

PHÂN TÍCH VÀ MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH HÀN GIÁP MỐI VÁT MÉP CHỮ V GIỮA THÉP CÁC BON SS400 VỚI THÉP KHÔNG GỈ SUS304

ANALYSIS AND SIMULATION ON BUTT JOIN WELDING OF SINGLE-V GROOVE BETWEEN SS400 CARBON STEEL AND SUS304 STAINLESS STEEL

Ngô Hữu Mạnh

TÓM TẮT

Quá trình hàn giáp mối thép các bon SS400 với thép không gỉ SUS304 bằng phương pháp hàn hồ quang tay gặp rất nhiều khó khăn do sự khác nhau về thành phần và cơ tính. Mối hàn yêu cầu không có khuyết tật, tổ chức ổn định, có độ bền cao trong quá trình làm việc. Trong bài báo này, tác giả phân tích kết hợp mô phỏng và thực nghiệm hàn thép không gỉ SUS304 với thép các bon SS400 bằng quá trình hàn hồ quang tay (SMAW). Trường nhiệt, ứng suất và biến dạng hàn được phân tích bằng phương pháp mô phỏng số trên phần mềm ANSYS. Phương pháp kim tương được sử dụng để phân tích cấu trúc tế vi kim loại mối hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt. Đây là cơ sở để ứng dụng vào thực tế sản xuất.

Từ khóa: Hàn thép austenite; hàn vật liệu khác nhau; hàn thép không gỉ; mô phỏng số.

ABSTRACT

Dissimilar metal welding (DMW) process of single-V groove butt weld between SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel is difficultly, because they have differences in composition and properties. The weld is require non defect, stability microstructure and high strength. In this paper, author is analysis combide simulation and experimental of shielded metal arc welding (SMAW) process between SUS304 stainless steel and SS400 carbon steel. The temperature fields, stress and distortion had been analysed by ANSYS software. Metallography method was used for analysis metals microstructure of the weld and heat affected zone (HAZ). There are data bases to application in dissimilar metals welding process.

Keywords: Austenite welding; dissimilar metal welding; stainless steel welding; numerical simulation.

Trường Đại học Sao Đỏ

Email: manh.weldtec@gmail.com

Ngày nhận bài: 26/4/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/8/2020

Ngày chấp nhận đăng: 18/8/2020

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hiện nay, việc liên kết hai loại vật liệu khác nhau bằng phương pháp hàn mặc dù gặp nhiều khó khăn nhưng con

người vẫn thực hiện do yêu cầu của thực tế sản xuất và đời sống. Quá trình hàn nối các vật liệu khác nhau nhằm khai thác, sử dụng tối đa những đặc tính ưu việt của các loại vật liệu này.

Quá trình hàn thép không gỉ SUS304 với thép các bon SS400 đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như nhiệt điện, hóa chất,... Một mặt nhằm sử dụng đúng vật liệu để phát huy tốt các đặc tính ưu việt của chúng. Mặt khác giúp tiết kiệm vật liệu tốt, giảm chi phí sản xuất, hạ giá thành sản phẩm sau khi chế tạo. Tuy nhiên vấn đề khó khăn ở đây là liên kết các loại vật liệu khác nhau hoàn toàn về thành phần và đặc tính này với nhau [1, 2]. Khi hàn hai loại vật liệu không đồng nhất, trong nhiều trường hợp, để hàn nối các loại vật liệu này người ta thường phải sử dụng đến một lớp vật liệu trung gian được gọi là lớp đệm [3].

Kim loại khác nhau là các kim loại khác nhau về thành phần hóa học, đặc tính, tổ chức tế vi. Quá trình hàn các kim loại đồng nhất thường thuận lợi hơn khi hàn các kim loại khác nhau DMW [1, 2]. Trong quá trình hàn, các nguyên tố hợp kim bị nóng chảy, hòa tan vào nhau tạo ra liên kim mới hoặc pha mới hoặc hợp chất mới. Quá trình này bị ảnh hưởng bởi quy trình hàn, quá trình luyện kim, tốc độ nguội [4]. Vì vậy, các yếu tố ảnh hưởng phải được nghiên cứu, phân tích trước khi hàn để loại bỏ những yếu tố bất lợi và hướng đến nhận được mối hàn và liên kết hàn tốt nhất [2].

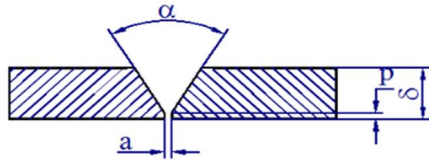
Mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM (Finite element method) là giải pháp giúp phân tích các xu hướng xảy ra trong quá trình hàn. Đây là cơ sở khoa học để xây dựng quy trình hàn phù hợp với hơn thực tế và tiết kiệm chi phí sản xuất. Quá trình mô phỏng trường nhiệt, ứng suất và biến dạng hàn được thực hiện bằng phần mềm ANSYS.

2. VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nền

Vật liệu nền được sử dụng gồm thép không gỉ SUS304 và thép các bon thấp SS400 dạng tấm, chiều dày 10mm. Bề mặt của vật hàn được làm sạch và gia công vát mép chữ V,

góc vát $\alpha = 60^\circ$. Khe hở giữa hai tấm từ $a = 2,0 \div 3,0\text{mm}$, chiều dày phần không vát từ $p = 1,5 \div 2,0\text{mm}$ (hình 1). Thành phần hóa học, cơ tính của thép SUS304, SS400 như bảng 1 ÷ 4.



Hình 1. Liên kết hàn thép SUS304 và SS400

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép SUS304 [5]

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Ni
0,08	0,75	2,0	0,03	0,045	18 - 20	8,0 - 10,5

Bảng 2. Cơ tính của thép SUS304 [5]

Giới hạn bền (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ giãn dài (%)
500 - 525	205 - 215	40

Bảng 3. Thành phần hóa học của thép SS400 [5, 6]

%C	%Si	%Mn	%S	%P
< 0,25	< 0,2	< 0,5	0,05	0,05

Bảng 4. Cơ tính của thép SS400 [5, 6]

Giới hạn bền (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ giãn dài (%)
400 - 510	245	21

2.2. Vật liệu hàn

Vật liệu hàn được sử dụng gồm que hàn hồ quang tay NC-39L tiêu chuẩn AWS A5.4 E309L-16, đường kính 3,2mm của hãng Kobelco (Nhật Bản) sản xuất có thành phần hóa học, cơ tính như bảng 5, 6.

Bảng 5. Thành phần hóa học của que hàn NC-39L [7]

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Ni
0,03	0,6	1,5	0,005	0,02	23,13	12,5

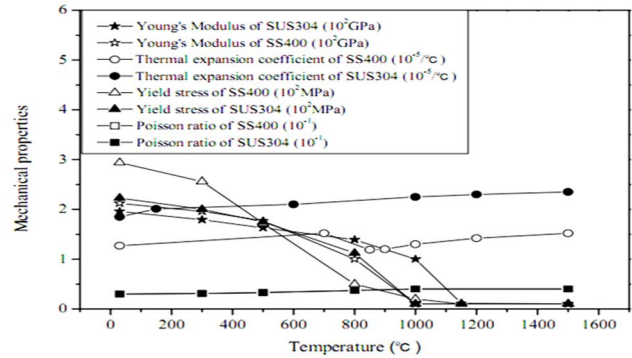
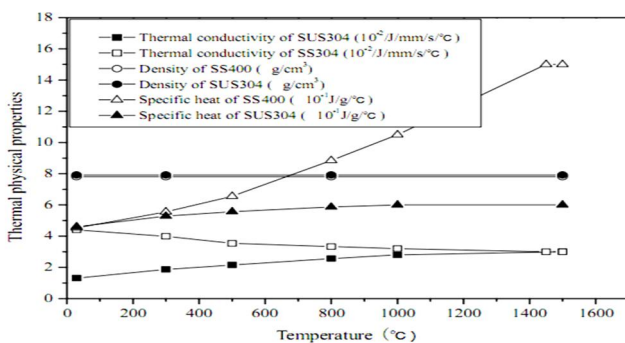
Bảng 6. Cơ tính của của que hàn NC-39L [7]

Giới hạn bền (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ giãn dài (%)	Độ dai va đập (V) ở 0°C (J)
560	410	42	67

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

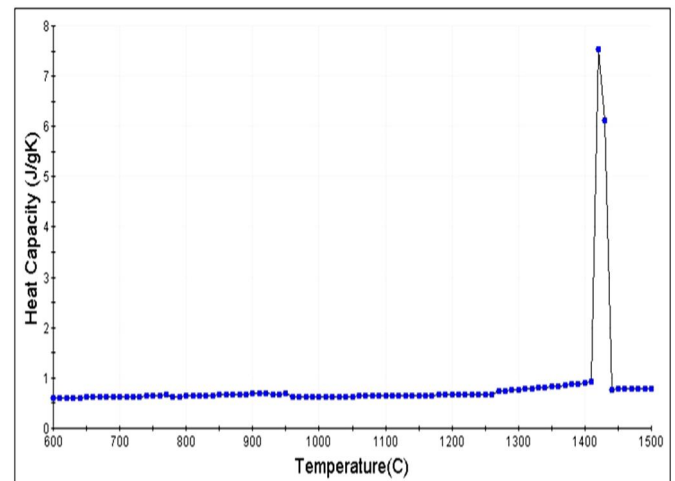
3.1. Phân tích quá trình hàn

Thép không gỉ SUS304 có sự khác biệt lớn về cơ tính và lý tính so với thép SS400.



Hình 2. So sánh đặc tính của thép SS400 và SUS304 [8]

Kết quả phân tích hình 2 thấy rằng, tỉ trọng và độ dẫn nhiệt của thép SUS304 với SS400 có sự chênh lệch đáng kể. Điều này gây ảnh hưởng rất lớn đến quá trình phân bố nhiệt hồ quang khi hàn. Vì vậy trong quá trình hàn, nguồn nhiệt hồ quang hướng sang thép SUS304 là cần thiết để cân bằng nguồn nhiệt.



Hình 3. Quá trình chuyển hoá trạng thái từ rắn sang lỏng của kim loại mối hàn

Quá trình phân tích đường đặc tính nhiệt thấy rằng, kim loại mối hàn chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng ở nhiệt độ khoảng 1430°C (hình 3). Đây là cơ sở quan trọng để điều tiết nguồn nhiệt lệch về phía vật liệu SUS304 trong quá trình hàn. Vì quá trình điều tiết nguồn nhiệt sẽ giúp kiểm soát được mức độ tham gia của vật liệu nền vào mối hàn [2]. Khi đó, mức độ tham gia vào mối hàn của thép SUS304 sẽ nhiều hơn so với SS400. Thép SUS304 tham gia nhiều vào mối hàn kết hợp với vật liệu bổ sung từ que hàn sẽ làm tăng độ dẻo, độ bền, khả năng chịu nhiệt, khả năng chống ăn mòn, khả năng kháng nứt cho kim loại mối hàn.

Do sử dụng phương pháp hàn nóng chảy nên kim loại mối hàn là hỗn hợp gồm vật liệu cơ bản và vật liệu bổ sung từ que hàn [2]. Vì hàn nối ghép hai loại vật liệu khác nhau hoàn toàn về thành phần và cơ tính, nên thép SS400 tham gia quá nhiều vào mối hàn sẽ làm giảm cơ tính, khả năng chịu nhiệt và khả năng chống ăn mòn của kim loại mối hàn.

Để đảm bảo chất lượng hàn, xây dựng quy trình hàn theo tiêu chuẩn AWS D1.1 [9]. Gia nhiệt cho vật hàn (từ 200 - 300°C) và thực hiện các mối hàn ở vị trí 1G theo quy trình

hàn. Các mối hàn được thực hiện theo trình tự từ lớp đáy đến lớp phủ bằng quá trình hàn SMAW để hoàn thiện mối hàn giáp mối hai loại vật liệu SUS304 và SS400.

Quá trình hàn lớp phủ được thực hiện bằng công nghệ hàn SMAW sử dụng que hàn NC-39L tiêu chuẩn E309L-16, đường kính 3,2mm của hãng Kobelco [7]. Trước khi thực hiện hàn lớp phủ, bề mặt mối hàn và mép vật hàn được làm sạch để đảm bảo nhận được mối hàn tốt nhất. Mỗi lớp hàn phủ gồm nhiều đường hàn khác nhau, nên các đường hàn phải được thực hiện theo đúng quy trình hàn. Sau mỗi đường hàn và lớp hàn, bề mặt mối hàn, vật hàn được làm sạch trước khi thực hiện đường hàn tiếp theo.

Các thông số chế độ hàn được xác định và lựa chọn theo lý thuyết và thực nghiệm. Năng lượng đường được xác định theo công thức sau [10]:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{1000 \cdot v} \cdot \eta$$

Trong đó: Q - Năng lượng đường (kJ/mm)

U - Điện áp hàn (V)

I - Dòng điện hàn (A)

v - Tốc độ hàn (mm/min)

η - Hiệu suất hàn SMAW, η = 0,6

Với chiều dày 10mm, mối hàn hoàn thiện bao gồm ba lớp hàn; trong đó có 01 lớp hàn đáy (lớp hàn lót). Lớp hàn đáy gồm một đường hàn, yêu cầu mối hàn ngấu hết chân của vật hàn và độ lồi chân mối hàn không quá 1,0mm. Thông số chế độ hàn lớp thứ I như bảng 7.

Bảng 7. Thông số chế độ hàn lớp thứ I

Chế độ hàn	Ký hiệu	Giá trị	Ghi chú
Đường kính que hàn (mm)	d	3,2	
Cường độ dòng hàn (A)	I _h	100	DCEP
Điện áp hàn (V)	U _h	30	
Vận tốc hàn (mm/phút)	V _h	100	
Năng lượng đường (kJ/mm)	Q ₁	1,08	

Sau mỗi đường hàn, lớp hàn, bề mặt mối hàn và mép vật hàn được làm sạch trước khi thực hiện hàn lớp tiếp theo. Lớp hàn thứ hai gồm một đường hàn và phủ kín toàn bộ lớp hàn thứ nhất (lớp hàn lót). Lớp hàn thứ ba gồm hai đường hàn phủ kín toàn bộ lớp hàn thứ hai. Bảng thông số chế độ hàn lớp thứ II và III như bảng 8.

Từ lớp hàn thứ hai, việc dao động que hàn là bắt buộc để phân bố nguồn nhiệt, đảm bảo chiều rộng và độ sâu ngấu mối hàn. Biên độ dao động que hàn từ 10 - 12mm. Cùng với đó, cường độ dòng hàn được tăng lên từ 5% đến 10% để đảm bảo công suất nguồn nhiệt hồ quang và độ sâu ngấu cần thiết cho mối hàn.

Bảng 8. Thông số chế độ hàn lớp thứ II và III

Chế độ hàn	Ký hiệu	Giá trị	Ghi chú
Đường kính que hàn (mm)	d	3,2	
Cường độ dòng hàn (A)	I _h	110	DCEP

Điện áp hàn (V)	U _h	32	
Vận tốc hàn (mm/phút)	V _h	100	
Năng lượng đường (kJ/mm)	Q _{2,3,4}	1,27	
Biên độ dao động que hàn (mm)	0	12	

Sử dụng phần mềm ANSYS để mô phỏng quá trình hàn giáp mối thép các bon SS400 với thép không gỉ SUS304. Các thông số chế độ hàn được xác định trên cơ sở lý thuyết và được điều chỉnh thông qua quá trình thực nghiệm. Các điều kiện biên được tác giả đưa ra gần giống điều kiện hàn thực tế.

Nguồn nhiệt hồ quang được xác định theo công thức sau [11]:

$$P = \eta \cdot U_h \cdot I_h$$

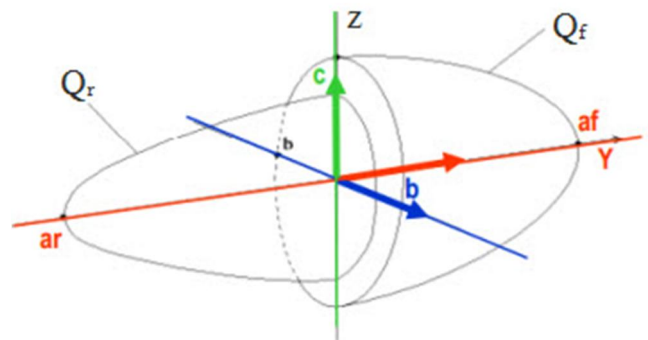
Trong đó:

U_h - Điện áp hồ quang (V)

I_h - Cường độ dòng điện hàn (A)

η - Hiệu suất hồ quang hàn (0,6 ÷ 0,9).

Goldak và các cộng sự [12] đã đưa ra mô hình nguồn nhiệt có mật độ phân bố ellipsoid kép được xác định bằng cách phối hợp hai khối bán ellipsoid khác nhau để tạo thành một nguồn nhiệt (hình 4).



Hình 4. Mô hình nguồn nhiệt hàn [12]

Mật độ nguồn nhiệt tại một điểm bất kỳ (x,y,z) bên trong khối ellipsoid đầu tiên (phía trước hồ quang hàn) được biểu diễn bởi phương trình sau [11, 12]:

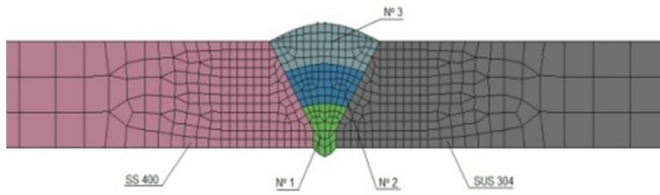
$$Q_r(x, y, z, t) = Q_f \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_f^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right)$$

Với một điểm bất kỳ (x,y,z) bên trong khối ellipsoid thứ hai (phía sau hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình sau [11, 12]:

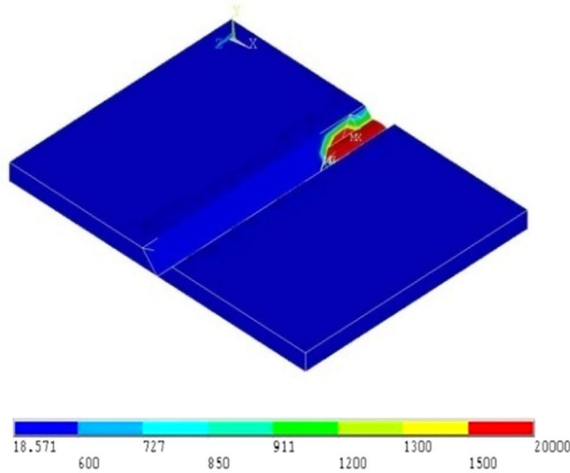
$$Q_r(x, y, z, t) = Q_r \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_r^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right)$$

Trong đó: a_r, a_f, b và c là các thông số hình học của nguồn nhiệt khối ellipsoid kép; Q_r là hàm mật độ nguồn nhiệt.

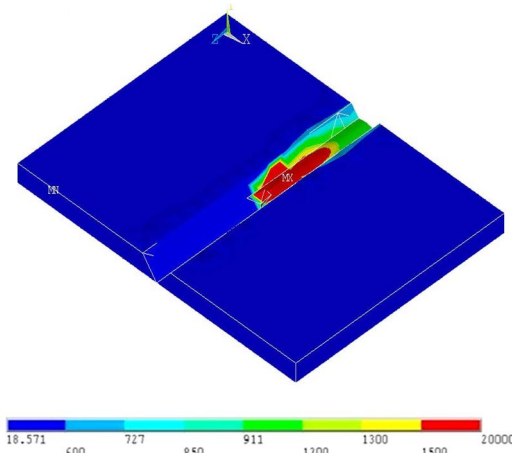
Mối tương quan giữa kích thước của nguồn nhiệt và kích thước của bể hàn, có thể nhận được giá trị cho a_r, a_f, b và c bằng cách đo trực tiếp các thông số hình học của bể hàn.



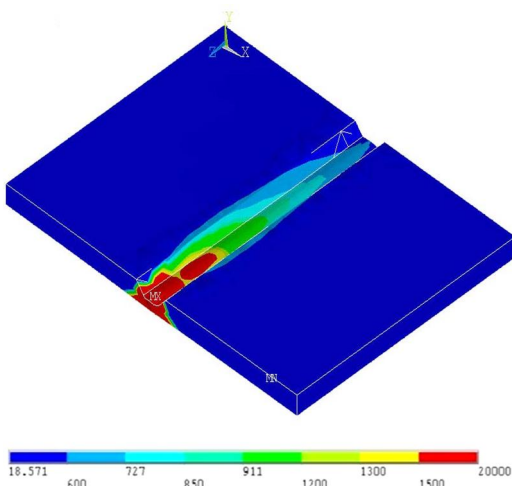
Hình 5. Mô hình mặt cắt ngang mối hàn



Hình 6. Bắt đầu đường hàn



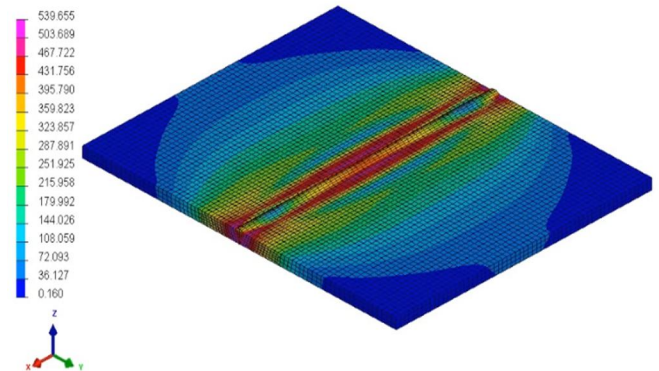
Hình 7. Nối tiếp đường hàn



Hình 8. Kết thúc đường hàn

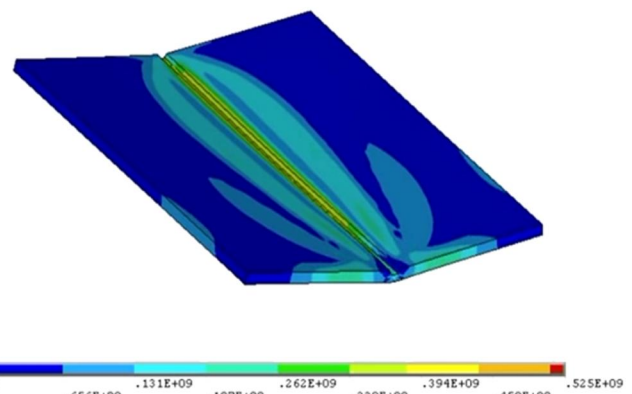
Phân tích hình ảnh mô phỏng (hình 6 ÷ 8) thấy rằng, ở từng thời điểm sự phân bố nhiệt trong kim loại vùng hàn và trên mối hàn là khác nhau. Vùng ảnh hưởng nhiệt ở thời điểm bắt đầu đường hàn nhỏ hơn so với khi hàn đến giữa đường hàn và cuối đường hàn. Khi nguồn nhiệt dịch chuyển, ngay sau đó kim loại vùng hàn kết tinh để hình thành mối hàn.

Sự phân bố nhiệt trong kim loại mối hàn không đồng đều giữa các vùng. Ở đường hàn thứ nhất, vùng ảnh hưởng nhiệt là không quá lớn. Ở đường hàn sau, vùng ảnh hưởng nhiệt lớn hơn do hồ quang liên tục cung cấp nhiệt cho vật hàn.



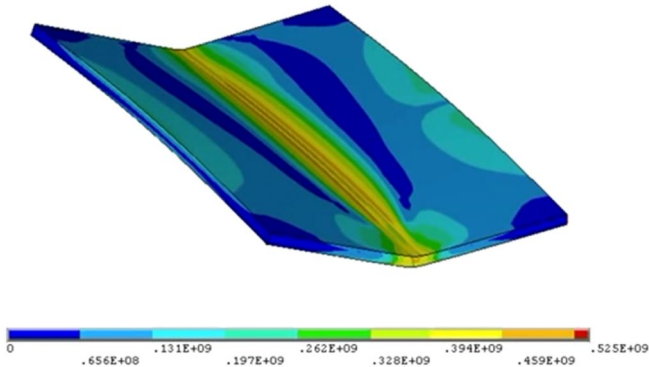
Hình 9. Sự phân bố ứng suất hàn

Do sự chênh lệch về hệ số dẫn nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt của thép không gỉ SUS304 và thép cacbon SS400, nên sự phân bố nhiệt trong vùng kim loại mối hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) cũng khác nhau. Kết quả phân tích thấy rằng, ứng suất sinh ra trong quá trình hàn là rất lớn và nó đạt giá trị lớn nhất tại vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) của mối hàn (hình 9). Đây có thể là nguyên nhân gây ra biến dạng và nứt cho liên kết hàn nếu bị kẹp chặt khi hàn.



Hình 10. Biến dạng khi hàn lớp thứ I

Sau khi hàn lớp thứ I ở trạng thái tự do, liên kết vát mép chữ V bị biến dạng góc do hiện tượng co ngang mối hàn. Ở giai đoạn đầu, mức độ biến dạng là không lớn. Về cuối đường hàn, mức độ biến dạng góc càng lớn do vùng ảnh hưởng nhiệt tăng lên. Ở trạng thái tự do (vật hàn không bị kẹp chặt), sự co ngót và biến dạng của vật hàn càng tăng lên trong quá trình nguội (hình 10).



Hình 11. Biểu dạng khi hàn lớp thứ II

Sau khi hàn lớp thứ II ở trạng thái tự do, mức độ biến dạng góc do hiện tượng co ngang mối hàn càng lớn (hình 11). Do sự tác động của nguồn nhiệt hồ quang, vùng ảnh hưởng nhiệt lớn dần theo thời gian dẫn đến sự biến dạng gia tăng.

Mức độ biến dạng ở các vùng là khác nhau. Ở vùng kim loại lỏng (vùng mối hàn), mức độ biến dạng là lớn nhất do sự co ngót của vật liệu khi nguội. Vì vậy, sau khi hàn, liên kết sẽ có xu hướng biến dạng theo cả phương dọc và phương ngang gây ra hiện tượng cong vênh tấm.

3.2. Quy trình hàn

Trước khi hàn, vật hàn được gia nhiệt từ 200 - 300°C. Mối hàn được thực hiện ở vị trí hàn bằng. Với chiều dày 10mm, mối hàn hoàn thiện bởi ba lớp hàn.

Lớp hàn thứ nhất (lớp đáy) sử dụng phương pháp dao động que hàn hình răng cưa để đảm bảo chân mối hàn ngấu hết mép vật hàn, độ lồi chân mối hàn không quá 1,0mm (hình 12).



Hình 12. Chân mối hàn

Các lớp phủ chỉ được thực hiện sau khi bề mặt mối hàn và mép vật hàn của lớp hàn trước đó được làm sạch để đảm bảo nhận được mối hàn tốt nhất, dao động que hàn hình răng cưa, biên độ dao động que hàn được điều chỉnh phù hợp với chiều rộng của mối hàn (hình 13).



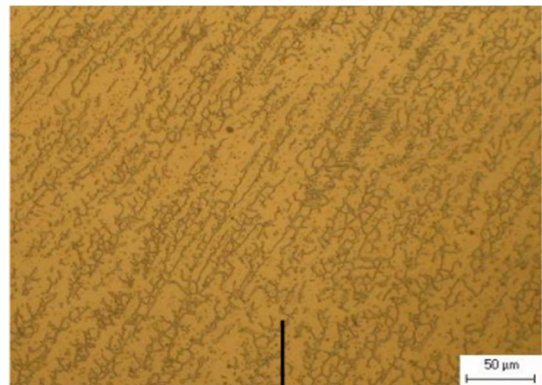
Hình 13. Bề mặt mối hàn

3.3. Tổ chức kim loại mối hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt

Do sử dụng phương pháp hàn nóng chảy nên kim loại mối hàn là hỗn hợp gồm vật liệu cơ bản và vật liệu bổ sung từ que hàn. Vì hàn giáp mối hai loại vật liệu khác nhau về thành phần và cơ tính, nên thép SS400 tham gia quá nhiều vào mối hàn sẽ làm giảm cơ tính, khả năng chịu nhiệt và khả năng chống ăn mòn của kim loại mối hàn.

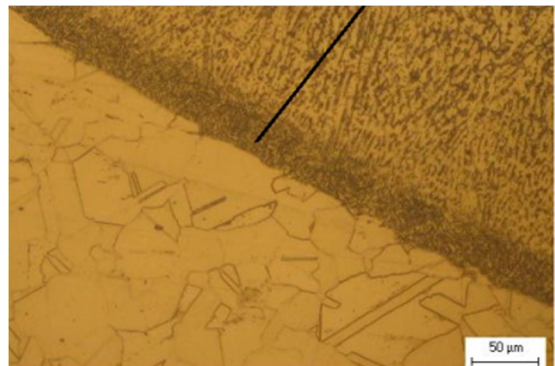
Mẫu kiểm tra kim tương được cắt ra từ vật hàn. Sau đó, mẫu thử được mài bóng và tẩm thực màu để thuận lợi cho trình phân tích cấu trúc. Mẫu thử được quan sát và chụp ảnh bằng thiết bị hiển vi quang học (OM - Optical microscopy) với độ phóng đại từ 200 đến 1000 lần. Kết quả phân tích ảnh chụp cấu trúc kim loại vùng mối hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt như sau:

- Tại vùng kim loại mối hàn: Kim loại vùng mối hàn có cấu trúc gồm hai pha Ferrite và Austenite. Cấu trúc pha tương đối đồng đều, các pha sắp xếp khá ổn định (hình 14).



Hình 14. Cấu trúc kim loại mối hàn thép SUS304 với thép SS400

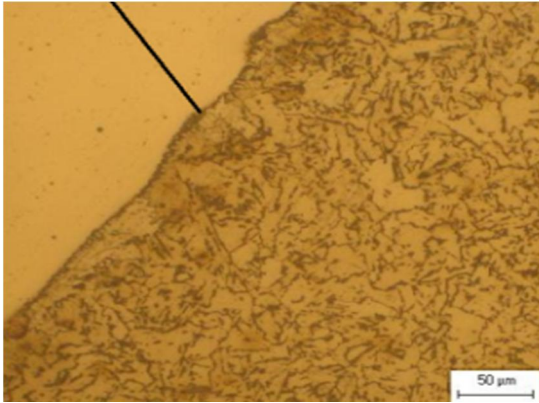
- Tại vùng ảnh hưởng nhiệt giữa tấm thép SUS304 với mối hàn có cấu trúc tương đối ổn định; đường phân giới giữa mối hàn với kim loại nền SUS304 là khá rõ nét; không thấy xuất hiện vết nứt hoặc tách lớp trong vùng phân giới tại vị trí kiểm tra (hình 15).



Hình 15. Cấu trúc kim loại vùng ảnh hưởng nhiệt giữa thép SUS304 với mối hàn

- Tại vùng ảnh hưởng nhiệt giữa tấm thép SS400 với mối hàn do hai loại thép khác nhau về thành phần và cơ tính nên quá trình tẩm thực màu ưu tiên thể hiện cấu trúc của thép SS400. Từ đường phân giới với mối hàn về phía tấm thép SS400 có sự thay đổi rõ rệt về tổ chức kim loại trong vùng ảnh hưởng nhiệt. Cấu trúc kim loại vùng ảnh hưởng nhiệt không còn dạng sóng/thớ như thép SS400 ban đầu.

Thay vào đó, các hạt có cấu trúc hạt nhỏ; càng xa mối hàn về phía tấm thép SS400, mức độ ảnh hưởng của nguồn nhiệt càng giảm nên kích cỡ hạt càng thô to; không thấy xuất hiện vết nứt hoặc tách lớp trong vùng phân giới tại vị trí kiểm tra (hình 16).



Hình 16. Cấu trúc kim loại vùng ảnh hưởng nhiệt giữa thép SS400 với mối hàn

4. KẾT LUẬN

Khi hàn nối vật liệu thép không gỉ SUS304 với thép cacbon SS400, gia nhiệt trước khi hàn từ 200 - 300°C để hạn chế nứt và tách lớp.

Kim loại mối hàn có cấu trúc gồm hai pha Ferrite và Austenite sắp xếp ổn định. Đường phân giới giữa SUS304 và SS400 với mối hàn không có vết nứt.

Cấu trúc kim loại vùng HAZ giữa thép SUS304 với mối hàn khá ổn định. Cấu trúc kim loại vùng HAZ giữa thép SS400 với mối hàn thay đổi theo hướng càng xa mối hàn kim loại càng có cấu trúc hạt thô đại.

Liên kết bị cong dọc trục mối hàn và biến dạng góc do co ngang mối hàn do ảnh hưởng của nguồn nhiệt hàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. E. Taban, et al, 2008. *Evaluation of Dissimilar Welds between Ferritic Stainless Steel Modified 12% Cr and Carbon Steel S355*. SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL, Sponsored by the American Welding Society and the Welding Research Council.

[2]. Ngô Hữu Mạnh, 2020. *Nghiên cứu và ứng dụng công nghệ hàn để hàn thép không gỉ SUS304 với thép cacbon A53*. Tạp chí Khoa học Thủy lợi và Môi trường, số 68.

[3]. Wang Rui, Jianxun Zhang, Serizawa Hisashi, Murakawa Hidekazu, 2009. *Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method*. Materials and Design, Volume 30, Issue 9, pages 3474-3481.

[4]. AWS welding handbook, 2011. *Materials and Applications, Part 1*. Ed. 9th, Volume 4, AWS, USA.

[5]. JIS G 3101, 2010. *Rolled steels for general structure*. Japan

[6]. John E. Bringas, 2007. *Handbook of comparative world steel standards*. Ed. 4th, USA.

[7]. Kobe steel, 2011. *Kobelco welding handbook*. Kobe steel, LTD, Japan

[8]. Wang Rui, Rashed Sherif, Serizawa Hisashi, Murakawa Hidekazu, Jianxun Zhang, 2008. *Numerical and experimental investigation on welding deformation*. Transactions of JWRI, Vol. 37, No. 1, pp. 79-90.

[9]. AWS D1.1/D1.1M, 2010. *Structural welding code - steel*. USA

[10]. Ngô Lê Thông, 2007. *Công nghệ hàn điện nóng chảy*. NXB Khoa học và Kỹ thuật.

[11]. Nguyen, N.T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., and Maeda, Y, 1999. *Analytical solutions for transient temperature of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat sources*. Welding Journal Research Supplement, 265-274.

[12]. J. Goldak, M. Bibby, J. Moore and B. Patel, 1996. *Computer Modelling of Heat Flow in Welds*. USA.

AUTHOR INFORMATION

Ngô Hữu Mạnh

Sao Do University