

# NGHIÊN CỨU TỐI ƯU THÔNG SỐ HÀN MIG CHO THÉP TẤM A36 BẰNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI KẾT HỢP PHÂN TÍCH XÁM

## RESEARCH ON OPTIMAL MIG WELDING PARAMETERS FOR A36 STEEL PLATE USING TAGUCHI METHOD WITH GRAY RELATIONAL ANALYSIS

ĐOÀN XUÂN MẠNH<sup>1</sup>, VŨ VIỆT QUYỀN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Khoa Cơ sở - Cơ bản, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

<sup>2</sup>Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: quyenvv.cndt@vamaru.edu.vn

### Tóm tắt

Hàn MIG là phương pháp hàn có độ chính xác và tạo ra chất lượng mối hàn tốt cho kim loại dạng tấm. Nghiên cứu này được thực hiện để tối ưu thông số hàn MIG nhằm tăng một số cơ tính bao gồm độ dai va đập và độ cứng Rockwell của mối hàn giáp mối thép tấm A36 sử dụng trong chế tạo tời cuốn cáp. Nghiên cứu thử nghiệm trên các tấm thép A36 dày 10mm bằng cách sử dụng ma trận trực giao L9 của thiết kế Taguchi kết hợp phân tích quan hệ xám. Các thông số hàn được chọn bao gồm dòng điện hàn, điện áp hàn và lưu lượng khí bảo vệ. Dựa trên phương pháp Taguchi - phân tích xám, các thông số tối ưu cho độ cứng và độ dai va đập tốt nhất được xác định với các giá trị dòng điện 180A, điện áp 24V và lưu lượng khí 20 l/phút. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy dòng điện hàn được tìm thấy là các yếu tố có ảnh hưởng đáng kể nhất đến độ cứng và độ dai va đập của mối hàn, tiếp sau đó là điện áp hàn và lưu lượng khí Ar.

**Từ khóa:** Thép A36, hàn MIG, thiết kế Taguchi, phân tích xám.

### Abstract

Metal Inert Gas (MIG) welding is a precise technique known for producing high-quality welds in sheet metal applications. This research aimed to optimize MIG welding parameters to enhance mechanical properties, included impact toughness and Rockwell hardness, in butt welds of A36 steel plates, commonly used in wire rope winch manufacturing. Experiments were conducted on 10mm thick A36 steel plates using the L9 orthogonal array from the Taguchi design, integrated with gray relational analysis. The welding parameters investigated included welding current, welding voltage, and shielding gas flow rate. Through the application of the Taguchi method and gray relational analysis,

optimal conditions for maximizing hardness and impact toughness were identified, with a welding current of 180A, voltage of 24V, and gas flow rate of 20 l/min. Analysis of variance (ANOVA) revealed that welding current was the most influential factor affecting both hardness and impact toughness, followed by welding voltage and shielding gas flow rate.

**Keywords:** A36 steel, MIG welding, Taguchi design, gray relation analysis.

### 1. Mở đầu

Trong các ngành công nghiệp hiện nay, việc sử dụng các loại vật liệu có tỷ lệ độ bền trên khối lượng cao đang trở thành xu hướng, trong đó thép hợp kim thấp độ bền cao (HSLA) là vật liệu nổi bật. Thép HSLA có độ bền kéo lớn hơn 450MPa và độ dẻo có thể đạt tới 30%. Sự cải thiện về tính chất cơ học của thép HSLA chủ yếu là do các nguyên tố hợp kim được thêm vào giúp làm nhỏ hạt, tạo sai lệch trong mạng tinh thể [1]. Thép A36 là một trong số các thép HSLA được sử dụng rộng rãi trong chế tạo các chi tiết kết cấu với độ dẻo, độ dai, độ bền và tính hàn tốt [2]. Loại thép này thường được hàn bằng kỹ thuật hàn hồ quang như hàn SMAW, GMAW, FCAW. Trong quá trình hàn, nhiệt được cung cấp bởi hồ quang sẽ tạo ra các vùng có cấu trúc tế vi khác biệt do đó ảnh hưởng đến tính chất cơ học của mối hàn [3]. Một trong những quy trình hàn hồ quang được sử dụng nhiều nhất là hàn hồ quang kim loại trong môi trường khí bảo vệ - GMAW hay còn được biết đến với tên gọi hàn MIG, MAG do tốc độ sản xuất cao nhất, chất lượng mối hàn tốt.

Một số nghiên cứu đã đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến cơ tính của mối hàn thép HSLA. Nghiên cứu của tác giả Al-Saraireh đã đánh giá ảnh hưởng của dòng hàn và điện áp hàn đến cơ tính mối hàn thép cacbon thấp [2]. Tác giả Alvaro đã đánh giá ảnh hưởng của thành phần và lưu lượng khí bảo vệ trong hàn GMAW đối với thép HSLA. Một số nghiên cứu khác đã tập trung vào tối ưu các thông số hàn của

phương pháp GMAW cho thép HSLA để đạt cơ tính, độ biến dạng tốt nhất [4], [5]. Những nghiên cứu này chủ yếu sử dụng phương pháp Taguchi truyền thống hoặc kết hợp Taguchi với phân tích logic mờ để tối ưu các thông số hàn. Taguchi là một công cụ thiết kế thực nghiệm mạnh mẽ có thể được sử dụng để cải thiện hiệu suất quy trình mà không cần phải thực hiện quá nhiều thử nghiệm. Theo phương pháp này, một chuỗi thí nghiệm dựa trên ma trận trực giao của Taguchi được thực hiện, đảm bảo các cấp trạng thái của yếu tố điều khiển ở mọi cột có xác suất xuất hiện ngang nhau. Tuy nhiên, phương pháp này xếp hạng bộ thông số theo chỉ số S/N do vậy chỉ tối ưu theo một mục tiêu đơn lẻ. Đối với trường hợp cần tối ưu đa mục tiêu, một số nhà nghiên cứu đã kết hợp Taguchi với một số phương pháp thống kê khác như phân tích logic mờ, mạng nơ-ron nhân tạo, phương pháp PSI [4], [6].

Phương pháp phân tích quan hệ xám (GRA) là một phương pháp thống kê hiệu quả để đo mức độ gần đúng giữa các đối tượng bằng cách sử dụng cấp quan hệ xám. Phương pháp này tạo ra một chuỗi ý nghĩa cho các tính năng được đánh giá với tập hợp thứ hạng, qua đó cho biết các tính năng này có ảnh hưởng lớn đến mục tiêu đang xét hay không. Phương pháp GRA được đánh giá cao hơn các phương pháp khác vì nó cho phép phân tích dữ liệu cục bộ và rời rạc trong khi vẫn đảm bảo độ tin cậy. Vì vậy, nghiên cứu này hướng tới sử dụng kết hợp Taguchi và GRA nhằm giải quyết bài toán tối ưu đa mục tiêu.

Trong điều kiện làm việc, tời cuốn cáp chịu ma sát mài mòn và tải trọng động khi nâng hạ hay phanh tải. Các lực này sẽ tác dụng thông qua dây cáp lên kết cấu hỗ trợ của tời. Do vậy, mối hàn cần phải đảm bảo được khả năng chống mài mòn và va đập. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là tối ưu hóa các thông số hàn MIG cho mối hàn giáp mối sử dụng thép ASTM A36 để cải thiện độ dai và đập và độ cứng mối hàn. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm sử dụng thiết kế Taguchi kết hợp phân tích GRA.

## 2. Nguyên liệu và thí nghiệm

### 2.1. Nguyên liệu và thiết lập thông số hàn

Nguyên liệu sử dụng trong thí nghiệm là thép tấm ASTM A36 được sản xuất tại Trung Quốc, có kích thước 100x100x10 (mm) với thành phần hóa học như trong Bảng 1. Quy trình hàn MIG sử dụng khí bảo vệ Ar 99,99%, dây bù ER70S-6 đường kính 1,2mm, mối hàn được vát mép theo tiêu chuẩn AWS D1.1. Các thông số hàn được thay đổi trong nghiên cứu này bao gồm cường độ dòng hàn từ 180-220 (A), điện thế hàn trong phạm vi 16-20 (V) và lưu lượng khí Ar từ 10-20

l/phút, tốc độ hàn được duy trì ở giá trị không đổi.

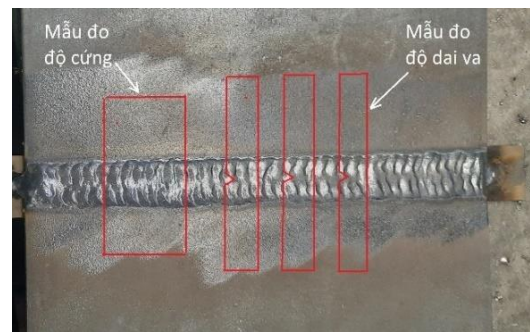
**Bảng 1. Thành phần hóa học thép ASTM A36**

Fe	C	Mn	Si	P	S	Cu
98.0	0.25	1.03	0.40	0.04	0.04	0.2

### 2.2. Phương pháp chuẩn bị mẫu và thiết bị đo

Trong nghiên cứu này, cơ tính của mối hàn được đánh giá bao gồm độ cứng và độ dai va đập. Các mẫu đo được cắt từ mẫu hàn tại các vị trí như Hình 1. Mẫu đo độ cứng được chuẩn bị có kích thước 40x30x10 (mm), bề mặt được làm sạch và đánh bóng để loại bỏ các tạp chất như rỉ sét, bụi và dầu. Phép đo được thực hiện trên máy đo độ cứng Hard Rocker 150A, sử dụng thang đo B với thiết lập tải trọng 100kg, thời gian đặt tải trọng 15 giây. Vị trí đo độ cứng tại chính giữa vùng kim loại nóng chảy của mối hàn. Mỗi mẫu đo độ cứng được đo 3 lần và sử dụng kết quả trung bình.

Mẫu đo độ dai va đập được chuẩn bị theo tiêu chuẩn ASTM E23 có kích thước 55x10x10 (mm) và thực hiện trên máy đo JBS-300 Jinan Precision Testing Equipment Co., Ltd. Mỗi mẫu hàn được chuẩn bị ba mẫu thử độ dai va đập như Hình 1, kết quả cuối cùng được lấy trung bình các phép đo.



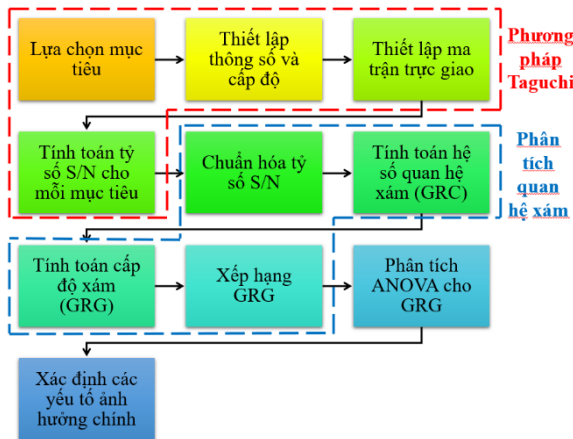
**Hình 1. Chuẩn bị mẫu đo độ cứng và độ dai va đập**

### 2.3. Thiết kế thí nghiệm và tối ưu các thông số

Thiết kế Taguchi được sử dụng cho 3 yếu tố đầu vào với 3 cấp độ như Bảng 2. Các bước thực hiện tối ưu thông số hàn theo Taguchi - GRA được thể hiện trong sơ đồ Hình 2.

**Bảng 2. Thông số hàn và cấp độ**

Thông số	Cấp độ		
	1	2	3
Dòng điện hàn (A)	150	180	210
Điện áp hàn (V)	22	24	26
Lưu lượng khí Ar (l/phút)	10	15	20



**Hình 2. Các bước thực hiện tối ưu đa mục tiêu cho thông số hàn MIG**

Tỷ số S/N được tính toán thông qua phần mềm Minitab 21 sử dụng công thức:

$$(S/N)_i = 10 \log \left( \frac{\bar{y}_i^2}{s_i^2} \right) \quad (1)$$

Trong đó:  $\bar{y}_i$  là tín hiệu,  $s_i^2$  là nhiễu,  $i$  là số thứ tự thí nghiệm. Giá trị tỷ số S/N càng lớn thì tham số đầu ra sẽ càng gần với giá trị tối ưu, tuy nhiên chỉ áp dụng cho một mục tiêu riêng lẻ. Để xác định được tối ưu cho đa mục tiêu cần kết hợp phương pháp GRA. Bước đầu tiên cần chuẩn hóa tỷ số S/N theo công thức:

$$X_i^* = \frac{X_i - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (2)$$

Với giá trị  $X_i$  là tỷ số S/N thứ  $i$ ,  $X_i^*$  là giá trị chuẩn hóa. Từ giá trị chuẩn hóa xác định hệ số xám theo công thức:

$$\gamma_i = \frac{\zeta \Delta_{max} + \Delta_{min}}{\zeta \Delta_{max} + \Delta_i} \quad (3)$$

Với giá trị  $\Delta_i$  là chuỗi lệch,  $\zeta$  là hệ số phân biệt nằm trong phạm vi từ 0 đến 1. Độ xám cuối cùng sẽ

được xác định theo công thức:

$$\Psi_i = \sum_l^z w_l \cdot \gamma_l \quad (4)$$

Trong đó:  $w_l$  là trọng số của các mục tiêu để quan hệ xám,  $z$  là số thí nghiệm.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Tối ưu đơn mục tiêu

Kết quả thực nghiệm theo thiết kế Taguchi L9 và tính toán tỷ số S/N được thể hiện trong Bảng 3. Đối với mỗi hàn, độ dai và đập cho thấy khả năng chịu các tải trọng và đập tốt hơn nên phân tích S/N sẽ lựa chọn phương án *lớn nhất tốt hơn*. Tuy nhiên sau hàn, độ cứng mỗi hàn của loại thép HSLA thường tăng lên, độ cứng cao sẽ khiến mỗi hàn bị giòn cần phải xử lý nhiệt phức tạp hơn sau khi hàn để giảm độ cứng và ứng suất. Do vậy độ cứng mỗi hàn được lựa chọn theo phương án *nhỏ hơn thì tốt hơn*. Kết quả cho thấy giá trị độ dai và đập đạt được cao nhất 80J/cm<sup>2</sup> với thông số thử nghiệm số 3. Trong khi thử nghiệm số 4 cho độ cứng thấp nhất đạt 93 HRB.

Phân tích Taguchi dựa trên các tỷ số S/N tính toán được, các yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất đến độ dai và đập và độ cứng mỗi hàn được xác định cho các mức tối ưu. Bảng 4 và 5 xếp hạng các thông số ảnh hưởng đến mục tiêu đầu ra. Kết quả cho thấy điện áp hàn có ảnh hưởng lớn nhất đến độ dai và đập và dòng điện hàn là thông số ảnh hưởng nhiều nhất đến độ cứng mỗi hàn. Trong khi lưu lượng khí Ar không ảnh hưởng quá nhiều đến cả hai tính chất này của mỗi hàn.

Điều đó có nghĩa khi thay đổi cường độ dòng điện hoặc điện áp, nhiệt sinh ra thay đổi sẽ ảnh hưởng đến cấu trúc tế vi của mỗi hàn trong quá trình đông đặc do sự phát triển của các hạt cũng như khả năng hình thành các khuyết tật.

**Bảng 3. Kết quả đo độ dai và đập, độ cứng và tỷ số S/N**

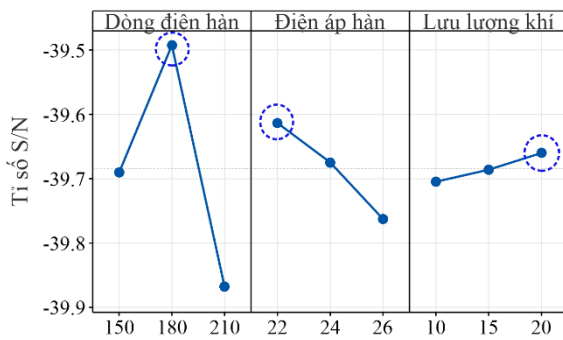
STT	Dòng hàn (A)	Thông số			Kết quả đo		Tỷ số S/N	
		Điện áp hàn (V)	Lưu lượng Ar (l/phút)	Độ dai và đập (J/cm <sup>2</sup> )	Độ cứng (HRB)	Độ dai và đập	Độ cứng	
1	150	22	10	72.5	97	37.207	-39.735	
2	150	24	15	68.75	96	36.745	-39.645	
3	150	26	20	80	96.5	38.062	-39.691	
4	180	22	15	52.5	93	34.403	-39.370	
5	180	24	20	78	95	37.842	-39.554	
6	180	26	10	62.5	95	35.918	-39.554	
7	210	22	20	58.75	97	35.380	-39.735	
8	210	24	10	63.75	98	36.090	-39.825	
9	210	26	15	71.25	101	37.056	-40.043	

**Bảng 4. Phân tích tỷ số S/N của độ dai va đập**

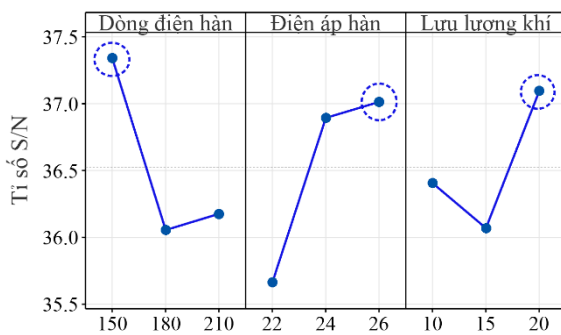
Cấp độ	Tỷ số S/N trung bình		
	Dòng điện hàn	Điện áp hàn	Lưu lượng Ar
1	37.34	35.66	36.4
2	36.05	36.89	36.07
3	36.18	37.01	37.09
Delta	1.28	1.35	1.03
Xếp hạng	2	1	3

**Bảng 5. Phân tích tỷ số S/N của độ cứng**

Cấp độ	Tỷ số S/N trung bình		
	Dòng điện hàn	Điện áp hàn	Lưu lượng Ar
1	-39.69	-39.61	-39.7
2	-39.49	-39.67	-39.69
3	-39.87	-39.76	-39.66
Delta	0.37	0.15	0.04
Xếp hạng	1	2	3



**Hình 3. Thông số đầu vào tối ưu cho độ cứng**



**Hình 4. Thông số đầu vào tối ưu cho độ dai va đập**

Các đồ thị trong Hình 3 và Hình 4 cho thấy tác động của yếu tố kiểm soát lên các giá trị S/N. Các mức có trị số S/N cao hơn sẽ gần với thông số tối ưu, do đó thông số hàn tối ưu đối với độ dai va đập là dòng điện hàn là 150A tương ứng mức 1, điện áp hàn 26V tương ứng mức 3 và lưu lượng khí Ar là 20 l/phút tương ứng mức 3. Các thông số hàn tối ưu đối với độ cứng mỗi

hàn là dòng điện hàn 180A tương ứng mức 2, điện áp hàn 22V tương ứng mức 1 và lưu lượng khí Ar là 20 l/phút tương ứng mức 3.

Phân tích phương sai (ANOVA) được thực hiện ở mức độ tin cậy 95% và mức ý nghĩa 5% bằng công cụ Minitab để xác định các tương tác và tác động riêng lẻ của tất cả các yếu tố kiểm soát trong một thiết kế thử nghiệm. Trong nghiên cứu này, kết quả ANOVA cho thấy tham số ảnh hưởng nhất đối với độ dai va đập là điện áp hàn với tỷ lệ tác động là 27,89%, dòng điện hàn có mức tác động gần tương đương là 26,67%. Thông số lưu lượng khí Ar cũng có mức tác động đáng kể là 16,32%. Đối với độ cứng, thông số ảnh hưởng nhất là dòng điện hàn đạt 72,94%, trong khi tác động của điện áp hàn là 11,82% và lưu lượng khí rất thấp chỉ 1,1%. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy tương tự với phân tích tỷ số S/N về tác động của các yếu tố đến mục tiêu.

### 3.2. Tối ưu đa mục tiêu

Phân tích tỷ số S/N trong phương pháp Taguchi chỉ xác định được các thông số tối ưu cho đơn mục tiêu. Trong khi chất lượng mỗi hàn yêu cầu độ dai va đập đạt được lớn nhất nhưng độ cứng đạt nhỏ nhất. Để tối ưu đa mục tiêu, nghiên cứu này sử dụng kết hợp phân tích quan hệ xám là một phương pháp thống kê hiệu quả để đo mức độ gần đúng giữa các đối tượng bằng cách sử dụng cấp quan hệ xám.

Tỷ số S/N chuẩn hóa, hệ số xám và cấp độ xám cho mỗi thí nghiệm được xác định theo công thức (2), (3), (4) tương ứng thể hiện trong Bảng 6. Cấp độ xám cao hơn biểu thị các kết quả thí nghiệm tương ứng gần hơn với các giá trị chuẩn hóa lý tưởng, tức là các đặc tính hiệu suất tốt hơn được xác định bằng các cấp độ quan hệ xám cao hơn. Thí nghiệm thứ 5 có các đặc tính hiệu suất tốt nhất trong số tất cả các thí nghiệm do thí nghiệm này thu được cấp độ xám cao nhất. Nói cách khác, thí nghiệm thứ 5 với dòng điện hàn 180A, điện áp hàn 24V và lưu lượng khí Ar 20 l/phút là bộ thông số tối ưu cho mục tiêu độ dai va đập cao nhất và độ cứng thấp nhất.

Phân tích ANOVA để đánh giá mức độ tác động các tham số đến cấp độ xám thể hiện trong Bảng 7. Kết quả cho thấy mức độ tác động của dòng hàn đến mục tiêu là 60,18%, tiếp theo là điện áp hàn 21,06%, tác động của lưu lượng khí Ar không đáng kể. Bảng 8 so sánh kết quả tối ưu đơn mục tiêu sử dụng phương pháp Taguchi truyền thống và tối ưu đa mục tiêu kết hợp Taguchi và GRA.

Bảng 6. Cấp độ xám và xếp hạng thông số tối ưu

STT	Tỷ số S/N		Chuẩn hóa S/N		Chuỗi lệch		Hệ số xám			Xếp hạng
	Độ dai va đập	Độ cứng	Độ dai va đập	Độ cứng	Độ dai va đập	Độ cứng	Độ dai va đập	Độ cứng	Độ xám	
1	37.207	-39.735	0.766	0.457	0.234	0.543	0.681	0.479	0.580	4
2	36.745	-39.645	0.640	0.591	0.360	0.409	0.582	0.550	0.566	5
3	38.062	-39.691	1.000	0.524	0.000	0.476	1.000	0.512	0.756	2
4	34.403	-39.370	0.000	1.000	1.000	0.000	0.333	1.000	0.667	3
5	37.842	-39.554	0.940	0.726	0.060	0.274	0.893	0.646	0.769	1
6	35.918	-39.554	0.414	0.726	0.586	0.274	0.460	0.646	0.553	6
7	35.380	-39.735	0.267	0.457	0.733	0.543	0.406	0.479	0.442	9
8	36.090	-39.825	0.461	0.325	0.539	0.675	0.481	0.425	0.453	8
9	37.056	-40.043	0.725	0.000	0.275	1.000	0.645	0.333	0.489	7

Bảng 7. Phân tích Anova và hệ số tác động

Thông số	DF	Seq SS	Adj SS	F	Tác động, %
Dòng hàn	2	0.071	0.071	3.6	60.18
Điện áp	2	0.025	0.002	0.12	21.06
Lưu lượng	2	0.002	0.025	1.26	2.04
Lỗi	2	0.020	0.020		16.71
Tổng	8	0.118			100

Bảng 8. So sánh kết quả tối ưu

Phương pháp	Mục tiêu	Kết quả
Taguchi	Độ dai va đập	180A, 22V, 20l/phút
Taguchi	Độ cứng	150A, 26V, 20l/phút
Taguchi+ GRA	Độ dai va đập+độ cứng	180A, 24V, 20l/phút

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp Taguchi-GRA để tối ưu các thông số trong quá trình hàn thép ASTM A36. Kết quả cho thấy có sự khác biệt trong thông số tối ưu khi thực hiện bằng phương pháp Taguchi truyền thống và phương pháp kết hợp. Thông số tối ưu cho đa mục tiêu độ dai va đập cao và độ cứng thấp là dòng điện hàn 180A, điện áp 24V và lưu lượng khí Ar 20 l/phút. Phân tích ANOVA cho thấy dòng điện hàn là yếu tố tác động nhiều nhất đến độ cứng và độ dai va đập.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Frátrik, M. Mičian, and J. Winczek (2022), *An analysis of strengthening mechanisms of TMCP*

*HSLA steels*, in *Engineering Mechanics* 2022. doi: 10.21495/51-2-113.

- [2] F. M. Al-Sarairah (2018), *The effect of current and voltage on mechanical properties of low carbon steel products*, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol.9, No.3.
- [3] H. Alipooramirabad, A. Paradowska, R. Ghomashchi, and M. Reid (2017), *Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds*, *J Manuf Process*, Vol. 28, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.030.
- [4] K. S. Y. N.Nandakumar (2021), *Experimental validation and Parametric Optimization in MIG welding of A-36 steel plate using Taguchi-Fuzzy logic approach*, *Solid State Technology*, Vol.64, No.2.
- [5] D. P. V. P. Kapil B. Pipavat (2014), *Optimization of MIG welding Process Parameter using Taguchi Techniques*, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, Vol.1, No. 05, doi: 10.21090/ijaerd.010595.
- [6] K. N. Wakchaure, A. G. Thakur, V. Gadakh, and A. Kumar (2018), *Multi-Objective Optimization of Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 6082-T6 Using hybrid Taguchi-Grey Relation Analysis-ANN Method*, in *Materials Today: Proceedings*, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.380.

Ngày nhận bài:	07/10/2024
Ngày nhận bản sửa:	01/11/2024
Ngày duyệt đăng:	11/11/2024