مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مرداد 1400، دوره 8، شماره 5، ص‌ص. 23- 29

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تجربی اثر پارامترهای لیزر بر روی استحکام و قطر سطح دکمه جوش نقطه‌ای لیزری فولاد زنگ نزن316

مهدی میرزالو[1]، مهدی مدبری فر[2*]، معین طاهری[2]، ایمان علی قورچی[1]، علیرضا کاریان[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-modabberifar@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 فروردین 1400

داوری اولیه: 6 اردیبهشت 1400

پذیرش: 16 تیر 1400

کلیدواژگان:

جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری

دکمه جوش

استحکام جوش

چکیده

فناوری جوش‌کاری لیزر امروزه از روش‌های نوین در ساخت و تولید می‌باشد. از جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری جهت اتصال ورق‌های نازک فولاد زنگ نزن آستنیتی در تولید وسایل آشپزخانه نیز استفاده می‌شود. استحکام و قطر سطح دکمه جوش دو پارامتر مهم در تعیین کیفیت جوش نقطه‌ای لیزری هستند. در این پژوهش ورق نازک فولاد زنگ نزن استنیتی 316 به ضخامت 0/7 میلی‌متر به روش جوش‌کاری لیزر به صورت اتصال لبه روی هم جوش‌کاری نقطه‌ای شد. برای انجام این جوش‌کاری از دستگاه جوش لیزر ان دی یاگ پالسی با توان متوسط استفاده گردید و اثر پارامترهای مؤثر بر قطر سطح دکمه‌ی جوش و استحکام نهایی نقطه‌ی جوش به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. فرکانس لیزر در سه سطح 5، 7 و 9 هرتز، پیک توان لیزر در سه سطح 1670، 1750 و 1800وات و زمان روشنی پالس در سه سطح 6، 8 و 10میلی‌ثانیه به عنوان پارامترها و سطوح آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش برای طراحی آزمایش از روش تاگوچی L9 استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش توان لیزر قطر سطح دکمه جوش کاهش یافته، با افزایش زمان روشنی پالس قطر سطح دکمه جوش ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و با افزایش فرکانس لیزر قطر سطح دکمه جوش ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس و فرکانس لیزر استحکام جوش نقطه‌ای افزایش یافته و با افزایش توان لیزر استحکام جوش نقطه‌ای ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است.

Experimental investigation of the effects of laser parameters on the strength and size of the weld nugget in laser spot welding of stainless steel sheet 316

Mehdi mirzaloo[1], Mehdi modabberifar[1*],Moien taheri[1], Iman alighourchi[1], Alireza Karian[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 3815688349 Arak, Iran, m-modabberifar@araku.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 April 2021

First Decision: 26 April 2021

Accepted: 7 July 2021

Keywords:

Laser spot welding

Weld nugget

Weld strength

Abstract

Today, laser welding technology is one of the new methods in manufacturing. Laser spot welding is used to connect thin sheets of austenitic stainless steel in the manufacture of kitchenware. The strength and size of the weld nugget are two important parameters in determining the quality of laser spot welding. In this study, thin sheets of stainless steel 316 with a thickness of 0.7 mm were laser spot welded. To perform this welding, a medium power Nd: YAG laser welding machine was used and the effects of effective laser parameters on the strength and size of the weld button were investigated experimentally. Laser frequency at three levels of 5, 7 and 9 Hz, peak laser power at three levels of 1670, 1750 and 1800 W and pulse ON time at three levels of 6, 8 and 10 milliseconds were selected as parameters and test levels. Taguchi L9 method was used to design the experiments. The experimental results show that with increasing laser power, the diameter of the welding button decreases, with increasing the pulse ON time, the diameter of the welding button first increases and then decreases, and with increasing laser frequency, the diameter of the welding button decreases and then increases. In addition, with increasing pulse ON time and laser frequency, the strength of weld nugget increases, and with increasing laser power, the strength of weld button increases firstly and then decreases.

1- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و نیاز روز افزون صنایع به قطعات ظریف و سبک با استحکام بالا، نیاز به جوش‌کاری قطعات نازک نیز بیشتر شده است. ورق‌های نازک فولاد زنگ نزن آستینی مورد استفاده در ظروف و تجهیزات آشپزخانه یکی از این موارد است. اتصال مواد به عنوان یکی از چالش‌های موجود در تولید ورق‌های نازک

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mehdi mirzaloo, Mehdi modabberifar, Moien taheri, Iman alighourchi, Alireza Karian, Experimental investigation of the effects of laser parameters on the strength and size of the weld nugget in laser spot welding of stainless steel sheet 316, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 23- 29, 2021 (in Persian)

فولاد زنگ نزن استنیتی شناخته می‌شود. مسئله موجود در این زمینه، نیاز به اتصال ورق‌های نازک فولاد زنگ نزن استنیتی با سرعت تولید بالاست. یکی از روش‌های مرسوم در اتصال ورق‌های نازک فولادی جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری است. در این روش دو ورق فولادی بر روی هم قرار گرفته و از طریق متمرکز کردن لیزر روی ورق بالایی، هر دو ورق بالایی و پایینی ذوب شده و تشکیل یک حوضچه مذاب می‌دهند که بعد از سرد شدن باعث اتصال هر دو ورق بالایی و پایینی می‌شود. در این فرایند به علت باریک و کوچک بودن نقطه اثر لیزر و در نتیجه کم بودن حرارت ورودی به قطعه جوش‌کاری، منطقه تحت تاثیر حرارت باریک و کوچک است. به همین ترتیب تنش پسماند آن ناچیز و احتمال اعوجاج در آن کاهش قابل ملاحظه ای دارد. انتخاب فلز پایه مناسب، تجهیزات دستگاه و طراحی مناسب محل اتصال و آماده سازی نمونه و انجام صحیح فرایند جوش‌کاری لیزر از جمله عواملی است که می‌تواند بر روی رفتار جوش تأثیر مستقیم داشته باشد و رسیدن به بالاترین استحکام جوش یکی از اهداف پژوهش‌های اخیر می‌باشد.

پژوهش‌های انجام شده بر روی جوش‌کاری لیزری ورق‌های فولادی به چند دسته قابل تقسیم هستند. تعدادی از این پژوهش‌ها تأثیر پارامترهای لیزر را بر خواص فیزیکی و متالوژیکی قطعه جوش‌کاری شده بررسی کردند. مالک قاینی و همکارانش [1] تأثیر پارامترهای فرآیند بر خواص متالورژیکی جوش لیزری ورق‌های نازک فولادی را مطالعه نمودند. آنها از یک لیزر پالسی ان‌دی‌یاگ با توان متوسط برای جوش ورق با کربن پایین استفاده نمودند، سپس آزمایش‌هایی برای تعیین اثر انرژی پالس، عرض پالس و سرعت جوش‌کاری بر ابعاد جوش، میکروساختار و سختی انجام دادند. در نهایت آن‌ها دریافتند که با بهینه‌سازی پارامترها در حالت جوش لب به لب می‌توان به جوش‌هایی با استحکام بالا دست یافت. همچنین مالک قاینی و همکاران [2] ویژگی‌های ریزساختار فلز جوش را در جوش لیزری پالسی ان‌دی‌یاگ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به صورت تجربی تأثیر انرژی پالس لیزر، مدت زمان و سرعت جوش‌کاری را بر ابعاد جوش، ریزساختار و سختی جوش ورق فولادی کم کربن بررسی نمودند. نکویی اصفهانی و همکارانش [3] خواص ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال جوش لیزری فولاد ضد زنگ کم کربن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به صورت تجربی پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی وخواص ریزساختار یک اتصال جوش لیزری بین فولاد ضد زنگ کم کربن و یک فولاد ضد زنگ آستنیتی را تعیین نمودند. اویاراولو و همکاران [4] خواص متالورژیکی و مکانیکی جوش لیزر فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا را مطالعه کردند. آن‌ها ریزساختار و خواص مکانیکی فولادی را که در دیگ‌های بخار کاربرد دارد، بعد از جوش لیزری بررسی نمودند.

شانموگارجان و همکاران [5] پارامترهای جوش‌کاری لیزر برای جوش‌کاری مواد P92 را با استفاده ازتجزیه و تحلیل خاکستری مبتنی برتاگوچی بهینه سازی نموده‌اند. آن‌ها پارامترهای جوش‌کاری این نوع مواد را برای رسیدن به عمق نفوذ و عرض جوش مناسب بهینه نمودند. کومار و سینها [6] خواص ریز ساختار و خواص مکانیکی جوش‌کاری لیزری پالسی ان‌دی‌یاگ فولاد کربنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استحکام کششی نهایی نمونه جوش داده شده و فلز پایه با هم برابر است. همچنین اثر تبلور مجدد درجوش را نیزمورد توجه قرار دادند.

تعدادی دیگر از پژوهش‌های انجام شده بر روی جوش‌کاری لیزری ورق‌های فولادی بر تأثیر فرآیندهای ثانویه و پارامترهای لیزر بر خواص جوش از جمله عمق نفوذ و خواص سطح جوش متمرکز شدند. کواکس [7] پارامترهای جوش لیزری را مورد مطالعه قرار داد. او تأثیر عملیات پیش گرم در جوش‌کاری لیزر را بررسی نموده و رابطه‌ی بین دمای پیش گرم و سختی ویکرز جوش را پیدا کرد. یی چونگ لیو و مینگ هو یو [8] اثر زاویه برخورد پرتو لیزر با سطح قطعه و انرژی پرتو را روی شکل و اندازه جوش ایجاد شده در ورق فولاد زنگ نزن استنیتی 304 به ضخامت 0/8 میلی‌متر مطالعه کرد. دنی پینگ و پال مولیان [9] به بررسی جوش ورق زنگ نزن 304 به ضخامت 60 میکرون که به وسیله‌ی لیزر پالسی ان‌دی‌یاگ جوش‌کاری شده است، پرداختند. جوش‌های انجام شده با اشعه‌ی لیزر تحت ارزیابی‌هایی از جهت صافی سطح، چگالی عیوب و عرض جوش قرار گرفتند. لیپولد [10] ساختار فلز جوش و حساسیت به ترک را در چند فولاد آستنیتی به وسیله‌ی جوش‌کاری لیزر مورد بررسی قرار دادند. ونترلا و همکاران [11] اثر افزایش انرژی پالس روی هندسه‌ی گرده‌ی جوش ورق فولاد زنگ نزن را مورد بررسی قرار دادند. جی دو و همکاران [12] به بررسی استحکام جوش‌ها و قابلیت کنترل جوش‌کاری ورق‌های نازک فولادی پرداختند. آن‌ها دریافتند که استحکام جوش بیشتر از فلز پایه است. همچنین در جوش‌های با نفوذ جزیی، استحکام جوش با افزایش عمق نفوذ به سرعت افزایش یافته است.

پلیپوویچ و همکاران [13] با معیار استحکام مکانیکی، سرعت و توان لیزر را روی PA2200 آزمایش و گزارش کرده‌اند.

لاندوفسکی [14] تأثیر پارامترهای جوش‌کاری لیزر را بر ساختار فولاد ضد زنگ 2205 بررسی کرد. اهداف این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای جوش‌کاری لیزر بر هندسه جوش اتصالات جوش خورده لب به لب بود. نتایج همبستگی بین موقعیت کانون پرتو لیزر و عمق نفوذ جوش را نشان داد. دانیلوفسکی و همکاران [15] نتایج حاصل از جوش‌کاری لیزری اتصال لبه روی هم[1] فولاد کم کربن و فولاد زنگ نزن 316 را منتشر کردند. نتایج نشان داد که استفاده از فولاد زنگ نزن 316 به عنوان ورق فوقانی اتصال جوش مزایایی در توزیع یکنواخت عناصر شیمیایی و تنش در منطقه جوش دارد.

مرور پژوهش گذشته بر روی جوش‌کاری لیزری فولادهای زنگ نزن نشان می‌دهد که اکثر آنها بر روی جوش‌کاری لب به لب لیزری متمرکز بوده و کمتر به جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری پرداخته شده است. در جوش‌کاری لب به لب سرعت جوش‌کاری یکی از پارامترهای مهم و تأثیر گذار بر کیفیت جوش است. امروزه جوش‌کاری لیزری نقطه‌ای در جوش‌کاری ورق‌های فولاد زنگ نزن مانند ظروف آشپزخانه کاربرد فراوانی دارد. این نوع جوش‌کاری پتانسیل بالایی برای اتوماسیون و تولید با سرعت بالا دارد. در این جوش‌کاری علاوه بر استحکام جوش، اندازه‌ی نقطه‌ی جوش در زیبایی محصولات جوش‌کاری شده تأثیر به سزایی دارد و در رقابت‌های تجاری تأثیر گذار است. در این پژوهش تأثیر پارامترهای مؤثر لیزر در فرآیند جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری بر روی استحکام نهایی و اندازه‌ی قطر سطح جوش در جوش‌کاری ورق فولاد زنگ نزن 316 بررسی و تحلیل می‌شود. به منظور انجام آزمایش‌ها از طراحی آزمایش به روش تاگوچی استفاده شده است. نهایتا با توجه به نتایج حاصله و تحلیل سیگنال به نویز سطوح بهینه پارامترها نیز استخراج می‌شود.

2- مواد و فرآیندها

ماده استفاده شده در این پژوهش ورق به ضخامت 0/7 میلی‌متر از جنس فولاد زنگ نزن AISI316 می‌باشد. ترکیب شیمیایی این فولاد آنالیز شده و در جدول 1 نشان داده شده است. این نوع فولاد یکی از انواع آلیاژ در خانواده فولادهای زنگ نزن است و دارای خواصی از قبیل مقاومت به خوردگی، شکل پذیری، ساخت آسان و استحکام مناسب می‌باشد. کاربردهای اصلی این آلیاژ در صنایع شیمیایی و پتروشیمی به منظور ساخت مخازن تحت فشار، مبدل‌های حرارتی، مخازن نگهداری، اجزای لوله کشی، شیرها و پمپ‌ها می‌باشد ولی از این فولادها در تجهیزات پزشکی و صنایع غذایی نیز استفاده می‌شود.

برای تست استحکام جوش نقطه‌ای، طبق استاندارد، تست‌های پیچش، کندن و کشش به تناسب کاربری جوش وجود دارد که در این پژوهش به دلیل نقطه‌ای بودن جوش و نیروی کم مورد نیاز جهت پیچش و کندن جوش، به تست کشش اکتفا شده است. نمونه‌های جوش‌کاری جهت تست کشش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 ورق‌هایی به ابعاد 45×105 میلی‌متر هستند که مطابق شکل 1 به مقدار 35 میلی‌متر به شکل روی هم با یکدیگر همپوشانی دارند. نحوه اتصال دو ورق در شکل 1 نمایش داده شده است. ورق‌ها توسط گیره مخصوص دستگاه جوش‌کاری لیزری بسته شده و جهت گیره بندی به همه نمونه‌ها نیروی یکسانی وارد می‌شود. نقطه جوش‌ها در وسط منطقه همپوشانی دو ورق قرار دارد و نمونه‌های جوش‌کاری شده در دستگاه تست کشش مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل 2 نمودار نیرو جابجایی یکی از نمونه‌های جوش‌کاری شده را نمایش می‌دهد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق AISI316

Table 1 Chemical composition of selected stainless steel sheet 316

C	%0/008
Si	%0/58
Mn	%0/99
P	%0/037
S	%0/004
Cr	%16/98
Mo	%2/01
Ni	%10/44

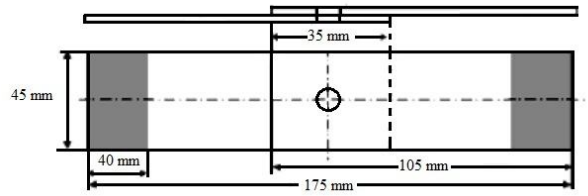

Fig. 1 Tensile-shear test samples were made according to ANSI/AWS/SAE/D8.9-97

شکل 1 نمونه‌های تست کشش ساخته شده بر اساس استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97

در این پژوهش جهت جوش‌کاری از یک دستگاه جوش‌کاری پالسی ان دی یاگ[2] با توان متوسط 400 وات استفاده شده است. در این دستگاه با توجه به جنس فلزات، عمق جوش و عرض جوش، پارامترهای جوش قابل تنظیم می‌باشند. همچنین

[1] Lap Joint

[2] Nd:YAG

امکان انتقال باریکه لیزر به‌وسیله‌ی فیبر نوری بر روی قطعه کار با میز سی‌ان‌سی نیز وجود دارد و نقطه کانونی لیزر بر روی سطح بالایی ورق تنظیم گردید. شکل 3 نمای کلی از مجموعه آزمایشگاهی جوش‌کاری لیزر مورد استفاده و سیستم گیره بندی ورق‌های نمونه را نشان می‌دهد. همچنین جدول 2 مشخصات دستگاه جوش‌کاری لیزر را نشان می‌دهد.

برای تحلیل نتایج آزمایش استحکام جوش، نقطه حداکثر (استحکام نهایی کشش) در منحنی نیرو-جابجایی در تست کشش به عنوان معیار استحکام جوش در نظر گرفته شد.

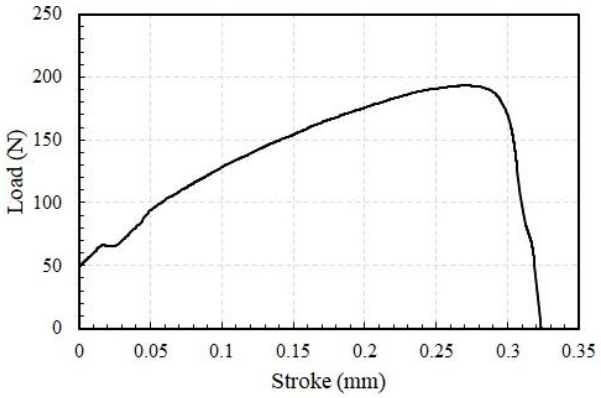

Fig. 2 Load-Stroke diagram of one sample

شکل 2 منحنی نیرو-جابجایی یک نمونه جوش‌کاری شده

Fig. 3 Set-up used for experiments

شکل 3 مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده جهت آزمایش‌ها

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، با توجه به استفاده گسترده از فولاد زنگ نزن 316 در تجهیزات آشپزخانه، یکی از اهداف این پژوهش بررسی اثر پارامترهای لیزر روی قطر سطح دکمه جوش در جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری است. در این مقاله با توجه به شکل 4، معیار کیفیت سطح جوش‌کاری شده، عرض بالایی یا قطر دکمه جوش بر روی سطح ورق می‌باشد. شکل 4 نمایشگر عرض بالایی، میانی و پایینی جوش نقطه‌ای می‌باشد. هرچقدر میزان عرض بالایی یا قطر سطح جوش کمتر باشد، شکل ظاهری جوش بهتر می‌باشد. برای اندازه گیری عرض بالایی نقطه جوش از روشی استفاده گردید که مبتنی بر استفاده از میکروسکوپ و مقیاس اندازه گیری است. در این روش مطابق شکل 5 یک مقیاس اندازه گیری شفاف بر روی نقطه جوش قرار میگیرد و اندازه قطر جوش خوانده می‌شود. قطر جوش در سه امتداد با زاویه 120 درجه اندازه‌گیری شده و از آنها میانگین گرفته شد.

جدول 2 مشخصات فنی لیزر مورد استفاده در جوش‌کاری

Table 2 Technical specifications of laser used in welding

توان ورودی	حداکثر 10 کیلو وات
توان متوسط	400 وات
قله توان پالس	7 کیلووات
طول موج	1064 نانومتر
پهنای پالس	20-0.25 میلی ثانیه
فرکانس	200-1 هرتز
فطر باریکه لیزر	0.6-0.3 میلی‌متر
لامپ	زنون
منبع تغذیه	سه فاز 380 ولت
سیستم خنک کننده	چیلر با آب خنک ساز
گاز محافظ	آرگون

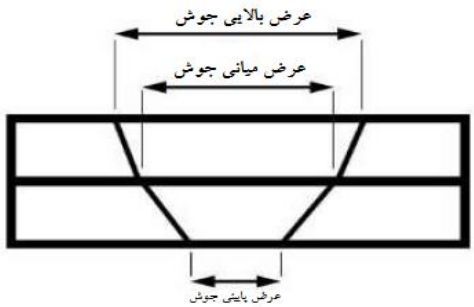

Fig. 4 Schematic diagram of the cross section of a spot weld

شکل 4 نمایش شماتیک مقطع عرضی جوش نقطه‌ای

3- آزمایش‌ها

3-1- طراحی آزمایش‌ها

در این مقاله استحکام نهایی کششی اتصال نقطه جوش و قطر سطح جوش (عرض بالایی جوش) توابع پاسخ می‌باشد و پارامترهای ورودی انتخاب شده، شامل توان ماکزیمم لیزر، زمان روشنی پالس و فرکانس لیزر می‌باشند که با توجه به

پژوهش‌های قبلی، تاثیر آنها در استحکام جوش و قطر سطح جوش به اثبات رسیده است [1، 2]. سطوح (مقادیر کمی اختصاص داده شده به پارامترها) این پارامترها نیز بصورت تجربی و با استفاده از نتایج یکسری آزمایش‌های اولیه تعیین گردید. یکی از معیارهای انتخاب سطوح در آزمایش‌های اولیه، سوراخ نشدن ورق‌ها حین جوش‌کاری نقطه‌ای است. جدول 3 پارامترها و سطوح انتخابی آنها را در این مقاله نشان می‌دهد.

برای طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی L9 استفاده شد تا در هزینه‌ها و زمان انجام آزمایش‌ها صرفه جویی شود. در روش تاگوچی برای مطالعه اثر تمام سطوح پارامترها، تعداد آزمایشهای کمتری از آرایه‌های متعامد که قسمتی از کل آزمایشها می‌باشند، مورد نیاز است. روش تاگوچیL9 برای سه پارامتر سه سطحی طراحی شده است و تعداد 27 ترکیب بین پارامترها و سطوح آنها را به 9 آزمایش تقلیل داده است [16]. جدول 4 آزمایش‌های طراحی شده به همراه نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد. مطابق این جدول تعداد فاکتورها 3 و تعداد تکرار آزمایش‌ها سه بار است که از نتایج آنها میانگین گرفته شد. در کلیه آزمایش‌ها زمان جوش‌کاری به طور تجربی 2/7 ثانیه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید نیروی گیره‌بندی بین ورق با استفاده از قید مخصوص در تمامی آزمایش‌ها ثابت است. با توجه به ماهیت فرآیند که به صورت نقطه جوش می‌باشد، سرعت جوش‌کاری در همه آزمایش‌ها صفر می‌باشد.

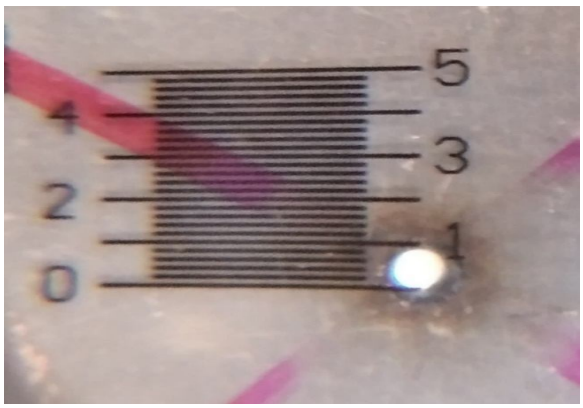

Fig. 5 Method of measuring the width of the spot weld using a scale

شکل 5 روش اندازه گیری عرض نقطه جوش با استفاده از مقیاس

جدول 3 پارامترهای انتخابی و سطوح آنها

Table 3 Selected process parameters in 3 levels

فرکانس لیزر (هرتز)	زمان روشنی پالس (میلی ثانیه)	ماکزیمم توان (وات)
5	6	1670
7	8	1750
9	10	1800

جدول 4 جدول طراحی آزمایش L9 تاگوچی و بهمراه نتایج آزمایش‌ها

Table 4 Taguchi L9 design table and experiments results

شماره آزمایش	فرکانس لیزر (هرتز)	زمان روشنی پالس (میلی ثانیه)	ماکزیمم توان (وات)	استحکام نهایی جوش (نیوتن)	عرض جوش (میلی‌متر)
1	5	6	1670	145	1/20
2	7	8	1670	130	1/27
3	9	10	1670	225	1/15
4	7	6	1750	225	1/00
5	9	8	1750	335	1/1
6	5	10	1750	250	1/20
7	9	6	1800	250	1/00
8	5	8	1800	205	1/05
9	7	10	1800	295	0/97

2-3- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

2-3-1- تأثیر پارامترها و تعاملات آنها بر استحکام و قطر سطح جوش نقطه‌ای

از نمودار تأثیرات پارامترها و نمودار تعاملات پارامترها می توان برای نتیجه‌گیری در مورد تأثیرات پارامترها و تعاملات آنها بر روی نتایج استفاده کرد. در شکل 6 تأثیر پارامترهای توان لیزر، زمان روشنی پالس و فرکانس بر روی استحکام جوش در فرآیند جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری ورق فولاد زنگ نزن 316 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، با افزایش زمان روشنی پالس و فرکانس، استحکام نقطه‌ی جوش افزایش یافته است. در حالی‌که استحکام ابتدا با افزایش توان لیزر افزایش یافته و سپس کاهش یافته است. مقدار افزایش استحکام نهایی جوش از 1670 تا 1750 وات تقریباً 5 برابر کاهش آن از 1750 تا 1800 وات است.

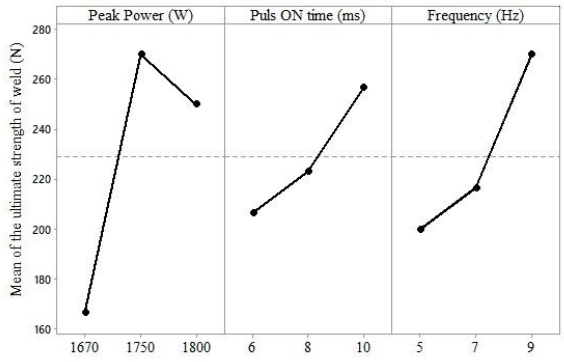

Fig. 6 The main effect of peak power, pulse ON time and frequency on the mean of the ultimate strength of weld

شکل 6 نمودار تأثیر پارامترهای پیک توان، زمان روشنی پالس و فرکانس بر روی استحکام نهایی جوش نقطه‌ای

شکل 7 تأثیر پارامترهای توان لیزر، زمان روشنی پالس و فرکانس را بر روی قطر سطح جوش در فرآیند جوش‌کاری نقطه‌ای لیزری ورق فولاد زنگ نزن 316 نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش توان لیزر، قطر سطح جوش کاهش یافته است. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس از 6 به 8 میلی ثانیه، قطر سطح جوش افزایش پیدا کرده است و سپس با افزایش زمان از 8 به 10 میلی ثانیه کاهش یافته است. با افزایش فرکانس از 5 به 7 هرتز، قطر جوش کاهش پیدا کرده و سپس با افزایش فرکانس از 7 به 9 هرتز اندکی افزایش یافته است.

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نمودارهای تأثیر متقابل پارامترها را برای استحکام و قطر سطح جوش نقطه‌ای نشان می دهد. در نمودار تعاملات، خطوط موازی هیچ تعاملی را بین پارامترها نشان نمی‌دهند، در حالی که خطوط متقاطع نشان دهنده تعاملات معنی دار بین پارامترها هستند [17].

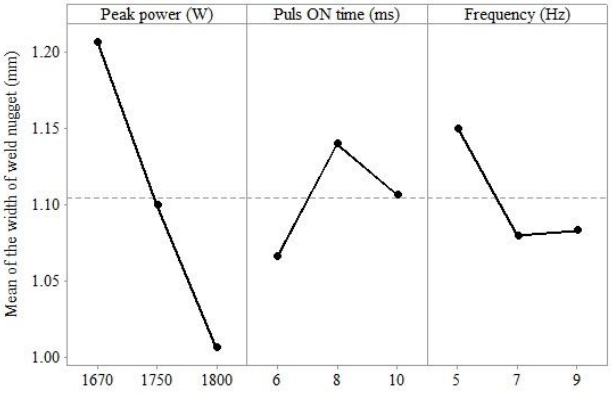

Fig. 7 The main effect of peak power, pulse ON time and frequency on the mean of the width of weld nugget

شکل 7 نمودار تأثیر پارامترهای پیک توان، زمان روشنی پالس و فرکانس بر روی قطر سطح جوش نقطه‌ای

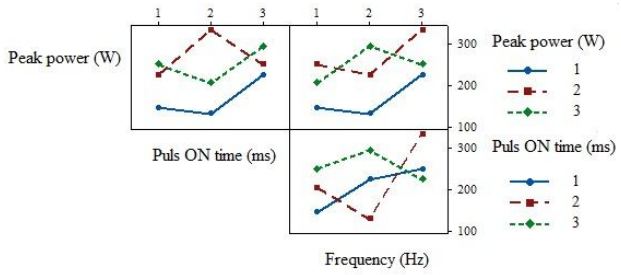

Fig. 8 The interaction diagram for the ultimate strength of weld

شکل 8 نمودار تأثیر تعاملات پارامترها روی استحکام نهایی جوش نقطه‌ای

3-2-2- تعیین سطوح بهینه پارامترها

سطوح بهینه پارامترها با استفاده از روش نسبت سیگنال به نویز یا همان نسبت S/N شناسایی می‌شود.

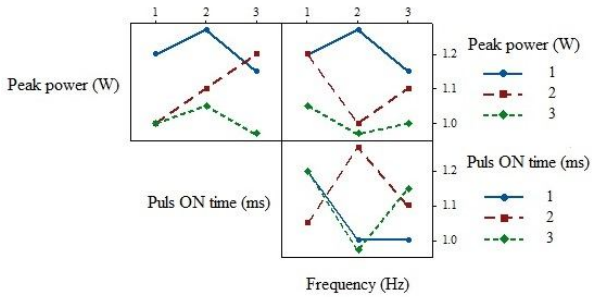

Fig. 9 The interaction diagram for the width of weld nugget

شکل 9 نمودار تأثیر تعاملات پارامترها روی قطر سطح جوش نقطه‌ای

دلیل اصلی این روش یافتن شرایطی است که تحت آن تأثیر سیگنال‌ها (پارامترهای قابل کنترل) بیشتر از همه در مقایسه با اثرات نویزها (پارامترهای غیرقابل کنترل) است. نسبت آماری S / N (η) را می توان با استفاده از رابطه (1) بدست آورد:

$$\eta = -10 \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \qquad (1)$$

در رابطه فوق n تعداد تکرارهای هر آزمایش و y_i خروجی‌های اندازه‌گیری شده در هر آزمایش است. در این پژوهش سطوح بهینه پارامترها برای استحکام جوش سطوحی هستند که در آنها استحکام نهایی جوش به حداکثر خود برسد و سطوح بهینه پارامترها برای قطر سطوح جوش سطوحی هستند که در آن میانگین قطر سطح جوش کمینه باشد. نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز نشان دادند که سطوح بهینه برای قطر سطح جوش برای پارامترهای پیک توان، زمان روشنی پالس و فرکانس به ترتیب 1، 2 و 1 و برای استحکام جوش 2، 3 و 3 هستند.

4- نتایج

در این پژوهش، ورق‌های فولاد زنگ نزن 316 با روش جوش‌کاری نقطه‌ای لیزر به یکدیگر متصل شدند. برای جوش‌کاری از یک دستگاه جوش‌کاری پالسی ان دی یاگ استفاده گردید. طراحی آزمایش به روش تاگوچی L9 انجام شده است و با استفاده از آزمایش‌های تجربی تأثیر سه متغیر مهم جوش‌کاری لیزر نقطه‌ای شامل توان لیزر، زمان روشنی پالس و فرکانس لیزر بر روی استحکام نقطه جوش بررسی و نتایج زیر حاصل شده است:

- افزایش توان لیزر تا 1750 وات سبب افزایش استحکام نقطه جوش می‌گردد، اما از 1750 وات تا 1800 وات استحکام

جوش کاهش یافت.

- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، افزایش زمان روشنی پالس باعث افزایش استحکام جوش شده است.

- اثر افزایش فرکانس لیزر بر افزایش استحکام جوش نیز در نتایج قابل مشاهده است.

همچنین با استفاده از تحلیل آماری تأثیر سه متغیر مهم جوش‌کاری لیزر نقطه‌ای شامل توان، زمان روشنی پالس و فرکانس لیزر بر روی قطر سطح نقطه جوش بررسی و نتایج زیر حاصل شدند:

- با افزایش توان لیزر، قطر سطح جوش کاهش یافت.

- با افزایش زمان روشنی پالس از 6 به 8 میلی ثانیه، قطر سطح جوش افزایش پیدا می‌کند و سپس با افزایش زمان از 8 به 10 میلی ثانیه کاهش می‌یابد.

- با افزایش فرکانس از 5 به 7 هرتز، قطر سطح نقطه جوش کاهش پیدا کرده است و سپس با افزایش فرکانس از 7 به 9 هرتز مقداری افزایش یافته است.

با در نظر گرفتن موارد فوق و اینکه رسیدن به استحکام جوش بالا و قطر کم نقطه جوش مطلوب می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که افزایش توان تا 1750 وات و افزایش فرکانس تا 7 هرتز مطلوب می‌باشد، در حالی‌که افزایش زمان روشنی پالس فقط منجر به افزایش استحکام جوش گردید.

5- مراجع

[1] F. Malek Ghaini, M.J. Hamedi, and M.J. Torkamany, The effect of process parameters on the metallurgical properties of laser welding of thin steel sheet, *Proceedings of 8th National Welding and Inspection Conference of Iran*, Tehran, 2008. (in Persian فارسی)

[2] F. Malek Ghaini, M.J. Hamedi, M.J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding, *Scripta Materialia*, Vol. 56, No. 11, pp. 955-958, 2007.

[3] M. Nekouie Esfahani, J. Coupland, S. Marimuthu, Microstructure and mechanical properties of a laser welded low carbon–stainless steel joint, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 12, pp. 2941-2948, 2014.

[4] R. Oyyaravelu, P. Kuppan, N. Arivazhagan, Metallurgical and mechanical properties of laser welded high strength low alloy steel, *Journal of Advanced Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 463-472, 2016.

[5] B, Shanmugarajan, R. Shrivastava, P. Sathiya, G. Buvanashekaran, Optimization of laser welding parameters for welding of P92 material using Taguchi based grey relational analysis, *Defense Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 343-350, 2016

[6] P. Kumar, A. N Sinha, Microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welding of st37 carbon steel, *Procedia Computer Science*, Vol. 133, pp. 733-739, 2018.

[7] T. Kovacs, Laser welding process specification base on welding theories, *Procedia Manufacturing*, Vol. 22, pp. 147-153, 2018.

[8] Y. Liao, M. Yu, Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, No. 1–3, pp. 102-108, 2007.

[9] D. P'ng, P. Molian, Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 486, No. 1–2, pp. 680-685, 2008.

[10] J.C.Lippold, solidification behavior and cracking susceptibility of pulsed-laser welds in austenitic stainless steels, *welding journal*, Vol. 72, pp 129-145, 1995.

[11] V. A Ventrella, J. R Berretta, W. Rossi, Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 14, pp. 1838-1843, 2010.

[12] J. Du, J. Longobardi, W. P. Latham, A. Kar, Weld strength and process controllability for laser welding of thin sheet metals, *journal of laser applications*, Vol. 12, 2000.

[13] A. Pilipovic.A; et al., Influence of laser sintering parameter on mechanical properties of polymer products, *The 3rd international conference on additive technology*, Nova Gorcia, Slovenia, 2010.

[14] M. Landowski, Influence of parameters of laser beam welding on structure of 2205 duplex stainless steel, *Advances in materials science*, Vol. 19, No. 1 (59), 2019.

[15] H. Danielewski, et al, Numerical and Metallurgical Analysis of Laser Welded, Sealed Lap Joints of S355J2 and 316L Steels under Different Configurations, Materials, Vol. 13, 5819, 2020.

[16] DC Montgomery, Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, 2000.

[17] RL. Mason, RF. Gunt, JL. Hess, Statistical design and analysis of experiments, Wiley & Sons, 2003.