

ẢNH HƯỞNG CỦA ĐƯỜNG KÍNH VAI DỤNG CỤ ĐẾN CHẤT LƯỢNG MỐI HÀN MA SÁT KHUẤY TRÊN ỐNG NHÔM HỢP KIM AA6061 CÓ GIA NHIỆT TRƯỚC

EFFECT OF TOOL SHOULDER DIAMETER ON THE QUALITY OF FRICTION STIR WELD JOINTS ON PRE-HEATED AA6061 ALLOY ALUMINUM TUBE

Nguyễn Hoàng Linh, Trần Thiên Phúc

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Hàn ma sát khuấy gia nhiệt trước bằng điện trở (*Resistance Friction Stir Welding – RFSW*) là quy trình hàn ma sát khuấy (*Friction Stir Welding – FSW*) có hỗ trợ nhiệt, nung nóng vật liệu hàn trước khi dụng cụ hàn tiếp xúc và ma sát, gia tăng dòng vật liệu, điều khiển được lượng nhiệt vào, giảm nguy cơ hình thành khuyết tật hàn, có chi phí thiết bị thấp và cải thiện chất lượng mối nối hàn hiệu quả. Trong bài báo này, nhóm tác giả tiến hành thực nghiệm RFSW trên mô hình ống trụ nhôm hợp kim AA6061. Chúng tôi đã thiết kế và chế tạo dụng cụ hàn, đồ gá hàn và thiết bị gia nhiệt. Ảnh hưởng của đường kính vai dụng cụ khuấy đến chất lượng mối hàn được đánh giá bằng thực nghiệm. Từ đó đánh giá độ dẻo dai và đập, độ cứng vi mô và xem xét cấu trúc tế vi nhằm đạt được chất lượng mối hàn tốt nhất.

Từ khóa: Hàn ma sát khuấy; Ống trụ nhôm; Độ va đập; Độ cứng vi mô; Gia nhiệt trước.

ABSTRACT

Resistance Friction Stir Welding (RFSW) is a heat-assisted Friction Stir Welding (FSW) welding process that heats the weld material before the welding tool comes into contact and friction, increases material flow, controls heat input, reduces the risk of welding defects, has low equipment costs and effectively improves weld joint quality. In this paper, RFSW experiments are conducted on the AA6061 aluminum alloy cylinder model. We have designed and manufactured welding tools, welding fixtures and heating equipment. The influence of the stirring tool shoulder diameter on weld quality was evaluated experimentally. From there, evaluate impact toughness, and microhardness and consider microstructure to achieve the best weld quality.

Keywords: Friction stir welding; Aluminum tube; Impact toughness; Microhardness; Preheating. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhận thức được tầm quan trọng của việc áp dụng FSW là một bước tiến quan trọng trong việc phát triển công nghệ hàn trong bối cảnh quốc gia đang phát triển ở mức thấp như Việt Nam. FSW đem lại nhiều lợi ích so với các phương pháp hàn truyền thống như: tiết kiệm năng lượng, bảo vệ môi trường mà không tạo hồ quang và khói hàn, không tiêu thụ khí hàn, không cần sử dụng kim loại que hàn để điền đầy mối hàn, giảm thiểu hiện tượng biến dạng, không nứt và đảm bảo chất lượng mối hàn [1].

Mục tiêu đầu tiên của nghiên cứu là phát triển công nghệ hàn FSW sao cho phù hợp với điều kiện, nhu cầu cụ thể của Việt Nam nhằm khắc phục nhược điểm trên và nâng cao độ bền cho mối hàn FSW. Điều này có thể bao gồm việc tối ưu hóa các thông số công nghệ như tốc độ quay của dụng cụ hàn, áp lực hàn, nhiệt độ và vật liệu hàn để đảm bảo mối hàn có độ bền cao và khả năng chịu tải tốt.

FSW được gia nhiệt bằng laser đã được nhận thấy có nhiều ưu điểm là cải thiện cấu trúc vi mô, độ bền kéo tăng 10%, tia laser có thể tăng nhiệt độ cho vùng khuấy làm giảm mài mòn dụng cụ, làm giảm lực công cụ, giảm độ lệch giữa máy và phôi so với FSW thông thường nhưng nhược điểm lớn là chi phí cho thiết bị thí nghiệm quá cao [2, 3].

FSW gia nhiệt bằng plasma [4, 5] đã nghiên cứu về nhiệt độ, cơ tính, và cấu trúc tế vi của mối hàn với vật liệu nhôm. Nhược điểm là khó kiểm soát nhiệt độ của bộ phận gia nhiệt plasma; nhiệt độ gia nhiệt từ plasma rất cao, nên đối vật liệu nhôm rất nhanh đạt tới giới hạn nóng chảy.

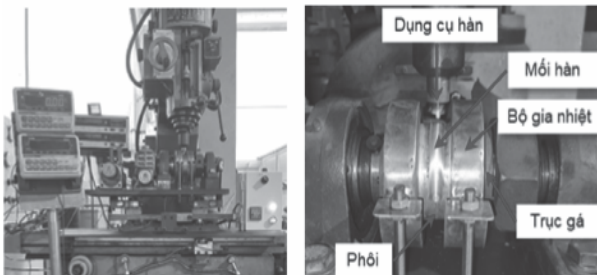
Naji và các cộng sự đã nghiên cứu, đánh giá sự phát triển và xu hướng trong hàn

ma sát khuấy có hỗ trợ nhiệt bằng siêu âm [6]. FSW có sự hỗ trợ của siêu âm mang lại nhiều ưu điểm so với FSW thông thường. Các tần số rung động cao giúp cải thiện chất lượng mối hàn và các tính chất vật lý, luyện kim, cơ học và ma sát của mối hàn. FSW gia nhiệt trước bằng siêu âm cải thiện đáng kể đặc tính cơ học, loại bỏ một số khuyết tật mối hàn cũng như tăng cường cơ tính mối hàn và cấu trúc tế vi. Bên cạnh hàn nhôm có thể được triển khai hàn nối thành công giữa các kim loại cứng như titan và thép. Nhược điểm của phương pháp là chi phí cho thiết bị tương đối cao, chỉ thích hợp hàn với vật liệu mỏng.

Ngoài các phương pháp FSW có gia nhiệt như trình bày trên, tác giả Kaushik Sengupta và cộng sự [7] đã có các đánh giá về nghiên cứu quá trình FSW có gia nhiệt trước bằng điện trở (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. Người ta 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, dễ bị điện giật nếu bất cẩn, 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 nối, không có sự thay đổi thành phần trong quá trình tham gia hàn, ổn định kích thước tốt hơn, cải thiện tính chất luyện kim, 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 đường kính nhỏ trong thời gian qua có nhưng rất ít những nghiên cứu đi sâu về vấn đề phân tích sự ảnh hưởng của các thông số hàn đến độ dẻo dai va đập, độ cứng vi mô, cấu trúc tế vi đối với hợp kim nhôm AA6061, từ đó lựa chọn thông số hàn hợp lý nhằm nâng cao chất lượng mối hàn. Đây là một trong những hợp kim rất khó hàn bằng phương pháp hàn nóng chảy truyền thống.

Ở đây, nhóm tác giả sẽ tiến hành nghiên cứu sự ảnh hưởng của đường kính vai của dụng cụ khuấy d (mm). Với những kết quả đạt được trong bài báo, hy vọng rằng mối hàn này có thể thay thế cho các mối ghép khác để ứng dụng trong ngành hàng không, vũ trụ, hệ thống đường ống dẫn dầu hoặc các kết cấu xây dựng khi sử dụng hợp kim nhôm.



Hình 1. Nguyên lý hàn ma sát khuấy có gia nhiệt trước

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Kỹ thuật RFSW so với FSW thông thường là sử dụng gia nhiệt làm nguồn nhiệt bổ sung để cải thiện quá trình dẻo hóa nhiệt của vật liệu hàn, tăng hiệu quả mỗi nối hàn, ít khuyết tật và kéo dài tuổi thọ dụng cụ hàn [7, 8]. Để xác định các thông số công nghệ ảnh hưởng đến chất lượng mối hàn, ta phải xây dựng phương trình cân bằng nhiệt của quá trình hàn với các yêu cầu giống như mô hình thực

nghiệm, bên cạnh đó cần tiến hành thí nghiệm trên mô hình thực tế, từ đó phân tích và đánh giá dữ liệu có được để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy. Nhiệt lượng hàn ma sát khuấy gia nhiệt bằng điện trở (Q_{RFSW}) là tổng quá trình truyền nhiệt từ điện trở (Q_R) và truyền nhiệt từ FSW (Q_{FSW}), có thể được biểu thị dưới dạng công thức (1):

$$Q_{RFSW} = Q_R + Q_{FSW} \quad (1)$$

Với $Q_R = I^2.R.t$ (I – Cường độ dòng điện, R – Điện trở, t – Thời gian)

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Vật liệu phôi hàn là ống trụ hợp kim nhôm AA6061 có kích thước: chiều rộng đoạn ống 40 mm, đường kính ngoài 80 mm, chiều dày 5 mm, được tiện cắt đứt từ ống dài 2.5m đảm bảo độ song song hai mặt khi gá lên trục gá để hàn giáp mối.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Tiến hành thực nghiệm RFSW cho ống nhôm hợp kim AA6061 có kích thước $\phi 80 \times 40 \times 5$ (mm) trên máy hàn ma sát khuấy đã cải tiến từ máy phay vạn năng. Trong đó, chế tạo dụng cụ hàn vật liệu H13 (SKD61) [9] có đầu khuấy hình trụ (ren phải M5x1), có kích thước đường kính vai lần lượt là 12 mm, 15 mm và 18 mm.

Nghiên cứu chế tạo bộ gia nhiệt gồm hai vòng điện trở có bảo ôn giữ nhiệt và hộp điều khiển gia nhiệt đảm bảo an toàn, hệ thống đồ gá hàn ống. Quá trình thực nghiệm hàn được thực hiện trên hệ thống thiết bị FSW (Hình 1). Ở thiết bị thí nghiệm này, ta chọn trước thông số: nhiệt độ gia nhiệt trước 100°C (nằm trong vùng nhiệt mà bộ gia nhiệt đã chế tạo) và độ lệch tâm dụng cụ hàn được chọn là 6 mm [10].

Sau khi thực hiện xong đường hàn, tiến hành quan sát cấu trúc tế vi của mối hàn sau khi tẩy thực bằng dung dịch 70ml H₂O, 15ml HNO₃, 5ml HCL và 10ml HF với thời gian 20s. Kính hiển vi quang học mẫu ViewMet được dùng để chụp tổ chức tế vi của mối hàn. Để đo độ cứng Vickers, sử dụng thiết bị Micro Hardness Tester WILSON 1202 với tải trọng đo 0.5kg, thời gian giữ tải 15s, mẫu thử được kiểm tra theo tiêu chuẩn Quốc tế ASTM E384 [11]. Độ dẻo dai va đập cũng được xem xét trên thiết bị thử nghiệm và có kích thước mẫu thử độ dai va đập được chuẩn bị theo tiêu chuẩn Quốc tế ASTM E23-18 [12].

Để đánh giá các nhân tố trong vùng hàn hợp lý, ở nghiên cứu trước các mẫu hàn đã được kiểm nghiệm với bộ thông số công nghệ (n, v, d) trong miền giá trị tối ưu lần lượt là: mẫu 1 (1500 v/ph; 100 mm/ph, 18 mm) và mẫu 2 (1500 v/ph; 100 mm/ph, 15 mm). Từ đây, nhóm tác giả tiến hành khảo sát các đặc tính cơ học ảnh hưởng đến chất lượng mối hàn.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

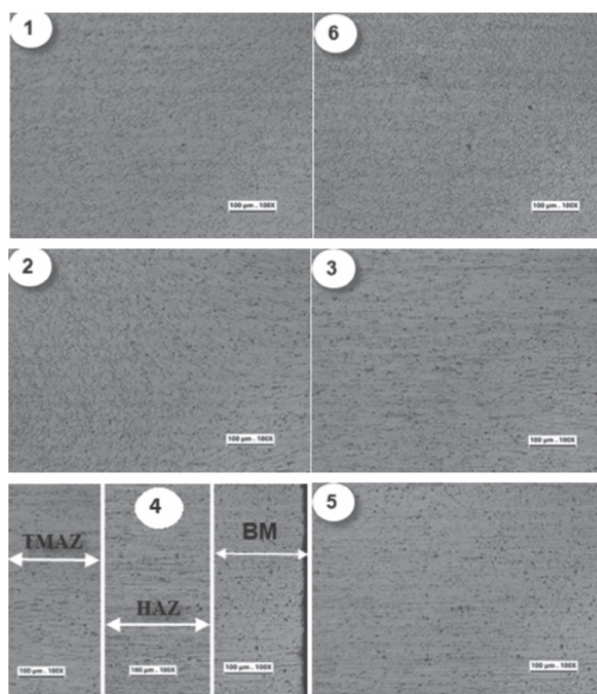
3.1. Cấu trúc tế vi mối hàn

Với kết quả đạt được như trên, cần kiểm tra tổ chức tế vi tại vùng tâm hàn, để đánh giá chất lượng mối hàn tốt nhất. Mẫu mối hàn hợp lý được sử dụng làm đại diện để khảo sát những thay đổi về tổ chức tế vi trong mối hàn RFSW.

Tổ chức tế vi của mối hàn được kiểm tra chụp ảnh bằng kính hiển thị vi quang học có độ phóng đại từ 50 đến 1500 lần tại các điểm 1, 2, 3, 4, 5, 6 như Hình 2 so với kim loại cơ bản (tổ chức tế vi có cấu trúc hạt thô và dài) và có kết quả như Hình 3.



Hình 2. Vị trí kiểm tra cấu trúc tế vi



Hình 3. Tổ chức tế vi tại các vị trí khác nhau trong vùng hàn: Vùng tâm mối hàn (1, 2, 6); Vùng ảnh hưởng cơ nhiệt (3); Vùng ảnh hưởng nhiệt (4); Vùng kim loại cơ bản (5)

Vùng tâm mối hàn (NZ – Nugget Zone): tổ chức tế vi ở vị trí 1 (giống với tổ chức tế vi ở vị trí 6), là điểm nằm ở đường tâm mối hàn, do biến dạng dẻo mãnh liệt bởi tác dụng của đầu khuấy nên vùng này có cấu trúc hạt mịn theo hướng từ chân mối hàn đến bề mặt mối hàn, chứng tỏ độ bền kéo tăng cao trong quá trình FSW. Tổ chức tế vi ở vị trí số 2 có kích thước hạt mịn giống với vùng tâm hàn (bên phải), bên trái giống với vùng ảnh hưởng nhiệt. Vùng ảnh hưởng cơ nhiệt (TMAZ – Thermo Mechanically Affected Zone): tổ chức tế vi ở vị trí 3, dòng vật liệu được hình thành bởi dụng cụ

hàn và nhiệt làm cho vật liệu bị biến dạng dẻo ảnh hưởng đến tính chất của vật liệu. Đây là vùng có cỡ hạt lớn dần về phía vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ – Heat Affected Zone) và gần với kích thước hạt kim loại cơ bản.

Vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ): tổ chức tế vi ở vị trí số 4, vùng này nằm giữa vùng không ảnh hưởng và vùng ảnh hưởng cơ nhiệt, không xảy ra quá trình biến dạng dẻo, có tổ chức tế vi và cơ tính bị thay đổi. Cấu trúc tế vi của HAZ là tương tự như BM (Base Material), nhưng hạt thô hơn so với BM. Vùng không ảnh hưởng (BM): có thể xem xét tổ chức tế vi ở vị trí số 5, phần vật liệu nằm ở vị trí xa mối hàn, không bị biến dạng và ảnh hưởng bởi nhiệt nên tổ chức tế vi và cơ tính không thay đổi.

Có thể kết luận rằng với các thông số công nghệ RFSW cho mỗi hàn chất lượng ở trên thì quá trình biến đổi cấu trúc hạt là khá rõ nét và mảnh liệt. Điều này chắc chắn làm tăng cơ tính mối hàn ma sát khuấy.

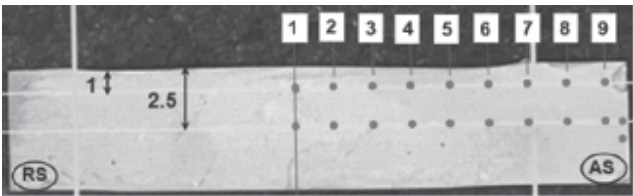
3.2. Độ cứng Vicker

Độ cứng đo ở giữa mặt cắt ngang mối hàn, khảo sát đo độ cứng cho 03 mẫu đo HV1, HV2, HV3 và vị trí đo như Hình 4. Thông số hàn n và v ở mức cơ sở với d có giá trị lần lượt là 12, 15, 18 (mm) được xem xét và cho kết quả như Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị đo độ cứng cách mặt ngoài ống 1 mm

Mẫu đo	n (v/ph)	v (mm/ph)	d (mm)	Vùng vị trí đo			Đo (trung bình)
				1 (Phía lui)	2 (Tâm)	3 (Phía tiến)	
HV1	1500	100	12	76.3	73.2	73.0	74.2
HV2			15	76.9	75.9	74.2	75.7
HV3			18	76.2	75.9	75.9	76.2

Dựa vào kết quả giá trị đo trung bình (Bảng 1), ta nhận thấy thông số hàn thực nghiệm mẫu đo HV3 (có đường kính vai 18mm) cho kết quả cao nhất.



Hình 4. Vị trí đo độ cứng vùng hàn

Bảng 2. Kết quả đo độ cứng Vickers (HV)

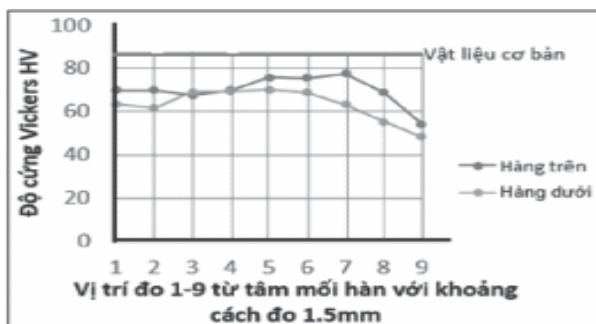
Giá trị đo Micro Vickers, tải đo 0.5kg, thời gian tải 15s									
Vị trí đo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hàng trên	69.8	69.8	67.5	69.8	75.6	75.3	77.5	68.6	54.0
Hàng dưới	63.4	61.4	69.0	69.3	69.9	68.8	63.0	55.0	48.1



Từ đây, tác giả chỉ đánh giá mẫu HV3, sự phân bố độ cứng bên phải mỗi hàn tính từ giữa tâm mặt cắt ngang vùng hàn (do mỗi nối hàn cùng vật liệu), gồm 02 hàng, mỗi hàng có 09 vị trí đo theo hướng dọc mỗi hàn, các vị trí cách đều 1.5mm, hàng dưới giữa tâm mặt cắt (khoảng cách 2.5mm) cách hàng trên 1.5mm (Hình 4), cho kết quả như Bảng 2.

Từ kết quả đo trên biểu diễn như hình 5, độ cứng hàng đo trên (cách mặt ngoài ống 1mm) có độ cứng cao hơn một ít so với hàng dưới, độ cứng tại vùng tâm hàn (NZ) thấp hơn độ cứng của vật liệu ống nhôm 6061 cơ bản (86HV) [13], là do sự hòa tan kết tủa các pha trong quá trình khuấy.

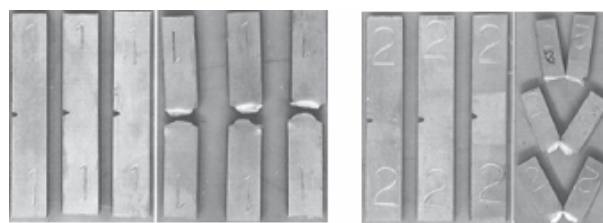
Độ cứng đo dọc theo mặt cắt ngang của mỗi hàn như thứ tự: BM > TMAZ > NZ > HAZ. FSW hỗ trợ nhiệt bằng điện trở có phân bố độ cứng giữa các vùng không chênh lệch nhiều theo chiều dọc mỗi hàn. Phía tiến (AS – Advancing Slide) được coi là vùng hơi mềm so với phía lui (RS – Retreating Slide), phía tiến có nhiệt độ cao hơn do lực ma sát lớn hơn, nhiệt độ cao này có thể dẫn đến việc các hạt kết tủa trong kim loại cơ bản bị thô hóa hoặc tan chảy và sau đó kết tinh lại thành các hạt lớn hơn khi kim loại nguội đi. Qua đó, cho thấy ảnh hưởng của quá trình cơ nhiệt đến quá trình biến đổi luyện kim, làm tăng độ cứng và độ bền cho mỗi hàn.



Hình 5. Sự phân bố độ cứng mỗi hàn

3.3. Độ dai và đập

Phương pháp thử nghiệm va đập Charpy được sử dụng để xác định độ dẻo dai của hai mẫu hàn ở nhiệt độ phòng (27°C). Búa được sử dụng có công suất cực đại là 292 J và vận tốc cực đại là 5,2 m/s. Kết quả kiểm tra độ dai và đập ở vùng hàn hợp lý được trình bày trong hình 6.



a) Mẫu 1 (8J, 8J, 6J) b) Mẫu 2 (6J, 6J, 8J)

Hình 6. Kiểm tra các mẫu thử va đập

Vật liệu gốc Al6061 có độ dai và đập là 8J [14], từng mẫu hàn được đo 03 lần, mẫu 1 có giá trị đo trung bình là 7.33J, còn mẫu 2 có giá trị đo trung bình là 6.67J. Kết quả đo độ dai và đập cho thấy rằng độ dai và đập của các mẫu hàn ma sát khuấy lệch ít so với mẫu kim loại gốc. Độ dai và đập của mẫu hàn 1 cao hơn độ dai và đập của mẫu hàn 2, điều đó cho thấy với cùng điều kiện hàn n và v, khi tăng đường kính vai d dẫn đến độ dai và đập tăng lên, là do sự ma sát vai dụng cụ tăng, nhiệt độ đầu vào cũng tăng và làm cho kích thước hạt trong mỗi hàn tăng.

4. KẾT LUẬN

Mỗi hàn RFSW của ống trụ hợp kim nhôm AA6061 được chế tạo thành công và đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ, đánh giá ảnh hưởng đường kính vai dụng cụ đến độ cứng vi mô, độ dai và đập và cấu trúc tế vi để mỗi hàn đạt chất lượng tốt nhất.

Gia nhiệt bằng điện trở trong quá trình

FSW giúp cấu trúc vi mô hạt nhỏ và đồng nhất, duy trì độ cứng vi mô đều hơn trong vùng NZ và HAZ. Từ đó, cải thiện cả về độ cứng vi mô và độ dai va đập so với các nghiên cứu về FSW thông thường.❖

Ngày nhận bài: **03/5/2024**

Ngày phản biện: **07/6/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. D. Yaduwanshi, S. Bag, and S. Pal, "Effect of preheating in hybrid friction stir welding of aluminum alloy". Journal of materials engineering and performance, vol. 23, pp. 3794-3803, 2014.
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. H. Schmidt, J. Hattel, and J. Wert, "An analytical model for the heat generation in friction stir welding". Modelling and simulation in materials science and engineering, vol. 12, no. 1, p. 143, 2003.
- [9]. 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.
- [10]. D. H. Lammlein, "Friction stir welding of spheres, cylinders, and t-joints: design, experiment, modelling, and analysis". Vanderbilt University, 2010.
- [11]. A. B. Hardness, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials". ASTM Committee: West Conshohocken, PA, USA, vol. 384, p. 399, 1999.
- [12]. A. Standard, "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials". Metals-Mechanical Testing, E23-94b, vol. 3, 2007.
- [13]. A.M.Khourshid, "Mechanical-properties-of-Friction-Stir-Welded-Aluminium-Alloy-pipes". European Journal of Mechanical Engineering Research, vol. 4, pp. 65-78, April 2017.
- [14]. D. Devaiah, K. Kishore, and P. Laxminarayana, "Study the process parametric influence on impact strength of friction stir welding of dissimilar aluminum alloys (AA5083 and AA6061) using Taguchi technique". Inte. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol, vol. 3, pp. 91-98, 2016.