

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ QUÁ TRÌNH HÀN LIÊN KẾT GIÁP MỎI SUS304 TỚI KÍCH THƯỚC VÙNG ẢNH HƯỞNG NHIỆT BẰNG CÔNG NGHỆ GTAW

Trịnh Tiến Thọ¹, Võ Tuyền^{1*}, Đặng Văn Hải¹, Phan Nhật Tuấn²

¹Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

²Trung tâm Giáo dục nghề nghiệp - Giáo dục thường xuyên Quận 10, TP.HCM

*Email: tuyenv@huit.edu.vn

Ngày nhận bài: 22/9/2025; Ngày nhận bài sửa: 03/11/2025; Ngày chấp nhận đăng: 24/11/2025

TÓM TẮT

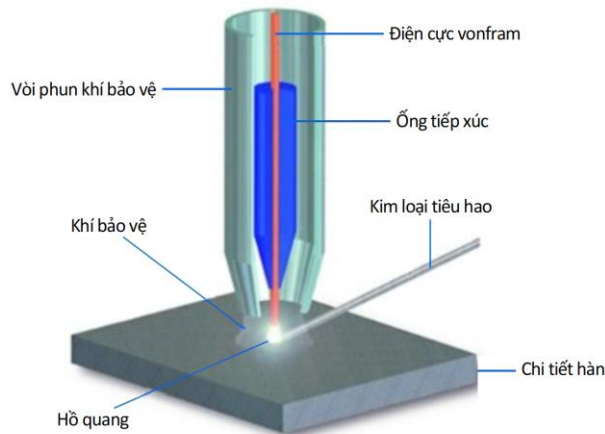
Hàn hồ quang vonfram khí (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) là một quá trình hàn sử dụng hồ quang giữa điện cực vonfram không tiêu hao và chi tiết hàn để thiết lập một bể hàn. Quá trình này được sử dụng với khí bảo vệ và không cần áp suất, và có thể được sử dụng có hoặc không có thêm kim loại phụ. Do chất lượng cao của mối hàn được tạo ra bằng phương pháp hàn hồ quang vonfram khí nên quá trình này đã trở thành một công cụ không thể thiếu đối với nhiều nhà sản xuất, bao gồm cả những nhà sản xuất trong ngành hàng không vũ trụ, hạt nhân, hàng hải, hóa dầu và chất bán dẫn, v.v. Trong nghiên cứu này, các thông số chính của quá trình hàn gồm dòng điện hàn I (A), điện áp hàn U (V) và tốc độ hàn v (mm/s) được lựa chọn dựa trên yêu cầu thực tế khi nghiên cứu ảnh hưởng của chúng tới kích thước vùng ảnh hưởng nhiệt (Heat Affected Zone – HAZ) khi hàn liên kết giáp mối SUS304 bằng công nghệ GTAW. Qua nghiên cứu thực nghiệm và quy hoạch thực nghiệm đã có kết quả về thông số chỉ tiêu đầu ra là chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) đạt giá trị nhỏ nhất $Y_{\min} = 0.6250$ mm. Từ đó, xác định được bộ thông số tối ưu cho quá trình hàn liên kết giáp mối SUS304 bằng công nghệ GTAW như sau: dòng điện hàn I = 108.42 A; điện áp hàn U = 14.977 V và tốc độ hàn v = 3.1704 mm/s.

Từ khóa: GTAW, dòng điện hàn, điện áp hàn, tốc độ hàn, chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt.

1. GIỚI THIỆU

Quá trình hàn hồ quang vonfram khí (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW), còn được gọi là hàn khí trơ vonfram (Tungsten Inert Gas – TIG), sử dụng điện cực vonfram không tiêu hao để tạo ra mối hàn. Khí bảo vệ (thường là khí trơ như argon hoặc heli), bảo vệ khu vực hàn khỏi bị ô nhiễm khí quyển và quá trình này thường sử dụng kim loại phụ, mặc dù một số mối hàn, được gọi là mối hàn tự sinh không yêu cầu kim loại phụ [1-3]. Quá trình GTAW có thể tạo ra nhiệt độ lên tới 19.426 °C [1]. Mối hàn dẫn dòng điện hàn tới hồ quang và dẫn khí bảo vệ đến khu vực hồ quang [2]. Nếu cần kim loại phụ để tạo mối hàn, có thể thêm kim loại phụ thủ công theo cùng cách như trong quá trình hàn oxy-acetylene. Ngoài ra còn có một số hệ thống cấp kim loại phụ để thực hiện nhiệm vụ tự động. Hình 1 mô tả quá trình hàn hồ quang vonfram khí (GTAW).

Trong ba thập kỷ qua, một lượng lớn công trình đã được công bố nhằm mục đích hiểu các hiện tượng cơ bản xảy ra trong quá trình hàn hồ quang vonfram khí [4-6]. Gần đây, một số mô phỏng hàn đã được thực hiện bằng cách xem xét tất cả các hiện tượng vật lý liên quan đến bể hàn [7]. Tất cả các mô hình này đều yêu cầu chỉ định đầu vào nhiệt rỗng từ plasma hồ quang đến bề mặt chi tiết hàn. Rosenthal [8] đã đề xuất một mô hình toán học về nguồn nhiệt chuyển động theo các giả định về trạng thái gần như tĩnh và gia nhiệt điểm trung trong phân tích 3D. Pavelic và cộng sự [9] đã đề xuất một mô hình nguồn nhiệt đĩa tròn với phân bố Gauss của thông lượng nhiệt trên bề mặt phôi. Goldak và cộng sự [10] đã phát triển thêm một mô hình phân bố mật độ công suất hình elip kép của nguồn nhiệt bên dưới hồ quang hàn để mô phỏng chính xác mọi loại quá trình hàn. Các mô hình nguồn nhiệt này cũng đã được sử dụng trong mô phỏng hàn để dự đoán độ méo mầu và ứng suất dư của mối hàn [11].



Hình 1. Quá trình hàn hồ quang vonfram khí (GTAW) [2].

Thép không gỉ SUS304 là vật liệu được sử dụng ngày càng phổ biến trong các ngành công nghiệp vì chúng có khả năng chống ăn mòn và tính chất cơ học tốt. Tuy nhiên, vật liệu này đòi hỏi quá trình hàn và kiểm tra nghiêm ngặt [12]. Quá trình hàn hồ quang vonfram khí được thực hiện để giảm vùng bị ảnh hưởng nhiệt đối với thép không gỉ. Khi vật liệu được vận hành ở áp suất cao, nó sẽ tăng hiệu quả nhờ đặc tính làm giảm sự phát triển vết nứt ở áp suất cao; trong nghiên cứu này, các tác giả cho biết dòng điện đầu vào và tốc độ hàn là những thông số quan trọng nhất [13]. Các thông số của quá trình hàn và hồ quang điện đã được mô tả và đề xuất một mô hình toán học cho hệ thống GTAW bởi Petrovic và cộng sự [14]. Theo đó, quá trình được mô phỏng bằng các thông số thực tế các giá trị đầu ra của quá trình tương ứng với các giá trị thực thu được bằng phương pháp đo lường. Để xác định các thông số thông lượng nhiệt trong quá trình hàn hồ quang vonfram khí (GTAW) được bảo vệ bằng khí argon, các tác giả [15] đã phát triển một mô hình đa vật lý của quá trình GTAW để đánh giá thông lượng nhiệt trao đổi giữa hồ quang plasma và vật liệu hàn.

Tóm lại, cho đến nay, việc phát triển, tối ưu hóa và đánh giá các quá trình hàn phần lớn được thực hiện trên cơ sở thử nghiệm và sai số, gây ra chi phí đáng kể. Mô phỏng số được công nhận là một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho các thử nghiệm và có thể cải thiện sự hiểu biết về hành vi quá trình phức tạp [16]. Vì vậy, trong nghiên cứu này, hoạt động hàn hồ quang khí vonfram (GTAW) đã được nghiên cứu về mặt thực nghiệm, quy hoạch thực nghiệm và mô phỏng nhằm xác định ảnh hưởng của các thông số quá trình hàn liên kết giáp mối SUS304 bằng quá trình GTAW tới kích thước vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ).

Nhiệt cần thiết cho hàn hồ quang vonfram khí (GTAW) được tạo ra bởi hồ quang điện được duy trì giữa điện cực vonfram không tiêu hao và chi tiết cần hàn. Vùng ảnh hưởng nhiệt (Heat Affected Zone – HAZ), kim loại nóng chảy và điện cực vonfram đều được bảo vệ khỏi khí quyển bằng lớp khí trơ được đưa qua mỏ hàn GTAW. Vùng ảnh hưởng nhiệt của mỗi hàn là vùng kim loại cơ bản xung quanh mối hàn, nơi tổ chức vật liệu bị biến đổi do tác động nhiệt trong quá trình hàn nhưng không bị nóng chảy. Vùng này có thể làm thay đổi các tính chất cơ học, dẫn đến điểm yếu và nguy cơ nứt gãy, ảnh hưởng lớn đến độ bền của toàn bộ liên kết hàn.

2. LỰA CHỌN CÁC THÔNG SỐ THỰC NGHIỆM

2.1. Các thông số của quá trình hàn và các vùng chính trong mối nối hàn

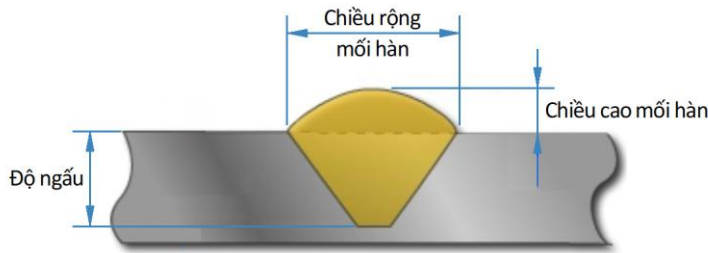
Các thông số của quá trình hàn kiểm soát hoạt động hàn và chất lượng của mối hàn được tạo ra. Việc lựa chọn các thông số hàn được thực hiện sau khi kim loại cơ bản, kim loại phụ và thiết kế mối nối được chọn. Việc lựa chọn đúng các thông số hàn sẽ giúp cho việc hàn trở nên dễ dàng hơn, tăng cơ hội tạo ra các đặc tính mối hàn cần thiết. Ba loại thông số hàn chính là thông số cố định, thông số điều chỉnh chính và thông số điều chỉnh thứ cấp [2].

Các thông số cố định được chọn trước khi quá trình hàn thực sự diễn ra. Đây là những hạng mục như loại và kích thước điện cực, loại dòng điện, loại khí bảo vệ và góc côn của điện cực. Các thông số

này không thể dễ dàng thay đổi khi quá trình hàn bắt đầu [2].

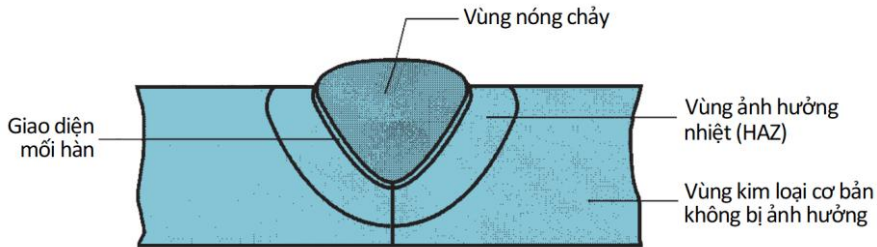
Các thông số điều chỉnh chính được sử dụng để điều khiển quá trình hàn sau khi các thông số cố định đã được chọn. Chúng kiểm soát sự hình thành của mối hàn bằng cách ảnh hưởng đến chiều rộng và chiều cao của mối hàn, độ ngấu của mối hàn, độ ổn định của hồ quang và độ bền chắc của mối hàn (Hình 2). Các thông số có thể điều chỉnh chính đối với hàn hồ quang vonfram khí là dòng điện hàn, chiều dài hồ quang (hay điện áp hồ quang) và tốc độ di chuyển [2].

Các thông số điều chỉnh thứ cấp được sử dụng để điều khiển quá trình hàn. Những thông số này thường khó đo lường hơn và tác động của chúng có thể không rõ ràng. Trong quá trình GTAW, các thông số điều chỉnh thứ cấp bao gồm góc làm việc và chuyển động của điện cực và phần nhô ra (tầm với) của điện cực.



Hình 2. Chiều cao, chiều rộng và độ ngấu của mối hàn [2].

Hầu hết các mối hàn là hàn nóng chảy. Như được minh họa trong mặt cắt ngang ở Hình 3, một mối hàn nóng chảy điển hình trong đó kim loại phụ được thêm vào bao gồm một số vùng: vùng nóng chảy, giao diện mối hàn, vùng bị ảnh hưởng nhiệt và vùng kim loại cơ bản không bị ảnh hưởng.



Hình 3. Mặt cắt ngang của mối hàn nóng chảy điển hình mô tả các vùng chính trong mối nối hàn [17].

Vùng nóng chảy bao gồm hỗn hợp kim loại phụ và kim loại cơ bản đã nóng chảy hoàn toàn. Vùng này được đặc trưng bởi mức độ đồng nhất cao giữa các kim loại thành phần đã bị nóng chảy trong quá trình hàn. Sự pha trộn của các thành phần này chủ yếu được thúc đẩy bởi sự đối lưu trong bể hàn nóng chảy. Quá trình đông đặc trong vùng nóng chảy có những điểm tương đồng với quá trình đúc [17].

Vùng thứ hai trong mối hàn là giao diện mối hàn, một ranh giới hẹp ngăn cách vùng nóng chảy với vùng ảnh hưởng nhiệt. Giao diện bao gồm một dải kim loại cơ bản mỏng đã bị nóng chảy hoặc nóng chảy một phần (nóng chảy cục bộ bên trong các hạt) trong quá trình hàn nhưng sau đó được đông đặc ngay lập tức trước khi trộn lẫn với kim loại trong vùng nóng chảy. Do đó, thành phần hóa học của vùng này giống với thành phần hóa học của kim loại cơ bản [17].

Vùng thứ ba trong mối hàn nóng chảy điển hình là vùng ảnh hưởng nhiệt. Kim loại trong khu vực này đã trải qua nhiệt độ thấp hơn điểm nóng chảy của nó, nhưng đủ cao để gây ra những thay đổi cấu trúc vi mô trong kim loại rắn. Thành phần hóa học trong vùng ảnh hưởng nhiệt giống như kim loại cơ bản, nhưng vùng này đã được xử lý nhiệt do nhiệt độ hàn nên tính chất và cấu trúc của nó bị thay đổi. Ảnh hưởng đến các tính chất cơ học trong vùng ảnh hưởng nhiệt thường là tiêu cực và chính trong vùng này của mối hàn thường xảy ra khuyết tật hàn [17].

Vùng cuối cùng là vùng kim loại cơ bản không bị ảnh hưởng, trong đó không có thay đổi luyện kim nào xảy ra. Tuy nhiên, kim loại cơ bản xung quanh HAZ có khả năng ở trạng thái ứng suất dư cao, kết quả của sự co rút trong vùng nóng chảy [17].

2.2. Lựa chọn thông số thực nghiệm

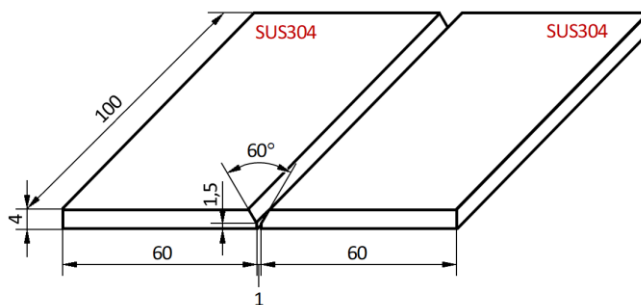
Qua phân tích ảnh hưởng đến chiều rộng và chiều cao của mối hàn, độ ngấu của mối hàn, độ ổn định của hồ quang và độ bền chắc của mối hàn của các thông số điều chỉnh đối với hàn hồ quang vonfram khí. Trong nghiên cứu này lựa chọn các thông số đầu vào phù hợp với quá trình GTAW như sau:

- Dòng điện hàn I (A): ảnh hưởng đến độ ngấu và thể tích kim loại mối hàn.
- Điện áp hàn U (V): ảnh hưởng đến kích thước mối hàn và độ ngấu.
- Tốc độ hàn v (mm/s): ảnh hưởng đến hình dạng mối hàn và độ ngấu.

Thông số đầu ra trong nghiên cứu này được chọn là chất lượng mối hàn thông qua kích thước vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) với yêu cầu cực tiểu, sao cho phù hợp với yêu cầu về đặc tính, chất lượng và hình dạng mối hàn, đồng thời có thể đo lường được chính xác các kết quả thực nghiệm và kiểm tra kết quả với các phương pháp khác.

Sau khi xác định thông số đầu vào, tiến hành thực nghiệm đơn yếu tố lần lượt với các thông số đầu vào. Mỗi mức biến thiên của thông số đầu vào được lặp lại ba lần, các thông số còn lại được giữ ở giá trị cố định là mức cơ sở đã chọn nhằm xác định ảnh hưởng của chúng đến kích thước vùng ảnh hưởng nhiệt (mm). Miền quy hoạch các thông số đầu vào được giới hạn gồm: dòng điện hàn I = 85–105 A; điện áp hàn U = 16–19 V; tốc độ hàn v = 2.5–3 mm/s.

Thực nghiệm hàn liên kết giáp mối bằng quá trình GTAW trên vật liệu tấm SUS304. Theo kinh nghiệm, các phôi tấm được cắt theo kích thước 100 mm × 60 mm × 4 mm. Vát mép chữ V có góc vát là 60°, chiều dày chỗ không vát là 1,5 mm, khe hở giữa hai tấm là 1 mm (Hình 4).



Hình 4. Kích thước của phôi vát mép chữ V khi hàn.

Các thông số quá trình hàn liên kết giáp mối SUS304 ở vị trí bằng với các tấm vật liệu dày 4 mm được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số quá trình hàn liên kết giáp mối SUS304 ở vị trí bằng.

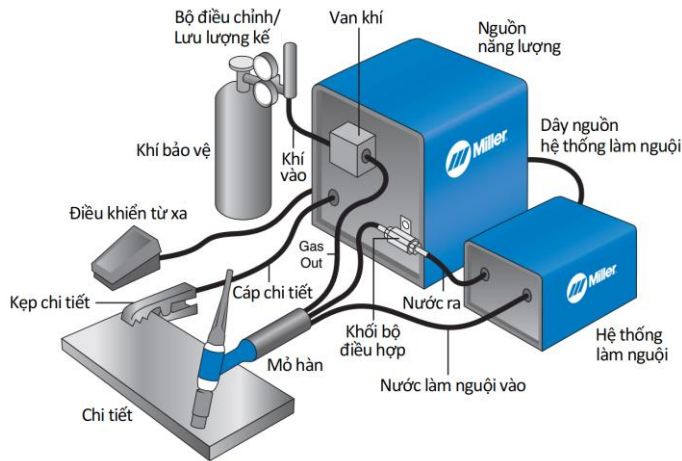
Thông số	Giá trị
Đường kính điện cực (mm)	2.4
Dòng điện hàn (A)	85–105
Điện áp hàn (V)	16–19
Loại dây hàn – Đường kính dây hàn	309L – 1.2 mm
Tốc độ hàn (mm/giây)	2.5–3
Đường kính sứ phun (mm)	9.55 (Số số 6)
Khí bảo vệ	Argon tinh khiết (99.99%)
Lưu lượng khí bảo vệ (lít/phút)	10
Góc nghiêng mỏ hàn (°)	45 và 65
Góc đầu điện cực (°)	60

3. THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP

3.1. Thiết bị hàn

Hình 5 thể hiện sơ đồ thiết bị được sử dụng cho quá trình GTAW thủ công. Một hệ thống GTAW điển hình bao gồm các bộ phận sau [1]:

- 1 Nguồn điện hàn.
- 2 Mô hàn.
- 3 Điện cực vonfram.
- 4 Cáp hàn.
- 5 Hệ thống khí bảo vệ.

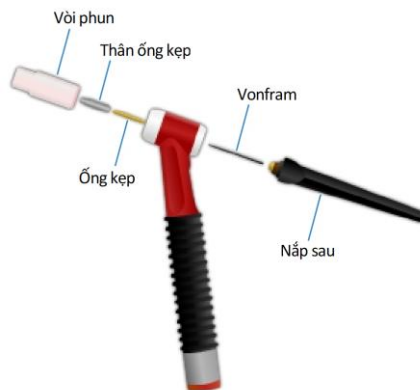


Hình 5. Thiết bị GTAW [1].

3.2. Vận hành thiết bị

Người thợ hàn nhất thiết phải có kiến thức cơ bản về vận hành thiết bị để thực hiện các mối hàn đúng cách và hiệu quả. Quá trình vận hành thiết bị GTAW theo trình tự sau:

- 1 Chuẩn bị đầu điện cực.
- 2 Lắp ráp mô hàn (Hình 6).
- 3 Thiết lập hệ thống khí bảo vệ.
- 4 Thiết lập các thông số hàn.
- 5 Tiến hành hàn thử và hàn trên các mẫu.
- 6 Sau khi công việc hàn đã hoàn thành, tắt và thu dọn hệ thống.



Hình 6. Lắp ráp mô hàn [17].

3.3. Thu thập số liệu thực nghiệm

Vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) của mối hàn được xác định bằng cách phân tích sự thay đổi của cấu trúc kim loại và cơ tính của nó do nhiệt độ cao trong quá trình hàn, dựa trên nhiệt độ làm việc của từng vùng. Có nhiều phương pháp để phân tích vùng ảnh hưởng nhiệt dựa trên nhiệt độ, đặc điểm màu sắc, hoặc sử dụng thiết bị đo lường chuyên dụng.

Việc phân tích dựa trên nhiệt độ đối với thí nghiệm này là không khả thi do cần phải chia vùng ảnh hưởng nhiệt thành các khu vực dựa trên nhiệt độ nóng chảy và nhiệt độ xử lý nhiệt như: vùng viền chảy, vùng quá nhiệt và vùng thường hóa. Mặt khác, do không có các thiết bị đo chuyên dùng để phân tích vùng ảnh hưởng nhiệt, nên trong thí nghiệm đã sử dụng phương pháp dựa trên màu sắc (sắc thái nhiệt) để phân tích kết quả. Màu sắc của mối hàn không những cho biết nhiệt độ của từng vùng, mà còn thể hiện cả kích thước của nó.

Sau khi thực hiện tất cả các mối hàn của quá trình GTAW, các mẫu được làm nguội trong môi trường không khí tĩnh, được làm sạch và được cắt vuông góc với hướng hàn bằng cách dùng máy cắt và đánh bóng bằng giấy nhám. Sau đó, mẫu sẽ được làm sạch bằng dung dịch nital 2% để làm rõ vùng kim loại hàn. Các kích thước độ sâu ngẫu, chiều cao, chiều rộng và chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) sẽ được phân tích bằng kính hiển vi quang học GX51 của hãng Olympus, máy có độ phóng đại 500 lần khi dùng thị kính 10× và vật kính 50×.

4. KẾ HOẠCH THỰC NGHIỆM BẬC HAI

4.1. Khoảng biến thiên các yếu tố đầu vào

Dựa vào bảng thông số và mức hàn (Bảng 2) gồm ba yếu tố nghiên cứu và ba mức cho mỗi yếu tố, phương án thực nghiệm bậc hai được chọn có dạng phương án bậc hai quay là phù hợp. Tính chất quay của phương án cấu trúc có tâm sẽ đạt được khi chọn cánh tay đòn sao (*) theo công thức [18]:

$$\alpha = 2^{k/4} = 2^{3/4} = 1.682 \quad (1)$$

với k là số yếu tố nghiên cứu, k = 3.

Khoảng biến thiên và giá trị các thông số đầu vào được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 2. Thông số và mức hàn.

Thông số	Mức dưới	Mức cơ sở	Mức trên
Dòng điện hàn, I (A)	85	90	105
Điện áp hàn, U (V)	16	17,5	19
Tốc độ hàn, v (mm/s)	2.5	2.75	3.0
Hàn tấm dày 4 mm.			

Bảng 3. Mức và khoảng biến thiên các yếu tố đầu vào.

Mức		Thông số		
		Dòng điện hàn (A)	Điện áp hàn (V)	Tốc độ hàn (mm/s)
Mức dưới	-1	85	16	2.5
Mức cơ sở	0	95	17.5	2.75
Mức trên	+1	105	19	3
Khoảng biến thiên		10	1.5	0.25

4.2. Lập ma trận thực nghiệm

Ma trận thực nghiệm bậc hai theo phương án quay, số lượng thực nghiệm được xác định theo công thức [18]:

$$\begin{aligned}
 N &= 2^k + 2k + n_0 \\
 &= 2^3 + 2 \times 3 + 6 = 20
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

trong đó: k – số yếu tố nghiên cứu, k = 3;

2^k – số lượng thực nghiệm ở mức trên và mức dưới;

2k – số lượng thực nghiệm ở mức điểm sao (*);

n_0 – số lượng thực nghiệm lặp ở mức cơ sở, $n_0 = 6$.

Số lượng thực nghiệm và kết quả đo đặc thực nghiệm được trình bày trong Bảng 4. Khi đo các giá trị HAZ, để đảm bảo độ tin cậy của kết quả đo, mỗi thí nghiệm được đo ba lần và kết quả là giá trị trung bình cộng của ba lần đo.

Bảng 4. Kết quả đo đặc thực nghiệm.

TT	Yếu tố đầu vào			Yếu tố đầu ra
	Dòng điện I (A)	Điện áp U (V)	Tốc độ v (mm/s)	HAZ Y (mm)
1	-1	-1	-1	0.88
2	1	-1	-1	0.93
3	-1	1	-1	0.71
4	1	1	-1	0.65
5	-1	-1	1	0.65
6	1	-1	1	0.58
7	-1	1	1	0.88
8	1	1	1	0.71
9	-1.68	0	0	0.89
10	1.68	0	0	0.88
11	0	-1.68	0	0.71
12	0	1.68	0	0.71
13	0	0	-1.68	0.71
14	0	0	1.68	0.53
15	0	0	0	0.53
16	0	0	0	0.65
17	0	0	0	0.53
18	0	0	0	0.53
19	0	0	0	0.53
20	0	0	0	0.53

4.3. Tóm tắt thiết kế theo phương pháp mặt phẳng hồi đáp trong phần mềm Minitab

Sau khi thiết lập ma trận thực nghiệm, chúng ta có kết quả sau:

Design Summary

Factors:	3	Replicates:	1
Base runs:	20	Total runs:	20
Base blocks:	1	Total blocks:	1

Point Types

Cube points:	8
Center points in cube:	6
Axial points:	6
Center points in axial:	0

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Xác định phương trình hồi quy

Ma trận thực nghiệm đối với vùng ảnh hưởng nhiệt HAZ (mm) được lập và ngẫu nhiên hóa trật tự bằng chương trình MiniTab (Bảng 5).

Bảng 5. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm bậc hai (HAZ).

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C11
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	I	U	v	Y
1	19	1	0	1	95.000	17.5000	2.75000	0.53
2	1	2	1	1	85.000	16.0000	2.50000	0.88
3	15	3	0	1	95.000	17.5000	2.75000	0.53
4	6	4	1	1	105.000	16.0000	3.00000	0.58
5	9	5	-1	1	78.182	17.5000	2.75000	0.89
6	8	6	1	1	105.000	19.0000	3.00000	0.71
7	4	7	1	1	105.000	19.0000	2.50000	0.65
8	12	8	-1	1	95.000	20.0227	2.75000	0.71
9	2	9	1	1	105.000	16.0000	2.50000	0.93
10	5	10	1	1	85.000	16.0000	3.00000	0.65
11	20	11	0	1	95.000	17.5000	2.75000	0.53
12	10	12	-1	1	111.818	17.5000	2.75000	0.88
13	17	13	0	1	95.000	17.5000	2.75000	0.53
14	7	14	1	1	85.000	19.0000	3.00000	0.88
15	11	15	-1	1	95.000	14.9773	2.75000	0.71
16	13	16	-1	1	95.000	17.5000	2.32955	0.71
17	18	17	0	1	95.000	17.5000	2.75000	0.53
18	16	18	0	1	95.000	17.5000	2.75000	0.65
19	14	19	-1	1	95.000	17.5000	3.17045	0.53
20	3	20	1	1	85.000	19.0000	2.50000	0.71

Dựa vào kết quả thực nghiệm, tiến hành phân tích phương sai với mô hình dạng đa thức bậc hai đầy đủ (Bảng 6).

Bảng 6. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) của mô hình bậc hai đầy đủ cho HAZ.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0392437	95.93%	92.26%	88.59%

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.362679	0.040298	26.17	0.000
Linear	3	0.037003	0.012334	8.01	0.005
I	1	0.005213	0.005213	3.38	0.096
U	1	0.000593	0.000593	0.39	0.549
v	1	0.031197	0.031197	20.26	0.001
Square	3	0.231539	0.077180	50.11	0.000
I*I	1	0.201438	0.201438	130.80	0.000
U*U	1	0.045770	0.045770	29.72	0.000
v*v	1	0.008676	0.008676	5.63	0.039
2-Way Interaction	3	0.094138	0.031379	20.38	0.000
I*U	1	0.005512	0.005512	3.58	0.088
I*v	1	0.006613	0.006613	4.29	0.065
U*v	1	0.082013	0.082013	53.25	0.000
Error	10	0.015401	0.001540		
Lack-of-Fit	5	0.003401	0.000680	0.28	0.904
Pure Error	5	0.012000	0.002400		
Total	19	0.378080			

Kết quả phân tích phương sai cho thấy hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy và bị loại gồm I, U, I*U và I*v (P-value > 0.05).

Sau khi loại bỏ hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy (I, U, I*U và I*v) ra khỏi mô hình và tiến hành phân tích phương sai lần thứ hai cho mô hình. Kết quả xử lý số liệu xác định các hệ số hồi quy có ý nghĩa (P-value < 0.05) được trình bày trong Bảng 7 và Bảng 8.

Bảng 7. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) của mô hình bậc hai đầy đủ cho HAZ sau khi loại bỏ hệ số hồi quy không phù hợp (I, U, I*U và I*v).

Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0487938	91.18%	88.04%	84.51%		
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0.344748	0.068950	28.96	0.000
Linear	1	0.031197	0.031197	13.10	0.003
v	1	0.031197	0.031197	13.10	0.003
Square	3	0.231539	0.077180	32.42	0.000

I*I	1	0.201438	0.201438	84.61	0.000
U*U	1	0.045770	0.045770	19.22	0.001
v*v	1	0.008676	0.008676	3.64	0.077
2-Way Interaction	1	0.082012	0.082012	34.45	0.000
U*v	1	0.082012	0.082012	34.45	0.000
Error	14	0.033332	0.002381		
Lack-of-Fit	9	0.021332	0.002370	0.99	0.537
Pure Error	5	0.012000	0.002400		
Total	19	0.378080			

Bảng 8. Hệ số hồi quy và phương trình hồi quy hàm Y (HAZ).

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.5500	0.0199	27.64	0.000	
v	-0.0478	0.0132	-3.62	0.003	1.00
I*I	0.1182	0.0129	9.20	0.000	1.02
U*U	0.0564	0.0129	4.38	0.001	1.02
v*v	0.0245	0.0129	1.91	0.077	1.02
U*v	0.1012	0.0173	5.87	0.000	1.00

Phương trình hồi quy ở dạng thực

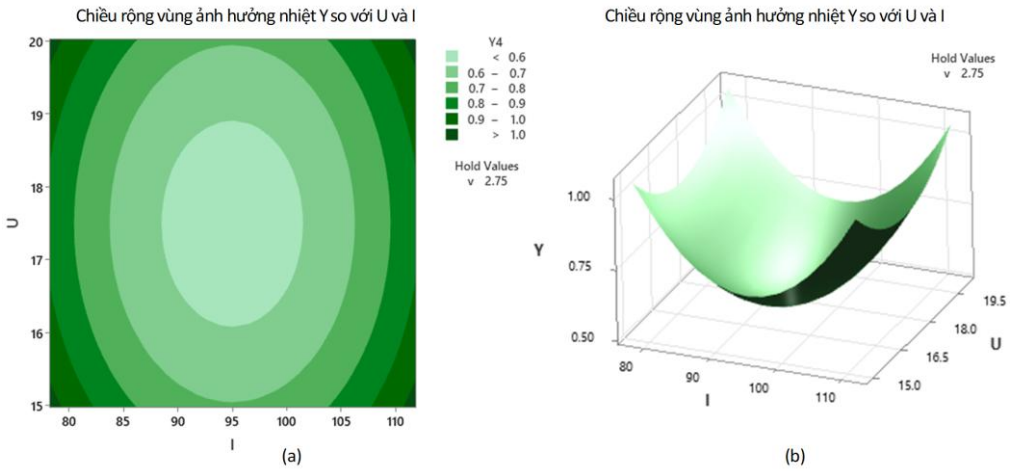
$$Y = 0.5500 - 0.0478 v + 0.1182 I^2 + 0.0564 U^2 + 0.0245 v^2 + 0.1012 Uv \quad (3)$$

Dựa vào hàm Y, tiến hành phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố nghiên cứu đến vùng ảnh hưởng nhiệt, ta có nhận xét:

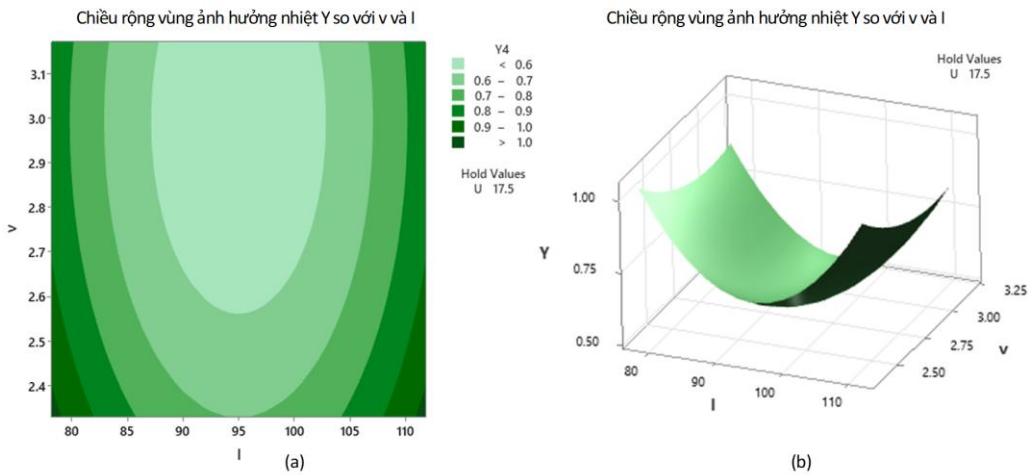
- Dấu cộng (+) đứng trước I^2 chứng tỏ dòng điện hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt có mối quan hệ tỷ lệ thuận.
- Dấu cộng (+) đứng trước U^2 chứng tỏ điện áp hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt có mối quan hệ tỷ lệ thuận.
- Dấu trừ (-) đứng trước v^2 chứng tỏ tốc độ hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt cũng có mối quan hệ tỷ lệ thuận.

Qua hàm Y có thể vẽ đồ thị theo từng cặp yếu tố ảnh hưởng tới vùng ảnh hưởng nhiệt (Hình 7 đến Hình 9), các đồ thị được vẽ khi giá trị của yếu tố còn lại được giữ ở mức cơ sở. Các đồ thị cho thấy:

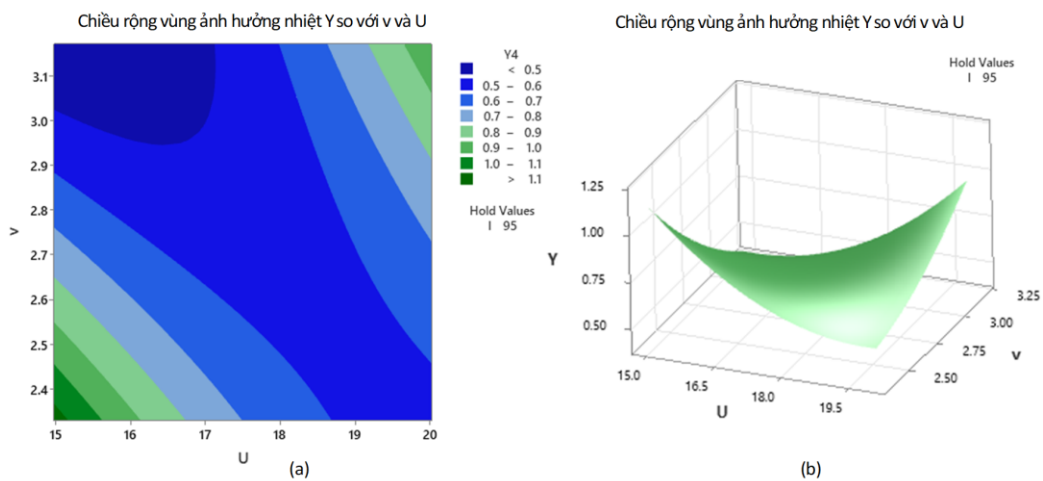
- Bề mặt hồi đáp của hàm Y có dạng parabol elliptic (dạng quả đồi) và đều nằm trong miền thí nghiệm.
- Điểm dừng của bề mặt hồi đáp (điểm tại đó mặt phẳng đáp ứng có độ dốc bằng 0) nằm sâu trong miền thí nghiệm và đạt giá trị cực đại của bề mặt hồi đáp.
- Vùng cho giá trị dự báo cao nhất của vùng ảnh hưởng nhiệt là vùng trong của ellipse nhỏ nhất.



Hình 7. Đồ thị dạng contour (a) và dạng surface (b) mô tả quan hệ giữa chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và cặp thông số U-I.



Hình 8. Đồ thị dạng contour (a) và dạng surface (b) mô tả quan hệ giữa chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và cặp thông số v-I.



Hình 9. Đồ thị dạng contour (a) và dạng surface (b) mô tả quan hệ giữa chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và cặp thông số v-U.

5.2. Kết quả giải bài toán tối ưu

Xuất phát từ mục đích nghiên cứu và nội dung phân tích ở trên, bài toán tối ưu được xây dựng như sau:

Hàm mục tiêu: $Y \rightarrow \min$, hay:

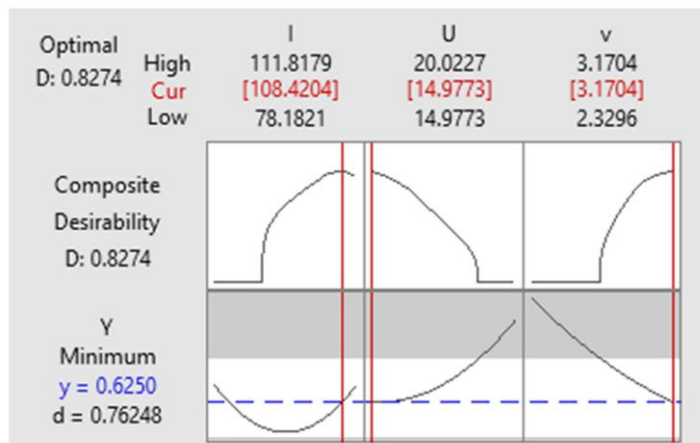
$$Y = 0.5500 - 0.0478 v + 0.1182 I^2 + 0.0564 U^2 + 0.0245 v^2 + 0.1012 Uv \rightarrow \min \quad (4)$$

Hàm điều kiện: $+1.682 \geq X_i \geq -1.682$ (trong đó X_i là các thông số đầu vào I, U hay v)

Bảng 9 trình bày kết quả mô phỏng giải bài toán tối ưu bằng phần mềm Minitab. Hình 10 là đồ thị tối ưu hóa các thông số đầu vào để đạt giá trị tối ưu của HAZ.

Bảng 9. Kết quả mô phỏng giải bài toán tối ưu

Response Optimization: Y						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Y	Minimum		0.53	0.93	1	1
Solution						
Solution	I	U	v	Y Fit	Composite Desirability	
1	108.420	14.9773	3.17045	0.625006	0.827359	
Multiple Response Prediction						
Variable	Setting					
I	108.42					
U	14.9773					
v	3.17045					
Response	Fit	SE Fit	95% CI		95% PI	
Y	0.6250	0.0709	(0.4729, 0.7771)		(0.4404, 0.8096)	



Hình 10. Đồ thị tối ưu hóa các thông số đầu vào để đạt giá trị tối ưu của HAZ.

Qua nghiên cứu quy hoạch thực nghiệm (Hình 8) đã có kết quả tối ưu hóa về thông số chỉ tiêu đầu ra là chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) như sau:

Chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) đạt giá trị nhỏ nhất $Y_{\min} = 0.6250$ mm.

Khi các thông số đầu vào tương ứng là: dòng điện hàn $I = 108.42$ A, điện áp hàn $U = 14.9773$ V và tốc độ hàn $v = 3.1704$ mm/s.

5. KẾT LUẬN

Các thông số của quá trình hàn kiểm soát hoạt động hàn và chất lượng của mối hàn được tạo ra. Việc lựa chọn các thông số hàn được thực hiện sau khi kim loại cơ bản, kim loại phụ và thiết kế mối nối được chọn. Việc lựa chọn đúng các thông số hàn sẽ giúp cho hoạt động hàn trở nên dễ dàng hơn, tăng cơ hội tạo ra các đặc tính mối hàn cần thiết. Các thông số chính của quá trình hàn gồm dòng điện hàn I (A), điện áp hàn U (V) và tốc độ hàn v (mm/s) được lựa chọn từ các kết quả ở Mục 2.1 và 2.2 dựa trên yêu cầu thực tế khi tối ưu chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ). Việc nhận biết và hiểu rõ vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) là rất quan trọng, vì những thay đổi trong vùng này có thể quyết định sự thành công hay thất bại của một bộ phận, đặc biệt là các cấu kiện chịu lực trong xây dựng và chế tạo máy móc.

Như vậy, qua nghiên cứu thực nghiệm và quy hoạch thực nghiệm đã có kết quả về thông số chỉ tiêu đầu ra là chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) đạt giá trị nhỏ nhất $Y_{\min} = 0,6250$ mm:

Từ các kết quả ở trên, xác định được bộ thông số tối ưu cho quá trình hàn liên kết giáp mối SUS304 bằng công nghệ GTAW như sau:

- Dòng điện hàn I = 108.42 A;
- Điện áp hàn U = 14.9773 V;
- Tốc độ hàn v = 3.1704 mm/s.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Edward R. Bohnart and the Miller Staff, *Guidelines for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, Miller Electric, 2005.
- [2] Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, *Navy Steelworker: Volume 1*. NAVEDTRA 14250, 2013.
- [3] American Welding Society, *Welding handbook Ninth Edition, vol. 2*. 550 N.W. LeJeune Road Miami, FL 33126, 2004.
- [4] Matsunawa A, Yokoya S, Asako Y. “Convection in weld pool and its effect on penetration shape in stationary arc welds,” *Welding Research Institute of Osaka University*, vol. 16, no. 2, pp. 229–236, 1987.
- [5] Fan HG, Tsai HL, Na SJ, “Heat transfer and fluid flow in a partially or fully penetrated weld pool in gas tungsten arc welding,” *Heat Mass Transfer*, vol. 44, no. 2, pp. 417–428, 2001.
- [6] Tanaka M, Lowke J. J., “Predictions of weld pool profile using plasma physics,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 1, pp. 1–23, 2007.
- [7] A. Traidia, *Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA Weld Pools*, Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering, École Polytechnique, Palaiseau, France, 2011. [Online]. Available: <https://pastel.hal.science/pastel-00709055v1>
- [8] Rosenthal D., “The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments,” *Journal of Fluids Engineering*, 68(8), pp. 849-865, 1946.
- [9] Pavelic V., “Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates,” *Welding Journal Research Supplement*, vol. 48, pp. 296-305, 1969.
- [10] J. A. Goldak et al, “A new finite element model for welding heat sources”, *Metallurgical Transactions B*, vol. 15, pp. 299–305, 1984.
- [11] N. S. Tsai, T. W. Eagar, “Distribution of heat and current fluxes in gas tungsten arcs,” *Metallurgical Transactions B*, vol. 16, pp. 841–846, 1985.
- [12] N. Navaneethakrishnan, V. N. Loganathan, “Welding Characteristics of 304, 306, 316 Stainless Steel: A Technical Review,” *International Journal for Scientific Research & Development*, vol. 3, no. 2, pp. 2438-2440, 2015.
- [13] S. P. Tukara, et al., “Parametric Study & Optimization of TIG Welding Process on Stainless Steel 304,” *International Engineering Research Journal (IERJ)*, Special Issue, pp.37-40, 2017.

- [14] Ivan Petrovic *et al.*, “Simulation of an electric arc in metal welding”, <https://www.researchgate.net>, 6 pages, 2021.
- [15] S. Unnikrishnakurup *et al.*, “Estimation of heat flux parameters during static gas tungsten arc welding spot under argon shielding,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 114, pp. 205–212, 2017.
- [16] A. Ebrahimi *et al.*, “A simulation-based approach to characterise melt-pool oscillations during gas tungsten arc welding,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 164, 13 pages, 2021.
- [17] Mikell P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2020.
- [18] Nguyễn Cảnh, *Quy hoạch thực nghiệm*. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2004.

ABSTRACT

STUDY ON THE INFLUENCE OF SUS304 BUTT WELDING PROCESS PARAMETERS ON THE SIZE OF HEAT AFFECTED ZONE USING GTAW TECHNOLOGY

Trinh Tien Tho¹, Vo Tuyen^{1*}, Dang Van Hai¹, Phan Nhat Tuan²

¹*Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Industry and Trade*

²*Center for Vocational Education-Continuing Education District 10, Ho Chi Minh City*

*Email: tuyenv@huit.edu.vn

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) is a welding process that uses an arc between a non-consumable tungsten electrode and the workpiece to establish a weld pool. This process is used with shielding gas and does not require pressure and can be used with or without additional filler metal. Due to the high quality of welds produced by gas tungsten arc welding, this process has become an indispensable tool for many manufacturers, including those in the aerospace, nuclear, marine, petrochemical, and semiconductor industries, etc. In this study, the main welding process parameters including welding current I (A), welding voltage U (V), and welding speed v (mm/s) were selected based on practical requirements when studying their effects on the size of the heat affected zone (HAZ) when butt welding SUS304 using GTAW technology. Through experimental research and experimental planning, the output parameter results are the width of the heat affected zone (HAZ) reaching the smallest value $Y_{min} = 0.6250$ mm. From there, the optimal parameter set for the SUS304 butt joint welding process using GTAW technology is determined as follows: welding current $I = 108.42$ A; welding voltage $U = 14.977$ V and welding speed $v = 3.1704$ mm/s.

Keywords: GTAW, welding current, welding voltage, welding speed, heat affected zone width.