



بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی نانوذرات آلومینا با روش سطح پاسخ

محمد مهدی انتظاریان^۱، محمد کریمی ایوانکی^۲، داود افشاری^{۳*}

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: dafshari@znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

بهینه‌سازی سطح پاسخ

بار برشی لبه‌ای

امروزه استفاده از آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن آن، به سرعت در حال افزایش است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) یک روش نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر رشد زیادی در جوشکاری موادی همچون آلیاژهای آلومینیوم، منیزیوم و فولاد داشته است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای فرایند بر بار برشی لبه‌ای ورقه‌ای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی خواهد شد. سه پارامتر مختلف فرایند که شامل سرعت دورانی ابزار، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار برای بررسی انتخاب شدند. پس از انجام فرایند جوشکاری، نمونه‌ها تحت تست کشش قرار گرفته و از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ برای پیش‌بینی بار کششی برشی نمونه‌ها نسبت به پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شد. همچنین در این مطالعه درصد سهم پارامترهای فرایند بر استحکام کششی نمونه‌ها با استفاده از تحلیل واریانس پیش‌بینی شد. نتایج تجربی نشان داد که در بین سه پارامتر فرایند، سرعت دورانی ابزار، بیشترین تأثیر را بر استحکام برشی لبه اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم ایفا می‌کند. مطابق نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصالات جوشی، در سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه، نرخ نفوذ ابزار ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و زمان توقف ابزار ۱۲ ثانیه به‌دست آمدند.

Optimization of friction stir spot welding parameters of AA6061/Al2O3 using response surface methodology

Mohammad Mahdi Entezarian¹, Mohammad Karimi Ivanaki², Davood Afshari^{3*}

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* Corresponding Author's Email: dafshari@znu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 2 August 2024

Accepted: 10 September 2024

Keywords:

Friction Stir Spot Welding

AA6061

Response Surface Methodology

Lap Shear Load

Abstract

The use of aluminum alloys is rapidly increasing due to their high strength-to-weight ratio. Friction Stir Spot Welding (FSSW) is a relatively new method that has seen significant growth in recent years for welding materials such as aluminum alloys, magnesium, and steel. This study will investigate the effect of process parameters on the lap shear load of AA6061 sheets with the addition of Al2O3 nanoparticles using friction stir spot welding. Three different process parameters were selected for examination: tool rotational speed, tool plunge depth, and tool dwell time. After the welding process, the samples were subjected to a tensile test, and the obtained results were used to predict the shear tensile load of the samples about the parameters of the friction stir spot welding process using the response surface optimization method. The percentage contribution of the process parameters was predicted using analysis of variance (ANOVA). Experimental results indicated that among the three process parameters, tool rotational speed had the most significant effect on the lap shear load of AA6061/Al2O3. According to the optimization results, the optimal process parameters for friction stir spot welding joints were achieved at a tool rotational speed of 1500 rpm, a tool plunge rate of 20 mm/min, and a tool dwell time of 12 Sec.

Please cite this article using:

Entezarian MM, Karimi Ivanaki M, Afshari D. Optimization of friction stir spot welding parameters of AA6061/Al2O3 using response surface methodology. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Oct 22;11(8):43-50. doi: 10.22034/ijme.2024.470738.1992 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از آلومینیوم و آلیاژهای آن در صنعت و خودروسازی برای دستیابی به کاهش مصرف سوخت در حال افزایش است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل خواص قابل توجهی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی کم و رسانایی حرارتی خوب، مورد توجه هستند [۱]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که توسط مرکز جوشکاری انگلستان اختراع شده، جایگزینی برای فرایند جوشکاری نقطه‌ای معمولی به دلیل سازگاری با محیط زیست و دستاوردهای رفتاری مکانیکی و متالورژیکی بهتر را منجر گردیده است [۲]. در فرایند جوشکاری اصطکاکی نقطه‌ای ابزار با سرعت دورانی بالا در موضع اتصال وارد شده و عمل اختلاط مواد با توقف چند لحظه‌ای آن صورت گرفته و ابزار از محل جوش خارج می‌گردد [۳، ۴].

پژوهشگران مختلفی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را بر روی آلیاژ مشابه و غیرمشابه اعمال کرده‌اند و اثرات پارامترهای جوشکاری را بر خواص مکانیکی و رفتارهای متالورژیکی گزارش کردند. افشاری و همکاران [۵] در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای غیرهمجنس آلومینیوم ۶۰۶۱ به مس دریافتند که در میان پارامترهای مختلف جوش، سرعت دورانی و زمان توقف ابزار و همچنین نحوه قرارگیری ورق‌ها نسبت به یکدیگر سه پارامتر مهم فرایند در بهبود استحکام اتصالات جوشی است. تحقیقات بسیاری در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزودن ذرات سرامیکی در جوش به منظور افزایش خواص اتصالات انجام شده است. روش بهینه سازی سطح پاسخ، روشی مؤثر و مناسب برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برای ارتقای ویژگی‌های کیفی یک محصول است [۶، ۷]. ملاکو و همکاران [۸] در پژوهشی به بهینه‌سازی اتصالات آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بر حداکثر حرارت تولید شده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای پرداختند. پارامترهای فرایند، سرعت دورانی، زمان توقف و هندسه ابزار بود. حداکثر دمای مشاهده شده در سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور در دقیقه، زمان توقف ابزار ۱۵ ثانیه و هندسه ابزار مقعر با پین مخروطی به دست آمد.

پریتی و همکاران [۹] در مطالعه‌ای به بررسی جوش‌پذیری کامپوزیت آلومینیوم هبیریدی توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار به عنوان پارامتر ورودی و سختی نمونه جوش به عنوان پارامتر خروجی انتخاب شد. روش تاگوچی برای طراحی آزمایش و بررسی تأثیر پارامتر ورودی بر پارامتر خروجی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که سرعت دورانی ابزار سهم عمده‌ای (۵۷٫۳ درصد) بر سختی دارد. جمالیان و همکاران [۱۰] به بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی چند پاسه با کمک نانو ذرات تقویت‌کننده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ با پنج هندسه مختلف پین پرداختند. پارامترهای ورودی، هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس جوشکاری بود. نتایج نشان داد هندسه پین ابزار مربعی یک اتصال با همگن‌ترین توزیع مواد ایجاد می‌کند و بالاترین استحکام کششی نهایی را به مقدار ۳۰۳ مگاپاسکال به دست آمده است. رحیمان و همکاران [۱۱] در پژوهشی به جوشکاری آلیاژ آلومینیوم غیرهمجنس ۶۰۶۱ به ۷۰۷۵ توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند توسط تحلیل رابطه خاکستری تاگوچی پرداختند. بالاترین استحکام کششی و استحکام تسلیم در سرعت دورانی ۵۵۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۵ میلی‌متر بر دقیقه حاصل شد. بروس و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم غیرهمجنس ۶۰۶۱ و ۵۰۵۲ پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت دورانی، سرعت پیشروی استحکام کششی نهایی را تا یک نقطه خاص افزایش می‌دهد و پس از آن این مقدار شروع به کاهش می‌کند.

در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای ورودی و مؤثر در بار برشی لبه‌ای نمونه‌های جوشکاری FSSW آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداخته شده است. استفاده از نانوذره تقویت‌کننده آلومینا در مقطع جوش و به طبع آن افزایش مقاومت کششی و تجزیه و تحلیل اثرات پارامترهای فرایند بر بار برشی لبه‌ای به روش بهینه‌سازی سطح پاسخ است.

۲- روش تحقیق

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به ضخامت ورق ۲ میلی‌متر به همراه نانوذرات اکسید آلومینیوم با اندازه ۴۵ نانومتر به عنوان فلز پایه و تقویت کننده در این تحقیق استفاده شده است. نانوذرات با تعبیه در سوراخی به قطر ۲ میلی‌متر در ورق بالایی قبل از جوشکاری در ناحیه جوش اضافه می‌شوند. خواص مکانیکی فلز پایه انتخاب شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ [۳]

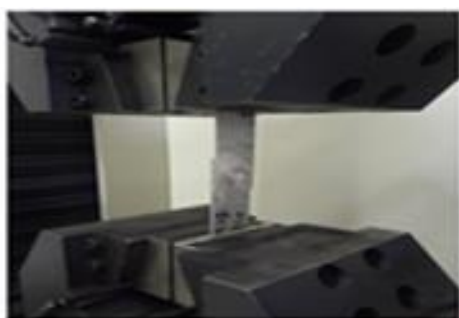
| انعطاف پذیری (%) | تنش تسلیم (MPa) | سختی (Hv) | استحکام کششی (MPa) |
|------------------|-----------------|-----------|--------------------|
| 10 | 201 | 103.5 | 222 |

ابزار جوشکاری از فولاد ابزار H13 ابتدا ماشین کاری شده و سپس عملیات حرارتی گردید که سختی آن تا حدود ۵۵ تا ۶۰ HRC رسیده است (در شکل ۱). نمونه‌های جوش به ابعاد ۳۵ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر و با سطح هم‌پوشانی ۳۵ میلی‌متر در ۳۵ میلی‌متر برش داده شدند. فرایند جوشکاری با استفاده از یک دستگاه فرز انجام شد.

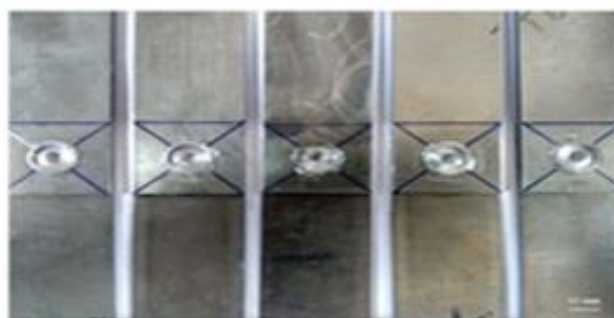


شکل ۱ ابزار پین مارپیچ و شانه طرح‌دار جوشکاری مورد استفاده

از دستگاه تست کشش سنتام برای انجام تست‌های کشش برشی استفاده شد. نمونه‌های تولید شده توسط فرایند جوشکاری و موقعیت نمونه در طول تست کشش برشی در شکل ۲ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲ الف) نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شده ب) نمونه در حال انجام تست کشش

سرعت دورانی ابزار، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار به‌عنوان پارامترهای ورودی فرایند برای بررسی در نظر گرفته می‌شوند. سطوح پارامترهای فرایند انتخاب شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مقادیر حدی پارامترهای موجود در جوشکاری جهت بهینه‌سازی

| نام پارامتر | سطح بالای عامل (+۱) | سطح پایین عامل (-۱) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|
| سرعت دورانی (rpm) | 1800 | 1200 |
| نرخ عمق نفوذ (mm/min) | 25 | 15 |
| زمان توقف ابزار (s) | 15 | 5 |

جهت ایجاد مدل ریاضی، یک معادله رگرسیون مرتبه دوم که تابعی از سرعت دورانی ابزار (R)، نرخ نفوذ ابزار (P) و زمان توقف ابزار (D) را توصیف می‌کند با استفاده از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار مینی‌تب توسعه داده شد. مدل نهایی برای پیش‌بینی استحکام کششی (T_s) در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$T_s(MPa) = -0.02 + 0.01932 \times P + 63.45 \times R + 1.931 \times D - 0.000006P^2 - 194.5 \times R^2 - 0.487 \times D^2 + 0.00673 \times P \times R - 0.000235 \times R \times D + 0.95 \times P \times D \quad (1)$$

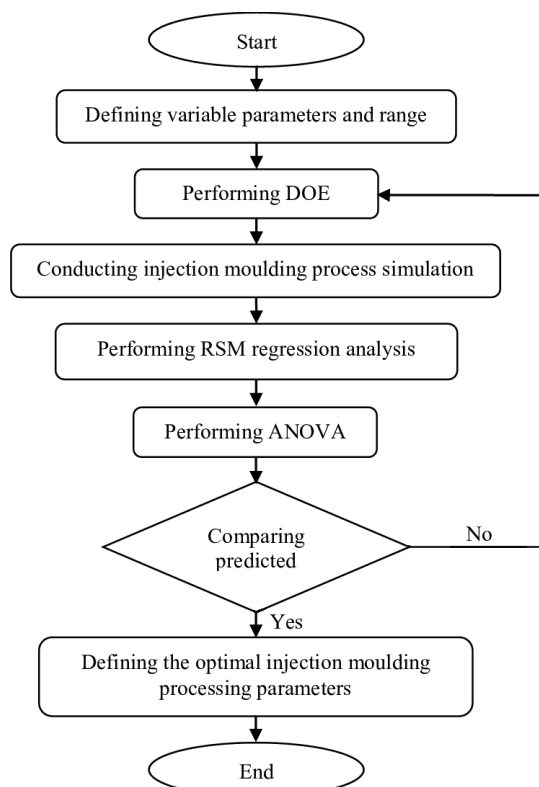
تخمین مقدار بهینه پارامترهای سرعت دورانی، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار برای به حداکثر رساندن استحکام جوش با استفاده از روش سطح پاسخ به دست آمد. منظور از بهینه‌سازی، یافتن سطوحی از فاکتورهای مؤثر برای آزمایش است که پاسخ آزمایش حداکثر و یا حداقل (بسته به هدف آزمایش) شود. در این روش اثر برهم‌کنش فاکتورها نیز لحاظ می‌شود. تعداد آزمایش‌ها برای طراحی مرکب مرکزی از رابطه ۲ به دست می‌آید. که در آن Run تعداد آزمایش، f تعداد فاکتور و r تعداد تکرار است.

$$Run = 2^f + (2f + 1) + r \quad (2)$$

طراحی آزمایش در پنج سطح (۱، ۰، -۱، α^- ، α^+) می‌باشد که همان سطوح بالا و پایین، صفر نقطه مرکزی و برای تعداد دو فاکتور برابر ۱/۴۱، برای تعداد سه فاکتور برابر ۱/۶۸، برای تعداد ۴ فاکتور برابر ۲ و برای دیگر فاکتورها از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\alpha = \pm \sqrt[4]{2^f} \quad (3)$$

در شکل ۳ فلوجارت روش سطح پاسخ نمایش داده شده است. مدل ایجاد شده برای پیش‌بینی بار کششی برشی نمونه‌ها نسبت به پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳ فلوجارت روش بهینه‌سازی سطح پاسخ (RSM)

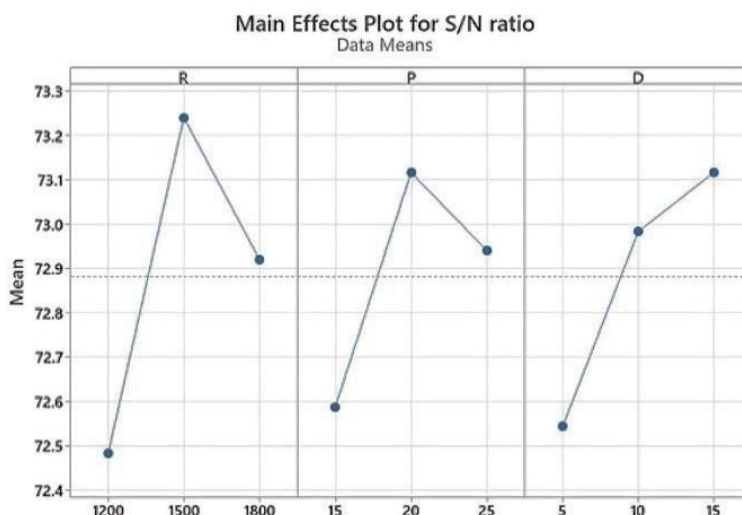
۳- نتایج و بحث

جدول ۳ و شکل ۴ به ترتیب ماتریس طراحی آزمایش و نمودار اثر میانگین را برای نسبت‌های S/N برای بار کششی برشی به دست آمده از نرم‌افزار مینی‌تب برای شناسایی مجموعه بهینه شده پارامترهای فرایند نشان می‌دهد. شکل ۴ رابطه بین میانگین نسبت S/N و پارامترهای فرایند که سرعت دورانی ابزار، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار را نشان می‌دهد. سطوح بهینه پارامترهای جوشکاری برای به حداکثر رساندن بار کششی برشی لبه‌ای اتصال، سرعت دورانی ابزار در ۱۵۰۰ دور در دقیقه، نرخ نفوذ ابزار در ۲۰ میلی‌متر در

دقیقه و زمان توقف ابزار در ۱۵ ثانیه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت دورانی ابزار و افزایش نرخ نفوذ ابزار، استحکام اتصال جوشی ابتدا به میزان خاصی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر، استحکام اتصالات جوشی کاهش می‌یابد. با افزایش زمان توقف ابزار از ۵ ثانیه تا ۱۵ ثانیه، استحکام اتصالات جوشی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. تأثیر پارامترهای فرایند به‌صورت تکی بر مقاومت برشی لبه اتصالات جوش با روش آنالیز واریانس (ANOVA)، تجزیه و تحلیل شد.

جدول ۳ ماتریس طراحی آزمایش و نتایج ویژگی‌های اتصال

| شماره | سرعت دورانی (rpm) | نرخ نفوذ (mm/min) | زمان توقف ابزار (s) | بار برشی لبه‌ای (N) | نسبت S/N |
|-------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------|
| 1 | 1200 | 15 | 5 | 3800 | 71.60 |
| 2 | 1200 | 20 | 10 | 4360 | 72.79 |
| 3 | 1200 | 25 | 15 | 4500 | 73.06 |
| 4 | 1500 | 15 | 10 | 4640 | 73.33 |
| 5 | 1500 | 20 | 15 | 4710 | 73.46 |
| 6 | 1500 | 25 | 5 | 4429 | 72.93 |
| 7 | 1800 | 15 | 15 | 4380 | 72.83 |
| 8 | 1800 | 20 | 5 | 4521 | 73.10 |
| 9 | 1800 | 25 | 10 | 4380 | 72.83 |



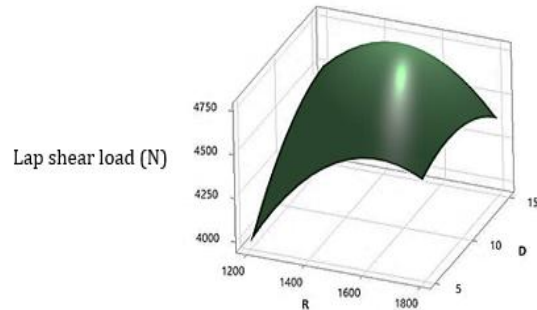
شکل ۴ تأثیر پارامترهای فرایند (سرعت دورانی ابزار (R)، نرخ نفوذ ابزار (P) و زمان توقف ابزار (D)) بر نسبت S/N

جدول ۴ نتیجه ANOVA را با سطح اطمینان ۹۵ درصد از مقادیر نسبت S/N محاسبه شده برای تمام مجموعه پارامترهای فرایند نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است بحرانی‌ترین عامل مؤثر بر بار کششی برشی سرعت دورانی ابزار است که ۳۸/۸ درصد از تغییرات کل را شامل می‌شود. در مرحله بعد، زمان توقف ابزار و نرخ نفوذ ابزار به ترتیب ۲۳/۵۹ درصد و ۱۸/۷۶ درصد سهم دارند.

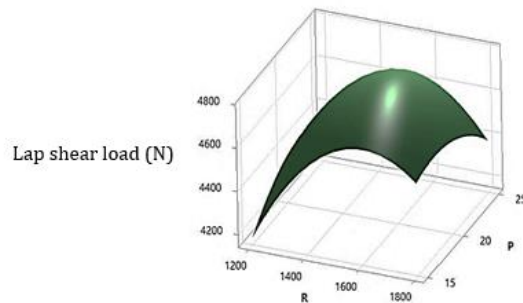
جدول ۴ آنالیز واریانس پارامترهای فرایند

| درجه آزادی | مجموع مربعات تنظیم شده | میانگین مربعات تنظیم شده | F-Value | P-Value | سهم (%) |
|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|
| سرعت دورانی | 420953 | 104767 | 2.06 | 0.327 | 38.80 |
| نرخ نفوذ | 101454 | 50727 | | 0.5 | 18.76 |
| زمان توقف | 127400 | 63700 | 1.25 | 0.444 | 23.59 |
| خطا | 101594 | 50767 | | | |
| کل | 539982 | | | | |

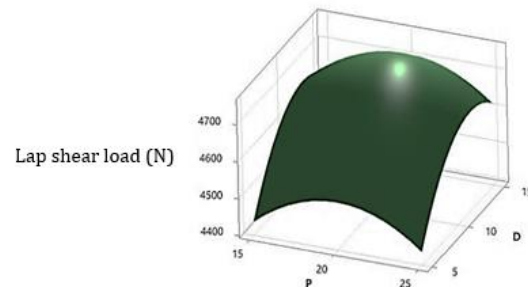
نمودارهای سطح خروجی بهینه‌سازی به‌عنوان تابعی از پارامترهای مختلف جوشکاری به ترتیب در شکل ۵ (الف)، تأثیر همزمان سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای) (ب)، تأثیر همزمان سرعت دورانی و نرخ نفوذ ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای) (ج)، تأثیر همزمان نرخ نفوذ و زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای) نشان داده شده است.



(الف)



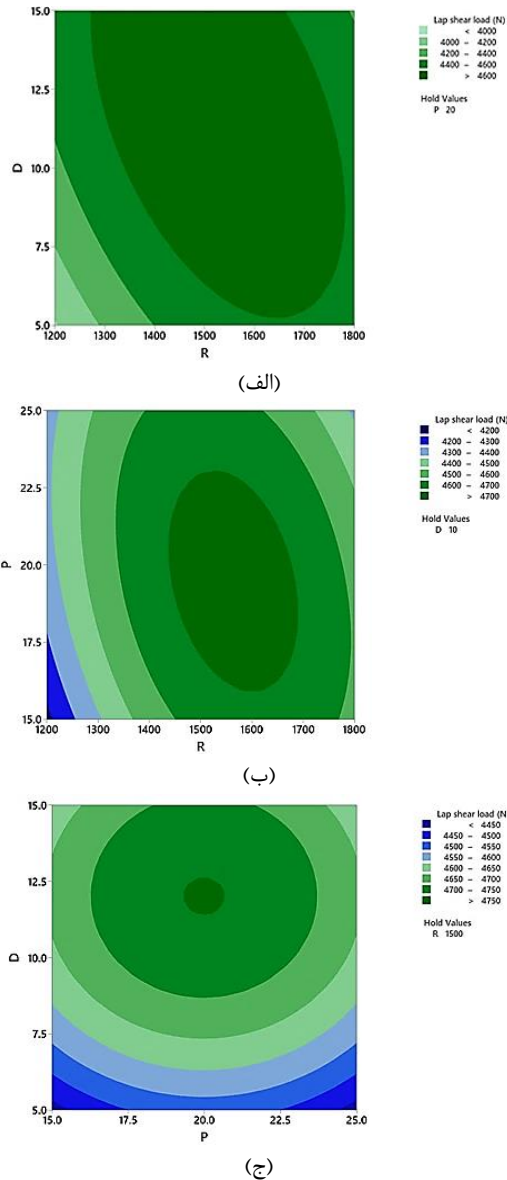
(ب)



(ج)

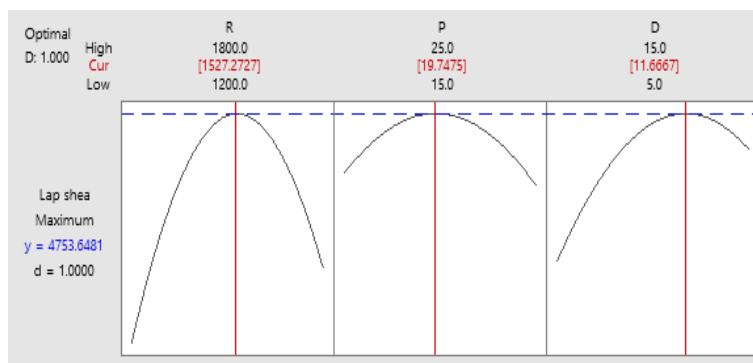
شکل ۵ (الف) نمودار تأثیر همزمان سرعت دورانی و زمان توقف ابزار، (ب) نمودار تأثیر همزمان دورانی و نرخ نفوذ ابزار، (ج) نمودار تأثیر همزمان نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار

نمودارهای کانتور خروجی بهینه‌سازی به‌عنوان تابعی از پارامترهای مختلف جوشکاری به ترتیب در شکل ۶ (الف)، کانتور استحکام تابعی از سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای) (ب)، کانتور استحکام تابعی از سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای) (ج)، کانتور استحکام تابعی از سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای) نشان داده شده است. برای به‌دست آوردن اتصالات جوشی با حداکثر بار کششی برشی، استفاده از زمان توقف ابزار بالا و سرعت دورانی متوسط برای نرخ نفوذ مختلف ابزار به‌شدت توصیه می‌شود. از سرعت دورانی پایین جلوگیری شود زیرا باعث ایجاد اتصالات شکننده می‌شود. استفاده از زمان توقف ابزار بالا، استحکام اتصالات جوش داده شده برای طیف وسیعی از سرعت دورانی و نرخ نفوذ ابزار را افزایش می‌دهد [۱۳]. به‌طور کلی، برای به‌دست آوردن اتصالات جوشی مناسب، استفاده از سرعت دورانی متوسط، نرخ نفوذ ابزار متوسط و زمان توقف بالا توصیه می‌شود.



شکل ۶ الف) کانتور استحکام تابعی از سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای، ب) کانتور استحکام تابعی از سرعت دورانی و نرخ نفوذ ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای، ج) کانتور استحکام تابعی از زمان توقف ابزار بر استحکام برشی لبه‌ای

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، پارامترهای بهینه فرایند برای به حداکثر رساندن ویژگی‌های اتصال به مقادیرهای سرعت دورانی ابزار ۱۵۲۷ دور در دقیقه و نرخ نفوذ ابزار ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و زمان توقف ابزار ۱۲ ثانیه می‌باشد. حداکثر بار کششی برشی لبه‌ای در منطقه جوش برای ترکیب پارامترهای بهینه فرایند مقدار ۴۷۵۳ نیوتن حاصل شد.



شکل ۷ بهینه‌سازی بار برشی لبه‌ای توسط روش سطح پاسخ و نقاط بهینه سرعت دورانی ابزار، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رویکرد روش بهینه‌سازی سطح پاسخ برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند AA6061/Al₂O₃ جوش داده شده با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برای دستیابی به بار کششی برشی لبه‌ای بالا با موفقیت انجام شد. تأثیر سرعت دورانی ابزار، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار بر روی بار کششی برشی لبه‌ای اتصال ثابت شد. نتایج تجربی با استفاده از آنالیز واریانس مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر بهینه سرعت دورانی ابزار، نرخ نفوذ ابزار و زمان توقف ابزار به ترتیب ۱۵۲۷ دور در دقیقه، ۱۲ میلی‌متر در دقیقه و ۲۰ ثانیه به دست آمد. سرعت دورانی ابزار یک پارامتر فرایند مهم با ۳۸/۸ درصد سهم و پس از آن زمان توقف ابزار ۲۳/۶ درصد و نرخ نفوذ ابزار ۱۸/۸ درصد است. با افزایش سرعت دورانی و زمان توقف ابزار، اصطکاک شانه با قطعه کار طولانی شده و تولید حرارت در ناحیه اتصال بیشتر می‌شود و با افزایش دما ریزساختار ناحیه اتصال ریزدانه شده و در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد. افزایش دما ناشی از افزایش پارامترها تا یک حد بهینه مطلوب می‌باشد و بیشتر منجر به تغییر خواص متالورژیکی و تضعیف خواص مکانیکی مقطع جوش می‌گردد. در سه پارامتر بهینه ذکر شده حداکثر بار برشی لبه‌ای ۴۷۵۳ نیوتن در ناحیه اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم با پارامتر بهینه شده به دست آمده که بالاترین مقدار بار برشی لبه‌ای است که اتصال قطعه می‌تواند تحمل کند.

References

- [1] Suresh S, Venkatesan K, Rajesh S. Optimization of process parameters for friction stir spot welding of AA6061/Al₂O₃ by Taguchi method. In AIP conference proceedings 2019 Jul 23 (Vol. 2128, No. 1). AIP Publishing. doi: 10.1063/1.5117961
- [2] Karimi Ivanaki M, Afshari D, Seidi H. Investigation the effect of bobbin tool geometry in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2019 Sep 23;6(4):1-6. [In Persian]
- [3] Stojanovic B, Bukvic M, Epler I. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. Applied Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018;3(2):52-62. doi: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2
- [4] Suresh S, Venkatesan K, Natarajan E. Influence of SiC Nanoparticle Reinforcement on FSS Welded 6061-T6 Aluminum Alloy. Journal of nanomaterials. 2018;2018(1):7031867. doi: 10.1155/2018/7031867
- [5] Afshari D, Modaresinia H, Karimi Ivanaki M, Entezarian MM. Experimental investigation on mechanical properties affected by dissimilar friction stir spot welding of aluminum 6061-T6 alloy to copper. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Aug 23;10(6):53-64. doi: 10.22034/IJME.2023.413891.1824 [In Persian]
- [6] Lee SH, Lee DM, Lee KS. Process optimisation and microstructural evolution of friction stir spot-welded Al6061 joints. Materials Science and Technology. 2017 Apr 13;33(6):719-30. doi: 10.1080/02670836.2016.1230661
- [7] Jambhale S, Kumar S, Kumar S. Effect of process parameters & tool geometries on properties of friction stir spot welds: a review. Universal Journal of Engineering Science. 2015 Feb;3(1):6-11. doi: 10.13189/ujes.2015.030102
- [8] Melaku LE, Tura AD, Mamo HB, Santhosh AJ, Ashok N. Optimization and thermal analysis of friction stir welding on AA6061 aluminum alloys. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;65:3348-56. doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.463
- [9] Preethi V, Das AD. Optimization of friction stir welding parameters for better hardness in weld nugget of hybrid aluminium composite. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;37:723-7. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.729
- [10] Jamalain HM, Eskandar MT, Chamanara A, Karimzadeh R, Yousefian R. An artificial neural network model for multi-pass tool pin varying FSW of AA5086-H34 plates reinforced with Al₂O₃ nanoparticles and optimization for tool design insight. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021 Nov 1;35:69-79. doi: 10.1016/j.cirpj.2021.05.007
- [11] Rahiman MK, Santhoshkumar S, Kumar PM. Experimental analysis on friction stir welded AA 7075/AA 6061 using Taguchi grey relational analysis. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;45:3290-5. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.519
- [12] Bruce AR, Kumar PP, Arul K, Kumar PM, Kumar SL. Experimental characteristics and optimization of friction stir welded AA5052-AA6061 using RSM technique. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;59:1379-87. doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.099
- [13] Ivanaki M K, Entezarian MM, Afshari D, Shirdast A. Experimental and finite element thermomechanical study of different regions of friction stir spot welding of aluminum 6061-T6 to copper. 20th National and 9th International Conference on Manufacturing Engineering, 2023. [In Persian]