



بررسی تأثیر پارامترهای برش کاری لیزر Nd:YAG ورق فولاد زنگ نزن ۳۱۶ بر روی کیفیت منطقه برش

محمد رضا وزیری سرشک^{۱*}، علی صولتی^۲، نصراله بنی مصطفی عرب^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
* تهران، صندوق پستی ۵۱۵-۱۴۳۹۵، m.vaziri@ut.ac.ir

چکیده

فولاد زنگ‌نزن به دلیل مقاومت به خوردگی و شکل‌پذیری مطلوب و استحکام مناسب در دماهای بالا در صنایع مختلفی کاربرد زیادی دارد. همچنین برش کاری لیزری یک روش غیرتماسی می‌باشد که به دلیل دقت بالای برش، پهنای برش کم، سرعت برش بالا، قابلیت برش قطعات پیچیده و برش موادی که برش مکانیکی آن‌ها سخت است، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای استفاده از این روش برش کاری باید پارامترهای مربوط به آن را با دقت انتخاب کرد. در این مقاله با بررسی پیشینه تحقیق، سه پارامتر مهم توان لیزر، سرعت برش کاری و موقعیت کانونی به‌عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند و اثر آن‌ها روی پهنای منطقه متأثر از حرارت بررسی شد. برای این منظور روش طراحی آزمایش L16 تاگوچی با چهار سطح تغییر در پارامترهای ورودی به کار گرفته شد. عملیات برش توسط لیزر آن-دی با توان ۴۰۰ وات و با گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ بر روی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ انجام شد. پهنای منطقه متأثر از حرارت و میکروسختی برای تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و نتایج توسط آنالیز واریانس تفسیر شده و پارامترهای بهینه مشخص گردید. برای صحت‌گذاری نتایج، با تنظیم پارامترها به مقدار بهینه بدست آمده سه آزمایش اضافی انجام گردید. علاوه بر این مدلی برای پیش‌بینی پهنای منطقه متأثر از حرارت بدست آمد که با مقایسه مدل بدست آمده با نتایج تجربی مشاهده شد این روش می‌تواند با دقت خوبی پهنای منطقه متأثر از حرارت را پیش‌بینی نماید.

کلید واژگان: بهینه‌سازی، برش کاری لیزری، فولاد زنگ‌نزن، روش تاگوچی، عرض ناحیه متأثر از حرارت

Optimization of laser cutting parameters on stainless steel to achieve minimum surface damage

Mohamad Reza Vaziri Sereshk^{1*}, Ali Solati¹, Nasrallah Bani Mostafa Arab²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14395-515 Tehran, Iran, m.vaziri@ut.ac.ir

ABSTRACT

Stainless steels have a wide range of applications in various industries due to its high corrosion resistance, desirable formability and high strength in elevated temperatures. Also, laser cutting is a non-contact method that is of interest due to the high precision, small kerf, high cutting speed and the ability to cut complicated shapes that are hard to cut by mechanical processes. In order to use this method, the process parameters shall be thoroughly selected. In this study, three main parameters: laser power, cutting speed and focal position were selected. Considering the literature review and the effects were investigated on the heat affected zone (HAZ) width. Taguchi orthogonal array L16 was employed with 4 levels of variation of input parameters. Cutting was performed using 400 watt Nd:YAG laser with argon shielding gas, on stainless steel 316. HAZ width and micro-hardness were measured for all samples and the results were analyzed by ANOVA method to find the optimal parameters. In order to verify the results, 3 extra experiments were conducted using optimal parameters. Moreover, a mathematical model was obtained to predict the HAZ width. Comparison of the results from the model and experimental data showed that the method can predict the HAZ width with insignificant error.

Keywords: HAZ Width, Laser Cutting, Optimization, Stainless Steel, Taguchi Method.

مزایای برش کاری لیزری در مقایسه با سایر روش‌های برش کاری، بستگی به خواص پرتو متمرکز در لیزر دارد. چگالی انرژی زیاد در برش کاری لیزری اجازه برش دقیق با کاهش گرمای انتقال یافته به قطعه کار شده که منجر به تشکیل یک منطقه متأثر از حرارت بسیار کوچک با تنش پسماند و اعوجاج کم می‌شود [۱]. نرخ تبرید زیاد احتمال بروز میکروساختارهای ریز را بیشتر می‌کند که این خود باعث افزایش خواص مکانیکی منطقه برش خواهد شد. از سوی دیگر نرخ تبرید زیاد می‌تواند باعث تشکیل فاز مارتنزیتی شده و

۱- مقدمه

روش‌های برش کاری غیرسنتی برای برش کاری هنگامی به کار می‌روند که روش‌های سنتی جواب‌گوی نیازهای مورد نظر نیست. برش کاری فولاد زنگ نزن ۳۱۶ توسط اکسی استیلن مشکل است زیرا این فولاد دمای ذوب بالا داشته و اکسیدهای تشکیل شده دارای ویسکوزیته بالا می‌باشند بنابراین برش لیزری روش مناسبی برای برش این ماده می‌باشد. برش کاری لیزری کاربردهای زیادی برای برش انواع مواد در صنایع مختلف می‌باشد. بیشتر

Please cite this article using:

M.R. Vaziri Sereshk, A. Solati, N. Bani Mostafa Arab, Optimization of laser cutting parameters on stainless steel to achieve minimum surface damage, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 426-430, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

داشتن یکی از پارامترها و تغییر دادن یکی از پارامترها در هر آزمایش انجام گرفت. مشاهدات چشمی برای تعیین کیفیت برش کاری شامل حداقل گپ برش، عدم پاشش مذاب و کیفیت سطح مطلوب ناحیه برش انجام گرفت. جدول ۱ مقادیر پارامترهای ورودی و سطوح طراحی آزمایش را نشان می‌دهد که منجر به بهترین نتایج می‌شود. روش طراحی آزمایش بر روی اطلاعات حاصل از آزمایش، توسط نرم‌افزار مینی‌تپ^{۱۲} انجام گرفت. مقادیر نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای هر سطح از پارامترها توسط آنالیز سیگنال به نویز بدست آمد و مشاهده گردید که مقدار سیگنال به نویز پایین‌تر، کیفیت برش بهتری را خواهد داشت. علاوه بر آن یک آنالیز واریانس آماری برای هر پاسخ بصورت مجزا انجام شد تا مشخص شود کدامیک از پارامترهای فرآیند تأثیر بیشتری روی پاسخ دارد در مرحله بعد می‌توان ترکیب بهینه متغیرهای فرآیند را بدست آورد. در نهایت آزمایش‌هایی برای بررسی صحت پارامترهای بهینه انجام گرفت.

۳- روند آزمایش

ماده مورد استفاده در این تحقیق ورق فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به ضخامت ۰/۶ میلی‌متر می‌باشد. ترکیب شیمیایی این ورق که توسط کوانتومتری بدست آمد در جدول ۲ آمده است. قبل از برش کاری نمونه‌ها توسط محلول استون بدقت تمیز شدند تا محل برش عاری از هرگونه چربی و آلودگی باشد. برش کاری با استفاده از لیزر ان-دی-یاگ^{۱۳} مدل IQL-10 با توان متوسط ۴۰۰ وات انجام گردید. در شکل ۱ شماتیکی از فرآیند برش لیزری و اجزای دستگاه دیده می‌شود.

نمونه‌ها با استفاده از گیره‌های آهنربایی در جای خود ثابت شدند. گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ و عمود بر قطعه‌کار در حین برش کاری به‌کار برده شد. لازم به‌ذکر است ترتیب آزمایش‌ها به‌صورت اتفاقی انجام شد تا از تجمع خطاهای احتمالی در پارامترهای ورودی خودداری شود. بعد از برش کاری، از تمامی نمونه‌ها مقطع عرضی تهیه شد و مانع گردید. نمونه‌های مانع شده با پولیش نمونه‌ها با کاغذ سنباده ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰، ۲۴۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ تهیه شد و سپس با استفاده از پولیش دیسکی با خمیر الماس پولیش گردیدند. نمونه‌ها در محلول HNO₃، HCL و آب مقطر به نسبت‌های مساوی به‌مدت ۱۰ ثانیه اچ^{۱۴} شدند. ناحیه متأثر از حرارت با اندازه دانه‌های متفاوت نسبت به فلز پایه در شکل ۲ دیده می‌شود. عرض ناحیه متأثر از حرارت توسط میکروسکوپ نوری در وسط نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. عرض منطقه متأثر از حرارت مطابق شکل ۳ برابر با (b+c)/2 در نظر گرفته شد.

جدول ۱ پارامترهای ورودی و سطوح طراحی آزمایش

پارامترها	واحد	سطوح			
		۱	۲	۳	۴
توان پالس	KW	۱/۲۲۸	۱/۴۲۶	۱/۶۲۵	۱/۸۲۳
سرعت برش کاری	mm/s	۱۳	۱۵	۱۷	۱۹
محل تمرکز پرتو	mm	-۱/۲	-۰/۶	۰	۰/۶

جدول ۲ ترکیب شیمیایی ورق مورد استفاده

عناصر	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
درصد	۰/۰۷	۱/۵	۰/۶۵	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۱۷/۳	۲/۲	۱۲/۸

باعث افت خواص مکانیکی ناحیه برش شود. برای دستیابی به کیفیت مطلوب برش کاری لیزری نیاز است تا پارامترهای برش کاری به دقت تعیین شوند [۲]. پارامترهای زیادی در برش کاری لیزری دخیل هستند که از آن جمله می‌توان توان لیزر، فشار گاز محافظ، قطر نازل، فاصله کانونی، فاصله کلگی تا قطعه کار را نام برد. پارامترهای پاسخ می‌تواند زبری سطح، پهنای برش، زاویه مخروطی ناحیه برش، نرخ برداشت ماده، اندازه ناحیه متأثر از حرارت^۱، هزینه برش باشد. روش طراحی آزمایش‌ها و روش‌های آماری امروزه کاربرد گسترده‌ای در بهینه‌سازی پارامترهای برش کاری دارند. مهمترین پارامترهایی که کیفیت منطقه برش را کنترل می‌کنند عبارتند از توان لیزر، سرعت برش کاری، فرکانس و محل تمرکز پرتو لیزر [۳]. روش تاگوچی^۲ یکی از روش‌های بهینه‌سازی است که می‌تواند برای بهینه‌سازی کیفیت منطقه برش کاری به‌کار رود. روش طراحی آزمایش‌ها^۳ و روش‌های آماری در بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندهای مختلف کاربرد زیادی دارد. تحقیقات زیادی برای یافتن پارامترهای بهینه انجام شده است. دویی^۴ و یاداوا^۵ [۴] از روش تاگوچی استفاده کردند تا پارامترهای فرآیند برش کاری لیزری ورق‌های آلومینیوم را بهینه‌سازی کنند. آن‌ها از یک نرم‌افزار^۶ برای طراحی قابل اطمینان پارامترها استفاده کردند و مشاهده کردند که زاویه مخروطی شکاف برش و نرخ برداشت ماده بهبود یافت. مطالعه‌ای که توسط لی^۷ و سای^۸ [۵] انجام گرفت راجع به بهینه‌سازی برش کاری لیزری صفحات مدار چاپی با استفاده از روش آنالیز گری^۹ با استفاده از تاگوچی بود. آن‌ها پارامترهای حاکم بر برش لیزری را از زبری سطح و عرض منطقه متأثر از حرارت را بدست آوردند. روش تاگوچی برای کاهش تعداد آزمایش‌ها بدون اثرگذاری بر کیفیت نتایج بکار گرفته شد. رانو^{۱۰} و یاداوا [۶] یک روش هیبرید برای بدست آوردن عرض و زاویه مخروطی کرف در برش کاری لیزری سوپرآلیاژ سوپرینی^{۱۱} ۷۱۸، معرفی کردند. این روش ترکیبی شامل روش تاگوچی و آنالیز وابستگی گری می‌باشد. برای محاسبه وزن ویژگی‌های کیفی از روش آنتروپی استفاده شد.

پارامترهای بهینه بدست آمده از روش تاگوچی نسبت به تغییر شرایط محیطی و دیگر فاکتورهای نویز حساس نمی‌باشد. اساسا طراحی آزمایش‌ها کلاسیک پیچیده بوده و استفاده از آن آسان نیست مخصوصا وقتی تعداد پارامترهای فرآیند افزایش می‌یابد نیاز به انجام تعداد زیادی آزمایش می‌باشد. برای حل این مشکل روش تاگوچی با طراحی خاصی از آرایه‌های عمودی قابل استفاده است تا با تعداد کمی آزمایش کل فضای پارامترها قابل مطالعه باشد [۷]. در این تحقیق پیش‌بینی تأثیر ترکیبات متفاوت پارامترهای فرآیند روی استحکام کششی با هدف بهینه‌سازی آن بحث و بررسی شده است.

۲- طراحی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها توسط یک ماتریس L16 با آرایه‌های عمودی که از ۳ ستون و ۱۶ سطر تشکیل شده است انجام شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق عبارت بودند از: توان لیزر، سرعت برش کاری و موقعیت کانونی. تعداد زیادی برش کاری آزمایشی برای بدست آوردن محدوده هر پارامتر لیزر برای ایجاد یک برش با کیفیت قابل قبول انجام شد. این آزمایش‌ها از طریق ثابت نگه

1. Heat Affected Zone (HAZ)
2. Taguchi
3. Design of Experiments (DOE)
4. Dubey
5. Yadava
6. computer aided robust parameter design (CARPD)
7. Li
8. Tsai
9. Grey
10. Rao
11. SUPERNI 718

12. Minitab 15
13. Nd:YAG
14. Etch

شد تا پاسخها کمینه شوند.
نسبت سیگنال به نویز برای هدف "کوچکتر بهتر" برای تمام پاسخها مطابق رابطه (۱) محاسبه شد [۹]

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (1)$$

که y عرض منطقه متأثر از حرارت، n تعداد آزمایشها، که در این مطالعه = ۱۶ می باشد.

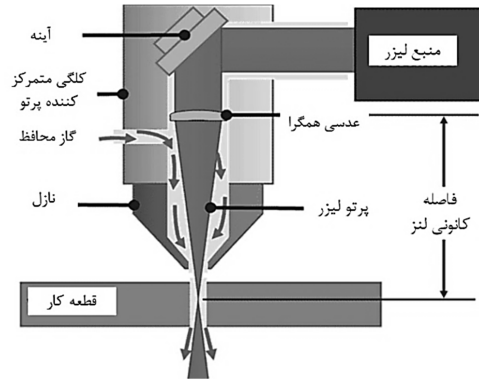
پاسخها برای نسبت سیگنال به نویز در جدول ۴ دیده می شود. رتبه اول در جدول ۴ مربوط به سرعت برش، رتبه دوم مربوط به محل تمرکز اشعه بوده و توان لیزر تأثیر کمتری روی عرض متأثر از حرارت دارد. نمودار شکل ۴ مربوط تغییرات سیگنال به نویز را برای عرض ناحیه متأثر از حرارت نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت برش، سیگنال به نویز افزایش یافته است که با توجه به انتخاب معیار "کوچکتر بهتر" نشان از کاهش عرض متأثر از حرارت دارد. همچنین با افزایش توان لیزر عرض متأثر از حرارت افزایش می یابد. با انتقال محل تمرکز اشعه به موقعیت های بالاتر، عرض متأثر از حرارت افزایش می یابد.

جدول ۳ نتایج آزمایش برای پهنای منطقه متأثر از حرارت

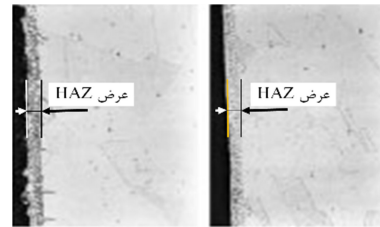
رتبیب	شماره آزمایش	F(mm)	S(mm/s)	P(W)	پهنای ناحیه HAZ(mm)
۴	۱	۱	۱	۱	۰/۲۰۷
۱۰	۲	۲	۲	۱	۰/۴۲۱
۱۳	۳	۳	۳	۱	۰/۵۲۵
۵	۴	۴	۴	۱	۰/۲۶۸
۷	۵	۲	۱	۲	۰/۲۵۵
۱۶	۶	۱	۲	۲	۰/۱۸۲
۲	۷	۴	۳	۲	۰/۲۰۶
۱۴	۸	۳	۴	۲	۰/۷۴۶
۱	۹	۳	۱	۳	۰/۱۹۵
۶	۱۰	۴	۲	۳	۰/۲۲۷
۱۱	۱۱	۱	۳	۳	۰/۱۴۶
۱۵	۱۲	۲	۴	۳	۰/۲۸۳
۸	۱۳	۴	۱	۴	۰/۱۲۸
۳	۱۴	۳	۲	۴	۰/۱۹۳
۹	۱۵	۲	۳	۴	۰/۴۴۶
۱۲	۱۶	۱	۴	۴	۰/۱۰۴

جدول ۴ پاسخها برای نسبت سیگنال به نویز

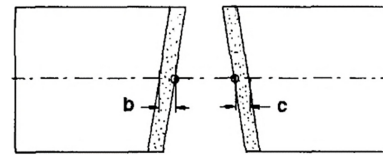
سطح	توان (kW)	سرعت (mm/s)	موقعیت کانونی (mm)
۱	۱۳/۹۷۳	۹/۶۵۴	۱۴/۶۴۸
۲	۱۳/۵۱۰	۱۰/۱۴۱	۱۳/۹۴۶
۳	۱۲/۷۲۵	۱۳/۴۵۹	۱۱/۴۰۱
۴	۹/۴۵۲	۱۶/۴۹۹	۹/۶۶۵
اختلاف	۴/۴۵۱	۶/۹۷۳	۴/۹۸۲
رتبه	۳	۱	۲



شکل ۱ شماتیک دستگاه لیزر



شکل ۲ عرض منطقه متأثر از حرارت روی نمونه های برش کاری شده توسط لیزر



شکل ۳ عرض منطقه متأثر از حرارت

۴- نتایج

پهنای منطقه متأثر از حرارت انجام مراحل متالوگرافی برای تمام نمونه ها بدست آمد و بعنوان پاسخ مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج آزمایشها در جدول ۳ دیده می شود. نرم افزار مینی تب برای آنالیز داده ها استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل به دست آمده برای پیش بینی پاسخ از نظر آماری معتبر^۱ می باشد بنابراین در آنالیزهای بعدی نیز می تواند به کار گرفته شود.

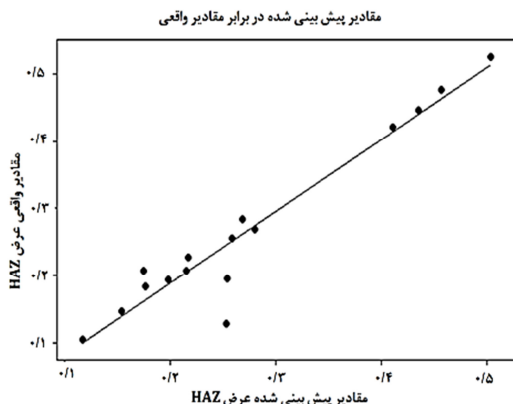
۵- آزمایشها با آرایه های متعامد و نسبت سیگنال به نویز

در این مطالعه یک آرایه چهار در سه با ۱۶ سطر و چهار ستون استفاده شد. این آرایه می تواند چهار سطح از پارامترها را در بر بگیرد. ۱۶ آزمایش متفاوت برای مطالعه تأثیر پارامترها انجام گرفت. برای تعیین اثر هر پارامتر روی پاسخ، نسبت سیگنال به نویز برای هر فاکتور کنترلی می بایست محاسبه شود. سیگنالها توسط تأثیر آنها روی میانگین پاسخها و نویزها توسط تأثیرشان روی انحراف از میانگین پاسخها مشخص می شوند. نسبت سیگنال به نویز مناسب باید براساس دانش قبلی، تجربه و درک فرآیند انتخاب شود. وقتی هدف ثابت باشد و فاکتور نویز موجود نبوده یا ناچیز باشد (طراحی ثابت^۲)، می توان نسبت سیگنال به نویز را براساس هدف طراحی انتخاب نمود. در این مطالعه نسبت سیگنال به نویز براساس معیار "کوچکتر بهتر"^۳ انتخاب

1. significant
2. Static design
3. smaller is better

۷- اعتبارسنجی مدل

شکل ۵ نشان دهنده پاسخ حقیقی در برابر پاسخ پیش‌بینی شده برای استحکام کششی می‌باشد. با توجه به شکل می‌توان دید از آن جایی که نقاط داده‌ای به خط مایل نزدیک می‌باشند، مدل می‌تواند پاسخ را در محدوده فاکتورهای مورد بررسی با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید. علاوه بر این چند آزمایش اضافه با استفاده از مدل بدست آمده با پارامترهای متفاوت انجام شد که در جدول ۵ همراه درصد خطا مشاهده می‌شود.



شکل ۵ نمودار مقادیر واقعی در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده برای عرض منطقه متاثر از حرارت

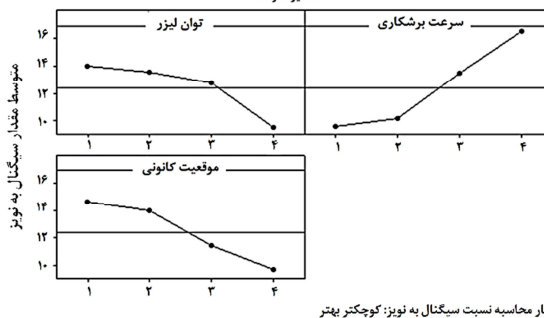
جدول ۵ مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با نتایج بدست آمده از مدل

شماره	موقعیت کانونی (mm)	سرعت (mm/s)	توان (KW)	درصد خطا (%)
۱	-۱	۲/۸۵	۱/۳۶	۱۵
۲	-۰/۵	۲/۹۵	۱/۵۷	۳
۳	۰/۵	۳/۱۵	۱/۷۲	۱

۸- تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی پاسخ

۱- سرعت برش: با توجه به نتایج مشخص است که سرعت برش کاری تأثیر زیادی روی عرض ناحیه متاثر از حرارت در برش کاری لیزری دارد. بیشترین مقدار عرض متاثر از حرارت در سرعت ۱۳ mm/s و کمترین مقدار آن در ۱۹mm/s مشاهده گردید و مشخص شد که با افزایش سرعت برش کاری با یا بدون تغییر محل تمرکز اشعه عرض متاثر از حرارت کاهش می‌یابد. این امر به دلیل آن است که با افزایش سرعت برش کاری، حرارت ورودی به قطعه کار فرصت کمتری برای پخش شدن از طریق هدایت حرارتی خواهد داشت و منطقه‌ای از قطعه که تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد کوچکتر خواهد شد.

نمودار اثرات اصلی برای نسبت‌های سیگنال به نویز مقادیر متوسط



شکل ۴ نمودار سیگنال به نویز برای عرض منطقه متاثر از حرارت

۶- آنالیز واریانس

هدف آنالیز واریانس بدست آوردن پارامتری است که تأثیر بسزایی روی خواص کیفی دارد. با جدا کردن پراکندگی کلی نسبت‌های سیگنال به نویز که با اندازه‌گیری مجموع مربعات انحراف از میانگین کلی نسبت سیگنال به نویز بدست آمده، به سهم هر پارامتر برشکاری و خطا می‌توان آن را محاسبه نمود [۸]. نتایج آنالیز واریانس برای مدل در جدول ۶ مشاهده می‌شود. در جدول آنالیز واریانس، مقدار F برای تست اعتبار یک فاکتور به کار می‌رود. اگر مقادیر انحراف نزدیک به هم باشند، مقدار F کمتر می‌شود و احتمال این‌که آن فاکتور تأثیر قابل توجهی روی پاسخ داشته باشد کمتر می‌شود. اگر مقدار F برای پارامتری بالا باشد به معنی آن است که تأثیر آن پارامتر روی پاسخ زیاد است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار F مربوط به سرعت برش و برابر ۱۴/۵۲ بدست آمد. مقدار F برای موقعیت کانونی برابر ۷/۴۴ بدست آمد که نشان دهنده آن است که موقعیت کانونی تأثیر به مراتب کمتری بر روی استحکام کششی دارد.

همچنین در این جدول‌ها مقادیر R-Sq و R-Sq(adj) دیده می‌شود. این مقادیر نزدیک به صد بودند که نشان دهنده آن است که مدل می‌تواند پاسخ را با دقت خوبی پیش‌بینی کند. مقدار F محدوده مقادیر پیش‌بینی شده را در نقاط طراحی با میانگین خطای پیش‌بینی مقایسه می‌کند. در این مطالعه مقادیر F برای تمامی جملات مربوط به مدل‌های پهنای متاثر از حرارت همگی بزرگتر از ۴ می‌باشند که نشان می‌دهد مدل بخوبی پاسخ‌ها را پیش‌بینی می‌کند. تمام معیارهای دقت نشان از آن دارد که یک مدل مناسب بدست آمده است. مدل ریاضی نهایی برای پیش‌بینی پهنای برش لیزری فولاد زنگ نزن براساس پارامترهای فرآیند که توسط نرم‌افزار مینی‌تب بدست آمد بصورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$\text{HAZ width} = 0.16025 + 0.055850 P - 0.072300 S + 0.05890 F \quad (2)$$

جدول ۶ نتایج آنالیز واریانس برای مدل بدست آمده از مینی تب

P	عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات ترتیبی	مجموع مربعات ترتیبی تنظیم شده	متوسط مربعات تنظیم شده	F
0.033	توان لیزر	۱	۰/۰۶۲۳۸	۰/۰۶۲۳۸	۰/۰۶۲۳۸	۵/۸۴
0.004	سرعت برش	۱	۰/۱۰۴۵۴	۰/۱۰۴۵۴	۰/۱۰۴۵۴	۱۴/۵
0.019	موقعیت کانونی	۱	۰/۰۶۹۳۸	۰/۰۶۹۳۸	۰/۰۶۹۳۸	۷/۴۴
	خطا	۱۲	۰/۰۱۷۴۱	۰/۰۱۷۴۱	۰/۰۱۴۵	
	مجموع	۱۵	۰/۲۵۳۷۳			

S = ۰/۰۲۸۱۰۰ R-Sq = ۹۳/۱۳ R-Sq(adj) = ۹۱/۴۲

- ۲- موقعیت تمرکز اشعه: با نزدیک کردن موقعیت تمرکز اشعه به سطح قطعه، اشعه دچار واگرایی شده و حرارت به سطح بیشتری از قطعه می‌رسد و پهنای بیشتری را ذوب می‌کند و باعث افزایش پهنای ناحیه متأثر از حرارت خواهد شد.
- ۳- توان لیزر: با افزایش توان لیزر پهنای ناحیه متأثر از حرارت افزایش می‌یابد زیرا حرارت ورودی افزایش یافته و منطقه بیشتری تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد.

۹- نتیجه‌گیری

مطالعه روی پارامترهای مختلف فرآیند برش کاری لیزری نشان داد می‌توان در محدوده بخصوصی از پارامترها برش‌های مطلوبی بدست آورد. همچنین نتیجه گرفته شد که مهمترین عاملی که در تعیین عرض ناحیه متأثر از حرارت دخالت دارد سرعت برش کاری باشد و با افزایش سرعت، عرض متأثر از حرارت کاهش می‌یابد. محل تمرکز اشعه در محدوده بررسی شده تأثیر قابل توجهی بر عرض متأثر از حرارت ندارد. مدل بدست آمده قادر است در محدوده پارامترهای فرآیند عرض متأثر از حرارت را پیش‌بینی نماید. متأثر از حرارت بهینه توسط مدل بدست آمده از نرم‌افزار مینی‌تب، معادل 0.1mm بود که در سرعت 19mm/s ، توان پالس $1/228\text{ KW}$ و محل تمرکز اشعه 0.6mm زیر سطح ورق، بدست آمد.

۱۰- مراجع

- [1] A. Pandey, Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet, *Optics & Laser Technology*, Vol. 50, No. 3, PP. 328-335, 2012
- [2] L.v. Shanjin, W. Yang, An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, No. 10, PP. 1067-1077, 2006.
- [3] U. Çaydaş, A. Hasçalık, Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics, *Optics & Laser Technology*, Vol. 40, No. 7. PP. 987-994 , 2008.
- [4] A.K. Dubey, V. Yadava, Robust parameter design and multi-objective optimization of laser beam cutting for aluminium alloy sheet, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, PP. 268-277, 2008.
- [5] C.H. Li, M.J Tsai, Multi-objective optimization of laser cutting for flash memory modules with special shapes using grey relational analysis, *Optics & Laser Technology*, Vol. 41, PP. 634-642, 2009.
- [6] R. Rao, V. Yadava, Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement, *Optics & Laser Technology*, Vol. 41, NO. 8, PP. *Optics & Laser Technology*, Vol. 41, PP. 634-642, 2009.
- [7] *Minitab release 15, user guide, data analysis and quality tools*, Minitab Inc, 1997
- [8] *Annual Book of ASTM Standards. Technical Report* , Vol. 02, No. 02, ASTM, 1992.
- [9] L. Pan, C. Wang, S. Wei, and H. Sher, Optimizing multiple quality characteristics via Taguchi method-based Grey analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 107-116, 2007.