جلد 7، شماره 1، بهار 99، ص‌ص 800-807

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی استحکام دما بالای اتصال کامپوزیت Hastelloy X – AISI 304L تولید شده به روش جوشکاری لیزری

حامد حلیمی خسروشاهی[1]، فرید وکیلی تهامی[2*]، ابراهیم صفری[3]

1- دکترای تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشیار، فیزیک لیزر، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51666-16471، f_vakili@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 98/05/11

پذیرش: 99/03/22

کلیدواژگان:

کامپوزیت Hastelloy X – AISI 304L

جوشکاری لیزری

کشش دما بالا

خزش

میکروسکوپ الکترونی روبشی

چکیده

در این پژوهش استحکام اتصال کامپوزیت سوپر آلیاژ پایه نیکل Hastelloy X و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L که با استفاده از جوشکاری لیزری تولید شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، دو قطعه ورق ناهمجنس به ضخامت یک میلی‌متر، به صورت لب به لب و در فیکسچر ورق قرار گرفته و با استفاده از پرتو لیزر Nd-YAG پالسی مورد جوشکاری قرار گرفته‌اند. برای انجام جوشکاری از مقادیر مختلف برای توان جوشکاری، عرض پالس پرتو لیزر و سرعت جوشکاری استفاده شده و مقادیر پارامترهای فرکانس پرتو، دبی گاز محافظ و قطر پرتو بر روی سطح قطعه، ثابت نگه داشته شده‌اند. پس از جوشکاری، نمونه‌های استاندارد آزمایش استحکام از قطعات ورق بریده شده و تحت آزمایش‌های کشش در دمای بالا و خزش با بار ثابت قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌های کشش و خزش نشان می‌دهد که با انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری لیزری می‌توان اتصال مناسبی میان آلیاژهای Hastelloy X و AISI 304L به دست آورد، به گونه‌ای که در برخی از نمونه‌ها استحکام اتصال بیش از استحکام آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) بوده و شکست در نواحی دورتر از اتصال اتفاق افتاده است. همچنین ساختار اتصال با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی بررسی شده است. داده‌های حاصل از این میکروسکوپ‌ها نشان داده است که با بهینه‌سازی پارامترهای توان پرتو، سرعت جوشکاری و عرض پالس پرتو، اتصال تقریباً بدون ایراد قابل دستیابی است.

Investigation of high-temperature strength of composite joint Hastelloy X - AISI 304L manufactured by laser welding

Hamed Halimi Khosroshahi[1], Farid Vakili Tahami[1*], Ebrahim Safari[2]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Department of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran
* P.O.B. 51666-16471, Tabriz, Iran, f_vakili@tabrizu.ac.ir

Keywords

AISI 304L – Hastelloy X composite
Laser welding
High-temperature tensile
Creep
Scan electron microscope

Abstract

This study investigates the strength of Hastelloy X nickel-based superalloy and AISI 304L austenitic stainless steel composite joint produced by laser welding. Two pieces of 1mm thick dissimilar plates are butt jointed together on a sheet fixture and welded using a pulsed Nd-YAG laser beam. In the welding process, different values are used for welding power, laser beam pulse width and welding speed. Values for the beam frequency, shielding gas flow rate and beam diameter are kept constant on the surface of the work piece. After welding, suitable specimens were cut from sheet components and subjected to high-temperature tensile tests and constant load creep. The results of tensile and creep tests show that by choosing the right laser welding parameters, a proper bonding between Hastelloy X and AISI 304L alloys can be achieved. In some samples, the joints strength is higher than the corresponding value of base alloy strength (AISI 304L), and the failure occurred in the base alloy region. Optical and scanning electron microscopes have also been used to examine the structure of the joint. The data from these microscopes shows that joints almost free of defects can be achieved by optimizing the beam power, welding speed and pulse width.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Halimi Khosroshahi, H., Vakili Tahami, F., Safari, E. "Investigation of high-temperature strength of composite joint Hastelloy X - AISI 304L manufactured by laser welding", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 800-807, 2020.

1- مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی و سوپرآلیاژهای پایه نیکل به شکل گسترده‌ای در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاهی، فرآوری مواد شیمیایی و هوافضا به کار می‌روند [2, 1]. به طور مثال در حدود 47 درصد از وزن موتور جت جنرال الکتریک CF6 از آلیاژهای پایه نیکل و 16 درصد وزن آن از آلیاژهای پایه آهن، تشکیل شده است [3]. این کاربرد در کنار یکدیگر و همچنین مسائل مرتبط با کاهش هزینه‌های تولید، لزوم اتصال کامپوزیت این دو گروه آلیاژی را مطرح می‌کند [4]. به طور کلی اتصال کامپوزیت آلیاژهای ناهمجنس باعث کاهش هزینه‌های تولید، استفاده از مزایای هر دو آلیاژ به شکل بهینه و کاهش محدودیت‌های کاربردی آلیاژها می‌شود [7-5]. یکی از بهترین روش‌های اتصال فلزات و آلیاژهای همجنس و ناهمجنس، جوشکاری لیزری می‌باشد که می‌تواند اتصالات ظریف، دقیق و مستحکمی ایجاد کند [8]، همچنین به دلیل ماهیت متمرکز پرتو لیزر حرارت کلی وارد شده به قطعه کار کاهش یافته و در نتیجه صدمه کمتری به ریزساختار نواحی اطراف درز جوش وارد می‌شود [9].

به فاصله کوتاهی پس از ارائه پرتو لیزر در دهه 1960 میلادی، اولین تلاش‌ها برای جوشکاری لیزری همجنس و ناهمجنس آلیاژهای مختلف شروع شد [11, 10]. پرتوهای لیزر اولیه دارای سطوح توان و بازده پایینی بودند، ولی با پیشرفت‌های به دست آمده در زمینه دستگاه‌های تولید، روش‌های انتقال و دستگاه‌های اعمال پرتو لیزر، جوشکاری لیزری کامپوزیت آلیاژهای ناهمجنس، پیشرفت‌های بسیاری یافته است [14-12]. سان و مویسیو [15]، جوشکاری ناهمجنس فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 347 به فولاد فریتی 13CrMo44 را با استفاده از روش‌های جوشکاری گوس پلاسما، TIG[1] و لیزر بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که جوشکاری لیزری در موارد هندسه درز جوش، ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ[2]) و اعوجاج، نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌های جوشکاری دارد. مای و اسپوواج [16]، جوشکاری ناهمجنس لیزری استیل-کووار، مس-استیل و مس-آلومینیوم را مورد مطالعه قرار دادند و توانستند اتصالات مستحکمی برای این سه ترکیب و با استفاده از پرتو لیزر پالسی Nd-YAG، ایجاد کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کنترل نرخ ذوب فلزات یک فاکتور مهم در جوش بی‌عیب فلزات ناهمجنس است. به دلیل امکان کنترل توزیع حرارت در طی فرآیند جوشکاری لیزری، می‌توان از تشکیل فازهای بین فلزی ترد نیز، جلوگیری کرد. پاتاگای [17]، تأثیر پارامترهای مختلف بر پروفیل ناحیه مذاب را در جوشکاری لیزری چند نوع فولاد، مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که به منظور دستیابی به درز جوش با نفوذ کامل، حداقل میزان ناحیه مذاب همراه با پروفیل درز جوش مناسب، پارامترهای تأثیرگذار، از قبیل سرعت و توان جوشکاری باید به درستی انتخاب شوند.

نوس و همکارانش [18] استحکام نمونه‌های حاصل از اتصال کامپوزیت لیزری سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل 600 و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 را با استفاده از آزمایش کشش در دمای محیط بررسی کردند و توانستند اتصالاتی با حداکثر استحکام برابر با 90% استحکام فولاد زنگ نزن AISI 304، به دست آورند. وی و همکارانش [19]، تأثیر توان پرتو لیزر بر استحکام دینامیکی جوش لیزری را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند کاهش توان پرتو به کار رفته، با اطمینان از تشکیل درز جوش با نفوذ کامل، منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود. پارکس و همکارانش [20]، ریزساختار، پروفیل سختی ناحیه اتصال، استحکام کششی و خستگی اتصال لیزری ناهمجنس فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا و دو فازی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به دلیل سرعت بالای نرخ خنک شوندگی ناحیه اتصال در جوشکاری لیزری، ناحیه ذوب باریک دارای ساختار مارتنزیتی می‌باشد. پارکس و همکارانش [21]، خواص کششی اتصال لیزری ناهمجنس فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا و دو فازی را در دمای پایین (40-درجه سلسیوس)، دمای اتاق (25 درجه سلسیوس) و دماهای بالا (تا 180 درجه سلسیوس)، مورد مطالعه قرار دادند. لی و همکارانش [22]، ریزساختار و استحکام اتصال لیزری سوپرآلیاژ پایه نیکل 625 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 را بررسی کردند و توانستند اتصالاتی با استحکام 87% استحکام نهایی آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304) در دمای اتاق، به دست آورند. ژو و همکارانش [23]، تأثیر انرژی، فرکانس و عرض پالس پرتو بر اتصال آلیاژهای Hastelloy C-276 و فولاد زنگ‌نزن AISI 304 را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که انرژی پالس می‌تواند عمق نفوذ و پروفیل درز جوش را تغییر دهد، با افزایش انرژی پالس، میزان نفوذ پرتو افزایش می‌یابد و می‌تواند منجر به کاهش میزان کل انرژی منتقل شده به قطعه شود و فرکانس پرتو میزان همپوشانی پالس‌های متوالی را تغییر می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که پارامترهای انرژی، فرکانس و عرض پالس پرتو تأثیر مهمی بر اتصال دارند و می‌توان با بهینه‌سازی آن‌ها اتصالات مناسبی به دست آورد. همچنین، آنها با مطالعه ترکیب عناصر سازنده اتصال به این نتیجه رسیدند به دلیل اینکه ساختار Hastelloy C-276 نیکل فراوانی دارد، این نیکل وارد ناحیه اتصال شده و محتوای نیکل این ناحیه را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد. کومار و همکارانش [24]، تأثیر پارامترهای توان پرتو لیزر، سرعت جوشکاری و عرض پالس بر اتصال ناهمجنس فولادهای زنگ‌نزن AISI 304 و AISI 316 را با استفاده از پرتو لیزر پالسی Nd-YAG بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تأثیر پارامتر عرض پالس بر اتصال، از دو پارامتر توان و سرعت جوشکاری بیشتر می‌باشد. لیو و همکارانش [25] تغییرات به وجود آمده در ترکیب عناصر سازنده اتصال، به دلیل تبخیر را برای جوشکاری لیزری فولادهای زنگ‌نزن، بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تبخیر عناصر، باعث تغییر ترکیب عناصر سازنده اتصال می‌شود. همچنین، در سرعت جوشکاری ثابت، افزایش توان، منجر به افزایش نرخ تبخیر شده و این تبخیر در ناحیه بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد.

اتصال کامپوزیت فولادهای زنگ نزن آستنیتی و سوپرآلیاژهای پایه نیکل در بسیاری از صنایع مرتبط با کاربردهای دمابالا از قبیل موتور هواپیما، نازل موتور فضاپیما، توربین‌های گاز و محفظه‌های احتراق مورد استفاده قرار می‌گیرد [27, 26]. بنابراین مطالعات گسترده‌ای بر روی بررسی ریزساختار و جوانب متالوژیکی این اتصال انجام گرفته است، ولی رفتار مکانیکی این اتصال در دمای بالا مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس، مهم‌ترین نوآوری این پژوهش مطالعه رفتار مکانیکی این اتصال در دمای بالا با استفاده از آزمایش‌های کشش دمابالا و خزش، می‌باشد. با توجه به کاربردهای گسترده این دو گروه آلیاژی در دماهای بالا، مطالعه رفتار اتصال در دمای بالا و در طول زمان‌های طولانی (به ویژه خزش) دارای اهمیت بسزایی می‌باشد که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، بهینه‌سازی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در جوشکاری لیزری پالسی Nd:YAG (سرعت جوشکاری، عرض پالس پرتو و توان پرتو لیزر)، به منظور دستیابی به بهترین اتصال

[1] Tungsten Inert Gas
[2] Heat Affected Zone

ناهمجنس این دو گروه آلیاژی مهم و پرکاربرد صنعتی در این پژوهش بررسی شده است.

2- مواد و روش تحقیق

دو قطعه ورق ناهمجنس فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L و سوپر آلیاژ پایه نیکل Hastelloy X به ضخامت یک میلی‌متر و طول و عرض 73 میلی‌متر در 53 میلی‌متر در کنار یکدیگر به صورت لب به لب (شکل 1) در فیکسچر مخصوص ورق قرار گرفته و با استفاده از پرتو لیزر پالسی Nd-YAG جوشکاری شده است. ترکیب آلیاژهای مورد استفاده در جوشکاری (فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L و سوپرآلیاژ پایه نیکل Hastelloy X) در جدول 1 آورده شده است. همانطور که در جدول 1 دیده می‌شود، عنصر پایه در آلیاژ 304L، آهن می‌باشد و مهم‌ترین عناصر آلیاژی آن عبارت‌اند از کروم و نیکل، همچنین در آلیاژ Hastelloy X، نیکل عنصر پایه می‌باشد و عناصر کروم، آهن، مولیبدن و کبالت مهم‌ترین عناصر تشکیل دهنده ساختار آلیاژ هستند.

لبه نمونه‌ها (به طول 57 میلی‌متر) پیش از جوشکاری، با سمباده‌های مختلف تا شماره 800 تحت عملیات سمباده زنی قرار گرفته و پس از آن با استفاده از استون پاک شده است. جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر Nd-YAG پالسی مدل IQL-10 و با حداکثر توان متوسط پرتو 400 وات، انجام گرفته است، همچنین، از دستگاه پاورمتر LpOphir برای سنجش و تنظیم توان پرتو لیزر استفاده شده است. برای جوشکاری از پارامترهای مختلفی برای توان متوسط پرتو، سرعت جوشکاری و همچنین عرض پالس پرتو لیزر استفاده شده که این پارامترها در جدول 2 آورده شده است. در تمام حالات جوشکاری دبی گاز محافظ آرگون در مقدار 10 لیتر بر دقیقه، قطر پرتو لیزر بر روی سطح بالایی نمونه‌ها در 700 میکرومتر و فرکانس پرتو در مقدار 20 پالس در ثانیه، ثابت نگه داشته شده‌اند. تصویر یکی از نمونه‌های جوشکاری شده در شکل 2 نشان داده شده که در آن نواحی با آلیاژهای مختلف مشخص شده‌اند. همانطور که در شکل 2 دیده می‌شود، تعدادی سوراخ در انتهای قطعات ورق (بخش دور از لبه جوشکاری لیزری) وجود دارد که این سوراخ‌ها به منظور سهولت برش نهایی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات (EDM[1])، بر روی قطعات ورق ایجاد شده است.

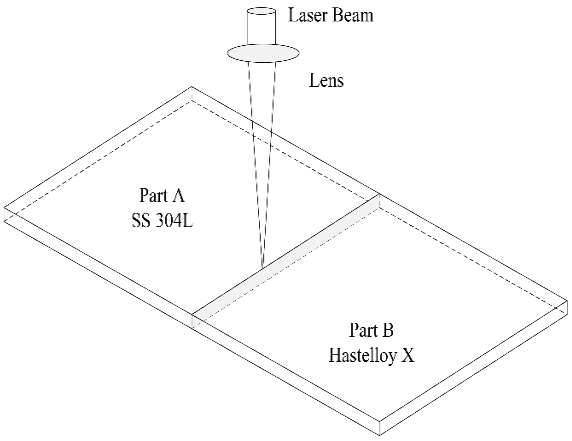

Fig. 1 Butt-welding geometry

شکل 1 هندسه جوشکاری لب به لب

جدول 1 ترکیب آلیاژهای AISI 304L و Hastelloy X (درصد وزنی)

Table 1 AISI 304L and Hastelloy X alloys composition (Wt. %)

عنصر	AISI 304L	Hastelloy X
Fe	Balance	18
Ni	8.0-12.0	Balance
Cr	17.5-19.5	22
Mo	-	9
Co	-	1.5
W	-	0.16
C	≤0.030	0.1
Mn	≤2	≤1
Si	≤0.75	≤1

جدول 2 پارامترهای به کار رفته در جوشکاری لیزری

Table 2 Parameters used in laser welding

شماره نمونه	توان (وات)	عرض پالس (میلی‌ثانیه)	سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)
5	240	5.5	4.5
3	240	5.5	5.84
4	240	5.5	6.67
7	240	4.5	5.84
3	240	5.5	5.84
8	240	6.5	5.84
9	200	5.5	5.84
3	240	5.5	5.84
10	275	5.5	5.84

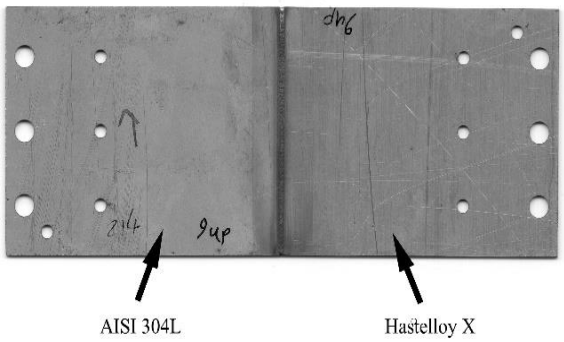

Fig. 2 Welded sample

شکل 2 نمونه جوشکاری شده

پس از انجام جوشکاری، نمونه‌های مناسب آزمایش‌های بررسی استحکام مکانیکی، با استفاده از دستگاه وایرکات از قطعات ورق، بریده شده است. یکی از نمونه‌های مناسب آزمایش‌های کشش دمابالا و خزش در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 3 دیده می‌شود، دو زائده کوچک با فاصله 50 میلی‌متر از هم، به منظور اتصال سیستم کرنش‌سنج، بر روی نمونه‌ها قرار گرفته است. طول کلی نمونه‌ها برابر با 116 میلی‌متر و عرض ناحیه موازی نمونه‌ها برابر با 5 میلی‌متر می‌باشد. همچنین به کمک سه عدد ترموکوپل، دمای نمونه‌ها در سه نقطه بالای ناحیه موازی، وسط ناحیه موازی و پایین ناحیه موازی، اندازه‌گیری شده و تنظیم درجه حرارت کوره، به منظور

[1] Electric Discharge Machine

گرمایش نمونه‌ها و پس از آن ثابت نگه داشتن درجه حرارت، با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها انجام شده است.

از اتصال پینی به منظور اعمال نیروی کششی بر دو انتهای نمونه‌ها استفاده شده است که باعث افزایش هم محوری نیروی کششی اعمالی بر نمونه‌ها نیز می‌شود. همچنین با توجه به اینکه آزمایش‌های کشش دما بالا و خزش در دمای 600 درجه سلسیوس انجام شده‌اند، نمی‌توان در این درجه حرارت، از روش‌های اعمال نیروی اصطکاکی (مانند فک‌های گوه‌ای معمول دستگاه‌های کشش) استفاده کرد و باید از روش‌های اتصال پینی و یا پروفیلی (مانند رزوه) استفاده کرد [28]. عموماً فولادهای زنگ نزن آستنیتی در دماهای زیر 600 درجه سلسیوس (به دلیل افت شدید خواص در دماهای بالاتر) مورد استفاده قرار می‌گیرند و سوپرآلیاژهای پایه نیکل در دماهای بالاتر از 600 درجه سلسیوس، به همین دلیل دمای 600 درجه سلسیوس به عنوان دمای گذار از فولاد زنگ نزن به سوپرآلیاژ در نظر گرفته شده و آزمایش‌های کشش و خزش در این دما انجام شده‌اند [29, 30]. در دماهای بالاتر از 600 درجه سلسیوس استحکام و مقاومت به اکسیداسیون فولادهای زنگ نزن آستنیتی به سرعت افت می‌کند و استحکام تسلیم آلیاژ AISI 304L از 166 MPa برای دمای 600 درجه سلسیوس، به مقدار 45 MPa برای دمای 800 درجه سلسیوس می‌رسد [31]. به همین دلیل در دماهای بالاتر از 600 درجه سلسیوس، استحکام ناحیه آلیاژ پایه AISI 304L دچار افت شدیدتری نسبت به سایر نواحی خواهد شد و در نتیجه احتمال شکست از ناحیه آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) افزایش خواهد یافت.

برای بررسی تأثیر تغییرات توان میانگین پرتو لیزر بر استحکام اتصال، از 3 توان جوشکاری مختلف 200، 240 و 275 وات استفاده شده است. در این حالت‌ها با ثابت نگه داشتن سرعت جوشکاری در مقدار 5.84 mm/s و عرض پالس در مقدار 5.5 ms، توان متوسط اعمالی تغییر کرده است. با توجه به ثابت بودن فرکانس پرتو در مقدار 20 Hz و عرض پالس در 5.5 ms، مقادیر حداکثر توان پالس‌ها برای توان‌های مختلف مطابق با جدول 3، به دست می‌آید. همان‌طور که در جدول 3 دیده می‌شود، مقادیر حداکثر توان پالس بسیار بالاتر از توان متوسط پالس می‌باشد که یکی از مزیت‌های مهم پرتوهای لیزر پالسی می‌باشد و موجب افزایش عمق نفوذ پرتو پالسی نسبت به پرتوهای پیوسته با توان متوسط برابر می‌شود. در توان متوسط 200 وات، حداکثر توان هر پالس از پرتو لیزر برابر با 1818.18 وات می‌باشد و با افزایش توان متوسط به 275 وات، حداکثر توان پالس به 2500 وات می‌رسد. همچنین، به منظور بررسی تأثیر تغییرات عرض پالس پرتو لیزر بر اتصال، از 3 عرض پالس مختلف 4.5، 5.5 و 6.5 میلی‌ثانیه استفاده شده است. در این حالت‌ها با ثابت نگه داشتن سرعت جوشکاری در مقدار 5.84 mm/s و توان میانگین پرتو در مقدار 240W، عرض پالس پرتو تغییر کرده است. مقادیر حداکثر توان پالس‌ها برای عرض پالس‌های مختلف مطابق با جدول 3، به دست می‌آید. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، در عرض پالس 4.5 ms، حداکثر توان پالس پرتو لیزر به 2666.67 وات می‌رسد، ولی با افزایش عرض پالس به 6.5 ms، مقدار حداکثر توان پالس تا 1846.15 وات کاهش پیدا می‌کند.

برای بررسی تأثیر تغییرات سرعت جوشکاری بر استحکام اتصال، از سه سرعت مختلف 4.5، 5.84 و 6.67 میلی‌متر بر ثانیه استفاده شده است. در این حالت‌ها با ثابت نگه داشتن توان جوشکاری در مقدار 240 W، عرض پالس در مقدار 5.5 ms، و قطر پرتو در مقدار 700 میکرومتر، سرعت جوشکاری تغییر کرده است. تغییر سرعت جوشکاری، میزان همپوشانی پالس‌های پشت سر هم را تغییر می‌دهد، در جدول 4 میزان تقریبی همپوشانی پالس‌ها برای سرعت‌های جوشکاری مورد استفاده، آورده شده است. همانطور که در جدول 4 دیده می‌شود، با قطر پرتو ثابت برابر با 700 میکرومتر در سطح بالایی نمونه‌ها، در سرعت جوشکاری 4.5 mm/s، همپوشانی پالس‌های متوالی برابر با تقریباً 68% می‌باشد و با افزایش سرعت، همپوشانی کاهش یافته و در سرعت 6.67 mm/s به حدود 52% می‌رسد.

از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN MIRA3 برای بررسی دقیق‌تر ریزساختار اتصال استفاده شده است. نمونه‌های مناسب میکروسکوپ الکترونی به صورت عمود بر راستای درز جوش بریده شده و از سمباده‌های شماره 280، 400، 800، 1200، 2000، 3000 و 5000 برای سمباده‌زنی سطح استفاده شده است. همچنین، استون برای پاکسازی سطوح به کار رفته است. علاوه بر این، از تصاویر حاصل از دستگاه میکروسکوپ نوری برای بررسی نفوذ کامل درز جوش استفاده شده است.

Fig. 3 Mechanical test sample

شکل 3 نمونه آزمایش مکانیکی

جدول 3 حداکثر توان پالس برای پارامترهای مختلف لیزر

Table 3 Maximum pulse powers for different laser parameters

توان متوسط (W)	عرض پالس (ms)	فرکانس (Hz)	حداکثر توان پالس (W)
200	5.5	20	1818.18
240	5.5	20	2181.81
275	5.5	20	2500
240	4.5	20	2666.67
240	5.5	20	2181.81
240	6.5	20	1846.15

جدول 4 همپوشانی پالس‌ها برای سرعت‌های جوشکاری مختلف

Table 4 Pulse overlap for different welding speeds

سرعت جوشکاری (mm/s)	همپوشانی پالس‌ها (٪)
4.5	67.86
5.84	60.14
6.67	52.36

3- نتایج

با استفاده از آزمایش‌های کشش در دمای 600 درجه سلسیوس، استحکام نهایی آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) در این دما برابر با 362.3 MPa به دست آمده و به عنوان پارامتر مقایسه‌ای برای بررسی استحکام اتصال حاصل از جوشکاری لیزری به کار رفته است. با توجه به اینکه جوشکاری لیزری در ناحیه بسیار کوچکی اتفاق می‌افتد، تغییر در پارامترهای جوشکاری موجب تغییر در این ناحیه بسیار کوچک می‌شود، بنابراین اکثر بخش‌های نمونه‌های

مختلف آزمایش کشش و خزش (نواحی آلیاژهای پایه AISI 304L و Hastelloy X) کاملاً مشابه یکدیگر هستند و نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مختلف با اختلاف کمی بر روی همدیگر قرار می‌گیرند و فقط در محل اتفاق افتادن شکست، با یکدیگر اختلاف دارند. به همین دلیل دیاگرام تنش-کرنش آزمایش کشش در دمای 600 درجه سلسیوس، فقط برای یکی از نمونه‌ها (شماره 3) رسم شده و در شکل 4 نشان داده شده است. همانطور که از این دیاگرام دیده می‌شود، پس از اینکه نمونه تغییر شکل نسبتاً زیادی از خود نشان داد، شکست نرم اتفاق افتاده است.

در جدول 5 استحکام اتصال و همچنین نسبت استحکام اتصال به استحکام آلیاژ پایه AISI 304L در دمای بالا (600 درجه سلسیوس) به صورت درصد آورده شده است. همان‌طور که از اطلاعات جدول 5 دیده می‌شود، با افزایش توان پرتو لیزر، استحکام اتصال، از حدود 89.78% استحکام آلیاژ 304L برای توان 200 وات تا 100% استحکام برای توان 240 وات افزایش یافته و پس از آن با افزایش بیشتر توان به 275 W، مقداری کاهش یافته و به 97.61% استحکام آلیاژ 304L در دمای 600 درجه سلسیوس می‌رسد. فقط در نمونه شماره 3 شکست از ناحیه آلیاژ پایه اتفاق افتاده است و در دو مورد دیگر نمونه‌ها از ناحیه اتصال دچار شکست شده‌اند. در شکل 5 تصویر نمونه شماره 3 نشان داده شده است. همچنین، همانطور که در جدول 5 دیده می‌شود، در عرض پالس 4.5 ms (نمونه شماره 7) که حداکثر توان هر پالس مقدار بالایی می‌باشد (2667 W)، استحکام اتصال برابر با 93.4% استحکام آلیاژ AISI 304L در دمای 600 درجه سلسیوس می‌باشد و با افزایش عرض پالس و در نتیجه کاهش حداکثر توان پالس، استحکام اتصال افزایش یافته و در عرض پالس 5.5 ms، استحکام اتصال به بیش از استحکام آلیاژ پایه 304L می‌رسد (نمونه شماره 3). با افزایش بیشتر عرض پالس به مقدار 6.5 ms، به دلیل کاهش بیشتر حداکثر توان پالس به مقدار 1846 W، استحکام اتصال کاهش یافته و به حدود 95% استحکام آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) می‌رسد (نمونه شماره 8). در دو نمونه با عرض پالس‌های 4.5 و 6.5 ms، شکست در ناحیه اتصال و در نمونه با عرض پالس 5.5 ms شکست از ناحیه آلیاژ پایه 304L اتفاق می‌افتد. همانطور که از نتایج جدول 5 دیده می‌شود، برای نمونه‌های شماره 5 و 6 که همپوشانی پالس‌ها بیشتر از 60% می‌باشد استحکام اتصال بیش از استحکام آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) می‌باشد و شکست نمونه‌ها از ناحیه آلیاژ پایه اتفاق می‌افتد. ولی با افزایش سرعت جوشکاری به 6.67 mm/s (نمونه شماره 6) و کاهش درصد همپوشانی به زیر 60%، استحکام اتصال شروع به کاهش می‌کند و به 97.7% استحکام آلیاژ 304L می‌رسد.

با استفاده از آزمایش خزش با بار ثابت 122.5 kg (معادل با تنش ثابت 240 MPa) و در دمای ثابت 600 درجه سلسیوس، عمر متوسط خزشی آلیاژ AISI 304L در این شرایط برابر با 4098 دقیقه (68 ساعت و 18 دقیقه) به دست آمده و از آن به عنوان پارامتر مقایسه‌ای، برای بررسی رفتار خزشی اتصال استفاده شده است. مقادیر عمر خزشی برای نمونه‌های مختلف در جدول 6 آورده شده است. همانطور که از اطلاعات جدول 6 دیده می‌شود، در توان جوشکاری 200 W (نمونه شماره 9) عمر خزشی اتصال برابر با 91.4% عمر خزشی آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) می‌باشد و با افزایش توان به 240 W، عمر خزشی افزایش یافته و به بیش از عمر خزشی آلیاژ پایه 304L می‌رسد، در نتیجه شکست از ناحیه آلیاژ پایه 304L اتفاق می‌افتد. با افزایش بیشتر توان به مقدار 275 W، عمر خزشی دوباره کاهش یافته و با شکست نمونه از ناحیه اتصال به 98.9% عمر خزشی آلیاژ پایه 304L می‌رسد. فقط در نمونه شماره 3 شکست خزشی از ناحیه آلیاژ پایه 304L اتفاق می‌افتد، تصویر این نمونه در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور از اطلاعات جدول 6 دیده می‌شود در نمونه شماره 7 (عرض پالس 4.5 ms)، عمر خزشی نمونه برابر با 95.3% عمر خزشی آلیاژ 304L می‌باشد و با افزایش عرض پالس به 5.5 ms (نمونه شماره 3) عمر خزشی به بیش از عمر خزشی آلیاژ 304L افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر عرض پالس به 6.5 ms (نمونه شماره 8)، عمر خزشی اتصال کاهش یافته و به مقدار 96.6% عمر خزشی آلیاژ پایه 304L می‌رسد و در نتیجه نمونه از ناحیه اتصال دچار شکست خزشی می‌شود.

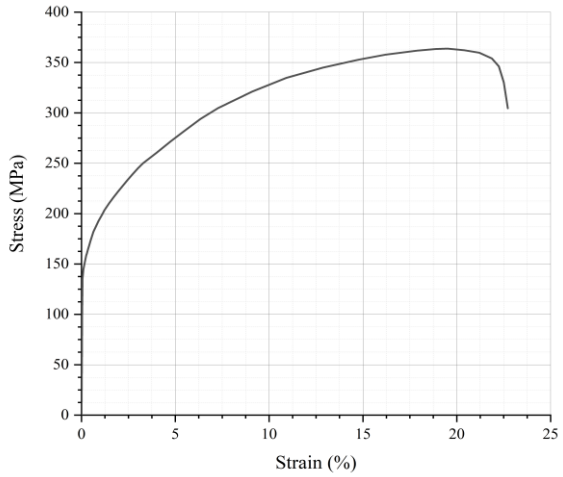

Fig. 4 Stress-strain diagram for sample No. 3 (high temperature tensile test)

شکل 4 دیاگرام تنش-کرنش نمونه شماره 3 (آزمایش کشش دما بالا)

جدول 5 تأثیر تغییرات پارامترهای جوشکاری بر استحکام کششی اتصال

Table 5 Effect of welding parameters on the joint tensile strength

شماره نمونه	استحکام اتصال (MPa)	نسبت استحکام اتصال به استحکام 304L	محل شکست
9	325.28	89.78%	اتصال
3	363.76	100.4%	304L
10	353.65	97.61%	اتصال
7	338.51	93.43%	اتصال
3	363.76	100.4	304L
8	344.96	95.21	اتصال
5	365.7	100.93%	304L
3	363.76	100.4%	304L
6	353.84	97.66%	اتصال

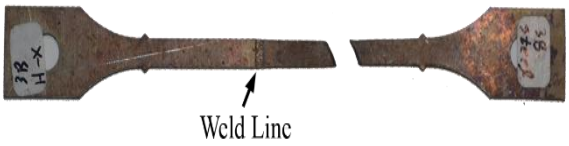

Fig. 5 Sample No. 3 (high temperature tensile test)

شکل 5 نمونه شماره 3 (آزمایش کشش دما بالا)

جدول 6 تأثیر تغییرات پارامترهای جوشکاری بر عمر خزشی اتصال

Table 6 Effect of welding parameters on the joint creep rupture time

شماره نمونه	عمر خزشی (دقیقه)	نسبت عمر خزشی اتصال به عمر خزشی 304L	محل شکست
9	3745	91.39%	اتصال
3	4110	100.3%	304L
10	4054	98.93%	اتصال
7	3906	95.32%	اتصال
3	4110	100.3%	304L
8	3960	96.64%	اتصال
5	4155	101.4%	304L
3	4110	100.3%	304L
6	4066	99.23%	اتصال

همچنین در سرعت‌های جوشکاری 4.5 و 5.84 mm/s (نمونه‌های شماره 5 و 3)، که همپوشانی پالس‌ها بیش از 60% می‌باشد، عمر خزشی اتصال به ترتیب برابر با 4155 و 4110 دقیقه به دست آمده که بیش از عمر خزشی آلیاژ پایه 304L می‌باشد و شکست از ناحیه این آلیاژ پایه اتفاق می‌افتد، ولی با افزایش سرعت و کاهش همپوشانی به زیر 60%، در سرعت 6.67 mm/s (نمونه شماره 6) شکست از ناحیه اتصال اتفاق می‌افتد.

در دو نمونه شماره 3 و 5، شکست کششی و خزشی در ناحیه آلیاژ پایه (AISI 304L) اتفاق افتاده است و در نتیجه این دو نمونه بهترین نمونه‌ها هستند، توان جوشکاری و عرض پالس پرتو برای هر دوی این نمونه‌ها به ترتیب 240 W و 5.5 ms هستند و فقط سرعت جوشکاری نمونه شماره 3 بیشتر می‌باشد. با توجه به اینکه افزایش سرعت جوشکاری منجر به افزایش سرعت فرآیند و کاهش هزینه‌های کارکردی دستگاه می‌شود، نمونه شماره 3 با سرعت جوشکاری 5.84 mm/s به عنوان بهترین نمونه انتخاب می‌شود. سایر پارامترهای جوشکاری برای این نمونه عبارت‌اند از توان جوشکاری 240 W و عرض پالس 5.5 ms. تصویر سطح مقطع درز جوش برای نمونه شماره 3 که اتصال ناهمجنس حاصل، دارای استحکام نهایی بیش از استحکام نهایی آلیاژ پایه AISI 304L می‌باشد در شکل 7 نشان داده شده است و همانطور که دیده می‌شود، سطح مقطع درز جوش دارای کیفیت بالایی می‌باشد و ایرادی در ساختار آن دیده نمی‌شود. همواری گرده جوش و پرشدگی کامل ناحیه درز جوش به خوبی در این شکل دیده می‌شود. همچنین، وجود ایراد در ضعیف‌ترین نمونه (شماره 9)، در شکل 8 نشان داده شده است. نمونه شماره 9 با توان متوسط 200 W، عرض پالس 5.5 ms و سرعت جوشکاری 5.84 mm/s مورد جوشکاری قرار گرفته است. توان پایین جوشکاری در این نمونه موجب کاهش حداکثر توان پالس به 1818.18 W می‌شود. وجود این ایراد ساختاری (از نوع حفره با قطر تقریبی 190 میکرومتر) در نمونه شماره 9 موجب کاهش استحکام مکانیکی آن شده است.

تصویر سطح پایینی درز جوش نمونه شماره 3 (بهترین نمونه) در شکل 9 نشان داده شده است، همانطور که در این شکل دیده می‌شود، نفوذ کامل اتفاق افتاده و ایرادی در ظاهر سطح پایینی درز جوش دیده نمی‌شود. در شکل 10 تصویر سطح پایینی درز جوش برای نمونه شماره 9 (ضعیف‌ترین نمونه) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، به دلیل توان پایین جوشکاری (200 W)، نفوذ کامل اتفاق نیفتاده و فقط در برخی نقاط، مذاب به سطح پایینی قطعات ورق رسیده است. این عدم تشکیل درز جوش کامل موجب کاهش استحکام اتصال می‌شود.

با توجه به اینکه درز جوش، از ترکیب عناصر سازنده دو آلیاژ پایه تشکیل می‌شود، این ناحیه دارای مقادیر بالایی از عنصر نیکل خواهد بود که در عمل مهم‌ترین عنصر افزایش استحکام فولادهای زنگ نزن آستنیتی در دمای بالا می‌باشد [32]. بنابراین در صورتی که ایراد ساختاری در درز جوش وجود نداشته باشد (به دلیل انتخاب پارامترهای جوشکاری صحیح) و درز جوش تقریباً کامل تشکیل شود، اتصال مستحکمی به وجود خواهد آمد. به همین دلیل در نمونه‌های شماره 3 و 5 که درز جوش تقریباً بدون نقص ساختاری به وجود آمده است، استحکام اتصال از استحکام آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L)، بالاتر می‌باشد و شکست از ناحیه آلیاژ پایه 304L اتفاق می‌افتد.

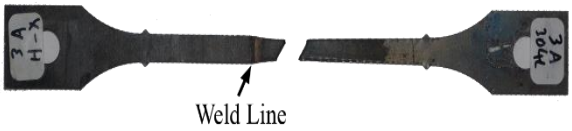

Fig. 6 Sample No. 3 (creep test)

شکل 6 نمونه شماره 3 (آزمایش خزش)

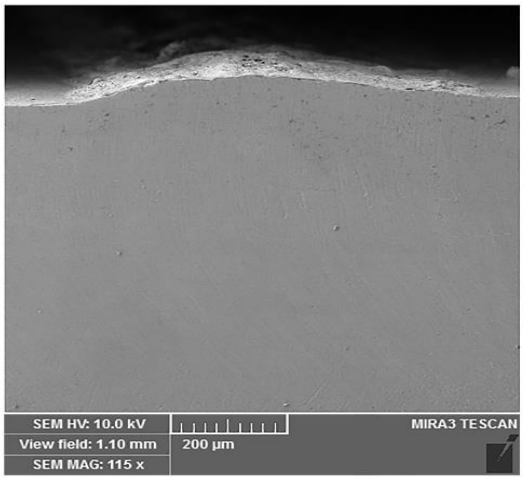

Fig. 7 Electron microscope image for sample No. 3

شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه 3

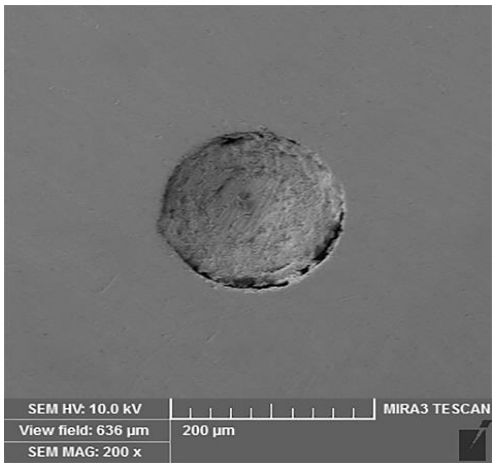

Fig. 8 Electron microscope image for sample No. 9

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه 9

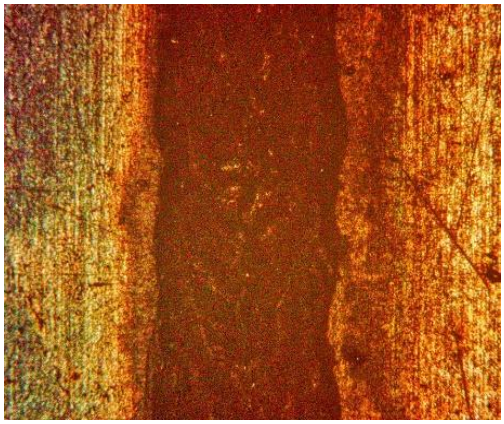

Fig. 9 Optical microscope image for sample No. 3

شکل 9 تصویر میکروسکوپ نوری برای نمونه 3

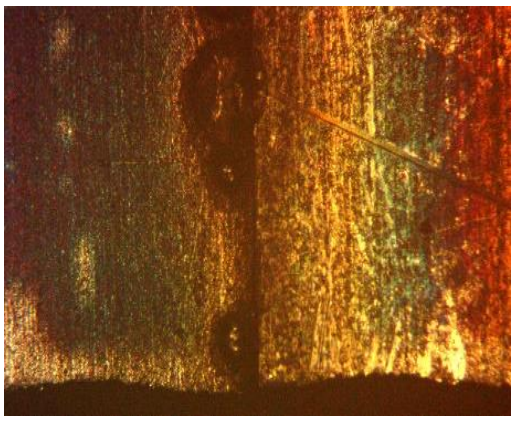

Fig. 10 Optical microscope image for sample No. 9

شکل 10 تصویر میکروسکوپ نوری برای نمونه 9

4- نتیجه گیری

در این تحقیق جوشکاری ناهمجنس آلیاژهای AISI 304L و Hastelloy X با استفاده پرتو لیزر Nd-YAG پالسی و پارامترهای مختلف برای توان متوسط پرتو، سرعت جوشکاری و عرض پالس پرتو لیزر انجام گرفت. پس از آن، استحکام اتصال حاصل با آزمایش‌های کشش دمابالا و خزش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی برای بررسی ساختار اتصال استفاده شده است. بر این اساس، خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج تحقیق حاضر به صورت زیر می‌باشد:

1- نتایج نشان می‌دهد که جوشکاری لیزری یک روش مناسب برای جوشکاری ناهمجنس فولادهای زنگ نزن آستنیتی و سوپرآلیاژهای پایه نیکل است و با این روش می‌توان اتصالات مستحکمی میان این دو گروه مهم آلیاژی به دست آورد.

2- انتخاب پارامترهای صحیح نقش اساسی در استحکام دما بالا و خزشی اتصال دارد و با بهینه‌سازی آن‌ها می‌توان اتصالاتی به دست آورد که استحکام آن‌ها بیش از استحکام آلیاژ پایه ضعیف‌تر (AISI 304L) می‌باشد.

3- در توان متوسط جوشکاری برابر با 240 W، عرض پالس 5.5 ms و سرعت‌های جوشکاری 4.5 و 5.84 mm/s استحکام اتصال بیش از استحکام آلیاژ پایه 304L می‌باشد ولی با توجه به اینکه سرعت‌های جوشکاری بالاتر موجب کاهش زمان کلی جوشکاری و افزایش سرعت فرآیند می‌شود، بهترین سرعت جوشکاری، سرعت 5.84 mm/s می‌باشد.

4- تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که پارامترهای جوشکاری تأثیر مهمی بر ناحیه درز جوش دارند و با انتخاب صحیح آن‌ها می‌توان اتصالاتی با ساختار تقریباً بدون ایراد به دست آورد.

5- هنگامی که درصد همپوشانی پالس‌های متوالی بین 60% تا 70% است تغییرات سرعت جوشکاری و در نتیجه همپوشانی موجب تغییر زیادی در استحکام اتصال نمی‌شود. ولی با افزایش سرعت و کاهش درصد همپوشانی به زیر 60%، استحکام اتصال شروع به کاهش می‌کند.

6- برای جوشکاری ناهمجنس آلیاژهای AISI 304L و Hastelloy X، حداکثر توان پالس در حدود 2200 W مناسب می‌باشد.

5- مراجع

[1] Varghese, P., Vetrivendan, E., Dash, M. K., Ningshen, S., Kamaraj, M. and Kamachi Mudali, U., "Weld Overlay Coating of Inconel 617 M on Type 316 L Stainless Steel by Cold Metal Transfer Process," Surface and Coatings Technology, Vol. 357, pp. 1004-1013, 2019.

[2] Kangazian, J. and Shamanian, M., "Micro-Texture and Corrosion Behavior of Dissimilar Joints of UNS S32750 Stainless Steel/UNS N08825 Ni-Based Superalloy," Materials Characterization, Vol. 155, pp. 109802, 2019.

[3] Schafrik, R. E., Ward, D. D. and Groh, J. R., "Application of Alloy 718 in GE Aircraft Engines: Past, Present and Next Five Years" in Proceeding of Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives, pp. 1-11.

[4] Sharma, S., Taiwade, R. V. and Vashishtha, H., "Effect of Continuous and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Dissimilar Weldments between Hastelloy C-276/AISI 321 Austenitic Stainless Steel," Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 26, No. 3, pp. 1146-1157, 2017.

[5] Sarvari, M. and Divandari, M., "Effect of Solid Ring Preheating and Cooling Conditions on Bonding of Mg-Al Composite Produced by Centrifugal Casting," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites , Vol. 3, No. 1, pp. 85-91, 2016.

[6] Khodabakhshi, M. and Mahmoodi, M., "A Study of Layer Strength in Composite Al 1050/SS 316 Manufactured by Accumulative Roll Bonding Process," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 479-484, 2019.

[7] Shabani, M., Shaghayegh Boroujeni, B. and Ebrahimi Kahrizsangi, R., "Effect of Tool Rotation Speed on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Dissimilar Friction Stir Welded of 5083 Aluminum Alloy and Commercially Pure Titanium," In Persian, Advanced Processes in Materials, Vol. 11, No. 4, pp. 79-96, 2018.

[8] Fabbro, R., "Developments in Nd-YAG Laser Welding," Handbook of Laser Welding Technologies, Eds., pp. 47-72, 2013.

[9] Katayama, S., "Defect Formation Mechanisms and Preventive Procedures in Laser Welding," in: Handbook of Laser Welding Technologies, Eds., pp. 332-373, 2013.

[10] Miller, K. J. and Nunnikhoven, J. D., "Laser - a Space Age Welding Process," SAE Technical Papers, 1965.

[11] Battista, A. D. and Ponti Sr, M. A., "Laser Welding of Microcircuit Interconnections - Simultaneous Multiple Bonds of Aluminum to Kovar" SAE Technical Papers, 1968.

[12] Shaikh Meiabadi, M. S., Kazerooni, A. and Moradi, M., "Experimental and Numerical Investigation of Laser Assisted Pc to Polycarbonate Welding," In Persian, Journal of Welding Science and Technology of Iran, Vol. 4, No. 2, pp. 99-109, 2019.

[13] Faraji, A. H., Goodarzi, M., Seyedein, S. H. and Maletta, C., "Investigation of the Capability of Hybrid Nd:YAG – TIG Welding against Nd:YAG Laser Welding Process for Aluminum Foam Sandwich Panels," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 349-356, 2017.

[14] Stavridis, J., Papacharalampopoulos, A. and Stavropoulos, P., "Quality Assessment in Laser Welding: A Critical Review,"

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 94, No. 5-8, pp. 1825-1847, 2018.
[15] Sun, Z. and Moisio, T., "Comparative Evaluation of Tube-to-Tube Dissimilar Steel Joints Made by Laser, Plasma and TIG Welding," International Journal for the Joining of Materials, Vol. 5, No. 1, pp. 19-29, 1993.
[16] Mai, T. A. and Spowage, A. C., "Characterisation of Dissimilar Joints in Laser Welding of Steel-Kovar, Copper-Steel and Copper-Aluminum," Materials Science and Engineering A, Vol. 374, No. 1-2, pp. 224-233, 2004.
[17] El-Batahgy, A. M., "Effect of Laser Welding Parameters on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels," Materials Letters, Vol. 32, No. 2-3, pp. 155-163, 1997.
[18] das Nevesa, M. D. M., Lottob, A., Berrettac, J. R., de Rossid, W. and Júniord, N. D. V., "Microstructure Development in Nd:YAG Laser Welding of AISI 304 and Inconel 600," Welding International, Vol. 24, No. 10, pp. 104-113, 2010.
[19] Wei, Y. P., Li, M. H., Yu, G., Wu, X. Q., Huang, C. G. and Duan, Z. P., "Effects of Laser Power Density on Static and Dynamic Mechanical Properties of Dissimilar Stainless Steel Welded Joints," Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao, Vol. 28, No. 5, pp. 1334-1339, 2012.
[20] Parkes, D., Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S. and Chen, D. L., "Microstructure and Fatigue Properties of Fiber Laser Welded Dissimilar Joints between High Strength Low Alloy and Dual-Phase Steels" Materials and Design, Vol. 51, pp. 665-675, 2013.
[21] Parkes, D., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S. and Chen, D. L., "Tensile Properties of Fiber Laser Welded Joints of High Strength Low Alloy and Dual-Phase Steels at Warm and Low Temperatures," Materials and Design, Vol. 56, pp. 193-199, 2014.
[22] Li, G., Huang, J. and Wu, Y., "An Investigation on Microstructure and Properties of Dissimilar Welded Inconel 625 and SUS 304 Using High-Power Co 2 Laser," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 76, No. 5-8, pp. 1203-1214, 2014.
[23] Zhou, S., Chai, D., Yu, J., Ma, G. and Wu, D., "Microstructure Characteristic and Mechanical Property of Pulsed Laser Lap-Welded Nickel-Based Superalloy and Stainless Steel," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 25, pp. 220-226, 2017.
[24] Kumar, N., Mukherjee, M. and Bandyopadhyay, A., "Comparative Study of Pulsed Nd-YAG Laser Welding of AISI 304 and AISI 316 Stainless Steels," Optics and Laser Technology, Vol. 88, pp. 24-39, 2017.
[25] Liu, T., Yang, L. J., Wei, H. L., Qiu, W. C. and Debroy, T., "Composition Change of Stainless Steels During Keyhole Mode Laser Welding" Welding Journal, Vol. 96, No. 7, pp. 258s-270s, 2017.
[26] Sakiyan, S., Sabet, H. and Abbasi, M., "Study the Profile Shape and Mechanical Properties of Bonded Joint Hnv3 to Nimonic 80a Superalloy with Inertia Friction Welding Method," In Persian, Journal of Welding Science and Technology of Iran Vol. 2, No. 1, pp. 14-20, 2016.
[27] Kangazian, J., Shamanian, M. and Ashrafi, A., "Dissimilar Welding between SAF 2507 Stainless Steel and Incoloy 825 Ni-Based Alloy: The Role of Microstructure on Corrosion Behavior of the Weld Metals," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 29, pp. 376-388, 2017.
[28] Metallic Materials - Tensile Testing - Part 2: Method of Test at Elevated Temperature, BS En ISO 6892-2, 2018.
[29] Lippold, J. C., Kotecki, D. J. J. W. M. and Weldability of Stainless Steels, b. J. C. L., Damian J. Kotecki, pp. 376. ISBN 0-471-47379-0. Wiley-VCH, March. "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels," pp. 376, 2005.
[30] Lippold, J. C., Kiser, S. D. and DuPont, J. N., "Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys," John Wiley & Sons, 2011.
[31] Zhu, X. K. and Chao, Y. J., "Numerical Simulation of Transient Temperature and Residual Stresses in Friction Stir Welding of 304l Stainless Steel" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 2, pp. 263-272, 2004.
[32] Pramanik, A. and Basak, A. K., "Stainless Steel: Microstructure, Mechanical Properties and Methods of Application", Nova Science Publishers, Inc., 2015.