



امکان پذیری اتصال فاز مایع گذرای فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S32750 به فولاد آستنیتی AISI 304

روح الله عبدالوند^{1*}، مسعود عطاپور¹، مرتضی شمعیان¹، علیرضا علافچیان²

1- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

2- پژوهشکده نانو فناوری و مواد پیشرفته، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

(دریافت مقاله: 1395/03/16؛ دریافت نسخه نهایی: 1395/08/29)

چکیده

اتصال فاز مایع گذرای فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S32750 به فولاد آستنیتی زنگ نزن AISI 304 با استفاده از لایه میانی BNi-2 در دمای 1050 °C و به مدت زمان 45 دقیقه انجام شد. ریز ساختار اتصال با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز تفکیک انرژی بررسی شد. به منظور تخمین خواص مکانیکی اتصال از آزمون ریزسختی سنجی و استحکام برشی استفاده شد. در ناحیه ی اتصال هیچ گونه ترکیب یوتکتیکی مشاهده نشد که به معنای کامل شدن انجماد همدم بود. ناحیه ی اتصال از دو قسمت انجماد همدم و منطقه ی متاثر از نفوذ تشکیل شد. استحکام برشی اتصال حدود 0/7 استحکام برشی فولاد زنگ نزن دوفازی بود. بررسی سطوح شکست نشان داد که نمونه متصل شده در زمان 45 دقیقه به صورت نرم شکسته بود.

کلمات کلیدی: اتصال فاز مایع گذرا، فولاد زنگ نزن دوفازی، فولاد زنگ نزن آستنیتی، اتصال غیر مشابه.

The possibility of the TLP bonding between UNS S32750 and AISI 304

R. Abdolvand¹, M. Atapour¹, M. Shamanian¹, A. Allafchian²

1- Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2-Nanotechnology and Advanced Materials Institute, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

(Received 5 June 2016 ; Accepted 19 November 2016)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: r.abdolvand@ma.iut.ac.ir

Abstract

Transient liquid phase bonding of UNS S32750 super duplex stainless steel to AISI 304 austenitic stainless steel using BNi-2 interlayer was carried out at 1050 oC for 45 min. Microstructure analyses of the joint were carried out using optical microscopy, scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. Microhardness indentation and shear strength test were performed to assess mechanical behavior of the joint. No eutectic contents was seen at the joint and thus Isothermal solidification was completed at 45 min bonding time. The shear strength of the joint was about 0.7 of duplex stainless steel shear strength. Fractographic studies revealed that the fracture mode was completely ductile in the case of the joint made at bonding time of 45 min.

Keywords: Transient liquid phase, Duplex stainless steel, Austenitic stainless steel, Dissimilar joint.

1- مقدمه

GTAW و فلزات پرکننده ی ER2594 و ER309L پرداختند. آن ها نشان دادند که اتصال ایجاد شده با هر دو فلز پرکننده استحکام کششی، انرژی ضربه و خواص خمشی خوبی داشت. در پژوهشی دیگر ویگرامان و همکاران [11]، اتصال نفوذی غیرمشابه فولاد SAE 2205 و AISI 1035 را بررسی کردند. آن ها گزارش دادند که با افزایش دمای اتصال دهی استحکام اتصال افزایش یافت. از مشکلات موجود در اتصال غیرمشابه فولاد های زنگ نزن می توان به وجود ترکیبات سخت و ترد در ناحیه اتصال حاصل از جوشکاری ذوبی اشاره کرد [1]. فرایند اتصال فاز مایع گذرا (TLP) تلفیقی از فرایند های اتصال نفوذی و لحیم کاری سخت است. در این فرایند یک لایه ی میانی با نقطه ی ذوب پایین تر از نقطه ی ذوب اجزای متصل شونده و حاوی عناصر کاهش دهنده ی نقطه ذوب (B, Si و P) در بین قطعات قرار می گیرد. سپس قطعات را تا دمای اتصال که معمولا کمی بالاتر از نقطه ی ذوب لایه ی میانی است حرارت می دهند. با رسیدن به دمای اتصال لایه ی میانی ذوب می شود و با ننگه داری قطعات در این دما؛ در اثر نفوذ عناصر مختلف به خصوص عناصر کاهنده نقطه ی ذوب، مذاب تشکیل شده به صورت همدمنا منجمد می شود. در این روش به علت وجود لایه نازک مذاب، به فشار کمتری نسبت به فرایند جوشکاری نفوذی نیاز است و از طرف دیگر به دلیل کامل شدن انجماد همدمنا استحکام اتصال بالاتری نسبت به روش لحیم کاری سخت حاصل می شود [12].

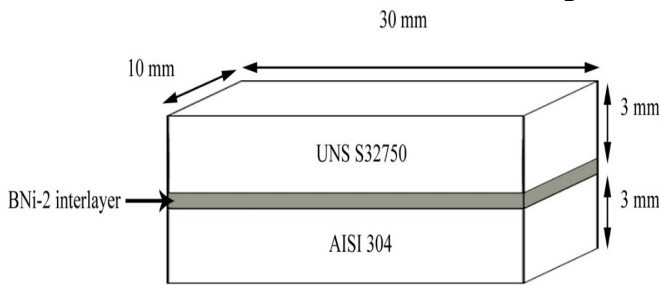
اخیرا برخی از پژوهشگران از روش اتصال فاز مایع گذرا برای اتصال مشابه فولاد های زنگ نزن استفاده کرده اند

امروزه اتصال غیر مشابه فولاد های زنگ نزن با هدف کاهش هزینه ها و استفاده همزمان از ویژگی های مختلف این آلیاژها، در صنایع مختلفی هم چون صنعت نفت و گاز، صنایع دریایی و پتروشیمی مورد استفاده قرار می گیرد [1]. فولادهای زنگ نزن آستنیتی به علت برخورداری از مقاومت به خوردگی بالا و جوش پذیری مناسب در صنایع مختلفی استفاده می شوند. اما این آلیاژها جهت استفاده در برخی از محیط های متداول نظیر آب دریا، محیط های حاوی یون کلر و محیط های بسیار قلیایی انتخاب مناسبی نیستند [2]. از طرف دیگر فولاد زنگ نزن دو فازی از مقادیر تقریبا یکسان آستنیت و فریت تشکیل شده و دارای مقاومت به خوردگی عالی در محیط های بسیار خورنده است. مقاومت بالای این آلیاژها در برابر خوردگی حفره ای؛ خوردگی شیاری و ترک خوردن خوردگی تنشی به خصوص در حضور یون کلر باعث افزایش روز افزون استفاده از آن ها به عنوان جایگزین فولاد های زنگ نزن آستنیتی در صنعت شده است [3 و 4]. این فولاد ها به صورت عمده در مبدل های حرارتی حاوی آب شور یا آب کلر دار، خطوط لوله و مخازن استخراج نفت و گاز از چاه های ترش، پالایشگاه ها و محیط های دارای یون کلر و سولفید استفاده می شود [5 و 6].

تاکنون اتصال غیرمشابه فولاد های زنگ نزن به روش های مختلف جوشکاری ذوبی و حالت-جامد بررسی شده است [7-9]. رحمانی و همکاران [10]، به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن UNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 با روش

دبی 5 لیتر بر دقیقه، در دمای 1050 درجه سانتی گراد و زمان 45 دقیقه انجام شد.

برای ارزیابی ریزساختاری، نمونه‌ی متصل شده به وسیله سنباده کاربرد سیلیسیم از شماره 240 تا 2400 سنباده زنی و سپس با خمیر الماس پولیش شد. بعد از اچ کردن الکتريکی نمونه‌ی محلول آبی 10 درصد HNO_3 ، ریزساختار مناطق مختلف قطعه-ی متصل شده توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز تفکیک انرژی (EDS)¹ انجام شد. در نهایت استحکام برشی قطعه‌ی متصل شده اندازه‌گیری و سطح شکست آن با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. شکل (2) شماتیک نگه‌دارنده‌ی تست برش را نشان می‌دهد.



شکل 1- نحوه‌ی سر هم بندی قطعات.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریز ساختاری

شکل 3 (الف) تصویر میکروسکوپ نوری ریز ساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 را نشان داده است. همان طور که دیده می‌شود، ریز ساختار معمول فولادهای آستنیتی شامل دانه‌های آستنیت هم محور در این تصویر مشاهده می‌شود.

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلزهای پایه و لایه‌ی میانی

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)									
B	Mo	Cr	Ni	Mn	Si	C	N	Fe	مواد
-	۳/۰۰	۲۲/۴۰	۵/۸۶	۱/۴۱	۰/۴۰	۰/۰۳	۰/۱۶	Bal.	UNS S32750
-	-	۱۷/۵	۸	۲/۰۰	۰/۷۵	۰/۰۷	۰/۱۰	Bal.	AISI 304
۳/۲	-	۷	Bal.	-	۴/۵	۰/۰۶	-	۳	BNi-2

¹Scanning Electron Microscope

²Energy dispersive X-ray spectroscopy

[13-15]. ولی تاکنون گزارشی راجع به اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن دوفازی به فولاد زنگ نزن آستنیتی ارائه نشده است. بنابراین یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی امکان پذیری اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن دو فازی UNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304، با استفاده از روش فاز مایع گذرابود..

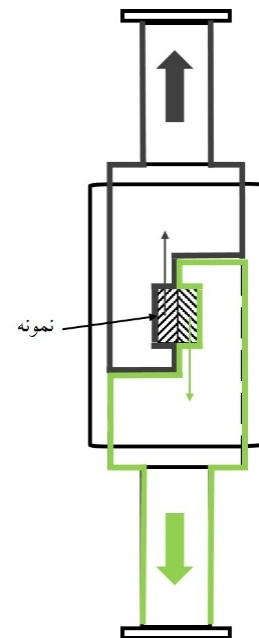
2- روش تحقیق

در این پژوهش، از فولاد زنگ نزن دو فازی UNS S32750 و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 به عنوان فلزهای پایه و از آلیاژ تجاری BNi-2 به عنوان لایه‌ی میانی استفاده شد. این لایه میانی به علت دمای ذوب پایین و ترشوندگی خوب روی فولادها، در این پژوهش استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزهای پایه و لایه‌ی میانی در جدول 1 آمده است. برای اتصال، نمونه‌هایی از فولاد زنگ نزن دوفازی و فولاد زنگ نزن آستنیتی به ابعاد $3 \times 10 \times 30$ mm تهیه شد.

سپس سطح نمونه‌های فولاد دو فازی و آستنیتی با کاغذ سنباده تا شماره 1200 صیقل کاری شدند. از یک فویل BNi-2 به ضخامت $50 \mu m$ و ابعاد 10×30 mm به عنوان لایه‌ی میانی استفاده شد. نمونه‌های صیقل کاری شده به همراه لایه‌ی میانی به مدت یک ساعت در حمام آلتراسونیک با استفاده از استن پاک سازی و تا قبل از عملیات درون محلول استن نگه‌داری شدند. برای اتصال، فویل BNi-2 بین قطعات قرار داده شد. شکل 1 نحوه‌ی سر هم بندی قطعات را نشان می‌دهد. عملیات اتصال دهی در کوره‌ی ای با اتمسفر گاز آرگون با

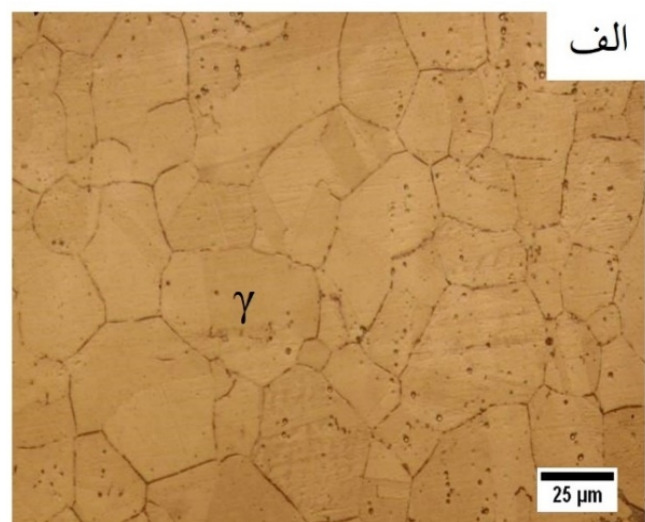
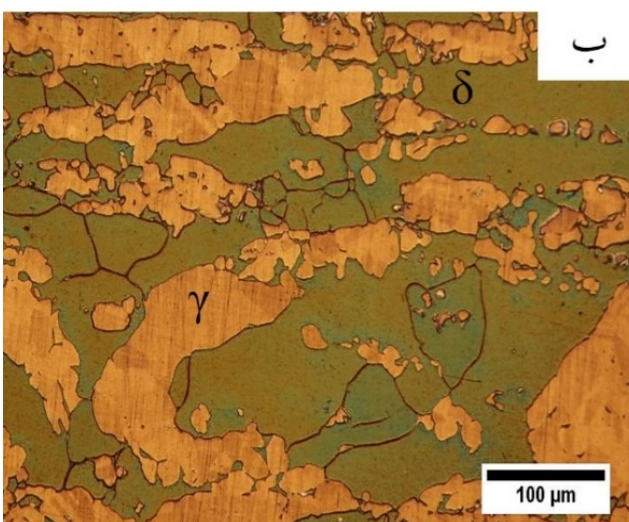
مشخص شده، در جدول 2 آورده شده است. با توجه به شکل (4) و جدول (2)، ناحیه اتصال به دو ناحیه مجزا تقسیم شده است:

الف - منطقه ی انجماد همدا (ISZ) که متشکل از فاز پرویوتکتیک محلول جامد نیکل γ بود (ناحیه ی A). نیروی محرکه ی انجماد همدا بوجود آمدن یک تغییر ترکیب شیمیایی در دمای ثابت به خاطر نفوذ عناصر آلیاژی بین لایه ی میانی و فلز پایه بود [16]. در واقع بعد از ذوب شدن لایه ی میانی مقداری از آلیاژهای پایه در لایه مذاب حل شد. افزایش غلظت عناصر فلزپایه در مذاب (Mo و Fe، Cr) و نفوذ عنصر کاهنده نقطه ذوب (B) به فلزات پایه، باعث افزایش دمای لیکوییدوس مذاب شد. بنابراین مذاب از فصل مشترک لایه میانی/فلزپایه به صورت همدا منجمد شد. جهت حرکت این جبهه انجماد به سمت مرکز لایه میانی بود. با مقایسه ترکیب شیمیایی اولیه لایه میانی (جدول 1) و لایه میانی بعد از اتصال (جدول 2) افزایش مقدار عناصری مانند آهن، کرم و به خصوص مولیبدن، در ناحیه ی انجماد همدا، دلیل واضحی بر ذوب شدن فلزپایه در فصل مشترک فلزپایه-لایه ی میانی بود. نکته دیگر این بود که آنالیز EDS (شکل 4-ب) در راستای سطح مقطع اتصال نشان داد که مقدار سیلیسیم در ناحیه اتصال بسیار زیاد تر از نواحی اطراف است. این نکته با در نظر گرفتن



شکل 2- شماتیک نگه دارنده تست برش.

در شکل 3 (ب) تصویر میکروسکوپ نوری ریز ساختار فولاد زنگ نزن دو فازی UNS S32750 آورده شده است. ساختار متشکل از دو فاز فریت و آستنیت با مقدار 48 درصد حجمی فریت بود. فاز قهوه ای آستنیت و فاز سبز رنگ فریت است. شکل (4) تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی اتصال انجام شده در دمای 1050 درجه سانتی گراد و زمان 45 دقیقه را نشان داده است. آنالیز مناطق مختلف اتصال که در شکل (4)



شکل 3- ریز ساختار میکروسکوپ نوری

الف) فولاد زنگ نزن آستنیتی و ب) فولاد زنگ نزن دو فازی (مناطق قهوه ای آستنیت و مناطق سبز فریت هستند).

به فصل مشترک فلز پایه-لایه میانی و تشکیل یک منطقه‌ی فوق اشباع از بور در این ناحیه بود. حضور همزمان بور و بورایدزهای قوی مانند کروم، آهن، نیکل و مولیبدن باعث تشکیل بورایدهای این عناصر شد. آنالیز EDS (جدول 3) از ناحیه متأثر از نفوذ فولاد زنگ نزن آستنیتی (شکل 5-الف) وجود بورایدها و کربوبورایدهای آهن و کروم در این ناحیه را پیشنهاد کرد. کاهش حلالیت کربن در اثر ورود بور به ساختار آهن [18]، موجب خارج شدن کربن از ساختار آهن شد که این کربن با عناصر آهن و کروم تشکیل کربوبوراید داد. با توجه به آنالیز EDS (جدول 3) از ناحیه متأثر از نفوذ فولاد زنگ نزن دوفازی (شکل 5-ب))، علاوه بر وجود بورایدهای کروم، نیکل، آهن و مولیبدن، در این ناحیه نیتريد بور نیز تشکیل شد. تشکیل شدن نیتريد بور در این ناحیه به حضور نیتروژن در فولاد زنگ نزن دوفازی و پایدارتر بودن آن نسبت به سایر بورایدها و نیتريدها [19] نسبت داده شد. این مشاهدات و نتایج در سایر پژوهش‌های مشابه گزارش شده است [18-20].

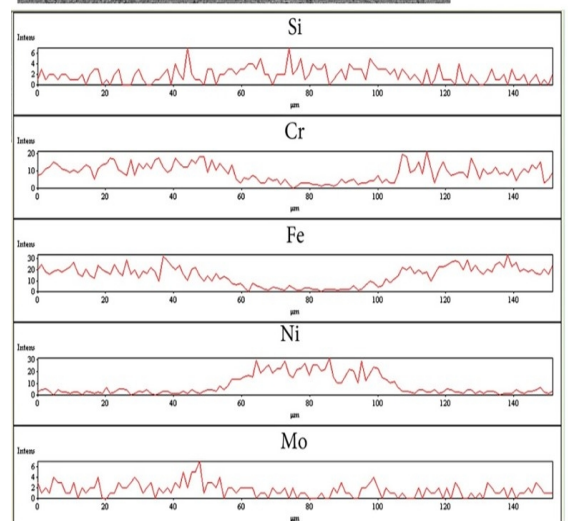
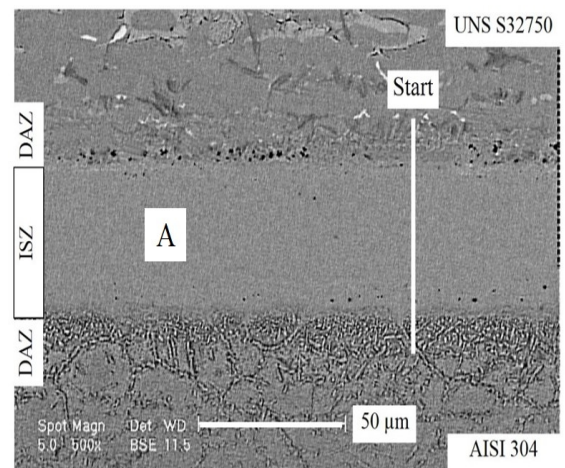
3-2- خواص مکانیکی اتصال

شکل 6 استحکام برشی نمونه‌ی متصل شده در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه را در مقایسه با استحکام برشی اسمیفلزات پایه نشان داده است. استحکام برشی در نمونه‌ی متصل شده به مدت 45 دقیقه و دارای انجماد همدمای کامل حدود 0/7 استحکام برشی فولاد زنگ نزن دوفازی و 1/1 برابر استحکام برشی فولاد زنگ نزن آستنیتی بود. عدم وجود ترکیبات ترد یوتکتیک، که مانند نقاط تمرکز تنش عمل می‌کنند و کامل شدن انجماد همدمای باعث استحکام بالای اتصال شده است. شکل (7) تصویر میکروسکوپ الکترونی از محل شکست اتصال انجام شده به مدت 45 دقیقه را نشان داده است.

جدول 2- ترکیب شیمیایی ناحیه‌ی مشخص شده در شکل 4.

منطقه	عنصر (درصد وزنی)						
	C	Mo	Fe	Si	Cr	Ni	B
A	۳/۴۴	۶۷/۱۹	۱۱/۱۹	۳/۳۲	۱۳/۲۵	۱/۶۱	-
	محلول جامد γ -Ni (ISZ)						

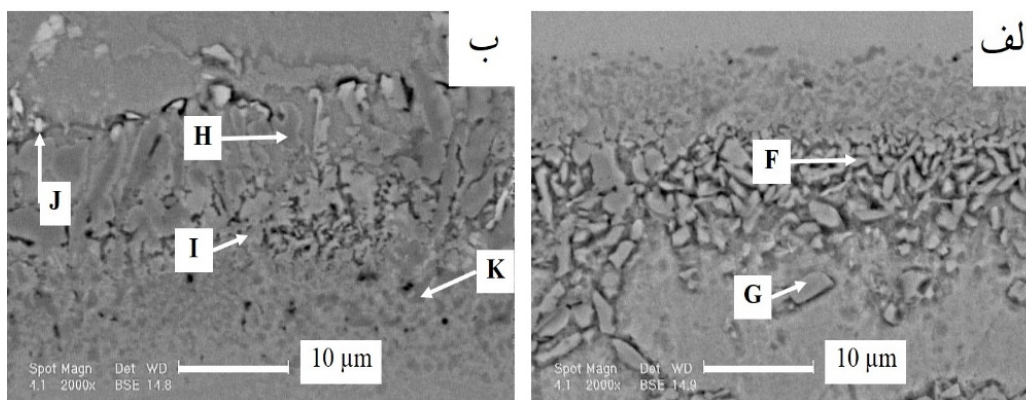
ضریب نفوذ سیلیسیم در نیکل و ضریب نفوذ بور در نیکل (به ترتیب $3/09 \times 10^{-14}$ و $6/22 \times 10^{-11}$ مترمربع بر ثانیه [17]) توجیه پذیر بود. در واقع حین اتصال دهی عنصر سیلیسیم به علت نفوذ کم در مرکز اتصال متمرکز شد و بنابراین عنصر اصلی نفوذ کننده بور بود.



شکل 4- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی اتصال انجام شده در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه و (ب) آنالیز EDS از خط مشخص شده در قسمت الف.

(ب) مناطق متأثر از نفوذ (DAZ)¹ (شکل 5) که شامل رسوبات غنی از بور بود. علت بوجود آمدن این ناحیه، نفوذ بور

¹Diffusion affected zone



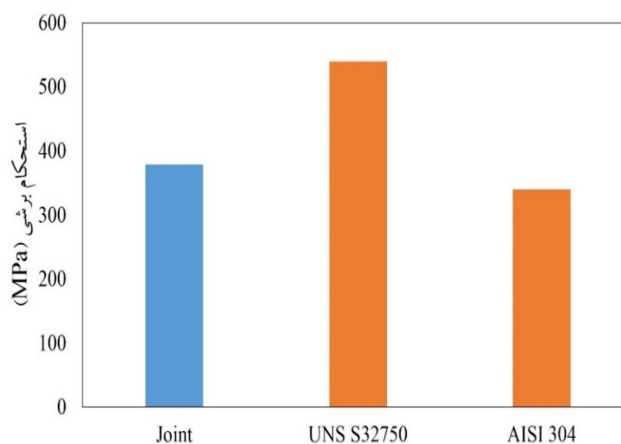
شکل 5- تصویر میکروسکوپ الکترونی از مناطق متأثر از نفوذ الف) فولاد زنگ نزن آستینیتی و ب) فولاد زنگ نزن دوفازی.

جدول 3- ترکیب شیمیایی مناطق مشخص شده در شکل 5.

فاز پیشنهادی	عنصر (درصد وزنی)								منطقه
	N	C	Mo	Fe	Si	Cr	Ni	B	
کربو-بوراید غنی از آهن و کروم	۴/۳۲	۲۳/۴۸	۱/۲۳	۲۲/۰۶	۰/۱۰	۲۰/۰۲	۰/۵۸	۲۸/۲۱	F
کربو-بوراید غنی از آهن و کروم	-	۲۰/۴۱	۱/۲۳	۳۰/۰۶	۰/۰۱	۲۴/۰۲	۴/۰۶	۲۰/۲۱	G
بوراید غنی از آهن و نیکل	-	-	۲/۹۴	۲۱/۴۷	۰/۹۹	۸/۱۴	۲۴/۶۳	۴۱/۸۳	H
بوراید غنی از آهن و کروم	-	-	۳/۸۳	۲۵/۲۱	۰/۴۴	۳۳/۱۲	۰/۸۴	۳۶/۵۶	I
بوراید غنی از کروم و مولیبدن	-	-	۲۶/۵۶	۹/۹۴	۱/۲۷	۱۴/۳۶	۳/۴۹	۴۴/۳۸	J
نیتريد بور	۲۱/۶۴	-	۱/۲۶	۲۴/۰۹	۱/۰۴	۲۰/۳۴	۱/۲۷	۳۰/۳۶	K

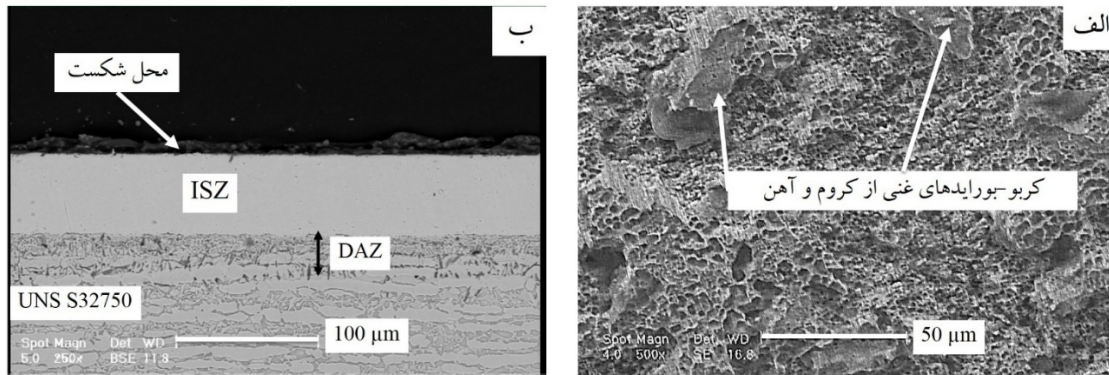
محل شکسته شدن قطعه ناحیه‌ی متأثر از نفوذ فولاد 304 تشخیص داده شد. با توجه به آنالیز EDS منطقه متأثر از نفوذ فولاد 304 (جدول 2)، این رسوبات بورایدهای غنی از آهن و کروم تشخیص داده شد.

به منظور بررسی دقیق‌تر خواص موضع اتصال، تغییرات سختی در این منطقه بررسی شد. نتایج حاصل از این آزمون در شکل 8 ارائه شده است. با توجه به شکل (8)، مقدار سختی از ناحیه آلیاژهای پایه به سمت منطقه اتصال افزایش یافت و سپس در منطقه مرکزی اتصال کاهش پیدا کرد. دلیل سختی پایین ناحیه مرکزی اتصال کامل شدن انجماد همدمای در این نمونه بود. افزایش مقدار سختی در مناطق متأثر از نفوذ نمونه‌ها به وجود فازهای سخت بین‌فلزی (بوراید عناصری مانند آهن، کروم و مولیبدن) در این مناطق نسبت داده شد. همچنین مقدار سختی منطقه‌ی متأثر از نفوذ فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی بیشتر از مقدار میانگین سختی در ناحیه‌ی متأثر از نفوذ فولاد زنگ نزن آستینیتی بود. دلیل این امر نیز به تفاوت ترکیب شیمیایی و

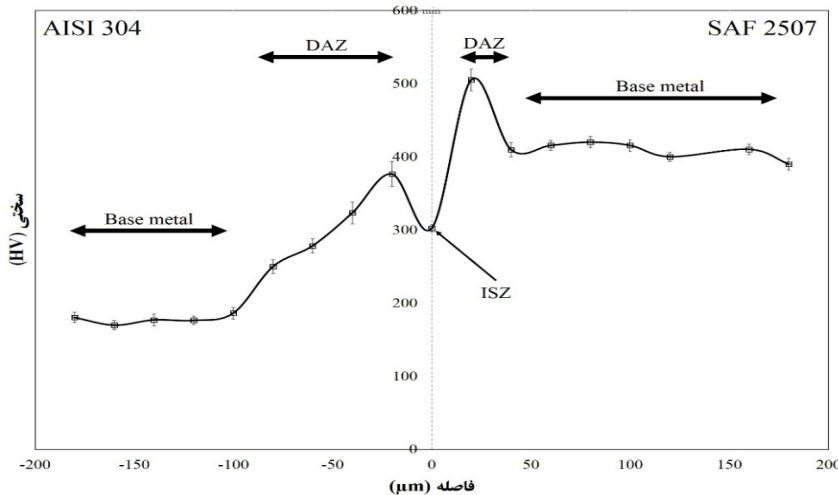


شکل 6- استحکام برشی نمونه‌ی متصل شده در دمای 1050 درجه سانتیگراد به مدت 45 دقیقه درمقایسه با استحکام فلزهای پایه.

با توجه به شکل (7-الف) سطح شکست نمونه متصل شده به مدت 45 دقیقه کاملاً نرم بود. دلیل این امر کامل شدن انجماد همدمای در این نمونه بود. در این سطح شکست رسوباتی مشاهده شد که با بررسی سطح مقطع شکست (شکل 7-ب)،



شکل 7- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) سطح شکست نمونه‌های متصل شده در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه و (ب) سطح مقطع نمونه شکسته شده.



شکل 8- تغییرات سختی در نمونه متصل شده در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به مدت 45 دقیقه.

4- نمونه‌ی متصل شده در زمان 45 دقیقه دارای شکست نرم بود.

منابع

- 1- Lippold, J.C., Kotecki, D.J., Welding metallurgy and weldability of stainless steels, John Wiley, New Jersey, 2005.
- 2-Bhattacharya, A., Kumar, R., "Dissimilar joining between austenitic and duplex stainless steel in double-shielded gma: a comparative study", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 31, NO. 3, pp. 300-310, 2016.
- 3-Badji, R., Bouabdallah, B., Bacroix, B., Kahloun, C., Belkessa, B., Maza, H., "Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds", Materials Characterization, Vol. 59, 447-453, 2008.
- 4-Muthupandi, V., Srinivasan, P.B., Seshadri, S., Sundaresan, S., "Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds", Materials Science and Engineering: A, Vol. 358, 9-16, 2003.

مورفولوژی رسوبات سخت این دو ناحیه نسبت داده شد.

4- نتیجه گیری

- اتصال فاز مایع گذرای فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S32750 و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد و زمان 45 دقیقه با موفقیت انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:
- 1- هیچ گونه ترکیب یوتکتیکی در ناحیه‌ی اتصال مشاهده نشد.
 - 2- انجام همدمای در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد در زمان 45 دقیقه کامل شد.
 - 3- استحکام برشی نمونه‌ی متصل شده حدود 0/7 برابر استحکام برشی فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی بود.

- pp. 5305-5323, 2011.
- 13-Yuan, X., Kim, M.B., Kang, C.Y., "Characterization of transient-liquid-phase-bonded joints in a duplex stainless steel with a Ni-Cr-B insert alloy", *Materials Characterization*, Vol. 60, NO. 11, pp. 1289-1297, 2009.
- 14-Atabaki, M.M., Wati, N.J., Jamaliah, I., "Transient liquid phase diffusion bonding of stainless steel 304", *Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 18, NO. 3, pp. 177-186, 2012.
- 15-Khan, T., Kabir, M., Bulpett, R., "Effect of transient liquid-phase bonding variables on the properties of a micro-duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 372, NO. 1, pp. 290-295, 2004.
- 16-Yuan, X., Kim, M.B., Kang, C.Y., "Characterization of transient-liquid-phase-bonded joints in a duplex stainless steel with a Ni-Cr-B insert alloy", *Materials Characterization*, Vol. 60, NO. 11, pp. 1289-1297, 2009.
- 17- 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 and compounds*, Vol. 563, pp. 143-149, 2013.
- 18-Yuan, X., Kang, C.Y., "Microstructural characteristics in vacuum TLP (Transient Liquid Phase) bonds using a novel iron-based interlayer based on duplex stainless steel base metal alloyed with a melting-point depressant", *Vacuum*, Vol. 99, pp. 12-16, 2014.
- 19- 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", *Materials Transactions*, Vol. 44, NO. 5, pp. 1014-1023, 2003.
- 20- Arafin, M., Medraj, M., Turner, D., Bocher, P., "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, NO. 1, pp. 109-119, 2007.
- 5-Centeno, D.M.A., Carvalho, Jr. C., Brandi, S.D., "Brazing of UNS S32101 and UNS S32304 lean duplex stainless steels and UNS S32750 super duplex with AWS A5.3 BNi-7 (Ni-Cr-P) filler metal", *Welding International*, Vol. 29, NO. 12, pp. 937-945, 2015.
- 6- Gunn, R.N., *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*, Woodhead Publishing, 1997.
- 7-Kumar, S.S., Murugan, N., Ramachandran, K., "Influence of tool material on mechanical and microstructural properties of friction stir welded 316L austenitic stainless steel butt joints", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 58, pp. 196-205, 2016.
- 8-Eghlimi, A., Shamanian, M., Eskandarian, M., Zabolian, A., Szpunar, J.A., "Characterization of microstructure and texture across dissimilar super duplex/austenitic stainless steel weldment joint by austenitic filler metal", *Materials Characterization*, Vol. 106, pp. 208-217, 2015.
- 9-Ramkumar, K.D., Singh, A., Raghuvanshi, S., Bajpai, A., Solanki, T., Arivarasu, M., Arivazhagan, N., Narayanan, S., "Metallurgical and mechanical characterization of dissimilar welds of austenitic stainless steel and super-duplex stainless steel—A comparative study", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 19, pp. 212-232, 2015.
- 10-Rahmani, M., Eghlimi, A., Shamanian, M., "Evaluation of microstructure and mechanical properties in dissimilar austenitic/super duplex stainless steel joint", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, NO. 10, pp. 3745-3753, 2014.
- 11-Vigraman, T., Narayanasamy, R., Ravindran, D., "Microstructure and mechanical property evaluation of diffusion-bonded joints made between SAE 2205 steel and AISI 1035 steel", *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 156-169, 2012.
- 12-Cook III, G.O., Sorensen, C.D., "Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding", *Journal of materials science*, Vol. 46, NO. 16,