

Investigating Mechanical Properties of Laser Welding of st37 Steel Sheet Using nd:yag Laser

Hossein Azizi ^a, Ali Sadeghi ^{b*}

^a Department of Mechanical Engineering, Damavand branch, Islamic Azad University, Damavand, Tehran, 1647643471, Iran.

^b Department of Mechanical Engineering, Damavand branch, Islamic Azad University, Damavand, Tehran, 1647643471, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Azizi H, Khalili O, Sadeghi A. Investigating Mechanical Properties of Laser Welding of st37 Steel Sheet Using nd:yag Laser. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(1):111-134.

 <https://10.52547/masm.3.1.111>.

KEYWORDS

Microstructure,
Mechanical properties of laser,
welding,
steel sheet st37,
nd:yag laser.

ABSTRACT

Considering possible plastic deformations for metals such as steel during design calculations reduces metal consumption in practice. In general, structural elements with heavy loads, such as shells of building structures, rockets, chemical reactors, thin-walled pipes and other structures, are designed using computational methods, in order to properly and scientifically design, plastic deformations should be considered in them. In the present study, the effects of laser processing on the mechanical strength of steel sheets and their resistance to bending loads caused by laser radiation have been investigated. The results of bending tests and computer simulation of elastoplastic deformation show that st37 carbon steel sheet subjected to local laser processing with surface melting due to increased mechanical strength can be used as a suitable replacement for more resistant and expensive alloys in advanced industrial and military applications.

Extended Abstract

1. Introduction

One of the most important methods of connecting parts is welding, which is widely used in the manufacture or repair of metal materials, and due to the economic and cost-effectiveness of this method, its use is increasing. Things like physical properties and mechanical properties, the availability of materials and required costs, and whether the raw material is suitable for welding, make welding some materials easy and others hard or sometimes impossible. This method is usually distinguished from other methods of melting metals, such as brazing, which usually do not melt the base metal. Laser welding is considered as a unique source of energy that can be controlled in terms of the intensity and position of the radiation. For welding, the beam emitted by the laser is focused to the scale of a small point to create a high energy density. This causes the metal to melt and, in the case of high penetration welds, causes a part of it to evaporate. At the initiation of solidification, a weld pool or joint is formed. Laser light consists of photons and can be amplified by lenses and mirrors. One of the characteristics of laser light is to pass through air without energy loss. There are different types of lasers that

* Corresponding author. Tel.: 09123570693

E-mail address: a_sadeghi@damavandiau.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.3.1.111>.

Received: April 03, 2023; Received in revised form: May 22, 2023; Accepted: June 10, 2023.

© Author



can be used for welding, and among them, we can mention fiber lasers, NDIG pulse lasers, and continuous wave lasers. In addition to being modern, laser welding creates the opportunity to produce parts that cannot be produced by other methods or are difficult to produce. In this method, which uses a high energy density, a small HAZ (Heat Affected Zone) zone is created that is quickly cooled and causes distortion in the resulting connection. Also, the welding area has a large depth to width ratio.

2. Experimental Method

2.1 Materials and experimental procedures

The diameter of the beam was 200 microns, in continuous mode, focused on the surface of the plate, under argon shielding gas with a flow rate of 25 inches liters per minute upwards, 15 inches liters per minute in reverse. The welded plate had dimensions of 3 x 14 cm² for copper and 5 x 9.5 cm² for stainless steel with a thickness of 2 mm. The lines were scratched on the copper surface at a distance of 2 mm from the interface line. High-power dissimilar laser welding was performed, which varies the laser power, speed, and beam shift relative to the joint line. The welding table also included a high-speed Phantom V.9 camera. The camera was placed laterally and at an angle of 33 degrees to the surface. The high-power laser welding system is shown in Figure 1(a). The image of the supervised welding process is video-recorded and the images are extracted as in Figure 1(b). The laser power is 2 kW, the welding speed is 1 m/min, and the laser change is 0 micrometers. The surface image shows the molten pool that appears dark around the keyhole, which emits light due to its high temperature. Illumination due to the hump of the surface of the molten pool has caused significant reflections and the molten particles splashed in the media are clearly visible, which are shown on the picture frame. The empirical analysis was carried out in several stages. The cross-sectional surfaces of the welds were polished and etched with Beche-Bojard solution.

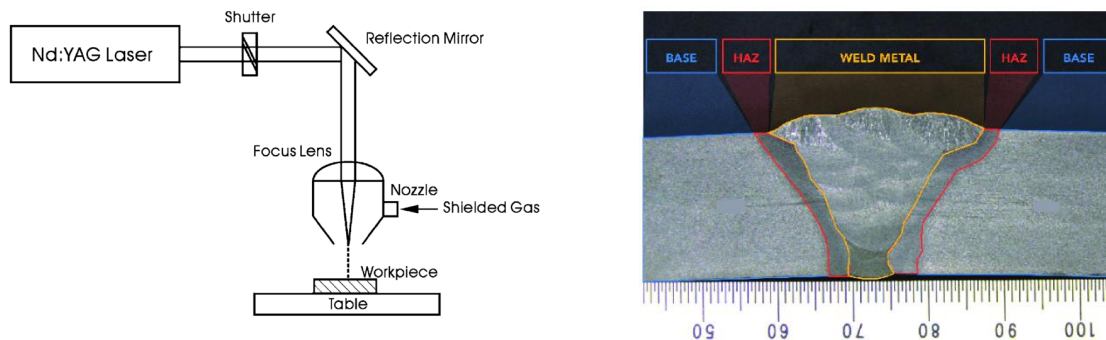


Figure 1. (a) Schematic of laser welding. (b) The image of the boiling pool

2.2 Simulation of elastoplastic bending of metal sheet

Thin-walled metal parts made of steel, which are often subjected to bending loads, are modeled using Finite Element Analysis (FEA). The simulation of elastoplastic deformation of plates under bending load was carried out using a device model, similar to the sample used in metal bending tests according to ISO 7438:2016. The 3D model was created and subsequently converted to STEP format using Autodesk Inventor software package. In the second step, an Ansys Workbench software package was used for the computer simulation of deformations in a laser-processed thin plate that is affected by a bending load. The size of the 3D model, the shape and the depth of the processed layer were similar to the real samples. The boundary conditions, the maximum applied load of 1280 and the maximum deflection (2 mm) in the bending simulation were the same as the conditions used during the experimental bending tests. Structural supports were modeled as movable roller supports. The rounding radius of the punch, the width (10 mm) and the distance between the supports (40 mm) were the same as in the actual bending test.

2.3 Testing the properties of the surface layer processed by laser and microstructure analysis

In order to create input data for FEA simulation, the structure, chemical composition and mechanical properties of steel were determined. The chemical composition of steel was determined by spectral analysis using an optical emission spectrometer. Standard tensile and hardness tests, according to ISO 6892-1:2016, were used to determine the mechanical properties of steel. For tensile testing, a German universal tensile testing machine with Katman-Express software was used. The accuracy of the test equipment, load and deformation measurement sensors was ± 0.03 . The hardness of steel was determined using a universal hardness tester and using the Vickers method with

a square tetrahedral pyramid. The hardness of the steel was determined on the surface with a load of 10 inches. The hardness of the laser-processed surfaces was determined using a hardness tester with a quadrilateral pyramid tip on a diamond square base with a load of 2.942 inches N. The hardness on the surface of the processed layers and its cross section was measured according to the EN ISO 4516 standard. Macroscopic and microscopic examination of lasered samples was performed according to ISO 17639:2003. Metallographic analysis of steel and laser processed areas was performed using a light microscope (Nikon Eclipse MA200) with a Lumenera Infinity 2-2 video camera and a JEOL JSM-7600 scanning microscope equipped with an optical microscope. Dispersive spectrometer for chemical microanalysis in different magnifications (up to 1500 ×) of the etchants were selected for macroscopic and microscopic examination based on ISO/TR 16060:2003. Nital solution (3% by weight of concentrated nitric acid in ethyl alcohol) was used for etching steel samples.

3. Results

3.1 Laser Welding

The samples were cut in dimensions of 100 x 100 mm square by a guillotine machine. In order to ensure the absence of contamination and fat in the samples, they were cleaned with acetone before welding. The samples were kept in place by magnetic clamps and bead-on-plate welding was performed on them.

3.2 Laser welding machine

Connections were made using an IQL-10 Nd:YAG laser with an average power of 400 watts. The laser beam is sent from the laser source using an optical fiber and the energy is transferred in the optical fiber along its diameter. The beam is focused on the work piece using a focusing device. Argon shielding gas with a purity of 99.9% and a flow rate of 1inch liter per minute was used perpendicular to the work piece and coaxially with the laser beam during welding. In Figure 1a, the schematic of the laser welding machine and in Table 1, the working characteristics of the used laser machine can be seen.

3.3 Macrography

Based on the investigations carried out on the prepared macro samples, according to the reference standard (2019) ASME SEC IX, the results are as follows:

- The weld has an acceptable profile and convexity.
- Melting of the root of the weld is sufficient (penetration rate of 0.75 mm).
- Welding penetration is suitable in the base metal and in different welding layers.
- The root of the weld is free of cracks in X 25 magnification.
- Weld metal and HAZ areas are free of cracks.
- The weld is free of gas hole, slag inclusion, shrinkage hole and other welding defects.
- There is no undercut on the edges of the weld.

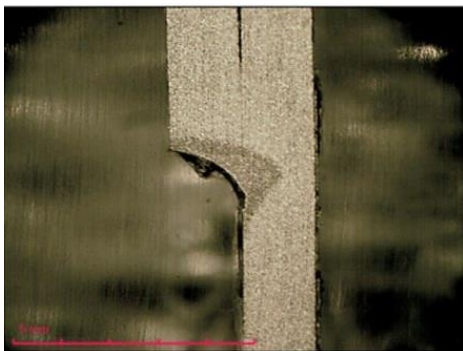


Figure 2. Macro image of the prepared cross-section of the developer solution



Figure 3. The image of the sample sent for the test

3.4 Variance Analysis

The purpose of performing analysis of variance (ANOVA) is to investigate which parameter affects the qualitative characteristic in question more. For this purpose, the overall variability of S/N ratios should be separated into the contribution of each process parameter, which is obtained by subtracting the total S/N variability from the sum of the squared deviations from the overall average, S/N ratios [80]. The test to check the accuracy of the model and the test to check the accuracy of each individual coefficient in the model were performed by MINITAB 15 software. Irrelevant sentences were removed from the model so that only important sentences were present in the model. The reduced models in relations 1 to 3 and the ANOVA table for the models can be seen in tables 2 to 4. Also, in these tables, the values of R - Sq and (R - Sq (adj)) can be seen. These values are close to one hundred, which indicates that the model can predict the response with good accuracy [81, 82]. For example, regarding the weld width W1, according to the value (R - Sq (adj)), the model can predict the response with 91.39% accuracy. The value of F is the range of predicted values in the design points. compares with the average prediction error. In this study, the F values for all the sentences related to the W2 and W1 models are greater than 4, which shows that the model predicts the answers well. Regarding the model related to the depth of penetration (P), only the sentence related to the location of the radiation concentration (F) has a significant effect on the prediction of the model, and the sentences related to the welding speed (S) and laser power (P) can be omitted. The obtained models are presented in relations 1 to 3.

$$W1 = 0.47363 + 0.055875P - 0.072275S + 0.058675F \quad (2)$$

Table1. W1 response

source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
P(KW)	1	0.062	0.062	0.062	413.54	40.004
S(mm/s)	1	0.104	40.104	40.104	26.40	10.001
F(mm)	1	0.104	50.068	50.068	515.65	30.003
Error	12	0.017	50.068	40.001		
Total	15	0.253				

R - Sq = 93.11% R - Sq(adj) = 91.39% S = 0.038

4. Conclusion

Laser welding is becoming an important technique for joining stainless steel to carbon steel and is widely used in various sectors, including aerospace, transportation, power plants, electronics and other industries. However, stainless steel to high carbon steel welding is still in its infancy, mainly due to the formation of hard brittle phases, which weaken the mechanical strength of the joint. This study is a scientific research on the control of brittle phase formation during dissimilar laser welding of high carbon steel to stainless steel. Attempts have been made to adjust the microstructure and phase composition of the fusion zone by influencing the alloy composition and cooling rate. The results show that the hardness of the heat-affected zone in high-carbon steel is significantly higher than the weld zone, which greatly weakens the quality of the weld. To reduce HAZ hardness, a new heat treatment strategy was proposed and evaluated using a numerical simulation model based on finite element analysis. A series of experiments have been carried out to verify the metallurgical thermal finite element analysis model and the qualitative agreement of the predicted martensitic phase distribution has been shown. The results of experiments and computer simulations of elastoplastic deformation showed that local laser processing with surface melting can be used to strengthen structural elements made of C22E thin steel sheet up to 8.4% and to reduce its deflection under similar working loads up to 17%. As an alternative to the use of complex geometric shapes, additional reinforcing elements or heat treatment should be placed. In this case, the strength of metal sheet parts improved due to local changes in microstructure and material properties. The hardness of the steel in the treated areas increased by 50% compared to the untreated areas. This led to an increase in the strength of the laser-processed metal sheet and the maximum level of bending load that could be tolerated without plastic deformation. This study shows that the mechanical strength of thin steel sheet depends on laser processing parameters, area and number of laser tracks and can be changed. The difference in the distance between the laser paths affects the increase in the mechanical resistance of the thin steel sheet. Therefore, the FEA method and the proposed model can be used to calculate the basic information and predict the required laser treatment area (geometry and location of the processed area, laser penetration depth, orientation and quantity of laser traces) in a specific case. The materials were tested using a numerical simulation instead of a complicated and lengthy experimental selection of the depth of the treated layer and the treatment area for strengthening thin steel sheet. The results of modeling and bending test are related to each other. The maximum difference between experimental and computational modeling results is less than 6%. In general, this research shows the potential of this technology for industrial applications. Complex

and thin materials, from 0.1 to 5 mm, in similar or dissimilar configurations, showed the capacity of laser welding to produce joints with a reduced area under the influence of heat input. As it turned out, most of the results were positive and they showed high quality connections. In future researches, it is suggested to conduct studies on the effect of laser voltage, speed and frequency parameters. It is also suggested that in the future, the effect of adjustable parameters such as pulse length, focal location, laser incident angle, etc., should be investigated. Also, examining mechanical and surface properties and surface preparation before laser welding can also become a new area for future studies. Based on the fact that the amount of laser absorption as an input heat source strongly depends on the properties of the sheet, then it is possible to increase the amount of laser absorption and input heat by making changes to the surface of the sheet.



بررسی خواص مکانیکی جوش لیزری ورق فولادی st37 با استفاده از لیزر nd:yag

حسین عزیزی الف، علی صادقی ب*

الف کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند، تهران، ایران، hoseinazizi17@gmail.com

ب استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند، تهران، ایران، a_sadeghi@damavandiau.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های پلاستیکی احتمالی برای فلزاتی چون فولاد حین محاسبات طراحی، مصرف فلز در عمل کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، عناصر سازه‌ای با بارهای سنگین، مانند پوسته‌های سازه‌های ساختمانی، موشک‌ها، راکتورهای شیمیایی، لوله‌های دیواره نازک و سایر سازه‌ها، با استفاده از روش‌های محاسباتی طراحی می‌شوند که به‌منظور طراحی درست و علمی بایستی تغییر شکل‌های پلاستیکی در آن‌ها در نظر گرفته شوند. در مقاله اخیر، اثرات پردازش لیزر بر استحکام صفحات فولادی و میزان مقاومت آن‌ها در برابر بار خمشی ناشی از تابش لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های خمشی و شبیه‌سازی رایانه‌ای تغییر شکل الاستوپلاستیک نشان می‌دهند که ورق فولادی با کربن st37 تحت پردازش لیزر موضعی با ذوب سطحی ناشی از افزایش مقاومت مکانیکی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آلیاژهای مقاوم‌تر و البته گران‌تر در مصارف صنعتی و نظامی پیشرفته استفاده شود.	ریزساختار، خواص مکانیکی، جوش لیزری، ورق فولادی st37، لیزر nd:yag
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

۱- مقدمه

از مهم‌ترین روش‌های اتصال قطعات می‌توان به جوشکاری اشاره کرد که در ساخت یا تعمیر مواد فلزی، کاربرد گسترده‌ای دارد و به علت اقتصادی و به‌صرفه بودن این روش، استفاده از آن رو به افزایش می‌باشد. مواردی مانند خواص فیزیکی و خواص مکانیکی، در دسترس بودن مواد و هزینه‌های مورد نیاز و این‌که آیا ماده اولیه برای جوشکاری مناسب است، باعث می‌شود که جوشکاری برخی مواد، آسان و برخی دیگر سخت و یا بعضاً غیرممکن شود. این روش معمولاً از روش‌های دیگر ذوب فلزات، مانند لحیم‌کاری، که معمولاً فلز پایه را ذوب نمی‌کنند، متمایز است. جوشکاری لیزری به‌عنوان یک منبع انرژی منحصربه‌فرد در نظر گرفته می‌شود که از نظر شدت و موقعیت اشعه قابل کنترل می‌باشد. جهت جوشکاری، پرتو ساطع شده توسط لیزر تا مقیاس یک نقطه کوچک متمرکز می‌شود تا بدین‌وسیله چگالی بالایی از انرژی ایجاد شود. این کار باعث ذوب فلز و در مورد جوش‌های با نفوذ بالا، موجب تبخیر بخشی از آن می‌شود. در زمان شروع انجماد، یک حوضچه جوش یا اتصال ایجاد می‌شود. نور لیزر از فوتون تشکیل شده و به‌وسیله عدسی‌ها و آینه‌ها می‌توان آن را تقویت کرد. یکی از ویژگی‌های نور لیزر، عبور از هوا بدون افت انرژی می‌باشد. انواع مختلفی از لیزر وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای جوشکاری استفاده کرد و از جمله آن‌ها می‌توان به لیزرهای فیبر، لیزرهای پالسی ان‌دی‌یاگ^۱ و لیزرهای موج پیوسته اشاره کرد [۱، ۲]. جوشکاری لیزر علاوه بر مدرن بودن، فرصت تولید قطعاتی را ایجاد می‌کند که با روش‌های دیگر قابل تولید نیستند یا به‌سختی تولید می‌شوند. در این روش که از چگالی انرژی

^۱ Puls ND Yag

بالایی استفاده می‌شود، منطقه HAZ (Heat Affected Zone) کوچک که سریع سرد شده ایجاد شده و باعث اعوجاج ناپذیری در اتصال حاصل می‌شود. همچنین منطقه جوش دارای نسبت عمق به پهنازی زیادی می‌باشد [۳، ۴]. تعیین شکل حوضچه جوش و عمق نفوذ، متأثر از جریان حرارت و جریان مایع در منطقه حوضچه جوش و انتقال حرارت همرفتی است. برای حالت پالس جوشکاری لیزر ان‌دی‌یاگ، شکل پالس، انرژی، مدت‌زمان، سرعت تکرار و حداکثر قدرت، مهم‌ترین پارامترهایی هستند که به‌طور مستقیم یا هم‌افزایی بر کیفیت جوش‌های درز پالس تأثیر دارند [۵، ۶]. لی و همکاران [۱۹]، در مطالعات خود، آزمایشی شامل بررسی پارامترهای جوشکاری برای آلیاژ تیتانیوم با ضخامت ۳ میلی‌متر با استفاده از لیزر پالس ان‌دی‌یاگ انجام دادند. مشخص شده است که مهم‌ترین پارامتر در تعریف عمق نفوذ، نسبت بین انرژی پالس و مدت‌زمان پالس است. همچنین مشاهده شده است که تغییر در طول پالس، در قدرت پیک ثابت هیچ تأثیری بر عمق نفوذ ندارد. هدف این تحقیق، پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص جوش ورق فولادی St37 در فرآیند جوشکاری لیزری ان‌دی‌یاگ می‌باشد. به همین منظور، پارامترهایی نظیر سرعت جوشکاری، توان لیزر و موقعیت کانونی اشعه، مدنظر قرار گرفته‌اند تا تأثیر آن‌ها بر خواص هندسی و مکانیکی مورد بررسی قرار گیرند. نتایج حاصل با استفاده از آنالیزهای سیگنال به نویز و آنالیز واریانس تحلیل خواهند شد [۷، ۸]. در مطالعه میراک و همکاران [۱۱] ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری قوس فلزی محافظ غیر مشابه آستنیتی فولاد کربنی St-37 مورد مطالعه قرار گرفت. این اتصال توسط الکتروود E316L و سه ورودی حرارتی ۰/۷۲، ۰/۸۴ و ۱/۰ کیلو ژول بر میلی‌متر انجام شد. ریزساختار مفاصل توسط میکروسکوپ نوری مشخص شد. همچنین فولاد St-37، و در محل اتصال فلز جوش یک ناحیه باریک بدون حک وجود داشت که پیشنهاد می‌شود ساختار آستنیتی-مارتنزیتی داشته باشد. نتایج آزمون‌های سختی نشان داد که سختی فصل مشترک فلز جوش با فولاد St-37 حداکثر بوده که به شکل‌گیری نسبت داده می‌شود. از نوار باریک مارتنزیتی، نتایج کشش طولی نشان داد که گرمای ورودی افزایش می‌یابد و باعث کاهش استحکام کششی و افزایش کشیدگی می‌شود.

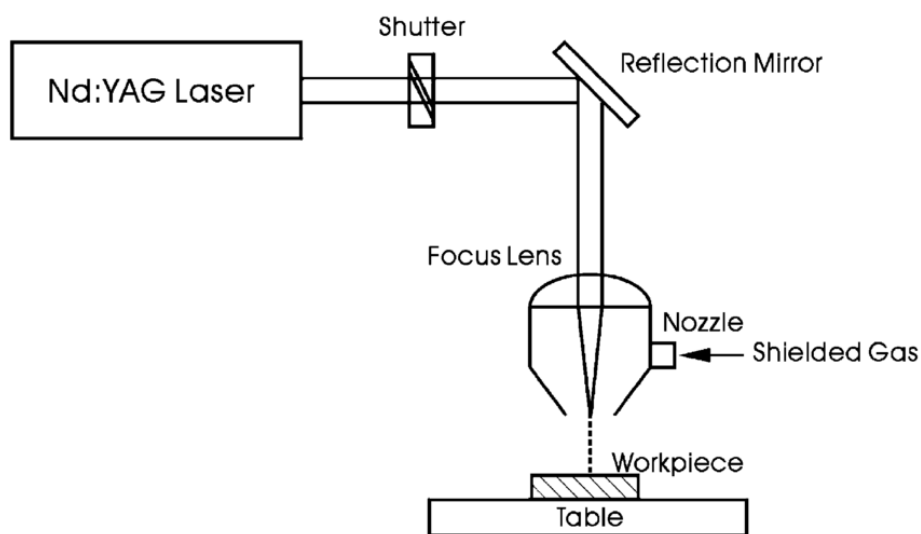
نتو و همکاران [۹] و سانتوس و همکاران [۱۰]، برای بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزری مانند جریان و سرعت جوش بر روی استحکام ضربه، استحکام کششی و ریزساختار، از جوشکاری زیر پودری برای اتصال مقاطع ۱۷ میلی‌متری فولاد درجه SA516 ۷۰ استفاده کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که جریان جوشکاری، عامل مهمی برای تأثیر بر فریت سوزنی آدر فلز جوش است. آنچه که پیشینه مطالعه روشن می‌کند، این است که خلأ مطالعاتی زیادی در این زمینه وجود دارد. با توجه به این‌که از تست جوش این فلز با لیزر ان‌دی‌یاگ در خودرو به میزان بالایی استفاده می‌شود، بنابراین، موضوع مناسب و جدیدی برای بررسی و تحقیق می‌باشد. استفاده بیشتر و در واقع، گسترش استفاده از لیزر به این جهت است که جوش ورق‌های نازک که با روش‌های مرسوم و سنتی، دارای مقاومت کافی نمی‌باشد، یا در صورت انجام، باعث سوراخ شدن قطعات و کیفیت بسیار پایین‌تری نسبت به جوش لیزری می‌شوند، حاصل شود [۱۴، ۱۵] (این دستگاه‌ها دارای فیدبک بوده و قدرت و فرکانس خروجی آن‌ها کنترل می‌شود که منجر به جوشکاری یکنواخت خواهد شد). در این مطالعه، برای پیش‌بینی هریک از مشخصات، یا پاسخ‌های تست استحکام کششی، عمق نفوذ و پهنازی جوش در قسمت‌های بالا و میانه مدل‌های ریاضی را به دست می‌آوریم. به‌علاوه، در مورد چگونگی اثرگذاری هریک از پارامترها بر پاسخ به‌دست‌آمده، تحلیل صورت خواهد گرفت. نمودارهای اثرات اصلی پارامترها روی پاسخ، با برنامه Matlab ۹.۱ حاصل شده و ترکیب بهینه پارامترها که منجر به پاسخ بهینه می‌شود نیز مشخص می‌گردد.

۱-۱- روبه‌های مواد و تجربی

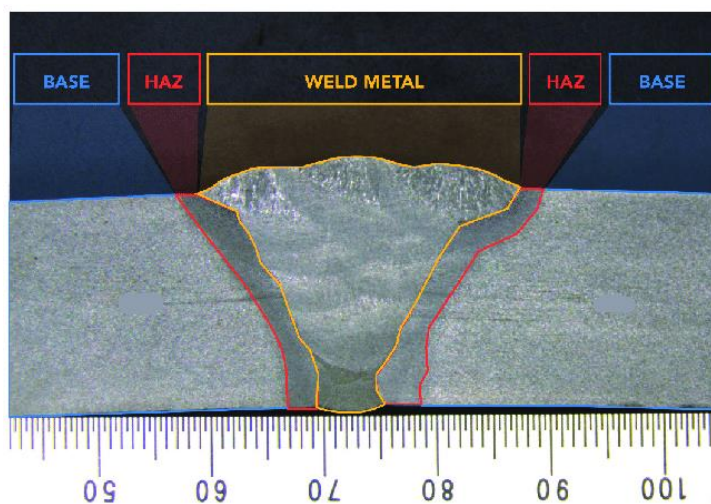
قطر پرتو ۲۰۰ میکرون، در حالت پیوسته، متمرکز بر روی سطح صفحه، تحت گاز محافظ آرگون با نرخ جریان ۲۵ اینچ لیتر در دقیقه به بالا، ۱۵ اینچ لیتر در دقیقه به‌صورت معکوس بود. صفحه جوش داده شده دارای ابعاد ۱۴ × ۳ سانتی‌متر مربع برای مس و ۵ × ۹/۵ سانتی‌متر مربع برای فولاد ضدزنگ با ضخامت ۲ میلی‌متر بود. خطوط در فاصله ۲ میلی‌متری از خط رابط روی سطح مس خراشیده شدند. جوش‌های پر قدرت لیزری غیرمشابه انجام شد که قدرت لیزر، سرعت و تغییر پرتو را نسبت به خط اتصال تغییر می‌دهد. میز جوش نیز شامل یک دوربین فانتوم ۷.۹ با سرعت بالا بود. دوربین به‌صورت جانبی و با زاویه ۳۳ درجه نسبت به سطح قرار گرفت. سیستم جوش لیزری پر قدرت در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. تصویر فرآیند جوشکاری تحت نظارت به‌صورت ویدئویی ضبط شده و تصاویر مانند شکل ۱ (ب) استخراج می‌شوند. قدرت لیزر ۲ کیلووات، سرعت جوشکاری ۱

² Needle ferrite

متر بر دقیقه و تغییر لیزر ۰ میکرومتر است. تصویر سطح، حوضچه مذاب را نشان می‌دهد که اطراف سوراخ کلید، تیره به نظر می‌رسد که به دلیل دمای بالای خود، نور ساطع می‌کند. روشنایی به دلیل قوز سطح حوضچه مذاب باعث انعکاس‌های چشمگیر شده و ذرات مذاب پاشیده به وضوح در رسانه قابل مشاهده هستند که بر روی قاب تصویر نشان داده شده‌اند. تجزیه و تحلیل تجربی در چند مرحله انجام شد. سطوح مقطع جوش‌ها با محلول بشه-بوژارد آصیقل داده و اچ^۳ شد. برای اطلاع از تأثیر پارامترها بر ناحیه مذاب (MZ)، شکل جوش با استفاده از میکروسکوپ دوچشمی (Wild M420, Leica) مشاهده شد و با استفاده از نرم‌افزار کنترل دوربین (LC 120 HD Leica) اندازه‌گیری شد. در ابتدا، این فرآیند، اجازه تقریبی رقت مس را در (MZ) داد؛ جداسازی با خطوط حکاکی شده در هر دو طرف، مجدداً تنظیم شد. نسبت عرض مذاب مس و عرض (MZ)، تقریبی از ترکیب حجمی (MZ) را نشان می‌دهد. عرض در بالا، وسط و پایین (MZ) و سطح آن بر روی برش‌های عرضی اندازه‌گیری شد. سپس، اندازه‌گیری طول نهایی (M.L) (MZ)، عرض (M.W) و مساحت (M.A) را که برای تأیید پردازش تصویر زیر استفاده می‌شوند، امکان‌پذیر می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۱ (الف) شماتیک از جوشکاری لیزری (ب) تصویر حوضچه جوش

۱-۲- شبیه‌سازی خمش الاستوپلاستیک ورق فلزی

قطعات فلزی جدار نازک ساخته شده از فولاد، که اغلب در اثر بار خمشی تحت فشار قرار می‌گیرند، با استفاده از تحلیل المان محدود (FEA) مدل می‌شوند. شبیه‌سازی تغییر شکل الاستوپلاستیک صفحات تحت بار خمشی، با استفاده از یک مدل دستگاه،

³ Beshe – Beaujard dissolved

⁴ H edge

مشابه با نمونه مورد استفاده در آزمایش‌های خم فلزی مطابق با ISO 7438:2016 انجام شد [۲۵،۲۴]. حالت سه‌بعدی ایجاد شده و متعاقباً با استفاده از بسته نرم‌افزاری Autodesk Inventor، به فرمت STEP تبدیل شد. در مرحله دوم، برای شبیه‌سازی کامپیوتری تغییر شکل‌ها در یک صفحه نازک پردازش‌شده با لیزر که توسط بار خمشی بر روی آن اثر می‌گذارد، از یک بسته نرم‌افزاری Ansys Workbench استفاده شد. اندازه مدل سه‌بعدی، شکل و عمق لایه پردازش‌شده، مشابه نمونه‌های واقعی بود. شرایط مرزی، حداکثر بار اعمال شده ۱۲۸۰ و حداکثر انحراف (۲ میلی‌متر) در شبیه‌سازی خمشی با شرایط استفاده شده در طول آزمایش‌های خمشی آزمایشی یکسان بود. تکیه‌گاه‌های ساختاری به‌عنوان تکیه‌گاه‌های متحرک غلتکی مدل‌سازی شدند. شعاع گرد کردن پنچ، عرض (۱۰ میلی‌متر) و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها (۴۰ میلی‌متر) مانند آزمایش خمش واقعی بود.

۱-۳- آزمایش خواص لایه سطحی پردازش‌شده با لیزر و ریزساختار آنالیز

به منظور ایجاد داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی FEA، ساختار، ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد تعیین شد. ترکیب شیمیایی فولاد با تجزیه و تحلیل طیفی با استفاده از طیف‌سنج انتشار نوری مشخص شد. از آزمایش‌های استاندارد کشش و سختی، مطابق با ISO 6892-1:2016 برای تعیین خواص مکانیکی فولاد استفاده شد. برای آزمایش کشش، یک دستگاه تست کشش جهانی آلمان با نرم‌افزار Katman-Express مورد استفاده قرار گرفت. دقت تجهیزات تست، سنسورهای اندازه‌گیری بار و تغییر شکل، $\pm 0.03\%$ بود. سختی فولاد با استفاده از سختی‌سنج جهانی و با استفاده از روش ویکرز^۵ با هرم چهاروجهی مربعی تعیین شد. سختی فولاد بر روی سطح با بار ۱۰ اینچ مشخص شد. سختی سطوح پردازش‌شده با لیزر با استفاده از سختی‌سنج با نوک هرم چهارضلعی بر پایه مربع الماس با بار ۲/۹۴۲ اینچ N تعیین شد. سختی بر روی سطح لایه‌های فرآوری شده و سطح مقطع آن، بر اساس استاندارد EN ISO 4516 اندازه‌گیری شد. بررسی ماکروسکوپی و میکروسکوپی نمونه‌های لیزر شده بر اساس ISO 17639:2003 انجام پذیرفت. تجزیه و تحلیل متالوگرافی فولاد و مناطق پردازش‌شده با لیزر با استفاده از میکروسکوپ نور (Nikon Eclipse MA200) با دوربین فیلم‌برداری Lumenera Infinity 2-2 و یک میکروسکوپ روبشی JEOL JSM-7600 مجهز به یک میکروسکوپ نوری انجام شد. طیف‌سنج پراکنده برای میکرو آنالیز شیمیایی در بزرگ‌نمایی‌های مختلف (تا $1500\times$) اچانت‌ها برای بررسی ماکروسکوپی و میکروسکوپی بر اساس ISO/TR 16060:2003 انتخاب شدند. برای اچ کردن نمونه‌های فولادی، از محلول نیتال^۶ (۳ درصد وزنی اسید نیتریک غلیظ در الکل اتیلیک) استفاده شد.

۱-۴- نتایج

۱-۴-۱- جوشکاری لیزری

نمونه‌ها در ابعاد 100×100 میلی‌متر مربع توسط دستگاه گیوتین برش داده شدند. به منظور اطمینان از عدم وجود آلودگی و چربی در نمونه‌ها، قبل از جوشکاری با استون تمیز شدند. نمونه‌ها توسط گیره‌های مغناطیسی در جای خود ثابت نگه داشته شده و جوشکاری به صورت Bead-On Plate (جوش روی صفحه) روی آن‌ها انجام گرفت [۱۷،۱۶]. مشخصات دستگاه لیزر مورد استفاده به صورت زیر است:

۱-۴-۲- دستگاه جوشکاری لیزری

اتصالات با استفاده از لیزر Nd:YAG مدل IQL-10، با توان متوسط ۴۰۰ وات انجام گردید. اشعه لیزر از منبع لیزر با استفاده از یک فیبر نوری فرستاده می‌شود و انرژی در فیبر نوری به صورت امتداد قطر آن انتقال می‌یابد. اشعه با استفاده از یک وسیله تمرکز دهنده، بر روی قطعه کار متمرکز می‌شود. گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ و با دبی ۱ اینچ لیتر بر دقیقه، عمود بر قطعه کار و به صورت هم‌محور با پرتو لیزر در حین جوشکاری به کار برده شد. در شکل ۱، کلگی دستگاه جوشکاری لیزر و در جدول ۱، مشخصات کاری دستگاه لیزر مورد استفاده، قابل مشاهده می‌باشد.

⁵ Vickers

⁶ Nital

۱-۵- عملیات جوشکاری لیزری

برای تعیین دامنه کاری هر یک از پارامترهای انتخاب شده، تعداد زیادی آزمایش ابتدایی جوشکاری لیزری انجام شد تا جوش‌هایی با کیفیت مناسب حاصل شود [۱۷]. این آزمایش‌ها با تغییر یک پارامتر در هر آزمایش و ثابت نگه داشتن مابقی پارامترها انجام شد. بعد از هر یک از آزمایش‌ها، برای یافتن عیوب جوشکاری، نظیر ترک، تخلخل، پاشش مذاب و نفوذ ناقص، مشاهدات چشمی انجام شد. بعد از این که سطوح مورد نظر برای هر یک از پارامترها تعیین شد، طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی^۷ و ماتریس L16 با کمک نرم‌افزار ۱۵ MINITAB انجام پذیرفت.

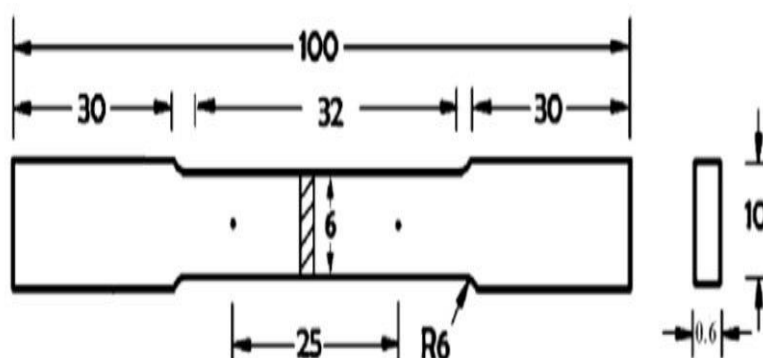
جدول ۱ مشخصات دستگاه لیزر

Nd: YAG IQL - 10	مدل
۱۰۶۴ نانومتر	طول موج
۴۰۰ وات	میانگین توان
۴۵ وات	انرژی پالس
۰/۲ تا ۲۵ میلی ثانیه	پهنای پالس
۷ کیلووات	قله توان
۱ تا ۱۰۰۰ هرتز	فرکانس
۱	تعداد لامپ
۹/۵۲ میلی متر	قطر کریستال لیزر
±۰/۲٪	شکل باریکه
مولتی مد	مد عرضی

۲- انجام آزمایش‌ها

۲-۱- آزمون کشش

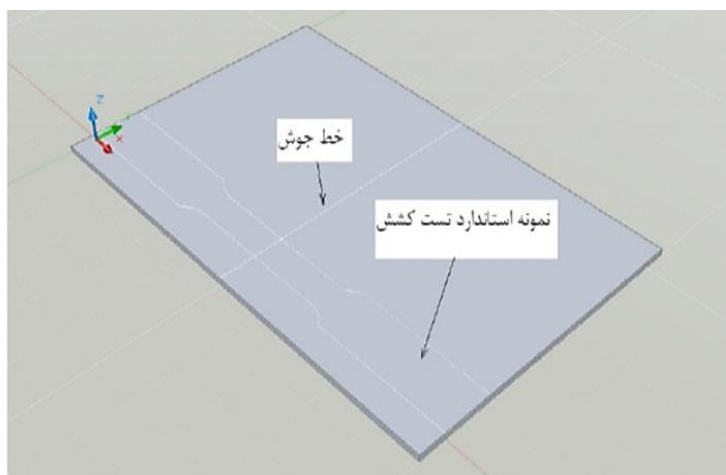
در این مرحله، در ابتدا قطعات جوشکاری شده، جهت انجام آزمون کشش مطابق استاندارد، در ابعاد دستگاه برش وایرکات^۸ بریده شدند. استاندارد مورد استفاده در این آزمایش ASTM E8M در ابعاد Subsize بود که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. از هر قطعه جوشکاری شده، سه نمونه توسط ماشین کاری وایرکات جدا شد. در شکل ۳ مدل سازی هندسی نمونه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲ نمونه استاندارد آزمون کشش مورد استفاده (ASTM E8M)

⁷ Taguchi

⁸ Wire cut



شکل ۳ نحوه برش نمونه‌ها از ورق جوشکاری شده

آزمون‌های کشش در دمای اتاق و توسط دستگاه Zwick/Roel Z100 که در شکل ۴ دیده می‌شود انجام شد. کشش با سرعت کلاسی ۵mm/min انجام گردید تا از اثر کرنش سختی پیشگیری شود [۲۱,۲۰] میانگین سه نمونه برای هر جوش اندازه-گیری شد. شکل ۵ تصاویر نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون کشش را نشان می‌دهد.

۲-۲- آزمون کشش جوش در دمای محیط

استاندارد مرجع آزمون: (۲۰۲۱) *ASTM E8*

نوع ماده: پایه آهنی

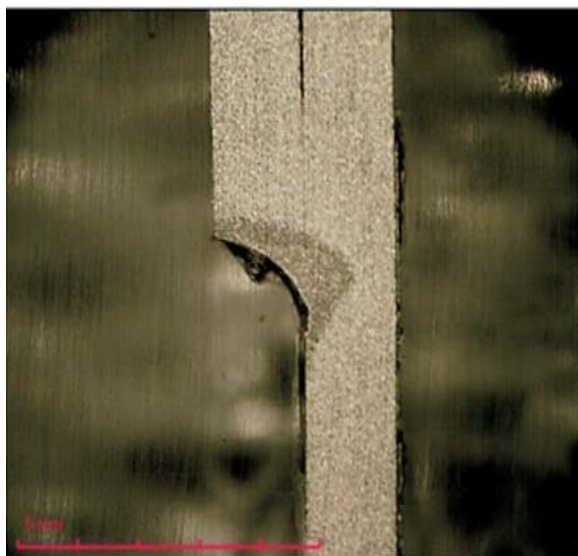
نوع نمونه آزمایشی: تخت

محل وقوع شکست	ازدیاد طول نسبی %A ₅₀	استحکام نهایی R _m MPa	استحکام 0.2% Proof offset R _{0.2} MPa	سطح مقطع S ₀ (mm ²)	ضخامت عرض A*B (mm*mm)	ردیف
WM	<۱	۱۶۹	----	۱۸/۸۴	۱۲/۵۶×۱/۵۰	۱
----	----	----	----			حدود مجاز استاندارد

۳-۲- ماکروگرافی (Macrography)

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های ماکروی آماده‌سازی شده، طبق استاندارد مرجع (۲۰۱۹) ASME SEC IX، نتایج به شرح زیر می‌باشند [۲۲]:

- جوش، از پروفیل و تحذب قابل‌قبولی برخوردار می‌باشد.
 - ذوب ریشه جوش کافی است (میزان نفوذ ۰/۷۵ میلی‌متر).
 - نفوذ جوش در فلز پایه و در لایه‌های مختلف جوش مناسب است.
 - ریشه جوش در بزرگ‌نمایی X ۲۵، عاری از ترک می‌باشد.
 - فلز جوش و مناطق HAZ، عاری از ترک می‌باشند.
 - جوش، عاری از حفره گازی، ناخالصی سرباره (Slag Inclusion)، حفره انقباضی و سایر عیوب جوش می‌باشد.
 - در لبه‌های جوش، بریدگی لبه جوش (undercut) مشاهده نمی‌شود.
- تصویر ماکروسکوپی در شکل ۴ مشاهده می‌گردد.



شکل ۴ تصویر ماکرو سطح مقطع آماده‌سازی شده محلول ظاهر کننده : نایتال ۱۰٪



شکل ۵ تصویر نمونه ارسال شده جهت انجام آزمون

۲-۴- آزمون کشش جوش در دمای محیط

استاندارد مرجع آزمون: (۲۰۲۱) ASTM E8

نوع ماده: پایه آهنی

نوع نمونه آزمایشی: تخت

محل وقوع شکست	ازدیاد طول نسبی %A ₅₀	استحکام نهایی R _m MPa	استحکام Proof 0.2% offset R _p MPa	سطح مقطع S _o (mm ²)	ضخامت عرض A*B (mm*mm)	ردیف
BM	۳۴/۵	۳۵۳	۲۳۸	۱۸/۴۶	۱۲/۵۸×۱/۴۶	۱
----	----	----	----	----	حدود مجاز استاندارد	

۲-۵- ماکروگرافی (Macrography)

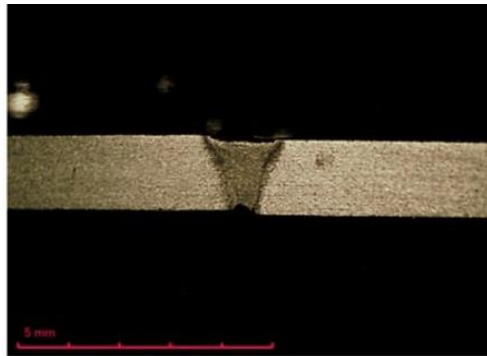
بر اساس بررسی‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های ماکروی آماده‌سازی شده، طبق استاندارد مرجع (۲۰۲۱) ASME SEC IX، نتایج به شرح زیر می‌باشند [۲۳].

- جوش، از پروفیل و تحذب قابل قبولی برخوردار می‌باشد. (تقعر گرده جوش ۰/۰۸ میلی‌متر)
- ذوب ریشه جوش کافی است (تقعر ریشه جوش ۰/۱۸ میلی‌متر).

- نفوذ جوش در فلز پایه و در لایه‌های مختلف جوش مناسب است.
- ریشه جوش در بزرگ‌نمایی $25 \times$ ، عاری از ترک می‌باشد.
- فلز جوش و مناطق HAZ عاری از ترک می‌باشند.
- جوش، عاری از حفره گازی، ناخالصی سرباره (Slag Inclusion)، حفره انقباضی و سایر عیوب جوش می‌باشد.
- در لبه‌های جوش، بریدگی لبه جوش (undercut) مشاهده نمی‌شود. تصویر ماکروسکوپی در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

۶-۲- آنالیز واریانس

هدف از انجام آنالیز واریانس (ANOVA)، بررسی این مسئله است که کدام پارامتر، ویژگی کیفی مدنظر را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای این منظور، بایستی تغییرپذیری کلی نسبت‌های S/N به سهم هر پارامتر فرآیند تفکیک شود که با تغییرپذیری کلی S/N کم کردن مجموع مربعات انحرافات از میانگین کلی، نسبت‌های S/N به دست می‌آید [۱۱]. آزمون برای بررسی دقت مدل و آزمون برای بررسی دقت هر ضریب مجزا در مدل، توسط نرم‌افزار ۱۵ MINITAB انجام شد. جملات غیر مهم از مدل حذف شدند تا فقط جملات مهم در مدل حضور داشته باشند. مدل‌های کاهش‌یافته در رابطه‌های ۱ تا ۳ و جدول ANOVA برای مدل‌ها، در جدول‌های ۲ تا ۴ قابل مشاهده است. همچنین در این جدول‌ها، مقادیر R - Sq (adj) و R - Sq دیده می‌شوند. این مقادیر نزدیک به صد هستند که نشان‌دهنده آن است که مدل می‌تواند پاسخ را با دقت خوبی پیش‌بینی کند [۱۲، ۱۳]. به‌عنوان مثال، در مورد پهنای جوش W1، با توجه به مقدار R - Sq (adj)، مدل می‌تواند با دقت ۹۱/۳۹٪، پاسخ را پیش‌بینی کند. مقدار F، محدوده مقادیر پیش‌بینی‌شده را در نقاط طراحی، با میانگین خطای پیش‌بینی مقایسه می‌کند. در این مطالعه، مقادیر F برای تمامی جملات مربوط به مدل‌های W1، W2، W3 بزرگ‌تر از ۴ می‌باشند که نشان می‌دهد مدل، به‌خوبی پاسخ‌ها را پیش‌بینی می‌کند. در مورد مدل مربوط به عمق نفوذ (P)، فقط جمله مربوط به محل تمرکز اشعه (F)، اثر قابل توجهی در پیش‌بینی مدل دارد و جملات مربوط به سرعت جوشکاری (S) و توان لیزر (P) قابل حذف می‌باشند. مدل‌های به‌دست‌آمده، در رابطه‌های ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۶ تصویر ماکرو سطح مقطع آماده‌سازی شده محلول ظاهر کننده : تایتال ۱۰٪



شکل ۷ تصویر نمونه ارسال شده جهت انجام آزمون

$$W1 = 0.47363 + 0.055875P - 0.072275S + 0.058675F \quad (1)$$

جدول ۲ ANOVA برای پاسخ W1

P	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	source
۴۰/۰۰۴	۴۱۳/۵۴	۰۰/۰۶۲۴۴۰	۰۰/۰۶۲۴۴۰	۰/۰۶۲۴۴۰	۱	P(KW)
۱۰/۰۰۱	۰۲۶/۴۰	۴۰/۱۰۴۴۷۴	۴۰/۱۰۴۴۷۴	۰/۱۰۴۴۷۴	۱	S(mm/s)
۳۰/۰۰۳	۵۱۵/۶۵	۵۰/۰۶۸۸۵۵	۵۰/۰۶۸۸۵۵	۰/۱۰۴۴۷۴	۱	F(mm)
		۴۰/۰۰۱۴۵۴	۵۰/۰۶۸۸۵۵	۰/۰۱۷۴۴۵	۱۲	Error
				۰/۲۵۳۲۱۳	۱۵	Total
R - Sq = 93.11% R - Sq(adj) = 91.39% S = 0.0381275						

$$W2 = 0.16025 + 0.055850P - 0.072300S + 0.05890F \quad (2)$$

جدول ۳ ANOVA برای پاسخ W2

P	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	source
۳۰/۰۳۳	۴۵/۸۴	۴۰/۰۶۲۳۸۴	۴۰/۰۶۲۳۸۴	۰/۰۶۲۳۸۴	۱	P(KW)
۴۰/۰۰۴	۲۱۴/۵۲	۶۰/۱۰۴۵۴۶	۶۰/۱۰۴۵۴۶	۰/۱۰۴۵۴۶	۱	S(mm/s)
۹۰/۰۱۹	۷/۴۴	۴۰/۰۶۹۳۸۴	۴۰/۰۶۹۳۸۴	۰/۰۶۹۳۸۴	۱	F(mm)
		۲۰/۰۰۱۴۵۲	۹۰/۰۱۷۴۱۹	۰/۰۱۷۴۱۹	۱	Error
				۰/۲۵۳۷۳۴	۱	Total
R - Sq = 93.13% R - Sq(adj) = 91.42% S = 0.0381000						

$$P = 0.75063 + 0.03177P - 0.02603S - 0.11147F \quad (3)$$

جدول ۴ ANOVA برای پاسخ P

P	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	source
۰۰/۱۲۰	۰۲/۸۰	۳۰/۰۲۰۱۹۳	۳۰/۰۲۰۱۹۳	۰/۰۲۰۱۹۳	۱	P(KW)
۶۰/۱۹۶	۸۱/۸۸	۶۰/۰۱۳۵۴۶	۶۰/۰۱۳۵۴۶	۰/۰۱۳۵۴۶	۱	S(mm/s)
۰۰/۰۰۰	۳۳۴/۴۳	۴۰/۲۴۸۵۳۴	۴۰/۲۴۸۵۳۴	۰/۲۴۸۵۳۴	۱	F(mm)
		۹۰/۰۰۷۲۱۹	۳۰/۰۸۶۶۳۳	۰/۰۸۶۶۳۳	۱۲	Error
				۰/۳۶۸۹۰۵	۱۵	Total
R - Sq = 76.52% R - Sq(adj) = 70.65% S = 0.0849671						

در مدل‌های به‌دست‌آمده برای پهنای میانی جوش (W2) و پهنای بالایی جوش (W1) مشاهده می‌شود که سرعت جوشکاری (S) دارای بیشترین تأثیر روی پاسخ‌ها می‌باشد. از نظر تأثیرگذاری روی پاسخ، محل تمرکز اشعه، رتبه دوم را دارا می‌باشد. در حالی که در مدل‌های به‌دست‌آمده برای عمق نفوذ (P)، محل تمرکز اشعه بیشترین تأثیر و سرعت جوشکاری کم‌ترین تأثیر را داشتند.

۲-۷- آنالیز S/N برای استحکام کششی

در مورد استحکام کششی، معیار «بزرگ‌تر بهتر» انتخاب گردید و نسبت S/N با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه شد. در جدول ۵، پاسخ‌ها برای S/N دیده می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار ۱۵ MINITAB به‌دست‌آمده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، از نظر میزان تأثیر بر استحکام کششی، موقعیت کانونی، رتبه یک را در میان پارامترها داراست و پس‌از آن، سرعت جوشکاری و محل تمرکز اشعه قرار دارند. در شکل ۸، نمودار اثرات اصلی برای S/N استحکام کششی دیده می‌شود. نمودار اثرات اصلی می‌تواند نشان دهد که کدام سطح از پارامترها انتخاب شوند تا استحکام جوش بیشترین مقدار را داشته و همچنین جوش‌های ایجادشده، کم‌ترین تغییرپذیری نسبت به نویز را داشته باشند.

جدول ۵ پاسخ‌ها برای S/N

موقعیت کانونی (F)	سرعت جوشکاری (S)	توان لیزر (P)	Level
۴۴/۸۶	۴۸/۷۱	۴۸/۷۰	۱
۴۸/۳۰	۴۹/۹۹	۴۸/۸۰	۲
۵۰/۱۱	۴۹/۴۹	۴۸/۵۲	۳
۵۱/۲۶	۴۶/۳۴	۴۸/۵۲	۴
۶/۴۰	۳/۶۵	۰/۲۸	Delta
۱	۲	۳	Rank

۸-۲- آنالیز واریانس (ANOVA)

برای بررسی پارامترها با جزئیات بیشتر آنالیز واریانس به کمک نرم‌افزار Minitab ۱۵ انجام گرفت. نتایج آنالیز برای مدل خطی استحکام کششی که از نرم‌افزار به دست آمد در جدول ۶ دیده می‌شود. مقادیر بالاتر F برای یک پارامتر نشان‌دهنده آن است که تاثیر آن پارامتر روی پاسخ زیاد است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار F مربوط به موقعیت کانونی (۶/۴۴) و پس از آن سرعت جوشکاری (۱/۸۰) و توان لیزر (۰/۰۶) می‌باشد که نشان می‌دهد توان پالس و سرعت جوشکاری تاثیر کمتری روی استحکام کششی دارند. تمامی معیارهای دقت مدل یعنی R^2 و R^2 تنظیم شده که در جدول نشان داده شده‌اند حاکی از دقت کافی مدل به دست آمده می‌باشند. مدل نهایی به دست آمده برحسب مقادیر فاکتورهای کد شده به صورت رابطه‌های ۴ می‌باشد.

$$T = 286.19 + 2.31P + 6.31S - 102.19F \quad (۴)$$

جدول ۶ ANOVA برای استحکام کششی (T)

P	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	Source
۹۰/۹۷۹	۰/۰۶	۲۲۵	۶۷۵	۶۷۵	۳	P(KW)
۷۰/۲۴۷	۱/۸۰	۶۷۸۷	۲۰۳۶۰	۲۰۳۶۰	۳	S(mm/s)
۵۰/۰۲۵	۶/۴۴	۲۵۰۲۳	۷۵۰۹۸	۷۵۰۹۸	۳	F(mm)
		۳۷۶۸	۲۲۶۱۰	۲۲۶۱۰	۶	Error
				۰/۳۶۸۹۰۵	۱۵	Total

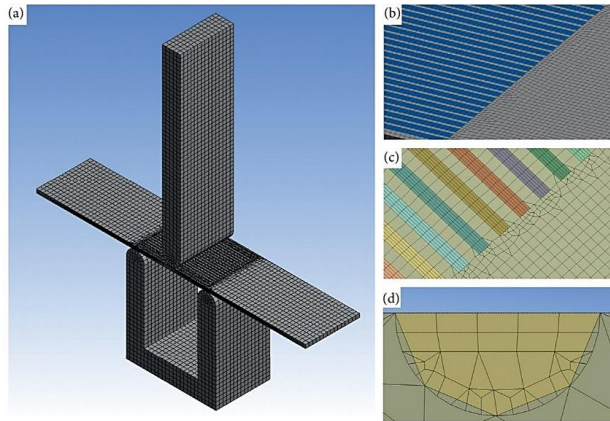
$S = 61.3866, R - Sq = 80.96\%, R - Sq(adj) = 52.40\%$

۹-۲- نتایج محاسبات حالت‌های پردازش لیزری

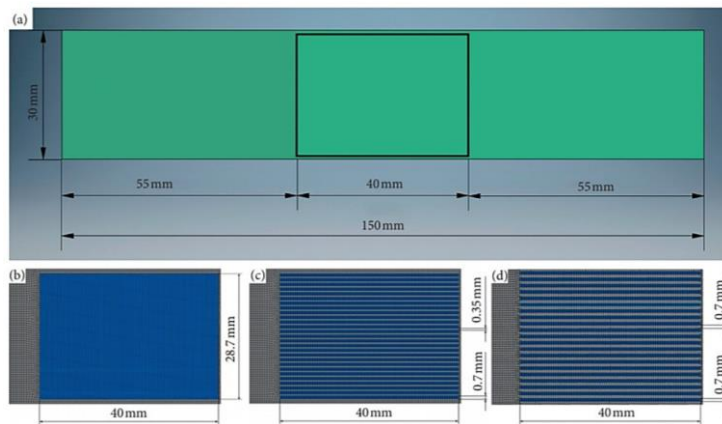
یکی از معیارهای انتخاب حالت‌های پردازش مناسب، عمق نفوذ لیزر مورد نیاز بود. عمق مناسب نفوذ لیزر، حدود ۰/۳۵ میلی‌متر (۲۰٪ ضخامت کل ورق فلز) می‌باشد. این مقدار بر اساس تحقیقات قبلی با ورق فولادی نازک مشابه بود، زمانی که پارامترهای تکنولوژیکی مختلف لیزر اعمال شد و شکل، ریزساختار و عیوب سطحی لایه‌های پردازش شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. توان بحرانی ۳/۹۸، ۱۰۵ وات بر سانتی‌متر مربع و سایر پارامترهای لیزر انتخابی (جدول ۸) تضمین می‌کند که عمق منطقه ذوب فلز به مقدار لازم می‌رسد.

۱۰-۲- نتایج مطالعه خصوصیات و ریزساختار لایه سطحی پردازش شده با لیزر

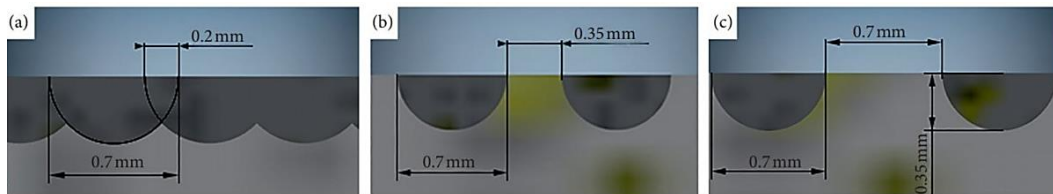
تجزیه و تحلیل متالوگرافی مقاطع نشان داد که ضخامت (عمق) مورد انتظار لایه تیمار شده (۰/۳۵ میلی‌متر) با استفاده از پارامترهای محاسبه شده پرتو لیزر در آزمایش‌ها به دست آمده است. سطح ناحیه تحت درمان، عاری از عیوب سطحی و سایر نشانه‌های تأثیر بد لیزر بود (شکل ۱۰). شکل مسیر لیزر شبیه به نیمکره بود (شکل ۶) که از همان شکل لایه در شبیه‌سازی FEA استفاده شده است.



شکل ۸ مش المان محدود یک مدل در میز کار ANSYS: (الف) نمای کلی مش سه بعدی، (ب) نمای بزرگ شده مش خطوط لیزری، (ج) نمای بزرگ شده از مش سطح ناحیه تحت تأثیر لیزر، و (د) متقاطع - نمای مقطعی مش مسیر لیزری جداگانه.



شکل ۹ نماهایی از سطح نمونه‌ها در نرم افزار Ansys: (الف) نمای کلی صفحه فلزی با ابعاد ناحیه تحت تأثیر لیزر. (ب) مورد ب (ج) مورد ج (د) مورد د.



شکل ۱۰ نمای مقطعی مناطق تحت درمان با لیزر در نرم افزار Autodesk Inventor. (الف) مورد ب. (ب) مورد ج. (ج) مورد د.

جدول ۷ هندسه ناحیه تحت درمان.

مورد D	مورد C	مورد B	نمونه‌ها
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	شعاع مسیر منفرد (میلی متر)
۴۰ × ۲۹	۴۰ × ۲۹	۴۰ × ۲۹	سطح تحت درمان، طول X عرض (mm × mm)
۲۱	۲۷	۵۶	تعداد ردهای لیزر در ناحیه تحت درمان (کامپیوتر)
۱۶۱/۵۵	۲۷۰/۷	۴۰۶	حجم ناحیه تحت درمان (میلی متر مکعب)
۶۷۳	۱۱/۲۸	۱۶/۹۲	نسبت حجم منطقه تحت درمان به حجم کل خم شده (%)

جدول ۸ بررسی خواص مکانیکی جوش لیزری ورق فولادی st37 با استفاده از لیزری nd:yag مورد استفاده برای محاسبه تغییر شکل الاستوپلاستیک نمونه‌ها

مواد	مدول الاستیسیته E (GPa)	مدول برشی σ_B (GPa)	قدرت تسلیم ۰.۲ (MPa)	قدرت نهایی OB (MPa)	نسبت پواسون (V)
فلز پایه (ورق فولادی st37)	۲۰۰	۷۸/۱	۲۷۵	۴۵۰	۰/۲۸
لایه تحت درمان با لیزر	۲۱۰	۸۲	۴۱۲	۶۶۵	۰/۲۸

تجزیه و تحلیل مقاطع متالوگرافی^۹ نشان می‌دهد که پردازش لیزر موضعی ورق فولادی st37، باعث تغییرات موضعی در ریزساختار آن می‌شود. ساختار شبکه کریستالی فولاد در مناطق گرم شده و ذوب مجدد اصلاح شده است و از ساختار پرلیت فریت^{۱۰} (مشخصه ورق فولادی st37، پس از تمپر یا نرمال شدن) به ساختار سوربیت (شکل ۷) تبدیل می‌شود، به عنوان مثال، مخلوط فریت-سمنتیت که بافت ظریف تری نسبت به پرلیت دارد. فاصله بین تیغه‌ها در ساختار سوربیت پراکنده به دست آمده حدود ۰/۴ میکرومتر و اندازه دانه آن، G11 بود. به طور کلی، سوربیت در طی سرد شدن سریع آستنیت در حال تجزیه در محدوده دمایی ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد یا در حین پخت مارتنزیت^{۱۱} ساختار سوربیت، پراکندگی و سختی بالاتری دارد که باعث افزایش استحکام و مقاومت در برابر بارگذاری چرخه‌ای و مقاومت در برابر سایش قطعات فلزی، بدون ازدست دادن انعطاف پذیری می‌شود. مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های میکروسختی در این مورد نشان می‌دهد که سختی لایه فرآوری شده، ۵۰ درصد (تا ۲۰۵ HV) در مقایسه با ناحیه تیمار نشده (که در آن، سختی از ۱۳۵ HV تجاوز نمی‌کند)، افزایش می‌یابد. سختی در ناحیه همپوشانی مسیرها، بسیار شبیه به سختی وسط ناحیه تحت درمان با لیزر است که در محدوده ۱۹۵-۲۰۵ HV بود.

هیچ ساختار سخت و شکننده خاموش کننده یا سایر اجزاء نامطلوب و نقص داخلی در لایه پردازش شده با لیزر (ذوب مجدد) یا در امتداد لبه مناطق ذوب شده تشکیل نشد. اندازه دانه در منطقه فرآوری شده از G8 (متوسط قطر دانه حدود ۲۰ میکرومتر) به G11 (متوسط قطر دانه حدود ۷ میکرومتر) کاهش یافت. وجود سوربیت و عدم وجود ساختارهای خاموش کننده سخت و شکننده نیز با اندازه‌گیری ریز سختی بر روی مقاطع لووگرافی^{۱۲} فلزی تأیید شد. مطالعه توزیع عناصر شیمیایی در لایه فرآوری شده (ذوب مجدد) نشان داد که ناهمگنی شیمیایی قابل توجهی در این ناحیه وجود ندارد. نقشه برداری عناصر SEM - EDS، اسکن خطی و تجزیه و تحلیل نقطه‌ای از توزیع و غلظت عناصر شیمیایی نشان می‌دهد که توزیع‌های C، منگنز و Si در سراسر نمونه، نسبتاً یکنواخت هستند (جدول ۱۲).

۲-۱۱- نتایج شبیه‌سازی تغییر شکل خمش الاستوپلاستیک ورق فلزی

نتایج شبیه‌سازی ۴ مدل توسعه یافته (شکل ۱۲) تحت یک تحلیل مقایسه‌ای تنش‌ها و کرنش‌ها تحت بار و انحراف مختلف قرار گرفتند (شکل ۱۱). بارهای خمشی مورد نیاز برای انحراف نمونه‌ها تا ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر توسط FEA تعیین شد. اعتبار مدل با مقایسه نتایج آزمایش‌های خمشی با نتایج مدل‌سازی نمونه‌ها تأیید شد. نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی انحراف نمونه‌های تیمار نشده با نتایج نمونه‌های تیمار شده با اعمال فواصل مختلف بین خطوط لیزری مقایسه شد. نتایج آزمایش‌های خمشی و محاسبه بر اساس قوانین مخلوط (معادله ۱) نشان داد که میانگین استحکام تسلیم و استحکام نهایی لیزر ورق‌های فلزی فرآوری شده از ۳.۴٪ به ۸.۴٪ افزایش می‌یابند که بستگی به مقدار ردیابی لیزر و حجم ناحیه تحت درمان در مقایسه با نمونه‌های تصفیه نشده دارد (جدول ۹). مشخص شده است که ورق‌های فلزی با ۳۰٪ روکش خطوط لیزری دارای بالاترین استحکام مکانیکی در مقایسه با سایر حالت‌های عملیاتی می‌باشند (جدول ۹ و ۱۰).

باین حال، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که در عمل، می‌توان از پردازش غیرمستمر (با فاصله معینی بین مسیرها) نیز استفاده کرد، زیرا تفاوت در کارایی چنین فرآیندهایی کم است. پس از پردازش لیزر موضعی، بار مورد نیاز برای انحراف ۰.۵ میلی‌متری

⁹ Metallography

¹⁰ Pearlite ferrite

¹¹ Martensite

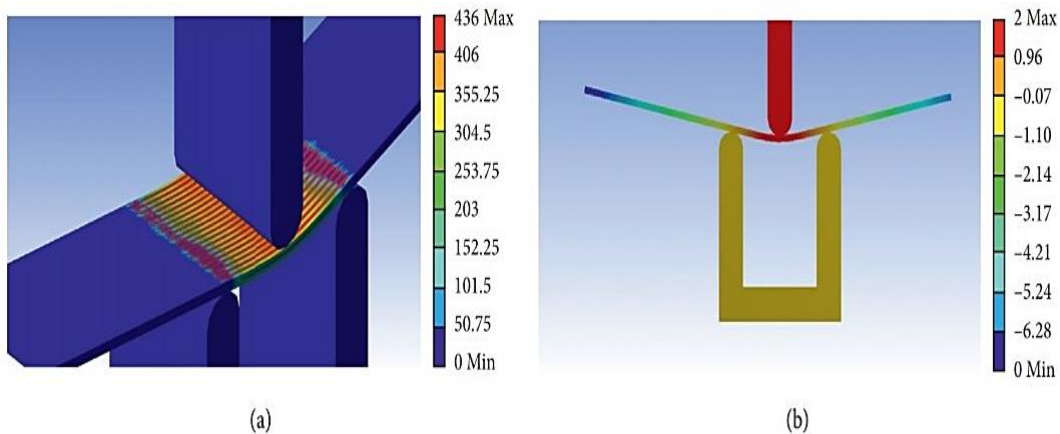
¹² Luography

در مرحله الاستیک ۲۵ تا ۳۲ درصد در مقایسه با صفحات درمان نشده افزایش یافت. هنگامی که یک بار خارجی ۷۰۰ نیوتن اعمال شد (شرایطی که تنش‌های داخلی نزدیک به استحکام تسلیم این فولاد است)، انحراف صفحه بسته به حالت پردازش (فاصله اعمال شده بین خطوط لیزر) ۸ تا ۱۸ درصد کاهش یافت.

جدول ۹ خواص مکانیکی جوش لیزری در برابر صفحات خم شده.

مشخصات	مورد A	مورد B	مورد C	مورد D
نسبت پواسون (ν)	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸
مدول الاستیسیته E (GPa)	۲۰۰	۲۰۲/۸۹	۲۰۱/۱۳	۲۰۰/۶۷
قدرت تسلیم $\sigma_{0.2}$ (MPa)	۲۷۵	۲۹۸/۱۸	۲۹۰/۴۵	۲۸۴/۲۲
استحکام نهایی σ_B (MPa)	۴۵۰	۴۶۸/۳۸	۴۷۴/۲۵	۴۶۴/۴۷

محدوده ۶۹۹ نیوتن تا ۸۲۱ نیوتن، بسته به حالت درمان، برابر با ۱۷ درصد افزایش بار است. انحراف الاستیک نمونه‌ها از ۰/۷۵ میلی‌متر تا ۰/۹۵ میلی‌متر متغیر بود که بستگی به نحوه درمان لیزر دارد. بار مورد نیاز برای رسیدن به انحراف ۲ میلی‌متری در مرحله پلاستیک، ۱۰۰۰ نیوتن برای نمونه‌های تیمار نشده و ۱۲۰۰ نیوتن برای نمونه‌های درمان شده با لیزر بود که برابر با ۲۰ درصد افزایش بار است. داده‌های تجربی تأیید کرد که استحکام و افزایش کل بار خمشی (در صورت درمان با ناحیه لیزر و دستیابی به عمق نفوذ همه نمونه‌ها ثابت است) تحت تأثیر فاصله بین خطوط لیزر قرار می‌گیرد که به نوبه خود، بر حجم فاز سخت شده و نسبت آن به حجم مواد درمان نشده در ناحیه خم شده حداکثر اختلاف بین نتایج مدل‌سازی تجربی و محاسباتی کمتر از ۶٪ است (جدول ۱۳).



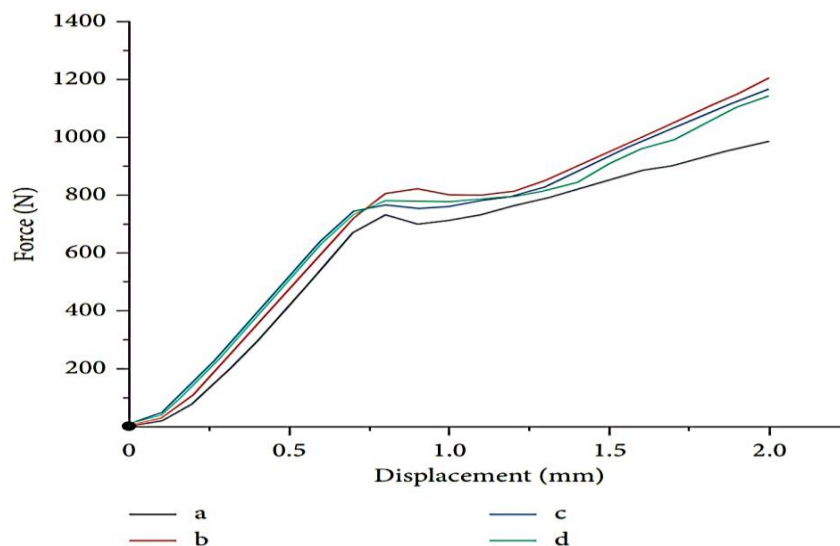
شکل ۱۱ شبیه‌سازی کامپیوتری تست خمش در میز کار Ansys: (الف) توزیع تنش در یک عنصر خمیده. (ب) درجه کرنش عنصر خم شده تحت بار.

جدول ۱۰ نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری تغییر شکل الاستوپلاستیک در صفحات (با انحراف ۲ میلی‌متری).

اشیاء	مورد A	مورد B	مورد C	مورد D
کرنش خمشی ω (mm)	۲	۱/۹۸	۱/۹۹	۲
حداکثر تنش معادل فون میزس (MPa)	۴۱۶	۴۶۲	۴۴۴	۴۳۶
نیروی خمشی P (N)	۱۰۳۳	۱۲۸۰	۱۲۱۷	۱۱۶۷

جدول ۱۱ نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری تغییر شکل الاستیک در صفحات (با بار ۷۰۰ نیوتن).

اشیاء	مورد A	مورد B	مورد C	مورد D
کرنش خمشی ω (mm)	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۸۰	۰/۸۵
حداکثر تنش معادل فون میزس (MPa)	۳۰۹	۳۲۳	۳۰۶	۲۹۹
نیروی خمشی P (N)	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰



شکل ۱۲ نتایج آزمایش خم. (الف) مورد الف (ب) مورد ب. (ج) مورد ج. (د) مورد د.

جدول ۱۲ نتایج آزمایشات خواص مکانیکی جوش لیزری

مورد D	مورد C	مورد B	مورد A	اشیاء
۷۶۷	۷۸۷	۸۲۴	۶۹۹	بار از خواص کشسانی فلز بیشتر نباشد (N)
۱۱۴۲	۱۱۶۷	۱۲۰۶	۹۸۶	حداکثر بار اعمال شده در انحراف ۲ میلی‌متر (N)

جدول ۱۳ مقایسه نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی و مدل‌سازی محاسباتی

مورد D	مورد C	مورد B	مورد A	اشیاء
----	----	----	----	انحراف نمونه‌ها ۰.۵ میلی‌متر است
۵۱۹	۵۵۰	۵۷۲	۴۳۱	نیروی خمشی محاسبه شده (N)
۵۱۱	۵۳۱	۵۶۰	۴۱۷	نیروی خمشی اندازه‌گیری شده (N)
۱/۵۴	۳/۴۵	۲/۰۹	۳/۲۴	تفاوت (%)
----	----	----	----	انحراف نمونه‌ها ۱ میلی‌متر است
۷۷۶	۷۹۸	۸۰۸	۷۳۲	نیروی خمشی محاسبه شده (N)
۷۶۱	۷۷۷	۸۰۱	۷۱۳	نیروی خمشی اندازه‌گیری شده (N)
۱/۹۳	۲/۶۳	۰/۸۶	۲/۵۹	تفاوت (%)
----	----	----	----	انحراف نمونه‌ها ۱.۵ میلی‌متر است
۹۵۴	۹۶۳	۹۷۹	۸۷۵	نیروی خمشی محاسبه شده (N)
۹۰۹	۹۳۶	۸۵۰	۸۵۲	نیروی خمشی اندازه‌گیری شده (N)
۴/۷۱	۲/۸۱	۲/۹۶	۲/۶۲	تفاوت (%)
----	----	----	----	انحراف نمونه‌ها ۲ میلی‌متر است
۱۱۶۷	۱۲۱۷	۱۲۸۰	۱۰۳۳	نیروی خمشی محاسبه شده (N)
۱۱۴۲	۱۱۶۷	۱۲۰۶	۹۸۶	نیروی خمشی اندازه‌گیری شده (N)
۲/۱۴	۴/۱۱	۵/۷۸	۴/۵۴	تفاوت (%)

برای بررسی کیفیت مدل رگرسیون توسعه یافته از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد.

جدول ۱۴ طراحی ماتریس تجربی و نتایج برای استحکام کششی جوش

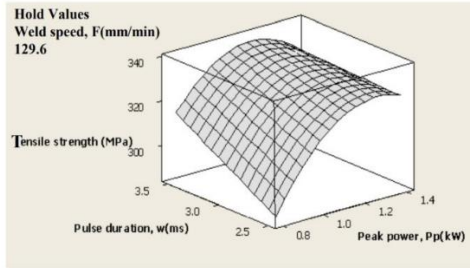
انقضای خیر.	پارامترهای فرآیند		مقادیر پاسخ	
	مدت زمان پالس، w [ms]	سرعت جوش، F [mm/min]	استحکام کششی (Mpa)	میانگین
۱	۲/۵	۸۶/۴	۲۸۸/۸۳	۲۸۷/۵۸
۲	۲/۵	۸۶/۴	۳۲۶/۱۷	۳۲۳/۰۹
۳	۳/۵	۸۶/۴	۳۱۵/۸۳	۳۱۶/۰۸
۴	۳/۵	۸۶/۴	۳۲۹/۳۳	۳۲۸/۸۳
۵	۲/۵	۱۷۲/۸	۲۸۱/۶۷	۲۸۶/۵۹
۶	۲/۵	۱۷۲/۸	۳۲۸/۳۳	۳۲۶/۵۸
۷	۳/۵	۱۷۲/۸	۳۲۸/۶۷	۳۲۰/۱۷
۸	۳/۵	۱۷۲/۸	۳۳۰/۵۰	۳۳۰/۶۷
۹	۳/۰	۱۲۹/۶	۳۳۰/۰۰	۳۲۸/۵۹
۱۰	۳/۰	۱۲۹/۶	۳۲۹/۶۷	۳۳۲/۰۰
۱۱	۳/۰	۱۲۹/۶	۳۳۴/۶۷	۳۳۲/۵۰
۱۲	۳/۰	۱۲۹/۶	۳۲۸/۶۷	۳۲۷/۴۲
۱۳	۳/۰	۱۲۹/۶	۳۰۴/۳۳	۲۹۲/۵۸
۱۴	۳/۰	۱۲۹/۶	۳۲۵/۶۷	۳۲۵/۲۵
۱۵	۲/۵	۱۲۹/۶	۳۲۷/۱۷	۳۲۶/۶۷
۱۶	۳/۵	۱۲۹/۶	۳۲۹/۳۳	۳۳۰/۰۸

۲-۱۲- تجزیه و تحلیل مقاومت کششی

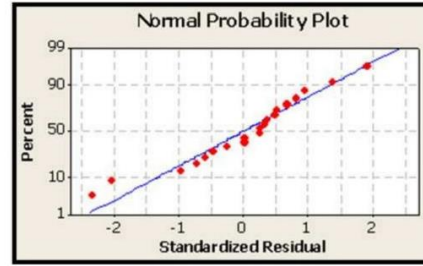
خلاصه برازش نشان می‌دهد که برای تحلیل استحکام کششی، مدل درجه دوم اهمیت بیشتری دارد. همان‌طور که در جدول ۱۴ نشان داده شده است، مدل کاهش یافته ANOVA به این نتیجه رسید که داده‌ها در این مدل برای بهینه‌سازی استحکام کششی به خوبی برازش دارند. مقدار R^2 و R^2 (adj) بیش از ۹۰ درصد به دست آمد. این به این معناست که مدل رگرسیون، توضیح خوبی در مورد رابطه بین متغیرهای مستقل (پارامترهای فرآیند) با استحکام کششی در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارائه کرد. مقدار پیش‌بینی شده R^2 برابر با ۹۰/۰۹ درصد است که به این معناست که دقت مدل پیش‌بینی شده در مقایسه با نتیجه واقعی کمی پایین‌تر است. مقدار S جذر مثبت MSE (میانگین مربعات خطا) و همچنین تخمین از تغییرپذیری متوسط در مورد خط رگرسیون است که در آن، مقدار کمتر، پیش‌بینی معادله بهتری را بر پاسخ ارائه می‌دهد. مقدار S به دست آمده برابر با ۳/۸۲۷۹۰ بود و برای این مدل، کمتر در نظر گرفته شد. در این مطالعه، p - مقدار مرتبط برای مدل کمتر از $a = ۰/۰۵$ یا ۹۵٪ اطمینان) برای این مدل معنی‌دار در نظر گرفته می‌شود؛ درحالی‌که عدم برازش به صورت دلخواه غیر معنی‌دار است. پس از حذف عبارت‌های غیر معنی‌دار، معادله پاسخ نهایی برای استحکام کششی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\text{استحکام کششی} = -120.088 + 560.909 Pp + 62.9654 w - 175.667 Pp^2 - 43.458 Pp.w \quad (۵)$$

که شکل سطح پاسخ برآورد شده برای استحکام کششی را در رابطه با عوامل طراحی پیک توان و مدت زمان پالس نشان می‌دهد. این شکل، افزایش استحکام کششی را با افزایش قدرت پیک تا نقطه اوج در ۱/۱ کیلووات و مدت زمان پالس ۳/۵ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. هم قدرت پیک و هم مدت زمان پالس، تأثیر بیشتری بر مشخصه استحکام کششی دارند. بنابراین، حداکثر استحکام کششی در حداکثر توان ۱/۱ کیلووات و مدت زمان پالس ۳/۵ میلی‌ثانیه با مقادیر نگه‌داشتن سرعت جوش ۱۲۹/۶ میلی‌متر در دقیقه نشان داده می‌شود. نمودار احتمال عادی باقیمانده‌ها برای استحکام کششی در شکل نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نتیجه گرفته می‌شود که خطاها معمولاً به صورت باقیمانده‌هایی که در خط مستقیم قرار می‌گیرند، توزیع می‌شوند.



شکل ۱۴ نمودار سطح مقاومت کششی در مقابل پارامترهای جوشکاری.

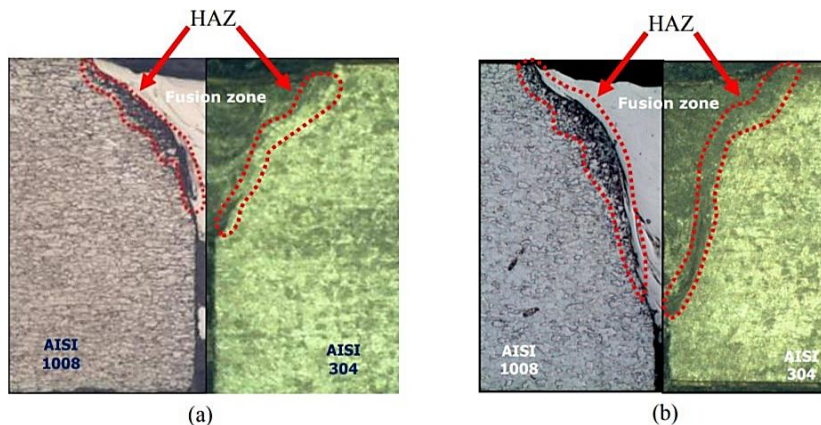


شکل ۱۳ نمودار احتمال عادی باقیمانده برای استحکام کششی

۲-۱۳- تجزیه و تحلیل ریزساختار

تجزیه و تحلیل ریزساختار فقط بر روی نمونه با بالاترین و کمترین مقاومت کششی متمرکز شد. مقاطع مختلف برای آشکارسازی ریزساختار ورق فولادی st37 مورد استفاده قرار گرفت. مقاطع یکی پس از دیگری با ۴-۶ ضربه سواب در ناحیه ورق فولادی st37 انجام شد. جدول ۴ نشان می‌دهد که بالاترین استحکام کششی در نمونه شماره ۱۱ با حداکثر توان ۱/۱ کیلووات، مدت زمان پالس ۳ میلی‌ثانیه به دست آمده است. سرعت جوش ۱۲۹/۶ میلی‌متر بر دقیقه در حالی که کمترین استحکام کششی در نمونه شماره ۱ با حداکثر توان ۰/۸ کیلووات، مدت زمان پالس ۲/۵ میلی‌ثانیه و سرعت جوش ۸۶/۴ میلی‌متر بر دقیقه رخ داد. شکل ۴ (الف) و ۴ (ب) HAZ را نشان می‌دهد که آشکارا در ناحیه هم‌جوشی مجاور ورق فولادی st37 تشکیل شده است و در سمت فولاد ضدزنگ کمتر کاربرد دارد. دلیل این که HAZ در مرز ورق فولادی st37 حداقل بوده است این است که رسانایی حرارتی این ماده به مراتب کمتر از ورق فولادی st37 است.

رسانایی حرارتی پایین می‌تواند جذب انرژی خوبی را بر روی مواد ایجاد کند. سرعت سرد شدن بالا و نفوذ بالا در حوضچه جوش نمونه شماره ۱۱، از تشکیل یک ریزساختار خوب و به‌طور معمول خواص مکانیکی بهبود یافته حمایت می‌کند. با وجود این، سرعت خنک‌سازی بیش از حد بالا، می‌تواند فاز مارتنزیتی را در ریزساختار ایجاد کرده و این فاز می‌تواند برخی از خواص مکانیکی جوش را به خطر بیندازد. در نمونه شماره ۱، تنها ۵۰ درصد نفوذ جوش وجود داشت، آزمایش کشش ۲۸۷/۵۸ مگاپاسکال را به همراه داشت و نقطه شکست در ناحیه فولاد کم‌کربن در مجاورت منطقه هم‌جوشی رخ داد. نفوذ ضعیف و تشکیل نازک ناحیه هم‌جوشی، از دلایل اصلی استحکام کششی پایین در نمونه شماره ۱ بود. بنابراین، به‌منظور تولید جوش با خواص مکانیکی بهبود یافته، مهم است که اطمینان حاصل شود که تنظیمات مناسب پارامترهای جوشکاری لیزر دنبال شده است.



شکل ۱۵ ریزساختار جوش زیر میکروسکوپ نوری X ۲۰: (الف) نمونه شماره ۱، (ب) نمونه شماره ۱۱

۲-۱۴- نتیجه‌گیری

جوشکاری لیزری در حال تبدیل شدن به تکنیکی مهم برای اتصال فولاد ضدزنگ به فولاد کربنی است و به‌طور گسترده در

بخش‌های مختلف، از جمله هوافضا، حمل‌ونقل، نیروگاه‌ها، الکترونیک و سایر صنایع استفاده می‌شود. با این حال، عمدتاً به دلیل تشکیل فازهای شکننده سخت، که استحکام مکانیکی اتصال را تضعیف می‌کند، جوشکاری فولاد ضدزنگ به فولاد پرکربن هنوز در مراحل اولیه خود است. این مطالعه، یک تحقیق علمی در مورد کنترل تشکیل فاز شکننده در طول جوشکاری غیرمشابه لیزری فولاد پرکربن به فولاد ضدزنگ است. تلاش‌هایی برای تنظیم ریزساختار و ترکیب فاز منطقه هم‌جوشی از طریق تأثیرگذاری بر ترکیب آلیاژی و سرعت خنک‌سازی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سختی ناحیه متأثر از حرارت در فولاد پرکربن به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از ناحیه جوش است که کیفیت جوش را به شدت تضعیف می‌کند. برای کاهش سختی HAZ، یک استراتژی عملیاتی جدید با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی عددی مبتنی بر تحلیل المان محدود پیشنهاد و ارزیابی شد. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای تأیید مدل تحلیل المان محدود حرارتی متالورژی انجام شده است و توافق کیفی توزیع فاز مارتزیتی پیش‌بینی‌شده نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری تغییر شکل الاستوپلاستیک نشان داد که پردازش لیزر موضعی با ذوب سطح می‌تواند برای تقویت عناصر ساختاری ساخته‌شده از ورق فولادی نازک C22E تا ۸/۴٪ و برای کاهش انحراف آن تحت بارهای کاری مشابه تا ۱۷٪ استفاده شود. به‌عنوان جایگزینی برای استفاده از اشکال هندسی پیچیده، عناصر تقویت‌کننده اضافی یا عملیات حرارتی قرار گیرد. در این مورد، استحکام قطعات ورق فلزی به دلیل تغییرات موضعی در ریزساختار و خواص مواد بهبود یافت. سختی فولاد در نواحی فرآوری‌شده تا ۵۰ درصد در مقایسه با نواحی تیمار نشده افزایش یافت. این امر، منجر به افزایش استحکام در ورق فلزی پردازش‌شده با لیزر و حداکثر سطح بار خمشی شد که بدون تغییر شکل پلاستیک قابل تحمل بود. این مطالعه نشان می‌دهد که استحکام مکانیکی ورق فولادی نازک به پارامترهای پردازش لیزر، مساحت و تعداد آهنگ‌های لیزر بستگی دارد و می‌توان آن را تغییر داد. تفاوت فاصله بین مسیرهای لیزری بر میزان افزایش مقاومت مکانیکی ورق فولادی نازک تأثیر می‌گذارد. بنابراین، روش FEA و مدل پیشنهادی می‌تواند برای محاسبه اطلاعات اولیه و پیش‌بینی ناحیه درمان لیزری موردنیاز (هندسه و مکان‌یابی ناحیه پردازش‌شده، عمق نفوذ لیزر، جهت‌گیری و کمیت ردهای لیزر) در مورد خاص مورد استفاده قرار گیرد. مواد، با استفاده از یک شبیه‌سازی عددی به‌جای انتخاب آزمایشی پیچیده و طولانی از عمق لایه تیمار شده و ناحیه درمان برای تقویت ورق فولادی نازک، آزمایش شدند. نتایج آزمون مدل‌سازی و خمش با یکدیگر مرتبط هستند. حداکثر اختلاف بین نتایج مدل‌سازی تجربی و محاسباتی، کمتر از ۶ درصد است. به‌طور کلی، این تحقیقات، نشان‌دهنده پتانسیل این فناوری برای کاربردهای صنعتی است. مواد پیچیده و نازک، از ۰/۱ تا ۵ میلی‌متر، در پیکربندی‌های مشابه یا غیرمشابه، ظرفیت جوشکاری لیزری را برای تولید اتصالات با ناحیه کاهش‌یافته تحت تأثیر حرارت ورودی نشان دادند. همان‌طور که مشخص شد، اکثر نتایج مثبت بودند و اتصالات را با کیفیت بالا نشان می‌دادند. در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که مطالعاتی بر روی تأثیر پارامترهای ولتاژ، سرعت و فرکانس لیزر صورت گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد که در آینده، تأثیر پارامترهای قابل تنظیم نیز مانند طول پالس، مکان کانونی، زاویه برخورد لیزر و ... مورد بررسی قرار گیرند. همچنین بررسی خواص مکانیکی و سطحی و آماده‌سازی سطح قبل از جوشکاری لیزری نیز می‌تواند حیطه‌ای جدید برای مطالعات آتی شود. بر این اساس که میزان جذب لیزر به‌عنوان منبع حرارتی ورودی به شدت به خواص ورق بستگی دارد، پس می‌توان با اعمال تغییراتی در سطح ورق، میزان جذب لیزر و حرارت ورودی را افزایش داد.

۳- مراجع

- [1] Huang S, Wang B, Li X, Zheng P, Mourtzis D, Wang L. Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution. *Journal of manufacturing systems*. 2022;64:424-8.
- [2] Kumar P, Sinha AN. Microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welding of st37 carbon steel. *Procedia computer science*. 2018;133:733-9.
- [3] Li Z, Gobbi S. Laser welding for lightweight structures. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997;70:137-44.
- [4] Schubert E, Klassen M, Zerner I, Walz C, Sepold G. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;115:2-8.

- [5] Katayama S. Introduction: fundamentals of laser welding. Handbook of laser welding technologies: Elsevier; 2013. p. 3-16.
- [6] Chludzinski M, Dos Santos RE, Churiaque C, Ortega-Iguña M, Sánchez-Amaya JM. Pulsed laser welding applied to metallic materials—A material approach. *Metals*. 2021;11:640.
- [7] Assuncao E, Williams S. Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects. *Optics and lasers in Engineering*. 2013;51:674-80.
- [8] Zhang P, Jia Z, Yu Z, Shi H, Li S, Wu D, et al. A review on the effect of laser pulse shaping on the microstructure and hot cracking behavior in the welding of alloys. *Optics & Laser Technology*. 2021;140:107094.
- [9] Cavilha Neto F, Pereira M, dos Santos Paes LE, Fredel MC. Assessment of power modulation formats on penetration depth for laser welding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021;43:286.
- [10] Chludzinski M, Dos Santos RE, Churiaque C, Ortega-Iguña M, Sánchez-Amaya JM. Effect of process parameters on pulsed laser welding of AA5083 alloy using response surface methodology and pulse shape variation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120:4635-46.
- [11] Mirak A, Shams B, Bakhshi S. Dissimilar welding of Inconel 713 superalloy and AISI 4140 steel using Nd: YAG pulse laser: An investigation on the microstructure and mechanical properties. *Optics & Laser Technology*. 2022;152:108143.
- [12] Bhatt D, Goyal A. Effect of parameters of Nd YAG laser welding on AISI 316 Stainless steel and Brass. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2018. p. 012118.
- [13] Sun Q, Di H-S, Li J-C, Wang X-N. Effect of pulse frequency on microstructure and properties of welded joints for dual phase steel by pulsed laser welding. *Materials & Design*. 2016;105:201-11.
- [14] Chludzinski M, Dos Santos R, Churiaque C, Fernández-Vidal S, Ortega-Iguña M, Sánchez-Amaya J. Pulsed laser butt welding of AISI 1005 steel thin plates. *Optics & Laser Technology*. 2021;134:106583.
- [15] Sánchez-Amaya J, Boukha Z, Amaya-Vázquez M, Botana F. Weldability of aluminum alloys with high-power diode laser. *Weld J*. 2012;91:155-61.
- [16] Katayama S. Understanding and improving process control in pulsed and continuous wave laser welding. *Advances in laser materials processing*: Elsevier; 2018. p. 153-83.
- [17] Gillner A, Holtkamp J, Hartmann C, Olowinsky A, Gedicke J, Klages K, et al. Laser applications in microtechnology. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;167:494-8.
- [18] Bunaziv I, Akselsen OM, Salminen A, Unt A. Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;233:107-14.
- [19] Li C, Muneharua K, Takao S, Kouji H. Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium. *Materials & Design*. 2009;30:109-14.
- [20] Bunaziv I, Akselsen OM, Frostevarg J, Kaplan AF. Laser-arc hybrid welding of thick HSLA steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;259:75-87.
- [21] Üstündağ Ö, Gook S, Gumenyuk A, Rethmeier M. Hybrid laser arc welding of thick high-strength pipeline steels of grade X120 with adapted heat input. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;275:116358.
- [22] Michael R, Sergej G, Marco L, Andrey G. Laser-Hybrid Welding of Thick Plates up to 32 mm Using a 20 kW Fibre Laser. 2009;27:74s-9s.
- [23] Kou S. *Welding Metallurgy*, A John Wiley & Sons. Inc, Hoboken, New Jersey. 2003:17-20.

- [24] Preedawiphat P, Mahayotsanun N, Sa-Ngoen K, Noipitak M, Tuengsook P, Sucharitpwatskul S, et al. Mechanical investigations of astm a36 welded steels with stainless steel cladding. *Coatings*. 2020;10:844.
- [25] Pan LK, Wang CC, Hsiao YC, Ho KC. Optimization of Nd: YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis. *Optics & Laser Technology*. 2005;37:33-42.