

CHẾ TẠO CÁC MẪU THỬ ĐỘ BỀN UỐN BẰNG PHƯƠNG PHÁP HÀN TIG

FABRICATION OF BENDING STRENGTH TEST SPECIMENS USING TIG WELDING METHOD

Trần Quang Vinh, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng, Phan Thanh Nhàn*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21143322@student.hcmute.edu.vn;

haspkt@hcmute.edu.vn;

tunglt@hcmute.edu.vn;

*nhanpt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện nay, công nghệ in 3D, hay còn gọi là sản xuất bồi đắp, đang phát triển nhanh chóng và ngày càng quan trọng trong nhiều lĩnh vực như sản xuất công nghiệp, y học, kiến trúc và xây dựng. Công nghệ này chủ yếu sử dụng vật liệu nhựa để tạo ra các mô hình sản phẩm. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này là sản phẩm có độ bền và khả năng chịu nhiệt thấp. Để khắc phục, công nghệ in 3D kim loại đã ra đời. Nghiên cứu tổng quan về in 3D kim loại bằng phương pháp kết hợp hàn TIG không dùng dây bù và gia công CNC. Mục tiêu là cải tiến, bổ sung và nâng cao quá trình nghiên cứu, phát triển công nghệ mới này.

Từ khóa: In 3D kim loại; Mẫu thử uốn; Hàn TIG; Độ bền; Vật liệu đắp.

ABSTRACT

Currently, 3D printing technology, also known as additive manufacturing, is rapidly advancing and becoming increasingly vital across various sectors, including industrial production, healthcare, architecture, and construction. Primarily, this technology uses plastic materials to create prototype models. However, a key limitation is the low durability and heat resistance of the resulting products. To address this, metal 3D printing technology has emerged as a solution. This study provides an overview of metal 3D printing using a hybrid method combining TIG welding without filler wire and CNC machining. The research aims to contribute to the improvement, supplementation, and advancement of this innovative technology, enhancing its development and application in modern manufacturing processes.

Keywords: Metal 3D printing; Bending test specimen; TIG welding; Strength; Additive material. 

1. TỔNG QUAN

Công nghệ hàn TIG (Tungsten Inert Gas) đã trở thành một phương pháp quan trọng trong chế tạo các sản phẩm kim loại, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác và chất lượng cao như chế tạo mẫu thử độ bền uốn [1]. Trong bối cảnh ngành công nghiệp cơ khí tại Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ, việc nghiên cứu và ứng dụng hàn TIG để chế tạo các mẫu thử không chỉ đáp ứng nhu cầu sản xuất mà còn góp phần nâng cao năng lực công nghệ trong nước [2]. Hàn TIG, với khả năng kiểm soát hồ quang ổn định và tạo ra mối hàn chất lượng cao, được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như ô tô, hàng không vũ trụ, và xây dựng, nhờ khả năng gia công các vật liệu kim loại đa dạng, từ thép cacbon đến hợp kim đặc biệt [3].

Việc chế tạo các mẫu thử độ bền uốn bằng phương pháp hàn TIG mang lại nhiều lợi ích, bao gồm khả năng tạo ra các mối hàn có độ bền cơ học cao và bề mặt mịn, đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật nghiêm ngặt [4]. Tuy nhiên, quá trình hàn TIG đối mặt với nhiều thách thức, đặc biệt trong việc kiểm soát các thông số như cường độ dòng điện, tốc độ hàn, và môi trường xung quanh, vốn có thể ảnh hưởng đến chất lượng mối hàn và tính chất cơ học của mẫu thử [5]. Các yếu tố như ứng suất dư, biến dạng nhiệt, và khuyết tật mối hàn (như rỗ khí hoặc nứt) có thể làm giảm độ bền uốn của sản phẩm nếu không được kiểm soát chặt chẽ [6]. Do đó, việc tối ưu hóa các thông số hàn TIG là cần thiết để đảm bảo độ chính xác và hiệu suất của các mẫu thử độ bền uốn.

Nghiên cứu này tập trung vào việc chế tạo các mẫu thử độ bền uốn bằng phương pháp hàn TIG, với mục tiêu đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến chất lượng mối hàn và

tính chất cơ học của sản phẩm [7]. Các thông số như cường độ dòng điện, tốc độ di chuyển của mỏ hàn, góc điện cực, và độ dày lớp kim loại được phân tích để xác định điều kiện tối ưu, đảm bảo mẫu thử đạt yêu cầu về độ bền uốn và tính đồng nhất [8]. Ngoài ra, việc kiểm soát các yếu tố môi trường, chẳng hạn như độ ẩm và nhiệt độ, cũng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu các khuyết tật và nâng cao chất lượng mối hàn [9]. Phương pháp hàn TIG, khi được tối ưu hóa, không chỉ cải thiện hiệu suất sản xuất mà còn giảm chi phí so với các phương pháp gia công truyền thống, mang lại lợi ích kinh tế đáng kể cho các doanh nghiệp Việt Nam [10].

Về mặt ứng dụng, các mẫu thử độ bền uốn chế tạo bằng hàn TIG có thể được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, từ kiểm tra chất lượng vật liệu trong công nghiệp đến phát triển các chi tiết phức tạp trong ô tô và hàng không vũ trụ [11]. Nghiên cứu này không chỉ đóng góp vào việc xây dựng cơ sở lý thuyết và thực tiễn cho công nghệ hàn TIG mà còn hỗ trợ các doanh nghiệp trong nước giảm phụ thuộc vào công nghệ nhập khẩu, từ đó nâng cao khả năng cạnh tranh trên thị trường quốc tế [12]. Hơn nữa, việc phát triển các mẫu thử độ bền uốn chất lượng cao còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ tin cậy cao, như chế tạo kết cấu thép hoặc sản xuất thiết bị y tế.

Nỗ lực nghiên cứu này mang ý nghĩa quan trọng trong việc thúc đẩy đổi mới công nghệ tại Việt Nam, đặc biệt trong bối cảnh ngành công nghiệp đang chuyển đổi sang các giải pháp sản xuất tiên tiến và bền vững [13]. Bằng cách tối ưu hóa quy trình hàn TIG, nghiên cứu không chỉ cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn góp phần xây dựng nền tảng cho công nghệ gia công kim loại hiện đại, hỗ trợ sự

phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí trong nước [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong nghiên cứu này, hệ thống máy hàn CNC 3 trục được sử dụng, kết hợp nguồn hàn TIG Jasic 250A W227 không bù dây để cung cấp năng lượng nung chảy kim loại trong quá trình in 3D kim loại. Phôi thép CT3, với kích thước $260 \times 6 \times t$ (mm), được cố định, trong khi điện cực hàn di chuyển theo quỹ đạo lập trình sẵn. Thành phần hóa học và tính chất cơ học của thép CT3 (Bảng 2.1) cho thấy độ bền kéo từ 373-461 N/mm², giới hạn chảy 225 N/mm², và độ cứng Brinell 130-160 HB, phù hợp cho các mẫu thử độ bền uốn.

Việc tối ưu hóa thông số hàn TIG đóng vai trò quan trọng để đảm bảo chất lượng mối hàn. Các thông số như dòng điện hàn (90-130

A), tốc độ hàn (12-15 mm/s), độ dày phôi (6-10 mm), và đặc biệt là góc di chuyển đầu điện cực (0° , 45° , 90°) được điều chỉnh để khảo sát ảnh hưởng đến độ bền uốn và chất lượng mối hàn (Bảng 2.3, 2.4). Góc di chuyển đầu điện cực là yếu tố chính, tác động đến quỹ đạo hàn và cơ tính của mẫu. Các thông số cố định như khoảng cách hồ quang (2 mm), đường kính điện cực (2.4 mm), và lưu lượng khí bảo vệ (13 L/phút) được giữ ổn định (Bảng 2.2).

Quá trình thí nghiệm dựa trên các nghiên cứu trước và thử nghiệm thăm dò để xác định thông số tối ưu, tránh khuyết tật như nứt, xộp, hoặc thiếu liên kết. Kết quả từ việc thay đổi góc di chuyển đầu điện cực giúp đánh giá ảnh hưởng của quỹ đạo đến độ ổn định hồ quang, độ sâu thâm nhập, và hình dạng mối hàn, từ đó nâng cao chất lượng mẫu thử trong in 3D kim loại.

Bảng 1. Thành phần hóa học – Tính chất cơ học thép CT3

Carbon	Silic	Mangan	Phốt pho	Lưu huỳnh
0.16	0.15	0.62 %	0.010	0.042
Độ bền kéo	Giới hạn chảy	Độ giãn dài	Độ cứng Brinell	Độ cứng Rockwell
373-461 N/mm ²	225 N/mm ²	22%	130-160 HB	45-48 HRC

Bảng 2. Thông số cố định trong quá trình hàn

Thông số	CTWD & chiều dài hồ quang	Góc làm việc	Khoảng cách giữa 2 đường hàn	Đường kính điện cực	Góc mài điện cực	Lưu lượng khí bảo vệ
Giá trị	4mm & 2mm	90	3mm	2.4mm	45	13 L/phút

Bảng 3. Mức giá trị của các thông số đầu vào

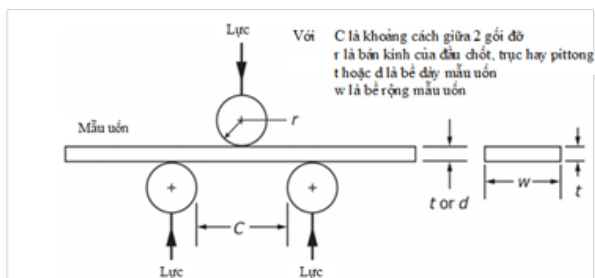
Thông số hàn	Mức giá trị		
	1	2	3
Dòng điện hàn, I (A)	90	110	130
Tốc độ hàn, F (mm/s)	12	13.5	15
Độ dày phôi	6	8	10



3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Quá trình nghiên cứu được thực hiện thông qua các bước chế tạo, gia công và kiểm tra mẫu thử in 3D kim loại sử dụng hàn TIG. Sau khi hàn các mẫu thép CT3 theo thông số thí nghiệm (Bảng 2.3, 2.4), các mẫu được xử lý theo sơ đồ quy trình thực nghiệm và xử lý mẫu (Hình 2.4, 2.5). Mẫu thử được gia công đạt kích thước chuẩn cho thử nghiệm uốn, tuân theo tiêu chuẩn ISO 7438 và ASTM E290. Quy trình gia công đảm bảo độ chính xác về kích thước và bề mặt trước khi tiến hành kiểm tra.

Thử nghiệm độ bền uốn được thực hiện trên máy thử vạn năng WE-1000B. Ứng suất bền uốn của mẫu được tính theo công thức: $\sigma = 3FC/(2wt^2)$, trong đó F là lực uốn, C là khoảng cách giữa các điểm tựa, w là chiều rộng mẫu, và t là độ dày mẫu. Công thức này giúp xác định khả năng chịu tải của mẫu dưới lực uốn, cung cấp dữ liệu về độ bền cơ học.



Hình 1. Mẫu uốn

Ngoài ra, cấu trúc tế vi của các mẫu được kiểm tra để đánh giá chất lượng mối hàn và ảnh hưởng của các thông số hàn TIG (dòng điện, tốc độ hàn, góc di chuyển đầu điện cực) đến tổ chức vật liệu. Các thông số như góc di chuyển đầu điện cực (0° , 45° , 90°) được phân tích để xác định ảnh hưởng đến độ bền uốn và tính đồng nhất của mối hàn. Dữ liệu đầu ra từ các thử nghiệm được thu thập và so sánh để xác định bộ thông số tối ưu, đảm bảo mẫu thử đạt

yêu cầu kỹ thuật về độ bền và chất lượng bề mặt.

Quá trình nghiên cứu kết hợp thí nghiệm thực tế và phân tích dữ liệu nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa công nghệ in 3D kim loại sử dụng hàn TIG, góp phần nâng cao hiệu quả sản xuất và ứng dụng thực tiễn.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của công nghệ in 3D kim loại, việc đảm bảo chất lượng cơ học của sản phẩm là yếu tố then chốt để mở rộng ứng dụng vào các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và độ bền cao, như hàng không, y sinh và ô tô. Trong số các phương pháp hoàn thiện bề mặt sau in, hàn TIG (Tungsten Inert Gas) được xem là một giải pháp hiệu quả nhờ khả năng kiểm soát tốt năng lượng đưa vào vật liệu và chất lượng mối hàn. Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn TIG – bao gồm góc di chuyển đầu điện cực, dòng điện hàn, tốc độ hàn, và độ dày phôi – đến chất lượng mối hàn và độ bền uốn của mẫu in 3D kim loại. Trong đó, đặc biệt chú trọng đến ảnh hưởng của góc di chuyển đầu điện cực tại ba mức: 0° , 45° và 90° .

4.1. Ảnh hưởng của độ dày phôi đến độ bền uốn

Kết quả thử nghiệm uốn cho thấy, trong tất cả các thông số được khảo sát, độ dày phôi (ký hiệu t) đóng vai trò quyết định đến độ bền uốn của mẫu. Theo công thức tính ứng suất uốn $\sigma = 3FC/(2wt^2)$, có thể thấy ứng suất uốn tỷ lệ nghịch với bình phương độ dày phôi, do đó thay đổi nhỏ về t dẫn đến biến thiên đáng kể về độ bền.

Cụ thể, phôi có độ dày 6 mm cho kết quả nổi bật nhất về độ bền uốn. Nguyên nhân là

nhờ độ dày này đảm bảo độ thâm nhập mỗi hàn tốt, tạo nên cấu trúc hàn đồng nhất, tăng cường khả năng kết dính giữa các lớp vật liệu, từ đó cải thiện cơ tính tổng thể. Trong khi đó, các phôi có độ dày lớn hơn, như 8 mm và 10 mm, lại cho kết quả kém hơn. Ở các mẫu này, nhiệt lượng không đủ để thâm nhập sâu, dẫn đến diện tích tiếp xúc hàn thực tế bị giảm, tạo nên những vùng liên kết yếu và làm giảm độ bền cơ học.

4.2. Tác động của dòng điện hàn

Dòng điện hàn được khảo sát trong khoảng 90 A đến 130 A. Kết quả cho thấy, khoảng 90-110 A là tối ưu để đảm bảo độ sâu thâm nhập thích hợp và tránh hiện tượng quá nhiệt. Khi dòng điện đạt đến mức 110 A, mỗi hàn đạt độ bền cao nhờ nhiệt độ đủ để làm chảy kim loại đều và sâu.

Tuy nhiên, khi vượt quá ngưỡng 110 A, hiện tượng quá nhiệt bắt đầu xảy ra. Điều này dẫn đến sự phát triển quá mức của hạt kim loại, tạo ra cấu trúc thô, dễ nứt vỡ, và xuất hiện các khuyết tật vi mô như rỗ khí hoặc vùng không thâm nhập hoàn toàn. Kết quả là độ bền uốn bị giảm sút đáng kể ở những mẫu được hàn với cường độ dòng điện quá cao.

4.3. Ảnh hưởng của tốc độ hàn

Tốc độ di chuyển mỏ hàn cũng là một yếu tố đáng lưu ý trong quá trình hàn TIG. Nghiên cứu khảo sát các mức tốc độ từ 12 mm/s đến 15 mm/s. Kết quả chỉ ra rằng, tốc độ hàn quá cao làm giảm thời gian tác dụng nhiệt, khiến kim loại không kịp nóng chảy hoàn toàn, dẫn đến mối hàn mỏng, thiếu độ sâu và dễ xuất hiện khuyết tật. Tuy nhiên, trong điều kiện thỏa đáng về dòng điện và độ dày phôi, ảnh hưởng của tốc độ hàn được ghi nhận là không quá rõ rệt đến độ bền uốn, miễn là nằm trong giới hạn cho phép.

4.4. Góc di chuyển đầu điện cực và độ bền uốn

Góc di chuyển của đầu điện cực ảnh hưởng trực tiếp đến hướng và cường độ truyền năng lượng vào vật liệu. Trong nghiên cứu này, ba mức góc di chuyển được khảo sát: 0° , 45° và 90° . Kết quả cho thấy:

- Góc 90° là tối ưu nhất về độ bền uốn, cho kết quả cao và ổn định. Với góc này, tia hồ quang tập trung trực tiếp vào vị trí hàn, đảm bảo năng lượng được phân bố đồng đều theo chiều sâu và chiều ngang.

- Góc 0° , tương ứng với tư thế hàn song song với bề mặt phôi, cho kết quả kém nhất, do năng lượng chủ yếu lan tỏa bề mặt, gây thiếu thâm nhập và mối hàn yếu.

- Góc 45° cho kết quả trung bình, tuy đạt được một số mẫu có độ bền khá cao, nhưng lại thiếu tính ổn định, khi một số mẫu khác thể hiện độ bền kém. Điều này có thể do sự khó kiểm soát về độ đồng đều của tia hồ quang ở góc nghiêng trung gian.

4.5. Mô hình hóa bằng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)

Để dự đoán và xác minh tính tin cậy của dữ liệu thực nghiệm, một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) đã được huấn luyện dựa trên tập dữ liệu đầu vào gồm: độ dày phôi, dòng điện, tốc độ hàn và góc di chuyển điện cực. Kết quả đánh giá mô hình ANN cho thấy hệ số tương quan $R > 0.96$, chứng tỏ rằng mô hình có khả năng học tốt từ dữ liệu thực nghiệm và cho kết quả dự đoán đáng tin cậy.

Các biểu đồ dự đoán (Hình 3.2, 3.3, 3.4) thể hiện rằng mô hình ANN đã xác nhận các xu hướng đã quan sát được trong thực nghiệm, như: 

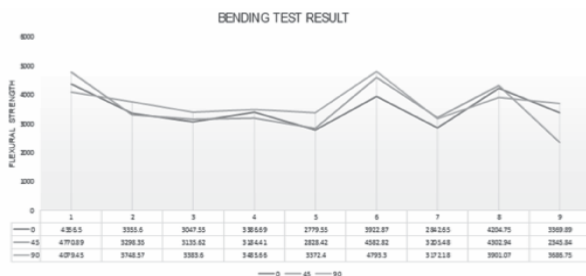
- Độ bền uốn cao nhất khi sử dụng phôi dày 6 mm;
- Dòng điện 110 A là tối ưu;
- Góc 90° mang lại hiệu quả vượt trội;
- Tốc độ hàn ảnh hưởng không đáng kể.

4.6. Tối ưu hóa thông số bằng phương pháp Taguchi kết hợp ANN

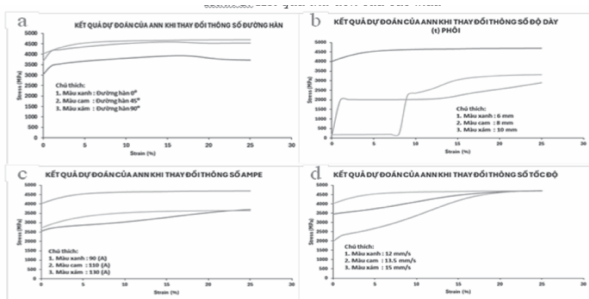
Nhằm xác định tổ hợp thông số hàn tối ưu, nghiên cứu đã áp dụng phân tích Taguchi, kết hợp với kết quả dự đoán từ mô hình ANN. Kết quả phân tích xác nhận rằng tổ hợp thông số tối ưu bao gồm:

- Góc di chuyển đầu điện cực: 90°;
- Độ dày phôi: 6 mm;
- Dòng điện hàn: 110 A;
- Tốc độ hàn: 13 mm/s (trung bình).

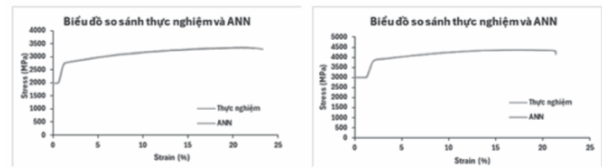
Tổ hợp thông số này cho giá trị độ bền uốn cao nhất, đồng thời đảm bảo tính ổn định và lặp lại trong quy trình sản xuất.



Hình 2. Kết quả thử uốn của các mẫu



Hình 3. Dự đoán ANN về ảnh hưởng của của các tham số



Hình 4. So sánh thực nghiệm với ANN

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành công trong việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn TIG đến chất lượng mối hàn và độ bền uốn của mẫu in 3D kim loại, sử dụng thép CT3. Kết quả cho thấy độ dày phôi 6 mm, dòng điện hàn 110 A, và góc di chuyển đầu điện cực 90° là bộ thông số tối ưu, mang lại độ bền uốn cao nhất và mối hàn đồng nhất. Góc di chuyển 90° đảm bảo tính ổn định và chất lượng vượt trội so với 0° và 45°. Mô hình ANN với độ tin cậy $R > 0,96$ đã xác nhận tính chính xác của dữ liệu thực nghiệm và hỗ trợ dự đoán thông số tối ưu. Phương pháp kết hợp hàn TIG không bù dây và gia công CNC không chỉ giảm chi phí mà còn rút ngắn thời gian sản xuất, mở ra tiềm năng ứng dụng thực tiễn tại Việt Nam. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học để cải tiến công nghệ in 3D kim loại, góp phần nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm phụ thuộc công nghệ nhập khẩu và đáp ứng nhu cầu thị trường.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Thái Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Quang Vinh, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng, Phan Thanh Nhân.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường

Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố 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: SV2025-356.❖

Ngày nhận bài: 05/5/2025

Ngày phản biện: 19/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Singh, M., & Singh, S. (2021), “*Multiple response optimization of ultrasonic assisted electric discharge machining of Nimonic 75: a Taguchi-grey relational analysis approach*”. Materials Today: Proceedings, 45, 4731-4736. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.173>
- [2]. BalaramNaik, A., & Chennakeshava Reddy, A. (2018), “*Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA)*”. Therm Sci Eng Prog, 8, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.005>
- [3]. Paventhan, R., Lakshminarayanan, P. R., & Balasubramanian, V. (2011), “*Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints*”. Materials & Design, 32(4), 1888-1894. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.011>
- [4]. Argade, G. R., Shukla, S., Liu, K., & Mishra, R. S. (2018), “*Friction Stir lap welding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion properties*”. Journal of Materials Processing Technology, 259, 259-269. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.048>
- [5]. Kant, R., Mittal, C., Kumar, B. S., Rana, M., & Kumar, R. (2018), “*Fabrication and characterization of weldments AISI 304 and AISI 316 used in industrial applications*”. Materials Today: Proceedings, 5(9), 18475-18481.
- [6]. Sridhara, S. N., Allada, S. C. S., PV, S. S., Banala, S., Subbiah, R., & Marichamy, S. (2020), “*Tensile strength performance and optimization of Al 7068 using TIG welding process*”. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.481>
- [7]. Shanmugasundar, G., Karthikeyan, B., & Vignesh, V. (2019), “*Optimization of process parameters in TIG welded joints of AISI 304L-austenitic stainless steel using Taguchi's experimental design method*”. Materials Today: Proceedings, 16, 1188-1195.
- [8]. Silwal, B., & Santangelo, M. (2018), “*Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape*”. Journal of Materials Processing Technology, 251, 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.010>
- [9]. Ramana, M. V., Kumar, B. V. R. R., Krishna, M., Rao, M. V., & Kumar, V. S. (2020), “*Optimization and influence of process parameters of dissimilar SS304L - SS430 joints produced by robotic TIG welding*”. Materials Today: Proceedings, 23, 479-482. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.388>
- [10]. Bu, Y., & Gardner, L. (2018), “*Local stability of laser-welded stainless steel I-sections in bending*”. Journal of Constructional Steel Research, 148, 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.010>
- [11]. Yan, S., Shi, Y., Liu, J., & Ni, C. (2019), “*Effect of laser mode on microstructure and corrosion resistance of 316L stainless steel weld joint*”. Optics and Laser Technology, 113, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.01.023>
- [12]. Keskitalo, M., Sundqvist, J., Mäntyjärvi, K., Powell, J., & Kaplan, A. F. H. (2015), “*The influence of shielding gas and heat input on the mechanical properties of laser welds in ferritic stainless steel*”. In Physics Procedia (Vol. 78, pp. 222-229). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.032>
- [13]. Wu, S. K., Zheng, K., Zou, J. L., Jiang, F., & Han, X. H. (2018), “*A study of the behavior and effects of nitrogen take-up from protective gas shielding in laser welding of stainless steel*”. Journal of Manufacturing Processes, 34, 477-485. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.031>
- [14]. Mohammad, H., & Tayebi, M. (2018), “*Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding*”. Journal of Alloys and Compounds, 767, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.302>