



Microstructural and Mechanical Investigation of the Joint of Aluminum Alloy 6061 with CO₂ Laser High Power Welding Machine

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Akbari Mousavi S.A.A.^{*1} PhD,
Faghani G.H.² PhD,
Sheivani H.R.¹ MSc

How to cite this article

Akbari Mousavi S.A.A, Faghani GH, Sheivani H.R. Microstructural and Mechanical Investigation of the Joint of Aluminum Alloy 6061 with CO₂ Laser High Power Welding Machine. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2):447-454.

¹Metallurgy & Material Department, Metallurgy & Material Faculty, Engineering Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

²Materials Department, Mechanical Faculty, Khatam-Ol-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Room 205, First Floor, Metallurgy & Material Faculty, Engineering Campus, North Kargar Street, Tehran, Iran

Phone: +98 (21) 82084096

Fax: +98 (21) 82084096

akbarimusavi@ut.ac.ir

Article History

Received: March 20, 2019

Accepted: May 23, 2019

ePublished: February 01, 2020

ABSTRACT

One of the emerging methods of joining various metals is the use of laser beam welding in a variety of industries such as transportation, aerospace, radar, and marine construction, which reduces fuel consumption and thus reduces environmental pollution. In this study, the microstructure and mechanical properties of similar joints of aluminum alloy 6061 with a thickness of 2 millimeters have been investigated by the laser beam welding method with a high power of 5000 watts. Examined items include the effect of laser welding parameters such as power, frequency, and welding speed on microstructural and mechanical properties. Microstructural analysis results using an optical and scanning electron microscope show that in the process, the microstructure of the weld in the base metal to the center of the weld region changed from the dendritic column to the parallel dendritic zone and eventually reached the equiaxed dendritic area, due to the higher input temperature and consequently less cooling rate. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) showed no significant change in the chemical composition. Investigating the mechanical properties using hardness measurement, and the tensile testing showed that the hardness in the fusion zone was lower than other base metal zones, and the optimized sample was failed in the weld zone. The tensile strength of the optimum welding sample is approximately equal to half the tensile strength of the base metal.

Keywords Laser Welding; Mechanical Properties; Microstructure; Aluminum 6061; Dendrites; Columnar

CITATION LINKS

- [1] ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys [2] Springer handbook of automation [3] Application of laser in welding of non-similar metals [4] Aluminum, and its Alloys [5] On the weldability, composition, and hardness of pulsed and continuous Nd:YAG laser welds in aluminum alloys 6061, 5456, and 5086 [6] Laser beam welding of AA5052, AA5083, and AA6061 aluminum alloys [7] CO₂ laser beam welding of 6061-T6 aluminum alloy thin plate [8] Fiber laser welded AZ31 magnesium alloy: The effect of welding speed on microstructure and mechanical properties [9] Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Process, microstructure, and mechanical properties [10] Effect of Nd:YAG laser welding on microstructure and hardness of an Al-Li based alloy [11] Magnesium loss in Nd:YAG pulsed laser welding of aluminum alloys [12] Effect of pulsed Nd:YAG laser re-melting on chromium surface alloyed AA6061-T6 aluminum [13] Microstructure, texture and mechanical properties of 6061 aluminum laser beam welded joints [14] Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy [15] Benefits of very high feed rates for laser beam welding of AlMgSi aluminum alloys [16] Effect of magnesium content on keyhole-induced porosity formation and distribution in aluminum alloys laser welding [17] Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead [18] An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy [19] Process and Outcome Comparison Between Laser, Tungsten Inert Gas (TIG) and Laser-TIG Hybrid Welding [20] Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review [21] Effect of heat-affected zone on joint strength of welded Al-Mg-Si System [22] Laser welding of aluminum and aluminum alloys

بررسی ریزساختاری و مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با دستگاه توان بالای جوشکاری پرتو لیزر CO₂

سیدعلی اصغر اکبری موسوی* PhD

گروه متالورژی و مواد، دانشکده مواد و متالورژی، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

غلامرضا فغانی PhD

گروه مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص)، تهران، ایران

حمیدرضا شیوانی MSc

گروه متالورژی و مواد، دانشکده مواد و متالورژی، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش‌های نوظهور در اتصال‌دهی فلزات مختلف استفاده از روش جوشکاری پرتوی لیزر در صنایع مختلفی نظیر حمل‌ونقل، هوافضا، ساخت رادار و دریایی بوده که باعث کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش آلودگی محیط زیست خواهد شد. در این پژوهش به بررسی و مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات مشابه و هم‌جنس آلومینیوم آلیاژ ۶۰۶۱ با ضخامت ۲ میلی‌متر با دستگاه جوشکاری پرتوی لیزر با توان بالای ۵۰۰ وات پرداخته شده است. موارد مورد بررسی شامل اثر پارامترهای جوش لیزر مانند توان، فرکانس و سرعت جوش بر خواص ریزساختاری و مکانیکی است. نتایج بررسی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و روبشی نشان می‌دهد که در فرآیند به دلیل حرارت ورودی بالاتر و در نتیجه نرخ سرد شدن کمتر می‌توان مشاهده کرد که ریزساختار جوش از فلز پایه تا مرکز ناحیه جوش از دندریتی ستونی تا ناحیه دندریتی موازی تغییر کرده و نهایتاً به ناحیه دندریتی هم‌محور رسیده است. آنالیز اسپکتروسکوپی اشعه ایکس انرژی متفرق (EDS) نشان داد که تغییر قابل توجهی در ترکیب شیمیایی به وجود نیامده است. بررسی خواص مکانیکی با استفاده از سختی‌سنجی و آزمون کشش نشان داد که سختی کمتری در منطقه هم‌جوشی نسبت به سایر نواحی فلز پایه وجود دارد و نمونه‌های کشش از ناحیه جوش شکستند. همچنین استحکام کششی نمونه جوش بهینه تقریباً برابر نیمی از استحکام کششی فلز پایه است.

کلیدواژه‌ها: جوش لیزر، خواص مکانیکی، ریزساختار، آلومینیوم ۶۰۶۱، دندریتی، ستونی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲

*نویسنده مسئول: akbarimusavi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

جوشکاری با استفاده از پرتو لیزر از روش‌های نوین جوشکاری بوده که در دهه‌های اخیر مورد توجه صنعت قرار گرفته و امروزه به دلیل کیفیت، سرعت و قابلیت کنترل آن، به‌طور وسیعی در صنایع مختلف استفاده می‌شود. در این فرآیند، ذوب و اتصال فلزات توسط حرارت حاصل از پرتو لیزر حالت جامد یا گازی صورت می‌گیرد [1، 2]. از طرف دیگر، در صنایع مختلف نیاز به جوشکاری فلزات هم‌جنس رو به افزایش است. جوشکاری لیزر با توجه به میزان حرارت ورودی

پایین، تنظیم دقیق توان پرتو و محل برخورد پرتو با سطح می‌تواند جوشکاری هم‌جنس را در مقایسه با سایر روش‌ها تسهیل نماید [3]. جوشکاری لیزری یک روش اتصال ذوبی است که به علت گرمای ورودی اندک، برای اتصال انواع فلزات، به‌ویژه قطعات حساس به انرژی ورودی مانند ورق‌های نازک فولادی روشی بسیار سودمند است. ویژگی‌های اصلی جوشکاری لیزری عبارتند از: سرعت، دقت، کنترل‌پذیری بالا، و گرمای ورودی اندک. جوشکاری لیزری عمدتاً بدون استفاده از سیم‌پرکن انجام می‌شود. لبه طرفین اتصال هم‌زمان با تابش لیزر ذوب‌شده یک حوضچه جوش مشترک تشکیل می‌شود که ابعاد آن به علت چگالی انرژی بالای لیزر در مقایسه با روش‌های جوشکاری مرسوم بسیار کوچک‌تر است. به‌خاطر گرمای ورودی اندک، جوشکاری لیزری قطعه در مقایسه با روش‌های مرسوم جوشکاری دچار اعوجاج بسیار کمی می‌شود. در جوشکاری با لیزر تمامی عملیات ذوب و انجماد در چند میلی‌ثانیه انجام می‌شود و به‌خاطر کوتاه‌بودن این زمان، در جوشکاری بسیاری از فلزات احتمال واکنش بین فلز مذاب و اتمسفر کم است.

آلیاژهای گروه ۶۰۰۰، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند. برای مثال آلیاژ ۶۰۶۱ در کاربردهای هوایی، دریایی، خودروسازی، برج‌های تلویزیونی، رادار، وسایل حمل و نقل، قطعات نظامی فضایی و در مواردی که نیاز به مقاومت به خوردگی همراه با استحکام متوسط باشد، به‌کار می‌رود و پراستحکام‌ترین آلیاژ، گروه ۶۰۰۰ است. مهم‌ترین مشکل جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم، نرم‌شدن منطقه متأثر از حرارت در اثر تبلور مجدد و رشد دانه در این منطقه است که در جوشکاری به سبب بسیار باریک‌بودن منطقه متأثر از حرارت، این مشکل کاملاً رفع‌شدنی است. همچنین این آلیاژ از نقطه‌نظر به‌کارگیری در ساخت قطعاتی که لازم است در دماهای پایین کار کنند، حائز اهمیت است [4].

ریزساختار فلز یا فلزات پایه یکی از مهم‌ترین مسائل برای جوشکاری است. فلز پایه از نظر ساختاری برای تحلیل خواص جوش‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، ریزساختار و خواص مکانیکی ارتباط تنگاتنگی با هم دارند.

در مطالعه‌ای که توسط سیسلاک و فورسباک [5] انجام شد، تاثیر جوشکاری پرتوی لیزر ان‌دی‌یاگ (ND:YAG) را بر تبخیر عنصری، حساسیت به ترک گرم و خواص مکانیکی آلیاژ ۶۰۶۱ بررسی کردند. منیزیم در طول جوش تبخیر می‌شود و سختی جوش‌های تحت تاثیر تبخیر منیزیم قرار گرفته و کم شده بود.

در مطالعه دیگری که توسط البتاهجی و کاتسونوا [6] در مورد جوشکاری لیزر آلومینیوم ۶۰۶۱ انجام شد، اثر پارامترهای جوش پرتوی لیزر CO₂ بر ورق آلیاژی تمپر شده ۶۰۶۱ بررسی شد. اندازه‌گیری‌های سختی و آزمون کشش آلومینیوم ۶۰۶۱ یک نرم‌سازی قابل توجه را در ناحیه هم‌جوشی به دلیل انحلال رسوبات استحکام‌بخش نشان داد؛ البته این عیب با عملیات پیرسازی پس از جوشکاری بایزایی شد.

جو و همکاران^[13] ریزساختار، بافت و خواص مکانیکی جوش لیزر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با حرارت ورود $\eta P/v = 30.38.46$ (ژول بر میلی متر) را بررسی کردند. فلزهای جوش عمدتاً متشکل از دندریتهای ستونی دانه‌درشت و دندریتهای هم‌محور شدند و کمی نرم‌سازی در ناحیه متأثر از حرارت به دلیل تبلور مجدد مشاهده شد. اثر الگوی نوسانی پرتو بر مشخصات جوشکاری لیزر آلیاژ ۶۰۶۱ که توسط وانگ و همکاران^[14] روی یک ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر و اتصال سر به سر انجام شد، نشان داد که نوسان پرتو موجب بهبود مورفولوژی جوش شد و تشکیل دانه‌های هم‌محور را در ناحیه هم‌جوشی به دلیل اثر هم‌زدن ارتقاء یافت.

مزایای نرخ تغذیه بسیار بالا برای جوشکاری آلیاژ AlMgSi بدون سیم فیلر را هگنلوکر و همکاران^[15] بررسی نمودند. ایشان جوشی با موقعیت همپوشان و توان ۱۶ کیلو وات با نرخ تغذیه ۳۰ متر بر دقیقه را انجام دادند. نتیجه‌گیری شد که نرخ‌های تغذیه بالا تا ده‌ها متر بر دقیقه در ارتباط با نوسانات عمق نفوذ، حفرات و ترک‌های سنترالین بسیار خوب است و جوشی بدون ترک ارائه می‌کند.

مطالعه‌ای که توسط هوآنگ و همکاران^[16] در مورد تأثیر منیزیم بر تشکیل و توزیع تخلخل ناشی از سوراخ کلیدی جوش لیزر در آلیاژهای آلومینیوم انجام شد، نشان داد که فلز ذوب‌شده در جلوی دیواره سوراخ کلیدی ضخیم‌تر است. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش میزان منیزیم، عمق نفوذ در جهت جوش افزایش می‌یابد و زمان بیشتری لازم است تا به حالت شبه پایدار برسد. چگالی بالاتری از تخلخل در میانه و پایین جوش به دلیل فروپاشی راحت سوراخ کلیدی در نواحی مرتبط با منیزیم بالاتر، تشکیل می‌شود.

در تحقیقی که توسط مرادی و قریشی^[17] به‌منظور بررسی اثرهای متغیرها بر پروفیل هندسی مهره جوش سوپرآلیاژ پایه نیکل رنه ۸۰ انجام شد، معلوم شد که پروفیل مهره جوش تحت تأثیر گرمای ورودی لیزر و پارامترهای فرآیند لیزر است و سرعت جوشکاری به‌عنوان مهم‌ترین متغیر با اثر معکوس بر خروجی‌های فرآیند است. همچنین دریافتند که موقعیت نقطه کانونی اثر قابل توجهی بر شکل هندسی مهره جوش ندارد، اما هرچه از سطح قطعه کار بالاتر رود، ناحیه حوضچه جوش و پهناى مهره جوش افزایش می‌یابد.

فرجی و همکاران^[18] درباره ظرفیت فناوری جوشکاری ترکیبی لیزر-قوسی (تیگ) برای آلیاژ Al-Li (AA2198) تحقیق کردند و دریافتند که در فرآیند جوشکاری لیزر تنها، حالت هدایتی رخ داده و سوراخ کلیدی تشکیل نمی‌شود؛ بنابراین عمق نفوذ بسیار کم است. همچنین متوجه شدند که لیزر با توان بالا همراه با انرژی قوسی کم نسبت به لیزر توان پایین با انرژی قوسی بالا ارجحیت دارد؛ زیرا گرمای ورودی کمتری برای نفوذ کامل مورد نیاز بود و در نتیجه، یک ناحیه متأثر از حرارت کوچک‌تر تشکیل شد.

مرادی و همکاران^[19] بین جوشکاری لیزر، تیگ و ترکیبی لیزر-تیگ مقایساتی انجام دادند. نتایج نشان داد که نفوذ روش ترکیبی دو برابر تیگ و پنج برابر جوشکاری لیزر است. همچنین اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت در تیگ به وضوح درشت بود. در منطقه

هیروشه و همکاران^[7] گزارش دادند که جوشکاری لیزر توان بالای CO₂ بر یک ورق آلیاژ ۶۰۶۱ با ضخامت ۱ میلی‌متر و ناحیه نرم‌شده در جوش‌ها، کمتر از ۲۵٪ جوش تیگ است. آنها نشان دادند که مقادیر سختی فلز را پس از یک عملیات پیرسازی مصنوعی در ۴۴۸ کلوین برای ۲۸/۸ کیلو ثانیه، می‌توان به فلز پایه رساند.

چادوری و همکاران^[8] اثر سرعت جوشکاری لیزر فیبر بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم A231 با ضخامت ۲ میلی‌متر را بررسی کردند. سرعت جوشکاری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه منجر به تشکیل دندریتهای هم‌محور در مرکز ناحیه هم‌جوشی و دندریتهای ستونی در کنار مرز ناحیه هم‌جوشی شده است و همواره همراه با ذرات $\beta\text{-Mg}_{12}\text{Al}_{12}$ یوتکتیک جدا افتاده در نواحی بین دندریتی و بین‌دانه‌ای است. در سرعت جوشکاری ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نسبت به ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، هم ناحیه هم‌جوشی پهن‌تر است و هم اندازه سلول دندریتی در ناحیه هم‌جوشی و اندازه دانه در ناحیه متأثر از حرارت (ناحیه متأثر از حرارت) بزرگ‌تر بود.

مطالعه‌ای که توسط یانگ و همکاران^[9] در مورد اتصالات تی با پرتوی لیزر دو جانبه پنل‌های بدنه هواپیما انجام شد، ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم ۶۱۶۵ با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر با سیم فیلر ۴۰۴۲ جوش داده‌شده، بررسی شد. مشخص شد که هرچه زاویه پرتو افزایش یابد، عمق نفوذ افزایش می‌یابد. در آن پنج ناحیه متمایز بین ناحیه هم‌جوشی و فلز پایه (BM) مشخص شد که شامل ناحیه دندریتی سلولی، ناحیه دندریتی موازی، ناحیه ذوب جزئی، ناحیه فرآیندسازی شده و فلز پایه است.

لی و همکاران^[10] به بررسی اتصالات جوش لیزر پالسی سر به سر ورق‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر آلیاژ پایه آلومینیوم-لیتیم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که این جوش منجر به یک تغییر در ریزسختی، شکل دانه، جهت‌گیری دانه و ناپدید شدن زیربافت و رسوب‌ها می‌شود. یک باند باریک از ناحیه هم‌محور (EQZ) در راستای مرز جوش و یک ساختار دندریتی هم‌محور در ناحیه هم‌جوشی ایجاد شده است.

اتلاف منیزیم در جوش لیزر ان‌دی‌یاگ آلیاژهای آلومینیوم در مطالعه بیرونوند و همکاران^[11] بررسی شد. نتایج تجربی آنها نشان داد که در یک توان ثابت، با افزایش فرکانس، غلظت منیزیم کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که به دلیل واکنش‌های بین منیزیم و سایر عناصر اصلی، ضریب اکتیویته منیزیم برای مدل اصلاح شد تا به‌طور دقیق تبخیر منیزیم را اندازه‌گیری کنند.

اثر ذوب مجدد لیزر ان‌دی‌یاگ پالسی بر سطح کروم آلیاژ ۶۰۶۱ توسط انصاری و همکاران^[12] بررسی شد. در آن، تشکیل درجای ترکیب بین فلزی آلومینیوم-کروم روی سطح پودر کروم از پیش قرارگرفته آلیاژ ۶۰۶۱ با استفاده از جوش لیزر مورد تحقیق قرار گرفت و نشان داد که لایه‌های آلیاژی عمدتاً متشکل از ترکیبات بین فلزی Al₄Cr و Al₇Cr ریز در یک ماتریس محلول جامد $\alpha\text{-Al}$ با مورفولوژی‌های دندریتی و سلولی است. ذوب مجدد لیزر منجر به بهبود یکنواختی و افزایش سختی به بیش از ۶ برابر فلز پایه می‌شود.

می‌کند. از یک قطعه مسی به ضخامت ۱۲ میلی متر به عنوان پشتی (Backing) استفاده شد. سپس نمونه‌ها متالوگرافی شدند (متالوگرافی از سطح مقطع جوش‌ها انجام پذیرفت). نمونه‌ها پس از سنباده‌زنی و پولیش، با محلولی حاوی ۲/۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید، ۱/۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید، ۱ میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید و ۹۵ میلی‌لیتر آب برای ۱۰ ثانیه حکاکی شدند. سپس ریزساختار نواحی مختلف جوش توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس دی‌پی ۱۲ (Olympus DP12) با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و میکروسکوپ الکترونی روبشی هیتاچی اس ۳۴۰۰ (Hitachi S3400) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس نیز با همان میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. از سختی‌سنجی میکرو ویکرز تستر تی‌اچ ۷۱۴ (Micro Vickers) Hardness Tester TH714 برای نشان دادن مقاومت در برابر جسم فرورونده استفاده شد.

با در نظر گرفتن تعداد فراوان متغیرهای جوشکاری لیزر و به منظور شناسایی متغیرهای دستگاه لیزر و چگونگی تاثیر این متغیرها بر جوش لیزری، ابتدا یک سری آزمایش‌های مقدماتی انجام شد. در این آزمایش‌ها، متغیرهای چشمه لیزر اعم از توان و سرعت جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت. پس از دستیابی به یک جوش با نفوذ و رضایت‌بخش و بدون ترک روی ورق آلیاژ آلومینیومی ۶۰۶۱، محدوده مناسب این پارامترها برای طراحی آزمایش‌ها مشخص شد. در شکل ۱، شماتیک فرآیند جوشکاری لیزر نشان داده شده است. در این شکل، موقعیت نقطه کانونی لیزر بر قطعه کار نشان داده شده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ (بر حسب درصد وزنی)

نام عنصر	نماد	درصد
کروم	Cr	۰/۲۵
روی	Zn	۰/۰۱
منیزیم	Mg	۱/۰۵
منگنز	Mn	۰/۱۲
مس	Cu	۰/۲۷
آهن	Fe	۰/۳۱
سیلیسیم	Si	۰/۶۵
آلومینیوم	Al	باقی‌مانده

همجوشی، دانه‌های هم‌محوری وجود دارد که اندازه آنها در جوشکاری لیزر کوچک‌ترین است.

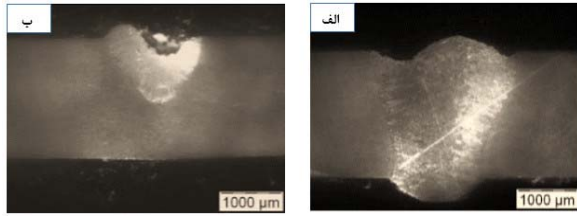
با بررسی مراجع، ملاحظه می‌شود که تاکنون تحقیقات قابل توجهی درباره اتصالات همجنس آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است، ولی بررسی‌های خاص و متمرکز راجع به اتصال همجنس آلیاژ آلومینیوم ضخامت پایین با استفاده از جوش لیزر توان بالا در دسترس نیست. در این پژوهش، سعی بر آن شده است که با انتخاب پارامترهای بهینه و دقت در چپش فلزات در محل اتصال، به جوشی عاری از نقص و در عین حال دارای نفوذ کامل دست یابیم. همچنین اثر سرعت و توان و فرکانس جوشکاری پرتوی لیزر CO₂ توان بالا (۴/۵ تا ۵/۵ کیلو وات) را بر اندازه عمق نفوذ و پهنای جوش و مقادیر سختی و استحکام اتصال همجنس ورق آلیاژ ۶۰۶۱ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

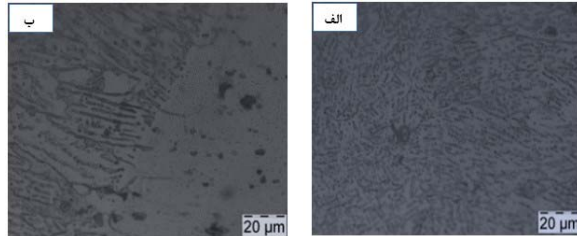
۱۲ نمونه ۳×۳ سانتی‌متر با ضخامت ۲ میلی‌متر آماده شد تا ۶ اتصال را بررسی کنیم. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۶۰۶۱ در جدول ۱ آورده شده است. لبه‌های نمونه‌ها قبل از جوشکاری سنگ زده شد و با برس فولاد زنگ‌نزن تمیز و سپس با استون شستشو شدند تا لایه اکسید و کثیفی از سطوح پاک شود. یک دستگاه جوشکاری با توان بالای (۵۰۰۰ وات) مدل DC035 ساخت شرکت رافین سینار لیزر (ROFIN-SINAR Laser) با آینه کانونی ۳۰۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای جوش‌های صورت‌گرفته در جدول ۲ قابل مشاهده است. این جدول حاوی اطلاعاتی از جمله توان لیزر، سرعت جوشکاری، بسامد ضریب و نرخ جریان گاز محافظ آرگون است. نمونه‌های اولیه توسط وایرکات با لبه‌هایی کاملاً صاف بریده شدند. سپس نمونه‌ها داخل محلول استون قرار گرفته و داخل دستگاه التراسونیک شستشو شدند. از یک فیکسچر مخصوص برای کنار هم قراردادن لبه‌ها و حفظ موقعیتشان در طول فرآیند استفاده شد. در طول فرآیند جوشکاری، گاز آرگون با دبی ۰ الیتر بر دقیقه در محصل اتصال دمیده شد و موضع اتصال را از وجود گازهای مخرب تهی ساخت. بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها در داخل فیکسچر، اشعه لیزر به‌صورت خطی و با سرعت قابل تنظیم در امتداد درز اتصال حرکت

جدول ۲) پارامترهای جوش لیزر

شماره اتصال	توان لیزر (کیلو وات)	توان متوسط (کیلو وات)	قله متوسط توان (کیلو وات)	فرکانس (هرتز)	سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	قطر پرتو (میلی‌متر)	نرخ جریان گاز محافظ آرگون (لیتر بر دقیقه)
۱	۲	۱/۶۱	۲/۲۴	۶	۱	۰/۶	۱۰
۲	۲	۱/۸۷	۲/۳۷	۷	۲	۰/۶	۱۰
۳	۲	۲/۱۴	۲/۵۱	۸	۳	۰/۶	۱۰
۴	۳/۵۰	۳/۲۳	۳/۵۳	۶	۱	۰/۶	۱۰
۵	۳/۵۰	۳/۷۶	۳/۸۹	۷	۲	۰/۶	۱۰
۶	۳/۵۰	۴/۳۰	۴/۴۱	۸	۳	۰/۶	۱۰



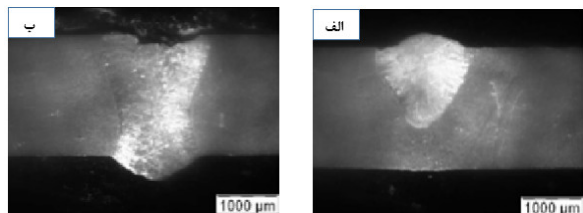
شکل ۳) تصویر میکروگرافی نوری سطح مقطع حوضچه جوش لیزر آلومینیوم ۶۰۶۱؛ الف) اتصال شماره ۱ با توان ۲ کیلو وات و سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه، ب) اتصال شماره ۳ با توان ۲ کیلو وات و سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه



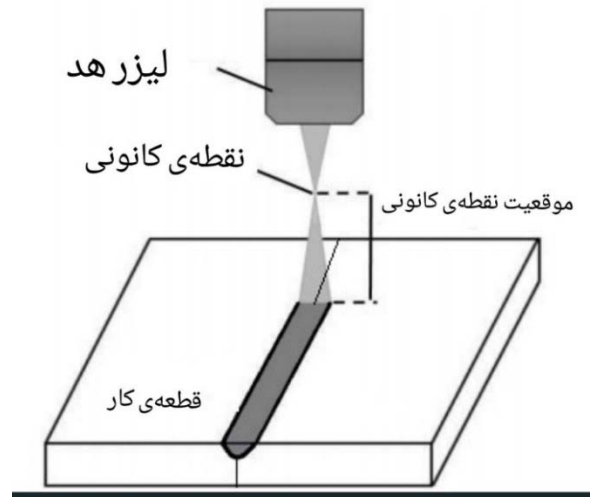
شکل ۴) تصویر میکروگرافی نوری الف) ناحیه همجوشی و ب) ناحیه همجوشی در جوار ناحیه متأثر از حرارت

تاثیرپذیری عمق نفوذ جوش از انرژی ورودی بیشتر از عرض جوش است [22]؛ زیرا افزایش شیب دمایی در نتیجه ازدیاد انرژی ورودی باعث اغتشاش مذاب و انتقال حرارت به عمق حوضچه جوش و در نتیجه موجب تعدیل حالت جوشکاری از هدایت به سوراخ کلیدی شده که این امر سبب افزایش بیشتر عمق نفوذ جوش نسبت به عرض آن با افزایش ولتاژ می‌شود. عمق نفوذ در بسامد و سرعت جوشکاری بالا کمتر از بسامد و سرعت جوشکاری پایین است. زیرا اگرچه حرارت ورودی به‌ازای واحد طول و همپوشانی ضربان‌ها یکسان است، ولی در بسامد ضربان بالا، زمان برای ازدست‌دادن حرارت کمتر است و پدیده پیش‌گرم ضربان قبلی روی ضربان بعدی تشدید شده، اغتشاش مذاب کاهش می‌یابد و عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند.

اگر بخواهیم اثر توان را بررسی کنیم باید گفت که با افزایش توان، عمق و عرض حوضچه جوش افزایش می‌یابد و این اثر قطعی است (شکل ۵). نقاطی که آنالیز اسپکتروسکوپی اشعه ایکس انرژی متفرق (EDS) از ناحیه همجوشی تا فلز پایه انجام شده است در شکل ۶ نشان داده شده است. جدول ۳ نیز نشان‌دهنده اطلاعات اسپکتروسکوپی اشعه ایکس انرژی متفرق است که نشان می‌دهد تغییر قابل توجهی در ترکیب شیمیایی وجود ندارد که برای خواص مکانیکی همگن، ضروری و اساسی است.



شکل ۵) تصویر میکروگرافی نوری سطح مقطع حوضچه جوش لیزر آلومینیوم ۶۰۶۱؛ الف) اتصال شماره ۲ با توان ۲ کیلو وات و سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه، ب) اتصال شماره ۴ با توان ۳/۵ کیلو وات و سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه

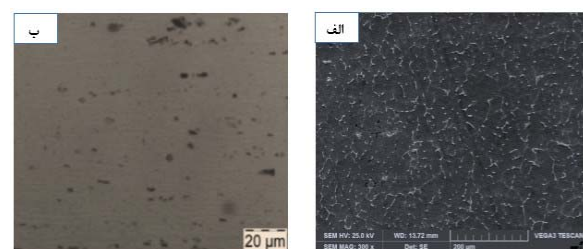


شکل ۱) شماتیک فرآیند و موقعیت نقطه کانونی روی قطعه کار

۳- نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از فلزات پایه در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمق نفوذ با افزایش سرعت جوشکاری کاهش می‌یابد و این می‌تواند به دلیل افزایش حرارت ورودی باشد [20, 21]. از همین شکل می‌توان تاثیر سرعت بر پهنای مهره را نیز مشاهده کرد که روند مشابهی را نشان می‌دهد. همچنین رسوبات ریزی وجود دارند که به‌طور همگن در ماتریس غنی از آلومینیوم توزیع شده‌اند.

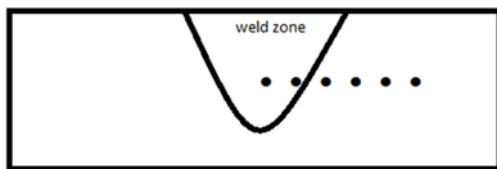
اثر سرعت در یک توان ثابت به این صورت است که کاهش آن، موجب افزایش حرارت ورودی و متعاقباً موجب افزایش عمق نفوذ می‌شود (شکل ۳). ریزساختار جوش از فلز پایه تا مرکز ناحیه جوش از دندریتی سلولی تا ناحیه دندریتی موازی تغییر کرده و نهایتاً به ناحیه دندریتی هم‌محور رسیده است (شکل ۴). تغییر در ریزساختار می‌تواند ناشی از نرخ‌های سرمایش متفاوت و نرخ گرما باشد که در نواحی گوناگون موجود است. کنار خط همجوشی به سمت فلز پایه، ساختار درشت‌دانه مانند ناحیه متأثر از حرارت دیده شد که می‌تواند به علت احتباس گرما از ناحیه همجوشی باشد. همان‌طور که در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد، جهت‌گیری رشد دندریت‌ها در هر دانه مختلف بوده و حقیقتاً یک نوع رشد رقابتی در بین دانه‌های متفاوت دیده می‌شود. مرز دانه‌های انجمادی (Sub Grain Boundary) در ساختار واضع است. با حرکت به سمت خط ذوب، دانه‌های ستونی به وضوح در ساختار قابل مشاهده است (شکل ۴- الف).



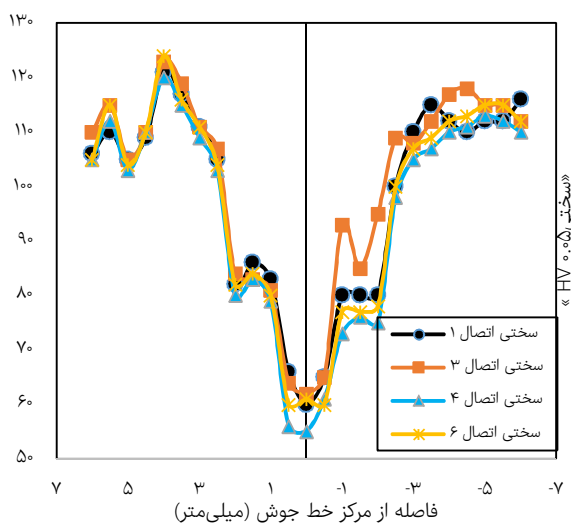
شکل ۲) تصاویر ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱؛ الف) تصویر SEM، ب) میکروسکوپ نوری

خط جوش نگاهی بیندازیم، اُفت قابل توجهی می‌بینیم که در فاصله کوتاهی از خط جوش وجود دارد و این همان ناحیه متأثر از حرارت است که در جوش لیزر بسیار باریک است و در میکروگرافی‌ها قابل رویت نیست.

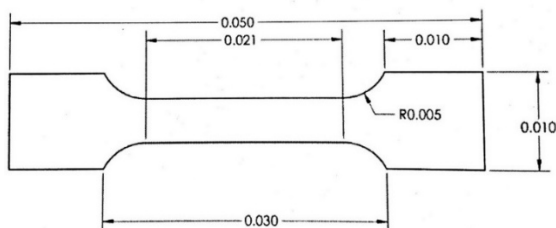
نتایج آزمون کشش اتصال جوش کاهش قابل توجهی را در ناحیه همجوشی نشان داد. لازم به ذکر است که نمونه بهینه (شماره ۲) با استاندارد ای‌اس‌تی‌ام ای ۸ (ASTM E8) با دستگاه سانتام (Santam) و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند (شکل ۸). در کل، جوش‌ها استحکام کششی کمتری در مقایسه با فلزهای پایه دارند. این به‌خاطر حضور ساختار ریختگی در ناحیه همجوشی اتفاق می‌افتد که متعاقباً متحمل هیچ گونه رسوبی نشدند و ترک‌ها در خط همجوشی جوانه زدند. جدول ۴ نشان‌دهنده نتایج تست کشش فلز پایه و اتصال شماره ۲ است. اتصال شماره ۲ دارای عمق نفوذ و سختی مناسبی بود و به دلیل همین شرایط بهینه برای تست کشش انتخاب شدند.



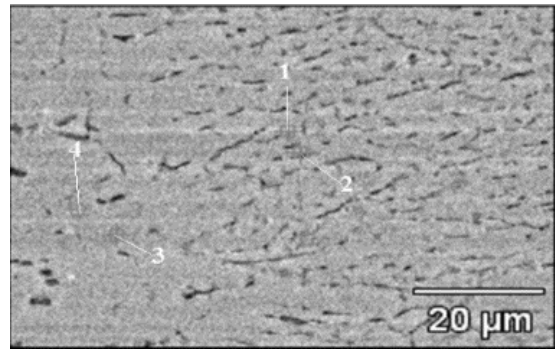
شکل ۷ شماتیک محل انجام آزمایش‌های ریزسختی در سطح مقطع جوش هم‌جنس آلیاژ ۶۰۶۱



نمودار ۱) پروفیل ریزسختی سطح مقطع اتصالات جوش لیزر هم‌جنس آلیاژ ۶۰۶۱



شکل ۸) طرحواره و ابعاد (بر حسب متر) نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-E8



شکل ۶) تصویر SEM خط جوش (ترکیب شیمیایی نقطه ۱: $\text{Si} = 0.63, \text{Al} = 98.49$; نقطه ۲: $\text{Mg} = 0.77, \text{Al} = 98.61, \text{Si} = 0.77$; نقطه ۳: $\text{Mg} = 0.21, \text{Al} = 98.30$; نقطه ۴: $\text{Mg} = 0.90, \text{Al} = 98.71, \text{Si} = 0.36$)

جدول ۳) آنالیز EDS (درصد وزنی) بر اساس شکل ۵

نقطه مورد مطالعه	Si	Al	Mg
۱	۰/۶۳	۹۸/۴۹	۰/۷۶
۲	۰/۷۷	۹۸/۶۱	۰/۶۰
۳	۰/۲۱	۹۹/۳۰	۰/۹۰
۴	۰/۳۶	۹۸/۷۱	۰/۹۳

رفتار جدایش عناصر محلول در آلیاژ را می‌توان به‌طور قابل توجهی توسط سرعت رشد انجمادی متأثر نمود. در شرایط رشد با سرعت بالا که در شرایط سردشدن سریع جوشکاری لیزر محسوس است، میزان جدایش کاهش خواهد یافت. کاهش در میزان غنی‌بودن دندریته‌های جامد یا مذاب بین دندریته‌ای از عناصر محلول، می‌تواند به تفاوت چشمگیر بین ریزساختار منجمدشده آلیاژ ریختگی و آن چیزی که در فلز جوش مشاهده می‌شود، منتج شود.

شماتیک پروفیل ریزسختی روی سطح مقطع جوش لیزر آلومینیوم در حالت جوش در شکل ۷ نشان داده می‌شود. سختی فلز پایه در ۱۲۰-۱۵۰، ۵HV و فلز جوش به یک مقدار کم ۶۰، ۵HV می‌رسد. در نمودار ۱، ریزسختی خط جوش برای ۴ نمونه ۱، ۳، ۴ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که واضح است، وقتی توان افزایش می‌یابد یا سرعت کاهش پیدا می‌کند، گرمای ورودی افزایش یافته و منجر به افزایش تبخیر منیزیم می‌شود که این موضوع کاهش سختی بیشتر در ناحیه همجوشی را در بر دارد. به‌طور کلی سختی پایین‌تر در ناحیه همجوشی به‌خاطر این حقیقت است که منیزیم تبخیر شده و سختی به‌خاطر غلظت پایین منیزیم به حد کمی می‌رسد که همین موضوع استفاده از اتصال لیزر آلومینیوم ۶۰۶۱ را در محیط‌های کمی خورنده دچار شک و تردید ساخته است (نمودار ۱). همچنین دلیل دیگر کاهش سختی منوط به ریزساختار دندریته درشت در ناحیه همجوشی است. تغییر کوچک در سختی در سر تا سر ناحیه همجوشی به دلیل تغییرات فاصله بازوهای دندریته است.

همان‌طور که از نمودار ۱ مشخص است، اتصالات ۱ و ۳ که با توان پایین‌تری از اتصالات ۴ و ۶ جوش داده شده‌اند، سختی بالاتری دارند؛ زیرا درشت‌دانی کمتری در آنها رخ داده و منیزیم کمتری تبخیر شده است. همچنین اگر به نمودار در فواصل ۱ میلی‌متری از

آزمون	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
اتصال شماره ۲	۶/۵	۱۵±۱۳	۱۱۰±۱۲
فلز پایه	۱۲	۳۰۱±۱۰	۲۴۰±۱۰

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از زحمات تمامی اشخاصی که در به‌ثمر رسیدن این پژوهش نقشی داشته‌اند، تشکر می‌نماییم. همچنین از آقای *فرهاد حسن‌آبادی* (کارشناس آزمایشگاه متالوگرافی)، به‌منظور دادن وقت و همکاری بسیار دوستانه در انجام کارهای لازم در این پژوهش تشکر ویژه داریم.

تاییدیه اخلاقی: کل روند پژوهش و نوشتن مقاله با برآوردن اصول اخلاقی انجام شده و حقی از شخصی ضایع نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله هیچ گونه تعارض منافی با یکدیگر ندارند.

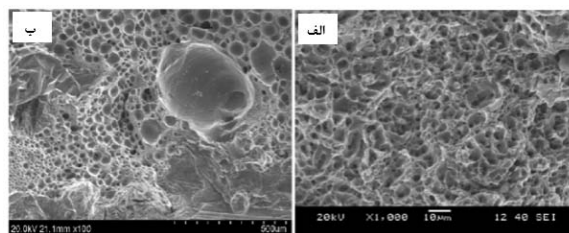
سهم نویسندگان: سیدعلی اصغر اکبری موسوی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ غلام‌رضا فغانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)؛ حمیدرضا شیوانی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش تماماً توسط آقای حمیدرضا شیوانی تامین شده است.

منابع

- 1- Avedesian M.M, Baker H, editors. ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys. Cleveland: ASM International; 1999.
- 2- Nof SY, editor. Springer handbook of automation. Berlin: Springer Science & Business Media; 2009.
- 3- Malek F, Sheikhi M. Application of laser in welding of non-similar metals. Unknown Publisher. 2011. [Persian]
- 4- Ghorbanian J. Aluminum, and its Alloys. 1st Edition. Tehran: Hosein Serajian; 2008. [Persian]
- 5- Cieslak MJ, Fuerschbach PW. On the weldability, composition, and hardness of pulsed and continuous Nd:YAG laser welds in aluminum alloys 6061, 5456, and 5086. Metallurgical Transactions B. 1988;19(2):319-329.
- 6- El-Batahy A, Kutsuna M. Laser beam welding of AA5052, AA5083, and AA6061 aluminum alloys. Advances in Materials Science and Engineering. 2009;2009: Article ID 974182.
- 7- Hirose A, Kobayashi KF, Todaka H. CO₂ laser beam welding of 6061-T6 aluminum alloy thin plate. Metallurgical and Materials Transactions A. 1997;28(12):2657-2662.
- 8- Chowdhury SH, Chen DL, Bhole SD, Powidajko E, Weckman DC, Zhou Y. Fiber laser welded AZ31 magnesium alloy: The effect of welding speed on microstructure and mechanical properties. Metallurgical and Materials Transactions A. 2012;43(6):2133-2147.
- 9- Yang ZB, Tao W, Li LQ, Chen YB, Li FZ, Zhang YL. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Process, microstructure, and mechanical properties. Materials & Design. 2012;33:652-658.
- 10- Cui L, Li X, He D, Chen L, Gong S. Effect of Nd:YAG laser welding on microstructure and hardness of an Al-Li based alloy. Materials Characterization. 2012;71:95-102.
- 11- Malekshahi Beiranvand Z, Malek Ghaini F, Naffakh-Moosavy H, Sheikhi M, Torkamany MJ. Magnesium loss in Nd:YAG pulsed laser welding of aluminum alloys. Metallurgical and Materials Transactions B. 2018;49(5):2896-2905.
- 12- Ansari M, Heydarzadeh Sohi M, Soltani R, Torkamany

سطح شکست فلز پایه و نمونه جوش بهینه، تحت میکروسکوپ روبشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که در شکل ۹ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که سطح شکست فلز پایه، نمایانگر نوع داکتیل شکست به دلیل حضور دیمپل‌ها است. علاوه بر این، می‌توان دید که دیمپل‌ها در فلز پایه اندازه مشابهی دارند. در مورد نمونه بهینه جوش داده‌شده، ظاهر پایه مشابه است، اما دیمپل و حفره‌های بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. این می‌تواند به دلیل حضور ریزحفرات باشد که در میکروگراف‌ها از قبل مشخص نشد. همچنین مورفولوژی دندریتی فلز جوش در حال انجماد را نشان می‌دهد که تحت کرنش افزایشی شکسته است. در شکست بین دندریتی، ترک از میان دندریت‌ها آغاز شده و گسترش می‌یابد. حفره‌های بین دندریتی کاملاً قابل مشاهده است. این حفره‌ها همان انقباض‌ها در طول انجماد هستند که نشان می‌دهند، ساختار ماده کاملاً متراکم نیست. ترک گرم، عیبی است که نیاز جوانه‌زنی و رشد دارد و حفره‌ها می‌توانند انرژی شروع ترک گرم را کاهش دهند و به انشعاب راحت‌تر آن کمک کنند.



شکل ۹) سطح مقطع شکست (الف) فلز پایه و (ب) نمونه بهینه

۴- نتیجه‌گیری

- در جوش لیزر CO₂ به دلیل حرارت ورودی پایین‌تر و متمرکز، ناحیه متأثر از حرارت اتصال همجنس آلایژ ۶۰۶۱ بسیار ناچیز است. افزایش سرعت جوشکاری موجب کاهش عمق و عرض حوضچه جوش می‌شود و این اثر قطعی است.

- رشد دانه‌های فلز جوش در نمونه‌های لیزر کاملاً به‌صورت ستونی-دندریتی است. در منطقه هم‌جوشی، درشت‌دانگی مشاهده می‌شود که موجب کاهش قابل توجه مقادیر استحکام تسلیم می‌شود.

- به دلیل کاهش قابل توجه سختی و استحکام در اتصال لیزر آلومینیوم ۶۰۶۱، می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد این اتصال در تجهیزات پرتنش و محیط‌های خورنده کمی باید با دقت صورت گیرد. استحکام کششی فلز جوش در حدود ۵۰٪ استحکام فلز پایه است. سختی به‌ترتیب از فلز پایه جوش به ناحیه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد. دیمپل‌های نمونه جوش به‌خاطر وجود ریزحفرات بزرگ‌تر هستند.

- parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;55(1-4):205-215.
- 18- Faraji AH, Moradi M, Goodarzi M, Colucci P, Maletta C. An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy. *Optics and Lasers in Engineering*. 2017;96:1-6.
- 19- Moradi M, Ghoreishi M, Khorram A. Process and Outcome Comparison Between Laser, Tungsten Inert Gas (TIG) and Laser-TIG Hybrid Welding. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*. 2018;39(3-6):379-391.
- 20- Hong KM, Shin YC. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;245:46-69.
- 21- Hori H. Effect of heat-affected zone on joint strength of welded Al-Mg-Si System. *Welding International*. 2011;25(10):737-741.
- 22- Huntington C, Eagar TW. Laser welding of aluminum and aluminum alloys. *Welding Research Supplement*. 1983;105-S-107-S.
- MJ. Effect of pulsed Nd:YAG laser re-melting on chromium surface alloyed AA6061-T6 aluminum. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;83(1-4):285-291.
- 13- Chu Q, Bai R, Jian H, Lei Z, Hu N, Yan C. Microstructure, texture and mechanical properties of 6061 aluminum laser beam welded joints. *Materials Characterization*. 2018;137:269-276.
- 14- Wang L, Gao M, Zhang C, Zeng X. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy. *Materials & Design*. 2016;108:707-717.
- 15- Hagenlocher C, Fetzner F, Weber R, Graf T. Benefits of very high feed rates for laser beam welding of AlMgSi aluminum alloys. *Journal of Laser Applications*. 2018;30(1):012015.
- 16- Huang L, Hua X, Wu D, Fang L, Cai Y, Ye Y. Effect of magnesium content on keyhole-induced porosity formation and distribution in aluminum alloys laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;33:43-53.
- 17- Moradi M, Ghoreishi M. Influences of laser welding