

مدل سازی و بهینه‌سازی عمق نفوذ جوشکاری اکتیوتیگ با استفاده از روش رگرسیون و الگوریتم تبرید

عماد پروانه اول^۱، فرهاد کلاهان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، e.parvanehaval@mail.um.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، kolahan@um.ac.ir

چکیده

آزمون‌های تجربی برای ایجاد روابط بین پارامترهای ورودی و داده‌های خروجی فرآیند جوشکاری اکتیو تیگ انجام شده، مدل پیشنهادی دارای سه پارامتر ورودی است که عبارت‌اند از: جریان جوشکاری (I)، سرعت تورچ جوشکاری (S) و فاصله نوک تنگستن تا قطعه کار (G)، ولتاژ (V) در نظر گرفته شده است. در روش پیشنهادی، مدل رگرسیون بر روی آزمایش‌ها تجربی که بر اساس ماتریس طرح عاملی کامل انجام شده است، سپس، معادلات مختلف رگرسیونی مقایسه شده و بر اساس نتایج آماری مناسب‌ترین آن‌ها به عنوان مدل‌سازی آماری برگزیده می‌شود در مرحله بعدی، برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرآیند، مدل انتخاب شده با استفاده از الگوریتم تبرید بهینه شده است. این پژوهش بر روی فولاد AISI316L انجام شده است که فولاد پرکاربردی در صنایع پتروشیمی، خطوط لوله‌های نفت و گاز می‌باشد.

آزمایش و تجهیزات مورد استفاده

به منظور شناخت دامنه‌ی پارامترهای تنظیمی و مؤثر بر فرآیند، از پیشنهادات مراجع و همچنین آزمایشات متعددی برای تعیین پارامترهای تنظیمی صورت پذیرفت [۱-۳]؛ که پارامترهای جریان جوشکاری (I)، سرعت (S) و گپ (G)، ولتاژ (V) می‌باشد. زاویه مشعل نسبت به راستای قائم 95 درجه و حدود دبی گاز آرگون 5 تا 1 لیتر بر دقیق در این پژوهش در نظر گرفته شده است، [۲، 3]. جدول ۱ بر اساس یافته‌های آزمون اولیه، پارامترهای ورودی فرآیند و سطح بندی آن‌ها، مشاهده می‌شود.

جدول ۱: پارامترهای ورودی و بازه‌های آن‌ها

پارامتر (یکا)	ولتاژ جوش کاری (v)	گپ جوش کاری (mm)	سرعت جوش کاری (m/min)	شدت جریان (A)
نماد	V	G	S	I
بازه	-	0.75-1.5	1-3.33	80-280

در روش عاملی کامل تمام ترکیب‌های احتمالی بین پارامترها در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب مناسب سطوح پارامترهای فرآیند بر کیفیت محصولات در فرآیندهای مختلف تأثیر مثبت می‌گذارد. در این مطالعه مسئله مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری اکتیو تیگ برای فولاد ضدزنگ AISI316L است، از طرح عاملی کامل برای ماتریس طراحی آزمایشات استفاده شده و مدل‌سازی با استفاده از شیوه رگرسیون و بهینه‌سازی آن بر اساس الگوریتم تبرید می‌باشد. این آزمایش‌ها بر روی قطعات فولاد AISI316L انجام شده است. طرح عاملی کامل برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز انتخاب شده است. سپس توابع رگرسیون (خطی، درجه دوم و لگاریتمی) بر روی داده‌های تجربی انجام شده‌اند. در مرحله بعد نتایج آزمون‌های آماری و تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که مدل درجه دوم بهترین مدل است. سپس از روش الگوریتم تبرید برای بهینه‌سازی فرآیند استفاده شده است. بر اساس نتایج، مدل پیشنهادی در مدل‌سازی بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری اکتیوتیگ کاملاً کارآمد است.

واژه‌های کلیدی

جوشکاری اکتیو تیگ، مدل رگرسیون، نانو، طراحی آزمایشات

مقدمه

فرآیند جوشکاری اکتیو تیگ یک راهکار برای بهبود عمق نفوذ کم جوشکاری تیگ می‌باشد. [1-3] جوشکاری اکتیوتیگ برای اولین بار توسط موسسه برق پاتون در سال ۱۹۶۰ ارائه شده است [۴]. این فرآیند در مقایسه با جوشکاری معمولی تیگ، می‌تواند عمق نفوذ را برای فولادهای ضدزنگ افزایش دهد [5] این فرآیند را می‌توان فرآیند جوشکاری تیگ دانست که در آن یک لایه فلاکس قبل از شروع فرآیند جوشکاری، روی سطح جوش اعمال می‌شود. تحقیقات گسترده‌ای رو جوشکاری اکتیو تیگ انجام شده، اما مطالعه‌ای روی مدل‌سازی با طرح عاملی کامل^۴ و بهینه‌سازی با الگوریتم تبرید^۵ برای عمق نفوذ جوش انجام نشده در این مقاله مدل‌های رگرسیون مبتنی بر

¹ Active tig(atig)

² paton

³ flux

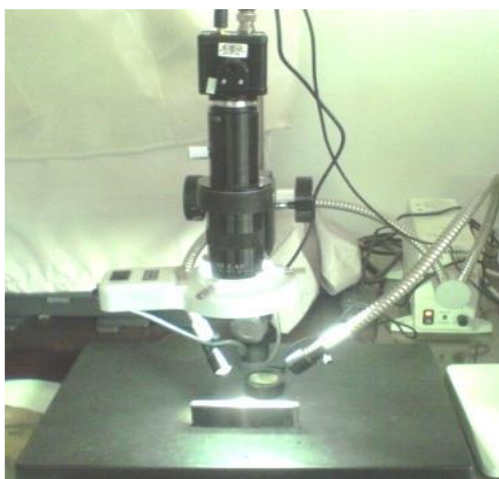
⁴ Full Factorial

⁵ Simulated Annealing algorithm (SA)



شکل ۳: دستگاه الکترو پولیش

پس از عمل پولیش و اچ، از میکروسکوپ نوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود برای تصویربرداری استفاده شده است برای اندازه‌گیری عمق نفوذ جوش از نرم‌افزار MIP استفاده شد. در جدول ۲ پارامترهای تنظیمی و ۱۲۰ نمونه که عمق نفوذ جوش اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴: میکروسکوپ نوری مورد استفاده

جدول ۲: سطوح پارامترهای تنظیمی و نتایج آزمایش

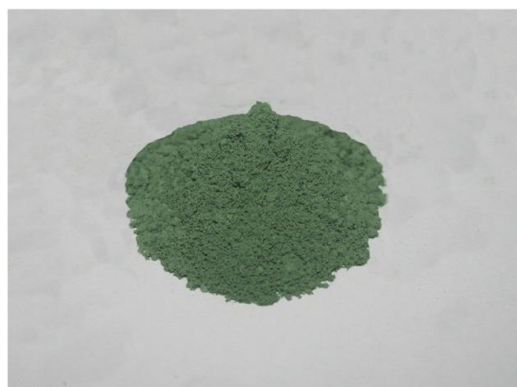
No.	G	S	I	V	DOP
1	1.5	1	80	11.90	2.37
2	1.5	1	100	12.00	6.33
3	1.5	1	120	12.70	9.14
4	1.5	1	140	13.50	2.41
.
.
.
.
.
117	0.75	3.33	200	15.60	1.420
118	0.75	3.33	220	16.70	2.329
119	0.75	3.33	240	17.00	1.815
120	0.75	3.33	280	19.20	1.981

همانطور که گفته شد، فولاد استفاده‌شده در این تحقیق AISI316L می‌باشد، دستگاه جوش تیگ مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است [3].



شکل ۱: دستگاه جوش تیگ استفاده‌شده

در این مطالعه، از گاز محافظ آرگون (با خلوص ۹۹.۷٪) و ورق‌های فولاد AISI316L با ابعاد 50×100×12 mm برای تست و ترکیب سه نانو پودر عبارت‌اند از: سیلیس (20-30nm) به‌عنوان فلاکس در نظر گرفته شده است در شکل ۲ یک نمونه نانو پودر مورد استفاده مشاهده می‌شود.



شکل ۲: نانو پودر مورد استفاده

برای اندازه‌گیری عمق نفوذ جوش ابتدا نمونه‌های برش داده شده و سپس با دستگاه موجود در آزمایشگاه متالوگرافی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی الکتروپولیش^۶ و الکترواچ^۷ شدند شکل ۳.

⁶ Electropolish

⁷ Electroetch

مدل	R ²	R ² (adjust)	R ² (predict)
خطی	92.25%	92.03%	91.43%
لگاریتمی	97 %	97%	97%
درجه دو	98.5%	98%	98%

یکی از معیارهای انتخاب مدل مناسب، ضریب همبستگی است (R²: R²adj) که برای همه مدل‌ها محاسبه شده است [۳]. مدل درجه دوم دارای ضرایب همبستگی به ترتیب ۹۸.۵٪ و ۹۸٪ است که نشان‌دهنده عالی بودن برازش این مدل برای داده‌های تجربی است. معیار آماری دیگر F-value است که اگر از مقدار بحرانی $F(0.05, 11, 120) = 1.98$ به دست آمده از جدول بیشتر باشد، به این معنی است که مدل خوبی می‌باشد. نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دو در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: تحلیل واریانس مدل مرتبه دوم اصلاح شده برای عمق نفوذ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	۱۱	۳۱۲,۹۰۲	۲۸,۴	۴۵۲,۸	۰,۰۰
I	۱	۰,۲۶۵	۰,۲۶	۴,۲۲	۰,۰۴
S	۱	۱,۲۴۷	۱,۲۵	۱۹,۸۶	۰,۰۰
G	۱	۰,۶۸۲	۰,۷	۱۰,۸۶	۰,۰۰۱
V	۱	۰,۸۲۰	۰,۸۲	۱۳,۰۵	۰,۰۰
I×I	۱	۰,۴۰۲	۰,۴۰	۶,۴۰	۰,۰۱۳
V×V	۱	۰,۷۱۹	۰,۷۲	۱۱,۴۴	۰,۰۰۱
S×S	۱	۲,۵۷۴	۲,۶	۴۰,۹	۰,۰۰
I×V	۱	۰,۵۳۷	۰,۵۳	۸,۵۴	۰,۰۰۴
I×S	۱	۱۳,۷۱۳	۱۳,۷	۲۱۸,۳	۰,۰۰
I×G	۱	۰,۴۳۵	۰,۴۳	۶,۹۲	۰,۰۱
V×G	۱	۰,۵۶۱	۰,۵۶	۸,۹۳	۰,۰۰۴
Error	۹۶	6.030	۰,۰۶	-	-
Total	۱۰۷	318.932	-	-	-
R-sq		R-sq(adj)		R-sq(pred)	
	98.5%	98%		98%	

نمودارهای باقیمانده در شکل ۵ به نمایش درآمده است. هیستوگرام توزیع باقیمانده‌ها و نمودار احتمال توزیع نرمال، نشان‌دهنده نزدیکی توزیع باقیمانده‌ها به توزیع نرمال است. بررسی نمودار باقیمانده‌ها مقادیر خروجی پاسخ، بیانگر این موضوع است که هیچ رابطه قابل تشخیص بین افزایش مقادیر خروجی و مقادیر باقیمانده‌ها قابل شناسایی نیست. نمودار باقیمانده ترتیب اجرا، نشان‌دهنده تصادفی بودن تغییرات باقیمانده‌ها در طول اجرای آزمایش‌ها است [5].

رگرسیون^۸ ابزاری قدرتمند برای تقریب ریاضی به منظور تعیین تابعی تقریبی بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند است. برای انجام روش مدل‌سازی رگرسیون و روش تجزیه و تحلیل آماری، مراحل زیر را باید در نظر گرفت [۴].

ابتدا پارامترهای ورودی و داده‌های خروجی شناسایی می‌شوند. سپس بازه هر پارامتر ورودی را بر اساس آزمایش‌های اولیه و مراجع تعیین می‌شوند و بعد از آن بر اساس پارامترهای ورودی و سطح آن‌ها ماتریس آزمایشات مناسب (که در این پژوهش طرح عاملی کامل) انتخاب شده است، بعد از تعیین ماتریس آزمایش، آزمایشات انجام شده. سپس با مقایسه آماری مدل‌های ریاضی مدل اصلاح را انتخاب می‌کنیم [5]. این روش آماری کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علمی از جمله مهندسی، فیزیک، اقتصاد و سایر علوم دارد. در این مطالعه، از تحلیل رگرسیون برای تعیین رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند استفاده می‌شود. در مدل‌سازی انجام شده در این پژوهش، مدل‌های درجه یک، درجه دو و نمایی برای عمق نفوذ با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ایجاد شده است. در نهایت برای مدل اصلاح با خطای $\alpha = 0.05$ با استفاده از تحلیل واریانس بررسی شده است. کلیه محاسبات توسط نرم‌افزار MINITAB 16 انجام شده از میان سه مدل جدول ۳، برای عمق نفوذ جوشکاری با توجه به نتایج تحلیل‌های آماری جدول ۴، مناسب‌ترین گزینه مدل مرتبه دوم تعدیل شده می‌باشد.

جدول ۳: مدل‌ها

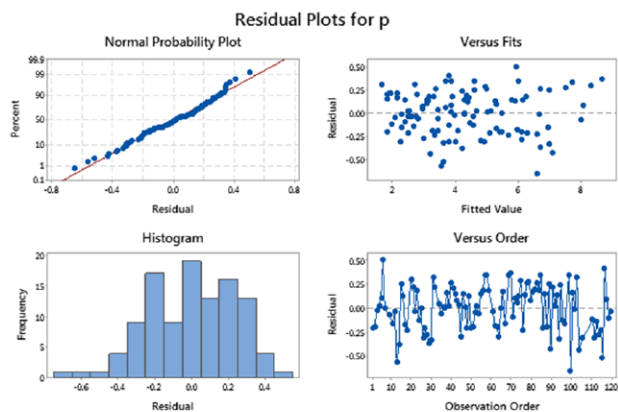
پارامتر خروجی	مدل	معادله مدل
عمق نفوذ جوش	خطی	$3.716 + 0.03367 \times I - 0.9347 \times S - 0.2180 \times V$
	لگاریتمی	$-2.9338 \times I^{1.2360} \times S^{-0.4143} \times V^{-0.628}$
	درجه دو	$-10.69 - 0.0850 \times I - 0.976 \times S - 6.09 \times G + 3.63 \times V - 0.000355 \times I_2 - 0.2779 \times V_2 + 0.2970 \times S + 0.01981 \times I \times V - 0.007872 \times I \times S - 0.0275 \times I \times G + 0.744 \times V \times G$

جدول ۴: تحلیل آماری مدل‌ها

⁸ Regression

جدول ۶: نتایج بهینه‌سازی عمق نفوذ جوش

پارامتر	I	S	G	پیش‌بینی	آزمایش	خطا %
				عمق نفوذ جوش	عمق نفوذ جوش	
عمق نفوذ جوش	۸۰	۲,۶	۱,۳	۲,۱	۲,۲۶	۷,۶
جوش	۲۸۰	۱	۱,۴	۱۰,۹۱	۱۱,۹۵	۹.۵



شکل ۵: نمودار هیستوگرام، احتمال نرمال بودن و باقیمانده‌ها

نتایج

انتخاب مناسب سطح متغیرهای فرآیند بر کیفیت جوشکاری اکتیو تیگ تأثیر مثبت می‌گذارد. در این مطالعه، استفاده از فلاکس‌ها برای مشکل عمق نفوذ کم فرآیند جوشکاری تیگ بررسی شده است که نتایج آماری نشان از تأثیر مثبت این فلاکس‌ها بر عمق نفوذ جوش را دارد. مدل‌سازی و بهینه‌سازی جوشکاری اکتیو تیگ بر روی قطعات فولاد ضدزنگ AISI316L آستینیتی انجام شده است. ابتدا داده‌های آزمایشی بر اساس روش طرح عاملی کامل انجام شده و با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر MIP عمق نفوذ ۱۲۰ قطعه جوشکاری شده اندازه‌گیری گردید. سپس از طریق روش رگرسیون برای مدل‌سازی و گرفتن تابعی بین پارامترهای ورودی (سرعت جوشکاری، گپ جوشکاری، ولتاژ، شدت جریان) و پارامتر خروجی عمق نفوذ جوش انجام شد. سپس با تجزیه تحلیل واریانس مدل اصلاح بین سه مدل لگاریتمی، خطی و درجه‌دو انتخاب شد. در مرحله مدل اصلاح با الگوریتم تبرید بهینه‌سازی صورت گرفت، نتایج بهینه‌سازی با آزمون‌های آزمایشی تطبیق داده شده است. بر اساس نتایج، روش پیشنهادی می‌تواند به‌طور دقیق (با خطای میانگین کمتر از ۰.۸٪) فرآیند جوشکاری اکتیو تیگ را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کند.

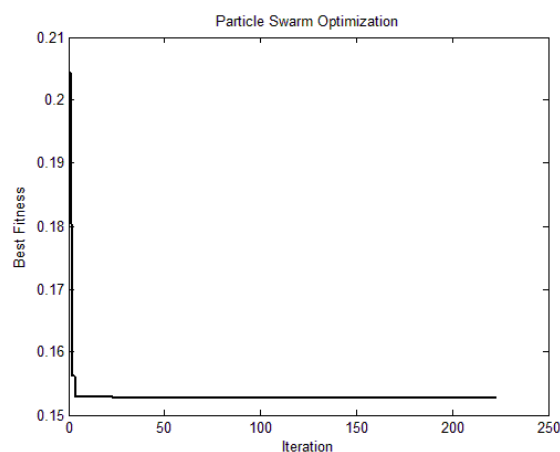
فهرست علائم

- I شدت جریان
- G فاصله نوک تنگستن تا قطعه کار
- V ولتاژ
- S سرعت تورچ جوشکاری

بهینه‌سازی با الگوریتم تبرید

بیشتر الگوریتم‌های ابتکاری بر اساس پدیده‌های طبیعی پایه‌گذاری شده است. فرمول به‌کاررفته در الگوریتم تبرید بر اساس فرآیند سرد شدن ذوب فلزات است. در جوشکاری اکتیو، برای عمق نفوذ جوش مدل درجه‌دو که مدل اصلاح می‌باشد را برای بهینه‌سازی انتخاب شده.

نمودار گام حرکت الگوریتم برای رسیدن به جواب را در شکل ۶ همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است که به دلیل وزن دهی در برنامه‌نویسی الگوریتم، حالت بهینه پارامترها در دو تست می‌باشد.



شکل ۶: نمودار همگرایی الگوریتم تبرید

convection". [J]. *Mater Sci Eng A*, 495(23), pp. 296–303.

- [4] Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., and Kushnirenko, N. A., 1965. "Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process". [J]. *Avtom Svarka*, 23(9), pp. 1–4.
- [5] Azadi Moghaddam, M., and Kolahan, F., 2016. "Application of orthogonal array technique and particle swarm optimization approach in surface roughness modification when face milling AISI1045 steel parts". *J Ind Eng Int*, 12(4), pp. 199–209.

مراجع و منابع

- [1] Huang, H.Y., Shyu, S.W., Tseng, K.H., and Chou, C.P., 2005. "Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel". [J]. *Sci Technol Weld Join*, 10(5), pp. 566–573.
- [2] Shyu, S.W., Huang, H.Y., Tseng, K.H., and Chou, C.P., 2008. "Study of the performance of stainless steel A-TIG welds". [J]. *Mater Eng Perform*, 17(2), pp. 197–201.
- [3] Fujii, H., Sato, T., LU, S.P., and Nogi, K., 2008. "Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni