

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CÁC THÔNG SỐ ĐẾN CHẤT LƯỢNG CỦA MỐI HÀN HỒ QUANG CẮY CHỐT CHU KỲ NGẮN

STUDY ON PARAMETERS THAT AFFECTING THE QUALITY OF SHORT CYCLE STUD WELDING PROCESS

HUỖNH NGUYỆT KHUYẾN^{1,a}, MAI ĐẶNG TUẦN²,
PHAN TRƯỜNG DUY³, TRẦN KHẮC TUẦN³

¹Trường Cao Đẳng Nghề An Giang

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

³Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

^aTác giả liên hệ: huynhnguyetkhuyen@agvc.edu.vn.

Nhận bài (Received): 28/3/2023; Phản biện (Reviewed): 17/4/2024; Chấp nhận (Accepted): 26/04/2024

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu các thông số ảnh hưởng đến quá trình hàn chốt bằng hồ quang nóng chảy chu kỳ ngắn cho thép SS400. Bài báo đã tiến hành mô phỏng nhiệt cho quá trình hàn chốt bằng hồ quang nóng chảy chu kỳ ngắn cho vật liệu này và sử dụng quy hoạch Box-Behnken với 3 nhân tố gây ảnh hưởng nhiều nhất tới chất lượng sản phẩm là I (cường độ dòng điện khi hàn), T (thời gian hàn) và H (độ lún của chốt). Kết quả đạt được của bài báo có thể làm số liệu tham khảo trong quá trình lựa chọn giá trị các thông số hàn chốt bulông với vật liệu SS400.

Từ khóa: Hàn cấy chốt, Quy hoạch thực nghiệm, Mô phỏng nhiệt, Box-Behnken

ABSTRACT

This article studies the parameters affecting the short circle stud welding process for SS400 steel. The article conducted thermal simulation for the short circle stud welding process for this material and used Box-Behnken experimental planning with the 3 factors that most affect product quality: I (current when welding), T (welding time) and H (bolt plunge). The results obtained in the article can be used as reference data in the process of selecting the values of bolt and bolt welding parameters with SS400 material.

Key words: Stud welding, experimental planning, thermal simulation, Box-Behnken

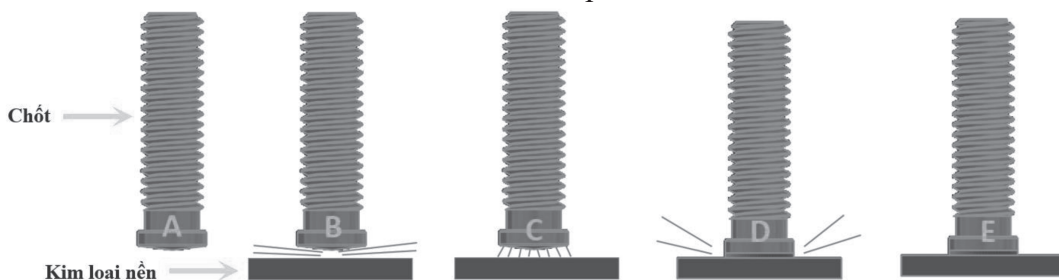
1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, Quy trình hàn chốt bằng hồ quang nóng chảy với chu kỳ ngắn được sử dụng để nối các chốt với kim loại cơ bản dùng trong nhiều ngành công nghiệp. Công nghệ hàn này có thể hàn ở cường độ cao, thời gian hàn ngắn, mối hàn chắc, ít bị biến dạng và đạt hiệu suất cao [1]. Quá trình hàn

chốt là một kỹ thuật hàn được sử dụng để nối một kết cấu dạng đỉnh tán kim loại với các kích thước khác nhau vào một tấm kim loại có độ dày khác nhau [2]. Phương pháp này đặc trưng bởi lượng nhiệt cục bộ cao đưa vào vùng hàn do dòng điện cao và có dùng ống sứ bảo vệ vùng nóng chảy và giữ hơi kim loại như một khí bảo vệ với tốc độ

làm mát cao dẫn đến vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ [3]. Chất lượng của mỗi hàn này phụ thuộc vào nhiều thông số khác nhau như vật liệu chót và nền, dòng điện và thời gian hàn, khoảng cách nâng và khoảng cách nhấn [4]. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để tìm hiểu ảnh hưởng của các thông số hàn đến tính chất cơ học và cấu trúc tế vi của mỗi hàn này [5], nhưng với thép SS400 thì còn rất hạn chế.

Quy trình hàn chót bulông bằng hồ quang nóng chảy chu kỳ ngắn gồm 5 giai đoạn, được trình bày ở Hình 1: A: Chốt bulông được lắp vào dụng cụ hàn và được đặt vào đúng vị trí trên tấm kim loại nền; B: Nâng chót tạo hồ quang; C: Tạo hồ quang, bể nóng chảy sắp được hình thành; D: Giai đoạn hồ quang hoàn tất và chót bulông được dụng cụ hàn tác động lực ép để lún vào bể nóng chảy; E: Mỗi hàn hoàn tất, dụng cụ hàn được rút ra và chụp sứ bảo vệ được tháo ra để kiểm tra..



Hình 1. Quy trình hàn chót bằng hồ quang nóng chảy chu kỳ ngắn [1]

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương trình nhiệt của quá trình hàn chót

Quá trình hàn chót bulông là một sự truyền nhiệt phức tạp, trong đó, vừa có sự toả nhiệt mạnh của hồ quang, vừa có sự bức xạ và đối lưu nhiệt của bề mặt chót và tấm nền. Phân tích nhiệt trong quá trình hàn chót bao gồm hai phần; dòng nhiệt và sự mất nhiệt từ bề mặt của chót và tấm kim loại nền. Ta có thể tính gần đúng thông lượng nhiệt bằng cách dùng giả định phân phối Gaussian [7].

Thép SS400 là một loại thép cacbon sản xuất dựa theo tiêu chuẩn Nhật Bản. Thép SS400 có độ bền lớn, có thể chịu được nhiệt độ cao nên được dùng để sản xuất nhiều thiết bị, chi tiết máy móc. Thép SS400 là thép cacbon, có hàm lượng cacbon trung bình, hàm lượng P và S thấp hơn 0.05%. Độ bền kéo của mác thép này dao động trong khoảng 400-510MPa.

Tuy nhiên, ở nước ta công nghệ này còn chưa được áp dụng rộng rãi trong sản xuất. Nguyên nhân chính là thiếu các công trình nghiên cứu về bản chất và tối ưu hoá chế độ công nghệ, thiếu các điều kiện cơ sở như vật liệu, thiết bị. Vì vậy, việc nghiên cứu quá trình hàn chót, các thông số ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm hàn chót là cần thiết đối với nước ta hiện nay. Do đó, mục tiêu nghiên cứu của bài báo này nhằm tìm cách tìm ra các thông số công nghệ phù hợp cho mỗi hàn với vật liệu SS400.

$$q(x, y, z) = f \frac{6\sqrt{3}}{abc\pi^2} q_0 e^{-3\left(\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} + \frac{z^2}{c}\right)} \quad (1)$$

Và

$$q_0 = \mu UI \quad (2)$$

Trong đó:

q là lượng nhiệt tại điểm bất kỳ của vùng hàn (W/m^3)

f : tham số công suất đặt trong trụ và tấm, thống nhất bằng nhau theo nghiên cứu này [7]

q_0 : Công suất nguồn phát hồ quang (W)

μ : Hiệu suất máy hàn

U : độ sụt áp (V)

I : cường độ dòng điện (A)

a, b và c: bán kính phân bố nhiệt (m), thống nhất bằng nhau theo nghiên cứu này [7]

Sự mất mát nhiệt lượng trong quá trình hàn do đối lưu và bức xạ, lượng nhiệt mất đi này có thể được tính toán như sau:

$$q_{ex} = h(T_0 - T) + \varepsilon \cdot \sigma(T_{amb}^4 - T^4) \quad (3)$$

Trong đó:

q_{ex} : Nhiệt mất đi từ bề mặt chót và tấm

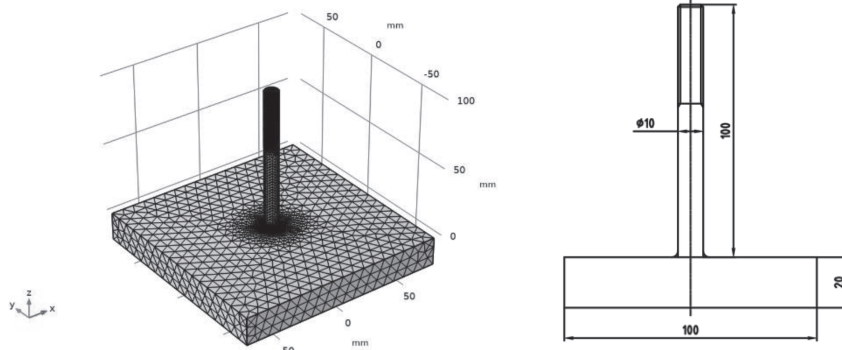
h : Hệ số truyền nhiệt đối lưu

T và T_{amb} : Nhiệt độ ban đầu và nhiệt độ môi trường

ε : Độ bức xạ bề mặt

σ : Hằng số Stefan-Boltzmann

Từ các phân tích trên, ta tiến hành xây dựng các mô hình tính toán trên phần mềm mô phỏng COMSOL®, như hình 2.



Hình 2. Mô hình thực nghiệm và Mô hình quá trình hàn chốt thực hiện mô phỏng nhiệt

2.2. Quá trình chuẩn bị mẫu thử cho quy hoạch thực nghiệm:

Để nghiên cứu các thông số ảnh hưởng nhiều nhất đến chất lượng mối hàn chốt, ta tiến hành phân tích các nghiên cứu [4,5,6,7]. Từ các nghiên cứu trên, ta chọn được 3 thông số ảnh hưởng nhiều nhất đến chất lượng mối hàn chốt là: I (cường độ dòng điện khi hàn), T (thời gian hàn) và H (độ lún của chốt). Do cần tìm các giá trị tối ưu của từng thông số nên nghiên cứu lựa chọn phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc 2 Box-Behnken 3

nhân tố. Quy hoạch dạng này có thiết kế số thực nghiệm vừa đủ để xây dựng mô hình bậc 2 đầy đủ, ít mức thí nghiệm nên làm giảm đáng kể số lượng thí nghiệm cần thiết, do đó sẽ làm giảm thời gian tiến hành thí nghiệm và chi phí vật chất đồng thời vẫn đảm bảo nhận được mô hình toán học thực nghiệm đầy đủ dạng đa thức bậc 2. Nghiên cứu cũng lập ra bảng giá trị các mức cho từng thông số ở Bảng 1. Nhóm nghiên cứu cũng lựa chọn thông số độ bền kéo là thông số kỹ thuật chính sẽ nghiên cứu.

Bảng 1. Giá trị các mức của các nhân tố

Tên nhân tố	Ký hiệu		Đơn vị	Các mức thực nghiệm		
	Tự nhiên	Mã hoá		(-1)	(0)	(+1)
Cường độ dòng điện khi hàn	I	A	A	380	400	420
Thời gian hàn	T	B	s	0,06	0,08	0,1
Độ lún của chốt	H	C	mm	0,6	0,8	1,0

Dựa vào bảng quy hoạch trên, nhóm tác giả đã tiến hành xây dựng ma trận quy hoạch cho quy hoạch thực nghiệm này, đồng thời xác định từng mức giá trị cho từng thực nghiệm. Ma trận quy hoạch được trình bày cùng với dữ liệu thực nghiệm thu được ở Bảng 2.

Mẫu thí nghiệm được xây dựng hàn chót bulông đường kính 10mm, dài 100mm, vật liệu SS400. Tấm kim loại nền dày 20mm, kích thước 100x100mm, sau khi hàn xong sẽ cắt gọn lại để dễ gá vào ngàm kẹp máy kéo nén. Hình ảnh kích thước mẫu thí nghiệm được trình bày ở Hình 2.

Dựa vào bảng ma trận quy hoạch thực nghiệm, sử dụng máy hàn chót SC (hình 3) với các thông số kỹ thuật trình bày ở bảng 3, tiến hành thực nghiệm hàn chót, cuối cùng thu được các mẫu thí nghiệm ở Hình 4.

Các mẫu thí nghiệm sau đó sẽ được thử độ bền kéo bằng máy kén nén vạn năng INSTRON DX300, kết quả thí nghiệm được trình bày ở bảng 2. Trong đó, các thông số: D là đường kính chót bulông; S là tiết diện mặt cắt đứt; F là lực kéo nén. TS (Tensile Strength) là giá trị ứng suất kéo khi mẫu thử bị phá hủy.

Bảng 2. Ma trận quy hoạch và dữ liệu thực nghiệm

TT	D mm	S mm ²	F kN	I A	T s	H mm	TS MPa	Vị trí
1	9,95	77,8	27,7	380	0,06	0,8	356,0	Tại mỗi hàn
2	9,99	78,4	28,7	420	0,06	0,8	366,1	Tại mỗi hàn
3	9,98	78,2	36,0	380	0,1	0,8	460,4	Tại mỗi hàn
4	9,96	77,9	36,3	420	0,1	0,8	466,0	Tại mỗi hàn
5	9,95	77,8	30,4	380	0,08	0,6	390,7	Tại mỗi hàn
6	9,96	77,9	31,0	420	0,08	0,6	397,9	Tại mỗi hàn
7	9,95	77,8	36,6	380	0,08	1	470,4	Tại mỗi hàn
8	9,97	78,1	37,8	420	0,08	1	484,0	Tại mỗi hàn
9	9,95	77,8	26,1	400	0,06	0,6	335,5	Tại mỗi hàn
10	9,95	77,8	37,6	400	0,1	0,6	483,3	Tại mỗi hàn
11	9,97	78,1	36,2	400	0,06	1	463,5	Tại mỗi hàn
12	9,95	77,8	39,0	400	0,1	1	501,3	Tại mỗi hàn
13	9,97	78,1	35,8	400	0,08	0,8	458,4	Tại mỗi hàn
14	9,95	77,8	36,0	400	0,08	0,8	462,7	Tại mỗi hàn
15	9,96	77,9	36,4	400	0,08	0,8	467,3	Tại mỗi hàn



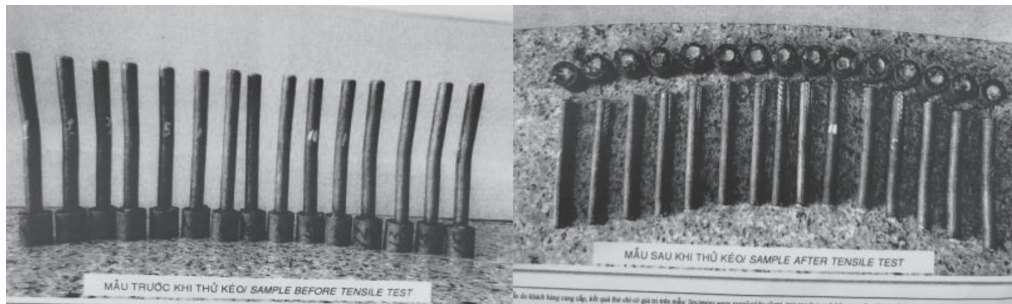
Hình 3. Thiết bị hàn chót ARC [9]

Bảng 3. Thông số kỹ thuật máy hàn ARC [9]

Điện áp nguồn 1 pha	220V
Tần số nguồn điện Hz	50, 60
Công suất tiêu thụ	2.5 Kva

Dung tích tụ điện	10800 UF
Điện áp hàn	30-190V
Chu kỳ tải	60%
Phạm vi hàn (mm)	M2 – M10 mm

Thời gian hàn (s)	1-3
Tốc độ hàn	10-20 cái/phút
Kích thước (mm)	445x245x215
Trọng lượng (kg)	20.5

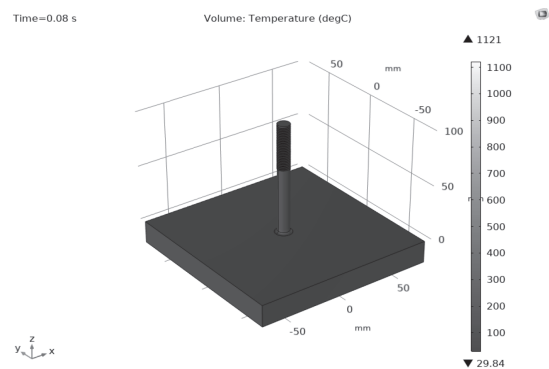


Hình 4. Mẫu thí nghiệm kéo

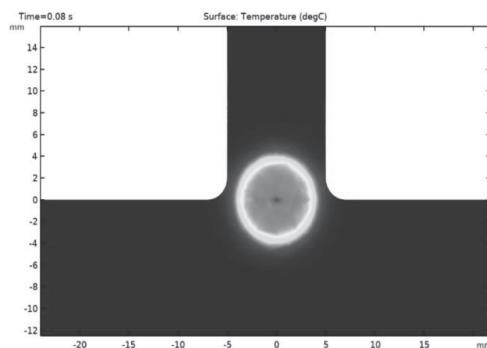
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả mô phỏng nhiệt

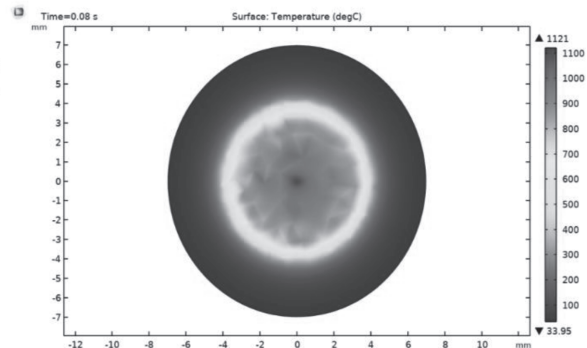
Sử dụng môi trường mô phỏng nhiệt của phần mềm COMSOL, với các thiết lập đã trình bày, ta thu được kết quả mô phỏng nhiệt của quá trình hàn chốt ở các hình 5, hình 6. Ta nhận thấy nhiệt độ tối đa của vùng hồ quang là 1121°C , với các phân bố nhiệt độ đều như hình 4,5,6.



Hình 5. Kết quả mô phỏng nhiệt (mô hình tổng quát)



a. Mặt cắt trực YZ



b. Mặt cắt trực XY

Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt (mặt cắt trực YZ) và (mặt cắt trực XY)

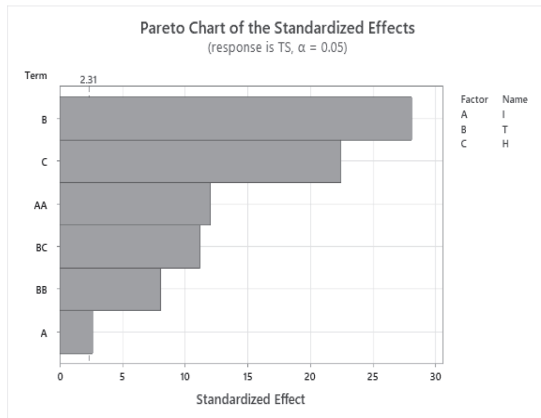
3.2. Kết quả xử lý số liệu thực nghiệm

Dựa vào bảng số liệu thực nghiệm thu được (Bảng 2), ta tiến hành xử lý số liệu thực nghiệm này. Tiến hành phân tích sơ bộ với các nhân tố của hệ đa thức

bậc 2 đầy đủ bằng phần mềm tính toán thống kê Minitab, ta thu được kết quả. Sau đó, ta loại bỏ các nhân tố không ảnh hưởng và tiến hành phân tích lại sau khi loại bỏ các không ảnh hưởng tới phương

trình hồi quy. Với kết quả phân tích lại, ta thấy rằng giá trị p-Value của nhân tố chính bậc nhất I đã bé hơn mức ý nghĩa α . Từ đây, ta kết luận các nhân tố của lần phân tích này đều có ảnh hưởng tới phương trình hồi quy.

Tiếp theo ta sẽ phân tích mức độ ảnh hưởng của các nhân tố tới phương trình hồi quy. Dựa vào biểu đồ Pareto ở hình 7, ta thấy các nhân tố ảnh hưởng nhiều nhất tới phương trình hồi quy là: Thời gian hàn (T), H (độ lún của chốt) và nhân tố bậc hai của cường độ dòng điện hàn (I^2).



Hình 7. Biểu đồ Pareto thể hiện sự ảnh hưởng của các nhân tố tới phương trình hồi quy

Tiếp theo ta sẽ tiến hành phân tích phương sai ANOVA (Analysis of Variance) cho các nhân tố ảnh hưởng tới phương trình hồi quy ở bảng 4. Do p-Value của hệ số Lack-of-Fit là 0.499 lớn hơn mức ý nghĩa $\alpha=0.05$ nên ta kết luận *Không có bằng chứng nào cho thấy mô hình không phù hợp với dữ liệu* [10].

Bảng 4. Phân tích ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	39095,2	6515,9	270,60	0,000
Linear	3	31321,7	10440,6	433,59	0,000

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
I	1	166,5	166,5	6,92	0,030
T	1	19002,8	19002,8	789,16	0,000
H	1	12152,4	12152,4	504,68	0,000
Square	2	4748,5	2374,3	98,60	0,000
I*I	1	3494,1	3494,1	145,11	0,000
T*T	1	1564,2	1564,2	64,96	0,000
2-Way Interaction	1	3025,0	3025,0	125,63	0,000
T*H	1	3025,0	3025,0	125,63	0,000
Error	8	192,6	24,1		
Lack-of-Fit	6	153,0	25,5	1,29	0,499
Pure Error	2	39,6	19,8		
Total	14	39287,8			

Ta tiến hành kiểm nghiệm R bình phương cho phương trình hồi quy thu được. Kết quả thể hiện ở bảng 6.

Bảng 6. Kết quả kiểm nghiệm R bình phương

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.90710	99.51%	99.14%	97.58%

Các hệ số R-sq, R-sq hiệu chỉnh và R-sq dự đoán đều lớn hơn 85%. Mô hình phù hợp với dữ liệu thực nghiệm và có thể dùng phương trình hồi quy này dự đoán cho dữ liệu thực nghiệm.

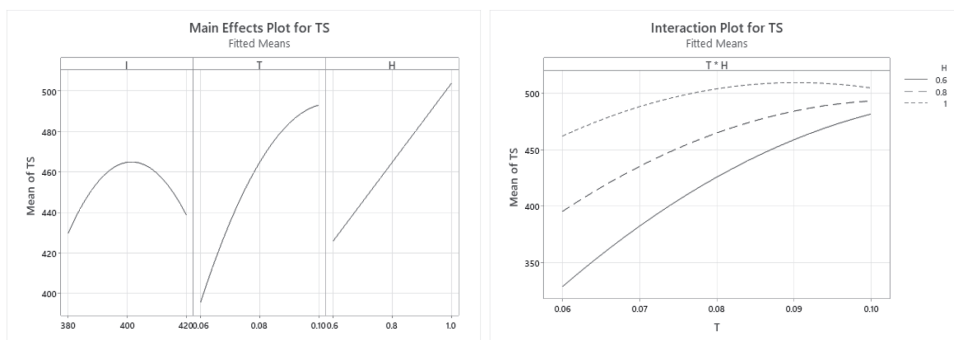
Phương trình hồi quy ở dạng tự nhiên là:

$$TS = -13014 + 61.57 I + 16145 T + 744.9 H - 0.07668 I^2 - 51303 T^2 - 6875 TH \quad (4)$$

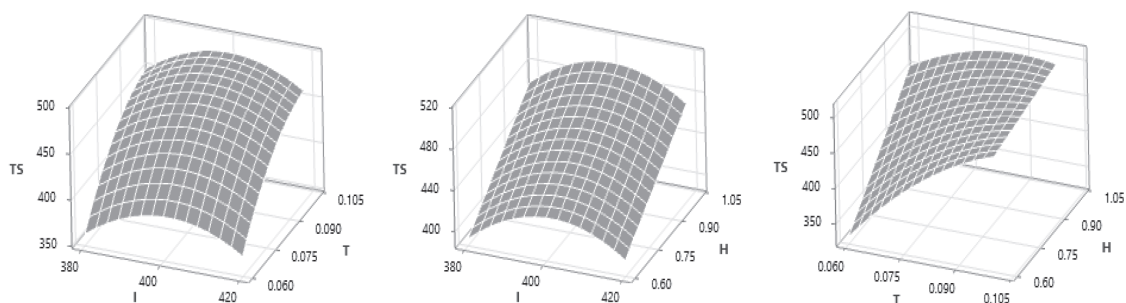
Ta tiến hành phân tích tiếp các biểu đồ thể hiện sự ảnh hưởng của từng nhân tố đến độ bền kéo của các mẫu thí nghiệm bằng các biểu đồ ở các hình 9, 10:

Từ biểu đồ các nhân tố ảnh hưởng (hình 8), ta có thể thấy rằng: Với nhân tố chính I, khi ta tăng I thì độ bền kéo sản phẩm tăng lên nhưng khi đạt giá trị cực đại lại bắt đầu giảm xuống, điều này thể hiện khi giá trị cường độ dòng điện tăng, hồ quang sinh ra sẽ có nhiệt độ lớn hơn, làm cho vùng hàn mở rộng, nếu ở nhiệt độ vừa phải sẽ giúp

tăng độ bền, nếu tăng quá giới hạn thì sẽ sinh ra sự chuyển pha làm giảm độ bền sản phẩm; Với nhân tố chính T, khi tăng T thì độ bền sản phẩm tăng, do khi tăng thời gian hàn thì chất lượng mối hàn sẽ tốt hơn; Với nhân tố độ lún mỗi hàn H, khi ta tăng H thì độ bền kéo của sản phẩm tăng theo hàm bậc nhất, lực ép càng lớn làm cho phần kim loại mối hàn chịu trạng thái ứng suất như quá trình rèn dập, làm kết cấu kim loại có dạng hạt nhỏ, nâng cao cơ tính mối hàn, tăng bền.



Hình 8. Các biểu đồ ảnh hưởng của các nhân tố tới độ bền kéo



a. Ảnh hưởng của I và T

b. Ảnh hưởng của I và H

c. Ảnh hưởng của T và H

Hình 10. Các biểu đồ ảnh hưởng của các nhân tố tới độ bền kéo

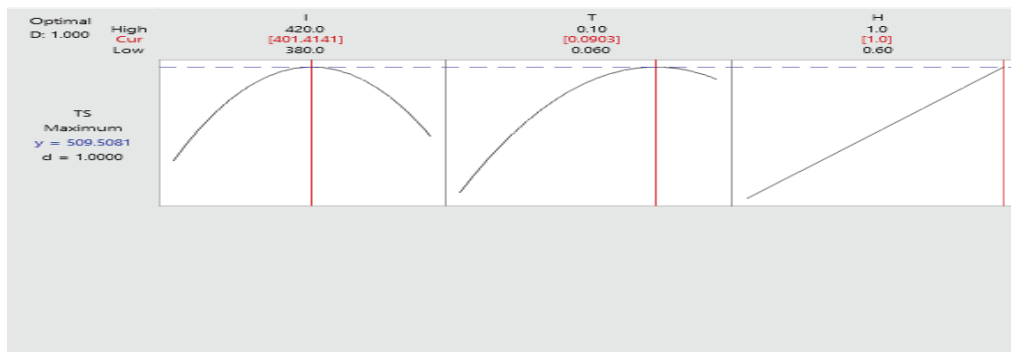
3.3. Tối ưu hoá các thông số của quá trình hàn chót bulông với vật liệu SS400

Ta sử dụng module Response Optimizer của Minitab để tiến hành tối ưu hoá thông số công nghệ của quá trình hàn chót để có giá trị độ bền kéo là lớn nhất với các điều kiện biên như sau:

$$\begin{cases} 380 \leq I \leq 420 \\ 0.06 \leq T \leq 0.1 \\ 0.6 \leq H \leq 1 \end{cases}$$

Phần mềm sẽ tính toán và đưa ra giá trị tối ưu như sau:

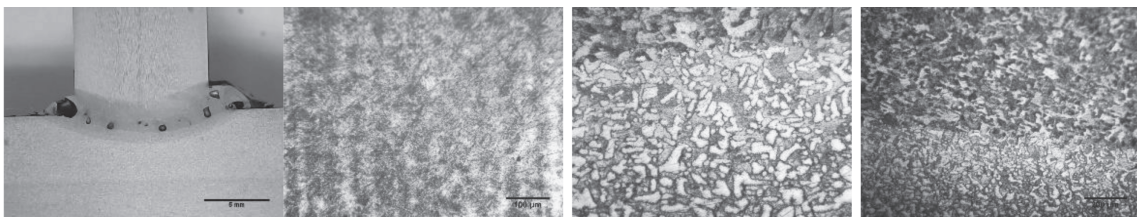
I	T	H	TS Fit
401.414	0.0903030	1	509.508



Hình 11. Kết quả tối ưu hoá thông số công nghệ cho quá trình hàn chốt

Từ giá trị tối ưu trên, nhóm nghiên cứu đã tiến hành gia công lại với bộ thông số tối ưu ($I=401.4A$; $T=0.09$; $H=1.0$), kết quả độ bền kéo của mẫu

thử là $TS_{op} = 502.4MPa$. Nhóm nghiên cứu cũng tiến hành chụp tế vi biên dạng vùng mối hàn của mẫu thử trên, thể hiện ở hình 12.



Hình 12. Kết quả chụp bề mặt tế vi của mẫu thử tối ưu hoá

(Từ trái sang phải: 1-Mẫu hàn chốt; 2-Vùng tâm mối hàn; 3-Viên dưới mối hàn; 4-Vùng tiếp giáp kim loại nền và mối hàn)

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành phân tích mô phỏng nhiệt quá trình hàn chốt với vật liệu SS400, các kết quả thu được phù hợp với các giả định ban đầu về phương trình truyền nhiệt. Nghiên cứu cũng đã tiến hành phân tích quy hoạch thực nghiệm nhằm tìm ra giá trị các thông số công nghệ để có độ bền kéo lớn nhất cho sản phẩm.

Kết quả đạt được của bài báo có thể làm số liệu tham khảo trong quá trình lựa chọn giá trị các thông số hàn chốt bulông với vật liệu SS400. Ngoài ra, trong tương lai, hướng nghiên cứu sẽ được phát triển thêm nhằm bổ sung thêm các quá trình chuyển biến pha nếu có của quá trình hàn chốt nhằm góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm hơn nữa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Algodí, Samer Jasim, Salman, Abdulhakeem Amer, Al-helli, Ali H. "Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1106 /AISI 1045 Steels Drawn Arc Stud Welded Joints", Advances in Science and Technology. Research Journal, 2023, Vol. 17, no 5, 48-55
- [2]. Abass, M.H., Abood, A.N., Alali, M., Hussein, S.K. and Nawi, S.A. 2021. *Mechanical Properties and Microstructure Evolution in Arc Stud Welding Joints of AISI 1020 with AISI 316L and AISI 304*. Metallography, Microstructure, and Analysis, 10(3), 321–333.

- [3]. ISO 14555, (2006). In Welding-Arc Stud Welding of Metallic Materials, 2nd ed. Geneva, Switzerland.
- [4]. Başıyigit, A.B. and Kurt, A. 2017. Investigation of the weld properties of dissimilar S32205 duplex stainless steel with AISI 304 steel joints produced by arc stud welding. *Metals*, 7(3), p. 77.
- [5]. Buranapunviwat, K. and Sojiphan, K. 2021. *Destructive testing and hardness measurement of resistance stud welded joints of ASTM A36 steel*. *Materials Today: Proceedings*, 47, pp. 3565–3569.
- [6]. Zhang, Q., Zhang, B., Luo, Y., Yang, G. and Zheng, H.X. 2022. Effect of the Welding Process on Microstructure, Microhardness, and Residual Stresses of Capacitor Discharge Stud Welded Joint. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 144(1).
- [7]. Sabah Khammass Hussein. 2017. *Thermal Finite Element Analysis and Optimization of Carbon Steel Arc Stud Welding Parameters*. *ENGINEERING JOURNAL* Volume 21 Issue 5, pp. 333-345.
- [8]. Yohei Harada, Hiroki Yamada, Shinji Kumai. 2016. Interfacial microstructure and thermal history of SS400 steel stud/5052 aluminum alloy plate joints fabricated by solid-state stud welding. *Journal of Japan Institute of Light Metals* 66(9):489-496.
- [9]. Máy hàn Tiên Thành. <https://mayhantienthanh.com/san-pham/may-han-bu-long/>
- [10]. Douglas C. Montgomery. 2021. *Design and Analysis of Experiments*, 10th Edition, Wiley.