



# The effect of surface roughness on 1050 aluminum alloy weld profile welded by pulsed Nd:YAG laser



M. Foumani, H. Naffakh-Moosavy\*, A. Rasouli, H. Aliyari


Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received 10 March 2022 ; Accepted 3 July 2022

## Abstract

Surface roughness in the welding processes is one of the important parameters in the laser welded metal connections which affects laser beam absorption directly. When the laser beam is irradiated to the surface of the base metal, the surface roughness plays an important role in the amount of beam absorption and the amount of melting achieved and directly affects the penetration depth. The main purpose of this study is to investigate the effect of roughness mentioned above in the equal parameter for this widely used aluminum alloy. Microstructural Surveys were performed on three different roughness levels of the sample and the results obtained from the analysis of samples by optical microscope (OM), atomic force microscope (AFM) and Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that, increasing the surface roughness up to  $R_a = 0.16$  micrometer, caused the greater degree of beam engagement by the surface grooves, hence more concentration of the beam photons and more melting obtained, so the depth of penetration increases by consuming a lower amount of energy.

**Keywords:** Surface roughness; Beam absorption; Pulsed Laser welding; penetration depth; Aluminum alloy.

 Corresponding Author: [h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir](mailto:h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir)



## اثر زبری سطح بر هندسه جوش آلیاژ آلومینیم 1050 جوشکاری شده به روش لیزر Nd:YAG پالسی

میلاذ فومنی، همام نفاخ موسوی\*<sup>ID</sup>، علی رسولی، حسین علی یاری

گروه مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1400/12/19؛ پذیرش مقاله: 1401/04/12

### چکیده

زبری سطح در جوشکاری، از پارامترهای مهم در اتصال فلزات جوش داده شده به روش لیزر است که در جذب پرتوهای لیزر مستقیماً اثرگذار است. هنگامی که پرتو لیزر به سطح فلز پایه تابیده می‌شود، زبری سطح نقش مهمی در میزان جذب پرتوها و میزان ذوب حاصل شده دارد و مستقیماً روی عمق نفوذ جوش نهایی اثر می‌گذارد. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر زبری ذکر شده در پارامترهای جوشکاری یکسان برای این آلیاژ در کاربرد آلومینیم است. بررسی‌های ریزساختاری در سه سطح زبری مختلف نمونه انجام شد و نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه‌ها توسط میکروسکوپ‌های نوری، نیروی اتمی و الکترونی روبشی نشان داد افزایش میزان زبری سطح تا اندازه  $Ra = 0/16$  میکرومتر، باعث افزایش میزان درگیری پرتوها می‌شود. در نتیجه میزان تمرکز بیشتری از پرتوها را خواهیم داشت و ذوب بیشتری در این حالت رخ می‌دهد و عمق نفوذ با صرف انرژی کمتر افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** زبری سطح، جذب پرتو، جوشکاری لیزر پالسی، عمق نفوذ، آلیاژ آلومینیم.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir](mailto:h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir)

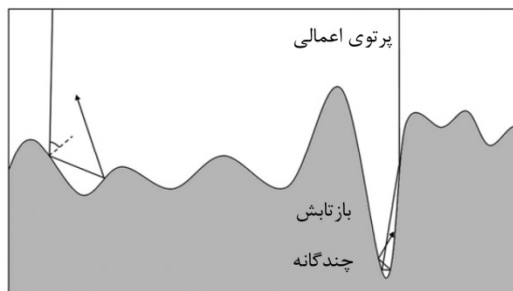
### 1- مقدمه

اعمال پالس را به پارامترهای کنترل کننده اضافه می‌کند که مزیت‌های قابل توجهی به همراه دارد؛ با پالسی شدن پرتوی لیزر، به دلیل افزایش توان، عمق نفوذ افزایش می‌یابد و پالس‌های اولیه نیز به شروع تعامل بین پرتو و سطح مورد هدف کمک می‌کند. مدت زمان اعمال ضربان یا پالس برای یک جوشکاری لیزر با پرتو Nd:YAG عموماً در محدوده 0/5 تا 20 میلی‌ثانیه در فرکانس 5 تا 500 هرتز است [1].

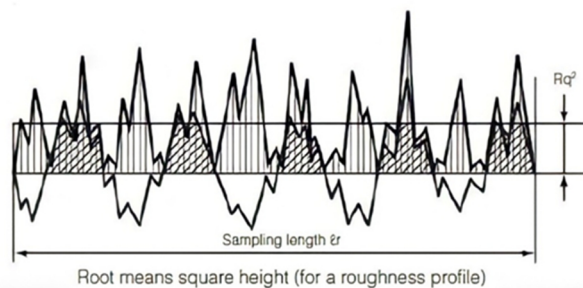
جوشکاری لیزر از روش‌های پیشرفته جوشکاری و اتصال فلزات به روش ذوبی است که با وجود متغیرهای ذاتی از نظر نوع و منبع پرتوی اعمالی از نظر پارامترهای جوشکاری نیز متغیرهای متعددی مثل سرعت جوشکاری، توان و فرکانس دستگاه در نوع و کیفیت اتصال نهایی اثرگذار خواهد بود. حالت ضربانی اعمال پرتو، متغیر جدیدی به نام مدت زمان

اصلی ترین دلیل موفقیت این لیزرها، امکان انتقال پرتو از لیزر به قطعه کار توسط فیبرنوری می باشد که موجب انعطاف پذیری بالای لیزر می شود. در طول دهه گذشته با وجود چالش های متعدد، توجه زیادی به جوشکاری لیزر آلیاژهای آلومینیم شده است. آلیاژهای مختلف آلومینیم به دلیل عناصر آلیاژی مختلفی که دارند جوش پذیری مختلفی از خود نشان می دهند؛ اما سری تجاری این آلیاژ به دلیل خواص ذاتی خود، با چالش های کمتری همراه است [2].

رسانش حرارتی آلومینیم در مقایسه با فولاد تقریباً سه برابر بیشتر است. این موضوع باعث شده آلومینیم به یک ماده مهم در کاربردهای حرارتی و انجمادی مانند مبدل های حرارتی و جوشکاری تبدیل شود. در کنار مس، آلومینیم خالص دارای رسانایی الکتریکی کافی برای استفاده به عنوان رسانای الکتریکی است [3]. اما در مقایسه با فولاد ساده کربنی، آلومینیم دارای رسانش الکتریکی حدوداً شش برابری می باشد در حالی که نقطه ذوب آن تقریباً نصف فولاد است. این موضوع موجب می شود اثر زبری سطح در جوشکاری لیزر این فلز به دلیل ذوب و انجماد سریع تر حوضچه جوش به نسبت فولاد کربنی، واضح تر باشد. علاوه بر این، با افزودن عناصر آلیاژی به این فلز، ضریب رسانش حرارتی آن کاهش می یابد [4]. در نتیجه برای این بررسی آلیاژ 1050 که سری تجاری این فلز محسوب می شود، انتخاب شد.



شکل 1- بازتابش چندگانه حین برخورد پرتو با پستی بلندی سطح.



شکل 2- تعریف Rq یا Rms در هیستوگرام زبری سطح نمونه.

## 2- مواد و روش پژوهش

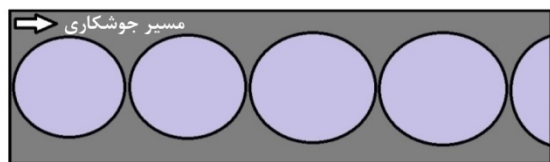
در این پژوهش از ورق آلومینیم 1050 با ضخامت 1/9 میلی متر، به عنوان فلز پایه استفاده شد. نتایج آنالیز تعیین ترکیب شیمیایی به روش ICP این ورق جهت شناسایی کامل عناصر و اطمینان از فلز پایه، در جدول (1) آمده است. برای آماده سازی نمونه ها جهت جوشکاری، ابتدا ورق با آب و سپس استون شستشو داده شد و برای دستیابی به زبری مورد نظر، با استفاده از کاغذ سمباده های به ترتیب 2500، 800 و 120 سطوح مختلفی از زبری روی سطح سه نمونه از همان ورق ایجاد شد. در ادامه

رسانش حرارتی آلومینیم در مقایسه با فولاد تقریباً سه برابر بیشتر است. این موضوع باعث شده آلومینیم به یک ماده مهم در کاربردهای حرارتی و انجمادی مانند مبدل های حرارتی و جوشکاری تبدیل شود. در کنار مس، آلومینیم خالص دارای رسانایی الکتریکی کافی برای استفاده به عنوان رسانای الکتریکی است [3]. اما در مقایسه با فولاد ساده کربنی، آلومینیم دارای رسانش الکتریکی حدوداً شش برابری می باشد در حالی که نقطه ذوب آن تقریباً نصف فولاد است. این موضوع موجب می شود اثر زبری سطح در جوشکاری لیزر این فلز به دلیل ذوب و انجماد سریع تر حوضچه جوش به نسبت فولاد کربنی، واضح تر باشد. علاوه بر این، با افزودن عناصر آلیاژی به این فلز، ضریب رسانش حرارتی آن کاهش می یابد [4]. در نتیجه برای این بررسی آلیاژ 1050 که سری تجاری این فلز محسوب می شود، انتخاب شد.

پرتوهای نوری که روی سطح فلز پایه فرود می آید، قسمتی از آن بازتابش، جذب و منتقل می شود. بخش جذب شده تابش الکترومغناطیس که با الکترون اتم های لایه های سطحی برهم کنش ایجاد می کند، به صورت ارتعاش و سپس گرما ظاهر می شود و باقی بازتابش می شوند. در کنار عوامل متعددی مانند طول موج، افزایش دما و حالت ماده در فلز پایه، زبری سطح ( $R_a$ ) از عوامل تاثیرگذار در میزان جذب پرتوی لیزر اعمال شده به سطح است که از آن برای جذب و درگیری بیشتر پرتو با سطح استفاده می شود. پستی و بلندی های ایجاد شده فرصتی برای بازتابش های چندگانه پرتوی لیزر ایجاد می کند که این موضوع در شکل (1) نشان داده شده است. همچنین شکل (2)

پرتوهای نوری که روی سطح فلز پایه فرود می آید، قسمتی از آن بازتابش، جذب و منتقل می شود. بخش جذب شده تابش الکترومغناطیس که با الکترون اتم های لایه های سطحی برهم کنش ایجاد می کند، به صورت ارتعاش و سپس گرما ظاهر می شود و باقی بازتابش می شوند. در کنار عوامل متعددی مانند طول موج، افزایش دما و حالت ماده در فلز پایه، زبری سطح ( $R_a$ ) از عوامل تاثیرگذار در میزان جذب پرتوی لیزر اعمال شده به سطح است که از آن برای جذب و درگیری بیشتر پرتو با سطح استفاده می شود. پستی و بلندی های ایجاد شده فرصتی برای بازتابش های چندگانه پرتوی لیزر ایجاد می کند که این موضوع در شکل (1) نشان داده شده است. همچنین شکل (2)

جذب اولیه پراکنده شود [9].



شکل 3- شماتیکی از مهره‌های جوش اجرا شده با فرکانس 1/2 هرتز.

پس از جوشکاری نمونه‌ها با استفاده از اپوکسی، مانع سرد شدند. سپس سطح مقطع آلیاژ جوشکاری شده، مطابق استاندارد فرایند سمباده زنی و پولیش مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و سپس با استفاده از محلول (9ml H<sub>2</sub>O+ 1gr NaOH) در مدت زمان 2 دقیقه، سطح نمونه‌ها حکاکی شیمیایی شدند. عکس‌برداری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS انجام شده است. در ادامه آزمون ریزسختی سنجی ویکرز با نیروی 25 گرم نیرو به مدت زمان 15 ثانیه جهت بررسی تغییرات سختی انجام شد.

### 3- نتایج و بحث

نتایج حاصل از عکس‌برداری از سطح نمونه‌های سمباده زنی شده توسط میکروسکوپ الکترونی در شکل (4) به ترتیب آورده شده است. در شکل (5) نتایج آنالیز تصویری مقاطع جوش توسط میکروسکوپ نوری به ترتیب آمده است که در نمونه (الف)، پالس‌های اعمال شده پهن‌شدگی بیشتری روی فلزپایه از خود نشان دادند و در تصاویر این تفاوت قابل تشخیص است. در حالت (ب) و (ج) با افزایش زبری سطح، پهن‌شدگی پالس‌ها روی سطح یا به عبارتی عرض حوضچه به مراتب کاهش بیشتری یافت. همچنین داده‌های مرتبط با توپوگرافی و زبری بدست آمده، در جدول (3) آورده شده اند. جدول (4) نتیجه جوشکاری سه نمونه را به لحاظ مشخصات ابعادی حوضچه جوش نهایی برای درک بهتر نشان می‌دهد. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد با افزایش زبری تا  $R_a = 0/16$  میکرومتر عمق نفوذ افزایش می‌یابد و با زبری بیشتر نمونه تا  $R_a = 0/57$  میکرومتر عمق نفوذ شدیداً کاهش می‌یابد. در حالتی که سطح نمونه تا بالاترین شماره یعنی 2500

جهت به دست آوردن پارامترهای زبری موردنظر، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شدند. پس از تعیین زبری سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، نمونه‌ها مطابق پارامترهای جدول (2) به صورت مهره‌جوش روی صفحه با دستگاه جوشکاری لیزر پالسی با توان اسمی 100 وات جوشکاری شدند.

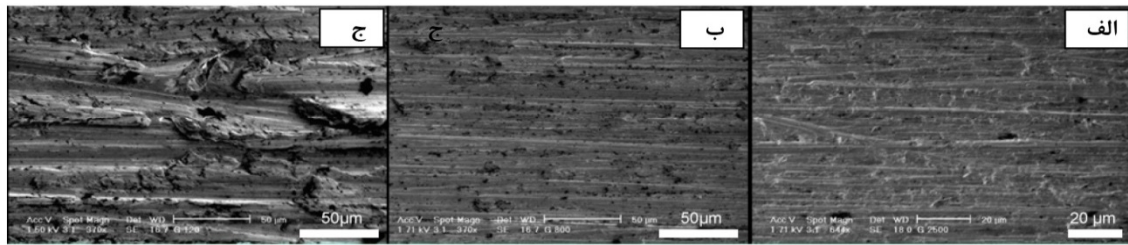
جدول 1- نتیجه بررسی آنالیز ICP ورق آلومینیم.

نوع عنصر آلیاژی	درصد عنصر
آلومینیم	۹۹/۲۲
آهن	۰/۴۳
روی	۰/۱۲
وانادیم	۰/۰۳
نیکل	۰/۰۲
منیزیم	۰/۰۱

جدول 2- پارامتر اجرا شده توسط دستگاه جوش لیزر پالسی.

متغیر	اندازه
سرعت (mm/s)	۱/۱
ولتاژ (V)	۴۷۰
فرکانس (Hz)	۱/۲
مدت زمان اعمال پالس (ms)	۳
سایز لکه (mm)	۱

انتخاب فرکانس 1/2 هرتز برای این فرایند، با این هدف بوده که پالس‌های اعمالی حداقل هم‌پوشانی روی سطح فلزپایه را با یکدیگر داشته باشند چرا که در فرایند ذوب و انجماد جوشکاری لیزر، ذوب ناشی از اعمال پرتوی لیزر پس از انجماد، علاوه بر اینکه موجب زبری سطح می‌شود [8]، در اثر برخورد با مذاب منجمد شده ناشی از پالس قبل (به اندازه سهم هم‌پوشانی)، عمق نفوذ متناسب با پالس اول را ندارد و در نتیجه عمق نفوذ متفاوتی ایجاد می‌کند. این موضوع برای درک بهتر در شکل (3) نشان داده شده است. آلومینیم دارای نفوذ حرارتی بالایی است، بنابراین هنگامی که انرژی کافی جذب می‌شود، به دلیل افزایش زبری سطح، گرما می‌تواند راحت‌تر از محل

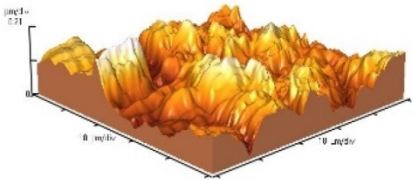
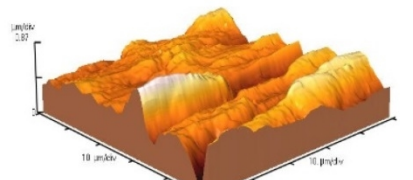
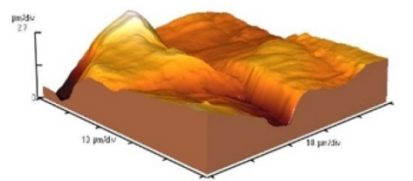


شکل 4- سطح نمونه‌های آماده شده با سمباده‌های به ترتیب از راست به چپ الف- شماره 2500، ب- شماره 800 و ج- شماره 120



شکل 5- تصاویر متالوگرافی نمونه‌های به ترتیب با الف-  $R_a = 0,05$  ب-  $R_a = 0,16$  و ج-  $R_a = 0,57$  میکرومتر با بزرگنمایی پنج برابر.

جدول 3- نتایج بررسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی.

نمونه	$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	سطح نمونه
اول	0/06	0/05	
دوم	0/23	0/16	
سوم	0/74	0/57	

نمونه دوم عرض حوضچه جوش به نسبت نمونه با سمباده 2500 کمتر شد چرا که پرتوها تمرکز بیشتری روی سطح پیدا کردند. در نتیجه عمق نفوذ بالاتری حاصل شد که در شکل (7) ظاهر پالس اعمالی آن نشان داده شده است.

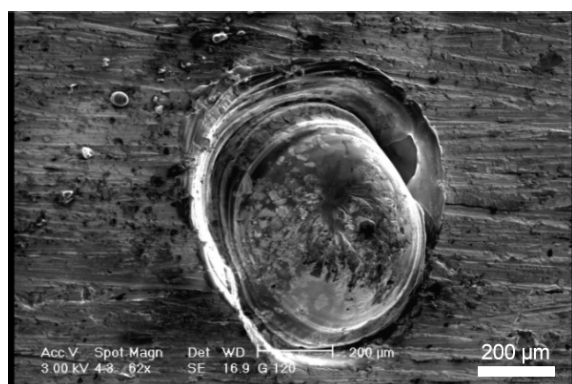
سمباده‌زنی شده باشد، سطح به اصطلاح آینه‌ای می‌شود. در نتیجه پرتوهای اعمالی درگیری کمی با شیارهای سطحی ایجاد می‌کنند و عمق نفوذ بالایی حاصل نمی‌شود. تصویر نهایی پالس اعمال شده روی این سطح در شکل (6) قابل مشاهده است. در

جدول 4- مشخصات ابعادی حوضچه جوش در اثر تغییرات زبری سطح.

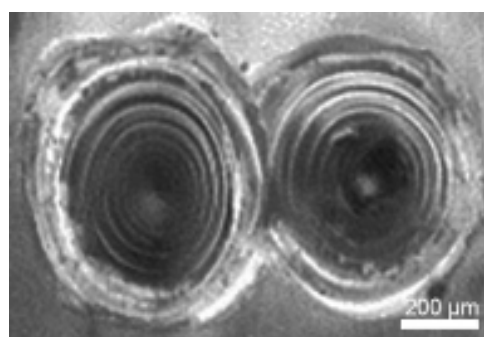
نمونه	زبری سطح ( $R_a$ )	عمق نفوذ حوضچه	عرض حوضچه	نسبت عمق به عرض حوضچه
اول	۰/۰۵	۰/۸۵	۱/۳۲	۰/۶۴
دوم	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۰۴
سوم	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۸۴	۰/۲۹

بیشترین حرارت ورودی و عمق نفوذ شده، به همان نسبت عرض منطقه‌ای که افت سختی پیدا می‌کند به نسبت دیگر نمونه‌ها بیشتر می‌شود. در نمونه سوم نیز، کمترین عمق نفوذ و کمترین نسبت عمق به عرض حوضچه (جدول 4)، باعث بیشترین یکنواختی و کمترین افت عرضی در پروفیل سختی آن می‌شود.

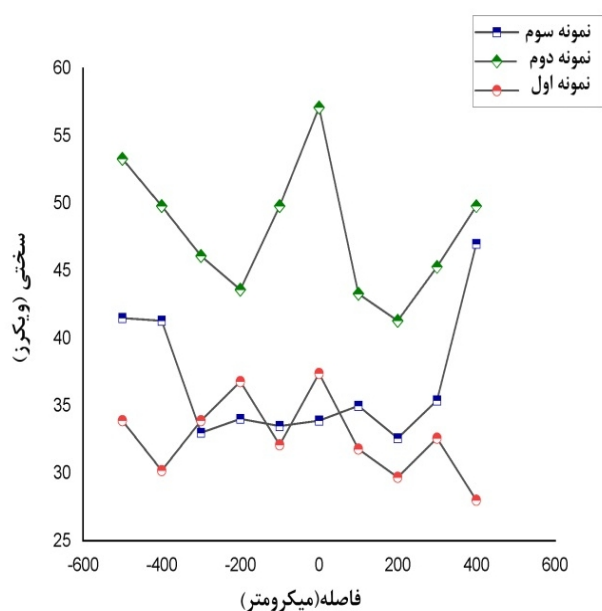
با عمیق‌تر شدن شیارهای سطح برای نمونه با زبری سمباده شماره 120، پستی و بلندی سطح نمونه به بیشترین مقدار مورد بررسی در این پژوهش رسید که جوشکاری آن با کاهش شدید در عمق نفوذ و عرض حوضچه همراه بود. در نتیجه پرتوهای اعمالی به میزان بیشتری از جوشکاری نمونه با سمباده شماره 2500 پراکنده شدند و جذب کمتری هم صورت گرفت، این تفاوت در ظاهر پالس‌های اعمالی نیز قابل تشخیص است که در شکل (6، 7 و 8) نشان داده شده است.



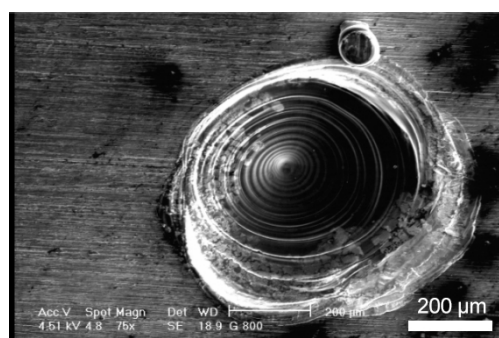
شکل 8- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پالس اعمالی روی نمونه با زبری سمباده شماره 120



شکل 6- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پالس اعمالی روی نمونه با زبری سمباده شماره 2500.



شکل 9- پروفیل سختی حاصل از میکروسختی سنجی سه نمونه.



شکل 7- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پالس اعمالی روی نمونه با زبری سمباده شماره 800.

نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی ویکرز در شکل (9) نشان داد، بیشینه سختی با افزایش عمق نفوذ رابطه مستقیم دارد و با افزایش عمق نفوذ سختی هم افزایش پیدا می‌کند. همانطور که گفته شد، از آنجایی که زبری سطح در نمونه دوم باعث ایجاد

## 4- نتیجه گیری و جمع بندی

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر زبری سطح روی مشخصات هندسی جوش لیزر ورق 1050 آلیاژ آلومینیم بوده است. با اعمال پارامترهای جوشکاری یکسان روی سه نمونه با سه زبری سطح مختلف، سه ابعاد و شکل متفاوت از حوضچه جوش در فلزجوش ورق آلومینیم حاصل شد که این تفاوتها در ابعاد ماکرو و میکرو قابل مشاهده است.

- هرچه زبری سطح ورق جوشکاری شده به میزان بهینه ای افزایش می یابد و به  $R_a=0/16$  میکرومتر نزدیک می شود، نسبت عمق به عرض حوضچه جوش بیشتر می شود و پس از آن با افزایش بیش از حد زبری، عمق نفوذ به دلیل پراکندگی بیش از حد پرتوها شدیداً کاهش می یابد.

- میزان بیشینه سختی با افزایش عمق نفوذ رابطه مستقیم دارد، با افزایش عمق نفوذ و افزایش نسبت عمق به عرض حوضچه، سختی افزایش می یابد.

## منابع

- 1-Laser welding, a practical guide, Christopher Dawes, CEng.
- 2-AMADA, "Laser Welding Fundamentals", [www.amadaweldtech.com](http://www.amadaweldtech.com), 2020.
- 3-[www.azom.com](http://www.azom.com), Aluminum: specifications, properties, classifications and classes, 2005
- 4-Laser welding of light metal alloys: aluminum and titanium alloys, J. M. SÁNCHEZ AMAYA, Titania, Ensayos Y Proyecto Industrials S.L, Spain, 2013.
- 5-Study the Effect of Changing the Surface Roughness and the Laser Focus Distance to the Aluminum Appearance using Picosecond Laser. F.qahtani, 2019.
- 6-ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay, 2019.
- 7-ISO 4287:1997, Profile method Terms, definitions and surface texture parameters.
- 8- Influence of process parameters on kerf geometry and surface roughness in Nd:YAG laser cutting of Al 6061T6 alloy sheet, C. Leone, 2016.
- 9-Effect of Surface Roughness on CO2 Laser Absorption by 316L Stainless Steel and Aluminum, M. Ahmed Obeidi, E. McCarthy, 2019.