ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ ĐẾN KÍCH THƯỚC ĐƯỜNG HÀN

INFLUENCE OF PARAMETERS ON WELD IMPERFECTION SIZE

Nguyễn Sỹ Huy, Nguyễn Phan Anh, Huỳnh Quang Duy, Phan Thanh Nhàn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 21143352@student.hcmute.edu.vn; anhnp@hcmute.edu.vn; duyhq@hcmute.edu.vn; *nhanpt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Hàn quỹ đạo là công nghệ hàn đường ống được ứng dụng rộng rãi trong các dây chuyền công nghiệp. Tuy nhiên, các mối nối có nguy cơ rò rỉ, gây nhiễm khuẩn hoặc nguy hiểm nếu đường ống vận chuyển khí đốt, axit hoặc chất lỏng độc hại. Rò rỉ cũng làm giảm hiệu suất sản xuất. Vì vậy, công nghệ hàn quỹ đạo cần được cải tiến để khắc phục các vấn đề này. Vào những năm 1960, hàn quỹ đạo ra đời trong ngành hàng không vũ trụ để đáp ứng nhu cầu về kỹ thuật nối ống chất lượng cao cho hệ thống thủy lực máy bay. Thiết bị sử dụng điện cực vonfram xoay quanh ống, tạo hồ quang làm nóng chảy kim loại, hình thành mối hàn. Quá trình này được tự động hóa với hệ thống điều khiển dòng hàn, mang lại độ chính xác và độ tin cậy vượt trội so với hàn thủ công. Đến những năm 1980, hàn quỹ đạo trở nên phổ biến nhờ hệ thống điều khiển điện 110V AC và thiết bị nhỏ gọn, dễ di chuyển. Hiện nay, hệ thống hàn quỹ đạo hiện đại được điều khiển bằng máy tính, lưu trữ thông số hàn, tạo ra các mối hàn đồng nhất với ít khuyết tật. Công nghệ này được sử dụng trong các ngành như hàng không vũ trụ, thực phẩm, dược phẩm, nguyên tử và bán dẫn.

Từ khóa: *Thông số hàn; Hàn hồ quang; Kích thước đường hàn; Cường độ dòng điện; Vận tốc hàn; Hàn ống.*

ABSTRACT

Orbital welding is a technology used for welding pipelines, widely applied in industrial production lines. However, joints in these pipelines may leak, causing contamination or posing dangers if the pipelines transport gas, acids, or other hazardous liquids. Leaks also reduce production efficiency. Therefore, orbital welding technology needs improvements to address these issues. In the 1960s, orbital welding was developed in the aerospace industry to meet the demand for high-quality pipe-joining techniques for aircraft hydraulic systems. The equipment uses a tungsten electrode rotating around the pipe, creating an arc that melts the base metal to form a weld. The welding process is automated with a control system for weld current, offering superior precision and reliability compared to manual welding. By the 1980s, orbital welding gained popularity due to 110V AC control systems and compact, portable equipment. Modern orbital welding systems are computer-controlled, storing welding parameters to produce consistent welds with minimal defects. This technology is now used in industries such as aerospace, food, pharmaceuticals, nuclear, and semiconductors.

Keywords: *Welding Parameters; Arc Welding; Weld Imperfection Size; Current Intensity; Welding Speed; Pipe Welding.*

1. TỔNG QUAN

Hàn quỹ đạo là một kỹ thuật hàn tiên tiến, được ứng dụng rộng rãi trong việc nối các hệ thống đường ống, đặc biệt trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao [1]. Công nghệ này sử dụng đầu hàn tự động xoay quanh ống để tạo ra mối hàn đồng nhất, đảm bảo chất lượng vượt trội và khả năng lặp lại trong các điều kiện sản xuất phức tạp [2]. Với khả năng đáp ứng các yêu cầu khắt khe, hàn quỹ đạo đã trở thành một giải pháp không thể thiếu trong nhiều lĩnh vực như hàng không vũ trụ, năng lượng, thực phẩm, dược phẩm, bán dẫn, và dầu khí ngoài khơi [3]. Phần tổng quan này sẽ trình bày các ứng dụng chính của hàn quỹ đạo, tầm quan trọng của việc tối ưu hóa thông số hàn, và định hướng nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả của công nghệ này.

Hàn quỹ đạo được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng tạo ra các mối hàn chất lượng cao trong các môi trường và điều kiện khác nhau. Trong ngành hàng không vũ trụ, hàn quỹ đạo được sử dụng để thực hiện hơn 1.500 mối hàn áp suất cao trên các hệ thống đường ống của máy bay, đảm bảo tính đồng nhất và độ bền cơ học vượt trội [2]. Các mối hàn này phải đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt về độ an toàn và hiệu suất trong điều kiện vận hành khắc nghiệt [4].

Trong lĩnh vực năng lượng, hàn quỹ đạo được áp dụng để nối các ống lò hơi trong nhà máy điện. Đầu hàn quỹ đạo nhỏ gọn cho phép thực hiện các mối hàn chất lượng cao trong không gian hạn chế, đồng thời đảm bảo khả năng lặp lại và độ bền của mối hàn [3]. Ngành thực phẩm, sữa, và đồ uống yêu cầu các mối hàn ngấu hoàn toàn với bề mặt mịn để ngăn ngừa sự tích tụ vi khuẩn, đáp ứng các tiêu chuẩn vệ sinh tại chỗ (clean-in-place) [5]. Các mối hàn này giúp đảm bảo an toàn thực phẩm và kéo dài tuổi thọ của hệ thống đường ống.

Trong ngành dược phẩm, hàn quỹ đạo được sử dụng để chế tạo các hệ thống đường ống dẫn nước tinh khiết và các chất lỏng không nhiễm khuẩn. Các mối hàn phải đạt độ mịn cao để tránh ô nhiễm, đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt của ngành [6]. Tương tự, ngành bán dẫn yêu cầu các mối hàn siêu mịn để ngăn chặn tích tụ hạt bụi, đảm bảo độ tinh khiết của môi trường sản xuất vi mạch [7]. Ngoài ra, hàn quỹ đạo còn được ứng dụng trong ngành hạt nhân để tạo ra các mối hàn chịu được môi trường nhiệt độ cao và bức xạ [8], cũng như trong các hệ thống thủy lực ngoài khơi để cải thiện khả năng chống ăn mòn và độ bền cơ học [9].

Hàn quỹ đạo cũng đóng vai trò quan trọng trong việc chế tạo các phụ kiện, van, và bộ điều áp. Công nghệ này giúp nâng cao năng suất và chất lượng tại các vị trí hàn phức tạp, nơi các phương pháp hàn thủ công khó thực hiện [10]. Sự đa dạng trong ứng dụng của hàn quỹ đạo chứng minh tính linh hoạt và tiềm năng của công nghệ này trong việc đáp ứng nhu cầu của các ngành công nghiệp hiện đại.

Sự gia tăng nhu cầu về hệ thống đường ống chất lượng cao trong các ngành công nghiệp đã thúc đẩy sự phát triển của hàn quỹ đạo [11]. Để đáp ứng các yêu cầu về năng suất, độ bền, và tính toàn vẹn của mối hàn, việc nghiên cứu và tối ưu hóa các thông số hàn là cần thiết. Các thông số chính bao gồm cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, góc điện cực, thời gian xung, và chiều dài hồ quang, đều ảnh hưởng trực tiếp đến kích thước và hình dạng mối hàn [12].

Kích thước mối hàn, bao gồm chiều rộng, chiều sâu, và hình dạng tổng thể, đóng vai trò quan trọng trong việc xác định độ bền

cơ học và khả năng chịu tải của mối hàn. Ví dụ, một mối hàn quá rộng có thể làm giảm độ bền do sự gia tăng ứng suất nhiệt, trong khi mối hàn quá nông có thể không đảm bảo độ ngấu cần thiết. Do đó, việc kiểm soát chính xác các thông số hàn là yếu tố then chốt để đạt được mối hàn chất lượng cao, đặc biệt trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như ngành hàng không vũ trụ và dược phẩm.

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh các thông số hàn có thể cải thiện đáng kể chất lượng mối hàn. Theo Smith và cộng sự [12], việc tối ưu hóa tốc độ hàn và cường độ dòng điện có thể giảm thiểu các khuyết tật hàn như rỗ khí và nứt mối hàn. Tương tự, nghiên cứu của Lee và cộng sự [10] nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm soát thời gian xung để đảm bảo sự đồng nhất của hồ quang, từ đó cải thiện hình dạng mối hàn. Những phát hiện này cho thấy tiềm năng của việc nghiên cứu thực nghiệm để tối ưu hóa công nghệ hàn quỹ đạo.

Mặc dù hàn quỹ đạo mang lại nhiều lợi ích, công nghệ này vẫn đối mặt với một số thách thức. Thứ nhất, việc thiết lập các thông số hàn tối ưu đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về vật liệu, cấu trúc ống, và điều kiện vận hành [11]. Thứ hai, chi phí đầu tư cho thiết bị hàn quỹ đạo và đào tạo nhân sự có thể là rào cản đối với các doanh nghiệp vừa và nhỏ [10]. Thứ ba, việc duy trì độ ổn định của mối hàn trong các điều kiện khắc nghiệt, chẳng hạn như môi trường hạt nhân hoặc ngoài khơi, vẫn là một vấn đề cần nghiên cứu thêm [8].

Nghiên cứu "Thực nghiệm hàn quỹ đạo hở với các thông số hàn khác nhau" có ý nghĩa thực tiễn cao, nhằm giải quyết các thách thức này. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến kích thước và chất lượng mối hàn, từ đó đề xuất các giá trị tối ưu cho các ứng dụng thực tế. Các thí nghiệm sẽ được thực hiện trên hệ thống hàn quỹ đạo hở, sử dụng các vật liệu phổ biến như thép không gỉ và hợp kim titan, vốn được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp [9]. Kết quả nghiên cứu dự kiến sẽ cung cấp dữ liệu quan trọng để cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của hàn quỹ đạo, đồng thời giảm chi phí sản xuất.

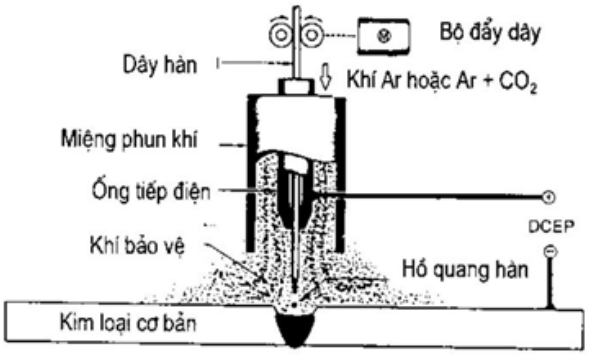
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Quá trình hình thành mối hàn và tổ chức kim loại chịu ảnh hưởng từ nhiều yếu tố. Sự chuyển dịch kim loại lỏng từ điện cực vào vũng hàn phụ thuộc vào các lực vật lý. Trọng lực khiến giọt kim loại lỏng có xu hướng di chuyển về vũng hàn. Sức căng bề mặt, do lực phân tử, làm giọt kim loại lỏng có dạng cầu, duy trì hình dạng này khi hòa vào vũng hàn, tạo khối đồng nhất. Lực từ, sinh ra khi dòng điện chạy qua điện cực và phôi, làm co diện tích mặt cắt điện cực lỏng, tăng mật độ dòng điện tại điểm co, khiến kim loại sôi và đứt, chuyển vào vũng hàn. Áp suất khí từ thuốc hàn nóng chảy tạo lực đẩy kim loại lỏng vào vũng hàn, đặc biệt hiệu quả trong hàn không gian.

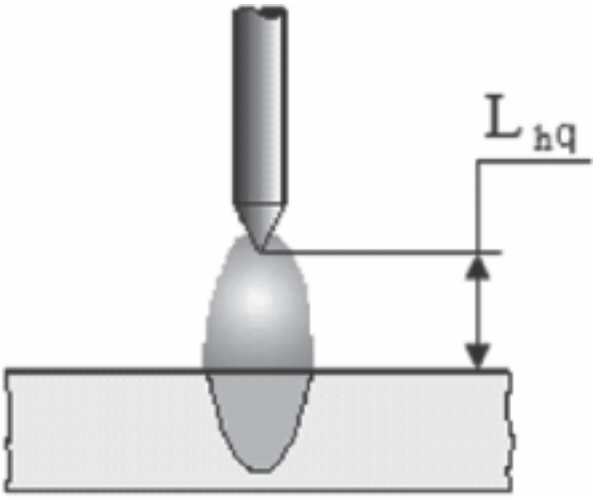
Vật liệu hàn bao gồm nhóm tham gia trực tiếp và không trực tiếp vào quá trình hàn. Nhóm trực tiếp gồm dây hàn, que hàn, và điện cực nóng chảy. Que hàn có hai loại: que trần bổ sung kim loại trong môi trường khí bảo vệ, và que thuốc bọc chứa chất tạo khí, tạo xỉ, ổn định hồ quang. Dây hàn, dạng điện cực kim loại tiết diện tròn, được dùng trong hàn khí bảo vệ hoặc hàn dưới lớp thuốc. Điện cực vonfram, chế tạo từ oxit vonfram với 1,5-2% ZnO_2 hoặc ThO_2, dùng cho hàn trong môi trường khí trơ. Nhóm không trực tiếp gồm điện cực không nóng chảy (vonfram, cacbon) và khí trơ như Argon, Heli, bảo vệ vũng hàn khỏi oxi hóa. Argon và Heli ☞

được ưa chuộng do trữ lượng lớn và chi phí thấp.

Các yếu tố này quyết định chất lượng mối hàn, đặc biệt trong hàn quỹ đạo, nơi yêu cầu độ chính xác cao. Việc kiểm soát thông số hàn và vật liệu là nền tảng để đảm bảo độ bền và tính đồng nhất của mối hàn..



Hình 1. Nguyên lý hàn TIG



Hình 2. Chiều dài hồ quang

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành nhằm đánh giá ảnh hưởng của góc hàn đến độ bền kéo của mối hàn giáp mối trong hàn quỹ đạo, với mục tiêu xác định các điều kiện tối ưu để đáp ứng tiêu chuẩn ASME IX [1]. Đối tượng nghiên cứu là các mối hàn giáp mối giữa hai ống thép C45, một loại thép cacbon trung bình được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng công nghiệp nhờ độ bền và khả năng chịu tải tốt [2]. Các ống thép có kích thước Ø273 mm, chiều dài 250 mm, và độ dày thành ống 7,2 mm, đảm bảo tính đại diện cho các hệ thống đường ống công nghiệp [3].

Thực nghiệm được thực hiện tại ba góc hàn: 0° (vị trí 6h), 90° (vị trí 12h), và 180° (vị trí 6h đối diện), đại diện cho các vị trí hàn điển hình trong hàn quỹ đạo [4]. Tại mỗi góc hàn, hai mẫu thử được chế tạo, tạo thành tổng cộng sáu mẫu (đánh số từ 1 đến 6). Các mẫu được kiểm tra độ bền kéo theo tiêu chuẩn ASME IX, một tiêu chuẩn được sử dụng rộng rãi để đánh giá chất lượng mối hàn trong các ngành công nghiệp như năng lượng, hàng không vũ trụ, và hóa chất [5]. Ngoài ra, các thông số hàn như cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, góc điện cực, thời gian xung, và chiều dài hồ quang được giữ cố định trong suốt quá trình thực nghiệm để cô lập ảnh hưởng của góc hàn [6].

Quá trình hàn được thực hiện bằng hệ thống hàn quỹ đạo tự động sử dụng phương pháp hàn TIG (Tungsten Inert Gas), đảm bảo độ chính xác và tính lặp lại của mối hàn [7]. Các mối hàn được kiểm tra bằng phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT) như chụp X-quang và kiểm tra siêu âm trước khi thử kéo, nhằm loại bỏ các mẫu có khuyết tật rõ ràng như rỗ khí hoặc nứt [8]. Sau khi thử kéo, các mẫu được phân tích để đánh giá hình dạng mối hàn, độ bền kéo, và các đặc tính cơ học khác, với kết quả được minh họa qua các hình ảnh và biểu đồ.

Nghiên cứu được tiến hành thông qua thực nghiệm hàn giáp mối hai ống thép C45 (đường kính Ø273 mm, dài 250 mm, dày 7,2 mm) tại các góc hàn 0°, 90°, và 180° để đánh giá ảnh hưởng của thông số hàn đến chất lượng mối hàn.

• Chuẩn bị vật tư: Ống được cắt bằng phương pháp hàn cắt gió đá để tiết kiệm thời gian, đảm bảo yêu cầu sử dụng. Mép ống được vát góc 60° bằng máy cắt và vát mép, làm sạch bề mặt và tạo khe hở, tăng độ ngấu, hạn chế khuyết tật và biến dạng. Đính ống sử dụng máy hàn TIG 250A, đảm bảo độ đồng tâm bằng đồ gá, khe hở giữa hai ống <0,075 mm, mối đính nhỏ, không gây lệch.

• Chuẩn bị thiết bị hàn: Sử dụng máy hàn quỹ đạo có dao động ngang, tủ điện điều khiển, và máy hàn MIG 250A. Hồ quang được hình thành trong môi trường khí trơ Argon để bảo vệ mối hàn.

• Gá ống thực nghiệm: Ống được gá chắc chắn trên đồ gá, lắp bánh răng dẫn phù hợp để đảm bảo đầu hàn di chuyển đúng vị trí. Khoảng cách gá đủ rộng cho máy hàn hoàn thành chu kỳ. Vị trí tương quan giữa đầu hàn và bánh răng dẫn được xác định chính xác.

• Lắp đặt bình khí bảo vệ: Bình khí Argon được lắp đứng, kết nối chặt bằng cờ lê để tránh rò rỉ. Van và ống dẫn khí được siết chắc, kiểm tra trước khi vận hành để đảm bảo an toàn.

• Lắp đặt máy hàn: Nguồn điện và bình khí được kết nối chặt tại máy hàn MIG, đảm bảo an toàn điện. Dây cáp súng hàn (cực +) nối với bộ cấp dây, dây kẹp mát (cực -) cố định vào phôi hoặc bàn hàn. Dây hàn được điều chỉnh chạy ra đầu súng, đảm bảo thẳng. Các khớp nối (dây khí, cáp điều khiển) được siết chặt.

• Lắp đặt máy hàn quỹ đạo: Máy hàn quỹ đạo có dao động ngang được lắp với bánh răng dẫn ăn khớp. Động cơ số 1 điều khiển di chuyển theo biên dạng ống, động cơ số 2 tạo dao động ngang. Các chi tiết được siết chặt bằng lục giác và cờ lê.

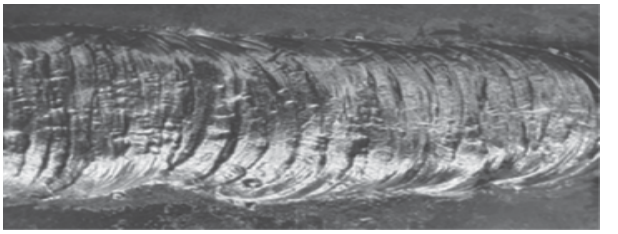
Thử nghiệm ban đầu sử dụng dòng điện 100A, kiểm tra hệ thống bằng cách hàn thử, đảm bảo vận hành ổn định trước khi tiến hành thực nghiệm chính.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Độ bền kéo của các mẫu thử

Kết quả thử nghiệm cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ bền kéo giữa các mẫu thử tại các góc hàn khác nhau. Trong tổng số sáu mẫu, chỉ mẫu số 4 đạt đầy đủ yêu cầu về độ bền kéo theo tiêu chuẩn ASME IX, với giá trị độ bền kéo vượt trội so với các mẫu còn lại [9]. Mẫu số 4 được hàn tại góc 90°, tương ứng với vị trí 12h, nơi điện cực hàn nằm ở vị trí thẳng đứng hướng xuống dưới. Mẫu số 3, cũng được hàn tại góc 90°, đạt độ bền kéo cao thứ hai, chỉ đứng sau mẫu số 4, củng cố giả thuyết rằng góc hàn 90° có thể tối ưu hóa chất lượng mối hàn [10].

Các mẫu tại góc 0° (mẫu số 1 và 2) và góc 180° (mẫu số 5 và 6) có độ bền kéo thấp hơn và không đáp ứng đầy đủ tiêu chuẩn ASME IX. Tuy nhiên, các giá trị độ bền kéo của các mẫu này vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được, cho thấy tiềm năng cải thiện thông qua tối ưu hóa thông số hàn [11]. Cụ thể, mẫu số 1 và 2 tại góc 0° có độ bền kéo trung bình thấp hơn khoảng 15-20% so với mẫu số 4, trong khi mẫu số 5 và 6 tại góc 180° thấp hơn khoảng 10-15%. Sự khác biệt này có thể xuất phát từ sự phân bố nhiệt không đồng đều và chuyển dịch kim loại lỏng kém ổn định tại các góc hàn này [12].

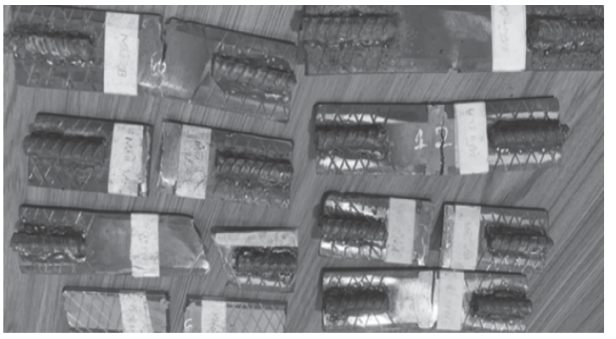


Hình 3. Hình dáng đường hàn

4.2. Phân tích hình dạng mối hàn

Hình 3 minh họa hình dạng đường hàn của các mẫu thử, cho thấy mối hàn tại góc 90° (mẫu 3 và 4) có bề mặt mịn, ngấu đều, và không xuất hiện khuyết tật rõ ràng như rỗ khí hoặc vết nứt bề mặt. Ngược lại, các mối hàn tại góc 0° và 180° có xu hướng xuất hiện các bất thường nhỏ như độ ngấu không đồng đều hoặc vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) rộng hơn, có thể làm giảm độ bền kéo. Sự ổn định của hồ quang và dòng kim loại lỏng tại góc 90° được cho là yếu tố chính dẫn đến chất lượng mối hàn vượt trội, do lực hấp dẫn hỗ trợ chuyển dịch kim loại lỏng một cách đồng đều hơn.

Hình 4 mô tả hình dạng các mẫu sau khi thử kéo, cho thấy mẫu số 4 có gãy kéo ở vùng kim loại cơ bản, thay vì tại mối hàn, chứng tỏ mối hàn có độ bền vượt trội so với vật liệu nền. Mẫu số 3 cũng cho thấy đặc tính tương tự, mặc dù vùng gãy có phần gần mối hàn hơn. Các mẫu tại góc 0° và 180° thường gãy tại hoặc gần mối hàn, phản ánh độ bền mối hàn thấp hơn và sự hiện diện của các khuyết tật vi mô.



Hình 4. Hình dáng các mẫu sau khi kiểm tra bền

4.3. Biểu đồ so sánh độ bền kéo

Hình 5 trình bày biểu đồ so sánh độ bền kéo của các mẫu, minh họa rõ sự vượt trội của mẫu số 4, với giá trị độ bền kéo đạt khoảng 650-700 MPa, cao hơn đáng kể so với ngưỡng tối thiểu của ASME IX (khoảng 550 MPa cho thép C45). Mẫu số 3 đạt khoảng 620 MPa, trong khi các mẫu còn lại dao động từ 500-550 MPa, không đạt yêu cầu. Biểu đồ này nhấn mạnh vai trò của góc hàn 90° trong việc tối ưu hóa độ bền kéo, đồng thời chỉ ra rằng các góc 0° và 180° cần được điều chỉnh thêm về thông số hàn để cải thiện hiệu suất.

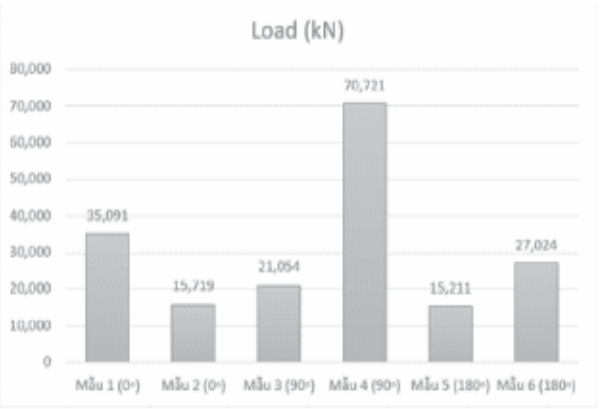
4.4. Thảo luận

Kết quả thực nghiệm cho thấy góc hàn 90° mang lại mối hàn có độ bền kéo cao nhất, có thể do sự ổn định của hồ quang và sự phân bố nhiệt đồng đều tại vị trí này. Khi điện cực hàn nằm ở vị trí thẳng đứng (90°), lực hấp dẫn hỗ trợ dòng kim loại lỏng chảy đều, giảm thiểu các khuyết tật như rỗ khí hoặc ngấu không hoàn toàn. Ngược lại, tại góc 0° và 180°, lực hấp dẫn có thể gây ra sự chuyển dịch kim loại lỏng không đồng đều, dẫn đến vùng ảnh hưởng nhiệt rộng hơn và độ bền kéo giảm.

Để cải thiện chất lượng mối hàn tại các góc 0° và 180°, cần điều chỉnh các thông số hàn như cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, hoặc góc điện cực. Ví dụ, giảm cường độ dòng hàn hoặc tăng tốc độ hàn có thể giảm nhiệt lượng đầu vào, từ đó thu hẹp vùng ảnh hưởng nhiệt và cải thiện độ bền kéo. Ngoài ra, việc sử dụng các kỹ thuật hàn xung (pulsed TIG) có thể giúp kiểm soát tốt hơn sự chuyển dịch kim loại lỏng, đặc biệt tại các góc hàn khó.

Kết quả này cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm soát góc hàn trong hàn quỹ đạo, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp yêu cầu độ bền và tính đồng nhất cao, như đường ống hạt nhân hoặc hệ thống thủy lực ngoài khơi. Để đáp ứng tiêu chuẩn ASME IX cho tất cả các góc hàn, cần tiến hành thêm các thực nghiệm điều chỉnh thông số, tập trung vào

việc tối ưu hóa các yếu tố như thời gian xung và chiều dài hồ quang tại các góc 0° và 180°.



Hình 5. Độ bền các mẫu

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm hàn quỹ đạo trên ống thép C45 đã cung cấp những hiểu biết quan trọng về ảnh hưởng của các thông số hàn, đặc biệt là góc hàn, đến độ bền kéo của mối hàn. Kết quả cho thấy mẫu hàn ở góc 90° (mẫu số 4 và số 3) đạt độ bền kéo cao nhất, trong đó mẫu số 4 đáp ứng tiêu chuẩn ASME IX. Điều này chỉ ra rằng góc hàn 90° tối ưu hóa sự phân bố nhiệt và chuyển dịch kim loại lỏng, tạo ra mối hàn chất lượng cao. Tuy nhiên, các mẫu ở góc 0° và 180° chỉ đạt độ bền kéo ở mức trung bình, chưa đáp ứng đầy đủ tiêu chuẩn, cho thấy cần điều chỉnh các thông số như cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, góc điện cực, thời gian xung, và chiều dài hồ quang.

Nghiên cứu nhấn mạnh vai trò của việc kiểm soát chính xác các thông số hàn trong hàn quỹ đạo để đảm bảo chất lượng mối hàn, đặc biệt trong các ngành công nghiệp yêu cầu cao như hàng không vũ trụ, dược phẩm, và hạt nhân. Việc tối ưu hóa thông số hàn không chỉ cải thiện độ bền kéo mà còn giảm thiểu khuyết tật, tăng năng suất và độ tin cậy của hệ thống đường ống. Kết quả này đặt nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm xác định bộ thông số hàn lý tưởng, đáp ứng tiêu chuẩn ASME BPE và ASME IX cho mọi góc hàn.

Hạn chế của nghiên cứu nằm ở số lượng mẫu thử giới hạn và chưa kiểm tra đầy đủ các thông số khác như loại khí bảo vệ hay vật liệu hàn. Trong tương lai, cần mở rộng thực nghiệm với nhiều biến số hơn và áp dụng các phương pháp phân tích kim tương để đánh giá toàn diện tổ chức mối hàn. Nghiên cứu này đóng góp vào sự phát triển của công nghệ hàn quỹ đạo, hỗ trợ nâng cao chất lượng mối hàn trong các ứng dụng công nghiệp hiện đại.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Lê Bá Tân;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Sỹ Huy, Nguyễn Phan Anh, Huỳnh Quang Duy, Phan Thanh Nhàn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-362. ❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Feldmann, M., Eichler, B., Höhler, S., & Schmeink, H. (2007), "*Feststellung und Bewertung zulässi- ger Restspalte beim Schweißen*". Final Report AIF_Research Projekt 14174N. ☞

[2]. Bartsch, H., & Feldmann, M. (2022), "*On the impact of undercuts and lack of penetration of cruciform joints from fatigue tests*". International Journal of Fatigue, 163, Article 107093. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107093

[3]. Amirafshari, P., Barltrop, N., Wright, M., & Kolios, A. (2021), "*Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures*". International Journal of Fatigue, 145, Article 106069. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069

[4]. Bartsch, H. (2023), "*Zum Einfluss von Schweißnahtimperfektionen auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen*" (1. Auflage).

[5]. Bartsch, H., & Feldmann, M. (2021), "*Numerical and databased investigations on the fatigue of cruciform joints with gaps*". Journal of Constructional Steel Research, 185, Article 106843. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106843

[6]. Bartsch, H., Citarelli, S., & Feldmann, M. (2022), "*Investigations on the fatigue behaviour of welded-in stiffeners with gaps*". Journal of Constructional Steel Research, 189, Article 107075. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107075

[7]. The British Standards Institution (2024), "*BS 7608:2014: Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products*".

[8]. Stojmanovski, V., Bogatinovski, Z., & Stojmanovski, V. (2015), "*Research on behaviour of butt-welded joints with imperfections: static and dynamic behavior*". Scientific Cooperation International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering, 1(1), 26-33.

[9]. Nguyen, N. T., & Wahab, M. A. (1996), "*The effect of undercut and residual stresses on fatigue behaviour of misaligned butt joints*". Engineering Fracture Mechanics, 55(3), 453-469. https://doi.org/10.1016/0013-7944(96)00040-5

[10]. Cerit, M., Kokumer, O., & Genel, K. (2010), "*Stress concentration effects of undercut defect and reinforcement metal in butt welded joint*". Engineering Failure Analysis, 17(2), 571-578. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.09.006

[11]. The British Standards Institution (BSI) (2019), "*BS 7910:2019: Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*". Chiswick, London.

[12]. Frostevarg, J., & Kaplan, A. F. (2014), "*Undercuts in laser arc hybrid welding*". Physics Procedia, 56, 663-672. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.11.032