



بررسی توانایی جوش کاری ترکیبی لیزر ان دی یگ - تیگ در مقابل جوش کاری لیزر به تنهایی در پنل های ساندویچی فوم آلومینیوم

امیر حسین فرجی¹، مسعود گودرزی^{2*}، سید حسین سیدین³، کارمینه مالتا⁴

1- دکتری، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کالابریا، رنده، ایتالیا

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، mgoodarzi@iust.ac.ir، تلفن: 02177240540 (داخلی 2857)

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 تیر 1395

پذیرش: 20 مهر 1395

ارائه در سایت: 24 آبان 1395

کلید واژگان:

جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ

پنل ساندویچی

فوم آلومینیوم

عمق جوش

پهنای جوش

چکیده

جوش کاری ترکیبی لیزر - قوس روش جدیدی است که به واسطه مزیت های فنی و اقتصادی آن، در صنایع مختلف کاربرد پیدا نموده است. در این روش، دو منبع جوش کاری لیزر و قوس به طور همزمان بر قطعه اعمال می شوند، به نحوی که از مزیت های هر دو روش استفاده شود. هدف از این تحقیق، بررسی قابلیت و توانایی روش جوش کاری لیزر پیوسته ی ان دی یگ-تیگ¹ نسبت به روش جوش کاری لیزر به تنهایی برای جوش کاری ساندویچ پنل فوم از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6082 می باشد. بدین منظور آزمایش های جوش کاری لیزر حالت جامد و همچنین جوش کاری ترکیبی لیزر ان دی یگ-تیگ صورت گرفت تا تأثیر پارامترهای جوش کاری شامل توان لیزر، شدت جریان الکتریکی قوس و سرعت جوش کاری بر ابعاد جوش بررسی شود. به کمک آنالیز آماری نتایج، پارامترهای مناسب جوش کاری برای جوش کاری لیزر و جوش کاری ترکیبی لیزر ان دی یگ-تیگ ساندویچ پنل های فوم آلومینیوم محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس، آستانه ی توان لیزر مورد نیاز برای تشکیل حفره سوراخ کلید، نسبت به جوش کاری لیزر کم تر است. بعلاوه، افزایش توان لیزر و کاهش سرعت جوش کاری باعث افزایش همزمان عمق و پهنای جوش می شود. درحالی که، با افزایش شدت جریان الکتریکی، عمق نفوذ جوش تقریباً ثابت مانده و تنها پهنای جوش افزایش می یابد. مقایسه ی نتایج جوش کاری لیزر و جوش کاری ترکیبی نشان داد که با اضافه نمودن یک قوس یک صد آمپری به منبع لیزر دوهزار وات، می توان سرعت جوش کاری را از 2 به 3 متر بر دقیقه افزایش داد که نشانگر توانایی و راندمان مناسب جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ است.

Investigation of the capability of hybrid Nd:YAG - TIG welding against Nd:YAG laser welding process for aluminum foam sandwich panels

Amir Hossein Faraji¹, Massoud Goodarzi^{1*}, Seyed Hossain Seyedein¹, Carmine Maletta²

1- School of Metallurgy and Material Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Calabria, Rende, Italy

* P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, mgoodarzi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 July 2016

Accepted 11 October 2016

Available Online 14 November 2016

Keywords:

Hybrid laser-TIG welding

Sandwich panel

Aluminum foam

Weld depth

Weld width

ABSTRACT

Hybrid laser-arc welding is a new welding process which has received particular attention in various industries because of its technological and economic advantages. This process combines a laser beam and an electric arc to incorporate the advantages of both laser and arc welding processes. The main goal of this paper is to evaluate the performance and ability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding compared to lone laser welding process for welding of aluminum foam sandwich (AFS) panels of AA6082. To this aim, a set of experiments for both laser and hybrid laser-TIG welding were done to investigate the effects of welding parameters including laser power, arc current and welding speed on weld dimensions. Then, appropriate welding parameters for the laser and hybrid laser-TIG welding of AFS panels were calculated by statistical analysis. The results show that laser power threshold for creating the keyhole was less in hybrid laser-TIG welding than lone laser welding. Moreover, increasing the laser power and decreasing the welding speed result in increasing both the weld depth and width. But, with increasing the arc current, the weld depth remains almost unchanged and only the weld width increases. Comparing the laser and hybrid laser-TIG results show that adding a 100 A arc to a 2000 W laser source can increase the welding speed from 2 to 3 m/min which proves the high ability and efficiency of hybrid laser-TIG welding process.

¹ Nd:YAG laser-TIG welding

1- مقدمه

لیزر، شدت جریان الکتریکی قوس، طول قوس، سرعت جوش کاری، نوع گاز محافظ و فاصله‌ی بین منبع لیزر و قوس [1,2]. چن و همکارانش [3]. تأثیر شدت جریان الکتریکی، سرعت جوش کاری و فاصله‌ی نسبی منابع لیزر و قوس را بر ابعاد جوش در روش جوش کاری ترکیبی لیزر-گازی- تیگ برای فولاد زنگ نزن 321 مطالعه نمودند. مینگ جاو و همکارانش [16]، تأثیر نوع و دبی گاز محافظ، را بر عمق نفوذ جوش در روش جوش کاری ترکیبی لیزر-گازی- تیگ برای فولاد زنگ نزن 316 مطالعه نمودند. لیو و همکارانش [17]، تأثیر موقعیت نسبی منابع لیزر و قوس تنگستن را بر عمق نفوذ جوش در روش جوش کاری ترکیبی لیزر جامد- تیگ برای آلیاژ منیزیم AZ31B مطالعه نمودند. مرادی و همکارانش تحقیقات متعددی [18-21]، روی جوش کاری ترکیبی لیزر-تیگ فولاد زنگ نزن 1.4418 انجام دادند و توانایی بالای این روش جوش کاری و تأثیر پارامترهای جوش کاری بر مشخصات و ابعاد جوش را بررسی کردند.

با توجه به این که آلیاژ آلومینیوم AA6082 که به عنوان پوسته‌ی ساندویچ پنل فوم آلومینیوم² بکار می‌رود دارای ضریب انعکاس لیزر بالایی می‌باشد، روش جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس به عنوان روشی کارآمد به منظور افزایش جذب انرژی پرتو لیزر، افزایش سرعت جوش کاری و در نتیجه افزایش راندمان جوش کاری قابل طرح و ارائه می‌باشد. بنابراین، هدف اصلی از این تحقیق بررسی قابلیت و توانایی روش جوش کاری ترکیبی لیزر جامد- تیگ نسبت به روش جوش کاری لیزر جامد به تنهایی برای جوش کاری ساندویچ پنل فوم آلومینیوم می‌باشد. بدین منظور ابتدا آزمایش‌هایی با روش جوش کاری لیزر جامد صورت می‌گیرد تا متغیرهای بهینه‌ی جوش کاری برای ورق‌های آلومینیوم AA6082 انجام می‌گیرند تا تأثیر متغیرهای اصلی جوش کاری مانند توان لیزر، شدت جریان الکتریکی قوس تنگستن و سرعت جوش کاری بر عمق و پهنای جوش بررسی شود. در ادامه به منظور ارزیابی توانایی جوش کاری ترکیبی، مقایسه‌ای بین نتیجه‌های به دست آمده صورت گرفته و پس از آن، به کمک تحلیل آماری این نتیجه‌ها، مقدارهای بهینه‌ی متغیرهای جوش کاری برای جوش کاری ترکیبی لیزر-تیگ ساندویچ پنل‌های فوم آلومینیوم محاسبه می‌گردند.

2- روش تحقیق

پنل ساندویچی فوم آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق در شکل 1 نشان داده شده است. پوسته‌ی این پنل ساندویچی، ورقی به ضخامت 1.7 میلی‌متر و از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6082 می‌باشد. هسته‌ی این پنل ساندویچی، فوم آلومینیوم سلول-بسته³ به ضخامت 26.6 میلی‌متر و از جنس $AlSi_6Cu_6$ می‌باشد. طرح کلی و چیدمان جوش کاری ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق در شکل 2 نشان داده شده است. در این تحقیق، از یک دستگاه جوش کاری لیزر حالت جامد (Nd-YAG) با حداکثر توان 2000 وات و یک دستگاه جوش کاری قوسی تنگستن - گاز با حداکثر شدت جریان الکتریکی 350 آمپر استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کلگی لیزر 5- درجه و مشعل قوس تنگستن 30 درجه نسبت به قائم زاویه دارند. از گاز محافظ آرگون با دبی 2 لیتر بر دقیقه و الکتروود تنگستن-زیرکونیوم با قطر 3.2 میلی‌متر استفاده شد. بعلاوه، از جریان متناوب با موج مربعی⁴ با فرکانس

جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ روش نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر به واسطه‌ی مزیت‌های فنی و اقتصادی در صنایع خودروسازی، کشتی سازی، هواپیما سازی، خطوط لوله و نظایر آن‌ها کاربرد فراوان پیدا نموده است [1-6]. در این فرایند دو منبع حرارتی لیزر و قوس تنگستن بطور هم‌زمان بر قطعه‌کار اعمال می‌شوند بطوری که مزیت‌های دو روش را ادغام کرده و بر مشکلات هر یک از آن‌ها غلبه نماید [1,7-9]. برخی از مزیت‌های گزارش شده برای روش جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس عبارتند از: پایداری بیشتر قوس، پایداری بهتر حفره‌ی سوراخ کلید¹، توانایی بهتر پل زدن جوش، افزایش پهنای جوش، امکان جوش کاری با سرعت‌های بالاتر و افزایش کیفیت جوش با حساسیت کم‌تر به تخلخل و ترک در مقایسه با جوش کاری لیزر [1,2,7,9,10]. فرایند جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس می‌تواند مزیت جوش کاری لیزر مانند سرعت جوش کاری بالا، حرارت ورودی کم و در نتیجه تنش‌های حرارتی کم را با مزیت‌های جوش کاری قوسی مانند پهنای بالای جوش و امکان شکستن لایه‌های اکسید سطحی (مخصوصاً برای آلیاژهای آلومینیوم) را ادغام می‌کند [11-14].

یکی از مشکلات اساسی جوش کاری لیزر آلیاژهای آلومینیوم مخصوصاً آلیاژهای آلومینیوم سری 2xxx و 6xxx، انعکاس بالای پرتو لیزر توسط سطح قطعه‌کار و در نتیجه کاهش جذب انرژی پرتو لیزر و افزایش احتمال آسیب رساندن به سیستم‌های نوری کلگی لیزر توسط پرتوهای منعکس شده از سطح قطعه‌کار است [12,13]. بعلاوه، در جوش کاری لیزر، یک آستانه‌ی توان لیزر وجود دارد که در بالاتر از آن امکان تشکیل حفره‌ی سوراخ کلید وجود دارد و در پایین‌تر از آن بیشتر پرتو لیزر توسط سطح قطعه‌ی کار منعکس می‌شود. بنابراین، باید در نظر داشت که در جوش کاری با توان‌های لیزر پایین، خطر آسیب دیدن سیستم نوری لیزر در اثر انعکاس لیزر توسط سطح به مراتب بیشتر است. نکته‌ی مهم دیگر اینکه، مقدار این آستانه برای آلیاژهای آلومینیوم نسبت به فولاد بالاتر است [13]. یکی از روش‌های کاربردی و عملی برای افزایش جذب انرژی لیزر توسط سطح و در نتیجه کاهش احتمال آسیب دیدن سیستم نوری کلگی لیزر، روش جوش کاری لیزر- قوس است. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که با بکارگیری یک منبع قوس در کنار یک منبع لیزر، میزان جذب پرتو لیزر توسط سطح قطعه‌کار بالاتر رفته و در نتیجه آستانه‌ی توان لیزر برای تشکیل حفره‌ی سوراخ کلید کاهش می‌یابد [1,9,12]. بنابراین، روش جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس برای آلیاژهای آلومینیوم که انعکاس لیزر توسط سطح در آن‌ها بالا است، می‌تواند بسیار کارساز و مؤثر باشد [1,2,12].

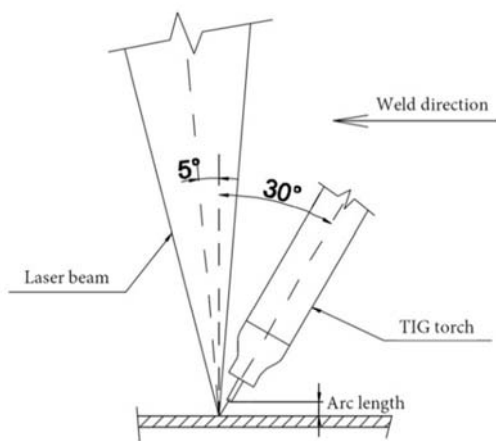
دو منبع پرکاربرد در جوش کاری لیزر شامل لیزر حالت جامد Nd-YAG و لیزر CO_2 می‌باشند. از آنجایی که طول موج پرتو لیزر در لیزر حالت جامد به مراتب کم‌تر از لیزر گازی می‌باشد، جذب لیزر توسط پلاسما در مورد لیزر جامد به مراتب کم‌تر است. بنابراین، از آنجا که در روش جوش کاری ترکیبی لیزر-قوس، جذب انرژی لیزر توسط پلاسما حاصل یکی از دغدغه‌ها می‌باشد، استفاده از لیزر جامد بسیار مناسب‌تر خواهد بود [1,2,10,15].

یکی از محدودیت‌های مهم در کاربرد روش جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس که باید مورد توجه قرار گیرد، تعداد زیاد پارامترهای جوش کاری است که باید به دقت تنظیم شوند تا جوش مناسب حاصل گردد [1,2,8,10]. برخی از پارامترهای مهم در جوش کاری ترکیبی لیزر- قوس عبارتند از: توان

² Aluminum foam sandwich (AFS)³ Closed-Cell⁴ AC square wave¹ Keyhole



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 2 (a) Hybrid laser-GTA welding machine, and (b) the schematic of laser gun and arc torch

شکل 2 (الف) دستگاه جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ و (ب) طرح کلی دستگاه و موقعیت کلگی لیزر و مشعل تیگ



Fig. 3 The optic system protector installed in the tip of laser gun

شکل 3 محافظ سیستم نوری لیزر، نصب شده در نوک کلگی پرتو لیزر

جوش کاری قوسی تنگستن-گاز تنها و بدون حضور لیزر روی صفحات آلومینیوم AA6082 به ضخامت 3 میلی‌متر در حالت جوش کاری روی سطح³ صورت می‌گیرد. ملاک پایداری قوس در این آزمایشات، منظم و موازی بودن نسبی خطوط کناری جوش در سطح بالایی جوش می‌باشد. متغیرهای

³ Bead on plate

100 هرتز (متوازن) استفاده گردید. نقطه‌ی کانونی پرتو لیزر بر سطح قطعه - کار تنظیم شده است بطوریکه قطر پرتو لیزر روی سطح قطعه کار برابر 0.6 میلی‌متر است. به منظور محافظت از سیستم نوری و لنز لیزر، از یک سیستم محافظ تیغه‌ی هوا¹ با فشار پنج بار نصب شده بر نوک کلگی لیزر، مطابق شکل 3 استفاده شد.

نمونه‌ها بعد از جوش کاری مقطع زده شدند، سپس سنباده و پولیش زده شده و در نهایت توسط محلول حکاکی کلر² حکاکی شدند تا شکل هندسی جوش نمایان گردد.

آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق با هدف ارزیابی قابلیت روش جوش کاری ترکیبی لیزر جامد- تیگ در برابر جوش کاری لیزر جامد به سه بخش قابل تقسیم می‌باشد که در ذیل به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود.

1-2- آزمایش‌های جوش کاری لیزر

در این بخش، جوش کاری لیزر به تنهایی و بدون حضور قوس الکتریکی روی پنل‌های ساندویچی فوم آلومینیوم صورت می‌گیرد. هدف اصلی از این آزمایش‌ها، یافتن شرایط جوش کاری بهینه برای رسیدن به نفوذ کامل می‌باشد. متغیرهای جوش کاری و سطوح مورد استفاده برای این آزمایش‌ها در جدول 1 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو سطح برای توان لیزر و سه سطح برای سرعت جوش کاری در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که در این حالت به منظور محافظت از حوضچه‌ی مذاب حاصل، گاز محافظ آرگون از مشعل تیگ به سطح قطعه کار دمیده می‌شود.

2-2- آزمایش‌های جوش کاری تیگ

از آنجا که طول قوس یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر پایداری قوس می‌باشد، در این بخش آزمایش‌هایی به منظور تعیین طول قوس مناسب انجام شد. به عبارت دیگر، هدف اصلی از این آزمایش‌ها یافتن طول قوس مناسب در جوش کاری قوسی تیگ است، بطوری که قوس حتی در سرعت‌های جوش کاری بالا شامل 2 و 3 متر بر دقیقه پایدار باشد. بنابراین، در این بخش،

جدول 1 متغیرهای جوش کاری و سطوح مورد استفاده برای آزمایش‌های جوش کاری لیزر.

Table 1 The welding parameters and their values in laser welding experiments

متغیر	نماد	واحد	سطح 1	سطح 3	سطح 3
توان لیزر	P	W	1750	2000	-
سرعت جوش کاری	V	m/min	1	2	3



Fig. 1 Aluminum foam sandwich (AFS)

شکل 1 پنل ساندویچی فوم آلومینیوم (ای اف اس)

¹ Air knife

² Kellers etchant

جوش کاری و مقدارهای آن‌ها در این آزمایش‌ها در جدول 2 مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مقدار برای طول قوس و دو مقدار برای سرعت جوش کاری در نظر گرفته شده‌اند. شدت جریان الکتریکی ثابت و برابر یک‌صد آمپر در نظر گرفته شده است.

2-3- آزمایش‌های جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ

در این بخش، ابتدا مجموعه‌ای از آزمایش‌های جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ روی صفحات آلومینیوم AA6082 به ضخامت 3 میلی‌متر در حالت حوضچه روی صفحه صورت می‌گیرد. هدف از این آزمایش‌ها، مطالعه‌ی تأثیر سه متغیر مهم جوش کاری ترکیبی یعنی توان لیزر، شدت جریان الکتریکی قوس و سرعت جوش کاری بر عمق و پهنای جوش می‌باشد. براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های جوش کاری قوسی تنگستن - گاز (بخش 2-2) طول قوس 2 میلی‌متر در نظر گرفته شد. متغیرهای جوش کاری و مقدارهای مورد استفاده در این آزمایش‌ها در جدول 3 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مقدار برای توان لیزر، دو مقدار برای شدت جریان الکتریکی و سه مقدار برای سرعت جوش کاری در نظر گرفته شده است. سپس، براساس مطالعات آماری روی نتایج به دست آمده، مقدارهای مناسب متغیرهای جوش کاری برای رسیدن به نفوذ کامل و جوش مطلوب در جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ مشخص شدند و در نهایت جوش کاری ترکیبی با مقدارهای بهینه روی پنل‌های ساندویچی فوم آلومینیوم صورت گرفت.

3-2- نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌های جوش کاری قوسی تنگستن -

گاز

سطح‌های بالایی جوش برای جوش کاری قوسی تنگستن - گاز در شرایط مختلف جوش کاری در شکل 6 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با طول قوس 3 میلیمتر، حتی در سرعت

3- نتایج و بحث

نتایج حاصل از این تحقیق به سه زیربخش شامل نتایج حاصل از آزمایش‌های جوش کاری لیزر، تنگستن - گاز و لیزر - تیگ تقسیم می‌شود که در ذیل هر یک به تفصیل شرح داده می‌شود.

3-1- نتایج حاصل از آزمایش‌های جوش کاری لیزر

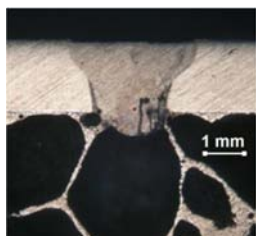
نتیجه‌های این مرحله نشان داد که در نمونه‌های جوش کاری شده در توان لیزر 1750 وات و در تمامی سرعت‌های جوش کاری، تنها ذوب شدن سطح نمونه اتفاق افتاده و نفوذ جوش بسیار ناچیز بوده است. این امر نشان می‌دهد که لیزر با توان 1750 وات، حتی در سرعت‌های جوش کاری پایین، برای

جدول 2 متغیرهای جوش کاری و مقدارهای آن‌ها برای آزمایش‌های جوش کاری تنگستن-گاز

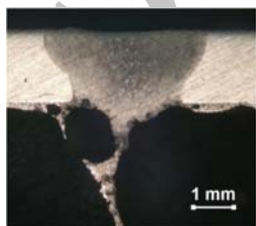
متغیر جوش کاری	نماد	واحد	مقدار 1	مقدار 2
طول قوس	L	mm	2	3
سرعت جوش کاری	V	m/min	2	3

جدول 3 متغیرهای جوش کاری و مقدارهای مورد استفاده برای آزمایش‌های جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ

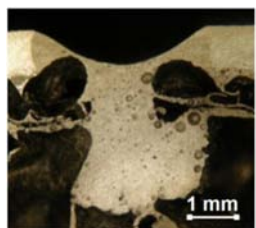
متغیر جوش کاری	نماد	واحد	مقدار 1	مقدار 2	مقدار 3
توان لیزر	P	W	1000	2000	-
شدت جریان الکتریکی	I	A	100	150	-
سرعت جوش کاری	V	m/min	1	2	3



الف) (a) $P = 2000 \text{ W}$, $V = 2 \text{ m/min}$



ب) (b) $P = 2000 \text{ W}$, $V = 1.5 \text{ m/min}$



پ) (c) $P = 2000 \text{ W}$, $V = 1 \text{ m/min}$

Fig. 4 The weld cross sections for the laser welding samples

شکل 4 مقطع عرضی جوش در نمونه‌های جوش داده شده به روش جوش کاری لیزر

3-3-1- تأثیر متغیرهای جوش کاری بر عمق و پهناي جوش

شکل 8، تأثیر متغیرهای جوش کاری، یعنی توان لیزر، شدت جریان الکتریکی و سرعت جوش کاری بر متوسط عمق و پهناي جوش در جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ را نشان می دهد. بطوری که در شکل 8 - الف مشاهده می شود، افزایش توان لیزر باعث افزایش شدید هم عمق و هم پهناي جوش می شود. علت این امر، افزایش حرارت وارد شده از منبع لیزر به قطعه کار با افزایش توان لیزر می باشد. شکل 8 - ب نشان می دهد که با افزایش شدت جریان الکتریکی، پهناي جوش افزایش نسبتاً چشم گیری دارد ولی عمق نفوذ جوش تقریباً ثابت باقی مانده است. به عبارت دیگر، توان لیزر متغیر تعیین کننده ی عمق نفوذ جوش در جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ می باشد. علت این امر، افزایش عمق نفوذ جوش با افزایش توان لیزر می باشد. شکل 8 - پ نشان می دهد که با افزایش سرعت جوش کاری هم عمق و هم پهناي جوش کاهش می یابد. علت این امر، کاهش مجموع حرارت وارد شده به قطعه کار در واحد طول آن با افزایش سرعت جوش کاری می باشد. در هر صورت تأثیر سرعت جوش کاری بر پهناي جوش بیشتر از تأثیر آن بر عمق نفوذ جوش می باشد.

از آنجایی که هدف اصلی از این پژوهش، جوش کاری پوسته ی پنل ساندویچی فوم آلومینیوم با ضخامت 1.7 میلی متر می باشد، در ادامه به محاسبه ی متغیرهای جوش کاری مناسب برای رسیدن به نفوذ کامل در جوش کاری این پوسته ها می پردازیم. شکل 9، خط های هم عمق جوش برحسب توان لیزر و سرعت جوش کاری در شدت جریان های الکتریکی 100 و 150 آمپر را نشان می دهد. خط چین نشان داده شده در شکل، نشان دهنده ی نفوذ جوش 1.7 میلی متر می باشد. بطوری که شکل 9 - الف نشان می دهد، در شدت جریان الکتریکی 100 آمپر، حداقل توان لیزر مورد نیاز برای نفوذ جوش معادل 1.7 میلی متر به ترتیب برابر 1450، 1700 و 1950 وات در سرعت های جوش کاری 1، 2 و 3، متر بر دقیقه می باشد. در شدت جریان الکتریکی 150 آمپر، این مقادیر به ترتیب برابر 1350، 1650 و 1850 وات در سرعت های جوش کاری 1، 2 و 3، متر بر دقیقه می باشد.

همچنین همان طور که در شکل 9 مشاهده می شود، خطوط هم عمق غیرموازی هستند و این امر نشان دهنده ی تأثیرات برهم کنشی چشم گیر دو متغیر توان لیزر و سرعت جوش کاری می باشد.

شکل 10، خط های هم عمق جوش برحسب توان لیزر و شدت جریان الکتریکی در سرعت های جوش کاری 2 و 3 متر بر دقیقه را نشان می دهد. خط چین نشان داده شده در شکل، نشان دهنده ی عمق نفوذ جوش 1.7 میلی متر می باشد. بطوری که از شکل پیداست، از آنجایی که شیب این خط- چین نسبتاً کم است، افزایش شدت جریان الکتریکی تأثیر کمی بر حداقل توان لیزر مورد نیاز برای رسیدن به نفوذ جوش 1.7 میلی متر دارد. نکته ی دیگر اینکه خط های هم عمق نشان داده شده در شکل 10 نسبتاً موازی هستند و این امر نشان دهنده ی تأثیرهای برهم کنشی ناچیز دو متغیر توان لیزر و شدت جریان الکتریکی می باشد.

3-3-2- جوش کاری پنل ساندویچی فوم آلومینیوم

در این بخش روش جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ در جوش کاری پنل ساندویچی فوم آلومینیوم با هدف یافتن مقادیر مناسب متغیرهای جوش کاری به کار گرفته شد. بر اساس نتیجه های بخش 3-3-1، افزایش شدت جریان الکتریکی از 100 به 150 آمپر تنها باعث افزایش پهناي جوش شده است و تأثیر کمی بر عمق نفوذ جوش دارد. بنابراین برای جوش کاری پوسته ی پنل ساندویچی فوم آلومینیوم، شدت جریان الکتریکی 100 آمپر

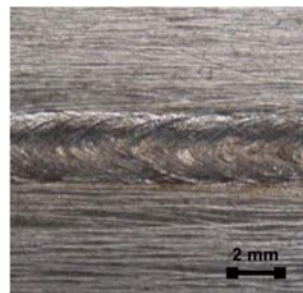


Fig. 5 The weld top surface for the laser welding with laser power of 2000 W and welding speed of 2 m/min

شکل 5 سطح بالایی جوش برای جوش کاری لیزر با توان لیزر 2000 وات و سرعت جوش کاری 2 متر بر دقیقه

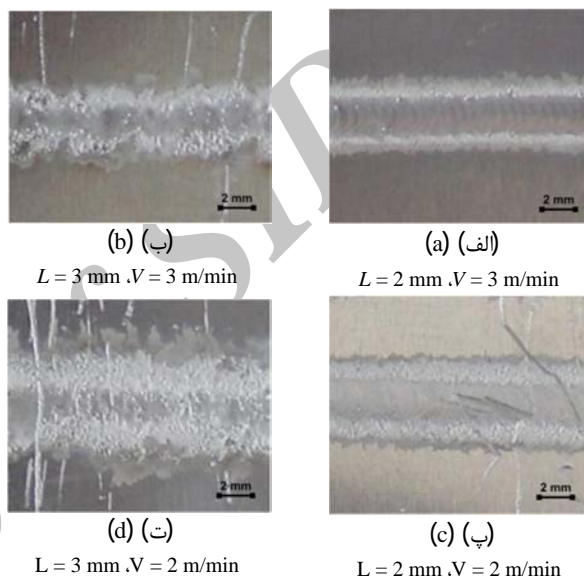


Fig. 6 The weld top surface for the GTAW welding in various welding conditions

شکل 6 سطح بالایی جوش برای جوش کاری قوسی تنگستن - گاز در شرایط مختلف جوش کاری

جوش کاری کم تر یعنی 2 متر بر دقیقه، خط های کناری جوش ها بسیار نامنظم است که به معنی نامناسب بودن پایداری قوس می باشد. این در حالیست که با طول قوس 2 میلی متر، حتی در سرعت بالای جوش کاری، یعنی 3 متر بر دقیقه، خط های کناری جوش منظم است. به عبارت دیگر، طول قوس 2 میلی متر، باعث ایجاد قوسی پایدار، حتی در سرعت های جوش کاری بالا شده است.

3-3-3- نتیجه های حاصل از آزمایش های جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ

با توجه به نتیجه های حاصل از بخش 3-2، طول قوس در تمامی آزمایش های جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ ثابت و برابر 2 میلی متر در نظر گرفته شده است. مقطع عرضی جوش در نمونه های جوش داده شده به روش جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ در شکل 7 نشان داده شده است. بطوری که مشاهده می شود، حتی در توان لیزر پایین یعنی 1000 وات، نفوذ نسبی جوش مشاهده می شود. این امر نشان دهنده ی این است که با کاربرد منبع قوس در جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ، آستانه ی توان لیزر مورد نیاز برای جذب مناسب اشعه ی لیزر و نفوذ جوش، نسبت به جوش کاری لیزر کاهش یافته است.

دو سرعت 2 و 3 متر بر دقیقه در توان لیزر 2000 وات و شدت جریان الکتریکی 100 آمپر صورت گرفت. شکل‌های مقطع و سطح بالایی جوش ساندویچ پل فوم آلومینیوم جوش داده شده تحت این شرایط در شکل 11 نشان داده شده‌اند. بطوری که مشاهده می‌شود سرعت جوش کاری 2 متر بر دقیقه بیش از حد کم است بطوریکه باعث فروپاشی حوضچه‌ی مذاب شده و به تبع آن کیفیت جوش نیز افت کرده است. درحالی‌که با سرعت جوش کاری

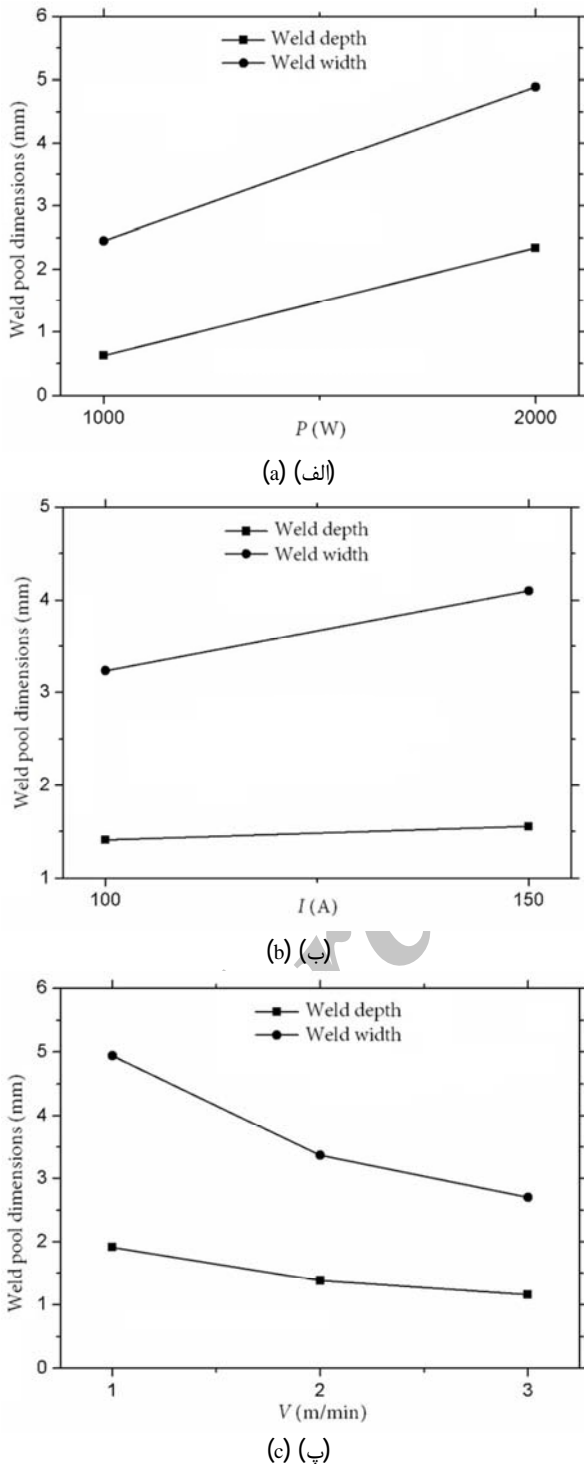


Fig. 8 The effects of (a) laser power, (b) welding current, and (c) welding speed on mean weld depth and width

شکل 8 تأثیر (الف) توان لیزر، (ب) شدت جریان الکتریکی و (پ) سرعت جوش کاری بر متوسط عمق و پهناي جوش در جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ

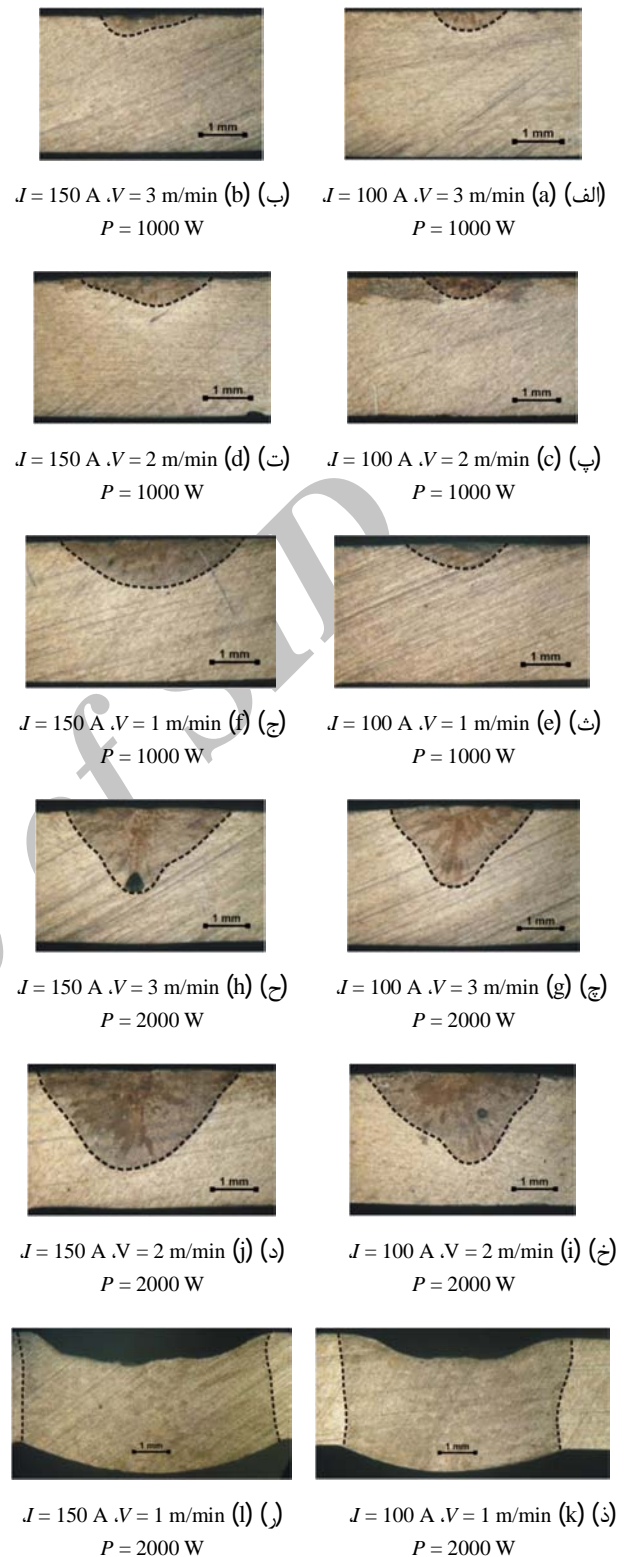


Fig. 7 The weld cross sections for the hybrid laser-GTAW welding in various welding conditions Weld pool dimension

شکل 7 مقطع عرضی جوش در نمونه‌های جوش داده شده به روش جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ

انتخاب گردید. از طرفی، از آنجایی‌که یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از روش جوش کاری ترکیبی افزایش سرعت جوش کاری است، حداکثر توان لیزر یعنی 2000 وات انتخاب گردید. در نتیجه، جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ در

هم‌زمان عمق نفوذ و پهناهای جوش می‌شود.

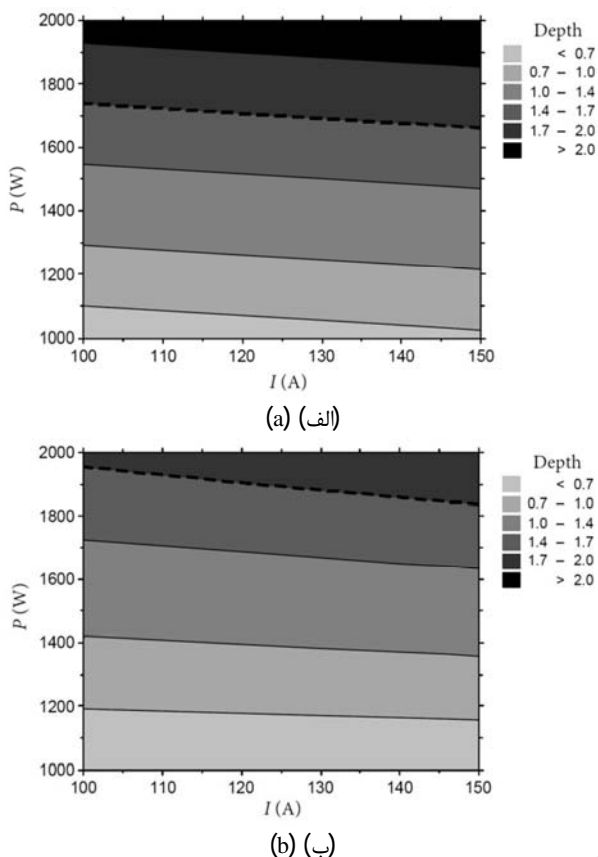
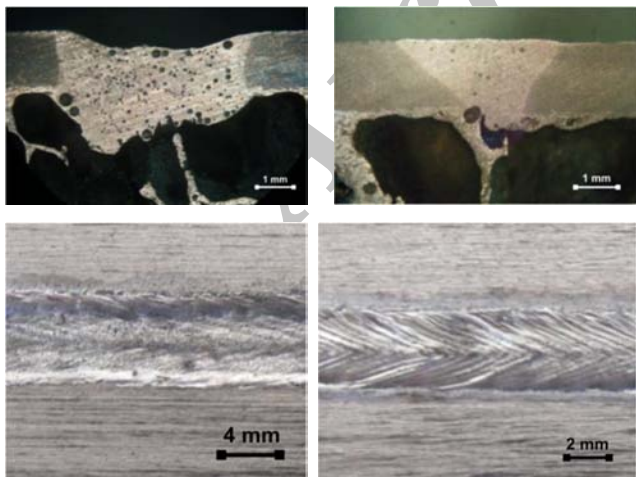


Fig. 10 The weld depth contour (at mm) as a function of welding current and laser power in the welding speeds of (a) 2 m/min, and (b) 3 m/min

شکل 10 خط‌های هم‌عمق جوش (برحسب میلیمتر) به عنوان تابعی از شدت جریان الکتریکی و توان لیزر در سرعت جوش کاری (الف) 2 متر بر دقیقه و (ب) 3 متر بر دقیقه (خط چین موقعیت عمق نفوذ 1.7 میلی‌متر را نشان می‌دهد)



$I = 100 \text{ A}, V = 2 \text{ m/min}$ (ب) (الف) $I = 100 \text{ A}, V = 3 \text{ m/min}$
 $P = 2000 \text{ W}$ $P = 2000 \text{ W}$

Fig. 11 The weld top surface and cross section of AFS panels welded by hybrid laser-GTA welding

شکل 11 مقطع و سطح بالایی جوش ساندویچ پنل فوم آلومینیوم به دست آمده از طریق جوش کاری ترکیبی

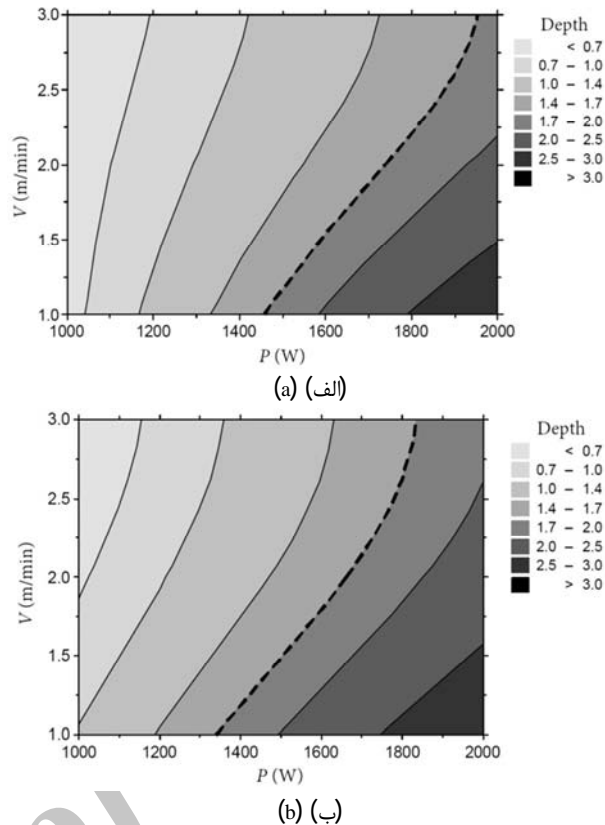


Fig. 9 The weld depth contour (at mm) as a function of laser power and welding speed in the welding currents of (a) 100 A, and (b) 150 A

شکل 9 خط‌های هم‌عمق جوش (برحسب میلیمتر) به عنوان تابعی از توان لیزر و سرعت جوش کاری در شدت جریان الکتریکی (الف) 100 آمپر و (ب) 150 آمپر (خط چین موقعیت عمق نفوذ 1.7 میلی‌متر را نشان می‌دهد)

3 متر بر دقیقه، نفوذ کامل جوش و ظاهر مناسب درز جوش مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی جوش‌های به دست آمده از جوش کاری لیزر و جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ در توان لیزر 2000 وات نشان می‌دهد که با اضافه نمودن یک منبع تیگ با جریان 100 آمپر می‌توان سرعت جوش کاری را از 2 متر بر دقیقه (در جوش کاری لیزر) به 3 متر بر دقیقه (در جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ) افزایش داد. این امر نشان دهنده‌ی توان‌مندی مناسب روش جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ برای جوش کاری ساندویچ پنل‌های فوم آلومینیوم می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری و جمع بندی

در این پژوهش قابلیت روش جوش کاری ترکیبی لیزر حالت جامد - تیگ در مقابل روش جوش کاری لیزر حالت جامد به تنهایی برای جوش کاری پنل‌های ساندویچی فوم آلومینیوم مطالعه شده است. بدین منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی با دو روش جوش کاری لیزر و جوش کاری ترکیبی لیزر - تیگ با مقدارهای متفاوت پارامترهایی جوش کاری صورت گرفت. نتیجه‌های حاصل از این پژوهش در ذیل بیان شده است:

- در جوش کاری ترکیبی لیزر-تیگ، آستانه‌ی توان لیزر مورد نیاز برای تشکیل حفره‌ی سوراخ کلید، نسبت به جوش کاری لیزر کم‌تر است. ممکن است بتوان این اثر را به جذب بیشتر انرژی لیزر توسط سطح ذوب شده‌ی فلز، توسط انرژی قوس، نسبت داد.
- افزایش توان لیزر و همچنین کاهش سرعت جوش کاری باعث افزایش

- [8] A. Faraji, M. Goodarzi, S. Seyedin, G. Barbieri, C. Maletta, Numerical modeling of heat transfer and fluid flow in hybrid laser-TIG welding of aluminum alloy AA6082, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-16, 2014.
- [9] M. Ono, Y. Shinbo, A. Yoshitake, M. Ohmura, Development of Laser-arc Hybrid Welding, *Nkk Technical Review*, Vol. 86, pp. 8-12, 2002.
- [10] J. Tusek, M. Suban, Hybrid welding with arc and laser beam, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, No. 5, pp. 308-311, 1999.
- [11] F. Möller, C. Thomy, Interaction Effects between Laser Beam and Plasma Arc in Hybrid Welding of Aluminum, *Physics Procedia*, Vol. 41, No. 0, pp. 81-89, 2013.
- [12] G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, P. Colucci, M. B. Alba, Development of laser welding processes and EBW for AFS panels, *Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie*, ENEA, pp. 1-37, 2011.
- [13] L. Quintino, R. Miranda, U. Dilthey, D. Iordachescu, M. Banasik, S. Stano, Laser Welding of Structural Aluminium. Advanced Structured Materials in: P. M. G. P. Moreira, L. F. M. da Silva, P. M. S. T. de Castro, *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures*, Eds., pp. 33-57: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [14] H. Ramezani, S. A. A. Mousavi, characterization of micro structural and mechanical properties of inconel 625/A 517 high strength quenched and tempered steel dissimilar welds, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 331-336, 2015. (in Persian)
- [15] Y. T. Cho, W. I. Cho, S. J. Na, Numerical analysis of hybrid plasma generated by Nd:YAG laser and gas tungsten arc, *Optics & Laser Technology*, Vol. 43, No. 3, pp. 711-720, 2011.
- [16] M. Gao, X. Zeng, Q. Hu, J. Yan, Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 785-791, 2009.
- [17] L. M. Liu, G. Song, M. L. Zhu, Low-Power Laser/Arc Hybrid Welding Behavior in AZ-Based Mg Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, No. 7, pp. 1702-1711, 2008.
- [18] M. Moradi, M. Ghoreishi, M. Karlsson, J. Kaplan, A.F.H., An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, No. 4, pp. 481-487, 2013.
- [19] M. Moradi, M. Salimi, N. Ghoreishi, M. Abdollahi, H. Shamsborhan, M. Frostevarg, J. Ilar, T. Kaplan, A.F.H., Parameter dependencies in laser hybrid arc welding by design of experiments and by a mass balance, *Journal of Laser Applications*, Vol. 26, No. 2, 2014.
- [20] M. Moradi, M. Ghoreishi, M. Torkamany, M.J., Modeling and Optimization of Nd:YAG Laser-TIG Hybrid Welding of Stainless Steel, *Journal of lasers in Engineering*, Vol. 27, NO. 3/4, pp. 211-230, 2014.
- [21] M. Moradi, M. Ghoreishi, A. Rahmani, Numerical and Experimental Study of Geometrical Dimensions on Laser-TIG Hybrid Welding of Stainless Steel 1.4418, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production (MPMP Journal)*, Vol. 5, No. 2, pp. 21-32, 2016.

- با افزایش شدت جریان الکتریکی، عمق نفوذ جوش تقریباً ثابت بوده و تنها پهنای جوش افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، شدت جریان الکتریکی تأثیر چندانی بر عمق نفوذ جوش ندارد.
- مقایسه‌ی جوش‌های حاصل از جوش کاری لیزر و جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ پنل‌های ساندویچی فوم آلومینیوم نشان داد که با اضافه نمودن یک منبع قوس یک‌صد آمپری به منبع لیزر ان دی یگ دو هزار واتی، می‌توان سرعت جوش کاری را از 2 به 3 متر بر دقیقه افزایش داد که این امر نشان دهنده‌ی توان‌مندی مناسب جوش کاری ترکیبی لیزر- تیگ است.

5- تقدیر و تشکر

در پایان، لازم است از همکاری‌های صمیمانه‌ی شرکت CALEF در کشور ایتالیا به دلیل در اختیار گذاشتن مواد و دستگاه‌های آزمایشگاهی مورد نیاز، قدردانی نمایم.

6- مراجع

- [1] C. Bagger, F. O. Olsen, Review of laser hybrid welding, *Journal of Laser Applications*, Vol. 17, No. 1, pp. 2-14, 2005.
- [2] A. Mahrle, E. Beyer, Hybrid laser beam welding—Classification, characteristics, and applications, *Journal of Laser Applications*, Vol. 18, No. 3, pp. 169-180, 2006.
- [3] Y. B. Chen, Z. L. Lei, L. Q. Li, L. Wu, Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, No. 4, pp. 403-411, 2006.
- [4] B. Hu, G. D. Ouden, Synergetic effects of hybrid laser/arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, No. 4, pp. 427-431, 2005.
- [5] G. Casalino, S. L. Campanelli, U. Dal Maso, A. D. Ludovico, Arc Leading Versus Laser Leading in the Hybrid Welding of Aluminium Alloy Using a Fiber Laser, *Procedia CIRP*, Vol. 12, No. 0, pp. 151-156, 2013.
- [6] B. Ribic, R. Rai, T. DebRoy, Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in GTA/Laser hybrid welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 13, No. 8, pp. 683-693, 2008.
- [7] B. Ribic, T. A. Palmer, T. DebRoy, Problems and issues in laser-arc hybrid welding, *International Materials Reviews*, Vol. 54, No. 4, pp. 223-244, 2009.