

مقایسه متالورژیکی و مکانیکی جوشکاری لیزر Nd:YAG فولادهای زنگ نزن آستنیتی

پژمان کیانی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مجید قریشی*

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش با استفاده از لیزر Nd:YAG پالسی دو نوع فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و ۳۱۶ به صورت لبه‌لب جوشکاری شدند و به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند با استفاده از روش فاکتوریل کامل پرداخته شد. اثر پارامترهای ورودی فرآیند شامل توان لیزر، پهنای پالس، سرعت جوشکاری و ترکیب شیمیایی بر پارامترهای خروجی از جمله پهنای جوش، عمق جوش، استحکام نهایی کشش، درصد ازدیاد طول و عدد فریت بررسی گردید. عملیات جوشکاری در توان‌های ۱/۲ و ۱/۸ کیلووات، پهنای پالس ۳ و ۴/۴ میلی‌ثانیه و سرعت جوشکاری ۰/۲ و ۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. به منظور دستیابی به بیشترین استحکام، ابعاد هندسه جوش و عدد فریت، پارامترهای ورودی در بالاترین سطح خود به عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید؛ با افزایش سرعت جوشکاری، درصد ازدیاد طول ۶۴ درصد افزایش یافت. فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ در مقایسه با فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴، به دلیل وجود عنصر مولیبدن در ریزساختار، فریت بیشتری دارد. خطای پارامترهای خروجی پهنای جوش، عمق جوش، استحکام نهایی کشش، درصد ازدیاد طول و عدد فریت به ترتیب برابر با ۲، ۵، ۱/۶، ۲۵ و ۲ درصد بود.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری لیزر Nd:YAG، فولاد زنگ نزن آستنیتی، طراحی آزمایش، بهینه‌سازی، طرح فاکتوریل کامل.

Comparative Metallurgical and Mechanical of Nd:YAG laser welding of Austenitic stainless steels

P. Kiani
M. Ghoreishi

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Laser welding is a significant method for welding all kinds of alloys. High speed welding, low distortion and easy automation are the advantages of this method. In this study, pulsed Nd:YAG laser butt joint welding was performed on 304 and 316 Austenitic stainless Steels workpieces. All the parameters were designed by Full Factorial Method which the center point was repeated for 10 times. Henceforth, the effect of power, pulse duration, laser velocity and chemical composition on width and depth of welding area, ultimate tensile strength, elongation and Ferrite Number were studied. The welding process was performed in 1.2 and 1.8 KW as power, 3 and 4.4 ms as pulse duration and 0.2 and 0.8 mm/s as velocity of welding. Thus, the upper level of input parameters were selected as the optimal case. This was done by surveying all the samples to achieve maximum UTS, size of the weld and Ferrite Number. In these conditions, output error for width of weld, depth of weld, U.T.S, elongation and Ferrite Number was 2, 5, 1.6, 25 and 2%.

Keywords: Nd:YAG Laser Welding, Austenitic stainless Steel, Design of experiment, Optimization, Full Factorial Design.

زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و ۳۱۶ به روش جوشکاری لیزر یاقوتی^۱ جهت ایجاد جوش بدون ترک، استحکام بالا و عمق نفوذ مناسب هست.

موتاپندی و همکاران در سال ۲۰۰۳ به بررسی اثر شیمی فلز جوش و حرارت ورودی^۲ بر ساختار و خصوصیت جوش فولاد زنگ نزن دوفازی پرداختند. مشاهده کردند که ترکیب شیمیایی تأثیر بیشتری بر نسبت فریت - آستنیت در مقایسه با آهنگ سرد شدن^۳ دارد و همچنین نشان دادند که تفاوت نسبت فریت - آستنیت منجر به تفاوت چشم‌گیری بر مقدار سختی نخواهد شد^۴ [۱]. موسوی و صوفی زاده به بررسی جوشکاری لیزر از نوع لبه‌لب^۵ فولادهای زنگ نزن ۳۲۱ و ۶۳۰ پرداختند و اثر توان لیزر، قطر پرتو لیزر، پهنای پالس، عمق و پهنای پالس را مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که عمق نفوذ و پهنای جوش با

۱- مقدمه

جوشکاری پرتوی لیزر یکی از روش‌های مورد توجه برای جوشکاری تمام آلیاژها است که از مزایای آن می‌توان به سرعت جوشکاری بالا، اعوجاج کم و راحتی اتوماسیون آن اشاره کرد. امروزه لیزر کاربردهای فراوانی در فناوری کامپیوتر، ارتباطات، هوافضا، جراحی و همچنین کاربردهای صنعتی در فرآوری مواد و غیره پیدا کرده است. سیستم لیزر پیوسته عمدتاً برای جوشکاری با عمق زیاد و لیزر پیوسته برای جوش مواد خیلی نازک استفاده می‌شود. فولادهای زنگ نزن آستنیتی از جوش‌پذیری بسیار خوبی برخوردار هستند ولی یکی از مشکلات موجود در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی حساسیت به ترک است که به پارامترهای جوشکاری، ترکیب شیمیایی و نحوه سرد شدن بستگی دارد. هدف از انجام این تحقیق، به دست آوردن محدوده‌ی ترکیب شیمیایی (عدد فریت) و پارامترهای جوشکاری مناسب، بر روی فولادهای

^۱ Nd:YAG

^۲ Heat Input

^۳ Cooling Rate

^۴ Butt

افزایش ولتاژ و فرکانس افزایش می‌یابد و همچنین نتایج نشان داد که پهنای پالس اثر دوجانبه‌ای داشته است به طوری که مقدار بهینه آن موجب ایجاد بیشترین ابعاد جوش خواهد شد [۲]. ماریسیو دیوید و همکاران به بررسی جوشکاری لیزر باقوتی پالسی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و آلیاژ نیکل (اینکونل ۶۰۰) پرداختند، در این تحقیق مرفولوژی منطقه انجماد جوش مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها مشاهده کردند که مرفولوژی انجماد منطقه جوش عموماً به صورت روزنه دار و دندریتی می‌باشد که متأثر از گرادیان دمایی، سرعت انجماد و ترکیب شیمیایی می‌باشد [۳].

باغجاری و موسوی اثر پارامترهای جوشکاری لیزر باقوتی را بر روی میکروساختار و سختی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که مقدار سختی در منطقه متأثر از گرما بزرگ‌تر از منطقه جوش می‌باشد و همچنین نشان دادند عمق و پهنای جوش با افزایش ولتاژ و کاهش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد [۴]. خان و همکارانش به جوشکاری غیرهم جنس فولاد زنگ نزن ۴۳۰ و ۴۴۰ به روش لیزر و به بررسی اثر پارامترهای جوشکاری بر هندسه جوش و به بهینه‌سازی فرآیند به روش عاملی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که میکروساختار جوش با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت جوشکاری تغییرات مثبتی می‌کند [۵]. سلمان و عابد به جوشکاری لیزر باقوتی فولاد زنگ نزن کم کربن ۳۰۴ به فولاد کم کربن با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر پرداختند و اثر پارامترهای قله‌ی توان و سرعت جوشکاری را بر استحکام جوش، سختی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند در بهترین شرایط جوشکاری با قله توان ۶/۵ کیلووات، بیشترین استحکام جوش (۴۰۸ نیوتن) و با سرعت جوشکاری ۱ mm/s، بیشترین استحکام جوش (۴۳۳ نیوتن) خواهد بود [۶]. جین ونگ و همکارانش به بررسی اثر پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت جوشکاری و توان لیزر بر روی ترک گرم و بهینه‌سازی فرآیند به روش سطح پاسخ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت جوشکاری و کاهش توان، کاهش ترک گرم را خواهیم داشت [۷].

الکساندرو و همکاران فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را با فولاد ۱۰۱۰ به روش جوشکاری لیزری به هم متصل نمودند و میکروساختار، مشخصات هندسی جوش، ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی جوش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS و آزمون کشش بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که توان، سرعت و قطر پرتو لیزر پارامترهای کلیدی فرآیند جوشکاری لیزر می‌باشند که اثر مهمی بر هندسه جوش و مشخصات فیزیکی جوش دارند. با بررسی آزمایش‌ها نشان دادند که قطر پرتو اثر زیادی بر نفوذ و همگنی جوش دارد و همچنین مشاهده کردند که امکان وجود میکروساختار مارتنزیتی در منطقه جوش متأثر از شرایط خنک کاری می‌باشد [۸]. مرادی و قریشی به بهینه‌سازی اثر پارامترهای جوشکاری لیزری بر پروفیل هندسی سوپر آلیاژ نیکل به روش سطح پاسخ پرداختند. آن‌ها توان لیزر، سرعت جوشکاری، فاصله کانونی پرتو لیزر و فشار گاز خنثی را به عنوان پارامتر ورودی فرایند و پهنای سطح جوش، مساحت حوضچه مذاب، پهنای گرده جوش، سرریز جوش و زیربرش جوش به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفتند و نشان

دادند در میان پارامترهای جوشکاری سرعت مؤثرترین پارامتر می‌باشد که تأثیری معکوس بر تمام ابعاد هندسی جوش دارد و همچنین با افزایش توان لیزر، تمام ابعاد هندسی جوش افزایش می‌یابد. مرادی و قریشی مشاهده کردند که فاصله کانونی لیزر اثر چشم‌گیری بر پارامترهای خروجی ندارد [۹].

در این پژوهش با یکسان در نظر گرفتن تمام پارامترهای ورودی و شرایط انجام فرآیند به مقایسه جوش‌پذیری دو نوع فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و ۳۱۶ به منظور دستیابی به جوش با کیفیت، بدون ترک گرم و هندسه جوش مناسب پرداخته می‌شود. بدین منظور ۳ پارامتر فرآیند جوشکاری در سه سطح و یک پارامتر ترکیب شیمیایی در دو سطح با روش آماری فاکتوریل کامل که یک روش مؤثر تحلیل هم‌زمان اثر پارامترهای ورودی و برهم‌کنش بر خروجی‌های مدنظر است مورد بررسی قرار می‌گردد. در انتها خواص مکانیکی و خواص متالورژیکی نمونه منتخب و معیوب مورد بررسی قرار گرفته شد. این موارد شامل بررسی استحکام نهایی کشش، آنالیز عنصری، متالوگرافی و تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بودند.

۲- آزمایشهای تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و ۳۱۶ از پرکاربردترین فولادهای زنگ نزن در صنعت است که جهت انجام فرآیند جوشکاری با لیزر در این تحقیق، ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶، با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر به مقدار لازم تهیه گردید. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ و ۳۰۴ در جدول ۱ ارائه شده است. دستگاه لیزر مورد استفاده برای انجام جوش، مدل ترامپ اف^۲ است از ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به قابلیت متمرکز شدن چشمی اشاره کرد که مشخصات دستگاه لیزر در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ - مشخصات دستگاه لیزر

نوع دستگاه	یاقوتی- پالسی
ولتاژ دستگاه	۷۰ ولت
پهنای پالس	۲۰-۰/۵ میلی ثانیه
طول موج	۱۰/۶۴ نانومتر
فرکانس	۱۰۰-۰ هرتز
فاصله کانونی	۳/۰۰ میلی‌متر
توان خروجی	۵/۷-۰/۵ کیلووات

۲-۲- روند آزمایش

۲-۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و جوشکاری

ابتدا نمونه‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ و ۳۰۴ را به شکل ورق‌هایی با ابعاد ۸ × ۶ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌های مختلف بریده‌شده و سپس به‌منظور افزایش دقت مطالعات و کیفیت جوش ایجادشده، وارد مرحله آماده‌سازی سطح می‌شوند. هدف از این مرحله زدودن آلودگی‌ها و اکسیدهای سطحی از روی سطح و همچنین

^۱ Trump

^۲ Energy Dispersive Spectroscopy

ترکیبی^۶ و روش سطح پاسخ^۷ اشاره نمود[۱۰]. پاسخ توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل، مدل بندی می‌شود که تابع تقریب کننده برای مدل مرتبه اول به صورت رابطه (۱) است:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

در این رابطه مقادیر β ، مقدار ضریب پارامترها و x_1 و x_2 و x_k ... بیان کننده مقادیر فاکتورها می‌باشند و ε خطای تصادفی در هر مورد آزمایش است. برای برآورد پارامترها در تقریب چندجمله‌ای‌ها، از روش حداقل مربعات استفاده می‌شود. در این تحقیق، از روش عاملی کامل دوسطحی با ۵ بار تکرار نقطه مرکزی استفاده شده است که با غیر مؤثر شدن انحنای، نشان می‌دهد که طرح دوسطحی کافی بوده است و نیازی به افزایش سطح نمی‌باشد. مقادیر واقعی و کد شده سطوح مختلف پارامترهای ورودی در طرح مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ - مقادیر کد شده و واقعی پارامترهای ورودی

فاکتورهای ورودی	۱	-۱
نوع فولاد زنگ نزن آستنیتی	۳۱۶	۳۰۴
توان لیزر (کیلووات)	۱/۸	۱/۲
پهنای پالس (میلی ثانیه)	۴/۴	۳
سرعت جوشکاری (میلی متر بر ثانیه)	۰/۸	۰/۲

چهار پارامتر سرعت (S)، پهنای پالس (PD)، توان لیزر (P) و نوع فولاد زنگ نزن آستنیتی (M) در دو سطح به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند که در جدول ۴ طراحی آزمایش پارامترهای ورودی ارائه شده است. پهنای (W.W^۸) و عمق جوش (D.W^۹) بر حسب میکرومتر و استحکام کششی (U.T.S^{۱۰}) بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع، درصد ازدیاد طول (EL^{۱۱}) و عدد فریت (F.N^{۱۲}) فلز جوش به عنوان پاسخ‌هایی برای هر آزمایش محاسبه و تحلیل شده است و در جدول ۴ پارامترهای خروجی ارائه شده است. تعداد آزمایش‌ها در این پژوهش ۲۶ عدد می‌باشد که شامل ۱۰ آزمایش تکرار نقطه مرکزی^{۱۳} و ۱۶ = ۲^۴ آزمایش مرتبط با طرح پایه^{۱۴} می‌باشد.

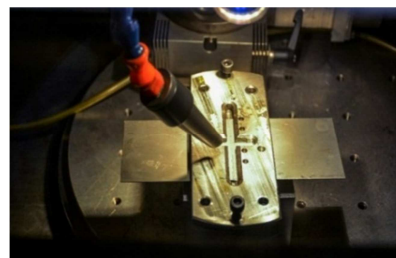
صیقل کاری و یکنواختی سطح می‌باشد. در این مرحله نمونه‌های بریده شده با سنباده‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ سنباده زنی می‌شوند، سپس نمونه‌ها طی عملیات چربی گیری در محلول استون در دستگاه اولتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه چربی زدایی می‌شوند، پس از عملیات چربی گیری، نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و در هوای گرم خشک می‌شوند.

نمونه‌ها به منظور متالوگرافی و مورفولوژی، با استفاده از الکترولیت اسید نیتریک ۶۰٪ با ولتاژ ۱۵ ولت به مدت ۱۰ ثانیه قلم زنی شدند و نمونه‌ها توسط دستگاه مانت گرم به مدت ۵ دقیقه تا دمای ۲۳۰ درجه گرم شدند و سپس توسط آب خنک، مانت سفت تهیه شد (شکل ۱).



شکل ۱ - نمونه مانت گرم شده

همچنین نمونه‌ها برای آماده سازی برای آزمون کشش با استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه برش با ابعاد استاندارد تهیه گردید. در این مرحله، فرآیند جوشکاری لیزر در شرایط مختلف از جمله سرعت، پهنای پالس و توان جوشکاری و همچنین ترکیب شیمیایی به منظور بررسی کیفیت جوش ایجاد شده بر روی سطح نمونه‌ها، انجام می‌شود. ورق‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ و ۳۰۴ به روش لب به لب و هم جنس اتصال داده می‌شوند که تصویر آن در شکل ۲ ارائه شده است. به منظور جوشکاری لیزری بر روی ۲۶ جفت نمونه به روش لب به لب انجام شده و با توجه به نتایج به دست آمده، شرایط بهینه به منظور کیفیت جوش مناسب انتخاب گردید.



شکل ۲ - انجام فرآیند جوشکاری لب به لب

۳- روش تحقیق

۳-۱- طراحی آزمایش

روش‌های متفاوتی برای طراحی آزمایش‌ها وجود دارند، به عنوان نمونه می‌توان به روش‌های طراحی پلاکت - بورمن^۲ آزمایش با سطوح متفاوت پارامترها^۳، طراحی آزمایش عاملی^۴، روش تاگوچی^۵، روش

^۲ Factorial Design Of Experimental

^۳ Taguchi Method

^۵ Mixture Design

^۶ Response Surface Methodology

^۸ Width of weld

^۹ Depth of Weld

^{۱۰} Ultimate Tensile Strength

^{۱۱} Elongation

^{۱۲} Ferrite Number

^{۱۳} Center Point

^{۱۴} Base Design

^۲ Etch

^۳ Plackett-Burman

^۴ Design With Mixed Levels

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶

عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Cu
۳۰۴	۶۹/۸۶	۰/۰۵۷	۰/۴۲	۱/۶۸	۰/۰۳۹۲	۰/۰۰۰۵	۱۸	۰/۳۲۷	۸/۵۸	۰/۱۶۳	۰/۴۶
۳۱۶	۶۹/۰۳	۰/۰۲	۰/۶۸	۱/۵	۰/۰۴	۰/۰۰۵	۱۶/۹	۲/۳۵	۹/۲	۰/۱۸	۰/۰۶

جدول ۴- طراحی آزمایش پارامترهای ورودی و خروجی

نمونه	Material	P (KW)	S mm/s	P.D (ms)	F.N (عدد فریت)	W.D (μm)	W.W (μm)	U.T.S (MPa)	EL (%)
1B	۳۰۴	۱/۲	۰/۲	۳	۰/۰۲	۱۱۲/۳	۴۹۹/۷	۱۷۱/۹	۰/۱
2B	۳۰۴	۱/۸	۰/۲	۳	۰/۰۷	۵۲۰	۷۴۱/۶	۵۱۱/۹	۱۸/۸
3B	۳۰۴	۱/۲	۰/۲	۴/۴	۰/۰۴	۳۹۸/۸	۷۱۰/۶	۳۸۹/۵	۶/۱
4B	۳۰۴	۱/۸	۰/۲	۴/۴	۰/۰۵	۵۲۰	۸۱۰/۱	۴۳۶/۳	۵/۱
5B	۳۰۴	۱/۲	۰/۸	۳	۰/۰۱	۱۰۸/۵	۴۸۴/۹	۹۷/۵	۰/۰۰۱
6B	۳۰۴	۱/۸	۰/۸	۳	۰/۰۹	۵۲۰	۷۲۹/۷	۵۴۹/۶	۲۶/۹
7B	۳۰۴	۱/۲	۰/۸	۴/۴	۰/۰۳	۳۳۸/۹	۶۶۳/۹	۳۶۴/۲	۴/۹
8B	۳۰۴	۱/۸	۰/۸	۴/۴	۰/۱۵	۵۲۰	۸۱۰/۲	۶۴۰/۳	۷۱/۷
1A	۳۱۶	۱/۲	۰/۲	۳	۰/۰۴	۱۱۴/۸	۵۰۳/۷	۱۶۱	۰/۱
2A	۳۱۶	۱/۸	۰/۲	۳	۰/۰۶	۴۸۰	۶۸۹/۲	۳۶۹/۹	۷
3A	۳۱۶	۱/۲	۰/۲	۴/۴	۰/۱۵	۴۹۰	۷۲۴/۷	۵۱۸/۷	۲۴/۴
4A	۳۱۶	۱/۸	۰/۲	۴/۴	۰/۰۷	۴۷۶	۸۰۷/۷	۳۸۱/۷	۷/۸
5A	۳۱۶	۱/۲	۰/۸	۳	۰/۰۴	۱۱۵	۴۹۹/۱	۱۴۲/۹	۰/۱
6A	۳۱۶	۱/۸	۰/۸	۳	۰/۱۶	۴۸۰	۷۵۳/۶	۵۸۳/۴	۴۰
7A	۳۱۶	۱/۲	۰/۸	۴/۴	۰/۰۸	۳۱۲	۶۳۰/۷	۳۸۹/۵	۹/۱
8A	۳۱۶	۱/۸	۰/۸	۴/۴	۰/۲	۴۷۲	۸۱۹/۵	۶۱۴	۵۱/۸
9B	۳۱۶	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۰۵	۲۵۴/۷	۶۲۰/۳	۳۲۸/۴	۲/۸
9A	۳۱۶	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۱۱۵	۳۲۹/۳	۶۸۱/۲	۴۸۹/۵	۱۸/۱
10B	۳۰۴	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۰۶	۳۲۱/۲	۶۱۶	۳۱۸/۳	۲/۵
10A	۳۱۶	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۱	۳۵۴/۹	۶۹۳/۹	۴۷۵	۱۶/۱
11B	۳۰۴	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۰۸	۳۵۶/۲	۶۴۴/۳	۴۵۱/۲	۱۰/۷
11A	۳۱۶	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۱۱	۴۰۶/۹	۷۰۰/۵	۴۸۴/۶	۱۷/۴
12B	۳۰۴	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۰۵	۵۱۰	۵۴۲/۶	۳۰۰/۶	۱/۷
12A	۳۱۶	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۱۷	۴۱۱/۳	۷۰۸/۳	۵۰۱/۴	۲۰/۸
13B	۳۰۴	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۰۳	۲۲۵/۱	۵۴۶/۴	۲۴۰/۲	۰/۵
13A	۳۱۶	۱/۵	۰/۵	۳/۷	۰/۱۷۵	۳۹۱	۷۰۵/۶	۵۲۵	۲۴

۴- بحث و نتایج

۴-۱- اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری بر خروجی‌ها

در این بخش داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی می‌شود. این بررسی برای خروجی‌های فرآیند که عدد فریت، ابعاد هندسه و استحکام جوش می‌باشد، به ترتیب انجام و بیان شده است.

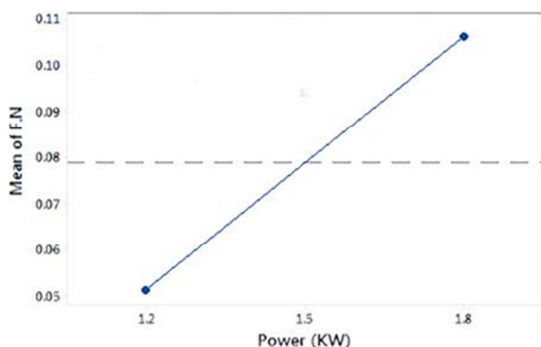
۴-۱-۱- اثر پارامترهای مؤثر بر عدد فریت

معادله رگرسیون مدل اصلاح‌شده برای متغیرهای کد شده برای عدد فریت به صورت رابطه (۲) است.

$$F.N = 0.07875 + 0.0275P + 0.0175PD + 0.01625S + 0.02846M + 0.0275P \times S \quad (2)$$

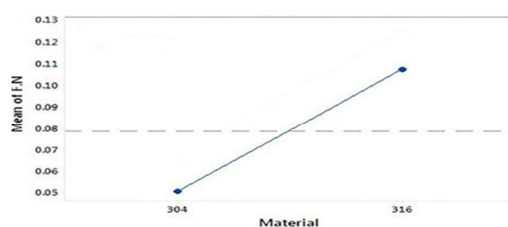
لازم به ذکر است در تمامی معادلات ارائه شده، پارامترهای P، PD، S و M به ترتیب نماینده پارامترهای توان، پهنای پالس، سرعت و جنس می‌باشند. در شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش توان لیزر، مقدار عدد فریت بیشتر می‌شود زیرا با افزایش توان، میزان گرما ورودی بر سطح ورق افزایش می‌یابد که سبب کاهش آهنگ سرد شدن و درنهایت افزایش میزان عدد فریت می‌گردد. البته لازم به ذکر است تشکیل عدد فریت علاوه بر نرخ سرد شدن به نسبت کروم به نیکل و ترکیب شیمیایی فلز جوش وابسته است افزایش میزان عدد فریت با افزایش بیش‌ازحد توان را می‌توان طبق شکل ۴ و در تعامل اثر آن با فاکتور سرعت جوشکاری نیز مشاهده کرد که در سرعت جوشکاری بالا، با افزایش توان، میزان عدد فریت افزایش می‌یابد.

مقایسه با افزایش سرعت جوشکاری از سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه تا سرعت ۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه، میزان عدد فریت به مقدار چشم‌گیری افزایش یافته است. زیرا با افزایش بیش از حد سرعت جوشکاری میزان نرخ سرد شدن نیز افزایش می‌یابد و به سبب آن میزان افزایش عدد فریت به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه کرد که عدد فریت تنها به نرخ سرد شدن وابسته نیست بلکه ترکیب شیمیایی از جمله نسبت کروم به نیکل و عناصر فریت زا مانند مولیبدن نیز بر عدد فریت تأثیرگذار است به همین دلیل نمی‌توان تنها با توجه به یکی از این دو عامل، قضاوت درستی از عدد فریت داشت.



شکل ۶ - اثر اصلی فاکتور سرعت بر عدد فریت

عدد فریت در فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ در مقایسه با فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ بیشتر است علت این امر این است که در ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ عنصر مولیبدن وجود دارد که حضور این عنصر سبب تشکیل بیشتر فریت در ریزساختار می‌شود. با توجه به اینکه در معادله رگرسیون ارائه شده، ضریب رگرسیون این فاکتور بیشترین مقدار است می‌توان نتیجه گرفت که این فاکتور بیشترین تأثیر را در میزان عدد فریت در فلز جوش، نسبت به سایر فاکتورهای فرایند دارد. (شکل ۷).



شکل ۷ - اثر اصلی فاکتور جنس بر عدد فریت

۴-۱-۲- اثر پارامترهای مؤثر بر ابعاد هندسه جوش

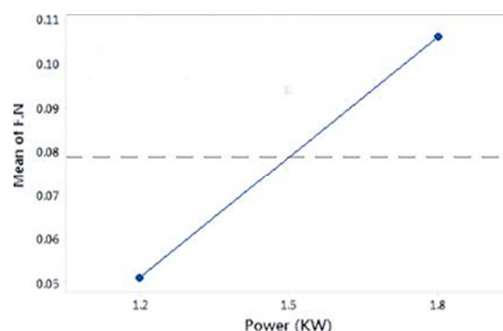
معادله رگرسیون مدل اصلاح شده برای پهنای جوش برحسب مقادیر متغیرهای ورودی کد شده و به صورت رابطه (۳) است.

$$W.W = 679.9 + 90.3P + 67.2PD \quad (3)$$

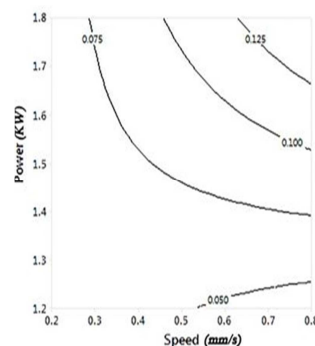
معادله رگرسیون مدل اصلاح شده برای عمق جوش برحسب

مقادیر کد شده ورودی‌ها به صورت رابطه (۴) است:

$$D.W = 374.3 + 125.5P + 66.7PD - 69.4P \times PD \quad (4)$$

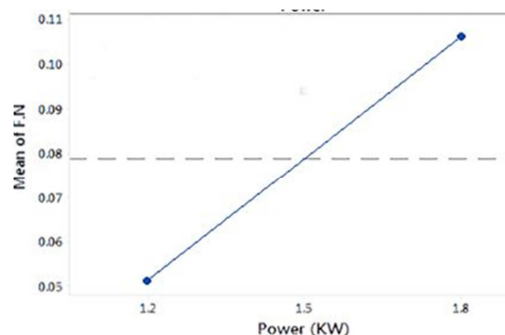


شکل ۳ - اثر توان بر عدد فریت



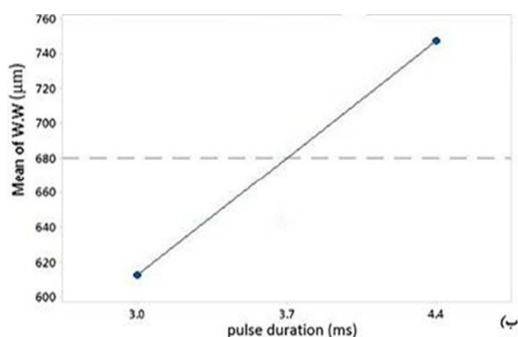
شکل ۴ - اثر برهم‌کنش فاکتور توان و سرعت بر عدد فریت

با توجه به شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش پهنای پالس، عدد فریت افزایش می‌یابد به این صورت که افزایش میزان عدد فریت بین بازه‌ی ۳ تا ۳/۷ میلی‌ثانیه بیشتر از افزایش آن در بازه‌ی ۳/۷ تا ۴/۴ میلی‌ثانیه است و یا به عبارت دیگر شیب نمودار در بازه ۳-۳/۷ بیشتر از شیب آن در بازه ۳/۷-۴/۴ است که دلیل آن بستگی به نرخ سرد شدن و ترکیب شیمیایی از جمله نسبت کروم به نیکل دارد به صورتی که در نسبت کروم به نیکل کمتر از ۱/۲ در نرخ‌های متفاوت سرد شدن، فاز آستنیت و در نسبت کروم به نیکل بیشتر از ۲ در نرخ‌های متفاوت سرد شدن، فاز فریت تشکیل می‌شود.



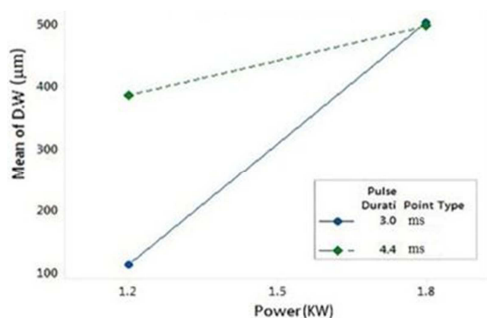
شکل ۵ - اثر اصلی فاکتور پهنای پالس بر عدد فریت

سرعت جوشکاری نیز به عنوان یک پارامتر مؤثر در میزان عدد فریت عمل می‌کند. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جوشکاری از ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه تا سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه، در



شکل ۹ - اثر اصلی فاکتور پهنای پالس بر ابعاد هندسه جوش (الف)
عمق جوش (ب) پهنای جوش

در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که در پهنای پالس ۳ میلی‌ثانیه با افزایش توان، عمق جوش به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد ولی در پهنای پالس ۴/۴ میلی‌ثانیه، در مقایسه با پهنای پالس ۳ میلی‌ثانیه با شیب کمتری افزایش می‌یابد. فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ در مقایسه با فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ابعاد هندسه جوش مناسب تری برخوردار است.



شکل ۱۰ - نمودار تعامل اثر فاکتور پهنای پالس و توان بر عمق جوش

۴-۱-۳- اثر پارامترهای مؤثر بر استحکام جوش

در این بخش به تحلیل و بررسی استحکام جوش که شامل استحکام نهایی جوش و درصد ازدیاد طول می‌باشد پرداخته خواهد شد. معادله رگرسیون مدل اصلاح‌شده برای استحکام نهایی کشش برحسب مقادیر گذشته ورودی‌ها به صورت رابطه (۵) است.

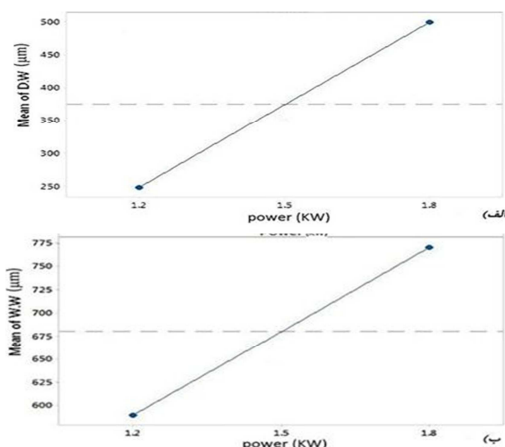
$$\begin{aligned} U.T.S \\ = 395.7 + 115.2P + 72.2PD + 28.1S - 65P \times PD \\ + 57.9P \\ \times S \end{aligned} \quad (5)$$

معادله رگرسیون مدل اصلاح‌شده برای ازدیاد طول برحسب مقادیر گذشته ورودی‌ها به صورت رابطه (۶) است.

$$\begin{aligned} E.L = 17.12 + 11.52P + 5.49PD + 8.44S + 3.7M \\ - 0.03P \times PD + 10.52P \times S \\ + 3.32PD \times S + 5.37P \times PD \\ \times S \end{aligned} \quad (6)$$

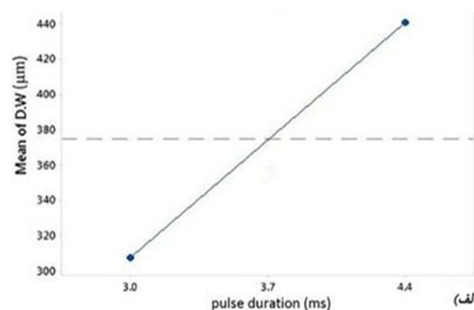
در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد با افزایش توان استحکام جوش شامل استحکام نهایی کشش و درصد ازدیاد طول افزایش می‌یابد علت آن را می‌توان به این صورت بیان کرد که با افزایش توان، گرمای ورودی بر سطح ورق افزایش می‌یابد به سبب آن میزان

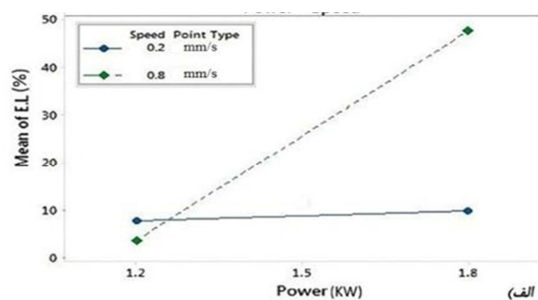
همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، توان (P) یکی از عوامل مهم در هندسه جوش است به‌طوری‌که افزایش آن سبب افزایش ابعاد هندسه جوش می‌گردد. (شکل ۸) علت آن هم آن‌طور که در ابتدای این فصل اشاره شد برمی‌گردد به این حقیقت که با افزایش توان میزان گرمای خروجی بر سطح ورق افزایش می‌یابد که سبب افزایش حوضچه مذاب که به دنبال آن پهنای و عمق جوش افزایش می‌یابد. با توجه به معادله رگرسیون (۳) و (۴)، فاکتور توان بیشترین ضریب را در معادله دارد که نشان‌دهنده تأثیر چشم‌گیر آن بر ابعاد هندسه جوش می‌باشد. البته باید به این نکته اشاره کرد که افزایش بیش‌ازحد توان لیزر، کیفیت سطح جوش را کاهش می‌دهد [۱۱].



شکل ۸ - اثر اصلی فاکتور توان بر ابعاد هندسه جوش (الف) عمق جوش
(ب) پهنای جوش

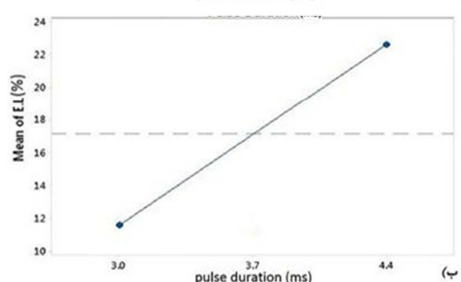
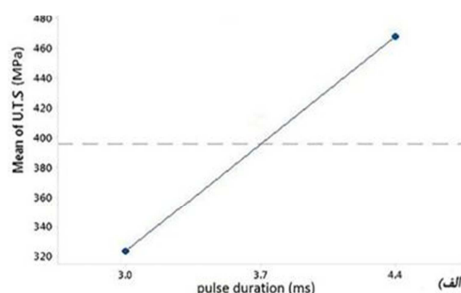
با افزایش پهنای پالس، ابعاد هندسه جوش از قبیل پهنای و عمق جوش افزایش می‌یابد. با افزایش پهنای پالس به مقدار بهینه، پهنای جوش و عمق جوش به خاطر افزایش هم‌پوشانی پالس‌ها و افزایش میزان حرارت خروجی بر سطح ورق، افزایش می‌یابد. (شکل ۹)





شکل ۱۳ - اثر برهم‌کنش توان و سرعت بر ازدیاد طول
الف) نمودار تعامل اثر

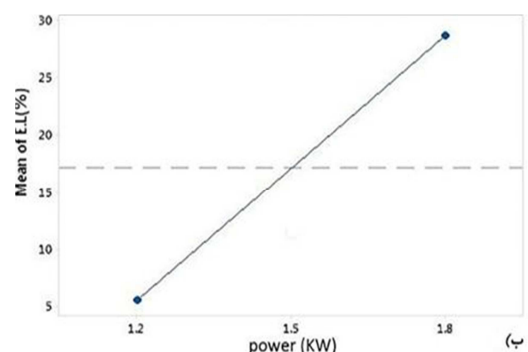
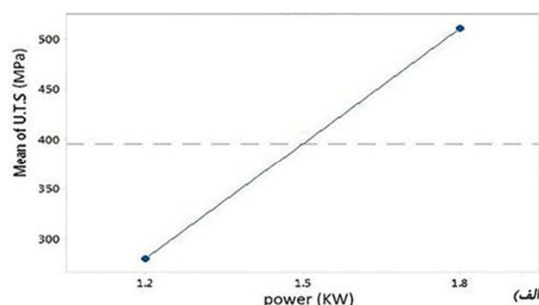
استحکام جوش شامل استحکام نهایی کشش و درصد ازدیاد طول با افزایش پهنای پالس، افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش پهنای پالس، میزان حوضه مذاب به علت افزایش مدت زمان روشنی پالس، افزایش می‌یابد که موجب اتصال مناسب بین دو ورق می‌شود که در نهایت سبب افزایش استحکام جوش می‌گردد.



شکل ۱۴ - اثر فاکتور اصلی پهنای پالس بر استحکام جوش
الف) استحکام نهایی کشش ب) ازدیاد طول

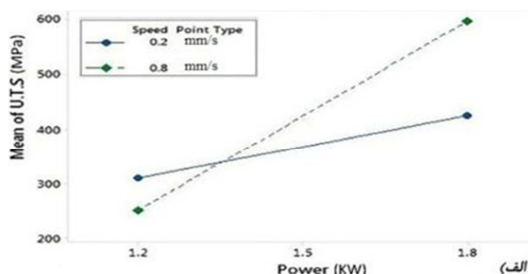
در نمودار ۱۵ اثر برهم‌کنش پهنای پالس و توان نشان داده شده است، مشاهده می‌گردد با قرارگیری توان و پهنای پالس در سطح بالای خود، فلز جوش بیشترین استحکام نهایی کشش را دارد و میزان تغییرات استحکام نهایی کشش در پهنای پالس ۳ میلی‌ثانیه بیشتر از پهنای پالس ۴/۴ میلی‌ثانیه می‌باشد.

امتزاج فلز پایه افزایش می‌یابد که موجب افزایش استحکام جوش می‌شود.



شکل ۱۱ - اثر فاکتور اصلی توان بر استحکام جوش
الف) استحکام نهایی کشش ب) ازدیاد طول

در سرعت جوشکاری ۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه با افزایش توان، استحکام نهایی کشش به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در سرعت جوشکاری ۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه با افزایش توان، درصد ازدیاد طول به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد ولی در سرعت جوشکاری ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه، تغییر در مقدار توان تأثیر چندانی بر درصد ازدیاد طول ندارد و ازدیاد طول در سرعت جوشکاری ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه تقریباً ثابت و برابر ۹/۹ می‌باشد (شکل ۱۳).



شکل ۱۲ - اثر برهم‌کنش توان و سرعت بر استحکام نهایی کشش
الف) نمودار تعامل اثر

داده شده است، دست یافت. لازم به ذکر است احتمال وقوع بهینه سازی هم زمان خروجی ها با تنظیم بهینه ورودی ها توسط نرم افزار ۰/۹۵ است.

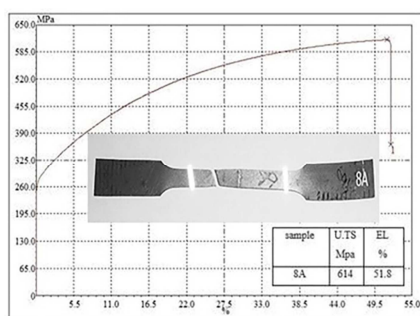
جدول ۵ - پارامترهای خروجی ها با تنظیم بهینه توسط نرم افزار

ترکیب شیمیایی	درصد ازدیاد طول	استحکام نهایی کشش	پهنای جوش	عمق جوش	عدد فریت
۳۱۶	۶۵	۶۰۴	۸۳۷/۴	۴۹۷	۰/۱۹۶

مقدار پیشنهاد شده فاکتورها توسط نرم افزار، همان آزمایش شماره ۱۶ می باشد که با توجه به جدول ۵ دارای درصد ازدیاد طول ۵/۱۸، استحکام نهایی کشش ۶۱۴ مگاپاسکال، پهنای جوش ۸۱۹/۵ میکرومتر، عمق جوش ۴۷۲ میکرومتر و عدد فریت ۰/۲ می باشد که با ترتیب با درصد خطای ۰/۲۵٪، ۱/۶٪، ۰/۲٪ و ۰/۵٪ حاکی از صحت پیش بینی نرم افزار و دقت بالای مدل ارائه شده برای ۵ خروجی می باشد.

۴-۳- تحلیل مکانیکی

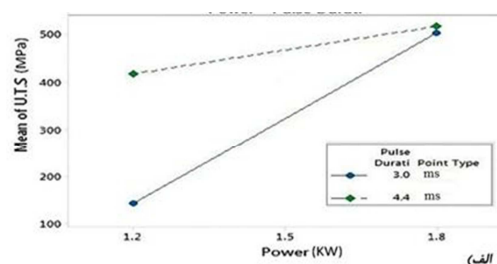
نمونه منتخب از ۲۶ نمونه که بیشترین استحکام را داشت به عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید. همان طور که در تصویر شکست مشاهده می گردد نمونه از فلز پایه با زاویه ۴۵ درجه شکست خورده است که نشان دهنده آن است که جوش از استحکام بالاتری از فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ برخوردار بوده است. (شکل ۱۸)



شکل ۱۸- منحنی تنش کرنش و تصویر شکست نمونه 8A

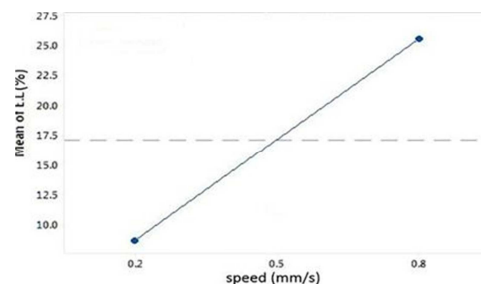
۴-۴- تحلیل متالورژیکی

ریزساختار فلز جوش نمونه منتخب 8A در شکل ۱۹ در بزرگنمایی های به ترتیب ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ برابر نشان داده شده است. ریزساختار فلز جوش از فاز فریت و مقدار کمی فاز آستنیت تشکیل شده است که به دلیل نرخ سرد شدن بالا در فرآیند جوشکاری لیزر، زمان کافی برای انتقال فاز فریت به آستنیت وجود نداشته در نتیجه فاز فریت در ریزساختار باقی مانده است و همچنین به دلیل وجود فاز فریت در ریزساختار، هیچ گونه عیبی که منجر به ایجاد تمرکز تنش در نمونه شود از جمله ترک یا حفرات گازی و غیره در ریزساختار نمونه 8A مشاهده نشده است.

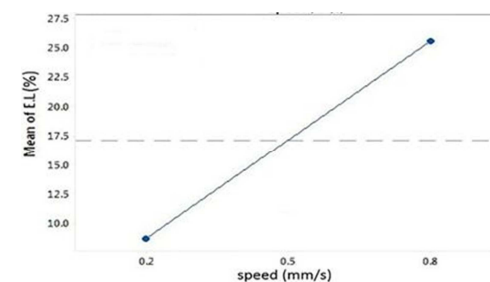


شکل ۱۵ - اثر برهم کنش پهنای پالس و توان بر استحکام نهایی کشش (الف) نمودار تعامل اثر

در شکل ۱۶ مشاهده می گردد که درصد ازدیاد طول با افزایش سرعت، افزایش می یابد. باید به این نکته دقت کرد که بازه ی سرعت جوشکاری ۰/۲-۰/۸ میلی متر بر ثانیه است و در این بازه با افزایش سرعت جوشکاری استحکام جوش افزایش یافته است زیرا در سرعت های جوشکاری بیشتر، به دلیل کاهش درصد هم پوشانی پرتو جوش، عمق نفوذ جوش کاهش می یابد و سبب کاهش استحکام جوش می گردد (۴، ۱۲).



شکل ۱۶ - اثر فاکتور اصلی سرعت بر ازدیاد طول

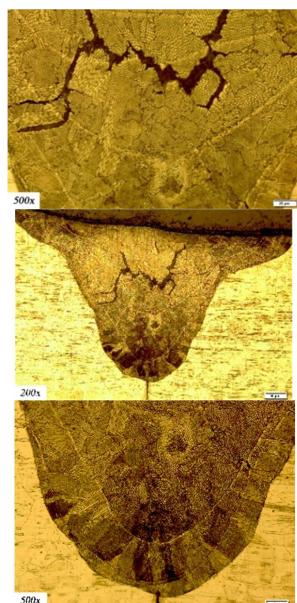


شکل ۱۷ - اثر فاکتور اصلی جنس بر ازدیاد طول

در شکل ۱۷ ملاحظه می گردد که فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ در مقایسه با فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴، ازدیاد طول بیشتری دارد که علت آن وجود عنصر مولیبدن در ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ می باشد که سبب افزایش استحکام فلز جوش می گردد (۱۲).

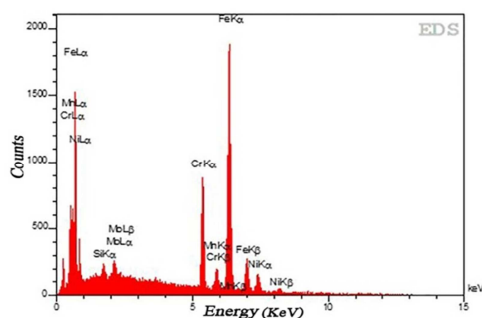
۴-۲- بهینه سازی فرآیند

با بهینه سازی فرآیند با معیار فاکتوریل کامل با ۵ بار تکرار نقطه مرکزی توسط نرم افزار، با تنظیم توان ۱/۸ کیلووات، پهنای پالس ۴/۴ میلی ثانیه، سرعت ۰/۸ میلی متر بر ثانیه و انتخاب فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶، می توان به خروجی های بهینه که در جدول ۵ نشان



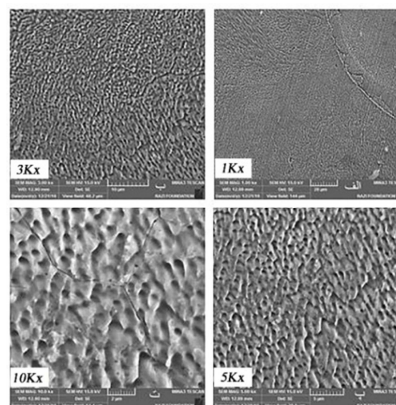
شکل ۲۱ - ترک در نمونه 3B فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ با بزرگنمایی مختلف

همچنین در آنالیز عنصری نمونه 3B در شکل ۲۲ و رابطه (۷) و (۸) مشاهده می‌گردد که نسبت کروم به نیکل ۱/۳۶ می‌باشد، که با توجه به نمودار سوتالا در منطقه‌ی احتمال وجود ترک در جوش قرار دارد که با نمودار سوتالا تطابق دارد. با توجه به بررسی ساختار متالوگرافی سطح مقطع جوش و همچنین بررسی آنالیز عنصری فلز جوش، وقوع ترک در نمونه 3B فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ روشن می‌گردد.



شکل ۲۲ - آنالیز عنصری نمونه 3B

با بررسی تمامی تصاویر نمونه‌های متالوگرافی برای دستیابی به جوش با کیفیت و مناسب، تعداد مناطق ذوب کاهش و فاصله‌ی بین مناطق ذوب افزایش می‌یابد که همان‌طور در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود در نمونه 8A تعداد منطقه ذوب ۲ و فاصله‌ی بین هر منطقه ذوب در مقایسه با نمونه‌ای که در آن ترک مشاهده شد، بیشتر می‌باشد همچنین در نمونه‌ی 3B تعداد منطقه‌ی ذوب ۶ می‌باشد.

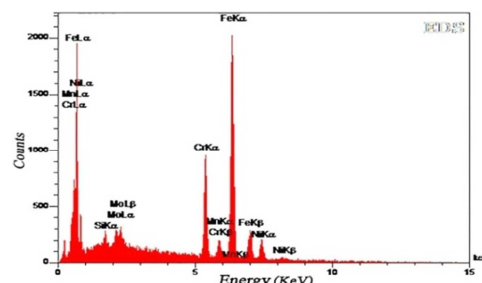


شکل ۱۹ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه 8A با بزرگنمایی مختلف

در آنالیز عنصری^۱ نمونه منتخب در شکل ۲۰ و رابطه (۷) و (۸) مشاهده می‌شود نسبت کروم به نیکل در منطقه جوش برابر ۲/۳۴ است که با توجه به نمودار سوتالا که احتمال وجود ترک در ریزساختار جوش را با در نظر گرفتن نسبت کروم به نیکل پیش‌بینی می‌کند، (شکل ۲۰) ملاحظه می‌گردد احتمال وجود ترک در نسبت کروم به نیکل بالای ۱/۵ کاهش می‌یابد در نتیجه نسبت کروم به نیکل به دست آمده از آنالیز عنصری تأییدی بر عدم وجود ترک در ریزساختار فلز جوش است.

$Cr_{eq} = Cr + 1.37Mo + 1.5Si + 2Nb + 3Ti$	(۷)
$Ni_{eq} = Ni + 0.31Mn + 22C + 14.2N + C$	(۸)

تعدادی ترک در نمونه 3B در فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در شکل ۲۱ با بزرگنمایی ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر نشان داده شده است. در شکل الف چندین ترک کوچک و بزرگ و در شکل ب بزرگ‌ترین ترک در ریزساختار جوش سوراخ کلیدی نشان داده شده است. یکی از دلایل ایجاد ترک وجود فاز آستنیت تبریدی در ریزساختار و عدم وجود فاز فریت است.



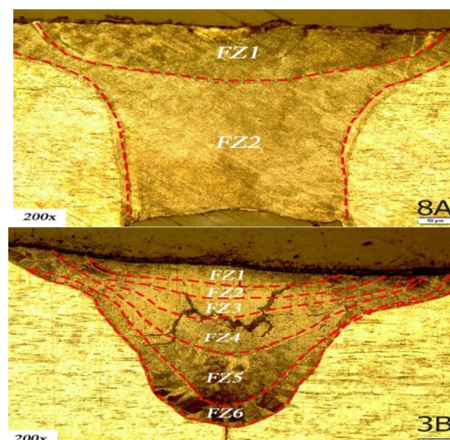
شکل ۲۰ - آنالیز عنصری نمونه 8A

^۱ EDS

۶. با مقایسه تصویر متالوگرافی دو نمونه بهینه و معیوب، مشاهده گردید که تعداد مناطق ذوب در نمونه بهینه ۲ و در نمونه معیوب ۶ می باشد و فاصله ی بین مناطق ذوب در نمونه بهینه در مقایسه با نمونه دارای ترک افزایش یافت.

۶- منابع

- [1] V. Muthupandi, P.B. Srinivasan, S. Seshadri, S. Sundaresan, Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds, *Materials Science and Engineering: A*, 358 9-16, 2003.
- [2] S.A. Mousavi, A. Sufizadeh, Metallurgical investigations of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels, *Materials & Design*, 30 3150-3157, 2009.
- [3] M.D.M. das Neves, A. Lotto, J.R. Berretta, W.d. Rossi, N.D.V. Júnior, Microstructure development in Nd: YAG laser welding of AISI 304 and Inconel 600, *Welding International*, 24 739-748, 2010.
- [4] S. Baghjari, S.A. Mousavi, Effects of pulsed Nd: YAG laser welding parameters and subsequent post-weld heat treatment on microstructure and hardness of AISI 420 stainless steel, *Materials & Design*, 43 1-9, 2013.
- [5] MMA Khan, L. Romoli, G. Dini, *Laser beam welding of dissimilar ferritic/martensitic stainless steels in a butt joint configuration*, *Optics & Laser Technology*, 49 pp 125-136, 2013.
- [6] J.M. Salman, K.M. Abed, Laser Welding for Dissimilar Metals Stainless Steel AISI 304H, to Low Carbon Steel DIN St33, by Nd: YAG Laser, DOI, 2014.
- [7] J.Wang, H.Wang, X.Wang, H.Cui, F. Lu. ,Statistical analysis of process parameters to eliminate hot cracking of fiber laser welded aluminum alloy, *Optics & Laser Technology*, 66, pp. 15-21, 2015.
- [8] A. Pascu, E.M. Stanciu, I. Voiculescu, M.H. Țîrean, I.C. Roată, J.L. Ocaña, Chemical and Mechanical Characterization of AISI 304 and AISI 1010 Laser Welding, *Materials and Manufacturing Processes*, 31 311-318, 2016.
- [9] M. Moradi, M. Ghoreishi, Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55 205-215, 2011.
- [10] C.Kumar, M. Das, C. Paul, B. Singh. , Experimental investigation and metallographic characterization of fiber laser beam welding of Ti-6Al-4V alloy using response surface method, *Optics and Lasers in Engineering*, 95, pp. 52-68, 2017.
- [11] R.H.Meyers, D.C. Montgomery, *Response surface methodology, Process and Product Optimisation Using Design Experiments*, second ed, Wiley, New York, NY, DOI, 2002.
- [12] M.Torkamany, M. Hamed, F. Malek, J. Sabbaghzadeh, The effect of process parameters on keyhole welding with a 400W Nd:YAG pulsed laser, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39 4563, 2006.



شکل ۲۵ - مناطق ذوب در نمونه های 8A و 3B

۵- نتیجه گیری

- چکیده ای از نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد.
۱. با افزایش متغیرهای فرآیند جوشکاری لیزر از قبیل توان، پهنای پالس و سرعت جوشکاری، عدد فریت به ترتیب ۵۲ و ۳۶ و ۳۴ درصد افزایش یافت.
 ۲. فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ به دلیل وجود عنصر مولیبدن در ریزساختار که محرک ایجاد فاز فریت است، میزان عدد فریت بیشتری در مقایسه با فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ مشاهده گردید. همچنین با توجه به مدل رگرسیون، ترکیب شیمیایی در مقایسه با دیگر پارامترهای ورودی فرآیند، بیشترین تأثیر را بر میزان عدد فریت دارد.
 ۳. با افزایش توان و پهنای پالس به دلیل افزایش هم پوشانی پالس ها و حرارت خروجی بر سطح ورق، ابعاد هندسه جوش از جمله پهنای و عمق جوش افزایش می یابد.
 ۴. با افزایش متغیرهای فریند جوشکاری لیزر از جمله توان استحکام جوش که شامل استحکام نهایی کشش و درصد ازدیاد طول است، به ترتیب ۴۰ و ۸۰ درصد و با افزایش پهنای پالس به ترتیب ۳۲ و ۴۸ درصد افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت جوشکاری، درصد ازدیاد طول ۶۴ درصد افزایش می یابد و همچنین فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ به دلیل وجود عنصر مولیبدن، استحکام جوش بهتری در مقایسه با فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ دارد.
 ۵. با بررسی اثر تعامل دوتایی بر استحکام جوش مشاهده گردید در سرعت جوشکاری ۰/۸ میلی متر بر ثانیه استحکام نهایی جوش و درصد ازدیاد طول به طور چشم گیری افزایش یافت و همچنین مشاهده می گردد که میزان تغییرات استحکام نهایی کشش با افزایش توان، در پهنای پالس ۳ میلی ثانیه بیشتر از پهنای پالس ۴/۴ میلی ثانیه می باشد.