

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ HÀN HỒ QUANG TỰ ĐỘNG ĐẾN CƠ TÍNH VÀ TỔ CHỨC MỐI HÀN GIÁP MỐI THÉP SUS316L

STUDYING THE EFFECTS OF TECHNICAL PARAMETERS ON AUTOMATION ARC WELDING PROCESS TO MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF MULTI-V-BUTT WELD JOINTS OF SUS316L STEEL

ĐẶNG HỮU NGHỊ^{1,a}, MAI ĐĂNG TUẤN², PHAN TRƯỜNG DUY³

¹Trường Cao đẳng Nghề An Giang

²Trường Đại học sư phạm kỹ thuật Vĩnh Long

³Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

^aTác giả liên hệ: danghuunghi@agvc.edu.vn

Nhận bài (Received): 28/3/2023; Phản biện (Reviewed): 17/4/2024; Chấp nhận (Accepted): 26/04/2024

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu các thông số ảnh hưởng tới quá trình hàn hồ quang tự động bằng robot hàn cho chế tạo sản phẩm dùng trong công nghiệp lọc hoá dầu trên vật liệu thép SUS316L. Bài báo đã tiến hành mô phỏng nhiệt cho quá trình hàn hồ quang tự động cho vật liệu này và sử dụng quy hoạch Box-Behnken với 3 nhân tố gây ảnh hưởng nhiều nhất tới chất lượng sản phẩm là I (cường độ dòng điện khi hàn), U (hiệu điện thế khi hàn) và V (tốc độ hàn). Kết quả đạt được của bài báo có thể làm số liệu tham khảo trong quá trình lựa chọn giá trị các thông số hàn hồ quang tự động trên vật liệu SUS316L.

Từ khóa: Hàn hồ quang tự động, Quy hoạch thực nghiệm, Mô phỏng nhiệt, Box-Behnken

ABSTRACT

This article studies the parameters affecting the automatic arc welding process using welding robots for manufacturing products used in the petrochemical industry on SUS316L steel. The article conducted thermal simulation for the automatic arc welding process for this material and used Box-Behnken experimental planning with the 3 factors that most affect product quality: I (current when welding), U (voltage when welding) and V (welding speed). The results obtained in the article can be used as reference data in the process of selecting the values of automatic arc welding parameters on SUS316L material.

Keywords: Automatic arc welding, experimental planning, thermal simulation, Box-Behnken

1. GIỚI THIỆU

Hàn MIG tự động với thép không gỉ có những ưu điểm là: thời gian duy trì hồ

quang dài, mức độ bắn tóe rất thấp; tốc độ đắp lớn; không bị tổn thất đầu mẫu que hàn nhiều so với hàn hồ quang khác... Với các

ưu điểm này thì công nghệ hàn MIG thép không gỉ ngày càng được áp dụng rộng rãi trong thực tiễn [1].

Trên thế giới đã có những nghiên cứu ứng dụng công nghệ này vào các quá trình gia công cơ khí, tìm cách nâng cao chất lượng sản phẩm. Nhóm tác giả Vikas Chauhan [2] trong nghiên cứu của mình đã tiến hành sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm xác định ảnh hưởng của các thông số hàn (dòng điện, điện áp và tốc độ hàn) đến độ bền kéo của mối hàn; Trong nghiên cứu của nhóm tác giả Bowen Liu [3], đã sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm kết hợp với mạng nơ ron nhân tạo (ANN) và thuật toán di truyền (GA) đã được áp dụng để thu được các thông số hàn tốt nhất khi hàn MIG cho thép không gỉ austenite 316L trong quá trình hàn. Trong nghiên cứu của nhóm tác giả Souto JIV [4], đã phân tích ảnh hưởng của nhiệt lượng đầu vào trên lớp phủ mối hàn bằng thép không gỉ austenit 316L-Si thu được bằng quy trình GMAW, để xác định giá trị thông số làm việc tối ưu để được mối hàn tốt nhất.

Hiện nay, các nghiên cứu về quá trình hàn MIG sử dụng robot hàn ở nước ta không nhiều. Trong nghiên cứu của nhóm tác giả Đỗ Văn Long [5], nhóm tác giả sử dụng phần mềm SYSWELD để tính toán xác định trước dải năng lượng đường phù hợp để hàn các lớp cụ thể trong liên kết hàn giáp mối bằng thép không gỉ chịu nhiệt ứng dụng trong các nhà máy hóa chất, dầu khí và năng lượng. Tính toán chỉ ra rằng với liên kết giáp mối thép SUS316L dày 8 mm, hàn 2 lớp cho ra chất lượng cao nhất. Trong nghiên cứu của nhóm tác giả Nguyễn Văn Thanh [6], kết quả đưa ra được khi chế độ hàn phù hợp với $I_h = 155 \text{ A}$; $U_h = 25 \text{ V}$; $V_h = 26 \text{ cm/phút}$ (năng lượng đường vừa đủ) cho mối hàn đủ ngấu, bề mặt mối hàn đẹp, sáng, vảy hàn xếp đều.

Tuy nhiên hàn MIG thép không gỉ là một phương pháp hàn tương đối mới ở nước ta, việc nghiên cứu, ứng dụng công nghệ này vào thực tế sản xuất còn nhiều hạn chế, chủ yếu là áp dụng trong ngành thông dụng [7]. Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này nhằm tìm ra các thông số công nghệ phù hợp cho mối hàn hồ quang tự động (mối hàn V) với vật liệu SUS316L, là mác thép được sử dụng cực kỳ phổ biến trong công nghiệp nặng ở nước ta.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương trình nhiệt của quá trình hàn hồ quang tự động

Quá trình hàn hồ quang tự động là một sự truyền nhiệt phức tạp, trong đó, vừa có sự toả nhiệt mạnh của hồ quang, vừa có sự bức xạ và đối lưu nhiệt của bề mặt vùng hàn và tấm nền. Phân tích nhiệt trong quá trình hàn hồ quang tự động bao gồm hai phần; dòng nhiệt và sự mất nhiệt từ bề mặt của vùng hồ quang và tấm kim loại nền. Do cánh tay robot vận hành nên mối hàn sẽ di chuyển liên tục, có thể xem như đây là một nguồn nhiệt di chuyển trong quá trình phân tích. Có thể tính gần đúng thông lượng nhiệt bằng cách dùng giả định. Nguồn nhiệt hình elip đôi Goldak [8].

Nguồn nhiệt Goldak được định nghĩa bởi 2 vùng nhiệt con, có dạng ellipse, được định nghĩa như sau [8]:

$$Q = \begin{cases} q_0 \exp\left(-3\left(\left(\frac{X-X_0}{c_f}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a}\right)^2 + \left(\frac{Z}{b}\right)^2\right)\right) & (X \geq X_0) \\ q_0 \exp\left(-3\left(\left(\frac{X-X_0}{c_r}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a}\right)^2 + \left(\frac{Z}{b}\right)^2\right)\right) & (X < X_0) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

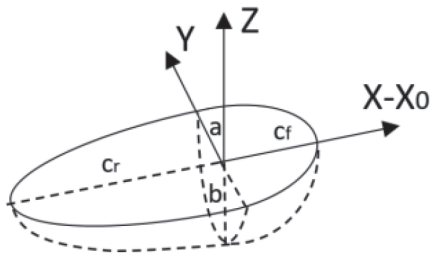
$$q_0 = Q_w \frac{6\sqrt{3}f_r}{abc_r\pi^2} = Q_w \frac{6\sqrt{3}f_f}{abc_f\pi^2} \quad (2)$$

q_0 là mật độ năng lượng của mối hàn.

a là chiều rộng nguồn nhiệt Goldak.

b là chiều sâu nguồn nhiệt Goldak.

c_f ; c_r là chiều dài phía trước và chiều dài phía sau của nguồn nhiệt Goldak.



Hình 1. Nguồn nhiệt Goldak [8]

Sự mất mát nhiệt lượng trong quá trình hàn do đối lưu và bức xạ, lượng nhiệt mất đi này có thể được tính toán như sau:

$$q_{ex} = h(T_0 - T) + \varepsilon \cdot \sigma(T_{amb}^4 - T^4) \quad (3)$$

Trong đó:

q_{ex} : Nhiệt mất đi từ bề mặt vũng hàn và tấm kim loại nền

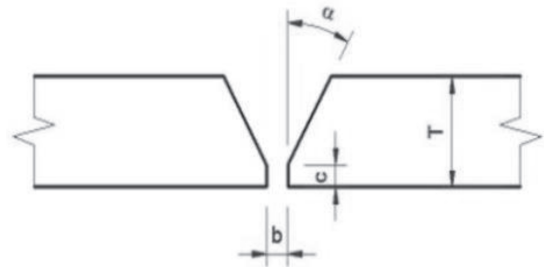
h : Hệ số truyền nhiệt đối lưu

T và T_{amb} : Nhiệt độ ban đầu và nhiệt độ môi trường

ε : Độ bức xạ bề mặt

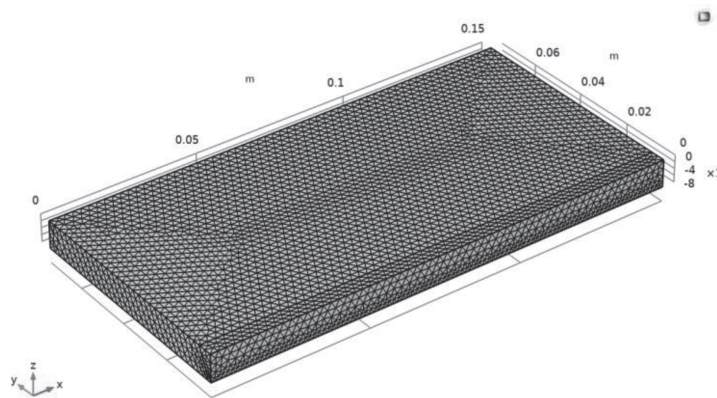
σ : Hằng số Stefan-Boltzmann

Mối hàn V của nghiên cứu có các kích thước sau:



Trong đó: $T=8\text{mm}$ (chiều dày kim loại cơ bản); $b=3\text{mm}$ (khe hở lắp ghép); $c=2\text{mm}$ (độ cùn); (góc vát)

Từ các phân tích trên, ta tiến hành xây dựng các mô hình tính toán trên phần mềm mô phỏng COMSOL®, như hình 2.



Hình 2. Mô hình quá trình hàn hồ quang tự động được chia lưới

2.2. Quá trình chuẩn bị mẫu thử cho quy hoạch thực nghiệm:

Để nghiên cứu các thông số ảnh hưởng nhiều nhất đến chất lượng mối hàn tự động, ta tiến hành phân tích các nghiên cứu [4,5,6,7]. Từ các nghiên cứu trên, ta chọn được 3 thông số ảnh hưởng nhiều nhất đến chất lượng mối hàn hồ quang tự động là: I (cường độ dòng điện khi hàn), U (hiệu điện thế khi hàn) và V

(vận tốc hàn). Do cần tìm các giá trị tối ưu của từng thông số nên nghiên cứu lựa chọn phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc 2 Box-Behnken 3 nhân tố. Quy hoạch dạng này có thiết kế số thực nghiệm vừa đủ để xây dựng mô hình bậc 2 đầy đủ. Nghiên cứu cũng lập ra bảng giá trị các mức cho từng thông số ở Bảng 1. Nhóm nghiên cứu cũng lựa chọn thông số độ bền kéo là thông số kỹ thuật chính sẽ nghiên cứu.

Bảng 1. Giá trị các mức của các nhân tố

Tên nhân tố	Ký hiệu		Đơn vị	Các mức thực nghiệm		
	Tự nhiên	Mã hoá		(-1)	(0)	(+1)
Cường độ dòng điện khi hàn	I	A	A	120	135	150
Hiệu điện thế khi hàn	U	B	V	23	24	25
Vận tốc hàn	V	C	cm/ph	16	21	26

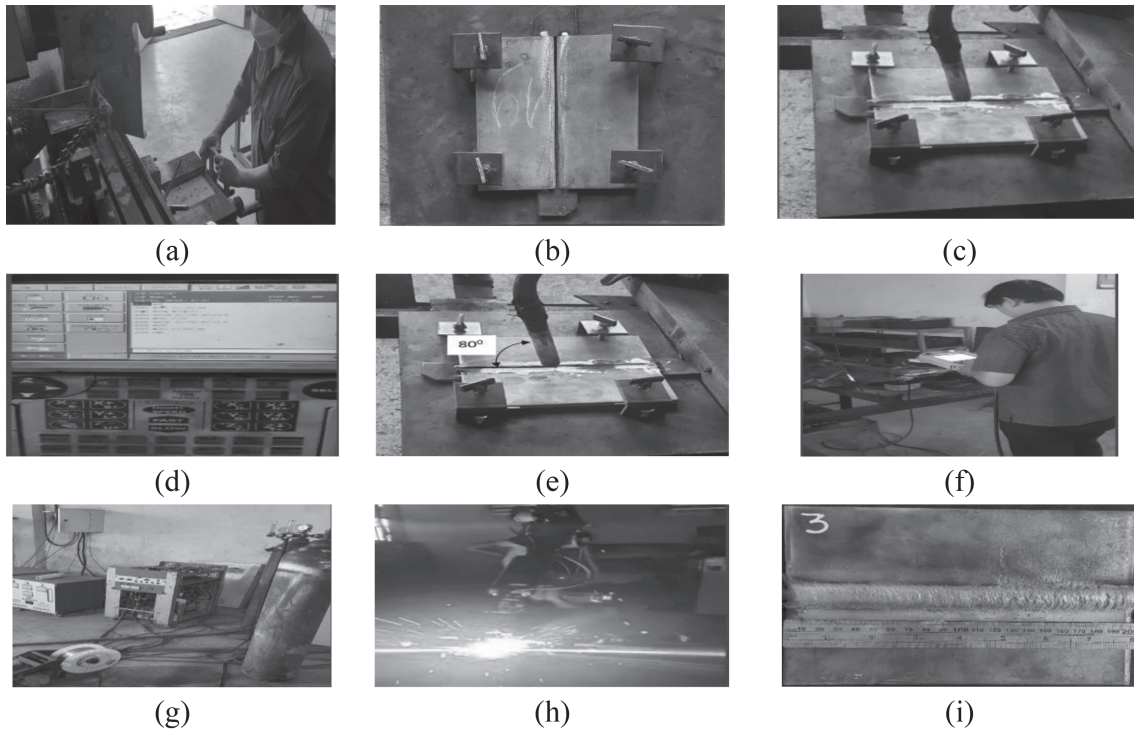
Dựa vào bảng quy hoạch trên, nhóm tác giả đã tiến hành xây dựng ma trận quy hoạch cho quy hoạch thực nghiệm này, đồng thời xác định từng mức giá trị cho từng thực nghiệm. Ma trận quy hoạch được trình bày cùng với dữ liệu thực nghiệm thu được ở Bảng 2. Dựa vào bảng ma trận quy hoạch thực nghiệm, sử dụng cánh tay robot hàn, tiến hành thực nghiệm với các bước ở hình 3, cuối cùng thu được các mẫu thí nghiệm ở Hình 4. Thông số

công nghệ của cánh tay robot hàn được trình bày ở bảng 3.

Các mẫu thí nghiệm sau đó sẽ được thử độ bền kéo bằng máy kéo nén vạn năng WEW theo tiêu chuẩn ASTM B557M, kết quả thí nghiệm được trình bày ở bảng 2. Trong đó: a là bề dày mẫu thử, b là chiều rộng mẫu thử, S là tiết diện mẫu thử; F là lực tối đa ghi nhận được trên máy kéo nén.

Bảng 2. Ma trận quy hoạch và dữ liệu thực nghiệm

STT	a	b	S	F	I	U	V	TS (Mpa)
	mm	mm	mm ²	N	A	V	cm/ph	
1	7.81	12.3	96.1	34135	120	23	21	355.2
2	7.82	12.3	96.2	35565	150	23	21	369.7
3	7.89	12.3	97.0	37859	120	25	21	390.3
4	7.91	12.3	97.3	39231	150	25	21	403.2
5	7.95	12.4	98.6	35348	120	24	16	358.5
6	7.84	12.4	97.2	34613	150	24	16	356.1
7	7.85	12.3	96.6	35114	120	24	26	363.5
8	7.95	12.3	97.8	37692	150	24	26	385.4
9	7.91	12.3	97.3	35281	135	23	16	362.6
10	7.8	12.4	96.7	34754	135	25	16	359.4
11	7.86	12.3	96.7	33439	135	23	26	345.8
12	7.93	12.3	97.5	40219	135	25	26	412.5
13	7.94	12.3	97.7	43330	135	24	21	443.5
14	7.92	12.3	97.4	43022	135	24	21	441.7
15	7.87	12.3	96.8	42515	135	24	21	439.2

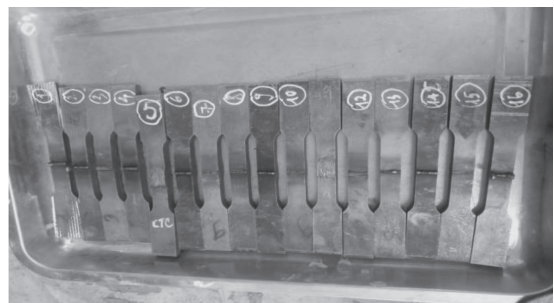
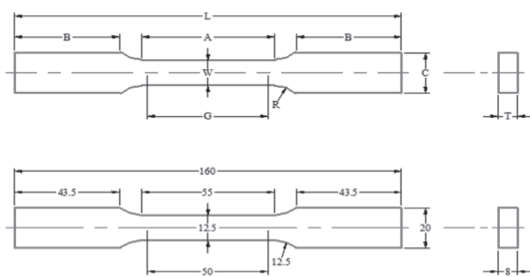


Hình 3. Quá trình hàn hồ quang tự động bằng cánh tay robot hàn

(a- Chuẩn bị phôi hàn; b- Chuẩn bị mối ghép hàn: Gá kẹp tạo phôi hàn; c- Định vị và cố định phôi hàn; d- Chuẩn bị chương trình hàn, thiết lập các tọa độ; e- Điều chỉnh góc độ mở hàn; f- Điều chỉnh vận tốc độ cánh tay robot; g- Điều chỉnh lưu lượng khí argon bảo vệ; h- Quá trình hàn hồ quang tự động; i- Làm sạch, kiểm tra bằng mắt thường)

Bảng 3. Thông số công nghệ cánh tay robot hàn tự động [9]

Hãng sản xuất	Yaskawa
Loại máy	4 trục
Nguồn cấp	220V, 60Hz
Số mở hàn	Một mở
Tốc độ tối đa trục U,R,B,T	220°/S, 435°/S, 435°/S, 700°/S
Kích thước máy	1m4
Trọng lượng	280kg



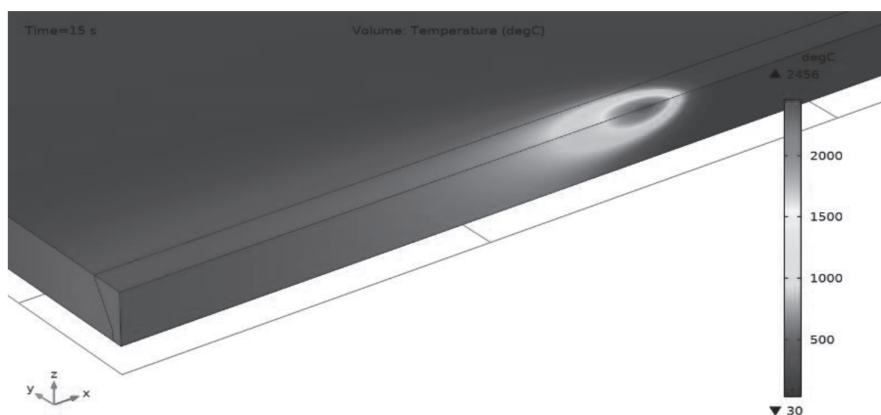
Hình 4. Mẫu thí nghiệm kéo

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

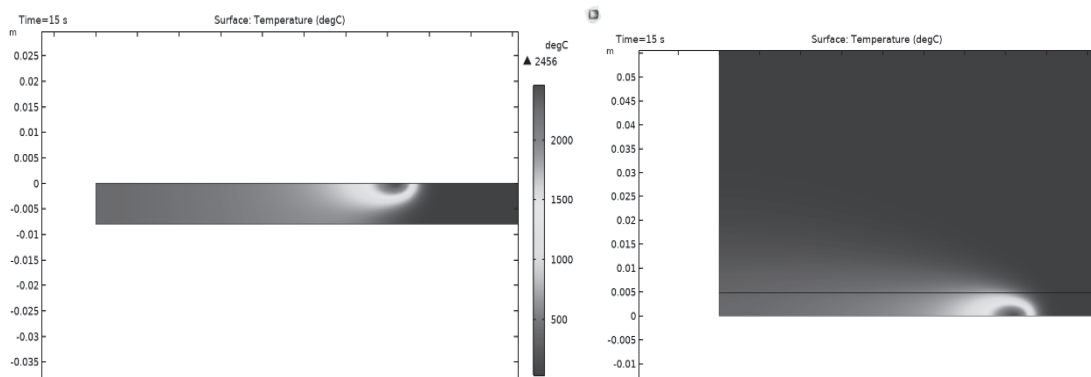
3.1. Kết quả mô phỏng nhiệt

Sử dụng môi trường mô phỏng nhiệt của phần mềm COMSOL, với các thiết lập đã trình bày, ta thu được kết quả mô phỏng nhiệt của quá trình hàn hồ quang tự động. Do quá trình hàn hồ quang tự động diễn ra liên tục, nên tác giả chỉ phân tích ở một điểm

thời gian trong quá trình hàn tự động ở các hình 5, hình 6, hình 7. Ta nhận thấy nhiệt độ tối đa của vùng hồ quang là 2456°C , với các phân bố nhiệt độ như hình 6, hình 7. Dựa vào các phân bố nhiệt, ta có thể thấy khi hàn hồ quang tự động, vùng nhiệt có phân bố như một nửa ellipse, nhỏ dần về hướng hàn và trải rộng ra ở hướng ngược lại,



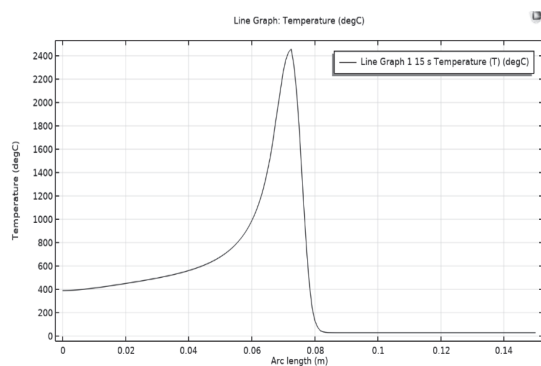
Hình 5. Kết quả mô phỏng nhiệt (mô hình tổng quát) (timestep=15s)



a) Mặt cắt tại mặt phẳng YZ

b) Mặt cắt tại mặt phẳng XY

Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt (mặt cắt tại mặt phẳng YZ) và (mặt cắt tại mặt phẳng XY)



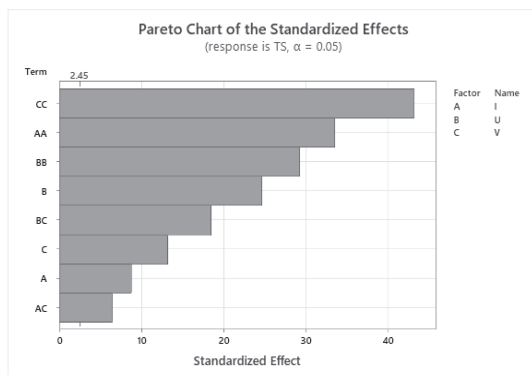
Hình 7. Kết quả mô phỏng nhiệt (trục X)

3.2. Kết quả xử lý số liệu thực nghiệm

Dựa vào bảng số liệu thực nghiệm thu được (Bảng 2), ta tiến hành xử lý số liệu thực nghiệm này. Tiến hành phân tích sơ bộ với các nhân tố của hệ bậc 2 đầy đủ bằng phần mềm tính toán thống kê Minitab, loại bỏ nhân tố không ảnh hưởng. Sau đó, Tiến hành phân tích lại sau khi loại bỏ nhân tố không ảnh hưởng tới phương trình hồi quy. Kết quả phân tích lại sau khi loại bỏ các

nhân tố không ảnh hưởng tới phương trình hồi quy, ta thấy rằng giá trị p-Value của các nhân tố đã bé hơn mức ý nghĩa. Vì thế, ta kết luận các nhân tố của lần phân tích này đều có ảnh hưởng tới phương trình hồi quy.

Tiếp theo ta sẽ phân tích mức độ ảnh hưởng của các nhân tố tới phương trình hồi quy. Dựa vào biểu đồ Pareto ở hình 8, ta thấy các nhân tố ảnh hưởng nhiều nhất tới phương trình hồi quy là: nhân tố bậc hai của tốc độ hàn (V^2); nhân tố bậc hai của cường độ dòng điện hàn (I^2) và nhân tố bậc hai của hiệu điện thế khi hàn (U^2).



Hình 8. Biểu đồ Pareto thể hiện sự ảnh hưởng của các nhân tố tới phương trình hồi quy

Tiếp theo ta sẽ tiến hành phân tích phương sai ANOVA (Analysis of Variance) cho các nhân tố ảnh hưởng tới phương trình hồi quy ở bảng 4. Dựa vào giá trị p-Value của thông số Lack-of-fit, ta tiến hành kiểm định sự phù hợp của phương trình hồi quy với dữ liệu thực nghiệm (Lack-of-fit test).

Do p-Value của hệ số Lack-of-Fit là 0.679 lớn hơn mức ý nghĩa $\alpha=0.05$ nên ta kết luận Không có bằng chứng nào cho thấy mô hình không phù hợp với dữ liệu [9].

Bảng 4. Phân tích ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	16475.6	2059.45	574.22	0.000
Linear	3	3079.3	1026.43	286.19	0.000

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
I	1	275.0	274.95	76.66	0.000
U	1	2181.3	2181.30	608.19	0.000
V	1	623.0	623.04	173.72	0.000
Square	3	12027.2	4009.07	1117.81	0.000
I*I	1	4029.1	4029.05	1123.38	0.000
U*U	1	3069.6	3069.64	855.88	0.000
V*V	1	6687.6	6687.55	1864.63	0.000
2-Way Interaction	2	1369.1	684.56	190.87	0.000
I*V	1	147.6	147.62	41.16	0.001
U*V	1	1221.5	1221.50	340.58	0.000
Error	6	21.5	3.59		
Lack-of-Fit	4	12.2	3.05	0.65	0.679
Pure Error	2	9.3	4.66		
Total	14	16497.1			

Ta tiến hành kiểm nghiệm R bình phương cho phương trình hồi quy thu được. Kết quả thể hiện ở bảng 6.

Bảng 6. Kết quả kiểm nghiệm R bình phương

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.89381	99.87%	99.70%	99.14%

Các hệ số R-sq, R-sq hiệu chỉnh và R-sq dự đoán đều lớn hơn 85%. Mô hình phù hợp với dữ liệu thực nghiệm và có thể dùng phương trình hồi quy này dự đoán cho dữ liệu thực nghiệm.

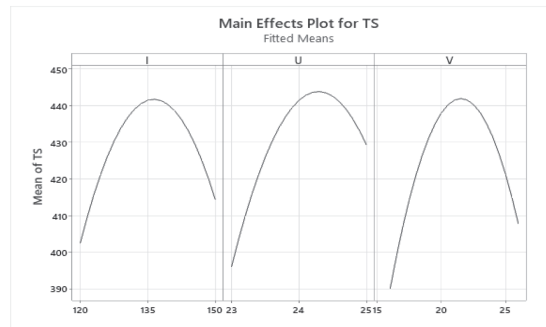
Phương trình hồi quy ở dạng tự nhiên là:

$$\begin{aligned}
 TS = & -18088 + 38.33 I + 1327.1 U \quad (4) \\
 & - 21.55 V - 0.14681 I^2 \\
 & - 28.833 U^2 - 1.7023 V^2 \\
 & + 0.0810 IV + 3.495 UV
 \end{aligned}$$

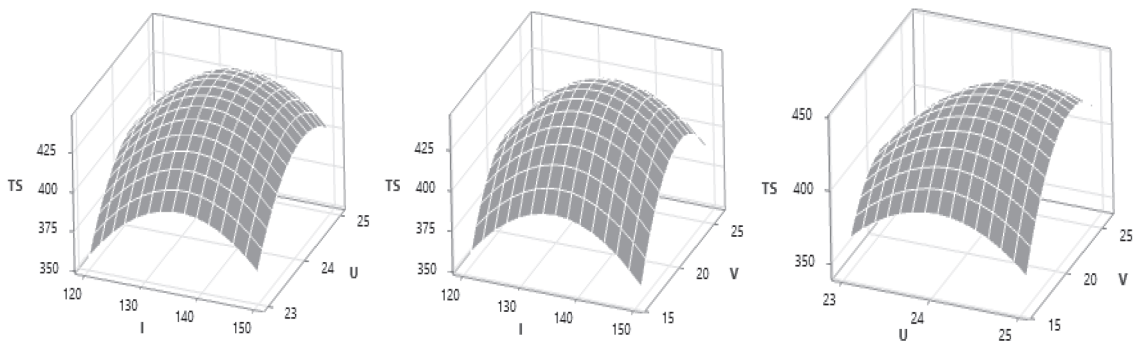
Ta tiến hành phân tích tiếp các biểu đồ thể hiện sự ảnh hưởng của từng nhân tố đến độ bền kéo của các mẫu thí nghiệm bằng các biểu đồ ở các hình 10, 11:

Từ biểu đồ các nhân tố ảnh hưởng (hình 10), ta có thể thấy rằng: Với nhân tố chính I, khi ta tăng I thì độ bền kéo sản phẩm tăng lên nhưng khi đạt giá trị cực đại lại bắt đầu giảm xuống, điều này thể hiện khi giá trị cường độ dòng điện tăng, hồ quang sinh ra sẽ có nhiệt độ lớn hơn, làm cho vùng hàn mở rộng, nếu ở nhiệt độ vừa phải sẽ giúp tăng độ bền, nếu tăng quá giới hạn thì sẽ sinh ra sự chuyển pha làm giảm độ bền sản phẩm; Với nhân tố chính U, khi tăng U thì độ bền kéo sản phẩm tăng lên nhưng khi đạt giá trị cực đại lại bắt đầu giảm xuống, điều này thể hiện khi giá trị hiệu điện thế tăng, hồ quang sinh ra sẽ có nhiệt độ lớn hơn, làm cho vùng hàn mở rộng, nếu ở nhiệt độ vừa phải sẽ giúp tăng độ bền, nếu tăng quá giới hạn thì sẽ

sinh ra sự chuyển pha làm giảm độ bền sản phẩm; Với nhân tố tốc độ hàn V, khi ta tăng V thì độ bền kéo tăng lên nhưng khi đạt giá trị cực đại lại bắt đầu giảm xuống, điều này thể hiện khi giá trị vận tốc hàn tăng hồ quang sinh ra sẽ có nhiệt độ lớn hơn, làm cho vùng hàn mở rộng, nếu ở nhiệt độ vừa phải sẽ giúp tăng độ bền. Tuy nhiên, nếu vận tốc hàn quá nhanh sẽ làm cho vùng kim loại vũng hàn có sự bất ổn định, giảm cơ tính, độ bền.



Hình 9. Các biểu đồ ảnh hưởng của các nhân tố tới độ bền kéo



a) Ảnh hưởng của I và U

b) Ảnh hưởng của I và V

c) Ảnh hưởng của U và V

Hình 10. Các biểu đồ ảnh hưởng của các nhân tố tới độ bền kéo

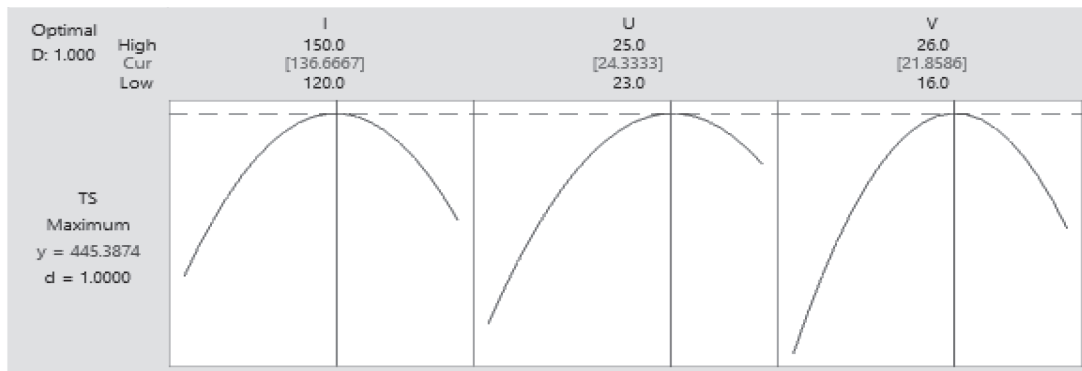
3.3. Tối ưu hoá các thông số của quá trình hàn tự động dùng robot hàn với vật liệu SUS316L

Ta sử dụng module Response Optimizer của Minitab để tiến hành tối ưu hoá thông số công nghệ của quá trình hàn tự động để có giá trị độ bền kéo là lớn nhất với các điều kiện biên như sau:

$$\begin{cases} 120 \leq I \leq 150 \\ 23 \leq U \leq 25 \\ 16 \leq V \leq 26 \end{cases}$$

Phần mềm sẽ tính toán và đưa ra giá trị tối ưu như sau:

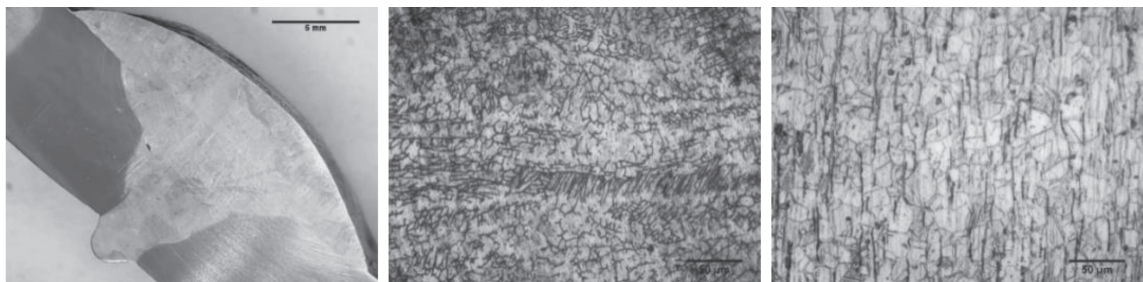
I	U	V	TS Fit
136.667	24.3333	21.8586	445.387



Hình 11. Kết quả tối ưu hoá thông số công nghệ cho quá trình hàn tự động

Từ giá trị tối ưu trên, nhóm nghiên cứu đã tiến hành gia công lại với bộ thông số tối ưu ($I=137A$; $U=24V$; $V=22cm/ph$), kết quả độ bền kéo của

mẫu thử là $TS_{op} = 443MPa$. Nhóm nghiên cứu cũng tiến hành chụp tế vi biên dạng vùng mối hàn của mẫu thử trên, thể hiện ở hình 13.



Hình 12. Kết quả chụp bề mặt tế vi của mẫu thử tối ưu hoá

(Từ trái sang phải: 1-Mẫu hàn tự động; 2-Vùng tâm mối hàn; 3-Vùng kim loại nền)

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành phân tích mô phỏng nhiệt quá trình hàn tự động bằng robot hàn với vật liệu SUS316L, các kết quả thu được phù hợp với các giả định ban đầu về phương trình truyền nhiệt. Nghiên cứu đã tiến hành phân tích quy hoạch thực nghiệm nhằm tìm ra giá trị các thông số công nghệ để có độ bền

kéo lớn nhất cho sản phẩm. Kết quả đạt được của bài báo có thể làm số liệu tham khảo trong quá trình lựa chọn giá trị các thông số hàn tự động bằng cánh tay robot hàn với vật liệu SUS316L. Ngoài ra, trong tương lai, hướng nghiên cứu sẽ được phát triển thêm nhằm bổ sung thêm các quá trình chuyển biến pha của quá trình hàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ruturaj U. Kakade, Baliram R. Jadhav, 2021. A Review on Optimization of MIG welding Process Parameters using different Method. International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), Volume 3, Issue 6 June 2021, pp: 974-980.
- [2]. Vikas Chauhan and Dr. R. S. Jadoun, 2015. Parametric optimization of mig welding for

- stainless steel (ss-304) and low carbon steel using taguchi design method. International Journal of Recent Scientific Research, Vol 6, Issue, 2, pp.2662-2666.
- [3]. Bowen Liu, Wentao Jin, Anjin Lu, Kai Liu, Chunming Wang, Gaoyang Mi, 2020. Optimal design for dual laser beam butt welding process parameter using artificial neural networks and genetic algorithm for SUS316L austenitic stainless steel, Optics & Laser Technology, Volume 125.
- [4]. Souto JIV, Ferreira SD, Lima JS, Castro WB, Grassi END, Santos TFA. Effect of GMAW process parameters and heat input on weld overlay of austenitic stainless steel 316L-Si. Soldagem & Inspeção. 2023;28.
- [5]. Đỗ Văn Long, Vũ Đình Toại, 2021. Xác định dải năng lượng đường phù hợp cho liên kết giáp mối thép không gỉ chịu nhiệt SUS316L bằng mô phỏng số. JST: Engineering and Technology for Sustainable Development, Volume 31, Issue 3, July 2021, 070-077.
- [6]. Nguyễn Văn Thanh, 2021. Nghiên Cứu Công Nghệ Hàn Giáp Mối Một Phía Thép Không Gỉ Sus 316L Ứng Dụng Trong Chế Tạo Thùng Chứa Hóa Chất, Luận Văn Thạc sĩ, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định.
- [7]. Ernandes J. G. Nascimento, 2023. A literature review in heat source thermal modeling applied to welding and similar processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 126, pages 2917–2957.
- [8]. Yaskawa Việt Nam. <https://yaskawavn.com/san-pham/robot-han-ho-quang-arc-welding-robots-c45.html>
- [9]. Douglas C. Montgomery. 2021. Design and Analysis of Experiments, 10th Edition, Wiley.