

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ BỀN KÉO CỦA MỐI HÀN MA SÁT KHUẤY CÓ GIA NHIỆT TRƯỚC CHO CÁC KẾT CẤU GÓC BẰNG HỢP KIM NHÔM BIẾN DẠNG

INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE TENSILE STRENGTH OF PREHEATED FRICTION STIR WELDED CORNER JOINTS OF WROUGHT ALUMINUM ALLOYS

HUỶNH HỮU HẬU^{1,a}, HUỶNH THANH TÂM¹, MAI ĐĂNG TUẤN²

¹Trường Cao đẳng Nghề Vĩnh Long

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

^aTác giả liên hệ: HhhauCDNVL2021@gmail.com

Nhận bài (Received): 1/10/2025; Phản biện (Reviewed): 18/10/2025; Chấp nhận (Accepted): 29/10/2025

TÓM TẮT

Hàn ma sát khuấy (FSW) là một công nghệ hàn tiên tiến, nổi bật nhờ khả năng tiết kiệm năng lượng, bảo vệ môi trường và tạo mối nối ở trạng thái rắn với chất lượng cao. Tuy nhiên, khi áp dụng cho các kết cấu góc bằng hợp kim nhôm, phương pháp này thường gặp hạn chế về phân bố nhiệt và dòng chảy vật liệu, dễ phát sinh khuyết tật. Trong nghiên cứu này, phương pháp hàn ma sát khuấy có gia nhiệt trước (HFSW) được áp dụng nhằm cải thiện điều kiện nhiệt và ổn định dòng chảy, giúp nâng cao cơ tính và tính toàn vẹn của mối hàn. Thực nghiệm được thực hiện trên mối hàn góc ngoài hợp kim nhôm AA5083-H116. Bằng phép quy hoạch thực nghiệm, nghiên cứu đã thiết lập phương trình hồi quy thể hiện mối quan hệ giữa các thông số công nghệ (tốc độ quay, vận tốc hàn và đường kính vai), từ đó tối ưu hóa chế độ hàn nhằm đạt được chất lượng mối hàn cao nhất. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học quan trọng để ứng dụng HFSW trong chế tạo và sửa chữa kết cấu hợp kim nhôm trong các ngành công nghiệp trọng điểm như đóng tàu, hàng không và ô tô.

Từ khóa: Hàn ma sát khuấy (FSW), Hàn ma sát khuấy có gia nhiệt TIG hỗ trợ (HFSW), Hợp kim nhôm AA5083.

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is an advanced welding technology that stands out for its energy efficiency, environmental friendliness, and ability to produce high-quality solid-state joints. However, when applied to corner joints of aluminum alloys, conventional FSW often encounters limitations in heat distribution and material flow, which may lead to defects and reduced mechanical performance. In this study, preheated friction stir welding (HFSW) was employed to improve thermal conditions and stabilize material flow, thereby enhancing the mechanical properties and integrity of the weld. Experiments were conducted on external corner joints of AA5083-H116 aluminum alloy. Using

experimental design methodology, a regression model was established to describe the relationship between process parameters (rotational speed, welding speed, and shoulder diameter), enabling the optimization of welding conditions to achieve the highest joint quality. The findings provide a scientific basis for applying HFSW in the fabrication and repair of aluminum alloy structures in critical industries such as shipbuilding, aerospace, and automotive manufacturing.

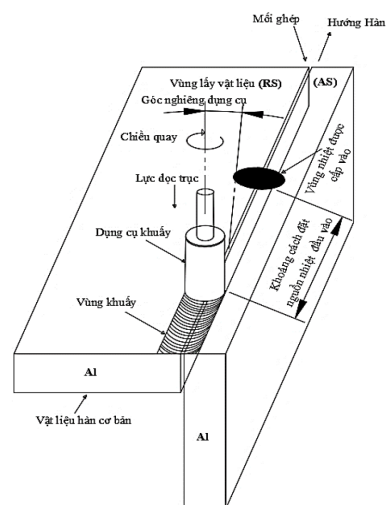
Keywords: Friction Stir Welding (FSW), TIG-assisted Heated Friction Stir Welding (HFSW), AA5083 aluminum alloy.

1. GIỚI THIỆU

Hàn ma sát khuấy (FSW) được Viện Hàn TWI (Anh) phát minh năm 1991 [1], là công nghệ hàn ở trạng thái rắn, liên kết vật liệu nhờ ma sát và biến dạng dẻo thay vì nóng chảy. FSW có thể hàn hầu hết các hợp kim, kể cả hợp kim nhôm 2xxx và 7xxx vốn khó hàn bằng phương pháp hồ quang, cũng như hàn composite và kim loại khác nhau. Mỗi hàn FSW có chất lượng cao, không nứt kết tinh, độ bền lớn và ít khuyết tật.

Tại Việt Nam, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh là đơn vị tiên phong nghiên cứu FSW, với nhiều công trình ban đầu thành công trên hợp kim nhôm [2]. Tuy vậy, khi áp dụng cho kết cấu góc ngoài bằng hợp kim nhôm biến dạng, FSW thường gặp khó khăn do phân bố nhiệt không đồng đều và dòng chảy vật liệu kém ổn định, dễ phát sinh khuyết tật và suy giảm cơ tính.

Một giải pháp được đề xuất là hàn ma sát khuấy có gia nhiệt trước (HFSW), trong đó bổ sung nguồn nhiệt phụ như hồ quang TIG để cải thiện điều kiện nhiệt và ổn định dòng chảy vật liệu [3]. Trong nghiên cứu này, hợp kim nhôm AA5083-H116 được khảo sát với ba thông số công nghệ chính: tốc độ quay, vận tốc hàn và đường kính vai [4],[5]. Bằng quy hoạch thực nghiệm, mối quan hệ giữa thông số hàn và độ bền kéo của mối hàn góc ngoài được thiết lập, từ đó tối ưu chế độ hàn nhằm đạt chất lượng cao nhất.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hàn HFSW (Al-AA5083).

2. NỘI DUNG

2.1. Thực nghiệm

2.1.1. Thiết bị dùng để thực nghiệm

Ứng dụng từ các cơ sở nghiên cứu kỹ thuật lai HFSW [6],[7],[8] do điều kiện thực tế tại nhà xưởng cũng như tối ưu các yêu cầu về kinh tế nên đã chọn thiết bị gia nhiệt cho quá trình hàn FSW là máy hàn TIG hỗ trợ trong suốt quá trình thực nghiệm.



Hình 2. Máy hàn EVO20 TIG 200PACDC PFC LCD E2S23.

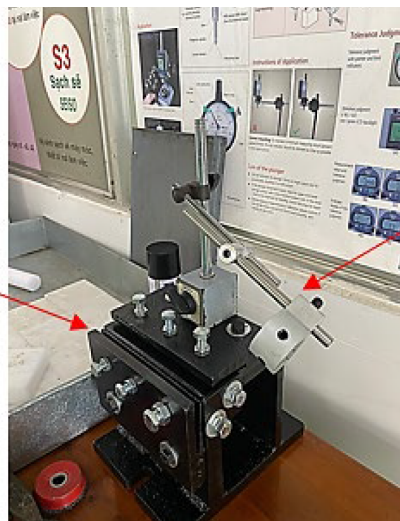
Phôi được định vị và kẹp chặt bằng đồ gá. Đồ gá được thiết kế và chế tạo để dễ thao tác gá lắp phôi, lắp đặt trực tiếp trên bàn máy và phù hợp cho việc thực hiện hàn ma sát khuấy có gia nhiệt trước.

Thực nghiệm thực hiện trên máy phay đứng vạn năng HHM (Vertical Milling Machine HHM) tại xưởng cơ khí trường

Đại học SPKT Vĩnh Long. Truyền động trực chính được điều khiển bằng động cơ biến tần hoặc bước, kích thước bàn 1370×300 mm, tốc độ quay trục chính đứng 75-3600 vg/ph, tốc độ quay trục chính ngang 65-1500 vg/ph, tốc độ tiến dao ngang, dọc 22-380 mm/ph, góc nghiêng trục chính 0-45°, máy có công suất hoạt động khoảng 2 – 3,7 kW (2 – 5 HP).



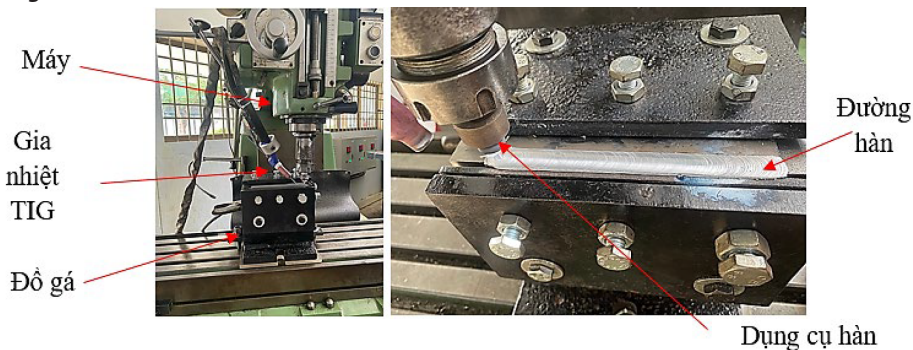
Hình 3. Máy phay vạn năng Vertical Milling Machine HHM



Đồ gá kẹp phôi

Dụng cụ gá mỏ hàn TIG gia nhiệt

Hình 4. Dụng cụ gá kẹp.



Máy
Gia nhiệt TIG
Đồ gá

Đường hàn

Dụng cụ hàn

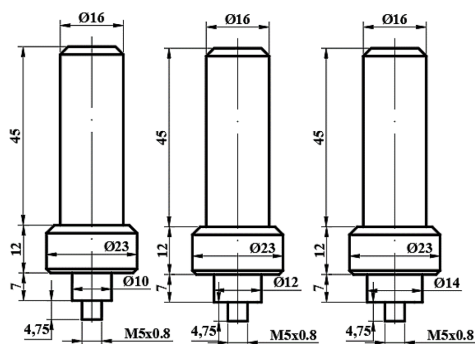
Hình 5. Thực nghiệm hàn FSW có gia nhiệt.

2.1.2. Dụng cụ và phôi hàn

Dụng cụ hàn ma sát khuấy (Friction Stir Tool) là bộ phận then chốt trong FSW, có nhiệm vụ tạo ma sát và áp lực để làm vật liệu chảy dẻo, đồng thời khuấy trộn và tạo liên kết vật liệu mà không cần điện cực như các phương pháp hàn truyền thống.

Trong quá trình hàn FSW, dụng cụ hàn

phải chịu các lực: lực dọc trục, lực hướng kính, lực tiếp tuyến do ảnh hưởng của độ nhớt vật liệu và quán tính dòng chảy [4]. Từ các cơ sở lý thuyết và qua các đề tài nghiên cứu [5], [9], [10], dụng cụ có đầu khuấy hình trụ, có ren (phải), chiều dài đầu khuấy là 4,75 (mm); đường kính đầu khuấy là 5 (mm), đường kính vai là 10, 12, 14 (mm), góc lõm ở vai là 3°.



Hình 6. Bản vẽ dụng cụ hàn.



Hình 7. Dụng cụ hàn SKD61.

Dụng cụ hàn được chế tạo từ thép dụng cụ SKD61 (tiêu chuẩn JIS) hoặc có thể dùng H13 (tiêu chuẩn AISI). Thành phần chính của vật liệu hàn gồm có: Crom (Cr), Mangan (Mn), Molybden (Mo) và Vanadi (V).

Bảng 1 thành phần hóa học của thép SKD61.

| Thành phần hóa học của thép SKD61 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Nguyên tố | C | Cr | Mo | V | Si | Mn | P | S |
| Hàm lượng (%) | 0,39 | 0,15 | 1,4 | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 0,03 | 0,01 |

Mẫu thí nghiệm được thực hiện trên hợp kim nhôm 5083, có kích thước mẫu hàn 150x70x5 mm. Thực hiện thí nghiệm trên 2 tấm kim loại đồng chất, mỗi ghép hàn thuộc liên kết góc và được gia nhiệt trong suốt quá trình hàn.

Bảng 2 Thành phần hóa học của vật liệu hợp kim nhôm 5083.

| Thành phần hóa học (%) | | | | | | | | | |
|------------------------|--------------|------------|-------|------------|------------|---------------|-------|-------------|-------------|
| Nguyên tố | Al | Cu | Mg | Si | Fe | Cr | Mn | Zn | Ti |
| Hàm lượng (%) | 92,4 95,6 | Max 0,1 | 4-4,9 | Max 0,4 | Max 0,4 | 0,05- 0,25 | Max 1 | Max 0,25 | Max 0,15 |

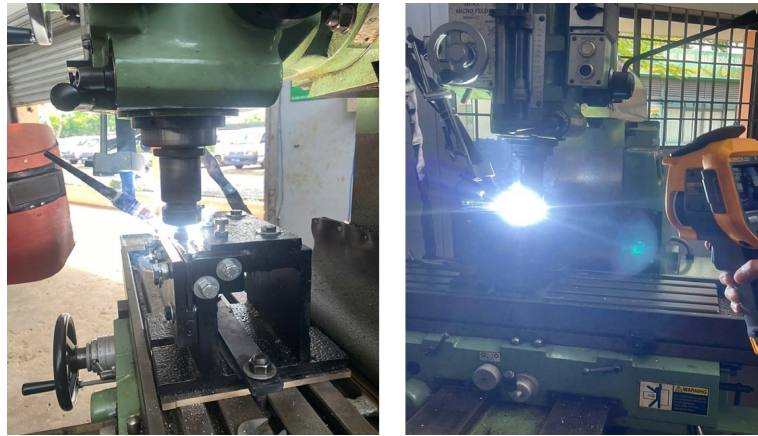
Bảng 3 Đặc tính cơ học của vật liệu hợp kim nhôm 5083.

| Đặc tính cơ học | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| Khối lượng riêng (g/cc) | Ứng suất kéo (MPa) | Giới hạn đàn hồi (MPa) | Nhiệt dung riêng (J/kg.K) | Hệ số dẫn nhiệt (W/m.K) | Độ dẫn dài (%) | Modul đàn hồi (GPa) | Nhiệt độ nóng chảy (°C) |
| 2.66 g/cm ³ | 317 MPa | 228 MPa | 900 (J/kg.K) | 117 (W/m.K) | 16 % | 70 - 71 GPa | 580 - 650 °C |

2.1.3. Phương pháp và chế độ hàn

Thực hiện chọn thông số đầu vào cho gia nhiệt bằng TIG [3],[10] và mô phỏng nhiệt kết hợp với thực nghiệm gia nhiệt trên mẫu thử, các thông số điều chỉnh nhiệt

độ cấp vào TIG gia nhiệt với $U = 12(V)$, $I = 40 (A)$, $t = 6(s)$ khoảng 550 - 570°C thực hiện trên mô phỏng và thực nghiệm thực tế đo được từ 520 - 530°C trên vật liệu nhôm 5083.



Hình 8. Gia nhiệt TIG trong hàn FSW.

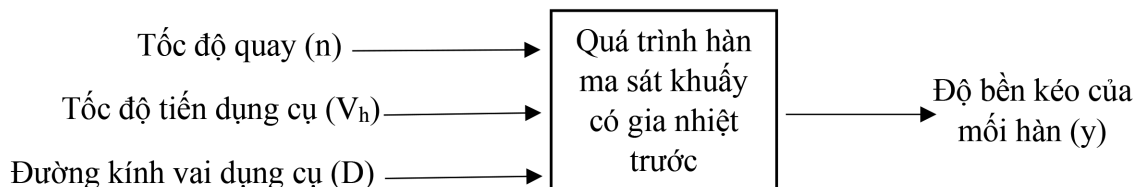
Sự khác biệt về nhiệt độ này là do hiệu suất làm việc của máy còn chưa ổn định, nhiệt độ sinh ra ở nhôm tại điểm TIG truyền đi rất nhanh với nhôm hệ số dẫn nhiệt cao $k = 117$ (W/m.K). Nhiệt độ TIG mô phỏng gia nhiệt cách tâm đầu 20mm khuấy khoảng $T^{\circ} = 196^{\circ}\text{C}$ ở bề mặt phôi, vùng tâm phôi nhận được trong khoảng $150 - 200^{\circ}\text{C}$ nhiệt độ tâm thấp hơn nhiệt bề mặt phôi (do tính chất truyền nhiệt không đối xứng của nhôm), phù hợp với mức độ gia nhiệt của nhôm 5083.

Phôi được định vị bằng đồ gá chuyên dụng, lắp trực tiếp trên bàn máy để thuận tiện cho hàn ma sát khuấy có gia nhiệt trước, với mỗi hàn liên kết góc ngoài. Chế độ hàn gồm ba thông số: tốc độ quay, tốc độ tiến và đường kính dụng cụ; số lần thực nghiệm xác định theo quy hoạch Box-Behnken. Thông số cơ sở được chọn theo [5], [9] và thử nghiệm thăm dò gồm $n = 900$ vòng/ph, $V_h = 115$ mm/ph, $D = 12$ mm, đầu khuấy trụ có ren, góc nghiêng 2° và độ sâu nhún vai 0,15 mm được giữ cố định trong suốt quá trình.



Hình 9. Liên kết hàn góc đã được thực hiện.

Với 3 thông số nghiên cứu, mô hình bài toán có dạng:



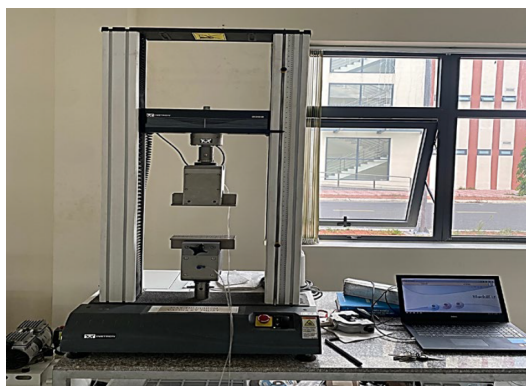
Hình 10. Mô hình bài toán hộp đen.

Miền quy hoạch của các thông số đầu vào như sau: tốc độ quay n : 800; 900; 1000 (vg/ph),

tốc độ tiến dụng cụ V_h : 100; 115; 130 (mm/ph), đường kính vai dụng cụ D : 10; 12; 14 (mm).

2.1.4. Phương pháp kiểm nghiệm

Các mẫu thử kéo được cắt bằng máy cắt dây, làm sạch bavia và gia công theo tiêu chuẩn ASTM E08. Thí nghiệm đo độ bền kéo được thực hiện trên máy Instron 3369 tại Phòng dịch vụ kiểm tra vật liệu, Trường ĐH Xây Dựng Miền Tây. Tốc độ kéo được thiết lập bằng phần mềm Bluehill LE trong dải 0,0005–500 mm/min để đảm bảo tải tăng đều.



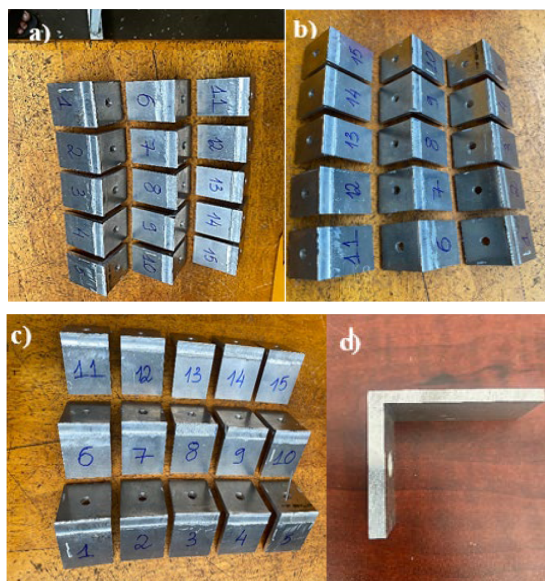
Hình 11. Máy Instron 3369.

2.2. Kết quả và thảo luận

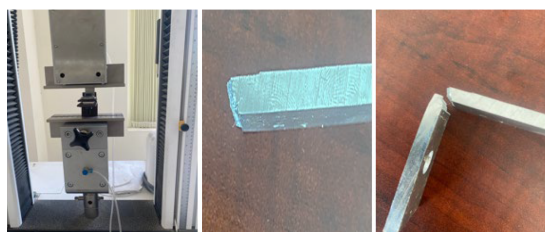
Thông số hàn và giá trị trung bình độ bền kéo được trình bày trong Bảng 4. Mỗi mối hàn được cắt tại 3 vị trí (đầu, giữa, cuối) để lấy mẫu thử kéo σ_k và tính giá trị trung bình, đảm bảo đánh giá chính xác. Kết quả cho thấy thông số công nghệ ảnh hưởng phi tuyến đến hàm mục tiêu, do đó tiến hành quy hoạch thực nghiệm toàn phần.

Bảng 4. Kết quả kiểm tra độ bền kéo khi n , V_h , D thay đổi.

| STT | Tốc độ quay (v/ph) | Vận tốc hàn (mm/ph) | Đường kính vai (mm) | Kết quả thí nghiệm 1 (Mpa) | Kết quả thí nghiệm 2 (Mpa) | Kết quả thí nghiệm 3 (Mpa) | Giá trị TB (Mpa) |
|-----|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| | n | v | D | y_1 | y_2 | y_3 | Y |
| 1 | 800 | 100 | 12 | 250,03 | 249,12 | 248,63 | 249,26 |
| 2 | 1000 | 100 | 12 | 233,97 | 234,85 | 231,83 | 233,55 |
| 3 | 800 | 130 | 12 | 257,22 | 258,45 | 260,1 | 258,59 |
| 4 | 1000 | 130 | 12 | 244,54 | 245,73 | 246,65 | 245,64 |



a) Đầu, b) Giữa, c) Cuối đoạn hàn, d) Góc cắt mẫu
Hình 12. Các mẫu hàn sau khi cắt ở các vị trí.



Hình 13. Mẫu sau khi kéo đứt.

Với số liệu σ_k đo được thấy rằng các thông số chế độ hàn ảnh hưởng phi tuyến đến hàm mục tiêu từ đó phải tiến hành quy hoạch thực nghiệm toàn phần. Kết quả kiểm tra độ bền kéo khi n , V_h , D thay đổi (bảng 4).

| STT | Tốc độ quay (v/ph) | Vận tốc hàn (mm/ph) | Đường kính vai (mm) | Kết quả thí nghiệm 1 (Mpa) | Kết quả thí nghiệm 2 (Mpa) | Kết quả thí nghiệm 3 (Mpa) | Giá trị TB (Mpa) |
|-----|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| | n | v | D | y_1 | y_2 | y_3 | Y |
| 5 | 800 | 115 | 10 | 263,56 | 265,83 | 263,6 | 264,33 |
| 6 | 1000 | 115 | 10 | 248,39 | 248,17 | 245,52 | 247,36 |
| 7 | 800 | 115 | 14 | 242,87 | 243,54 | 257,74 | 248,05 |
| 8 | 1000 | 115 | 14 | 235,44 | 234,02 | 236,38 | 235,28 |
| 9 | 900 | 100 | 10 | 253,67 | 251,49 | 252,25 | 252,47 |
| 10 | 900 | 130 | 10 | 264,32 | 261,05 | 262,25 | 262,54 |
| 11 | 900 | 100 | 14 | 245,58 | 244,04 | 239,29 | 242,97 |
| 12 | 900 | 130 | 14 | 252,63 | 251,72 | 247,63 | 250,66 |
| 13 | 900 | 115 | 12 | 252,76 | 251,82 | 265,25 | 256,61 |
| 14 | 900 | 115 | 12 | 255,67 | 256,03 | 256,24 | 255,98 |
| 15 | 900 | 115 | 12 | 255,73 | 253,27 | 260,26 | 256,42 |

Các phép biến đổi và tính toán phân tích sẽ được giải quyết bằng phần mềm Minitab, ta nhận thấy với mức ý nghĩa $p = 0.05$, chúng ta loại được các hệ số D^2 ,

$n*v$, $n*D$, $v*D$ với các P-value > 0.05 . Phương trình liên hệ giữa 3 thông số hàn và chất lượng mối hàn như sau:

$$y = -374.3 + 1.080n + 3.395v - 3.109D - 0.000641n^2 - 0.01334v^2 \quad (1.1)$$

Bảng 5. Phân tích phương sai ANOVA phương trình hồi quy.

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 9 | 3348,66 | 372,07 | 35,17 | 0,000 |
| Linear | 3 | 2782,39 | 927,46 | 87,66 | 0,000 |
| n | 1 | 1278,96 | 1278,96 | 120,88 | 0,000 |
| v | 1 | 575,65 | 575,65 | 54,41 | 0,000 |
| D | 1 | 927,78 | 927,78 | 87,69 | 0,000 |
| Square | 3 | 543,08 | 181,03 | 17,11 | 0,000 |
| n*n | 1 | 466,68 | 466,68 | 44,11 | 0,000 |
| v*v | 1 | 105,48 | 105,48 | 9,97 | 0,003 |
| D*D | 1 | 13,18 | 13,18 | 1,25 | 0,272 |
| 2-Way Interaction | 3 | 23,19 | 7,73 | 0,73 | 0,541 |
| n*v | 1 | 5,71 | 5,71 | 0,54 | 0,467 |
| n*D | 1 | 13,23 | 13,23 | 1,25 | 0,271 |
| v*D | 1 | 4,25 | 4,25 | 0,40 | 0,530 |

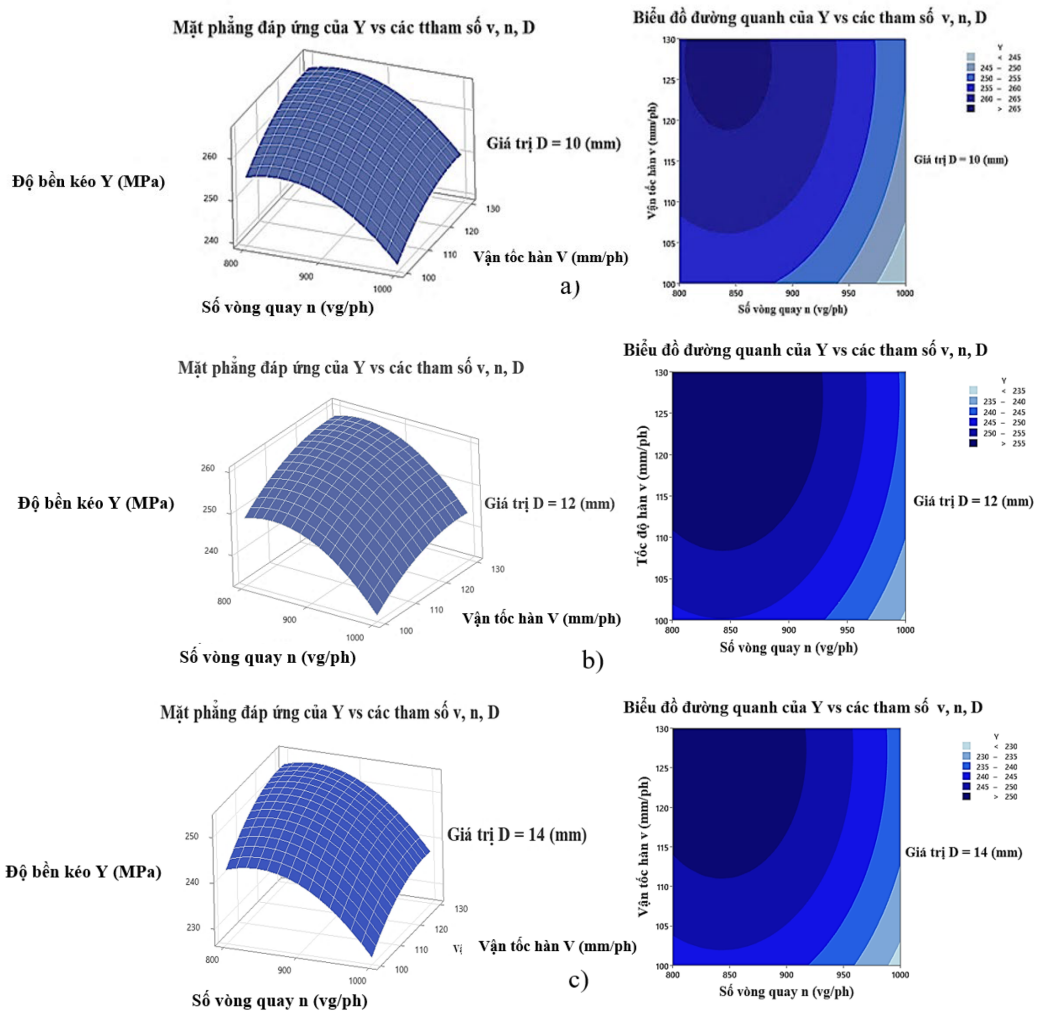
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-------------|----|---------|--------|---------|---------|
| Error | 35 | 370,31 | 10,58 | | |
| Lack-of-Fit | 3 | 23,73 | 7,91 | 0,73 | 0,541 |
| Pure Error | 32 | 346,58 | 10,83 | | |
| Total | 44 | 3718,97 | | | |

Ta kiểm tra tiếp độ phù hợp của mô hình bằng các thông số R^2 , R^2 hiệu chỉnh, R^2 dự đoán. Các thông số này có giá trị lớn hơn 85% nghĩa là mô hình phù hợp với dữ liệu đầu ra.

Bảng 6. Bảng kiểm tra tiếp độ.

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---------|--------|-----------|------------|
| 3,22920 | 89,06% | 87,66% | 85,73% |

Từ đây, các biểu đồ Surface plot và Contour plot trên Minitab được xây dựng để thể hiện mối quan hệ giữa từng cặp thông số hàn và hàm mục tiêu, qua đó đánh giá ảnh hưởng của ba yếu tố công nghệ gồm tốc độ quay (n), tốc độ tiến dụng cụ (Vh) và đường kính vai dụng cụ (D) đến độ bền mối hàn FSW.



Hình 14. Mặt phẳng đáp ứng của y với đến hàm mục tiêu.

- Dựa vào các đồ thị ta nhận thấy:

a) Khi đường kính vai dụng cụ giữ cố định ở mức 10 mm, bề mặt hồi quy cho thấy độ bền kéo Y tăng dần khi tốc độ quay n tăng từ 800 \rightarrow 950 (vg/ph) kết hợp với vận tốc hàn v trong khoảng 120 \sim 130 (mm/ph). Giá trị cực đại Y đạt khoảng $\bar{\sigma}_k = 265$ (Mpa).

Nếu n quá thấp (< 850 vg/ph) hoặc quá cao (> 1000 vg/ph), độ bền kéo đều có xu hướng giảm, do mất cân bằng giữa nhiệt đầu vào và tốc độ dịch chuyển, dẫn đến cấu trúc hàn không đồng nhất. Tương tự, v thấp hơn 100 (mm/ph) hoặc vượt quá 130 (mm/ph) cũng làm Y suy giảm. Điều này chứng tỏ tại $D = 10$ (mm), tổ hợp thông số tối ưu là $n \approx 900 - 950$ (vg/ph) và $v \approx 115 - 125$ (mm/ph).

b) Xu hướng biến đổi Y tương tự nhưng mức cực đại giảm nhẹ, chỉ đạt khoảng $\bar{\sigma}_k = 255$ (Mpa). Vùng tối ưu dịch chuyển sang $n \approx 880 - 940$ (vg/ph) và $v \approx 105 - 110$ (mm/ph).

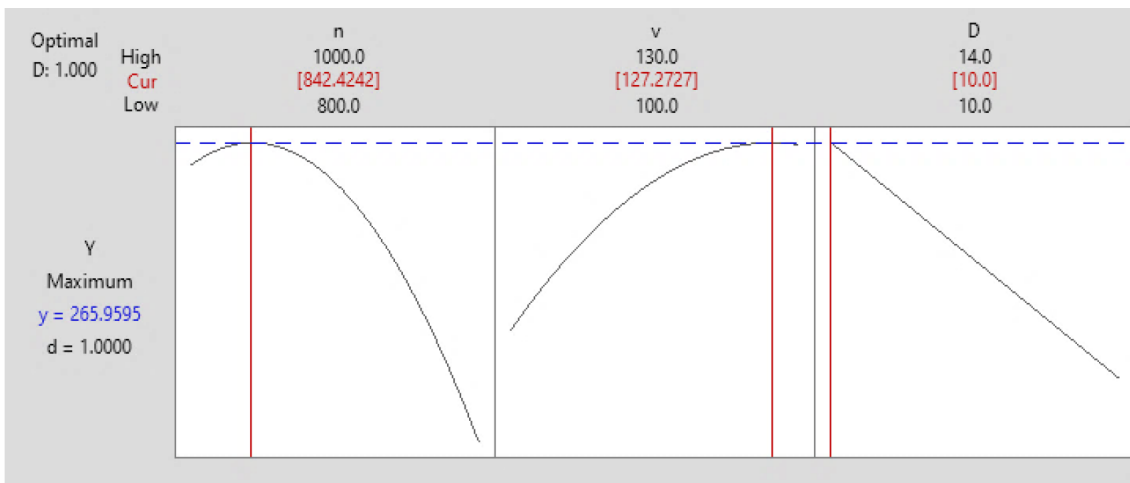
Độ bền kéo suy giảm khi D tăng từ 10 \rightarrow 12 (mm), nguyên nhân là diện tích tiếp xúc lớn hơn dẫn đến sự phân tán nhiệt không đồng đều, đồng thời ma sát tăng làm biến dạng dẻo kém đồng nhất hơn.

c) Bề mặt hồi quy cho thấy độ bền kéo tối đa chỉ đạt khoảng $\bar{\sigma}_k = 250$ (Mpa), thấp hơn đáng kể so với các trường hợp trước. Vùng tối ưu bị thu hẹp lại, tập trung ở $n \approx 900$ (vg/ph) và $v \approx 110$ (mm/ph). Ngoài vùng này, Y nhanh chóng giảm xuống dưới $\bar{\sigma}_k = 240$ (Mpa).

Vai trò của nhiệt TIG (520–530°C) trước giúp vật liệu AA5083-H116 đạt trạng thái ổn định duy trì hữu ích nhiệt cho cấp cho vùng khuấy, giảm lực xuyên và hạn chế các khuyết tật trong vùng tiến – vùng lùi những điều kiện nhiệt cơ sở trên cho thấy yếu tố cần giảm số vòng quay (n) và tăng tốc độ hàn (v) khi có gia nhiệt trước trong hàn ma sát là tối ưu nằm trong khoảng (0,7 - 0,8 T_m) các chế độ hàn sinh ra đủ lượng nhiệt để làm dẻo vật liệu gia công biến dạng áp lực.

Thông số tối ưu xác định trong điều kiện HFSW: n ở mức thấp hơn so với FSW truyền thống (khoảng 850 \sim 900 vg/ph), v ở mức cao (115 \sim 130 mm/ph), $D = 10$ (mm) cho giá trị y cực đại và ổn định nhất.

Phần mềm Minitab tính toán thông số tối ưu, các thông số này sẽ ảnh hưởng đến việc cho ra những thông số để có độ bền kéo tốt nhất



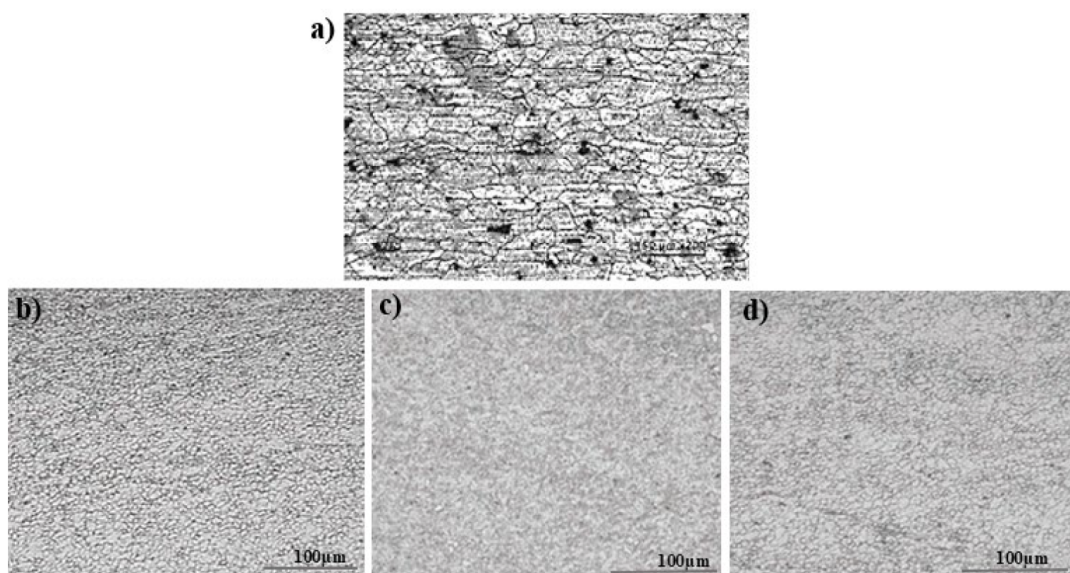
Hình 15. Tối ưu các thông số hàn.

Qua đó, khẳng định bộ số công nghệ tối ưu cho nghiên cứu khoa học này là: tốc độ quay $n = 842,42$ (vg/ph), vận tốc hàn $v = 127,27$ (mm/ph), đường kính vai dụng cụ $D = 10$ mm, với giá trị độ bền kéo $y = 265,95$ (MPa).

Kết quả phân tích cho thấy, với bộ thông số tối ưu gồm tốc độ quay $n = 842,42$ vg/ph, tốc độ tiến $v = 127,27$ mm/ph và đường kính vai $D = 10$ mm, vùng khuấy nhận được mức năng lượng nhiệt vừa đủ để vật liệu đạt trạng thái dẻo hoàn toàn, không xảy ra hiện tượng quá nhiệt hoặc thô biên hạt. Ở chế độ này, tốc độ quay thấp giúp giảm ma sát cục bộ, hạn chế sự phát sinh nhiệt tập trung gây tăng trưởng hạt thô, trong khi tốc độ hàn cao đảm bảo

tốc độ chuyển động đủ lớn để duy trì phân bố nhiệt đồng đều dọc theo môi hàn. Đồng thời, đường kính vai nhỏ ($D = 10$ mm) tạo ra vùng ảnh hưởng nhiệt hẹp, rút ngắn thời gian lưu nhiệt, từ đó giảm xu hướng phát triển hạt sau tái kết tinh.

Hạt trong kim loại mối hàn có kích thước nhỏ, đồng đều và mịn hơn rõ rệt so với kim loại cơ bản và được tái kết tinh hoàn toàn, phản ánh sự tương tác hiệu quả giữa biến dạng dẻo mạnh và nguồn nhiệt ổn định. Các biên hạt rõ nét và hướng kết tinh đồng nhất chứng tỏ dòng vật liệu trong vùng khuấy đạt trạng thái ổn định. Hình 16 thể hiện rõ tổ chức tế vi của mối hàn có độ bền kéo cao nhất, quan sát ở độ phóng đại 100 lần cùng với hình ảnh của kim loại cơ bản.



a) Kim loại cơ bản b) Vùng tiến c) Vùng tâm d) Vùng lùi

Hình 16. Các vùng tổ chức kim loại mối hàn.

Vùng ảnh hưởng nhiệt tại phía vùng tiến và vùng lùi, cấu trúc hạt có sự khác biệt đáng kể; xuất hiện hiện tượng hạt xoay một góc nhất định dưới tác động của lực khuấy, chiều quay dụng cụ và hướng tản nhiệt. Sự hình thành cấu trúc hạt mịn và đồng nhất tại vùng tâm mối hàn là

nguyên nhân trực tiếp giúp mối hàn đạt độ bền kéo cao nhất (265,95 MPa), tương đương 84% độ bền của vật liệu nền. Cấu hình này bảo đảm phân bố ứng suất đồng đều khi chịu tải, hạn chế nứt vi mô, và chứng minh rằng bộ thông số tối ưu đã đạt được sự cân bằng hợp lý giữa năng lượng

hiệu suất và biến dạng cơ học trong quá trình HFSW.

3. KẾT LUẬN

Với bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của việc thay đổi các thông số trong quá trình hàn ma sát khuấy: tốc độ quay (n), tốc độ tiến dụng cụ (V_h), đường kính vai dụng cụ (D) có ảnh hưởng đến độ bền kéo khi thực hiện có gia nhiệt trước cho mỗi hàn ma sát khuấy.

Kết quả thử kéo cho thấy độ bền mỗi hàn dao động trong khoảng 233,55 ~ 265,95 MPa, đạt 74–84% so với độ bền kéo của hợp kim nhôm 5083 ($\sigma_k = 317$ MPa). Trong đó, mẫu cao nhất đạt 265,95 MPa, tương đương 84% kim loại cơ bản. Phân tích hồi quy và đồ thị đáp ứng 3D cho thấy:

- Khi $D = 10$ (mm), độ bền kéo tăng khi n tăng từ 800 \rightarrow 950 (vg/ph) và v trong

khoảng 115 – 125 (mm/ph), đạt cực đại \approx 265 MPa.

- Khi $D = 12$ (mm), độ bền cực đại chỉ còn \approx 255 MPa tại $n = 880 \sim 940$ (vg/ph) và $v \approx 105 - 110$ (mm/ph).

- Khi $D = 14$ (mm), độ bền giảm xuống \approx 250 (Mpa), vùng tối ưu bị thu hẹp.

Từ phân tích tối ưu bằng phần mềm Minitab, bộ thông số tối ưu xác định cho quá trình HFSW là: $n = 842,42$ (vg/ph), $v = 127,27$ (mm/ph), $d = 10$ (mm), cho giá trị bền kéo trung bình 265,95 MPa ($\approx 84\% \sigma_k$). So sánh với nghiên cứu trước [9] không có gia nhiệt (độ bền tối đa chỉ đạt 60% σ_k), có thể khẳng định rằng gia nhiệt TIG đã giúp nâng cao đáng kể hiệu quả hàn, đồng thời cho phép vận hành ở tốc độ quay thấp và vận tốc hàn cao hơn mà vẫn đảm bảo chất lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W. M. Thomas et al. (1991), “Friction Stir Butt Welding”, GB Patent Application 9125978.8.
- [2]. W.Tang, X.GuO và Nunes (1998) “Heat input and Temperature Distribution in FSW”, J.mater, Process, Manuf.Sci, Vol 7.
- [3]. H. Bang, H. S. Bang, J. H. Hong, G. H. Jeon, & G. S. Kim, “Effect of Tungsten-Inert-Gas Preheating on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Al Alloy and Mild Steel,” *Strength of Materials*, vol. 48, pp. 152–159, 2016.
- [4]. R. Palanivel & P. Koshy Mathews, “Prediction and optimization of process parameter of friction stir welded AA5083-H111 aluminum alloy using response surface methodology,” *Journal of Central South University*, vol. 19, no. 1, pp. 1–8, 2012.
- [5]. Mai Đăng Tuấn, “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp hàn ma sát khuấy cho các kết cấu dạng tấm bằng hợp kim nhôm”, Luận văn thạc sĩ, Trường ĐHBK TPHCM, TP.HCM, 2008.
- [6]. Zaeh, M. F., & Gebhard. *Preheating assisted friction stir welding of high-strength aluminium alloys*. Production Engineering, 1(4), 343–347,2007.
- [7]. Riichi, S., Takehiko, T., Susumu, H., Naoki, Y., & Yuuta, K. On Preheating Effect for Friction Stir Welding of Aluminum Alloy—A Feasibility Study of Friction Stir

- Welding with Heating of Aluminum Alloy (Report 1). Journal of the Japan Welding Society, 24(3), 281–286, 2006.
- [8]. T. Takahashi, Y. Sato, Y. Kaneko, R. Suzuki, J. Kobayashi, and S. Hioki, “Numerical analysis of pre-heating by solid friction process: a study on friction stir welding with heating,” *Welding International*, vol. 24, no. 8, pp. 620–626, Aug. 2010.
- [9]. Huỳnh Thanh Tâm, Mai Đăng Tuấn, Lưu Minh Phương, “*Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến cơ tính và tổ chức mối hàn ma sát khuấy cho các kết cấu góc bằng hợp kim nhôm biến dạng*”, Luận văn thạc sĩ, Đại Học SPKT Vĩnh Long, 2021.
- [10]. Trương Minh Nhật, “*Nghiên cứu hàn kết cấu dạng tấm phẳng giữa thép không gỉ 304 và hợp kim nhôm 6061 bằng phương pháp ma sát khuấy*”, Luận văn thạc sĩ, Trường ĐHBK TPHCM, TP.HCM, 2018.