال دهی بر اتصال TLP فولاد زنگنوب دوفازی مکانیکی ایجاد شده به واسطهی تغییرات دما در اتصال TLP مورد پژوهش و مجموعه AISI 2205/BNi-3/AISI 2205 مورد پژوهش و مجموعه محموعه ماد. لازم به ذکر است با توجه به حساسیت فاز پایه به دمای پیونددهی تغییرات کسر سطحی فازهای آستنیت و فریت در فولاد 2205 AISI بر حسب تغییرات دما مورد بررسی فریت در فولاد 205 مورد بررسی موازی واقع شد و شرایط مطلوب آنالیزهای دقیق ریز ساختاری و فازی واقع شد و شرایط مطلوب برای اتصال دهی مجموعه ی مذکور تعیین گردید.

## 2- روش انجام آزمایش

در این پژوهش از صفحات فولاد زنگنزن دوفازی AISI 2205 با ضخامت 3 mm به عنوان فولاد پایه و لایهی آمورف BNi-3 با ضخامت 4m 25 به عنوان لایه واسط استفاده شد. ترکیب شیمیایی و محدودهی انجمادی فولاد پایه و لایه واسط در جدول (1) ارائه شده است.

به منظور بررسی تاثیر تغییرات دما بر خصوصیات فازهای موجود در ریزساختار فلز پایه، 10 نمونه با ابعاد 3mm<sup>3</sup>×10×10 از فلز پایه برشو به مدت 30min در دمای ℃ 925 تا ℃

ترکیب شیمیایی (%wt)										محدوده (C	مادہ
Cr	Ni	Mo	В	Ν	Si	Mn	Cu	Fe	Ts	$T_L$	
21.52	5.05	3.42	0	0.16	0.45	1.10	0.20	Bal.	1380	1470	AISI-2205
0	Bal.	0	3.2	0	4.5	0	0	0	982	1038	BNi-3
								197			<b>T T</b>

جدول 1- تركيب شيميايي و محدوده انجمادي فولاد AISI 2205 و لايه واسط BNi-3

T<sub>s</sub> و T<sub>L</sub> به ترتیب دمای سالیدوس و لیکودوس میباشد

D	C <sub>0</sub>	C <sub>FM</sub>	$C_{L\alpha}$	$C_{\alpha L}$	W <sub>0</sub>	کمیت
5.24×10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s	0% at	14.6% at	13.6% at	0.3% at	12.5µm	مقدار مورد استفاده در این پژوهش



جدول2- کمیتهای استفاده شده برای محاسبه زمان تکمیل انجماد همدما

زمان اتصال دهي (دقيقه)

شکل1- سیکل حرارتی فرآیند اتصالدهی TLP مورد استفاده در پژوهش حاضر.

 $^{\circ}$  500 و  $^{\circ}$  (1000 به ترتیب برای هم دما شدن نمونه با اتمسفر کوره و جلوگیری از شوک حرارتی به نمونهها اعمال می گردد. بعد از انجام پیونددهی TLP، نمونههای متالوگرافی از مقطع عمود بر راستای اتصال TLP توسط وایرکات برش زده شد و با سنبادههای 100 تا شماره 2500 و در ادامه توسط ذرات آلومینا با اندازه  $\mu$ 2 پولیش شدند. از دو محلول (I) اچانت H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - محلول (I) اچانت -2008 الومینا با اندازه شد Solo تا شماره 200<sup>m</sup> (20<sup>m</sup> NaOH +50<sup>mL</sup> H2O) NaOH -10M نومینا با محرون سطوح Solo الوگرافی استفاده شد. اچ نمودن نمونهها به صورت الکترواچ در ولتاژ 50 و به مدت 88 در دمای  $^{\circ}$  25 صورت یذیرفت. با فاصله دمایی 2° 50 تحت عملیات حرارتدهی واقع شدند و بعد از سرد شدن تا دمای اتاق مورد متالوگرافی کمی و ریزساختاری واقع شدند.

نمونههای اتصالدهی با ابعاد 3mm<sup>3</sup>×10×10 از فلز پایه برش و بعد از سنبادهزنی ت اسنباده 1200 و چربیزدایی در محلول استون، مورد عملیات پیونددهی واقع گردید. پیونددهی در کوره تیوبی مقاومتی تحت اتمسفر خنثی (۹۹/۹۹%-۸۲) در سه دمای 05000، 05010 و 0° 1200 به مدت 20min انجام شد. سیکل حرارتی فرآیند TLP انجام شده در این پژوهش در شکل (1) نشان داده شده است. توقف 30 دقیقهای در دمای







شکل3- ریزساختار فولاد AISI 2205 الف)تصویر میکروسکوپی نوری از فلز پایه دریافتی، آنالیز عنصری از ب) فاز فریت و ج) فاز آستنیت.

مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3، بررسی های دقیق ریزساختار و تعیین ترکیب شیمیایی فازهای تشکیل شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL30 مجهز به آنالیزگر پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) انجام شد.

شناسایی فازها در موضع اتصال توسط آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) توسط دستگاه XPert pro در گستره زاویهای °80-10 انجام با نرخ C/min 2 و با استفاده از پرتو تک رنگ Cu Ka انجام شد. نمونههای لازم برای آنالیز XRD، در راستای موازی با موضع اتصال برش زده شد و سپس به طرف ناحیهی مورد نظر سنباده زده شد، به طوری که در سطح نمونه تنها منطقهی مورد نظر برای آنالیز فازی واقع شود. مثلا با سنباده زدن تا منطقهی متاثر از نفوذیا منطقهی مرکزی اتصال سنباده زدن ادامه میافت. لازم به ذکر است برای تعیین درست میزان سنباده زدن، سطوح مذکور بعد از هر مرحله سنباده زدن اچ و مورد مطالعه ریزساختاری واقع شد تا از رسیدن به منطقه مورد نظر در سطح نمونه اطمینان حاصل شود. بررسیهای کمی در تصاویر

متالوگرافی با استفاده از نرم افزار آنالیزگر سطح MIP انجام شد و متوسط بالغ بر 50 اندازه گیری به عنوان مقدار هر اندازه گیری گزارش شد.از آزمون استحکام برشی برای ارزیابی خواص مکانیکی اتصال TLP ایجاد شده استفاده شد. نمونه های مورد نظر برای تست استحکام برشی، از نمونه های اتصال داده شده، مطابق با ابعاد نگهدارنده نمونه معادل mm<sup>3</sup> مx10×00 برش زده شد. برای هر شرایط اتصال، دو نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. فیکسچر ساخته شده برای انجام برش کششی در شکل (2) نشان داده شده است.

# 3- نتايج و بحث

3-1- ارزیابی ریزساختاری و فازی فلز پایـه و تـاثیر دمـای علیات حرارتی برآن

ریزساختار و آنالیز EDS فازهای تشکیل شده در فولاد پایه، در شکل (3) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود ریزساختار فولاد AISI 2205 از دوفاز متفاوت تیره و روشن تشکیل شده است که فاز روشن به صورت جزایر



شکل5- تغییرات کسر سطحی فازهای فریت و آستنیت در فلز پایه بر حسب دمای عملیات حرارتی.

حرارت دهی در دماهای بالاتر از این دما موجب تغییر روند مقادیر فازهای فریت و آستنیت شده و درصد فاز آستنیت افزایش و درصد فاز فریت کاهش مییابد. نکته قابل توجه، بازیابی مجدد مقدار فازهای آستنیت و فریت به حدود 10750 در نمونهی عملیات حرارتی شده در دمای 20± 2°1075 بود. به طور مشابه پترویچ [18] گزارش نمود که تعادل فازهای فریت و آستنیت در فولاد 2025 AISI در دمای 2001 به حالت 50-50 تغییر مینماید. بنابراین دمای اتصال دهی TLP در محدودهی دمای 2° 1075 انتخاب گردید.

3-2- ارزیابی ریزساختاری و فازی موضع اتصال بر حسب دمای اتصالدهی در شکل (6) یک ریزساختار کلی از مقطع اتصال TLP در

مجموعه AISI 2205/BNi-3/AISI 2205 اتصال داده شده به

کشیده در زمینهی فاز تیره واقع شده است. این نحوهی واقع شدن فازها را میتوان به پروسهی نورد برای تولید صفحات فولادی نسبت داد. آنالیز عنصری مشخص نمود فاز تیره رنگ، فولادی نسبت داد. آنالیز عنصری مشخص نمود فاز تیره رنگ، غنی از عناصر فریتزا مانند Cr و Mo و فاز با رنگ روشن غنی ( عناصر آستنیتزا مانند Ni میباشد. آنالیز MRD از فولاد پایه ( شکل (4)) نشان داد که فولاد پایه از دو فاز اصلی آستنیت (γ) و فریت ( گ) تشکیل شده است. بنابراین میتوان فاز تیره را، فاز فریت و فریت و فریت ( ۵) تشکیل شده است. بنابراین میتوان فاز تیره را، فاز فریت و فریت ( ۵) تشکیل شده است. بنابراین میتوان فاز تیره را، فاز فریت و فاز روشن را، فاز آستنیت نسبت داد. اندازه گیری کسر و مریت و فاز فریت و زوشن را، فاز آستنیت نسبت داد. اندازه گیری کسر مطحی فازها توسط آنالیز گر تصویری نشان داد که درصد فاز مینرات میتوان فاز تیره رات میتوان فاز تیره رات استنیت رات میتوان فاز مین کسر مطحی فازها توسط آنالیز گر تصویری نشان داد که درصد فاز مینرات میتوان داد که درصد فاز آستنیت در حدود فاز فریت ( 20) میباشد. تاثیر تغییرات میانی را این میتوان داده شده است. استی داد اندازه گیری کسر دمای دمایی بر ریزساختار فلز پایه در شکل ( 2) نشان داده شده است. آستنیت نسبت داد اندازه گیری کسر ما مولی و فریت ( 20) تشکیل شده است. آستنیت در حدود فاز فریت ( 20) میباشد. تاثیر تغییرات میانی داده شده است. استی در میانی داده شده است. میانی داده شده است. میانی داده شده است. میانی داده شده است. میانین داده شده است. میانی داده شده است. میانی داده شده است. میانی در میان داده شده است. میانی داده شده است. میانی در میان داده شده است. میانی داده شده است. میانی در میان داده شده است. میانی در میان داده میانده در میان داده شده میاند. این شکل مشخص است با افزایش دمای کاهش و در مقابل کسر سطحی فاز فریت افزایش میابد.



شکل 6- تصویر میکروسکوپی الکترونی از موضع اتصال ایجاد شده به مدت min 20در دمای CDZ BZ 1050.°C و DAZ به ترتیب معرف موضع اتصال و



شکل7- تاثیر دمای اتصالدهی بر ناحیه اتصال TLP ایجاد شده به مدت min 20در دماهای الف) 2°1050، ب) 2°1150 و ج) BZ .1200°C و DAZ و DAZ به ترتیب معرف موضع اتصال و موضع متاثر از نفوذ میباشند.

مدت 20min، ارائه شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است ناحیهی اتصال از دو قسمت موضع اتصال و موضع متاثر از نفوذ تشکیل شده است.

تاثیر دمای اتصال دهی بر ناحیه اتصال در شکل (7) نشان داده شده است. همانطور که از قسمت های مختلف این شکل برداشت می گردد: انجماد هم دما در هر سه دمای 2° 1050، 20 1050 تکمیل و ناحیه اتصال یکدست و یکنواخت ایجاد شده است. نتایج تجربی نشان داد با انتخاب زمان ایجاد شده است. نتایج تجربی نشان داد با انتخاب زمان نفوذ عناصر B و Si از فاز مذاب به فلز پایه اطراف فراهم می شود. در نتیجه نقطه ذوب فاز مذاب افزایش و فاز مذاب در دمای اتصال دهی انجماد می یابد. افزایش دما تا دمای پیونددهی موجب تشکیل مذاب غنی از عناصر B و Si در موضع اتصال

می گردد. اختلاف غلظت عناصر B و Si بین مذاب و فلز پایه اطراف موضع اتصال موجب پس زده شدن B و Si به فلز پایه مجاور موضع اتصال می شود و نفوذ این عناصر در فلز پایه می شود. در مقایل، عناصر Cr، Fe و M از فلز پایه وارد فاز مذاب که موجب کاهش تفاوت ترکیب شیمیایی بین فلز پایه و موضع اتصال می گردد. این نفوذ در هم بین موضع اتصال و فلز پایه موجب افزایش نقطه ذوب فاز مذاب مذکور می شود و در نتیجه در دمای پیونددهی انجماد هم دما صورت می پذیرد. روابط معددی از قبیل رابطهی (1) [19] برای تخمین مدت زمان انجماد هم دما (t<sub>IS</sub>) مطرح شده است.

$$t_{IS} = \frac{W_{MAX}^2}{16K^2D} \tag{1}$$

که D ضریب نفـوذ عنصر کـاهنـده نقطه ذوب (MPD)، W<sub>MAX</sub>



شکل8- بررسی ریزساختاری از موضع اتصال در نمونه اتصال داده شده در دمای C° 1050 به مدت 20min. الف)ریزساختار ناحیه اتصال، ب) آنالیز عنصری از نقطه مشخص شده در شکل الف با A



شکل 9− الگوی تفرق اشعه از ناحیه متاثر از نفوذ در نمونه اتصال داده شده در دمای ℃ 1050 به مدت 20min.

بیشینهی پهنای مذاب و K ثابت است که از رابطه (2) به دست می آید:

$$k = \left(\frac{C_{\alpha L} - C_0}{C_{L\alpha} - C_{\alpha L}}\right) \frac{\exp(-k^2)}{\sqrt{\pi}(1 + \operatorname{erf}(k))} \tag{Y}$$

که  $C_{aL}$  غلظت عناصر MPD در فلز پایه حین انجماد همدما، MPD غلظت عناصر MPD در مذاب و  $C_0$  غلظت عناصر CLa در فلز پایه می باشد. با ترکیب روابط (1) و (2) رابطه (3) به دست می آید:

$$t_{IS} = \frac{W_{Max}^2}{4D} \left( \frac{C_{L\alpha} - C_{\alpha L}}{C_{\alpha L} - C_0} \right)^2 \tag{(7)}$$

نصف بیشینهی پهنای مذاب (W<sub>Max</sub>/2) به صورت تئوری با رابطهی زیر قابل محاسبه است [20]:

$$W_{Max} \cdot C_{L\alpha} = W_0 C_{FM} \tag{(4)}$$

که در آن C<sub>FM</sub> غلظت عناصر MPD در لایه واسط و W<sub>0</sub> ف ضخامت اولیهی لایه واسط می باشد. اطلاعات لازم جهت محاسبهی t<sub>IS</sub> در جدول (2) آمده است.

با توجه به جدول مدت زمان محاسبه شده برای تکمیل انجماد همدما در حدود min 28 بوده است. تفاوت مقدار پیش بینی شده (28min) و مقدار واقعی (کمتر از 20min) برای زمان تکمیل انجماد همدما در پژوهش حاضر می تواند مربوط به تفاوت در واکنش در سیستم پیچیده واقعی و سیستم ساده سازی شده در مدل باشد. در فرضیات مسئله فلز پایه عنصر Fe خالص فرض شد در حالی که عناصر آلیاژی دیگر مانند Ro، N cr و in نیز در فولاد پایه وجود دارد که نفوذ عنصر B به فلز پایه و ا

مصلایی پور و همکاران گزارش کردند با افزایش دما در اتصال دهی TLP تا یک میزان بحرانی، سرعت نفوذ عناصر MPD در فولاد پایه، افزایش می یابد، ولی با افزایش بیشتر دمای اتصال موجب شروع مرحله دوم انجماد همدما شده که در این مرحله نیروی محرکهی نفوذ عنصر MPD، بور در زمینه غنی از Ni کاهش و سرعت انجماد همدما به شدت کاهش می یابد [22].







شکل 11- بررسی ریزساختاری از ناحیه متاثر از نفوذ در نمونه اتصال داده شده در دمای C° 1050 به مدت 20min. الف)تصویر میکروسکوپی الکترونی از ناحیه اتصال، ب) طیف آنالیز عنصری از نقطه از نقطه مشخص شده در شکل الف با A و ج)B.

بنابراین تکمیل انجماد همدما در تمامی دماهای مورد استفاده در این پژوهش حاکی از عدم شروع مرحلهی دوم انجماد هـمدمـا دارد.

2) با افزایش دمای اتصالدهی پهنای ناحیه اتصال از μm 5±22تا μm 2±02 به ترتیب در نمونههای اتصال داده شده در در دمای ℃ 1050و ℃ 1150 افزایش مییابد. این مشاهدات با پیشبینی انجام شده با استفاده از رابطه (4) از همخوانی خوبی

برخوردار است. به طوری که با استفاده از رابطه (4) بیشینه پهنای مذاب مقدار تقریبی 27µ۳ به دست میآید که نزدیک به مقدار حقیقی آن μm 2±30 میباشد، لیکن افزایش بیشتر دمای اتصالدهی از 2°150 باعث ایجاد تغییر قابل ملاحظهای در پهنای ناحیه اتصال نمیشود، به طوری که پهنای ناحیه اتصال در دمای 2° 1200در حدود μμ 2±11 میباشد. در شکل (8) مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی



شکل 13- مقایسه استحکام برشی فلز پایه و نمونه های اتصال TLP داده شده بر حسب دمای پیونددهی. BM معرف فلز پایه است.

(γ-Ni) تشکیل شده است.

3-3- ارزیابی ساختاری و فازی منطقهی متاثر از نفوذ اختلاف ترکیب شیمیایی بین فاز مذاب تشکیل شده در موضع اتصال با فولاد پایهی اطراف آن (فلز مذاب غنی از B و Si و در مقابل فولاد پایه اطراف غنی از عناصر Fe و Cr) موجب فعال شدن نفوذ درهم در ناحیهی اتصال می شود. ضریب نفوذ بالای عنصر بور در زمینهی آهنی (2/5m<sup>7-10</sup>x20) [23] و نیکلی عنصر بور در زمینهی آهنی (2/5m<sup>7-10</sup>x20) [23] و نیکلی زمینه ی آهنی (2/5m<sup>7-10</sup>x20) [23] و زمینه نیکلی زمینه ی آهنی (2/5m<sup>7-10</sup>x20) [23] و زمینه نیکلی زمینه از ماز m<sup>2</sup>/s) موجب خروج سریع بور از فاز مذاب و ورود به فولاد پایه اطراف می شود. واکنش پذیری بالای بور با عناصر نیتروژن [23] و کروم [26] باعث تشکیل ترکیبات از ناحیه اتصال ایجاد شده در دمای 2° 1050به مدت 20min نشان داده شده است. همانطور که در شکل (8) مشاهده می شود علی رغم عدم حضور عناصر Fe و Mo در ترکیب شیمیایی اولیه لایه واسط، مقدار این عناصر در ناحیه اتصال به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است (شکل (8-ب)). بنابراین می توان نتیجه گرفت در حین اتصال دهی TLP بخش هایی از فلز پایه در فاز مذاب (لایه واسط) حل شده و عناصر آلیاژی موجود در فلز پایه (Fe، rC و Mo) به ناحیه مذاب (لایه واسط) وارد می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت نیروی محرکهی انجماد هم دما، لایه واسط و فولاد پایه (در دما و زمان مشخص) می باشد. همچنین با توجه به ترکیب شیمیایی ناحیه اتصال (شکل (8-ب))

بین فلزی عناصر مذکور به فرم BN و Cr<sub>2</sub>B در فلز پایه اطراف موضع اتصال می شود که این قسمت از فلز پایه بـ ه نـام منطقـ ه متاثر از نفوذ شناخته می شود. نتایج آنالیز فازی تفرق اشعه x (شکل (9)) موید تشکیل ایـن فازهـا در ناحیـه متـاثر از نفـوذ مى باشد.مطالعات ريز ساختارى ناحيه متاثر از نفوذ (شكل (10)) دلالت بر تشکیل رسوباتی بـا دو مورفولـوژی تقریبـا کـروی و تقريبا سوزنی داشت. ارزيابی ترکيب شيميايی رسوبات مـذکور آشکار نمود که رسوبات کروی غنبی از نیتروژن و رسوبات سوزنی غنی از کروم (شکل (11)) میباشند. بر اساس مطالعات ریزساختاری و آنالیز فازی XRD از ناحیه متاثر از نفوذ می توان برداشت نمود رسوبات کروی احتمالا ترکیبات نیتریـدی BN و رسوبات سوزنی شکل احتمالا ترکیبات بورایـد کـروم Cr<sub>2</sub>B میباشد. با افزایش دمای اتصالدهی از C° 1050به C°1150 کسر سطحی رسوبات کروی کاهش و در مقابل ترکیبات سوزنی افزایش مییابد (شکل (7-ب)). با افزایش بیشتر دمای اتصالدهی تا °1200 مقدار ترکیبات سوزنی هر دو کاهش می یابد (شکل (7-ج)).روه و همکاران [27] گزارش نمودند در ناحيه متاثر از نفوذ اتصال TLP فولاد UNS S32750 با استفاده از لايه واسط Fe-2.3B-5.30Si در دمای Ce-2.3B به مدت 16 min فازهای میله ای و دانه ای شکل غنبی از عناصر Cr ،B و N تشکیل می شود که به عنوان فازهای نیترید بور و بورایـد کـروم شناسایی شدند. کاهش کسر سطحی ترکیبات بینفلزی تشکیل شده در ناحیه متاثر از نفوذ با افزایش دمای پیونددهی را می توان به افزایش نرخ نفوذ و افزایش حد حلالیت عناصر آلیاژی در فلز پایه نسبت داد. به عبارت دیگر با افزایش پیونددهی، تجمع عناصر MPD و ایجاد ترکیبات بینفلزی ناخواسته در ناحیه متاثر از نفوذ کاهش می یابد. از طرفی همانگونه که از مطالعات ریزساختاری مشخص میشود با افزایش دمای اتصالدهمی از ℃ 1050 به ℃ 1200، عمده رسوبات و تركيبات بينفلزي سوزنی غنی از عناصر B و Cr کاهش می یابد و تغییر چندانی در رسوبات غنی از N ایجاد نمیگردده که می توان آن را به سطح انرژی کمتر رسوبات نیترید بور (شکل (12)) و در نتیجه پایداری بیشتر و دمای انحلال بالاتر این ترکیبات نسبت داد.

3-4- ارزيابي خواص مكانيكي

بررسی تاثیر دمای اتصالدهی بر خواص مکانیکی نمونههای اتصال داده شده، دلالت بر تاثیر قابل ملاحظهی دمای اتصال-دهی بر استحکام نمونهها داشت. همانطور که در شکل (13) نشان داده شده است، با افزایش دمای اتصالدهی از C° 1050 به C، 1200℃، افـزایش اسـتحکام برشـی نمونـهمـا بـه ترتیـب از 450±10 MPa به 450±10 KPa درصد استحكام برشی فولاد پایه) میگردد. توضیح آنکه تشکیل ترکیبات بینفلزی از قبیل BN و Cr<sub>2</sub>B در ناحیه متاثر از نفوذ موجب ایجاد مراکز تمرکز تنش و ایجاد مسیری آسان برای اشاعه ترک مے شـود و کاهش قابل ملاحظهی استحکام در دمای C° 1050را موجب می شود. در مقابل با افزایش دمای اتصال دهی تا C° 1200 و به دنبال آن کاهش محسوس ترکیبات بینفلزی در ناحیـه متـاثر از نفوذ موجب افزایش چشمگیر استحکام برشی تا حدود % 83 استحکام فلز پایه می شود. همانگونه که از نتایج می توان برداشت نمود هماهنگی خوبی بین مطالعات ریزساختاری و استحكام برشي نمونهها برقرار ميباشد.

### 4-نتيجه گيرى

در پژوهش حاضر تاثیر دمای پیونددهی بر تغییرات ریزساختاری موضع اتصال مجموعـه AISI 2205/BNi-3/AISI 2205 مـورد مطالعه و بررسی واقع شد. از مهمترین نتایج پژوهش مـیتـوان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزایش دمای عملیات حرارتی تـاثیر چشـمگیری بـر نسبت فازی آستنیت و فریت در فولاد پایه دارد، اما در دمای 2° 1050 تقریبا نسبت فازی 50/50 آستنیت به فریت بازیابی می شود. - مـدت زمـان لازم بـرای تکمیـل انجمـاد هـمدمـا در فـولاد 1050 2005 AISI با استفاده از لایه واسط 3-BNI در دمـای 2° 1050 در حدود 28 دقیقه تخمین زده شد، مقدار واقعی ایـن زمـان در کمتر از 20 دقیقه می باشد که اختلاف مقداری تخمینی و واقعی را می توان به فرضیات مسئله مربوط نمود.

- نفوذ عنصر بور از ناحیه اتصال به فلز پایه موجب تشکیل ترکیبات بینفلزی از جمله BN و Cr<sub>2</sub>B در فلز پایه مجاور Materials Science and Engineering, 2002, Vol 338, pp 166-181

[11]- Zhou Y, Gale WF, North TH. Modelling of transient liquid phase bonding. *Int Mater Rev* 1995;40:181–96.

[12] MacDonald WD, Eagar TW. Transient liquid phase bonding process. *Met Sci Joining Proc Symp.* TMS Fall Meet The Metal 1992:93–100.

[13]- Cook G. O., Sorensen C. D.," Overview of

Transient Liquid Phase and Partial Transient Liquid

Phase Bonding<sup>"</sup>, *Journal of Material Science*, 2011, Vol.

46, pp 5305-5323.

[14]- Yuan X, Kang C Y, Kim M B. Microstructure and XRD analysis of brazing joint for duplex stainless steel using a Ni–Si–B filler metal [J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(9): 923–931.

[15]- Rhee B., Roh S., Kim D.," Transient Liquid Phase

Bonding of Nitrogen Containing Duplex Stainless Steel UNS S31803 using Ni-Cr-Fe-Si-B Insert Metal<sup>"</sup>,

Materials Transactions, 2003, Vol. 44, 1014-1023.

[16]- X. Yuan, M. Kim, Y. Cho, "Microstructures, Mechanical and Chemical Properties of TLP-Bonded Joints in a Duplex Stainless Steel with Amorphous Ni-Based Insert Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, Vol. 43

[17]- Roh. S, Lee. C, Formation of Secondary Phases and Their Effect on the Mechanical Properties of Joints Formed by TLP Bonding Using Fe–B–Si Insert Metal in Duplex Stainless Steel, *Metals and Materials International*, 2018,

[18]- D. S. Petrovic, M. Pirnat, "The effect of cooling

rate on the solidification and microstructure evolution in duplex stainless steel: a DSC study", *Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012

[19]- Pouranvari. M, "Isothermal Solidification During Transient Liquid-Phase Bonding of GTD-111/Ni-Si-B/GTD-111" *MTAEC9*, 48(1) 113 (2014)

[20]- Y. Zhou, W. F. Gale, T. H. North," *Modelling of transient liquid phase bonding*", International materials reviews, 1995, Vol23, pp 2905-2915

[21]- E. Azqadan, A. Ekrami, "Transient liquid phase bonding of dual phase steels using Fe-based, Ni-based, and pure Cu interlayers" Journal of Manufacturing Processes, 2017, Vol30, pp 106-115

[22]- م. مصلایی، ع. ا. اکرامی، "تاثیر دمای پیونددهی بر سینتیک انجماد همدما حین اتصال دهی از طریق مایع نافذ گذرا مجموعـهIN-738LC/BNi-3/IN-738LC "، هشتمین همایش

ملی دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی ایران، ۱۳۸۷

[23]- The Japan Institute of Metals: Metals Data Book, (Maruzen, 1993) pp. 21–22

[24]- Yuan X. J., Kang C. Y., Kim M. B.,

موضع اتصال می شود. - افزایش دمای اتصال دهی از 2° 1050 به 2° 1200 باعث کاهش درصد ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در حدود % 45 در منطقهی متاثر از نفوذ گردید.

- کاهش درصد ترکیبات بینفلزی در منطقه ی متاثر از نفوذ موجب بهبود استحکام برشی اتصالات می شود به طوری که با افزایش دمای اتصال دهی از 2°1050 به ۲۵ 2000 استحکام برشی اتصالات بیش از % 20 افزایش (از 450MPa به (از 550MPa) افزایش یافت.

منابع

[1]-ماسوری. داریوش،" مقدمهای بر فولادهای زنگنزن دوفازی"، خبرنامه انجمن خوردگی ایران، 1391، 18، 1.

[2]- Forgas A., "Ferrite Quantification Methodologies for Duplex Stainless Steel", Journal of Aerospace Technology and Management, 2016, Vol. 8, pp 357-362 [3]-حشمت دهكردى ابراهيم، سپهرزاد. رسول، باجقلى.محمـد [3]-حشمت دهكردى ابراهيم، سپهرزاد. رسول، باجقلى.ابران، ابراهيم، "خوردگى قطعات جوشكارى شده"، 1393، ايران، انجمن خوردگى ايران.

[4]- Ramazani A, Mukherjee K, Abdurakhmanuv A, Prahl U, Schleser M, Reisgen U, et al. Micro–macrocharacterisation and modelling of mechanical properties of gas metal arc welded (GMAW) DP600 steel. *Mater Sci Eng* A 2014;589:1–14

[5]- Lee JH, Park SH, Kwon HS, Kim GS, Lee CS. Laser, tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance. *Mater Des* 2014;64:559–65

[6]- Chabok A, van der Aa E, De Hosson JTM, Pei YT. Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel. *Mater Des* 2017;124:171–82

[7]- Yurtisik K., Tirkes S., Dykhno I., "Characterization of Duplex Stainless Steel Weld Metals Obtained by Hybrid Plasma-Gas Metal Arc Welding", *Soldag. InSp*, 2013, Vol. 18, pp 207-216

[8]- Azqadan E, Ekrami A, Transient liquid phase bonding of dual phase steels using Fe-based, Ni-based, and pure Cu interlayers, *Journal of Manufacturing Processes* 30 (2017) 106–115

[9]- Gale, W.F; Butts, D.A. *Transient liquid phase bonding*. Sci. Technol. Weld. Join. 2004, 9, 283–300

[10]- Chen T.H., Yang J.R., "Microstructural Characterization of Simulated Heat Affected Zone in Anitrogen-Containing 2205 Duplex Stainless Steel", [M]. Tokyo: Maruzen,1993: 21–22.

Superalloys". *Journal of Material Science*, 2001, Vol. 36, pp 1539–1546

[27]- Roh S., Lee C., Rhee B., "Effects of Austenite Regeneration Heat Treatment on the TLP Bonding of Duplex Stainless steel UNS S32750 using Fe-B-Si Insert Metal", *Materials Chemistry and Physics*, 2018, Vol. 207, pp 402-411

[28]- O. Kubaschewski, C.B. Alcock, *Metallurgical Thermochemistry*, 5th edn. (Pergmon Press, Oxford, 1979), pp. 336–356

"Microstructural Evolution and Bonding Behavior during Transient Liquid-Phase Bonding of a Duplex Stainless Steel using two Different Ni-B-Based Filler Materials", *Metallurgical and Materials transactions A*, 2011, Vol 42

[25]- Pouranvari M., Ekrami A., Kokabi A. "Solidification and Solid-State Phenomena during TLP Bonding of IN718 Superalloy using Ni–Si–B Ternary Filler Alloy", *Journal of Alloys Compound*, 2013, Vol. 563, pp 143–149

[26]- The japan institute of metals. metals data book