مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 129-135

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

علی خرم [1]، عابدجعفری [2]، 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
* 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:
لحیم‌کاری سخت به کمک لیزر
فولاد زنگ نزن 321
فولاد زنگ نزن 410
ماده پرکننده BNi-2
لیزر پالسی Nd:YAG

چکیده

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 و کشش برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات لحیم‌کاری شده انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که ماده پرکننده ترشوندگی و پخش شوندگی خوبی بر روی فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در فرآیند لحیم‌کاری سخت به کمک لیزر دارد. ماده پرکننده شامل محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم می‌باشد. اتصالات لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری شده 500 ویکرز می‌باشد. استحکام کششی اتصالات لحیم‌کاری 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 Khorram[1], Abed Jafari[2], 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

بسیاری از قطعات از دو و یا اجزای بیشتری تشکیل شده‌اند که اغلب آنها برای همیشه به یکدیگر متصل می‌شوند تا از لحاظ ساختاری، مونتاژهای بدون نقصی تولید گردد. لحیم‌کاری سخت در برگیرنده یک مجموعه فرآیندهای جوشکاری می باشد که اتصال مواد را با حرارت دادن آنها تا دمای لحیم‌کاری در حضور یک ماده پرکننده که دارای دمای مایع شدگی بیش از 450 درجه سانتیگراد و دمای جامد شدگی کمتر از فلزپایه می‌باشد بوجود می‌آورد. در لحیم‌کاری سخت ماده پرکننده بین سطوحی که روی هم قرار گرفته‌اند در اثر کشش مویینگی توزیع می‌شود.

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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

شمار می‌رود.

تفاوت اصلی بین لحیم‌کاری سخت و لحیم‌کاری نرم در این است که لحیم‌کاری سخت در دمای بالاتری انجام می‌شود. در فرآیندهای لحیم‌کاری 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 آستنیتی، فولاد زنگ نزن ماتنزیتی، 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 [1-3] .

لحیم‌کاری 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. لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری و مقدار ماده پرکننده باید با دقت کنترل شود. بور وسیلیسیوم 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 لحیم‌کاری سخت فولادهای زنگ نزن 321 و 410 وجود دارد. لی و همکارانش [5] میکروساختار و خواص مکانیکی اتصالات لحیم‌کاری سخت شده فولاد نرم/ منیزیوم و فولاد زنگ نزن/منیزیوم را بررسی کردند. آزمایش‌ها با لیزر CO_2 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 لحیم‌کاری شده بودند را مطالعه کردند. دارمندرا و همکارانش [7] یک لیزر Nd:YAG پیوسته برای اتصال لبه 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 لحیم‌کاری و سرعت تغذیه سیم را بررسی نمودند. مینگ جیانگ و همکارانش [8] لحیم‌کاری -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 لحیم‌کاری 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 آلومینیوم و فولاد توسط فرانکا و همکارانش [10] بررسی شد. میو و همکارانش [11] اثر میزان جابه جایی لیزر را بر روی عملکرد لحیم‌کاری سخت به کمک لیزر بررسی نمودند. آنها لیزر CO_2 با حداکثر توان 3 کیلو وات را برای اتصال آلیاژ منیزیوم و فولاد استفاده نمودند. استیوارد و همکارانش [12] لحیم‌کاری در کوره فولاد زنگ نزن 304 به آلیاژ وانادیوم (V-5Cr-5Ti) با ماده پرکننده مس خالص را مطالعه نمودند. لحیم‌کاری 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 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. لحیم‌کاری ورق فولاد زنگ نزن دوتایی حاوی نیتروژن با ماده پرکننده پایه نیکل توسط یوان و همکارانش [15] انجام شد. زانگا و همکارانش [16] اتصالات لبه 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 لحیم‌کاری در خلاء با ماده پرکننده نقره-مس و پودر TiH_2 متصل کردند. اثر دمای لحیم‌کاری و زمان نگهداری بر استحکام برشی اتصال توسط آنها بررسی شد. اویو و همکارانش [18] از لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری سخت به کمک لیزر متصل نمودند. خرم و همکارانش [20] در مقاله‌ای دیگر، لحیم‌کاری 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 می‌دهند. ریمان و همکارانش [21] تاثیر پوشش‌های روی متفاوت را در لحیم‌کاری 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 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 اتصالات لحیم‌کاری شده بررسی می‌شود. پخش شوندگی و ترشوندگی BNi-2 بر روی فلزات پایه 321 و 410 (آستنیتی و ماتنزیتی) مطالعه می‌گردد.

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 1×25×120 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

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 می‌شود. 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 لحیم‌کاری 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 می‌شود در عمل لیزر پالسی به یک لیزر موج پیوسته تبدیل می‌شود که منجر می‌گردد ماده پرکننده مذاب به طور پیوسته وجود داشته باشد. بنابراین فرکانس بالا برای انواع درز اتصال می‌تواند 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 لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری سخت با لیزر برای زدودن آلودگی ها با استون تمیز شد.

بعد از روش‌های استاندارد سنگ‌زنی و پولیش، نمونه‌ها با محلول killing (1.5 gr $Cucl_2$+ 33 ml HCl+ 33 ml H_2O + 33 ml ethanol) اچ شدند. میکروساختار و ترکیب ماده پرکننده و اتصال لحیم‌کاری 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 اندازه‌گیری شد.

میکروسختی نمونه‌های لحیم‌کاری 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 می‌باشد. تست کشش در دمای اتاق با سرعت کلگی 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

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

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 410

Table 2 chemical composition of stainless steel 410

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

جدول 3 ترکیب شیمیایی ماده پرکننده

Table 3 chemical composition of filler metal

عناصر	Ni	Fe	Si	B	Cr	C
درصد وزنی	تعادل	3%	4.5%	3.2%	7%	0.06%

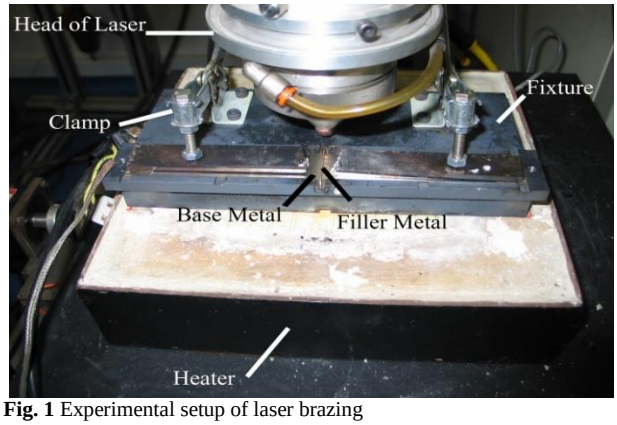


Fig. 1 Experimental setup of laser brazing

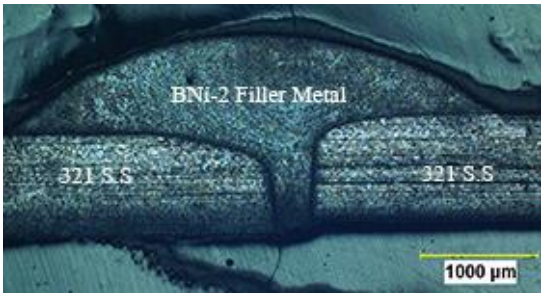
شکل1 تنظیم آزمایشگاهی فرآیند لحیم‌کاری سخت با لیزر

3- نتایج

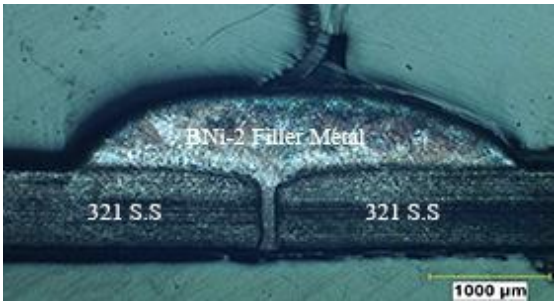
3-1- هندسه اتصال

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 پرکند و هیچ گونه عیوبی در سطح مشترک و درز لحیم‌کاری مشاهده نشود. سطح مقطع نمونه های لحیم‌کاری شده برای فولاد زنگ نزن 321 و 410 در درزهای اتصال متفاوت در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ماده پرکننده ترشوندگی و پخش شوندگی خوبی را بر روی فلزات پایه نشان می‌دهد و سطح مشترک اتصال سالم می‌باشد و هیچ گونه عیوبی در سطح مشترک و درز اتصال لحیم‌کاری وجود ندارد.



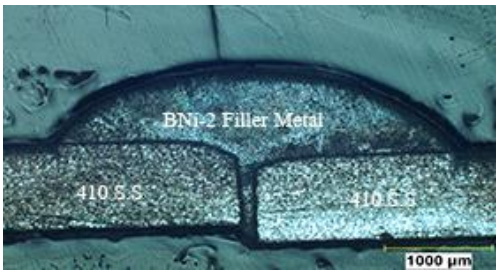
الف)



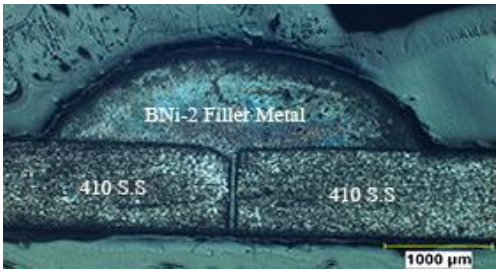
ب)

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

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



(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

شکل3 سطح مقطع نمونه لحیم‌کاری شده به کمک لیزر برای ماده پرکننده فولاد زنگ نزن 410 .الف) درز اتصال 0.15 میلیمتر ب) درز اتصال0.05 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 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.

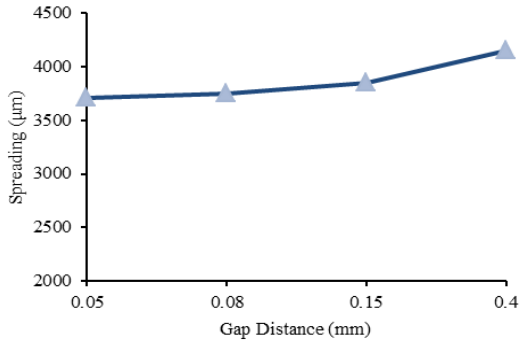
3-2- میکروساختار ماده پرکننده

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 لحیم‌کاری BNi-2 شامل 3 فاز محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم می‌باشد که با حروف A-D در شکل 6 و جدول 4 نشان داده شده است.

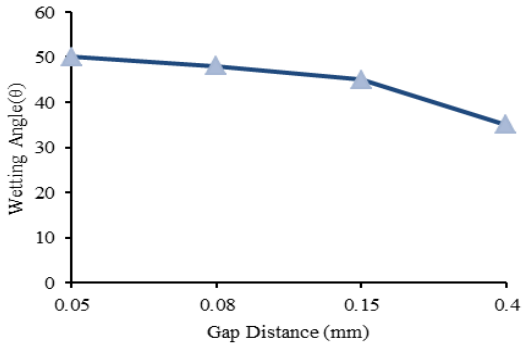
3-3- میکرو ساختار اتصال لحیم‌کاری شده

میکروساختار اتصال لحیم‌کاری 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 می‌شود مورفولوژی ماده پرکننده قبل و بعد از لحیم‌کاری متفاوت می‌باشد. در لحیم‌کاری به کمک لیزر شرایط تعادلی وجود ندارد بنابراین میکروساختار فازهای یوتکتیک دندریتی بعد از لحیم‌کاری مشاهده می‌شود.

در لحیم‌کاری سخت به کمک لیزر، عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند بور و سیلیسیوم می‌تواند بسیار سریع در فلزپایه نفوذ کنند. همچنین فلزپایه نیز



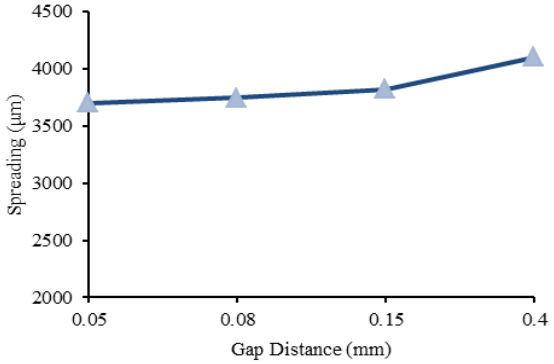
(الف)



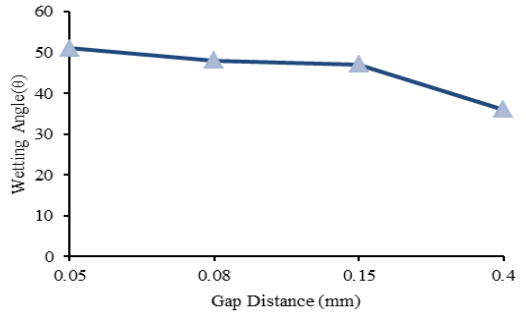
(ب)

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



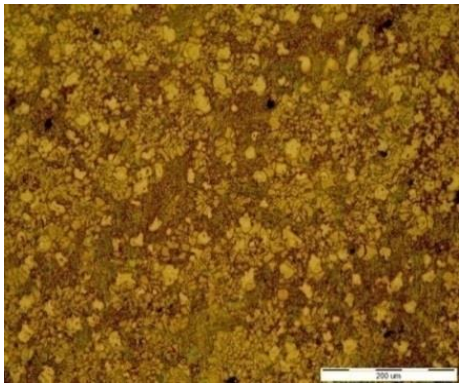
(الف)



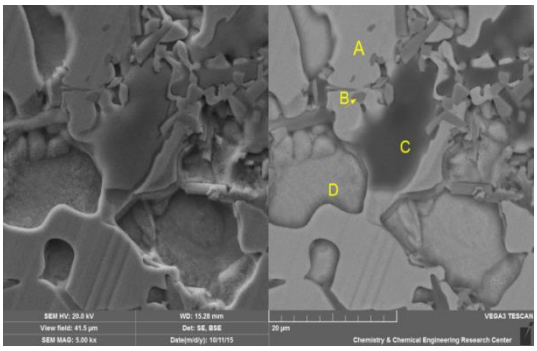
(ب)

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. 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 ب (درصد وزنی)

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

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 لحیم‌کاری نزدیک فلزپایه جمع می‌شوند. تولید فازهای ترد در درز لحیم‌کاری نامطلوب می‌باشد. دیاگرام فازی سه تایی برای نشان دادن سیر تکاملی میکروساختار در اتصال لحیم‌کاری 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 می باشد.

$$L \leftrightarrow BCr+BNi_3+(Ni) \quad (1)$$

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

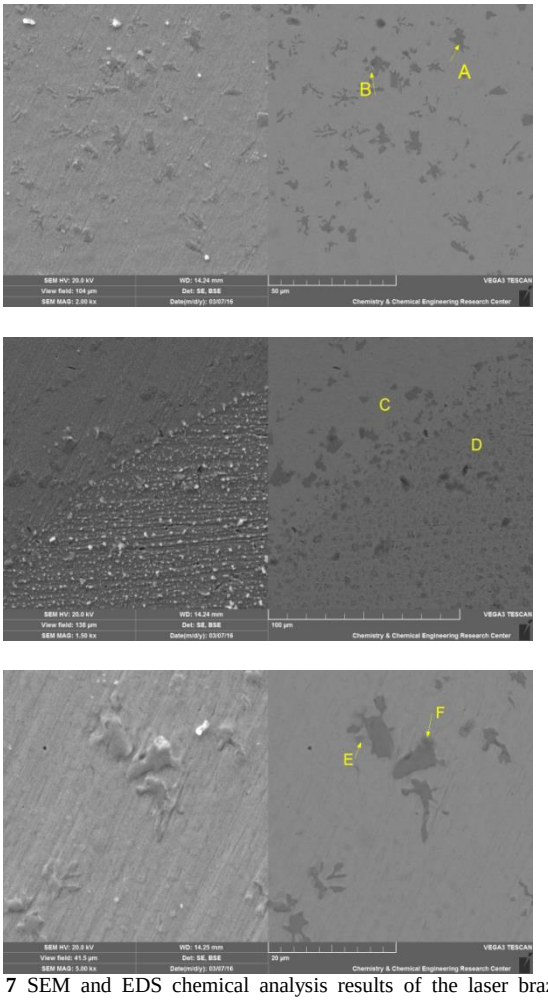


Fig. 7 SEM and EDS chemical analysis results of the laser brazed sample for 321 stainless steel

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

مشترک جامد/مایع تشکیل می‌شود. با ادامه فرآیند انجماد، 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)

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

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

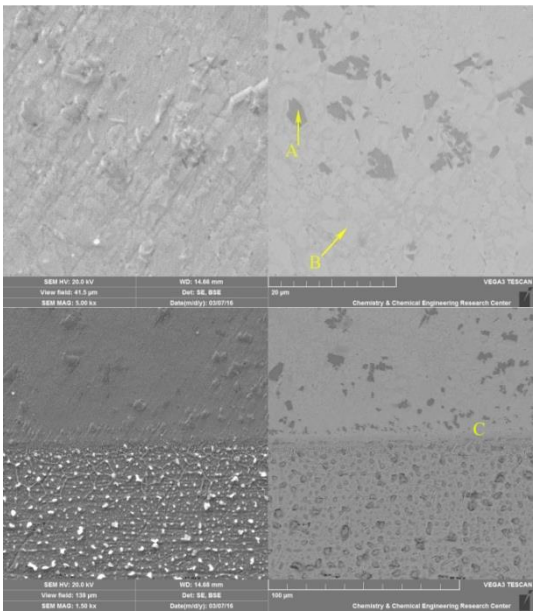


Fig. 8 SEM and EDS chemical analysis results of the laser brazed sample for 410 stainless steel

شکل 8 تصویر SEM و آنالیز EDS نمونه لحیم‌کاری 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. %)

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

3-4- خواص مکانیکی

مهمترین ملاحظات طراحی در به دست آوردن قطعات لحیم‌کاری مناسب، درز اتصال می‌باشد. درز اتصال بر خواص مکانیکی اتصال اثر می‌گذارد. 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 مکانیکی می‌باشند. میانگین استحکام کششی برای اتصالات لحیم‌کاری شده فولادهای زنگ نزن 321 و 410 در درزهای اتصال متفاوت در شکل 9 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود 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 می‌گذارد. میانگین استحکام کششی بین 200 تا 480 مگاپاسکال تغییر می‌کند 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 لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری شده به کمک لیزر نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود میکروسختی با افزایش

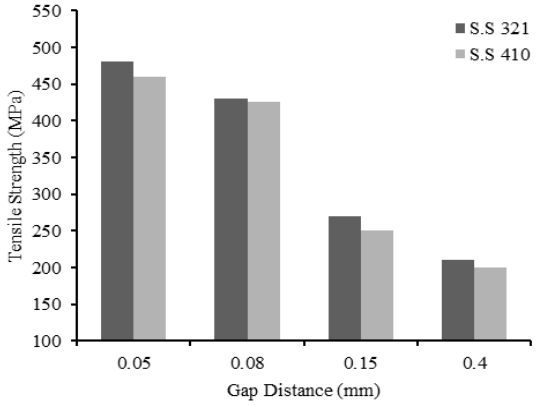
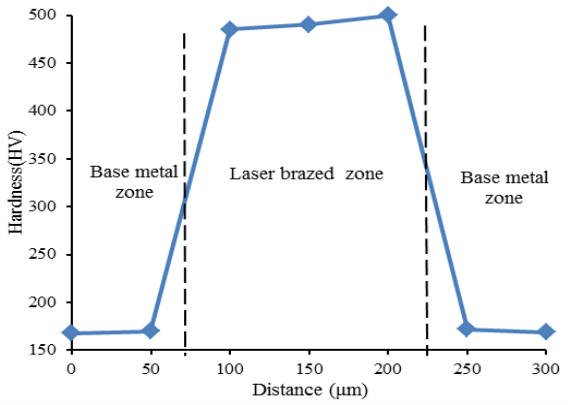
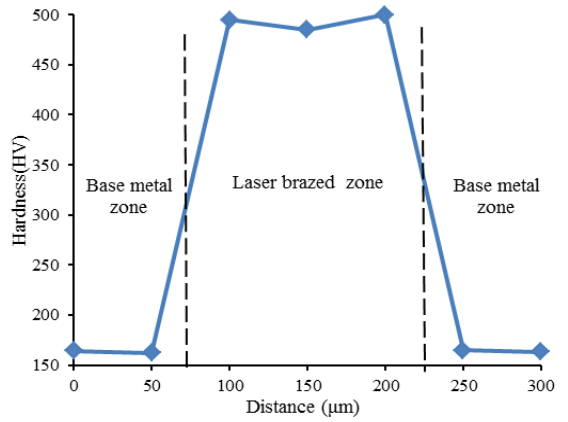


Fig. 9 Tensile strength versus gap distance

شکل 9 استحکام کششی در برابر درز اتصال



الف)



ب)

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

شکل 10 پروفیل میکروسختی نمونه لحیم‌کاری شده به کمک لیزر برای 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 یک نمونه ارائه شده است. میانگین میکروسختی ماده پرکننده 550 ویکرز و میانگین میکروسختی درز اتصال 500 ویکرز می‌باشد. این مقادیر بالای میکروسختی ماده پرکننده نسبت به فلز پایه به سبب وجود فازهای ترد و عناصر کاهنده نقطه ذوب در ماده پرکننده می‌باشد.

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 جایگزین 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 BNi-2 ارائه شده است. فرآیند لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری 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 لحیم‌کاری BNi-2 شامل سه فاز محلول جامد نیکل، بورید نیکل و بورید کروم می باشد.

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 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 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 TiH_2 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.