

# ĐỒNG TÂM TRỤC VÀ RUNG ĐỘNG TRÊN MÁY HÀN MA SÁT QUAY

## EVALUATION OF SHAFT CONCENTRICITY AND VIBRATION ON ROTARY FRICTION WELDING MACHINE

Tạ Văn Rảnh<sup>1</sup>, Lê Hồng Kỳ<sup>1,\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.369>

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về cân chỉnh đồng tâm trục và rung động trong quá trình hàn ma sát quay trên thiết bị hàn VLUTE A01. Sai lệch độ đồng tâm trục của máy hàn ma sát VLUTE A01 chủ yếu là theo phương đứng, sai lệch theo phương ngang thấp, nhưng khoảng sai lệch khá lớn. Các dao động đo được ở các trạng thái khác nhau được nghiên cứu trong thực nghiệm. Trong đó, trọng tâm là nguồn gốc của các dao động hình thành trong quá trình hàn. Biểu đồ cho thấy, mức độ rung động xảy ra trong quá trình hàn ma sát quay. Khi hai chi tiết hàn bắt đầu tiếp xúc, rung động tăng, giảm đột ngột. Các giai đoạn còn lại của quá trình hàn các giá trị rung động đo được đều khá ổn định, nằm trong phạm vi cho phép.

**Từ khóa:** Đồng trục; hàn ma sát quay; rung động.

### ABSTRACT

This article presents the results of research on shaft alignment and vibration during the rotary friction welding process on the VLUTE A01 welding equipment. The shaft concentricity error of the VLUTE A01 friction welding machine is mainly vertical, the horizontal error is low, but the error range is quite large. The measured oscillations in different states are studied experimentally. In particular, the focus is on the origin of the vibrations formed during the welding process. The graph shows the level of vibration that occurs during the rotary friction welding process. When two welded parts begin to contact, the vibration increases and decreases suddenly. In the remaining stages of the welding process, the measured vibration values are quite stable, within the allowable range.

**Keywords:** Alignment; rotary friction welding; vibration.

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh Long

\*Email: [kylh@vlute.edu.vn](mailto:kylh@vlute.edu.vn)

Ngày nhận bài: 12/9/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/11/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

### 1. GIỚI THIỆU

Trong công nghiệp hiện nay, hàn ma sát quay đã được sử dụng để nối các vật liệu kim loại cũng như kim loại với

phi kim loại. Tuy vậy, vẫn còn những thách thức mới đối với hàn ma sát quay chưa được nghiên cứu [1]. M. F. Zaeh, A. Poehler đã xem xét các rung động trong hàn ma sát quay để xác định các khả năng và phương pháp cũng như tránh hư hỏng cấu trúc của bộ phận trong quá trình sản xuất [1, 2].

Trong những năm gần đây, một số phương pháp giảm chấn trên thiết bị hàn cũng như trong quá trình hàn ma sát quay đã được phát triển. Các thử nghiệm rung động đã được thiết lập. Trong nghiên cứu của họ, Daniel Soares de Alcantara và Pedro Paulo Balestrassi đã mô tả chi tiết thí nghiệm có thể đo và định lượng các rung động. Sau đó, dữ liệu đo được sử dụng để phát triển phương pháp tính toán độ rung theo phương pháp phân tích [3].

M. M. Attallah đã giải thích việc áp dụng kỹ thuật phương pháp tính toán độ rung theo phương pháp phân tích và lựa chọn các thông số quy trình cũng như các phương pháp toán học, phân tích số khác nhau để mô hình hóa các trường nhiệt và sự phát triển ứng suất dư [4].

Mamdouh I. El-Elamy đã sử dụng kỹ thuật trong phân tích thực nghiệm (phương pháp chức năng đáp ứng tần số và phương pháp đường trễ xung phản xạ từ) để mô tả mối hàn ma sát [5].

Trong các nghiên cứu, các tín hiệu rung được tạo ra trong giai đoạn ma sát và rèn được đo trên phần đứng yên của kết cấu để xác định ảnh hưởng của các biến được điều khiển đến các đặc tính thống kê theo thời gian [3].

Trên máy hàn ma sát quay, sai lệch độ đồng trục giữa cụm di trượt so với cụm trục chính là nguyên nhân cơ bản gây ra rung động của hệ thống. Hơn thế, mức độ sai lệch độ đồng trục lớn hơn mức cảnh báo sẽ không cho phép thực hiện mối hàn ma sát quay. Rung động cũng vậy, nếu giá trị giai đoạn bắt đầu ma sát vượt quá tiêu chuẩn cho phép với bất kỳ trường hợp nào cũng không đảm bảo chất lượng mối hàn. Trước đây, ở Việt Nam việc nghiên cứu, đánh giá đồng thời mức độ đồng trục và rung động

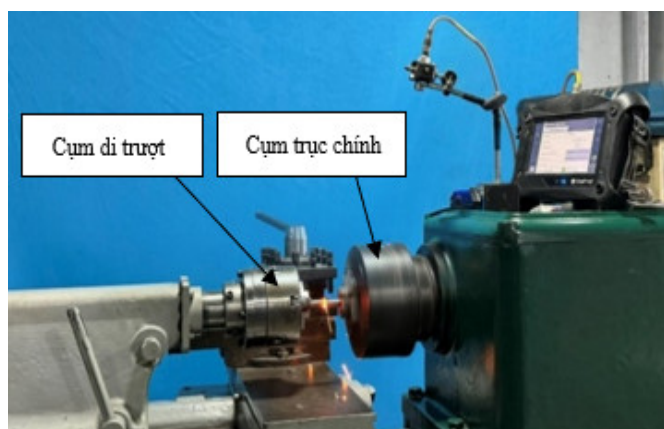
đối với thiết bị hàn ma sát quay cải tiến từ máy tiện chưa được xem xét. Nghiên cứu này chủ yếu tập trung đo kiểm thực tế và cân chỉnh đồng tâm trục, rung động trong quá trình hàn trên thiết bị hàn ma sát quay cải tiến VLUTE A01.

## 2. THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM

### 2.1. Thiết bị hàn ma sát quay

Máy hàn ma sát quay VLUTE A01 được cải tiến từ máy tiện Yamazaki CT800 do nhóm nghiên cứu thực hiện (hình 1). Nhìn chung, ngoài hệ thống điều khiển tự động quá trình hàn thì máy hàn ma sát quay VLUTE A01 có các thành phần cơ bản tương tự máy tiện vạn năng. Các thông số kỹ thuật cơ bản gồm: số vòng quay trục chính (tối đa 2000 vòng/phút); đường kính chi tiết hàn lớn nhất 15mm (phôi đặc), 30mm (phôi ống, rỗng, dày đến 5mm); áp lực (lớn nhất khi rèn đạt tới 200MPa). Trong đó, áp lực ma sát, áp lực rèn và thời gian ma sát có thể cài đặt tự động.

Hàn ma sát quay gồm hai giai đoạn chính là: giai đoạn ma sát (gia nhiệt) và giai đoạn rèn (hàn). Trong công nghiệp, ngay sau quá trình hàn ma sát là quá trình gia công hoàn thiện (thường là nguyên công tiện, cũng có thể bao gồm nguyên công mài). Các thông số chính trong hàn ma sát quay là tốc độ quay, áp lực và thời gian hàn.



Hình 1. Nguyên lý hàn ma sát quay và thiết bị VLUTE A01

### 2.2. Thiết bị đo

#### 2.2.1. Thiết bị cân đồng tâm trục



a) Sai lệch ngoài phạm vi cho phép      b) Sai lệch trong phạm vi cho phép

Hình 2. Thiết bị cân đồng tâm trục Fixturlaser NXA Pro [6]

Trong nghiên cứu này độ đồng trục giữa cụm trục chính và cụm di trượt dọc được đo kiểm và cân chỉnh bằng Thiết bị cân đồng tâm trục Fixturlaser NXA Pro (hình 2) [6].

Fixturlaser NXA Pro có thể đo và cân chỉnh tâm trục theo phương ngang, phương đứng, đặc biệt cân trục theo chuỗi (dùng để cân hai hay nhiều máy kết nối với nhau thành một chuỗi). Ứng dụng công nghệ laser để xác định mức độ đồng trục bằng một hoặc hai đường thẳng, trong đó chùm tia laser được sử dụng làm tham chiếu. Phép đo 3 điểm tạo ra một mặt phẳng sử dụng bằng máy Fixturlaser NXA Pro. Fixturlaser NXA Pro cho phép cung cấp các giá trị trực tiếp trong quá trình đo và điều chỉnh trực tiếp đồng thời theo thời gian thực (Chế độ Live), hỗ trợ cân cảnh nhanh. Kết quả có độ phân giải và độ chính xác theo  $\mu\text{m}$ . Độ lệch góc, độ lệch trục theo tiêu chuẩn của nhà sản xuất và có thể setup theo tiêu chuẩn của nhà máy để xuất. Có thể xử lý các kết quả đo đã lưu để chọn tham chiếu tốt nhất.

#### 2.2.2. Thiết bị đo rung động

Biên độ rung động đo được về bản chất là hoàn toàn ngẫu nhiên nhưng có thể thay đổi có tính chu kỳ và có thể dự đoán được. Phương pháp đơn giản nhất là tính toán giá trị năng lượng trung bình của tín hiệu mà không tham chiếu đến phổ tần suất của nó. Đây thực chất là một phép đo “dải tần số rộng”.

Nghiên cứu này sử dụng thiết bị đo rung chuyên nghiệp Extech 407860 (Vibration Meter 407860) (hình 4). Thông số kỹ thuật, phạm vi, độ phân giải như dưới đây [7]:

- Phạm vi: vận tốc rung: 200mm/s, gia tốc rung: 200m/s<sup>2</sup>, dịch chuyển rung: 2mm.
- Cảm biến rung động từ xa (khoảng 1m), giải tần số rộng: 10Hz - 1kHz.
- Ghi nhận kết quả từ màn hình hiển thị.

### 2.3. Đo kiểm, cân chỉnh đồng trục máy hàn ma sát quay VLUTE A01

- Xác định trục cụm trục chính làm chuẩn, tiến hành kiểm tra đồng trục của cụm di trượt theo phương đứng.

Gắn cảm biến M và S trên mâm cặp, cách mặt đầu ống trục chính 40mm, bộ thu gá đặt trên mâm cặp cách mặt đầu nòng cụm di trượt 150mm, khoảng cách giữa hai bộ thu phát là 200mm, khoảng cách giữa hai ổ đỡ trục chính là 260mm. Kiểm tra góc và cao độ của hai cảm biến. Hai cảm biến không được lệch nhau quá 2 độ, và cao độ không được lệch nhau quá 0,2 theo toạ độ trọng trường.

- Khởi động ứng dụng cân chỉnh trục đứng, hiệu chuẩn chùm tia laser, quan sát màn hình và đọc giá trị độ lệch theo phương đứng (hình 3a).

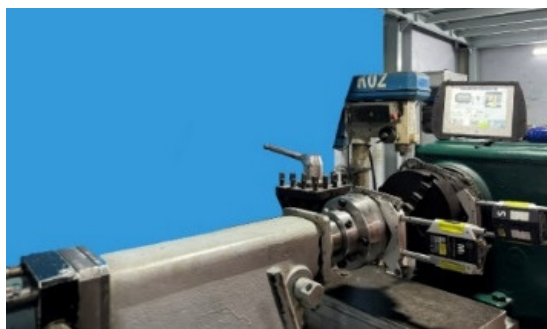
- Tiến hành cân chỉnh mâm cặp cụm di trượt theo phương đứng (lên, xuống) cho tới khi đạt độ đồng trục cho phép như hình 2b, hình 3a. Lưu kết quả.

- Lặp lại các bước trên theo phương ngang.

- Tiến hành cân chỉnh ụ động cụm di trượt theo phương ngang (trái, phải) cho tới khi đạt độ đồng trục cho phép như hình 2b, hình 3b. Lưu kết quả.



a) Theo phương đứng

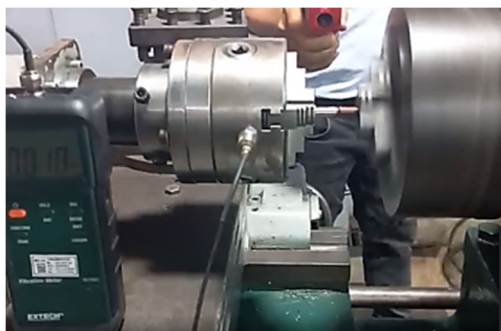


b) Theo phương ngang

Hình 3. Đo kiểm và cân chỉnh độ đồng trục máy hàn ma sát quay VLUTE A01

#### 2.4. Đo kiểm rung động trên máy VLUTE A01

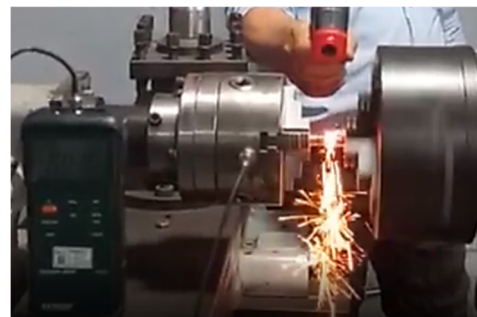
Trước khi đánh giá rung động trong quá trình hàn ma sát, cũng với thiết bị Extech 407860 nhóm nghiên cứu đã thực hiện kiểm tra nguồn rung động bên ngoài tác động lên thiết bị, kiểm tra rung động của thiết bị trước quá trình hàn. Theo tiêu chuẩn ISO/TR 230-8:2010 thì các giá trị đo được đều sát nằm trong phạm vi cho phép G2,5.



a) Khi hai chi tiết chưa tiếp xúc



b) Bắt đầu giai đoạn ma sát



c) Giai đoạn ma sát



d) Kết thúc giai đoạn rèn

Hình 4. Quá trình đo kiểm rung động bằng thiết bị Extech 407860

Đo kiểm rung động trong quá trình hàn trên thiết bị VLUTE A01 được thực hiện qua 6 giai đoạn, mỗi giai đoạn thực hiện 3 lần đo cách nhau 1s. Các giai đoạn cơ bản của quá trình đo rung động như hình 4. Tổng hợp kết quả đo như bảng 1.

#### 2.5. Thực nghiệm kiểm chứng

##### 2.5.1. Vật liệu và đối tượng phôi hàn

- Đối tượng thử nghiệm: hàn hai chi tiết cùng vật liệu thép C45 (Vật liệu phổ biến và dễ tìm)

- Phôi hàn: 2 bộ, mỗi bộ 8 mẫu (16 phôi hàn) có kích thước  $\varnothing 12 \times 70\text{mm}$  và một mẫu gốc ( $\varnothing 12\text{mm} \times 140\text{mm}$ ).

##### 2.5.2. Tiến hành thí nghiệm

Các thông số hàn ma sát bao gồm: tốc độ quay  $n$ ; áp lực ma sát  $F_{fr}$  và áp lực rèn  $F_{fro}$ ; thời gian ma sát  $t_{fr}$  và thời

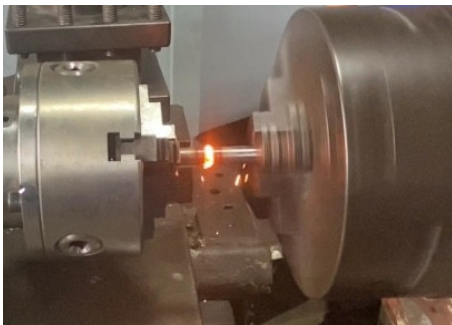


gian rèn  $t_{fro}$ . Ba thông số liên quan trực tiếp đến quá trình gia nhiệt và vùng chảy dẻo có tính chất quyết định chất lượng mối hàn được lựa chọn làm thông số đầu vào thực nghiệm là tốc độ quay, áp lực ma sát và thời gian ma sát. Các thông số còn lại (áp lực rèn và thời gian rèn) chủ yếu cố định mối hàn [11].

Tham khảo từ các công trình nghiên cứu đối với vật liệu gắn với thép C45 [8, 9] và các thử nghiệm thăm dò trước đó, phạm vi thực nghiệm gồm tốc độ quay  $n$  ( $1100 \div 1600\text{rpm}$ ), áp lực ma sát  $F_{fr}$  ( $110 \div 130\text{MPa}$ ) và thời gian ma sát  $t_{fr}$  ( $20 \div 25\text{s}$ ), các thông số áp lực rèn  $F_{fro}$  ( $110 \div 130\text{MPa}$ ) và thời gian rèn  $t_{fro}$  ( $5\text{s}$ ) được cố định.

Thực hiện 16 thí nghiệm hàn ma sát quay gồm:

- Bộ thứ nhất (dùng để thử kéo): các thông số công nghệ hàn cho 4 thí nghiệm ở nhóm thứ nhất (M2.1, M2.2, M2.3, M2.4) có giá trị ( $1600\text{rpm}$ ,  $110\text{MPa}$ ,  $20\text{s}$ ), 4 thí nghiệm ở nhóm thứ hai (M2.5, M2.6, M2.7, M2.8) có cùng giá trị ( $1100\text{rpm}$ ,  $130\text{MPa}$ ,  $25\text{s}$ ).
- Bộ thứ hai (dùng để thử uốn): cũng có 8 thí nghiệm với các thông số công nghệ hàn tương tự ở 2 nhóm.



a) Quá trình hàn



b) Các mẫu sau khi hàn

Hình 5. Thực nghiệm hàn

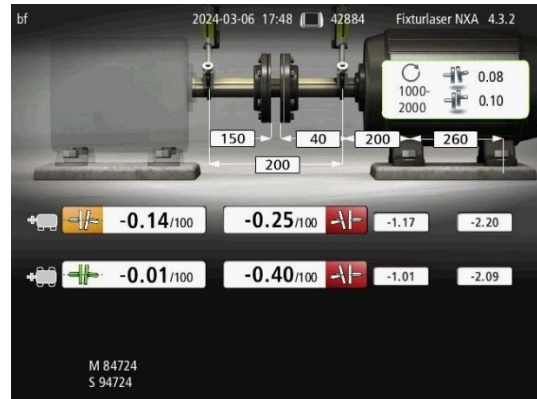
Tiến hành thử kéo, thử uốn trên máy kéo INSTRON-300DX.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Đồng tâm trục máy hàn ma sát quay VLUTE A01

Tốc độ quay trục chính được kiểm tra trong khoảng  $1000\text{rpm}$  đến  $2000\text{rpm}$ , giá trị sai lệch trung bình theo

phương đứng là  $0,08\text{mm}$ , giá trị sai lệch trung bình theo phương ngang là  $0,10\text{mm}$ .



Hình 6. Tổng hợp kết quả cân chỉnh đồng trục

- Mức độ sai lệch chủ yếu là theo phương đứng, mức cảnh báo:  $-0,14/100\text{mm}$ , mức nguy hiểm:  $-0,25/100\text{mm}$ .
- Mức độ sai lệch theo phương ngang thấp, nhưng khoảng sai lệch khá lớn, mức an toàn:  $-0,01/100\text{mm}$ , mức nguy hiểm:  $-0,40/100\text{mm}$ .

*Giải pháp khắc phục:*

- Với sai lệch theo phương đứng: tăng cường độ cứng vững của cụm trượt dọc, giảm kích thước chiều dài phần ngỗng trục nòng ụ động.
- Với sai lệch theo phương ngang: cân chỉnh ụ động theo phương ngang quanh mức an toàn.

#### 3.2. Rung động máy hàn ma sát quay VLUTE A01

Gọi  $v_{ij}$  (mm/s) giá trị rung động đo được tại vị trí (số thứ tự của các giai đoạn)  $i$  với số lần đo  $j$  và  $\bar{v}_i$  (mm/s) là giá trị trung bình rung động của các lần đo tại vị trí  $i$ . Tổng hợp kết quả đo rung động trong quá trình hàn ma sát quay hai chi tiết có vật liệu khác nhau như sau:

Bảng 1. Kết quả đo kiểm rung động trong quá trình hàn ma sát quay

$i, j$	1	2	3	$\bar{v}_i$
1	0,010	0,014	0,020	0,0147
2	0,335	0,175	0,137	0,2157
3	0,065	0,040	0,015	0,0400
4	0,033	0,033	0,033	0,0330
5	0,033	0,024	0,019	0,0253
6	0,019	0,017	0,012	0,0160

Từ các kết quả đo trong bảng 1 cho thấy:

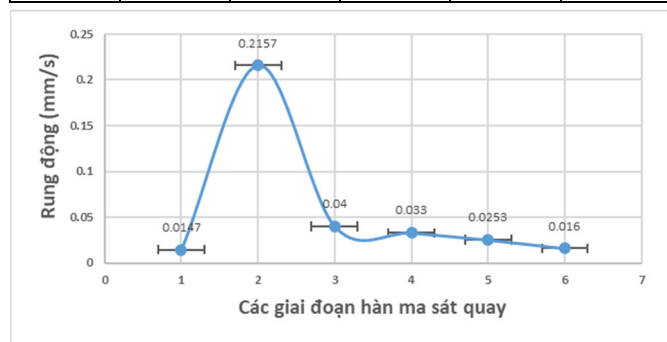
- Giai đoạn 1: Khi hai chi tiết chưa tiếp xúc, rung động tăng dần theo thời gian.
- Giai đoạn 2: bắt đầu giai đoạn ma sát, rung động đạt giá trị cực đại ( $v_{21} = v_{\max} = 0,335\text{mm/s}$ ), sau đó giảm nhanh.

- Giai đoạn 3: trong thời gian ma sát rung động tiếp tục giảm nhanh.
- Giai đoạn 4: hãm tốc độ quay rung động ổn định ở mức 0,0330mm/s.
- Giai đoạn 5: trục chính dừng, trong giai đoạn rên rung động tiếp tục giảm chậm ( $\bar{v}_5 = 0,0253\text{mm/s}$ ).
- Giai đoạn 6: kết thúc thời gian rên, rung động tiếp tục giảm chậm về các mức tương đương khi chưa tiếp xúc.

Tổng hợp kết quả rung động trung bình các giai đoạn của quá trình hàn ma sát quay hai chi tiết có vật liệu khác nhau như bảng 2, đồ thị biểu diễn rung động theo từng giai đoạn như hình 7.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả rung động trung bình các trong giai đoạn của quá trình hàn ma sát

$\bar{v}_1$	$\bar{v}_2$	$\bar{v}_3$	$\bar{v}_4$	$\bar{v}_5$	$\bar{v}_6$
0,0147	0,2157	0,0400	0,0330	0,0253	0,0160



Hình 7. Tổng hợp kết quả trung bình rung động của quá trình hàn ma sát quay

Từ bảng 1, 2 và hình 7 cho thấy ở giai đoạn 2 biên độ rung động cao nhất, mức độ rung động phụ thuộc vào tốc độ quay tương đối và tốc độ ép dọc trục, yếu tố về độ nhám và độ cứng bề mặt (của mẫu hàn) cũng ảnh hưởng đến rung động. Nếu biên độ rung động càng lớn sẽ ảnh hưởng đến độ đồng trục và sự cọ xát của bề mặt tiếp xúc. Giảm biên độ rung động bằng cách giảm độ nhám bề mặt mẫu hàn, điều chỉnh tốc độ ép dọc trục sao cho hai bề mặt tiếp xúc với lực nhẹ. Kết quả đo này phù hợp với sự biến thiên của momen xoắn trong nguyên lý hàn ma sát quay [10]. Giai đoạn 2 diễn ra đột ngột và kết thúc khi hệ số ma sát giảm dần và nhấp nhô bề mặt cọ xát bị san phẳng. Các giai đoạn còn lại giá trị rung động đo được đều khá ổn định, nằm trong phạm vi cho phép G2,5 của tiêu chuẩn ISO/TR 230-8:2010.

### 3.3. Kết quả thí nghiệm

Quan sát cảm quan các mẫu hàn cho thấy, phần vật liệu chảy dẻo được đùn ra tại vị trí hàn đều hai bên, bavia

tròn đều, không bị rạn nứt hoặc lỗ khí, sơ bộ chứng tỏ các mẫu hàn tương đối đồng đều (hình 8). Tổng hợp các kết quả đo sau các thí nghiệm được thể hiện như trong bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

Mã thí nghiệm	n (rpm)	$F_{fr}$ (MPa)	$t_{fr}$ (s)	Độ bền kéo (N)	Lực kéo lớn nhất (kN)	Lực uốn lớn nhất (kN)
M0.0				498.264	25.201	24.763
M2.1	1600	130	20	518.258	27.171	25.306
M2.2	1600	130	20	504.505	27.936	24.826
M2.3	1600	130	20	510.339	27.182	24.813
M2.4	1600	130	20	511.152	27.101	24.804
M2.5	1100	110	25	504.104	25.720	24.741
M2.6	1100	110	25	512.592	26.720	24.685
M2.7	1100	110	25	491.257	24.180	24.637
M2.8	1100	110	25	489.723	22.677	24.537



a) Mẫu hàn sau khi tiến



b) Vết gãy sau khi kéo

Hình 8. Kiểm tra độ bền kéo các mẫu sau khi hàn

#### 3.3.1. Kết quả kiểm tra bền kéo

Kết quả thử kéo cho thấy mẫu bị gãy gần mỗi hàn, vết gãy không đều (hình 8), thông số tải trọng lớn nhất (bảng 3), các mẫu thử đều có độ bền kéo cao hơn hoặc tương mẫu gốc, có 6/8 mẫu thử có lực kéo lớn nhất cao hơn lực kéo lớn nhất của mẫu gốc (25.201kN), có 2 mẫu có lực kéo lớn nhất thấp hơn lực kéo lớn nhất của mẫu gốc.

Độ bền kéo các mẫu từ 489,7MPa đến 518,3MPa (bảng 3) cao hơn so với công bố của tác giả V. N. Thương (cùng vật liệu, nhưng khác nhau về kích thước mẫu và thông số thí nghiệm hàn, độ bền kéo chỉ từ 156MPa đến 166MPa) [12].

### 3.3.2. Kết quả kiểm tra bền uốn

Các mẫu bị uốn cong (hình 9) và tải trọng uốn lớn nhất của từng mẫu được thống kê ở bảng 3. Từ bảng 3 cũng cho thấy các mẫu thử đều có độ bền uốn và lực nén lớn nhất tương đương mẫu gốc (24.763kN).



a) Gá mẫu thử lên máy thử uốn



b) Mẫu sau khi uốn

Hình 9. Kiểm tra độ bền uốn các mẫu sau khi hàn

Để tổng quát hóa chất lượng mối hàn ma sát quay trong những điều kiện làm việc thực tế khác nhau, nghiên cứu này đã tiến hành kiểm tra bền uốn dù hầu hết các công bố trước không có để cập.

## 4. KẾT LUẬN

Sai lệch độ đồng trục chủ yếu là theo phương đứng (từ mức cảnh báo:  $-0,14/100\text{mm}$  tới mức nguy hiểm:  $-0,25/100\text{mm}$ ). Mức độ sai lệch theo phương ngang thấp, nhưng khoảng sai lệch khá lớn. Rung động từ nguồn bên ngoài tác động lên thiết bị, rung động của thiết bị trước quá trình hàn nằm trong phạm vi cho phép. Trong quá trình hàn ma sát quay, trước và sau giai đoạn bắt đầu ma sát (khi hai chi tiết hàn bắt đầu tiếp xúc) rung động tăng, giảm đột ngột (từ  $0,335\text{mm/s}$  xuống  $0,065\text{mm/s}$ ), các giai đoạn còn lại giá trị rung động đo được đều khá ổn định. Máy hàn ma sát quay VLUTE A01 được cải tiến từ máy tiện do nhóm nghiên cứu phát triển có mức độ không đồng trục và rung động nằm trong phạm vi cho phép.

Mẫu hàn tương đối đồng đều, vật liệu chảy dẻo được đùn ra tại vị trí hàn đều hai bên, bavia tròn đều, không bị rạn nứt hoặc lỗ khí. Thử kéo cho thấy chi tiết bị đứt gãy gần mối hàn, vết đứt không đều. Các mẫu thử đều có độ

bền kéo cao hơn hoặc tương mẫu gốc. Các mẫu thử đều có độ bền uốn và lực kéo lớn nhất tương mẫu gốc. Sai lệch độ đồng trục và rung động của máy hàn ma sát quay được cải tiến từ máy tiện nằm trong phạm vi cho phép.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. F. Zaeh, A. Poehler, "Vibrations in friction welding", *Production Engineering*, 5, 2, 159-165, 2021. doi:10.1007/s11740-010-0284-8.
- [2]. E. Bayer, *Damping device, welding system for rotary friction welding and rotary friction welding method*. Patent, Internationale Veröffentlichungsnummer WO 2009/018804 A3, 2009.
- [3]. D. S. Alcantara, P. P. Balestrassi, "Vibrations in CDFW," *Entropy*, 22, 704, 2020. doi:10.3390/e22060704.
- [4]. M. M. Attallah, *Inertia friction welding (IFW) for aerospace applications, Welding and joining of aerospace materials*. Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [5]. M. I. El-Elamy, "Dynamic Analysis of Rotating Continuous Drive Friction Welding Joints of Al alloy," *Engineering Research Journal*, 46, 1, 43-53, 2023. doi:10.21608/ERJM.2022.162460.1212.
- [6]. Fixturlaser Acoem, *Fixturlaser NAX Pro Fixturlaser NAX Ultimate Shaft Alignment with Geometric Measurements*. fixturlaser.com, 2024. [Online]. Available: [https://fixturlaser.com/wp-content/uploads/2021/06/p-0344-gb-fixturlaser-nxa-pro\\_ultimate\\_low-res-1.pdf](https://fixturlaser.com/wp-content/uploads/2021/06/p-0344-gb-fixturlaser-nxa-pro_ultimate_low-res-1.pdf).
- [7]. Test Meter, *Extech 407860 Heavy Duty Vibration Meter*. www.test-meter.co.uk, 2024. [Online]. Available: <https://www.test-meter.co.uk/extech-407860-heavy-duty-vibration-meter>.
- [8]. Paulraj Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq, *Optimization for friction welding parameters with multiple performance characteristics*. Springer Science+Business Media B.V. 2007. DOI 10.1007/s10999-007-9037-z
- [9]. T. V. Hung, T. V. Ranh, T. T. V. Nga, L. H. Ky, "Research and Test of The Self-designed and Manufactured Rotary Friction Welding Machine with CT3 Steel Samples," *Advances in Engineering Research and Application*, 799-812, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-92574-182.
- [10]. F. Khalfallah, Z. Boumerzoug, S. Rajakumar, E. Raouache, "Optimization by RSM on rotary friction welding of AA1100 aluminum alloy and mild steel," *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 11, 1, 34-42, 2020. doi 10.1556/1848.2020.00005
- [11]. Carlos Guzman, *Welding Handbook Welding processes, Part 2, Ninth Edition Volume 3*. American Welding Society 550 N.W. LeJeune Road Miami, FL 33126, 2007.
- [12]. V. N. Thuong, N. V. Thanh, P. V. Chi, "Study on the influence of friction pressure and compression time on the tensile strength of the weld during rotation friction welding," in *Proceeding of the 5<sup>th</sup> National Conference on Mechanical Science & Technology*, Hanoi, Vietnam, 2018.

### AUTHORS INFORMATION

Ta Van Ranh, Le Hong Ky

Vinh Long University of Technology Education, Vietnam