ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س



mme.modares.ac.ir

لحیم کاری سخت به کمک لیزر فولادهای زنگ نزن 321 و 410 با ماده پرکننده پایه نىكل BNi-2

 * على خرم 1 ، عائدجعفرى 2 محمود مرادى *

1- دكترى، مهندسى مكانيك، دانشگاه صنعتى خواجه نصيرالدين طوسى، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

* ملاير، صندوق يستى 65719-95863، moradi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 آبان 1395 پذیرش: 05 آذر 1395 ارائه در سایت: 15 دی 1395	در این مقاله ، لحیمکاری سخت به کمک لیزر فولادهای زنگ نزن آستنیتی (321) و مارتنزیتی (410) با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG 400 وات با ماده پرکننده پایه نیکل BNi-2 انجام پذیرفت. فرآیند لحیمکاری سخت به کمک لیزر در درزهای اتصال متفاوت انجام پذیرفت. میکروساختار و آنالیز ترکیب ماده پرکننده و اتصال با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. تست سختی
<i>کلید واژگان:</i> لحیم کاری سخت به کمک لیزر فولاد زنگ نزن 321 ماده پرکننده BNi-2 لیزر پالسی Nd:YAG	و کشش برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات لحیم کاری شده انجام شد. نتایج نشان میدهد که ماده پرکننده ترشوندگی و پخش شوندگی خوبی بر روی فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در فرآیند لحیم کاری سخت به کمک لیزر دارد. ماده پرکننده شامل محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم میباشد. اتصالات لحیم کاری شده عمدتا شامل محلول جامد نیکل و بورید نیکل در مرکز اتصال و بورید کروم در نزدیکی سطح مشترک با فلزپایه میباشد. میانگین میکروسختی ماده پرکننده 550 ویکرز و میانگین میکروسختی اتصالات لحیم کاری شده 500 ویکرز میباشد. استحکام کششی اتصالات لحیم کاری شده بین 200 تا 480 مگاپاسکال است که به سبب درزهای اتصال متفاوت است.

Laser brazing of 321 and 410 stainless steels using BNi-2 nickel-based filler metal

Ali Khorram¹, Abed Jafari², Mahmoud Moradi^{3*}

1- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Material and Metallurgy Engineering, Iran University of Industries and Mines (IUIM), Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

* P.O. B. 65719-95863, Malayer, Iran, moradi@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT In this paper, laser brazing of austenitic stainless steel (type 321) and martensitic stainless steel (type Original Research Paper Received 31 October 2016 410) was performed using 400W pulsed Nd:YAG laser with nickel-based filler metal (BNi-2). Laser Accepted 25 November 2016 brazing process was carried out at different gap distances. Microstructure and composition analysis of Available Online 04 January 2017 the filler metal and the brazed joints were examined by optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Mechanical properties of the brazed joints were measured in the form of Keywords: Micro hardness and tensile test. Results show that the filler metal has good wetting and spreading on Laser brazing 321 and 410 stainless steel in laser brazing process. Filler metal consists of nickel solid solution, nickel-321 stainless steel 410 stainless steel rich boride and chromium-rich boride. The laser brazed joints are mainly comprised of the nickel solid BNi-2 filler metal solution, nickel-rich boride in the center of the joints and chromium-rich boride near interface with pulsed Nd:YAG laser substrates. The average micro hardness for filler metal was 550 HV compared to 500 HV for laser brazed joints. The tensile strength of laser brazed joints is varied from 200 to 500 MPa because of different gap distances

1- مقدمه

می آورد. در لحیم کاری سخت ماده پرکننده بین سطوحی که روی هم قرار گرفتهاند در اثر کشش مویینگی توزیع میشود.

در فرآيند لحيم كارى سخت، مواد موجود تقريبا 56 درجه سانتيگراد بیشتر از دمای مایع شدگی مواد پرکننده (معمولا فلز) حرارت داده می شوند. ماده پرکننده به مایع تبدیل شده و تمام سطوح فلز را می پوشاند و یک پیوند آلیاژی با سطوح ایجاد می کند. لحیم کاری سخت معمولا در دمای 540 تا 1620 درجه سانتیگراد انجام می شود و یک فرآیند اتصال در دمای بالا به بسیاری از قطعات از دو و یا اجزای بیشتری تشکیل شدهاند که اغلب آنها برای همیشه به یکدیگر متصل می شوند تا از لحاظ ساختاری، مونتاژهای بدون نقصی تولید گردد. لحیم کاری سخت در برگیرنده یک مجموعه فرآیندهای جوشکاری می باشد که اتصال مواد را با حرارت دادن آنها تا دمای لحیم کاری در حضور یک ماده پرکننده که دارای دمای مایع شدگی بیش از 450 درجه سانتیگراد و دمای جامد شدگی کمتر از فلزپایه میباشد بوجود

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شمار میرود.

تفاوت اصلی بین لحیم کاری سخت و لحیم کاری نرم در این است که لحیم کاری سخت در دمای بالاتری انجام می شود. در فرآیندهای لحیم کاری نرم از فلزات اتصال دهندهای استفاده می کنند که دمای ذوب آنها از 450 درجه سانتیگراد تجاوز نکند.

فولادهای زنگ نزن اغلب در کاربردهایی که نیاز به مقاومت در برابر حرارت و خوردگی دارند استفاده میشوند. کروم یک ماده منحصر به فرد در فولادهای زنگ نزن می باشد و یک لایه غیرفعال بر روی سطح فولاد تشکیل می دهد که از خوردگی جلوگیری می کند. فولادهای زنگ نزن ماتنزیتی، فولاد تقسیم میشوند: فولاد زنگ نزن آستنیتی، فولاد زنگ نزن رسوب سختی. زنگ نزن فریتی، فولاد زنگ نزن دوتایی، فولاد زنگ نزن رسوب سختی. ورق های فولاد زنگ نزن 120 و 410 کاربرد گستردهای در صنایع مختلف از جمله صنعت هوایی دارند. کاربرد فولاد زنگ نزن 120 در رینگهای پره استاتور کمپرسور موتور توربین هوایی و کاربرد فولاد زنگ نزن ماتن 400 در پره استاتور کمپرسور موتور توربین هوایی می باشد. از این فرآیند می توان برای اتصال پره استاتور کمپرسور در رینگ آن استفاده نمود [1-3].

لحيم كارى سخت به كمك ليزر يك تكنيك اتصال پيشرفته مى باشد كه به طور گستردهای در صنایع مختلف مانند اتومبیل، هوافضا و الکترونیک استفاده می شود. این فرآیند ترکیبی از حرارت دهی با لیزر و با ماده پرکننده میباشد. لحیم کاری سخت به کمک لیزر دارای مزایای زیر میباشد: 1) حرارت ورودی متمرکز 2) کنترل دقیق انرژی لیزر 3) زمان کوتاه حضور ماده پرکننده مذاب 4) نرخ های گرم شدن و سرد شدن سریع. انواع گوناگون مواد پرکننده تجاری برای لحیم کاری فولادهای زنگ نزن وجود دارد که عبارتند از: مواد پرکننده پایه نقره، مواد پرکننده پایه نیکل، مواد پرکننده پایه طلا، مواد پركننده پايه مس. مواد پركننده لحيم كارى پايه نيكل بيشترين مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون و استحکام بالا در دمای بالا را ارائه میدهند. BNi-2 بیشترین کاربرد را در میان مواد پرکننده لحیم کاری پایه نیکل دارد زیرا: 1) با غلب فلزات پایه سازگاری دارد. 2) در هر شکلی موجود است. 3) هزینه پایینی دارد. BNi-2 تمایل به سایش ورق نازک دارد زیرا با بسیاری از فلزات پایه واکنش میدهد. بنابراین زمان در دمای لحیم کاری و مقدار ماده پرکننده باید با دقت کنترل شود. بور وسیلیسیوم در BNi-2 به عنوان عناصر کاهنده نقطه ذوب می تواند فازهای ترد و سخت تشکیل دهند. این فازها می-توانند خواص مكانيكي اتصالات را خراب كنند. [4,3]

مطالعات کمی درباره لحیم کاری سخت فولادهای زنگ نزن 231 و 410 وجود دارد. لی و همکارانش [5] میکروساختار و خواص مکانیکی اتصالات لحیم کاری سخت شده فولاد نرم/ منیزیوم و فولاد زنگ نزن/منیزیوم را بررسی کردند. آزمایشها با لیزر 2O2 با توان 3 کیلو وات و طول موج 10.6 میکرومتر انجام شد. جانسن و همکارانش [6] خواص خستگی اتصالات فولاد دو فازی (DP600) و فولاد (TRIP700) را که با ماده پرکننده مس-آلومینیوم با لیزر لحیم کاری شده بودند را مطالعه کردند. دارمندرا و همکارانش [7] یک لیزر (DP600) به آلیاژ آلومینیوم (AA6016) با استفاده از ماده پرکننده پایه روی استفاده کردند. آنها اثر توان لیزر، سرعت لحیم کاری و سرعت تغذیه سیم را استفاده کردند. آنها اثر توان لیزر، سرعت لحیم کاری و سرعت تغذیه سیم را استفاده از لیزر همجنس منیزیوم (AZ31B و فولاد زنگ نزن AIS1304 را با اتصال غیر همجنس منیزیوم الا مطالعه نمودند. یو و همکارانش [9] اتصال

اینکونل X-750 به فولاد زنگ نزن 304 را در لحیم کاری القایی با ماده پرکننده BNi-2 بررسی نمودند. اثر زمان اتصال بر میکروساختار اتصال و فلزپایه، توزیع عناصر در داخل اتصال و استحکام برشی اتصال توسط آنها مطالعه شد. کنترل هم محور فرآیند لحیمکاری سخت به کمک لیزر آلومينيوم و فولاد توسط فرانكا و همكارانش [10] بررسى شد. ميو و همکارانش [11] اثر میزان جابه جایی لیزر را بر روی عملکرد لحیمکاری سخت به کمک لیزر بررسی نمودند. آنها لیزر CO₂ با حداکثر توان 3 کیلو وات را برای اتصال آلیاژ منیزیوم و فولاد استفاده نمودند. استیوارد و همکارانش [12] لحيم كارى در كوره فولاد زنگ نزن 304 به آلياژ واناديوم (V-5Cr-5Ti) با ماده پرکننده مس خالص را مطالعه نمودند. لحیم کاری سخت به کمک ليزر فولاد/آلومينيوم با ماده پركننده گرم (Al, 12% Si 88%) توسط متيو و همكارانش [13] مطالعه شد. آنها يك ليزر Nd:YAG پيوسته با حداكثر توان 3.5 كيلو وات براى تحقيقاتشان استفاده نمودند. كوزلوا و همكارانش [14] ترشوندگی فولادهای زنگ نزن توسط آلیاژ مس-آلومینیوم را در خلاء بالا در دمای 800 تا 900 درجه سانتیگراد بررسی نمودند. متغیرهای فرآیند در آزمایشهای آنها نوع فولاد، ترکیب آلیاژ مس-آلومینیوم و اتمسفر کوره بود. لحيم كارى ورق فولاد زنگ نزن دوتايي حاوى نيتروژن با ماده پركننده پايه نيكل توسط يوان و همكارانش [15] انجام شد. زانگا و همكارانش [16] اتصالات لبه روى هم آلياژ آلومينيوم (2B50) و فولاد زنگ نزن (1Cr18Ni9Ti) با ماده پركننده آلومينيوم-سيليسيوم را مطالعه كردند. ليو و همکارانش [17] زیرکونیای پایدار شده به فولاد زنگ نزن را توسط لحیم کاری در خلاء با ماده پرکننده نقره-مس و پودر TiH₂ متصل کردند. اثر دمای لحیم کاری و زمان نگهداری بر استحکام برشی اتصال توسط آنها بررسی شد. اويو و همكارانش [18] از لحيم كارى مادون قرمز براى اتصال فولاد زنگ نزن 422 با ماده پرکننده BNi-2 استفاده نمودند. خرم و همکارانش [19] فولادهای زنگ نزن 321 و 410 را با ماده پرکننده پایه نقره با استفاده از فرآیند لحيم كارى سخت به كمك ليزر متصل نمودند. خرم و همكارانش [20] در مقالهای دیگر، لحیم کاری سخت به کمک لیزر Inconel 718 و Inconel 600 را با ماده پرکننده BNi-2 مطالعه نمودند. آنها نتیجه گرفتند این ماده پرکننده ترشوندگی و پخش شوندگی مناسبی را بر روی این فلزات پایه نشان می-دهند. ریمان و همکارانش [21] تاثیر پوششهای روی متفاوت را در لحيم كارى سخت به كمك ليزر فولاد گالوانيزه شده بررسى كردند. هدف آنها از این مطالعه، حذف پاشش و ظاهر موجدار در محل اتصال بود.

طبق مطالعات انجام شده، تاکنون لحیمکاری سخت به کمک لیزر فولادهای زنگ نزن 321 و 410 با ماده پرکننده BNi-2 مطالعه نشده است. در این پژوهش میکروساختار و خواص مکانیکی ماده پرکننده BNi-2 و BNi- اتصالات لحیمکاری شده بررسی می شود. پخش شوندگی و ترشوندگی BNi-2 بر روی فلزات پایه 321 و 410 (آستنیتی و ماتنزیتی) مطالعه می گردد.

2- آزمایشها

ورقهای فولاد زنگ نزن 321 و 410 با ضخامت 1 میلیمتر به عنوان فلزپایه استفاده شدند. ترکیبات فلزپایه در جداول 1 و 2 ارائه شده است. ابعاد نمونه ها 1×52×120 میلیمتر بود. ماده پرکننده 2-BNi به شکل سیم و با قطر 2 میلیمتر برای اتصال فلزات پایه استفاده شد و ترکیب آن در جدول 3 ارائه شده است. دمای جامدشدگی و مایع شدگی ماده پرکننده به ترتیب 970 و 1000 درجه سانتیگراد بود.

آزمایش ها با استفاده از یک لیزر پالسی Nd: YAG با حداکثر توان 400

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.33.3

وات انجام پذیرفت. شکل استاندارد پالسی به صورت مربعی میباشد. قطر پرتوی لیزر 0.25 میلیمتر است و با استفاده از یک عدسی با طول کانونی 75 میلیمتر بر روی ماده پرکننده متمرکز می شود. محدوده قابل قبول پارامترهای ليزر، فركانس پالس 1 تا 1000 هرتز، مدت پالس 0.2 تا 20 ميلى ثانيه و انرژى پالس 0 تا 40 ژول می باشد. فرآیند لحیم کاری سخت با لیزر در توان لیزر 205.2 وات، عرض پالس 1.7 ميلى ثانيه، فركانس پالس 100 هرتز، پيش گرم 350 درجه سانتیگراد و سرعت 1.3 میلیمتر بر ثانیه در درزهای اتصال متفاوت (0.05, 0.08, 0.15 و 0.4 ميليمتر) انجام پذيرفت كه به عنوان بهترين پارامترها به دست آمدند. هنگامیکه یک فرکانس بالا و عرض پالس پایین استفاده می شود در عمل لیزر پالسی به یک لیزر موج پیوسته تبدیل می شود که منجر می گردد ماده پرکننده مذاب به طور پیوسته وجود داشته باشد. بنابراین فرکانس بالا برای انواع درز اتصال می تواند استفاده شود[22].

پرتوی لیزر بر روی ماده پرکننده با زاویه 90 درجه تابید. گاز آرگون در نرخ 30 لیتر بر دقیقه برای جلوگیری از اکسیداسیون ماده پرکننده مذاب استفاده شد. تنظیم آزمایشگاهی فرآیند لحیم کاری سخت با لیزر در شکل 1 نشان داده شده است. مجموعه در طراحی اتصال سر به سر در فیکسچر قرار گرفت و ماده پرکننده در بالای نمونهها قرار داده شد. سطح نمونهها قبل از لحيم كارى سخت با ليزر براى زدودن ألودكي ها با استون تميز شد.

بعد از روشهای استاندارد سنگزنی و پولیش، نمونهها با محلول killing (1.5 gr Cucl₂+ 33 ml HCl+ 33 ml H₂O + 33 ml ethanol) اچ شدند. میکروساختار و ترکیب ماده پرکننده و اتصال لحیم کاری شده با لیزر توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص گردید. پارامترهای فرآیند (زاویه ترشوندگی، پخش شوندگی و درز اتصال) با استفاده از نرم افزار تحلیل تصویری اندازه گیری شد.

میکروسختی نمونه های لحیم کاری شده با لیزر با دستگاه میکروسختی با نيروى 1000 گرم و زمان نگهدارى 10 ثانيه طبق استاندارد ASTM E384 انجام شد. مقادیر سختی گزارش شده میانگین سختی 3 نمونه میباشد. تست کشش در دمای اتاق با سرعت کلگی 1 میلیمتر بر دقیقه طبق استاندارد ASTM E8M صورت پذيرفت.

جدول 1 تركيب شيميايي فولاد زنگ نزن 321

Table 1 c	hemical	compositi	on of stai	nless stee	1 321					
Cr	С	Mn	Si	р	S		عناصر			
17%	0.06%	1.52%	0.62%	0.028%	0.02%	ό u	درصد وزني			
	Ti	Cu	Ni	Mo	Fe		عناصر			
	0.65%	0.21%	9.65%	0.21%	تعادل	نى	درصد وز			
جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 410 Table 2 chemical composition of stainless steel 410										
S	C	C Mr	n Si	i p)	Cr	عناصر			
0.0009%	0.159	% 0.31	% 0.4	% 0.00)6% 12	2.57%	درصد وزنی			
Sn	Ni	Mo	A A	1 C	u	Fe	عناصر			
0.02%	0.099	% 0.02	% 0.01	% 0.0	4% .	تعادل	درصد وزنی			

			لننده	بمیایی مادہ پر د	ی د تر دیب شب	جدور
hemica	l compo	sition of	filler me	tal		
C.	р	C :	E.	NI:	1.	

Table 3 chemical composition of filler metal											
С	Cr	В	Si	Fe	Ni	عناصر					
0.06%	7%	3.2%	4.5%	3%	تعادل	درصد وزنى					



شکل1 تنظیم آزمایشگاهی فرآیند لحیم کاری سخت با لیزر

3- نتايج

1-3- هندسه اتصال

آزمايشها چندين بار در توان ليزر 205.2 وات، عرض پالس 1.7 ميلي ثانيه، فركانس پالس 100 هرتز، پيش گرم 350 درجه سانتيگراد و سرعت 1.3 میلیمتر بر ثانیه در درزهای اتصال متفاوت (0.05, 0.08, 0.15 و 0.4 میلیمتر) انجام پذیرفت تا قابلیت تکرار نتایج بررسی گردد.

کیفیت اتصال هنگامی قابل قبول است که ماده پرکننده درز اتصال را به طور کامل پرکند و هیچ گونه عیوبی در سطح مشترک و درز لحیم کاری مشاهده نشود. سطح مقطع نمونه های لحیم کاری شده برای فولاد زنگ نزن 321 و 410 در درزهای اتصال متفاوت در شکل های 2 و 3 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ماده پرکننده تر شوندگی و پخش شوندگی خوبی را بر روی فلزات پایه نشان میدهد و سطح مشترک اتصال سالم می باشد و هیچ گونه عیوبی در سطح مشترک و درز اتصال لحیم کاری وجود ندارد.



Fig. 2 cross section of laser brazed samples for 321 stainless steel (a) gap distance of 0.4 mm, (b) gap distance of 0.08 mm

شکل2 سطح مقطع نمونه لحیم کاری شده به کمک لیزر برای ماده پرکننده فولاد زنگ نزن 321 الف) درز اتصال 0.4 میلیمتر ب) درز اتصال 0.08 میلیمتر



Fig. 3 cross section of laser brazed samples for 410 stainless steel (a) gap distance of 0.15 mm, (b) gap distance of 0.05 mm شكل3 سطح مقطع نمونه لحيم كارى شده به كمك ليزر براى ماده پركننده فولاد زنگ نزن 410 الف) درز اتصال 0.15 ميليمتر ب) درز اتصال 0.05 ميليمتر

در شکل 4 و 5 تغییرات زاویه ترشوندگی و پخش شوندگی برای درزهای اتصال متفاوت برای فولاد زنگ نزن 321 و 410 نشان داده شده است. با افزایش درز اتصال زاویه ترشوندگی به 35 درجه برای فولاد زنگ نزن 321 و 36 درجه برای فولاد زنگ نزن 410 کاهش مییابد. هنگامیکه درز اتصال از 0.05 تا 0.4 میلیمتر افزایش مییابد عرض پخششوندگی از 3710 میکرومتر تا 4150 میکرومتر برای فولاد زنگ نزن 321 افزایش مییابد. همچنین عرض پخش شوندگی از 3700 تا 4100 میکرومتر برای فولاد زنگ نزن 410 نیز افزایش مییابد. هنگامیکه درز اتصال افزایش مییابد ماده پرکننده به راحتی میتواند پیش از انجماد وارد درز اتصال شود و در آن جریان یابد. بنابراین میزان پخششدگی ماده پرکننده بر روی فلزات پایه افزایش و میزان زاویه ترشوندگی کاهش مییابد.

2-3- میکروساختار ماده پرکننده

میکروساختار ماده پرکننده در شکل 6 نشان داده شده است. در شکل 6 الف) تصویر کلی میکروساختار نشان داده شده است. در شکل 6 ب) تصاویر الکترونی روبشی برگشتی و ثانویه و آنالیز EDS برای ماده پرکننده لحیمکاری نمایش داده شده است. براساس نتایج آنالیز EDS، ماده پرکننده لحیمکاری BNi-2 شامل 3 فاز محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم می باشد که با حروف A-D در شکل 6 و جدول 4 نشان داده شده است.

3-3- میکرو ساختار اتصال لحیمکاری شده

میکروساختار اتصال لحیم کاری شده با لیزر برای فولادهای زنگ نزن 321 و 410 به ترتیب در شکلهای 7 و 8 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مورفولوژی ماده پرکننده قبل و بعد از لحیم کاری متفاوت می باشد. در لحیم کاری به کمک لیزر شرایط تعادلی وجود ندارد بنابراین میکروساختار فازهای یوتکتیک دندریتی بعد از لحیم کاری مشاهده می شود.

در لحیم کاری سخت به کمک لیزر، عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند بور و سیلیسیوم می تواند بسیار سریع در فلزپایه نفوذ کنند. همچنین فلزپایه نیز



Fig. 4 Variation of (a) Spreading, (b) wetting angle of BNi-2 on 321 stainless steel for different gap distances

شکل 4 تغییرات الف) پخش شوندگی ب) زاویه ترشوندگی ENi-2 بر روی فولاد زنگ نزن 321 در درزهای اتصال متفاوت



Fig. 5 Variation of (a) Spreading, (b) wetting angle of BNi-2 on 410 stainless steel for different gap distances

شکل 5 تغییرات الف) پخش شوندگی ب) زاویه ترشوندگی ENi-2 بر روی فولاد زنگ نزن 410 در درزهای اتصال متفاوت





Fig. 6 Microstructure of BNi-2 filler metal: (a) General view (OM), (b) SE, BSE image (SEM) and EDS analysis

شکل 6 میکروساختار ماده پرکننده BNi-2 الف) تصویر میکروسکوپ نوری ب) تصویر SEM و آنالیز SEM

جدول 4 نتایج آنالیز EDS ماده پرکننده BNi-2 طبق نقاط مشخص شده در شکل 6 ب (درصد وزنی)

Table 4 EDS analysis results	of BNi-2	filler metal	according to
locations in Fig.6b (Wt. %)			

نقاط	В	С	Si	Cr	Fe	Ni	فاز
А	0.53	0.47	0.03	1.08	0.94	96.95	محلول جامد نيكل
В	10.61	0.44	0.13	4.46	0.82	83.54	بوريد نيكل
С	14.61	2.5	3.01	74.81	0.13	4.94	بوريد كروم
D	0.28	0.4	0.48	1.28	1.91	95.65	محلول جامد نيكل

در داخل ماده پرکننده مذاب حل میشود. این عناصر کاهنده نقطه ذوب، ساختار یوتکتیک تشکیل میدهند که بسیار سخت هستند و حاوی فازهای بسیار ترد میباشند. عناصر کاهنده نقطه ذوب در درز لحیم کاری نزدیک فلزپایه جمع میشوند. تولید فازهای ترد در درز لحیم کاری نامطلوب میباشد. دیاگرام فازی سه تایی برای نشان دادن سیر تکاملی میکروساختار در اتصال لحیم کاری سخت به کمک لیزر استفاده شد. با توجه به ترکیب ماده پرکننده، دیاگرام فازی سه تایی R-IC-B برای مطالعه استفاده شد [23]. سه واکنش یوتکتیک سه تایی در دیاگرام وجود دارد که با E1 و E3 میباشد و به داده شده است. ترکیب شیمیایی ماده پرکننده مذاب نزدیک E2 میباشد و به صورت زیر می باشد.

(1) L↔BCr+BNi₃+(Ni) (1) جهت انجماد از فلزپایه به سمت مرکز ماده پرکننده میباشد. فاز جامد اولیه تشکیل شده در حین سرد شدن فاز محلول جامد نیکل میباشد که در سطح





Fig. 7 SEM and EDS chemical analysis results of the laser brazed sample for 321 stainless steel

شکل 7 تصویر SEM و آنالیز EDS نمونه لحیم کاری شده به کمک لیزر فولاد زنگ نزن 321

مشترک جامد/مایع تشکیل می شود. با ادامه فرآیند انجماد، فازهای یوتکتیک BCr و BNi₃ تشکیل می شوند. بنابراین بورید کروم، بورید نیکل و محلول جامد نیکل در آزمایش ها مشاهده می شود. آنالیز EDS ماده پرکننده برای فلزات پایه 321 و 410 به ترتیب در شکل های 7 و 8 و جداول 5 و 6 نشان داده شده است.

جدول 5 نتایج آنالیز EDS ماده پرکننده BNi-2 طبق نقاط مشخص شده در شکل 7 (درصد وزنی)

 Table 5 EDS analysis results of BNi-2 filler metal according to locations in Fig.7 (Wt. %)

 نقاط	В	С	Si	Cr	Fe	Ni	فاز
А	12.52	0.30	0.11	71.0	6.25	4.23	بوريدكروم
В	6.06	0.26	0.37	5.70	0.62	86.98	بوريدنيكل
С	0.58	0.18	0.30	1.53	4.56	92.85	محلول جامد نیکل
D	0.45	0.29	0.10	11.46	69.11	18.59	فاز زمینه فلزپایه
Е	10.76	0.24	0.33	5.74	1.11	81.82	بوريدنيكل
 F	0.21	0.22	0.35	3.17	5.36	90.7	محلول جامد نیکل





Fig. 10 micro hardness profile of laser brazed sample. a) 321 stainless steel b) 410 stainless steel

ر)

شكل 10 پروفيل ميكروسختى نمونه لحيم كارى شده به كمك ليزر براى الف) فولاد زنگ نزن 321 ب) فولاد زنگ نزن 410

فاصله از منطقه اتصال به سمت فلزپایه کاهش مییابد. مقادیر میکروسختی برای تمامی نمونهها تقریبا یکسان میباشد. بنابراین مقدار میکروسختی برای يك نمونه ارائه شده است. ميانگين ميكروسختي ماده پركننده 550 ويكرز و میانگین میکروسختی درز اتصال 500 ویکرز می باشد. این مقادیر بالای میکروسختی ماده پرکننده نسبت به فلز پایه به سبب وجود فازهای ترد و عناصر کاهنده نقطه ذوب در ماده پرکننده میباشد.



Fig. 8 SEM and EDS chemical analysis results of the laser brazed sample for 410 stainless steel

شکل 8 تصویر SEM و آنالیز EDS نمونه لحیم کاری شده به کمک لیزر فولاد زنگ نزن 410

جدول 6 نتایج آنالیز EDS ماده پرکننده BNi-2 طبق نقاط مشخص شده در شکل 8 (درصد وزنی)

Table	6	EDS	analysis	results	of	BNi-2	filler	metal	according	to
location	is i	in Fig.	8 (Wt. %)						

نقاط	В	С	Si	Cr	Fe	Ni	فاز
А	12.60	0.31	0.03	79.76	3.88	3.42	وريد كروم
В	0.69	0.18	0.5	1.67	1.30	95.66	محلول جامد نیکل
С	0.29	0.15	0.22	1.64	3.45	94.25	محلول جامد نيكل

3-4- خواص مكانيكي

مهمترین ملاحظات طراحی در به دست آوردن قطعات لحیم کاری مناسب، درز اتصال میباشد. درز اتصال بر خواص مکانیکی اتصال اثر می گذارد. به طور کلی هرچه درز اتصال کوچک تر باشد اتصال مستحکم تری به دست میآید. تست کشش و میکرو سختی شاخصهای مناسبی برای ارزیابی خواص مكانيكى مىباشند. ميانگين استحكام كششى براى اتصالات لحيم كارى شده فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در درزهای اتصال متفاوت در شکل 9 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود استحکام کششی با افزایش درز اتصال از 0.05 تا 0.4 میلیمتر کاهش مییابد. بدیهی است هنگامیکه درز اتصال با ماده پرکننده مذاب پر شود زاویه ترشوندگی، پخش شوندگی بر روی فلزپایه و ضخامت لایه واکنشی به طور موثری بر روی استحکام کششی اثر مى گذارد. ميانگين استحكام كششى بين 200 تا 480 مگاپاسكال تغيير مى كند و حداکثر استحکام اتصال برای فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در درز اتصال 0.05 میلیمتر به ترتیب 480 و 460 مگاپاسکال میباشد. استحکام بهتر نمونههای لحیم کاری شده با لیزر به توزیع عناصر کاهنده نقطه ذوب و فاز ترد کمتر تشکیل شده در درز اتصال مربوط میشود.

شکل 10 پروفیل میکروسختی را برای اتصالات لحیم کاری شده به کمک ليزر نشان مي دهد. همان طور كه مشاهده مي شود ميكروسختي با افزايش

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.33.3

microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Mg/mild steel and Mg/stainless steel joints, *Materials and Design*, Vol. 43, pp. 59–65, 2013.

- [6] M. H. E. Janssen, M. J. M. Hermans, M. Janssen, I. M. Richardson, Fatigue properties of laser-brazed joints of Dual Phase and Transformation Induced Plasticity steel with a copper-aluminum consumable, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 8, pp. 3922–3928, 2010.
- [7] C. Dharmendra, K.P. Rao, J. Wilden, S. Reich, Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 3, pp. 1497–1503, 2011.
- [8] M. Jiang, M.Gao, G. Li, C. Zhang, X. Zeng, Research on laser welding-brazing of dissimilar Mg alloy and stainless steel, *Kovove Materialy*, Vol. 52, No. 1, pp.11-17, 2014.
- [9] X. Wu, R. S. Chandel, S. H. Pheow, H. Li, Brazing of Inconel X-750 to stainless steel 304 using induction process, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 288, No. 1, pp. 84–90, 2000
- [10] S. Franka, M. Ungers, R. Rolser, Coaxial control of aluminum and steel laser brazing processes, *Physics Procedia*, Vol. 12, No. 2, pp. 752–760, 2011.
- [11] Y. Miao, D. Han, J. Yao, F. Li, Effect of laser offsets on joint performance of laser penetration brazing for magnesium alloy and steel, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 6, pp. 3121–3126, 2010.
- [12] R. V. Steward, M. L. Grossbeck, B. A. Chin, H. A. Aglan, Y. Gan, Furnace brazing type 304 stainless steel to vanadium alloy (V-5Cr-5Ti), *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 283-287, No .2, pp. 1224-1228, 2000.
- [13] A. Mathieu, S. Pontevicci, J.claude Viala, E. Cicala, S. Matte, D. Greve, Laser brazing of a steel/aluminum assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si), *Materials Science and Engineering A*, Vol. 435–436, pp. 19–28, 2006.
- [14] O. Kozlova, R. Voytovych, M.-F. Devismes, N. Eustathopoulos, Wetting and brazing of stainless steels by copper-silver eutectic, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 495, pp. 96–101, 2008.
- [15] X. Yuan, C. Yun Kang, M. Bok Kim, Microstructure and XRD analysis of brazing joint for duplex stainless steel using a Ni–Si–B filler metal, *Materials Characterization*, Vol. 60, No. 9, pp. 923– 931, 2009.
- [16] H. Zhanga, J. Liua, Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding–brazing process, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 19, pp. 6179–6185, 2011.
- [17] G. W. Liu, G. J. Qiao, H. J. Wang, J. F. Yang, T. J. Lu, Pressureless brazing of zirconia to stainless steel with Ag–Cu filler metal and TiH₂ powder, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, No. 14, pp. 2701–2708, 2008.
- [18] C. L. Ou, D. W. Liaw, Y. C. Du, R.K. Shiue, Brazing of 422 stainless steel using the AWS classification BNi-2 Braze alloy. *Journal of Material Science*, Vol. 41, No. 19, pp. 6353–6361, 2006.
- [19] A. Khorram, M. Ghoreishi, M. J. Torkamany, H. Rahimi, Comparative study on laser brazing of austenitic and martensitic stainless steels with silver-based filler metal, *Kovove Materialy*, Vol. 53, No. 1, pp. 43–50, 2015.
- [20] A. Khorram, O. Fakhraei, M. J. Torkamany, Laser brazing of Inconel 718 and Inconel 600 with BNi-2 nickel-based filler metal, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-016-8897-5
- [21] W. Reimann, S. Pfriem, T. Hammer, D. Päthe, M. Ungers, K. Dilger, Influence of different zinc coatings on laser brazing of galvanized steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 239, pp. 75–82, 2017.
- [22] A. Khorram, M. Ghoreishi, M. J. Torkamany, M. M. Bali, Laser brazing of Inconel 718 alloy with a silver based filler metal, *Optics* and Laser Technology, Vol. 56, pp. 443–450,2014.
- [23] P. Villars, A. Prince, H. Okamoto, *Handbook of ternary alloy phase diagrams*, pp. 5508, Ohio: ASM International, 1995.

بنابراین اتصالات قابل قبول برای فولادهای زنگ نزن 321 و 410 با فرآیند لحیمکاری سخت به کمک لیزر میتواند به دست آید و این فرآیند میتواند جایگرین فرآیند لحیمکاری سنتی شود.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش جدید برای اتصال فلزات پایه متفاوت (فولادهای زنگ نزن 321 و 410) با ماده پرکننده 2-BNi ارائه شده است. فرآیند لحیم کاری سخت به کمک لیزر در درزهای اتصال متفاوت انجام شد. نتایج مطالعات میکروساختار و مکانیکی نشان میدهد که:

 استفاده از توان لیزر 205.2 وات، عرض پالس 1.7 میلی ثانیه، فرکانس پالس 100 هرتز، پیش گرم 350 درجه سانتیگراد و سرعت 1.3 میلیمتر بر ثانیه میتواند منجر به بهترین نتیجه در اتصال فولادهای زنگ نزن 321 و 410 با ماده پرکننده 2Ni-2 میشود.

2) ماده پرکننده ترشوندگی و پخش شوندگی خوبی را بر روی فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در فرآیند لحیم کاری سخت به کمک لیزر نشان می دهد. با افزایش درز اتصال از 0.05 تا 0.4 میلیمتر، زاویه ترشوندگی به 35 درجه برای فولاد زنگ نزن 321 و 36 درجه برای فولاد زنگ نزن 410 کاهش می یابد. همچنین هنگامیکه درز اتصال از 0.05 تا 0.4 میلیمتر افزایش می یابد عرض پخش شوندگی از 3710 میکرومتر تا 4150 میکرومتر برای فولاد زنگ نزن 410 تا 210 افزایش می یابد. همچنین عرض پخش شوندگی از 3700 تا 410 میکرومتر برای فولاد زنگ نزن 410 نیز افزایش می یابد.

3) ماده پرکننده لحیمکاری BNi-2 شامل سه فاز محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم می باشد.

4) فازهای یوتکتیک در اتصال مشاهده می شود که به سبب انجماد هم دمای ناقص ماده پرکننده می باشد. این فازها محلول جامد نیکل و بورید نیکل نزدیک سطح مشترک و بورید کروم در مرکز اتصال می باشد.

5) استحکام اتصال با افزایش درز اتصال از 0.05 تا 0.4 میلیمتر کاهش مییابد و حداکثر استحکام کششی 480 و 460 مگاپاسکال به ترتیب برای فلزات پایه فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در درز اتصال 0.05 میلیمتر به دست آمد. تشکیل فازهای یوتکتیک کمتر در طول چرخه حرارت دهی منجر به افزایش خواص مکانیکی اتصال میشود.

6) میانگین میکروسختی ماده پرکننده 550 ویکرز و میانگین میکروسختی اتصالات لحیمکاری شده 500 ویکرز میباشد.

5- مراجع

- [1] M. Kutz (editor), *Handbook of Materials Selection*, pp. 58-62, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] J. C. M. Farrar, *The alloy tree: A guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys*, pp. 38-69, New York: CRC Press, 2004.
- [3] AWS Committee on Brazing and Soldering, *Brazing handbook*, Fourth Edittion, pp. 335-341, Florida: American Welding Society, 2002.
- [4] M. M. Schwartz, *Brazing*, Second Edittion, pp. 106-114, Ohio: ASM International, 2003.
- [5] L. Li, C. Tan, Y. Chen, W. Guo, F. Song, Comparative study on

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-27