



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

علی خرم¹، عابدجعفری²، محمود مرادی^{3*}

1- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 آبان 1395

پذیرش: 05 آذر 1395

ارائه در سایت: 15 دی 1395

کلید واژگان:

لحیم کاری سخت به کمک لیزر

فولاد زنگ نزن 321

فولاد زنگ نزن 410

ماده پرکننده BNi-2

لیزر پالسی Nd:YAG

چکیده

در این مقاله، لحیم کاری 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 لحیم کاری 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 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 عمدتاً شامل محلول جامد نیکل و بورید نیکل در مرکز اتصال و بورید کروم در نزدیکی سطح مشترک با فلز پایه 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

Original Research Paper

Received 31 October 2016

Accepted 25 November 2016

Available Online 04 January 2017

Keywords:

Laser brazing

321 stainless steel

410 stainless steel

BNi-2 filler metal

pulsed Nd:YAG laser

ABSTRACT

In this paper, laser brazing of austenitic stainless steel (type 321) and martensitic stainless steel (type 410) was performed using 400W pulsed Nd:YAG laser with nickel-based filler metal (BNi-2). Laser brazing process was carried out at different gap distances. Microstructure and composition analysis of 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 Micro hardness and tensile test. Results show that the filler metal has good wetting and spreading on 321 and 410 stainless steel in laser brazing process. Filler metal consists of nickel solid solution, nickel-rich boride and chromium-rich boride. The laser brazed joints are mainly comprised of the nickel solid solution, nickel-rich boride in the center of the joints and chromium-rich boride near interface with 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

می‌آورد. در لحیم کاری سخت ماده پرکننده بین سطوحی که روی هم قرار گرفته‌اند در اثر کشش موئینگی توزیع می‌شود.

در فرآیند لحیم کاری سخت، مواد موجود تقریباً 56 درجه سانتیگراد بیشتر از دمای مایع شدگی مواد پرکننده (معمولاً فلز) حرارت داده می‌شوند. ماده پرکننده به مایع تبدیل شده و تمام سطوح فلز را می‌پوشاند و یک پیوند آلیاژی با سطوح ایجاد می‌کند. لحیم کاری سخت معمولاً در دمای 540 تا 1620 درجه سانتیگراد انجام می‌شود و یک فرآیند اتصال در دمای بالا به

بسیاری از قطعات از دو یا اجزای بیشتری تشکیل شده‌اند که اغلب آنها برای همیشه به یکدیگر متصل می‌شوند تا از لحاظ ساختاری، مونتاژهای بدون نقصی تولید گردد. لحیم کاری سخت در برگیرنده یک مجموعه فرآیندهای جوشکاری می‌باشد 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 فلز پایه می‌باشد بوجود

Please cite this article using:

A. Khorram, A. Jafari, M. Moradi, Laser brazing of 321 and 410 stainless steels using BNi-2 nickel-based filler metal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 127-135, 2017 (in Persian)

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 می‌شود. در فرآیندهای لحیم کاری نرم از فلزات اتصال دهنده‌ای استفاده می‌کنند 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 می‌باشد و یک لایه غیرفعال بر روی سطح فولاد تشکیل می‌دهد که از خوردگی جلوگیری می‌کند. فولادهای زنگ نزن به 5 دسته تقسیم می‌شوند: فولاد زنگ نزن آستنی، فولاد زنگ نزن مارتزیتی، فولاد زنگ نزن فریتی، فولاد زنگ نزن دوتایی، فولاد زنگ نزن رسوب سختی. ورق‌های فولاد زنگ نزن 321 و 410 کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنعت هوایی دارند. کاربرد فولاد زنگ نزن 321 در رینگ‌های پره استاتور کمپرسور موتور توربین هوایی و کاربرد فولاد زنگ نزن 410 در پره استاتور کمپرسور موتور توربین هوایی می‌باشد. از این فرآیند می‌توان برای اتصال پره استاتور کمپرسور در رینگ آن استفاده نمود [3-1].

لحیم کاری سخت به کمک لیزر یک تکنیک اتصال پیشرفته می‌باشد که به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند اتومبیل، هوافضا و الکترونیک استفاده می‌شود. 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 پرکننده پایه مس. مواد پرکننده لحیم کاری پایه نیکل بیشترین 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 و سیلیسیوم در BNi-2 به عنوان عناصر کاهنده نقطه ذوب می‌تواند فازهای ترد و سخت تشکیل دهند. این فازها می‌توانند خواص مکانیکی اتصالات را خراب کنند. [4,3]

مطالعات کمی درباره لحیم کاری سخت فولادهای زنگ نزن 321 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 CO₂ با توان 3 کیلو وات و طول موج 10.6 میکرومتر انجام شد. جانسن و همکارانش [6] خواص خستگی اتصالات فولاد دو فاز (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 Nd:YAG پیوسته برای اتصال لیه روی هم فولاد پوشش داده شده با روی (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 بررسی نمودند. مینگ جیانگ و همکارانش [8] لحیم کاری -جوشکاری لیزر اتصال غیر همجنس منیزیوم AZ31B و فولاد زنگ نزن AISI304 را با استفاده از لیزر فیبری توان بالا 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 لحیم کاری سخت به کمک لیزر آلومینیوم و فولاد توسط فرانکا و همکارانش [10] بررسی شد. میو و همکارانش [11] اثر میزان جابه جایی لیزر را بر روی عملکرد لحیم کاری 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] لحیم کاری در کوره فولاد زنگ نزن 304 به آلیاژ وانادیوم (V-5Cr-5Ti) با ماده پرکننده مس خالص را مطالعه نمودند. لحیم کاری سخت به کمک لیزر فولاد/آلومینیوم با ماده پرکننده گرم (88% Al, 12% Si) توسط متیو و همکارانش [13] مطالعه شد. آنها یک لیزر Nd:YAG پیوسته با حداکثر توان 3.5 کیلو وات برای تحقیقاتشان استفاده نمودند. کوزلوا و همکارانش [14] ترشوندگی فولادهای زنگ نزن توسط آلیاژ مس-آلومینیوم را در حلال 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. لحیم کاری ورق فولاد زنگ نزن دوتایی حاوی نیتروژن با ماده پرکننده پایه نیکل توسط یوان و همکارانش [15] انجام شد. زانگا و همکارانش [16] اتصالات لیه روی هم آلیاژ آلومینیوم (2B50) و فولاد زنگ نزن (1Cr18Ni9Ti) با ماده پرکننده آلومینیوم-سیلیسیوم را مطالعه کردند. لیو و همکارانش [17] زیرکونیای پایدار شده به فولاد زنگ نزن را توسط لحیم کاری در حلال 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. اوپو و همکارانش [18] از لحیم کاری مادون قرمز برای 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 لحیم کاری سخت به کمک لیزر متصل نمودند. خرم و همکارانش [20] در مقاله‌ای دیگر، لحیم کاری سخت به کمک لیزر Inconel 600 و Inconel 718 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 می‌دهند. ریمان و همکارانش [21] تاثیر پوشش‌های روی متفاوت را در لحیم کاری سخت به کمک لیزر فولاد گالوانیزه شده بررسی کردند. هدف آنها از این مطالعه، حذف پاشش و ظاهر موج‌دار در محل اتصال بود.

طبق مطالعات انجام شده، تاکنون لحیم کاری 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 اتصالات لحیم کاری شده بررسی می‌شود. پخش شوندگی و ترشوندگی BNi-2 بر روی فلزات پایه 321 و 410 (آستنی و مارتزیتی) مطالعه می‌گردد.

2- آزمایش‌ها

ورق‌های فولاد زنگ نزن 321 و 410 با ضخامت 1 میلیمتر به عنوان فلزپایه استفاده شدند. ترکیبات فلزپایه در جدول 1 و 2 ارائه شده است. ابعاد نمونه ها 120×25×1 میلیمتر بود. ماده پرکننده BNi-2 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.

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

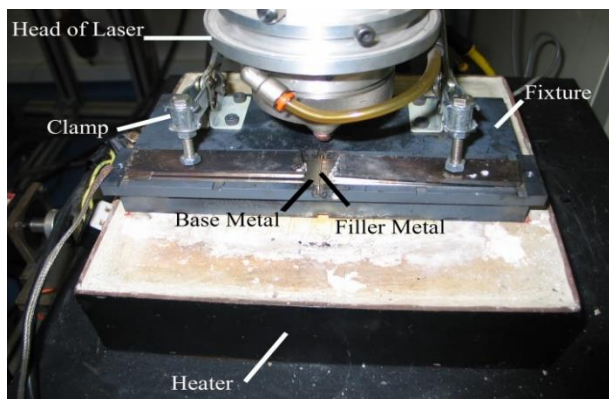


Fig. 1 Experimental setup of laser brazing

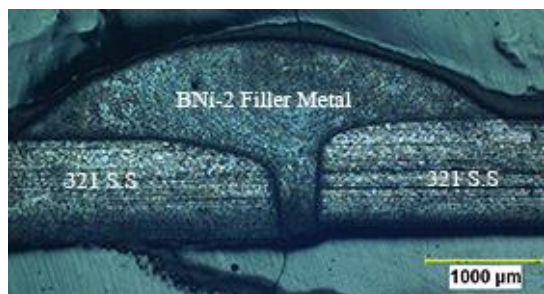
شکل 1 تنظیم آزمایشگاهی فرآیند لحیم کاری سخت با لیزر

3- نتایج

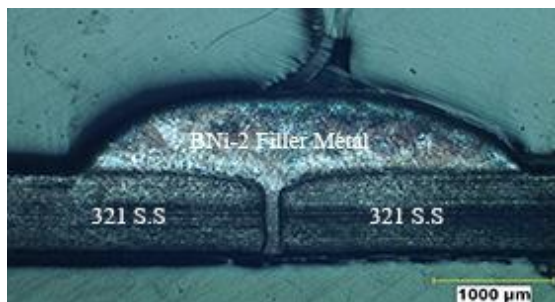
3-1- هندسه اتصال

آزمایش‌ها چندین بار در 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 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 پر کند 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. همان طور که مشاهده می شود ماده پرکننده ترشوندگی و پخش شوندگی خوبی را بر روی فلزات پایه نشان می دهد و سطح مشترک اتصال سالم می باشد و هیچ گونه عیوبی در سطح مشترک و درز اتصال لحیم کاری وجود ندارد.



(الف)



(ب)

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

شکل 2 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

وات انجام پذیرفت. شکل استاندارد پالسی به صورت مربعی می باشد. 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 لیزر، فرکانس پالس 1 تا 1000 هرتز، مدت پالس 0.2 تا 20 میلی ثانیه و انرژی پالس 0 تا 40 ژول می باشد. فرآیند لحیم کاری سخت با لیزر در 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 در درزهای اتصال متفاوت (0.05, 0.08, 0.15 و 0.4 میلیمتر) انجام پذیرفت که به عنوان بهترین 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 نمونه ها قرار داده شد. سطح نمونه ها قبل از لحیم کاری سخت با لیزر برای زدودن آلودگی ها با استون تمیز شد.

بعد از روش های استاندارد سنگ زنی و پولیش، نمونه ها 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 نیروی 1000 گرم و زمان نگهداری 10 ثانیه طبق استاندارد ASTM E384 انجام شد. مقادیر سختی گزارش شده میانگین سختی 3 نمونه می باشد. تست کشش در دمای اتاق با سرعت کلاگی 1 میلیمتر بر دقیقه طبق استاندارد ASTM E8M صورت پذیرفت.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 321

Table 1 chemical composition of stainless steel 321

عنصر	S	p	Si	Mn	C	Cr
درصد وزنی	0.02%	0.028%	0.62%	1.52%	0.06%	17%
عنصر	Fe	Mo	Ni	Cu	Ti	
درصد وزنی	تعداد	0.21%	9.65%	0.21%	0.65%	

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 410

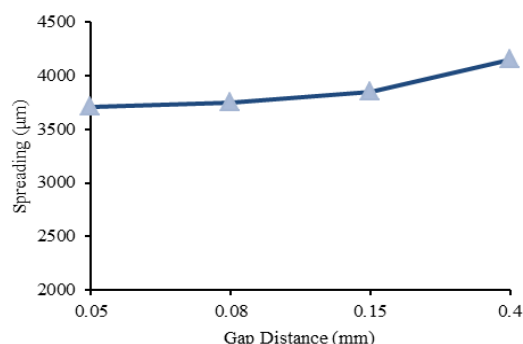
Table 2 chemical composition of stainless steel 410

عنصر	Cr	p	Si	Mn	C	S
درصد وزنی	12.57%	0.006%	0.4%	0.31%	0.15%	0.0009%
عنصر	Fe	Cu	Al	Mo	Ni	Sn
درصد وزنی	تعداد	0.04%	0.01%	0.02%	0.09%	0.02%

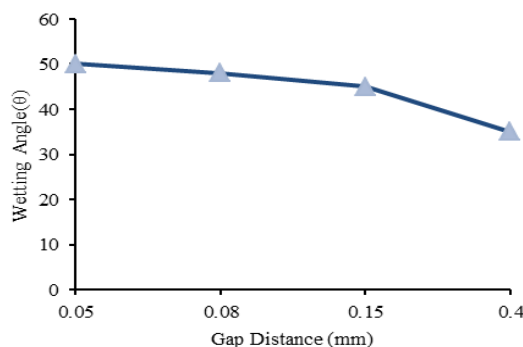
جدول 3 ترکیب شیمیایی ماده پرکننده

Table 3 chemical composition of filler metal

عنصر	Ni	Fe	Si	B	Cr	C
درصد وزنی	تعداد	3%	4.5%	3.2%	7%	0.06%



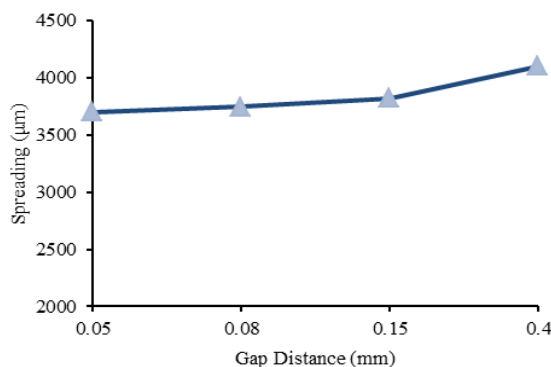
(الف)



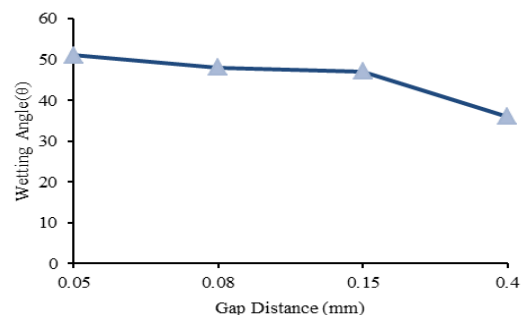
(ب)

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 BNi-2 بر روی فولاد زنگ نزن 321 در درزهای اتصال متفاوت



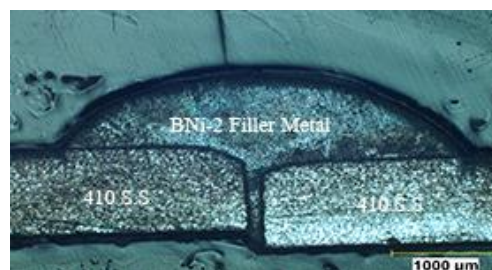
(الف)



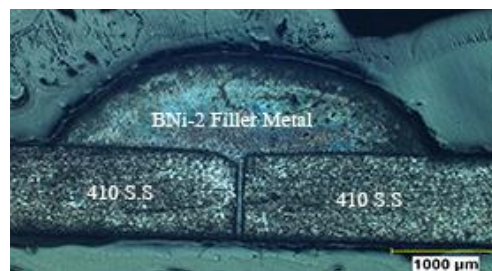
(ب)

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 BNi-2 بر روی فولاد زنگ نزن 410 در درزهای اتصال متفاوت



(الف)



(ب)

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

شکل 3 سطح مقطع نمونه لجیم کاری شده به کمک لیزر برای ماده پرکننده فولاد زنگ نزن 410 (الف) درز اتصال 0.15 میلیمتر (ب) درز اتصال 0.05 میلیمتر

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 می یابد. 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 321 افزایش می یابد. همچنین عرض پخش شوندگی از 3700 تا 4100 میکرومتر برای فولاد زنگ نزن 410 نیز افزایش می یابد. هنگامیکه درز اتصال افزایش می یابد ماده پرکننده به راحتی می تواند پیش از انجماد وارد درز اتصال شود و در آن جریان یابد. بنابراین میزان پخش شدگی ماده پرکننده بر روی فلزات پایه افزایش و میزان زاویه ترشوندگی کاهش می یابد.

3-2- 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 BNi-2 نمایش داده شده است. براساس نتایج آنالیز EDS، ماده پرکننده لجیم کاری 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- میکروساختار اتصال لجیم کاری شده

میکروساختار اتصال لجیم کاری شده با لیزر برای فولادهای زنگ نزن 321 و 410 به ترتیب در شکل های 7 و 8 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مورفولوژی ماده پرکننده قبل و بعد از لجیم کاری متفاوت می باشد. در لجیم کاری به کمک لیزر شرایط تعادلی وجود ندارد بنابراین میکروساختار فازهای یوتکتیک دندریتی بعد از لجیم کاری مشاهده می شود. در لجیم کاری سخت به کمک لیزر، عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند بور و سیلیسیوم می تواند بسیار سریع در فلز پایه نفوذ کنند. همچنین فلز پایه نیز

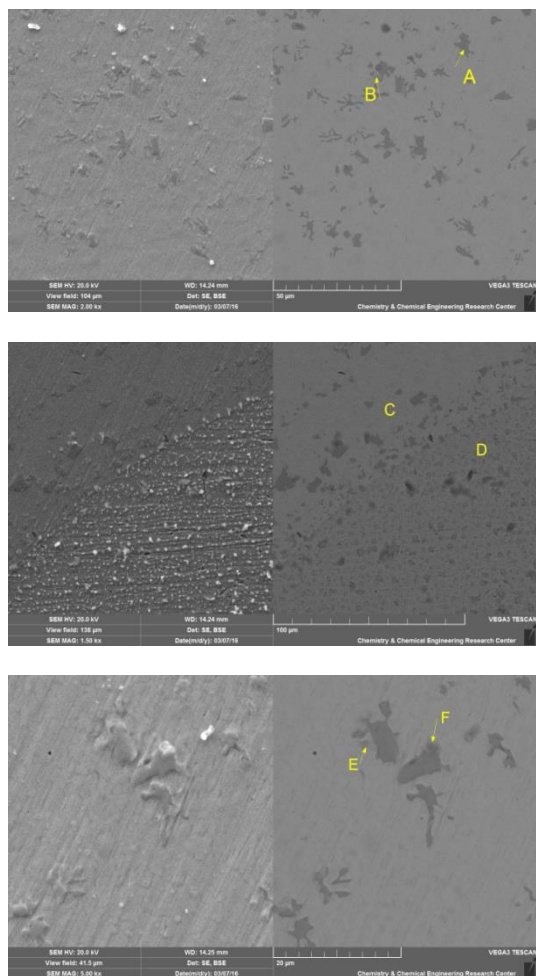


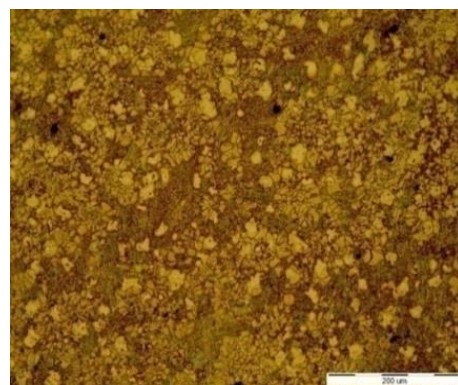
Fig. 7 SEM and EDS chemical analysis results of the laser brazed sample for 321 stainless steel

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

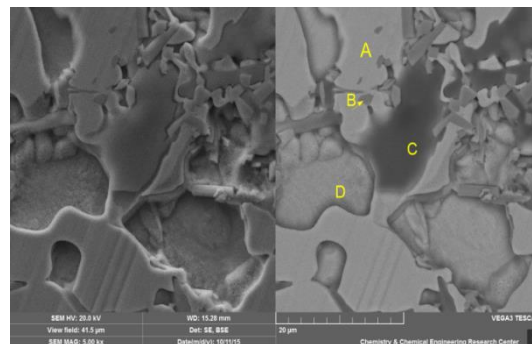
مشترک جامد/مایع تشکیل می‌شود. با ادامه فرآیند انجام، فازهای یوتکتیک BCr و BNi_3 تشکیل می‌شوند. بنابراین بورید کروم، بورید نیکل و محلول جامد نیکل در آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. آنالیز EDS ماده پرکننده برای فلزات پایه 321 و 410 به ترتیب در شکل‌های 7 و 8 و جداول 5 و 6 نشان داده شده است.

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

نقاط	B	C	Si	Cr	Fe	Ni	فاز
A	12.52	0.30	0.11	71.0	6.25	4.23	بورید کروم
B	6.06	0.26	0.37	5.70	0.62	86.98	بورید نیکل
C	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 فلز پایه
E	10.76	0.24	0.33	5.74	1.11	81.82	بورید نیکل
F	0.21	0.22	0.35	3.17	5.36	90.7	محلول جامد نیکل



(الف)



(ب)

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 EDS

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

نقاط	B	C	Si	Cr	Fe	Ni	فاز
A	0.53	0.47	0.03	1.08	0.94	96.95	محلول جامد نیکل
B	10.61	0.44	0.13	4.46	0.82	83.54	بورید نیکل
C	14.61	2.5	3.01	74.81	0.13	4.94	بورید کروم
D	0.28	0.4	0.48	1.28	1.91	95.65	محلول جامد نیکل

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 لجیم کاری نزدیک فلز پایه جمع می‌شوند. تولید فازهای ترد در درز لجیم کاری نامطلوب می‌باشد. دیاگرام فازی سه تایی برای نشان دادن سیر تکاملی میکروساختار در اتصال لجیم کاری سخت به کمک لیزر استفاده شد. با توجه به ترکیب ماده پرکننده، دیاگرام فازی سه تایی Ni-Cr-B برای مطالعه استفاده شد [23]. سه واکنش یوتکتیک سه تایی در دیاگرام وجود دارد که با E1، E2 و E3 نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی ماده پرکننده مذاب نزدیک E2 می‌باشد و به صورت زیر می‌باشد.



جهت انجماد از فلز پایه به سمت مرکز ماده پرکننده می‌باشد. فاز جامد اولیه تشکیل شده در حین سرد شدن فاز محلول جامد نیکل می‌باشد که در سطح

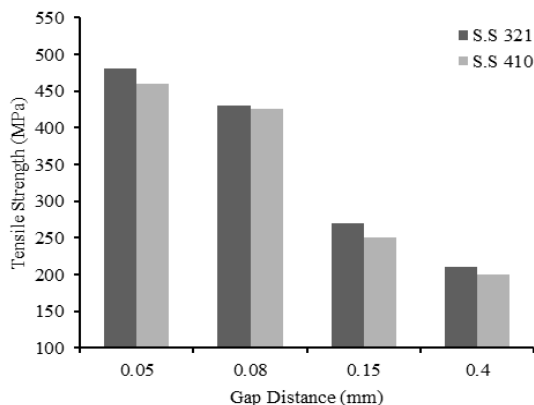


Fig. 9 Tensile strength versus gap distance

شکل 9 استحکام کششی در برابر درز اتصال

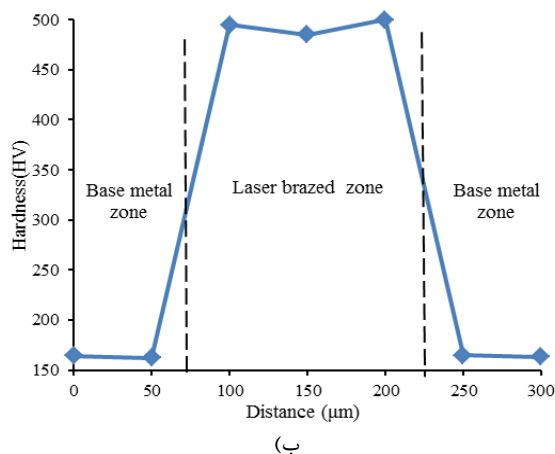
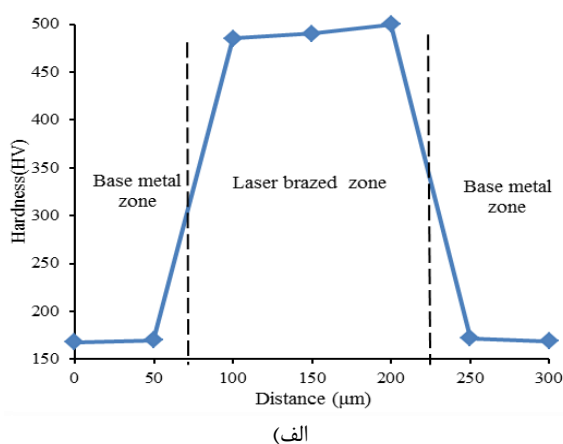


Fig. 10 micro hardness profile of laser brazed sample. a) 321 stainless steel b) 410 stainless steel

شکل 10 پروفیل میکروسختی نمونه لجیم کاری شده به کمک لیزر برای الف) فولاد زنگ نزن 321 ب) فولاد زنگ نزن 410

فاصله از منطقه اتصال به سمت فلز پایه کاهش می یابد. مقادیر میکروسختی برای تمامی نمونه ها تقریباً یکسان می باشد. بنابراین مقدار میکروسختی برای یک نمونه ارائه شده است. میانگین میکروسختی ماده پرکننده 550 ویکرز 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 می باشد.

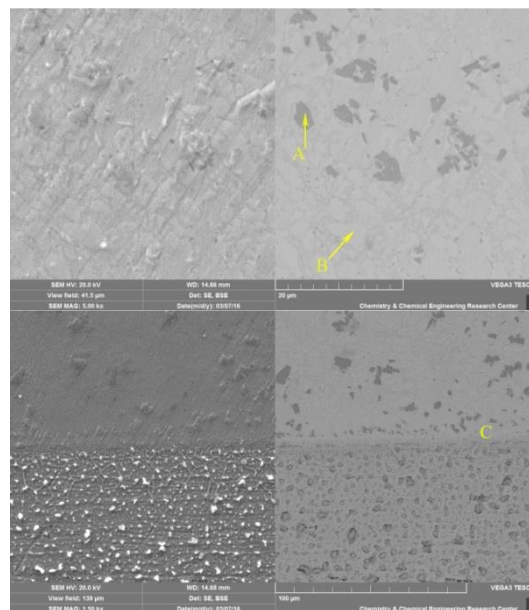


Fig. 8 SEM and EDS chemical analysis results of the laser brazed sample for 410 stainless steel

شکل 8 تصویر SEM و آنالیز EDS نمونه لجیم 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 locations in Fig.8 (Wt. %)

فاز	Ni	Fe	Cr	Si	C	B
بورید کروم	3.42	3.88	79.76	0.03	0.31	12.60
محلول جامد نیکل	95.66	1.30	1.67	0.5	0.18	0.69
محلول جامد نیکل	94.25	3.45	1.64	0.22	0.15	0.29

4-3- خواص مکانیکی

مهمترین ملاحظات طراحی در به دست آوردن قطعات لجیم کاری مناسب، درز اتصال می باشد. درز اتصال بر خواص مکانیکی اتصال اثر می گذارد. به طور کلی هرچه درز اتصال کوچک تر باشد اتصال مستحکم تری به دست می آید. تست کشش و میکرو سختی شاخص های مناسبی برای ارزیابی خواص مکانیکی می باشند. میانگین استحکام کششی برای اتصالات لجیم کاری 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 می یابد. بدیهی است هنگامیکه درز اتصال با ماده پرکننده مذاب پر شود زاویه ترشوندگی، پخش شوندگی بر روی فلز پایه و ضخامت لایه واکنشی به طور موثری بر روی استحکام کششی اثر می گذارد. میانگین استحکام کششی بین 200 تا 480 مگاپاسکال تغییر می کند و حداکثر استحکام اتصال برای فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در درز اتصال 0.05 میلیمتر به ترتیب 480 و 460 مگاپاسکال می باشد. استحکام بهتر نمونه های لجیم کاری شده با لیزر به توزیع عناصر کاهنده نقطه ذوب و فاز ترد کمتر تشکیل شده در درز اتصال مربوط می شود.

شکل 10 پروفیل میکروسختی را برای اتصالات لجیم کاری شده به کمک لیزر نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود میکروسختی با افزایش

- 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. Pätke, 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 لحیم کاری سخت به کمک لیزر می‌تواند به دست آید و این فرآیند می‌تواند جایگزین فرآیند لحیم کاری 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 BNi-2 ارائه شده است. فرآیند لحیم کاری سخت به کمک لیزر در درزهای اتصال متفاوت انجام شد. نتایج مطالعات میکروساختار و مکانیکی نشان می‌دهد که:

(1) 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 BNi-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 می‌دهد. 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 می‌یابد. همچنین هنگامیکه درز اتصال از 0.05 تا 0.4 میلیمتر افزایش می‌یابد عرض پخش شوندگی 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.

(3) ماده پرکننده لحیم کاری BNi-2 شامل سه فاز محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم می‌باشد.

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

(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 لحیم کاری 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 Edition, pp. 335-341, Florida: American Welding Society, 2002.
- [4] M. M. Schwartz, *Brazing*, Second Edition, pp. 106-114, Ohio: ASM International, 2003.
- [5] L. Li, C. Tan, Y. Chen, W. Guo, F. Song, Comparative study on