

ẢNH HƯỞNG CÁC THÔNG SỐ HÀN ĐẾN ĐỘ BỀN KÉO CỦA MỐI HÀN MA SÁT KHUẤY TRÊN ỐNG HỢP KIM NHÔM 6061 CÓ GIA NHIỆT TRƯỚC

Nguyễn Hoàng Linh¹

TÓM TẮT

Trong bài báo này, đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn, bao gồm tốc độ quay dụng cụ n (vòng/phút), tốc độ hàn v (mm/phút), đường kính vai của dụng cụ d (mm) đến chất lượng mối hàn ma sát khuấy ống trụ hợp kim nhôm 6061 có gia nhiệt trước bằng điện trở (Resistance Friction Stir Welding-RFSW). Hai đoạn ống hợp kim nhôm cần hàn giáp mí có cùng kích thước đường kính ngoài $\phi 80\text{mm}$, dày 5mm, chiều dài 40mm được gia công mặt đầu phẳng và gá trên trục gá được thiết kế đảm bảo độ cứng vững, đồng tâm và được định vị mặt trong kẹp chặt hai đoạn bằng đai ốc, trục gá được lắp trên hệ thống truyền dẫn vô cấp với các mức tốc độ xác định khác nhau. Bằng phép quy hoạch thực nghiệm thiết lập quan hệ giữa các thông số công nghệ hàn (tốc độ quay, tốc độ hàn và bán kính vai dụng cụ), từ đó tối ưu các thông số trên nhằm đạt được chất lượng mối hàn tốt nhất.

Từ khóa: Hàn ma sát khuấy, ống trụ nhôm, độ bền kéo mối hàn, quy hoạch thực nghiệm.

1. Đặt vấn đề

Nhôm và hợp kim nhôm là một trong những kim loại phổ biến và được sử dụng trong các ngành hàng không vũ trụ, công nghiệp ô tô, đường sắt, đóng tàu, điện, xây dựng... [1]. Phương pháp hàn ma sát khuấy (Friction Stir Welding-FSW) được dùng khá phổ biến khi hàn hợp kim nhôm [2], ứng dụng trong các ngành hàng không vũ trụ, công nghiệp ô tô, đường sắt, đóng tàu, xây dựng,... [1, 3]. Khi sử dụng hợp kim nhôm để hàn bằng các phương pháp hàn nóng chảy là rất khó khăn, ví dụ như trong ngành công nghiệp hàng không, khi hàn hồ quang plasma với tỉ lệ khuyết tật cao, còn hàn ma sát khuấy (Friction Stir Welding-FSW) đã giảm tỉ lệ khuyết tật này xuống gần như bằng không [4]. Vì vậy, cần phát triển công nghệ hàn FSW để khắc phục nhược điểm trên và nâng cao độ bền tại mối hàn là rất cần thiết.

Hàn ma sát khuấy là một công nghệ hàn mới được phát minh bởi viện hàn TWI (The Welding Institute-Vương Quốc Anh) vào năm 1991 [5]. FSW được coi là công nghệ xanh cho hiệu quả năng lượng và bảo vệ môi trường mà không tạo hồ quang và khói hàn, không yêu cầu các loại phụ khí che chắn, không cần sử dụng kim loại que hàn để điền đầy mối hàn, ít biến dạng và không nứt. Đây là quá trình hàn ở trạng thái rắn (không nóng chảy) nhờ nhiệt ma sát và ứng dụng chủ yếu cho vật liệu kim loại màu, đặc biệt là nhôm và hợp kim nhôm [6].

Ngoài các phương pháp FSW có gia nhiệt trước bằng laser [7, 8], plasma [9], siêu âm [10], bằng điện [11],... thì FSW có gia nhiệt trước bằng điện trở được quan tâm trong thời gian gần đây. Kaushik Sengupta và cộng sự [12] đã có các đánh giá về nghiên cứu

quá trình FSW có gia nhiệt trước bằng điện trở (Resistance Friction Stir Welding-RFSW). Bài báo trình bày những ảnh hưởng của các thông số hàn đến chất lượng mối hàn, hình học dụng cụ hàn, vật liệu dụng cụ và các thông số quá trình hàn. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng FSW có gia nhiệt trước bằng điện trở của hợp kim cường độ cao như nhôm là một công nghệ mới nổi với nhiều ứng dụng thương mại.

Bên cạnh nhược điểm khó bố trí điện trở phù hợp giữa hai vật liệu khác nhau, yêu cầu cao về an toàn điện, nghiên cứu cũng chỉ ra nhiều ưu điểm của RFSW so với các phương pháp FSW có hỗ trợ nhiệt khác như: tăng tuổi thọ và hiệu suất dụng cụ, ít tiêu thụ năng lượng, chi phí thấp và dễ sử dụng, không bị mất các nguyên tố hợp kim trong quá trình hàn, không có sự thay đổi thành phần trong quá trình tham gia hàn, ổn định kích thước tốt hơn, cải thiện tính chất cơ học, giảm rung động và biến dạng đồ gá hàn. Vì vậy việc tiếp cận nghiên cứu RFSW nhằm khắc phục các nhược điểm mà các phương pháp FSW có hỗ trợ nhiệt khác đã có với chi phí thấp, an toàn, dễ sử dụng là phù hợp và cần thiết với Việt Nam ngày nay.

Công nghệ RFSW ứng dụng hàn các ống trụ nhôm hợp kim đường kính nhỏ trong thời gian qua có nhưng rất ít những nghiên cứu đi sâu cùng lúc phân tích sự ảnh hưởng của các thông số hàn đến độ bền kéo và độ bền chảy đối với hợp kim nhôm 6061 dạng ống trụ, từ đó lựa chọn thông số hàn hợp lý nhằm nâng cao chất lượng mối hàn. Ở Việt Nam, FSW là một công nghệ còn khá mới, trong thời gian gần đây bắt đầu có những nghiên cứu về công nghệ hàn này nhưng hiện tại chưa có nghiên cứu nào đi sâu về vấn đề FSW dạng ống trụ đường kính nhỏ mà có gia nhiệt trước. Nghiên cứu sẽ thực nghiệm và phân tích sự ảnh hưởng của các thông số hàn đến độ bền kéo đối với ống trụ hợp kim nhôm 6061, từ đó lựa chọn thông số hàn hợp lý nhằm nâng cao độ bền cho mối hàn.

Trong bài báo này, tác giả tiến hành nghiên cứu sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn trong quá trình ứng dụng RFSW trên ống trụ hợp kim nhôm 6061 có đường kính $\phi 80$ gồm: tốc độ quay dụng cụ n (vòng/phút), tốc độ hàn v (mm/phút), đường kính vai của dụng cụ d (mm), bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm hỗn hợp đối xứng quay đều Box-Wilson [13]. Những kết quả đạt được làm cơ sở xác định bộ thông số hàn hợp lý, nhằm đạt chất lượng của mối hàn sát khuấy trên ống hợp kim nhôm 6061.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng được nghiên cứu chủ yếu ở đây là ảnh hưởng của tốc độ quay dụng cụ, tốc độ hàn và bán kính vai của dụng cụ đến độ bền kéo mối hàn trong điều kiện hàn ma sát khuấy dạng ống trụ hợp kim nhôm 6061 có gia nhiệt trước 100°C .

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Thực nghiệm hàn ma sát khuấy với thiết kế thí nghiệm có kiểm soát, kết hợp thử nghiệm cơ tính, phân tích và xử lý số liệu thống kê để đánh giá ảnh hưởng của thông số hàn đến độ bền kéo.

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

3.1. Tiến hành thực nghiệm

Hệ thống thí nghiệm RFSW gồm: thiết bị FSW đã có được cải tiến từ máy phay vạn năng ENSHURA2, đồ gá hàn và bộ gia nhiệt nhóm nghiên cứu đã chế tạo để lắp cùng thiết bị, tất cả như Hình 1. Dụng cụ hàn vừa xoay vừa tịnh tiến đi xuống tiếp xúc với bề mặt vật hàn (vị trí nối hai đoạn ống được lắp ổn định trên đồ gá hàn), tạo nguồn nhiệt vùng hàn khi đã gia nhiệt trước, dụng cụ hàn đi xuyên vào vật hàn tạo những thay đổi về tổ chức vật liệu làm cho quá trình biến dạng dẻo mãnh liệt ở vùng khuấy, sau đó di chuyển dọc theo hướng hàn tạo thành mối hàn.



Hình 1. Hệ thống thiết bị thí nghiệm



Hình 2. Vật liệu nền hợp kim nhôm AA6061

Ống trụ nhôm hợp kim AA6061 với kích thước $\phi 80 \times 40 \times 5$ mm (một đoạn ống) được sử dụng để nghiên cứu (Hình 2). Thành phần hoá học nhôm AA6061 tác giả đã kiểm tra đánh giá tại “*Trung tâm kiểm định vật liệu và kết cấu công trình LAS-XD 712*” như Bảng 1 và tính chất vật liệu của hợp kim nhôm AA6061 như Bảng 2 [14].

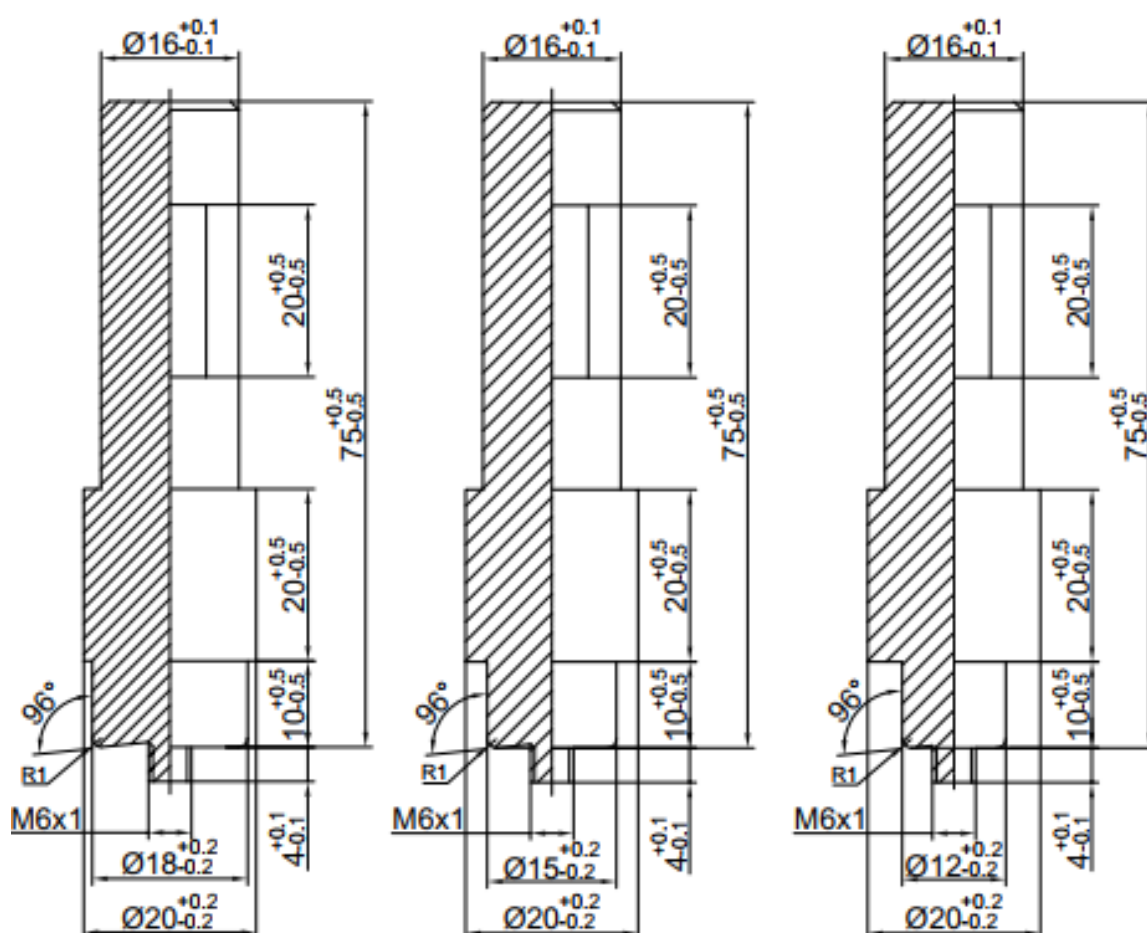
Bảng 1. Thành phần hóa học nhôm AA6061

Nguyên tố	Al	Mg	Cu	Si	Khác
Thành phần (%)	97.3	0.71	0.16	0.6	1.23

Bảng 2. Tính chất vật liệu nhôm AA6061 [14]

Thông số	Độ bền chảy (MPa)	Độ bền kéo (MPa)	Độ giãn dài (%)
Giá trị	179	200	23.4

Tiến hành thực nghiệm RFSW với nhiệt độ gia nhiệt trước 100°C cho ống nhôm hợp kim AA6061 có kích thước $\phi 80 \times 40 \times 5$ (mm) trên hệ thống thiết bị ở Hình 1. Trong đó, tác giả đã chế tạo dụng cụ hàn vật liệu H13 (SKD61) [15] có đầu khuấy hình trụ (ren phải M6x1) như Hình 3, có kích thước đường kính vai lần lượt là 12 mm, 15 mm và 18 mm.

**Hình 3.** Dụng cụ hàn

Dựa trên các thông số phân tích và mô hình phương trình nhiệt đối với mô hình hàn ma sát khuấy ống nhôm hợp kim có kích thước nhỏ, thực nghiệm 3 thông số đầu vào là:

tốc độ quay dụng cụ n (vòng/phút), tốc độ hàn v (mm/phút), đường kính vai của dụng cụ d (mm). Tiến hành kiểm nghiệm và xác định lại miền giá trị thực tế thông số đầu vào như Bảng 3 sau:

Bảng 3. Khảo sát miền giá trị của hệ thống hàn trên ống trụ

Tốc độ quay dụng cụ n (vòng/ph)	1050 v/ph – 2500 v/ph
Tốc độ hàn v (mm/ph)	62.5 mm/ph – 112.5 mm/ph
Đường kính vai dụng cụ d (mm)	10 mm - 20 mm

Độ bền kéo σ_k được xem là hàm mục tiêu của mô hình toán. Sau khi thực nghiệm khảo sát miền giá trị trên sẽ đưa ra được miền giá trị giới hạn gồm 3 mức độ của 3 thông số (Bảng 4). Tiến hành thực nghiệm đơn yếu tố để đánh giá sự ảnh hưởng đơn lẻ của mỗi thông số đến hàm mục tiêu.

Sau đó tiến hành thực nghiệm đa yếu tố toàn phần, để đánh giá sự ảnh hưởng tổng thể của cả 3 yếu tố đến hàm mục tiêu, loại trừ sự ảnh hưởng ngẫu nhiên. Thực nghiệm được tiến hành qua 4 bước sau:

Bước 1: Khảo sát miền giá trị tương ứng với thông số hiện có của hệ thống hàn (Bảng 3).

Bước 2: Từ kết quả thực nghiệm thô rút ra được miền giá trị giới hạn để thực nghiệm đánh giá như Bảng 4.

Bảng 4. Miền giá trị giới hạn

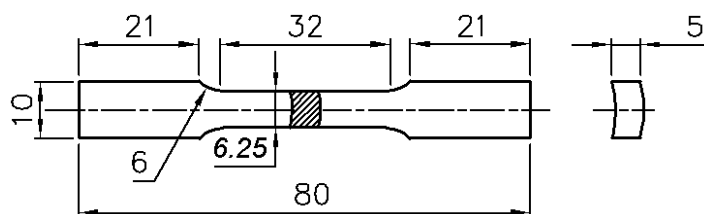
Mức độ	Thấp	Trung bình	Cao
Tốc độ quay dụng cụ n (v/ph)	1250	1500	1750
Tốc độ hàn v (mm/ph)	75	87.5	100
Đường kính vai dụng cụ d (mm)	12	15	18

Bước 3: Chọn thông số tối ưu y (độ bền kéo σ_k) và 3 yếu tố ảnh hưởng đến thông số tối ưu là: tốc độ quay n (vòng/phút) ký hiệu là x_1 , tốc độ hàn v (mm/phút) ký hiệu x_2 , đường kính vai dụng cụ d (mm) ký hiệu x_3 .

Bước 4: Chọn mô hình phương trình hồi quy bậc hai quay đều cho 3 nhân tố ($k = 3$), tiến hành quy hoạch thực nghiệm toàn phần Box-Wilson, số thí nghiệm cần thực hiện là $n = 20$.

3.2. Kiểm tra độ bền kéo mối hàn

Ống hợp kim nhôm sau khi hàn sẽ được cắt thành 8 phần, mỗi phần cắt được đem gia công trên máy cắt giầy để thử độ bền mẫu kéo như Hình 3 theo tiêu chuẩn ISO 6892-1:2019 (TCVN 197-1:2014) trên máy kéo vạn năng WEW-100B kết nối máy tính.



Hình 4. Kích thước mẫu thử

Mẫu thử kéo đã gia công như Hình 5.



Hình 5. Một số mẫu thử kéo đã gia công theo tiêu chuẩn

3.3. Quy hoạch thực nghiệm

Thí nghiệm được tiến hành theo ma trận dạng Box-Wilson, đây là dạng quy hoạch thực nghiệm quay đều được sử dụng phổ biến trong thí nghiệm tối ưu hóa. Giá trị của các thông số đầu vào được lựa chọn phù hợp cho điều kiện hàn ma sát khuấy hợp kim nhôm và phù hợp với khả năng công nghệ của máy thí nghiệm. Giá trị tại các mức mã hóa của các biến thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Bảng giá trị các nhân tố theo phương pháp quay đều

Nhân tố	Ký hiệu		Khoảng thay đổi	Mức giá trị				
	Tự nhiên	Mã hóa		Mức - α	Dưới -1	Cơ sở 0	Trên +1	Mức + α
Tốc độ quay (v/ph)	n	x ₁	250	1079	1250	1500	1750	1920
Tốc độ hàn (mm/ph)	v	x ₂	12.5	66.5	75	87.5	100	108.5
Đường kính vai (mm)	d	x ₃	3	10	12	15	18	20

Thí nghiệm dạng Box-Wilson cho 3 biến thí nghiệm (n, v, d) ở dạng mã hoá của các thông số được lập bằng phần mềm Minitab và giá trị trung bình của 3 lần đo độ bền kéo có kết quả như trong Bảng 6.

Bảng 6. Thí nghiệm 3 nhân tố và kết quả

Thí nghiệm	Tốc độ quay v/ph	Tốc độ hàn mm/ph	Đường kính vai mm	Độ bền kéo Y (MPa)
Số thí nghiệm ở nhân				
1	1250	75	12	142.4
2	1750	75	12	176.8
3	1250	100	12	170.8
4	1750	100	12	192.7
5	1250	75	18	145.9
6	1750	75	18	165.3
7	1250	100	18	158.9
8	1750	100	18	165.8
Số thí nghiệm ở điểm sao (*)				
9	1079	87.5	15	150.4
10	1920	87.5	15	185.1
11	1500	66.5	15	150.4
12	1500	108.5	15	174.7
13	1500	87.5	10	176.2
14	1500	87.5	20	156.6
Số thí nghiệm ở tâm qui hoạch				
15	1500	87.5	15	177.1
16	1500	87.5	15	178.1
17	1500	87.5	15	177.9
18	1500	87.5	15	176.8
19	1500	87.5	15	177.8
20	1500	87.5	15	178.2

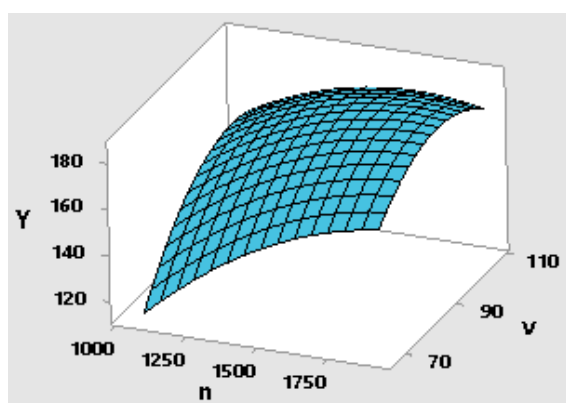
3.4. Kết quả

Từ kết quả trong Bảng 6, sử dụng phần mềm Minitab để xử lý số liệu, được kết quả phân tích mô hình hồi quy như Bảng 7. Trong 3 thông số công nghệ hàn: n, v, d đều có giá trị P nhỏ hơn 0,05 chỉ ra rằng hệ số của phương trình hồi quy đều có ý nghĩa. Do vậy, các thông số này đều có ảnh hưởng đến độ bền kéo.

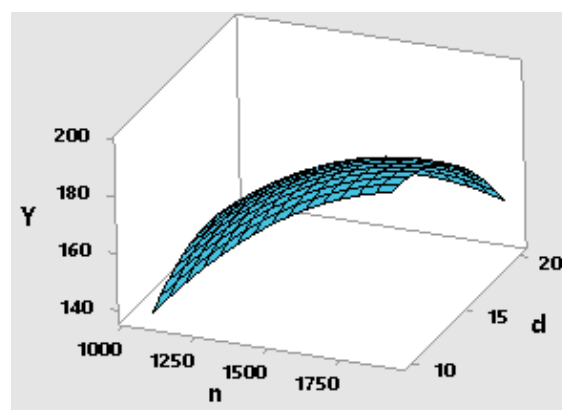
Bảng 7. Kết quả phân tích mô hình hồi quy

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		177.650	0.164	1083.13	0.000	
n	20.643	10.321	0.109	94.85	0.000	1.00
v	14.450	7.225	0.109	66.39	0.000	1.00
d	-11.681	-5.841	0.109	-53.67	0.000	1.00
n*n	-7.004	-3.502	0.106	-33.06	0.000	1.02
v*v	-10.681	-5.340	0.106	-50.41	0.000	1.02
d*d	-7.959	-3.979	0.106	-37.56	0.000	1.02
n*v	-6.250	-3.125	0.142	-21.98	0.000	1.00
n*d	-7.500	-3.750	0.142	-26.37	0.000	1.00
v*d	-7.700	-3.850	0.142	-27.08	0.000	1.00

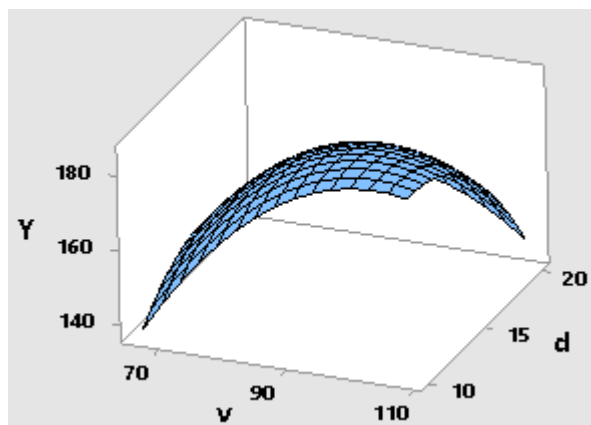
Căn cứ vào giá trị hệ số hồi quy được phần mềm đưa ra cột (Coef) trong Bảng 7 cho hệ số tự do và hệ số của các thông số đầu vào của phương trình hồi quy dạng mã hóa liên hệ giữa 3 thông số công nghệ hàn n, v, d và Y (độ bền kéo σ_k), phương trình (1).



Hình 6. Ảnh hưởng tương tác giữa n và v



Hình 7. Ảnh hưởng tương tác giữa n và d



Hình 8. Ảnh hưởng tương tác giữa v và d

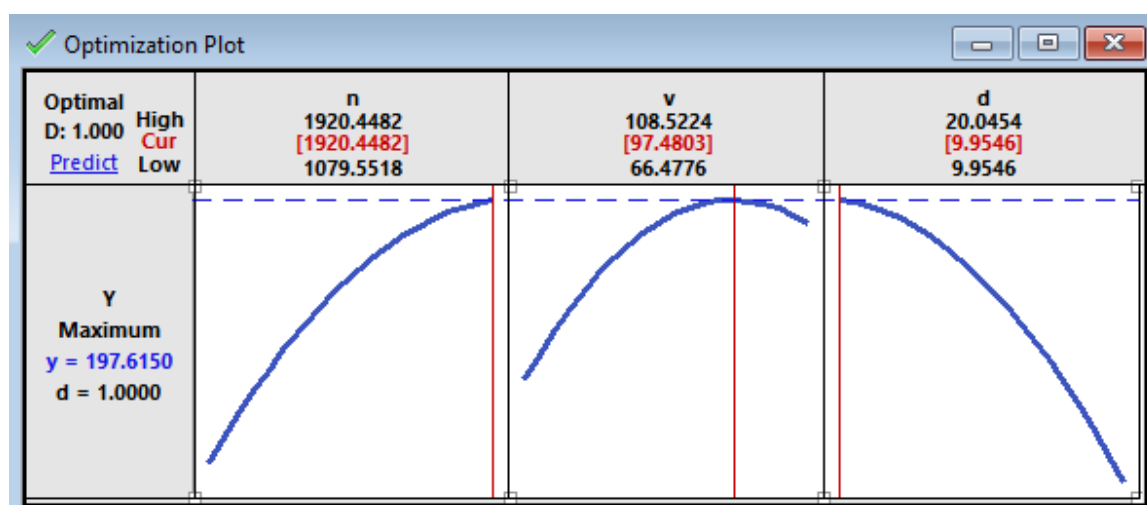
Phương trình (1) là phương trình hồi quy dạng mã hóa, như sau:

$$Y = 177.65 + 10.32x_1 + 7.22x_2 - 5.84x_3 - 3.12x_1x_2 - 3.75x_{13} - 3.85x_{23} - 3.5x_1^2 - 5.34x_2^2 - 3.98x_3^2 \quad (1)$$

Kiểm tra tính thích hợp của mô hình nhằm xác định việc lựa chọn mô hình là phù hợp hay không phù hợp để dự đoán độ chính xác giá trị đầu ra của kết quả thực nghiệm. Sử dụng Minitab để phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình. Các thông số đều có ý nghĩa, phương trình hồi quy dạng tự nhiên (3) được viết như công thức (2) sau:

$$Y = -771.4 + 0.37188.n - 9.599.v - 0.000056.n^2 - 0.034179.v^2 - 0.4421.d^2 - 0.001.n.v - 0.005.n.d - 0.10267.v.d \quad (2)$$

Trên Hình 6,7,8 là đồ thị biểu diễn quan hệ giữa tốc độ quay (n), tốc độ hàn (v) và đường kính vai (d) đến độ bền kéo mỗi hàn (Y). Xét về sự ảnh hưởng tương tác giữa các thông số thì tương tác giữa tốc độ hàn và đường kính vai (v*d) có ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo.



Hình 9. Đồ thị xác định giá trị tối ưu của từng thông số công nghệ

Công cụ Response optimizer của Minitab đã được sử dụng để tìm các thông số công nghệ tối ưu như đồ thị (Hình 9) cho thấy độ bền kéo đạt giá trị cao nhất 197,615 MPa ứng với mỗi hàn có $n = 1920$ v/ph, $v = 97$ mm/ph và $d = 10$ mm. Đây là các giá trị của thông số n , v , d hàn tốt nhất.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thực hiện khảo sát thành công ảnh hưởng của các thông số đầu vào (tốc độ quay $n = 1629$ v/ph, tốc độ hàn $v = 100$ mm/ph và đường kính vai dụng cụ $d = 13$ mm) đến chất lượng của mỗi hàn thông qua quá trình thực nghiệm và xây dựng phương trình hồi quy bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm hỗn hợp đối xứng quay đều Box-Wilson.

Quá trình thí nghiệm đã xác định được mối quan hệ giữa các thông số công nghệ hàn (còn gọi là thông số đầu vào: n , v , d) với độ bền kéo của mỗi hàn. Mỗi hàn ma sát khuấy được chế tạo có độ bền kéo đạt từ 71% đến 95% so với mẫu vật liệu nguyên, chứng tỏ chất lượng hàn đạt mức cao và ổn định.

Hơn nữa, dựa trên phương trình hồi quy thể hiện mối quan hệ giữa thông số đầu vào đến chất lượng mỗi hàn thông qua độ bền kéo, tác giả cũng tìm được chất lượng của mỗi hàn tốt nhất tương ứng với độ bền kéo cực đại đạt 197.15 MPa.

Trên cơ sở kết quả đạt được, hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào đánh giá độ bền chảy, độ cứng và tổ chức tế vi tại vùng tâm hàn để hiểu rõ hơn cơ chế hình thành và biến đổi vật liệu trong vùng hàn. Ngoài ra, việc mở rộng thực nghiệm trên mô hình có kích thước lớn hơn sẽ giúp kiểm chứng và hoàn thiện các thông số công nghệ đã đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Amini, P. Asadi, and P. Zolghadr, "Friction stir welding applications in industry," *Advances in friction-stir welding and processing*, pp. 671-722, 2014.
- [2]. S. Balaji *et al.*, "Comparative analysis of experimental and numerical investigation on multiple projectile impact of AA5083 friction stir welded targets," *Plos one*, vol. 18, no. 7, p. e0285254, 2023.
- [3]. S. Bharti *et al.*, "A Review of Recent Developments in Friction Stir Welding for Various Industrial Applications," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 1, p. 71, 2023.
- [4]. D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction stir welding: From basics to applications*. Elsevier, 2009.
- [5]. W. Thomas, E. Nicholas, J. Needham, M. Murch, P. Templesmith, and C. J. I. p. a. n. P. G. Dawes, "GB Patent application no. 9125978.8," 1991.
- [6]. D. Rowe and W. Thomas, "Advances in Tooling Materials for Friction Stir Welding,(Cedar Metals Ltd, TWI Cambridge)," in *Materials Congress–Disruptive Technologies for Light Metals, London, April, 2006*.

- [7]. W.-S. Chang, S. R. Rajesh, C.-K. Chun, and H.-J. Kim, "Microstructure and mechanical properties of hybrid laser-friction stir welding between AA6061-T6 Al alloy and AZ31 Mg alloy," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 199-204, 2011.
- [8]. G. Casalino, S. Campanelli, A. Ludovico, N. Contuzzi, and A. Angelastro, "Study of a fiber laser assisted friction stir welding process," in *High power laser materials processing: Lasers, beam delivery, diagnostics, and applications*, 2012, vol. 8239: SPIE, pp. 310-316.
- [9]. B. S. Cota and A. Q. Bracarense, "Hybrid Friction Stir Welding Process with Plasma-assisted of 5052 H34 Aluminum Alloy and SAE 1020 Steel: Material Flow Characterization," *Soldagem & Inspeção*, vol. 26, p. e2612, 2021.
- [10]. C. W. Naji A.M, and G.K.Padhy, "Review Progress and Trends in Ultrasonic Vibration Assisted Friction Stir Welding," *Journal of Harbin Institute of Technology*, vol. 25, pp. 16-42, 2018, doi: 10.11916/j.issn.1005-9113.17105.
- [11]. S. P. Shrivastava, G. Agrawal, S. Nagpal, and A. K. Kachhawaha, "Friction stir welding joint strength analysis on application of thermally preheated aluminium alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 986-993, 2022.
- [12]. K. Sengupta, A. K. Mondal, D. Bose, and D. K. Singh, "Fundamentals of Electric Resistance Friction Stir Welding of Metals: A Review," in *2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE)*, 2020: IEEE, pp. 32-37.
- [13]. V. D. Nguyễn and Đ. B. Nguyễn, *Quy hoạch thực nghiệm trong kỹ thuật*. Khoa học kỹ thuật, 2011.
- [14]. M. Sindhuja and S. Neelakrishnan, "Friction stir welding parameters and their influence on mechanical properties of welded AA6061 and AA5052 aluminium plates," *Materials Research Express*, vol. 8, no. 10, p. 106525, 2021.
- [15]. H. K. Rafi, G. J. Ram, G. Phanikumar, K. P. J. M. Rao, and Design, "Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13," vol. 32, no. 1, pp. 82-87, 2011.

EFFECT OF WELDING PARAMETERS ON THE TENSILE STRENGTH OF RESISTANCE FRICTION STIR WELD ON PRE-HEATED 6061 ALUMINUM ALLOY TUBES

Nguyen Hoang Linh¹

ABSTRACT

In this article, the effects of welding parameters, including tool rotation speed n (rpm), welding speed v (mm/min), and tool shoulder diameter d (mm), on the quality of friction stir welded joints of AA6061 aluminum alloy tubes with preheating by resistance heating (Resistance Friction Stir Welding – RFSW) were investigated. Two aluminum tubes with an outer diameter of 80 mm, a wall thickness of 5 mm, and length of 40 mm were machined at the end surfaces, clamped concentrically on a specially designed fixture, positioned inside and clamped the two sections with nuts. The mandrel is mounted on a stepless transmission system with different determined speed levels. Using the experimental design method, the relationships between welding parameters (rotation speed, welding speed and tool shoulder radius) were established, and the optimal parameter ranges were determined to improve the weld quality.

Keywords: *Friction stir welding, aluminum alloy tube, tensile strength, experimental design.*



¹Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Phạm Văn Đồng;

Email: nhlinh@pdu.edu.vn.