

INVESTIGATION AND EVALUATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS USING FINITE ELEMENT METHOD

Pham Van Hiep

Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics - Phenikaa School of Engineering - Phenikaa University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 23/01/2026	Resistance spot welding (RSW) is a common method for joining metal sheets in automotive industries. In this case, evaluation of RSW quality is an essential step for safety requirements. Technically, RSW quality depends on the welded materials and welding parameters including welding current, welding time, and electrode force. This study presents a numerical investigation and evaluation of the RSW process using finite element method (FEM). The simulation process is implemented by ANSYS software to evaluate the RSW quality. Nugget formation and nugget diameter are determined from the simulated temperature generation and distribution. To validate the simulation results, the RSW process of 590 DP steel sheets is simulated, and the predicted nugget diameter is compared with experimental data in the published work. The results show that the maximum error is 1.25% that indicates the strong predictive capability of ANSYS for simulating the RSW process. In addition, the suitable welding parameters are recommended following the American Welding Society (AWS). These results demonstrate the capability of FEM in predicting suitable welding parameters for specific material.
Revised: 28/02/2026	
Published: 28/02/2026	
KEYWORDS	
Resistance spot welding	
RSW process	
ANSYS software	
Nugget diameter	
RSW quality of 590 DP steel	

MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ QUÁ TRÌNH HÀN ĐIỂM SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Phạm Văn Hiệp

Khoa Cơ khí – Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa - Đại học Phenikaa

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 23/01/2026	Hàn điểm là phương pháp phổ biến gia công kim loại tấm trong ngành công nghiệp ô tô và hàng không vũ trụ. Trong các ngành công nghiệp này, đánh giá chất lượng mối hàn điểm là một bước không thể thiếu để đáp ứng các yêu cầu về an toàn. Chất lượng mối hàn điểm phụ thuộc vào vật liệu hàn và các thông số hàn như dòng điện hàn, thời gian hàn, và lực tác dụng lên điện cực. Nội dung bài báo trình bày quá trình mô phỏng mối hàn điểm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Quá trình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm ANSYS để đánh giá chất lượng của mối hàn. Sự hình thành của đường kính mối hàn được thể hiện dựa trên sự phân bố nhiệt độ thu được từ kết quả mô phỏng. Quá trình mô phỏng hàn điểm của thép tấm 590 DP được thực hiện để xác định đường kính mối hàn, sau đó so sánh với kết quả thực tế để kiểm chứng kết quả mô phỏng. Kết quả chỉ ra rằng giá trị sai lệch lớn nhất là 1.25%, từ đó chứng minh được khả năng của ANSYS trong thực hiện mô phỏng quá trình hàn điểm. Bên cạnh đó, thông số hàn phù hợp được đề xuất dựa theo tiêu chuẩn an toàn của Hiệp hội Hàn Hoa Kỳ (AWS). Các kết quả trên chứng minh khả năng của FEM trong việc dự đoán các thông số hàn phù hợp cho từng loại vật liệu cụ thể.
Ngày hoàn thiện: 28/02/2026	
Ngày đăng: 28/02/2026	
TỪ KHÓA	
Mối hàn điểm	
Quá trình hàn điểm	
Phần mềm ANSYS	
Đường kính mối hàn	
Hàn điểm đối với thép 590 DP	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14628>

Email: hiep.phamvan@phenikaa-uni.edu.vn

1. Giới thiệu

Hàn điểm là một phương pháp gia công phổ biến để hàn hai hoặc nhiều tấm kim loại với nhau. Dựa trên các đặc điểm nổi trội như thao tác đơn giản, giá thành thấp, thời gian thao tác ngắn và dễ dàng tự động hóa quá trình nên hàn điểm được xem là một trong những phương pháp gia công tối ưu trong ngành ô tô và hàng không vũ trụ [1], [2]. Trong các lĩnh vực này, chất lượng mỗi hàn điểm đóng vai trò quyết định đến độ bền kết cấu và mức độ an toàn của sản phẩm. Chất lượng của mỗi hàn điểm phụ thuộc vào một trong những yếu tố như: vật liệu hàn, cường độ dòng điện hàn, thời gian hàn và lực tác dụng lên điện cực trong quá trình hàn. Do đó, việc xác định bộ thông số hàn phù hợp là bước tiền đề quan trọng trước khi triển khai sản xuất hàng loạt.

Mô phỏng số được sử dụng rộng rãi nhằm đánh giá chất lượng mỗi hàn đối với từng loại vật liệu dưới các điều kiện công nghệ khác nhau. ANSYS, ABAQUS, và SORPAS là những phần mềm thông dụng nhất trong việc mô phỏng quá trình hàn điểm. Chất lượng mỗi hàn được đánh giá dựa trên kết quả mô phỏng và được so sánh với kết quả thực tế để kiểm tra tính khả thi của phương pháp mô phỏng. Dựa trên mô hình đối xứng hai chiều (2D), quá trình RSW đã được mô phỏng bằng ANSYS trong nhiều nghiên cứu [3], [4]. Dai [5] phân tích ảnh hưởng của các thông số hàn tới chất lượng mỗi hàn điểm thông qua quá trình mô phỏng trên phần mềm ANSYS. Khan và cộng sự [6] dự đoán sự hình thành và phát triển của mỗi hàn dựa vào phân tích cơ-nhiệt trên phần mềm ABAQUS. Zhang và cộng sự [7] sử dụng phần mềm SORPAS mô phỏng quá trình hàn điểm dựa trên mô hình điện-cơ-nhiệt. Bên cạnh đó, các phương pháp số khác cũng được áp dụng; chẳng hạn, Gould [8] sử dụng mô hình truyền nhiệt một chiều (1D) để phân tích sự thay đổi đường kính mỗi hàn, trong khi mối tương tác giữa điện cực và vật liệu hàn được nghiên cứu thông qua phân tích phân tử hữu hạn về sự phát triển đường kính mỗi hàn [9], [10].

Tuy nhiên, các công bố phía trên mới chỉ tập trung vào việc xây dựng mô hình mô phỏng mà chưa có so sánh với kết quả thực nghiệm để kiểm chứng mô hình. Nội dung của bài báo trình bày quá trình mô phỏng hàn điểm sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn được thực hiện trên phần mềm ANSYS. Quá trình mô phỏng được thực hiện qua ba bước bao gồm: tạo biên dạng hình học, định nghĩa vật liệu, và thiết lập quá trình mô phỏng. Chất lượng mỗi hàn được đánh giá dựa trên kết quả đo kích thước đường kính mỗi hàn. Kết quả mô phỏng mô tả quá trình hình thành và phân bố nhiệt trong vùng hàn. Đường kính mỗi hàn được đo dựa theo phân bố nhiệt độ. Để kiểm chứng kết quả mô phỏng, quá trình hàn hai tấm thép 590 DP dày 1 mm được thiết lập với các bộ thông số xác định. Đường kính mỗi hàn được xác định tại vùng có nhiệt độ vượt ngưỡng nhiệt độ nóng chảy của vật liệu thép 590 DP là 1500°C. Đường kính mỗi hàn được đo dựa trên phân bố nhiệt độ trong vùng hàn tại thời điểm kết thúc thời gian hàn. Giá trị này được so sánh với kết quả thực tế đã được công bố với sai lệch lớn nhất là 1,25%, qua đó đánh giá được khả năng của phần mềm ANSYS trong thực hiện mô phỏng quá trình hàn điểm. Dựa trên kết quả mô phỏng và theo tiêu chuẩn chất lượng của Hiệp hội Hàn Hoa Kỳ (AWS), thông số hàn phù hợp được đề xuất nhằm đảm bảo chất lượng mỗi hàn khi liên kết hai tấm thép 590 DP dày 1 mm. Các kết quả nghiên cứu khẳng định tính khả thi của việc ứng dụng mô phỏng số trong lựa chọn thông số công nghệ phù hợp cho từng loại vật liệu trước khi đưa vào sản xuất thực tế.

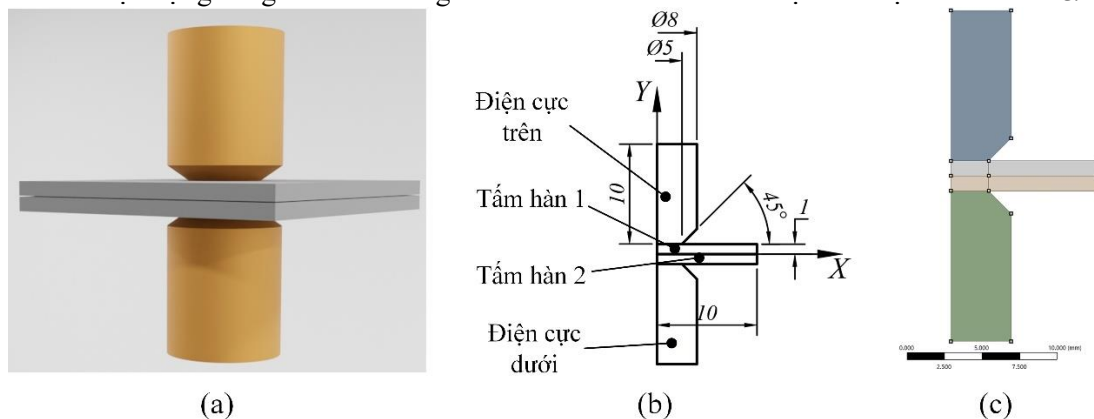
Nội dung còn lại của bài báo được trình bày như sau: phần 2 phương pháp nghiên cứu trình bày quá trình mô phỏng hàn điểm. Phần 3 kết quả và bàn luận đưa ra giá trị của đường kính mỗi hàn xác định dựa trên phân bố nhiệt độ, kết quả đó được xác thực dựa trên so sánh với kết quả thực tế. Cuối cùng, kết luận tính khả thi của phần mềm ANSYS trong quá trình mô phỏng hàn điểm được trình bày ở phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình hàn điểm

Hình 1a chỉ ra mô hình ba chiều (3D) của quá trình hàn điểm. Dễ dàng nhận thấy mô hình có tính đối xứng trục. Để đơn giản và giảm thời gian cho quá trình mô phỏng và tính toán, mô hình

được xây dựng lại dưới dạng hai chiều (2D) đối xứng với các kích thước được thể hiện trên Hình 1b. Kích thước của hai tấm thép hàn là $100\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ với chiều dài hàn chồng lên nhau là 20 mm. Hai điện cực trên dưới giống nhau được làm từ hợp kim đồng có đường kính tiếp xúc 5 mm, chiều dài 10 mm và góc vát 45° . Dựa trên các thông số trên, biên dạng hình học của điện cực và tấm hàn được dựng bằng mô-đun DesignModeler của ANSYS và được thể hiện trên Hình 1c.



Hình 1. Mô hình hàn điểm: (a) 3D, (b) 2D với các kích thước tương ứng, (c) biên dạng hình học của điện cực và tấm hàn dựng bằng phần mềm ANSYS

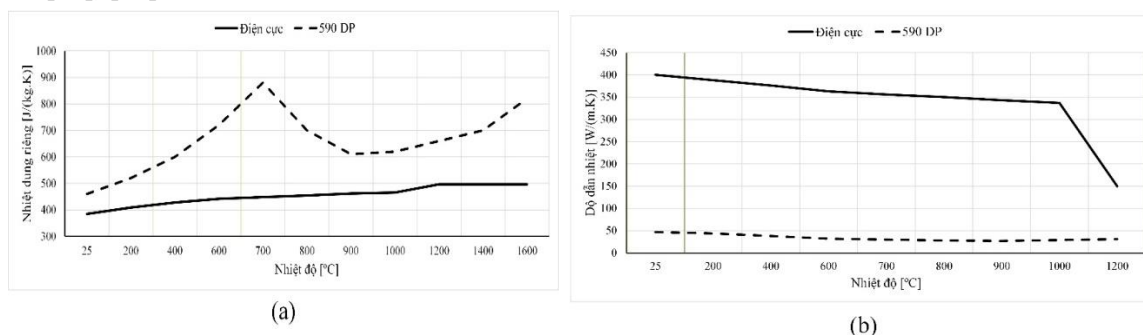
2.2. Định nghĩa vật liệu

Định nghĩa vật liệu là bước quan trọng trong quá trình mô phỏng hàn điểm. Vật liệu được định nghĩa ở đây là vật liệu của điện cực và tấm hàn. Đặc tính của vật liệu sẽ quyết định đến việc lựa chọn các thông số hàn phù hợp cho vật liệu đó. Trong quá trình hàn điểm, đặc tính của vật liệu được định nghĩa là các giá trị phụ thuộc theo nhiệt độ. Trong nghiên cứu này, vật liệu của điện cực là đồng, trong khi vật liệu hàn là thép 590 DP. Bảng 1 mô tả các thành phần hóa học của vật liệu thép 590 DP được tính theo phần trăm khối lượng. Nhiệt độ nóng chảy của thép 590 DP khi đó là 1500°C .

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép 590 DP (% theo khối lượng) [11]

Thành phần	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
% theo khối lượng	0,075	0,26	2,29	0,007	0,003	0,45	0,3	0,006

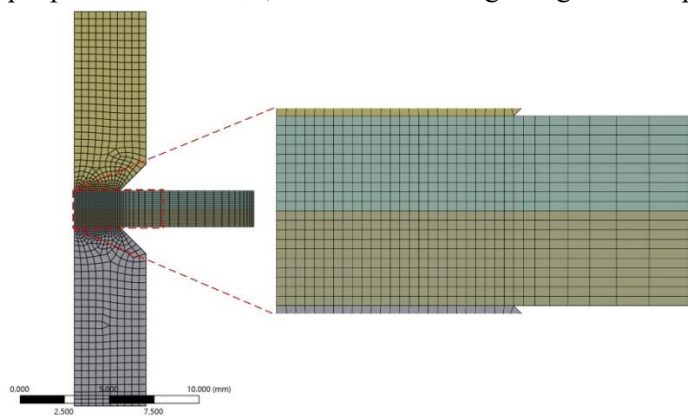
Các thông số của vật liệu được xác định trong quá trình mô phỏng gồm có nhiệt dung riêng và độ dẫn nhiệt. Nhiệt dung riêng là lượng nhiệt độ cần thiết để tăng nhiệt độ của 1 kg vật liệu đó lên 1 độ Kelvin. Độ dẫn nhiệt là khả năng của vật liệu trong việc truyền nhiệt từ nơi có nhiệt độ cao đến nơi có nhiệt độ thấp. Hình 2a trình bày nhiệt dung riêng của vật liệu đồng và thép 590 DP phụ thuộc theo nhiệt độ, trong khi độ dẫn nhiệt của hai vật liệu trên được thể hiện trên Hình 2b [12], [13].



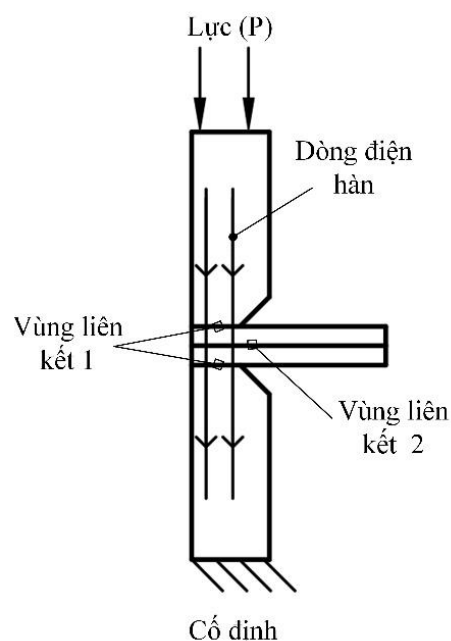
Hình 2. Thông số của vật liệu đồng và thép 590 DP theo nhiệt độ: (a) Nhiệt dung riêng, (b) Độ dẫn nhiệt

2.2. Thiết lập quá trình mô phỏng

Trong quá trình mô phỏng, các bước cơ bản bao gồm chia lưới mô hình, thiết lập điều kiện biên và xác định các thông số hàn. Hình 3 minh họa mô hình 2D của quá trình hàn sau khi được chia lưới. Kích thước phần tử được lựa chọn nhằm cân bằng giữa thời gian tính toán và độ chính xác của kết quả mô phỏng. Ban đầu, mô hình được xây dựng với một số lượng phần tử và nút nhất định để thực hiện mô phỏng sơ bộ; sau đó, mật độ lưới được tăng dần nhằm đánh giá tính hội tụ của nghiệm. Kết quả hội tụ nghiệm của lưới được trình bày ở Hình 6. Sử dụng phương pháp chia lưới tứ diện, mô hình cuối cùng bao gồm 1743 phần tử và 5651 nút.



Hình 3. Chia lưới mô hình 2D



Hình 4. Điều kiện biên sử dụng trong quá trình mô phỏng hàn điểm

Trước khi tiến hành mô phỏng, cài đặt các thuộc tính cho điều kiện biên là một bước quan trọng ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả mô phỏng. Hình 4 mô tả các điều kiện biên áp dụng cho quá trình mô phỏng hàn điểm. Điện cực phía dưới được cố định, trong khi điện cực phía trên được điều khiển chuyển động theo phương thẳng đứng nhằm tạo lực kẹp và ép chặt hai tấm thép hàn. Trong quá trình hàn, lực kẹp tác dụng lên điện cực phía trên có chức năng duy trì sự tiếp xúc tại hai vùng liên kết. Cụ thể, vùng liên kết 1 hình thành tại bề mặt tiếp xúc giữa điện cực và tấm thép, trong khi vùng liên kết 2 được tạo ra tại bề mặt tiếp xúc giữa hai tấm thép hàn. Quá trình hàn được thực hiện tại nhiệt độ phòng nên nhiệt độ môi trường trong mô phỏng là 25°C. Trong phạm vi mô phỏng, bỏ qua độ lệch vị trí giữa hai điện cực.

Các thông số của quá trình tính toán được cài đặt theo thông số hàn, trong đó thời gian mô phỏng bằng thời gian hàn. Điều kiện vùng liên kết được cài đặt thông qua trình soạn thảo thông số thiết kế của ANSYS (APDL – Ansys Parametric Design Language). Bảng 2 trình bày các thông số hàn được sử dụng để kiểm chứng kết quả mô phỏng so với thực tế.

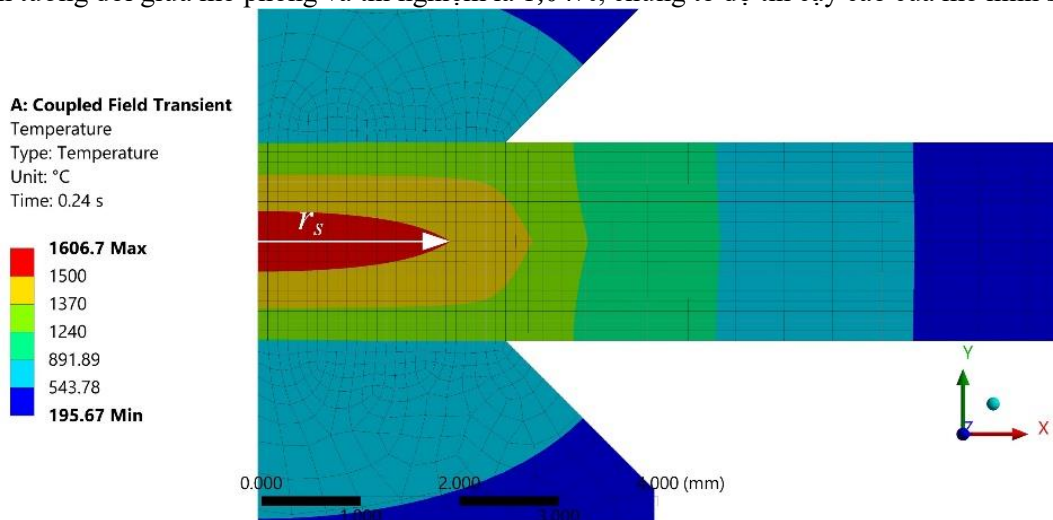
Bảng 2. Thông số hàn [14]

TT	Mô tả	Thông số
1	Dòng điện hàn (A)	5500
2	Thời gian hàn (s)	0,24
3	Lực duy trì (N)	2450

3. Kết quả và bàn luận

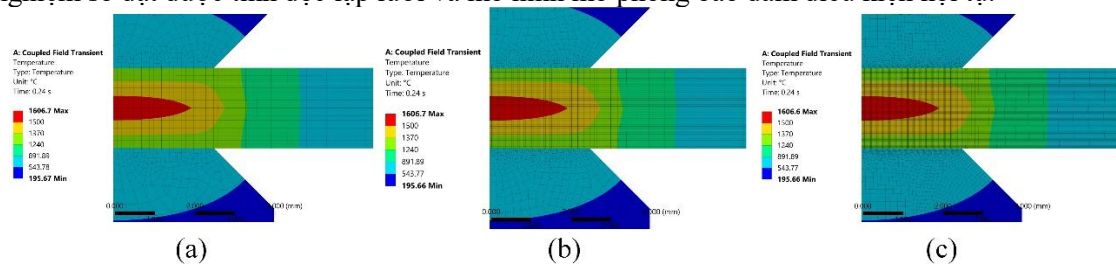
3.1. Kết quả mô phỏng

Hình 5 thể hiện kết quả mô phỏng quá trình hàn điểm hai tấm thép 590 DP dày 1 mm với các thông số hàn trên Bảng 2. Kết quả được biểu diễn thông qua phân bố nhiệt độ tại thời điểm kết thúc chu kỳ hàn ($t = 0,24$ s). Ngưỡng nhiệt độ tại 1500°C được thiết lập để xác định vùng hình thành mỗi hàn. Giá trị đường kính mỗi hàn được xác định bằng hai lần bán kính r_s được đo trong vùng hình thành mỗi hàn do mô hình là hai chiều đối xứng. Từ kết quả trên Hình 5, đường kính mỗi hàn thu được từ mô phỏng là 3,88 mm. So sánh với giá trị thực nghiệm 3,84 mm cho thấy sai lệch tương đối giữa mô phỏng và thí nghiệm là 1,04%, chứng tỏ độ tin cậy cao của mô hình số.



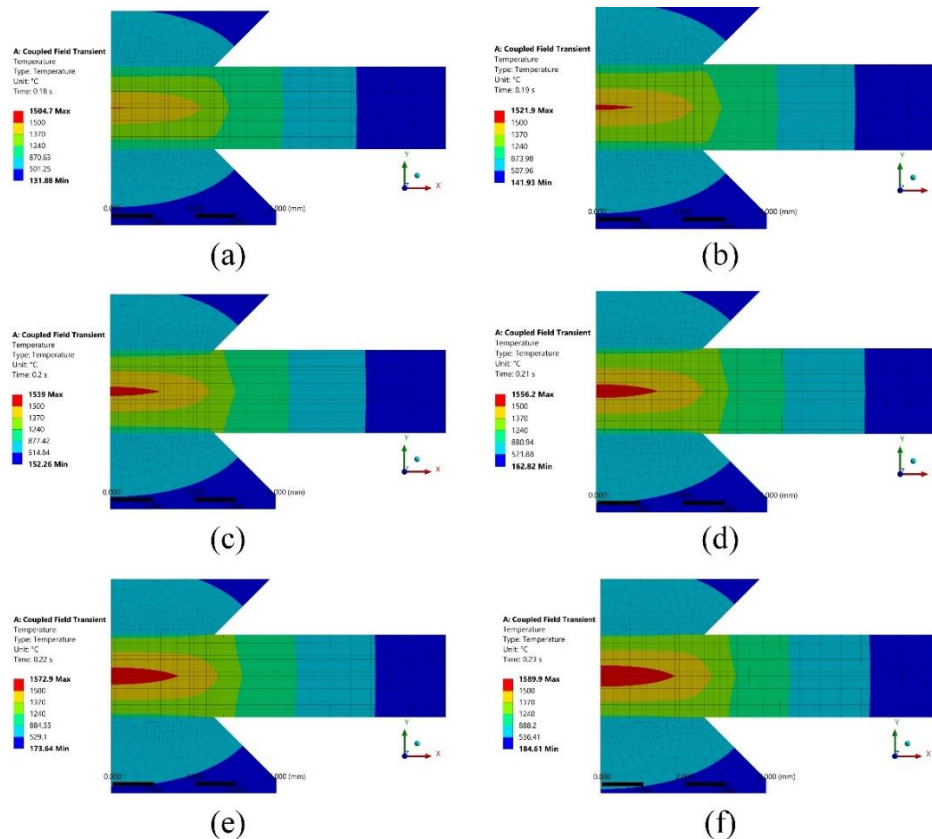
Hình 5. Kết quả mô phỏng quá trình hàn điểm tại thời điểm 0,24 s

Hình 6 trình bày kết quả đánh giá tính hội tụ nghiệm lưới của mô hình số. Cụ thể, Hình 6a thể hiện kết quả mô phỏng tương ứng với mô hình được chia lưới gồm 1743 phần tử và 5651 nút; Hình 6b biểu diễn trường hợp lưới gồm 5660 phần tử và 17732 nút; trong khi Hình 6c minh họa kết quả của mô hình với 19921 phần tử và 61147 nút. Kết quả so sánh cho thấy biên dạng và kích thước mỗi hàn hầu như không thay đổi khi số lượng phần tử lưới tăng lên. Điều này chứng tỏ nghiệm số đạt được tính độc lập lưới và mô hình mô phỏng bảo đảm điều kiện hội tụ.



Hình 6. Kết quả đánh giá tính hội tụ nghiệm của lưới

Để đánh giá được sự hình thành mỗi hàn theo thời gian, Hình 7 thể hiện hình dáng và kích thước của mỗi hàn tại một số thời điểm cụ thể. Mỗi hàn được coi là hình thành tại thời điểm mà nhiệt độ đạt ngưỡng nhiệt độ nóng chảy của thép 590 DP. Dựa trên kết quả có thể thấy đường kính và chiều cao mỗi hàn tăng dần qua các thời điểm 0,18 s, 0,19 s, 0,2 s, 0,21 s, 0,22 s, và 0,23 s tương ứng với các Hình 7a, 7b, 7c, 7d, 7e, và 7f. Xu hướng gia tăng này phù hợp với định luật Joule, theo đó nhiệt lượng sinh ra tỉ lệ với bình phương cường độ dòng điện, điện trở tiếp xúc và thời gian hàn, dẫn đến sự tích lũy nhiệt và mở rộng vùng nóng chảy trong suốt quá trình hàn.



Hình 7. Kết quả mô phỏng quá trình hàn điểm tại một số thời điểm:
(a) 0,18 s, (b) 0,19 s, (c) 0,2 s, (d) 0,21 s, (e) 0,22 s, (f) 0,23 s

3.2. Kiểm chứng kết quả mô phỏng so với thực nghiệm

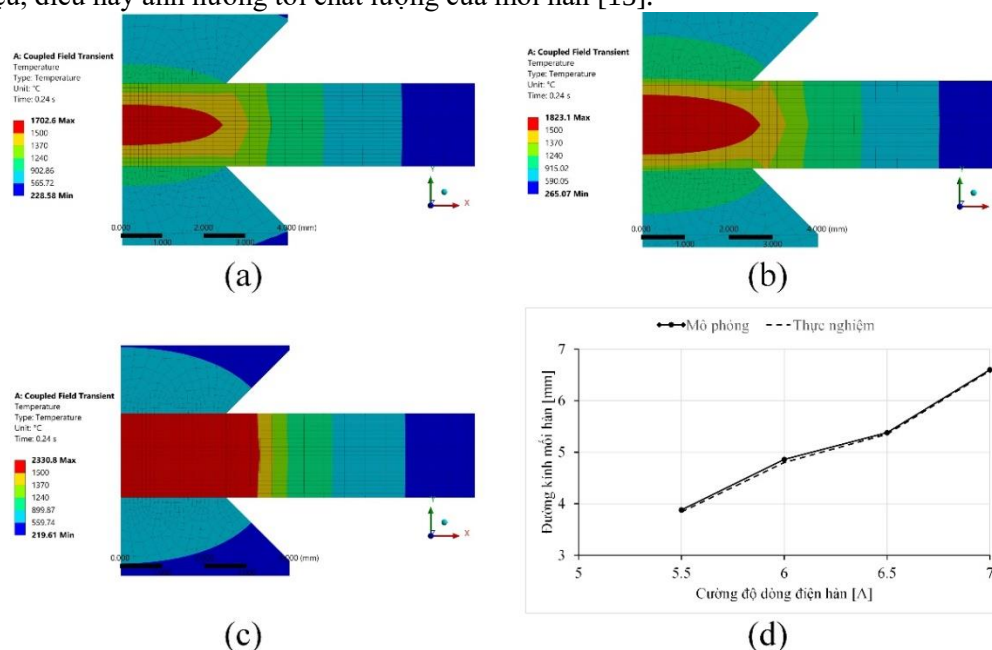
Để đánh giá tính khả thi và độ tin cậy của phương pháp mô phỏng, quá trình tính toán được thực hiện bổ sung với ba mức cường độ dòng điện hàn khác nhau và so sánh với kết quả thực nghiệm thông qua tiêu chí đường kính mỗi hàn thu được. Bảng 3 thể hiện cường độ dòng điện hàn áp dụng cho ba mẫu 2, 3, và 4 tương ứng lần lượt là 6000 A; 6500 A; và 7000 A. Các thông số hàn khác bao gồm thời gian hàn và lực tác dụng lên điện cực hàn được giữ nguyên tương ứng với các giá trị 0,24 s và 2450 N.

Bảng 3. Thông số hàn và kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm của 4 mẫu

Mẫu	Cường độ dòng điện hàn (A)	Kết quả mô phỏng (mm)	Kết quả thực nghiệm (mm) [14]	Sai lệch (%)
1	5500	3,88	3,84	1,04
2	6000	4,86	4,8	1,25
3	6500	5,38	5,35	0,56
4	7000	6,6	6,58	0,3

Hình 8a, 8b, 8c lần lượt thể hiện kết quả mô phỏng của 3 mẫu 2, 3, và 4. Đường kính mỗi hàn được xác định và tổng hợp trong Bảng 3 để phục vụ so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Sai lệch lớn nhất giữa mô phỏng và thực nghiệm ghi nhận là 1,25%, nằm trong giới hạn sai số chấp nhận được [14], qua đó cho thấy độ chính xác cao của mô hình đề xuất. Hình 7d minh họa mối quan hệ giữa đường kính mỗi hàn thu được từ mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả cho thấy đường kính mỗi hàn tăng lên khi cường độ dòng điện tăng, điều này phù hợp với định luật Joule. Tuy nhiên,

khi cường độ dòng điện hàn tới 7000 A thì chiều cao của mỗi hàn bao trùm cả chiều dày của tấm vật liệu, điều này ảnh hưởng tới chất lượng của mỗi hàn [15].



Hình 8. Kết quả mô phỏng: (a) mẫu 2, (b) mẫu 3, (c) mẫu 4, (d) biểu đồ thể hiện đường kính mỗi hàn thu được từ mô phỏng và thực nghiệm

Theo tiêu chuẩn của Hiệp hội Hàn Hoa Kỳ, chất lượng mỗi hàn điểm đạt được khi đường kính mỗi hàn tạo ra lớn hơn hoặc bằng đường kính mỗi hàn nhỏ nhất (d_{min}) đạt được theo công thức (1), trong đó t_v là chiều dày tấm vật liệu hàn [16].

$$d_{min} = 4\sqrt{t_v} \quad (1)$$

Đối với tấm vật liệu hàn dày 1 mm thì đường kính mỗi hàn nhỏ nhất cần đạt được là 4 mm. Dựa trên kết quả mô phỏng và thực nghiệm, thông số hàn phù hợp khi hàn hai tấm thép 590 DP dày 1 mm lần lượt là cường độ dòng điện hàn 6000 A, thời gian hàn 0,24 s, và lực tác dụng lên điện cực hàn 2450 N.

4. Kết luận

Hàn điểm là phương pháp gia công được sử dụng phổ biến trong các ngành công nghiệp. Chất lượng mỗi hàn của từng vật liệu hàn cụ thể phụ thuộc chủ yếu vào các thông số hàn bao gồm cường độ dòng điện hàn, thời gian hàn, và lực tác dụng lên điện cực trong quá trình hàn. Nghiên cứu này trình bày phương pháp mô phỏng và đánh giá chất lượng quá trình hàn điểm sử dụng phần mềm ANSYS. Kết quả mô phỏng được sử dụng để phân tích cơ chế hình thành mỗi hàn thông qua phân bố nhiệt độ trong vùng tiếp xúc. Sự hình thành và phát triển của đường kính mỗi hàn được đánh giá theo các mốc thời gian đặc trưng, phù hợp với định luật Joule về sinh nhiệt do dòng điện. Nghiên cứu tiến hành mô phỏng quá trình hàn điểm đối với thép 590 DP có chiều dày 1 mm dưới các thông số hàn xác định. Đường kính mỗi hàn được xác định trong vùng nhiệt độ đạt ngưỡng nóng chảy của thép 590 DP (1500°C). Kết quả so sánh cho thấy sai lệch lớn nhất giữa mô phỏng và thực nghiệm là 1,25%, qua đó khẳng định độ tin cậy và khả năng ứng dụng của ANSYS trong mô phỏng quá trình hàn điểm. Dựa trên kết quả mô phỏng kết hợp với tiêu chuẩn của Hiệp hội Hàn Hoa Kỳ, thông số hàn phù hợp được đề xuất đảm bảo chất lượng của mỗi hàn. Qua đó chứng minh tiềm năng của công cụ mô phỏng trong việc lựa chọn thông số hàn phù hợp cho từng loại vật liệu trước khi triển khai sản xuất thực tế.

Tuy nhiên, các kết quả thu được vẫn tồn tại một số hạn chế cần được tiếp tục nghiên cứu và hoàn thiện trong các công trình tiếp theo. Thứ nhất, các điều kiện mô phỏng trong nghiên cứu này được thiết lập dưới giả thiết lý tưởng, chưa xem xét đầy đủ các yếu tố thực tế như điều kiện tiếp xúc giữa các bề mặt, cũng như hiện tượng lệch tâm hoặc sai lệch vị trí giữa hai điện cực trong quá trình hàn. Thứ hai là chưa xét đến ảnh hưởng của sự chuyển pha trong quá trình hàn. Thứ ba, mô phỏng mới chỉ được thực hiện đối với một loại vật liệu đơn nhất, do đó tính khả thi và độ tin cậy của mô hình trong trường hợp hàn hai tấm vật liệu khác nhau vẫn chưa được đánh giá đầy đủ.

Lời cảm ơn

Tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Khoa Cơ khí - Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa đã hỗ trợ tác giả thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S.-G. Choi, I. Hwang, Y.-M. Kim, B. Kang, and M. Kang, "Prediction of the weld qualities using surface appearance image in resistance spot welding," *Metals*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/met9080831.
- [2] M. Pouranvari, "Effect of welding current on the mechanical response of resistance spot welds of unequal thickness steel sheets in tensile-shear loading condition," *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 178-189, 2011.
- [3] Z. Hou, I.-S. Kim, Y. Wang, C. Li, and C. Chen, "Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, pp. 160-165, 2007.
- [4] C. Tsai, J. Papritan, D. Dickinson, and O. Jammal, "Modeling of resistance spot weld nugget growth," *Welding Journal (USA)*, vol. 71, no. 2, pp. 47-54, 1992.
- [5] W.-L. Dai, "Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding," In *International Congress & Exposition*, 1991, doi: 10.4271/910191.
- [6] J. A. Khan, L. Xu, Y.-J. Chao, and K. Broach, "Numerical simulation of resistance spot welding process," *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, vol. 37, no. 5, pp. 425-446, 2000.
- [7] W. Zhang, H. Jensen, and N. Bay, "Finite element modeling of spot welding similar and dissimilar metals," *7th International Conference on Computer Technology in Welding*, 1997, pp. 364-373.
- [8] J. Gould, "An examination of nugget development during spot welding, using both experimental and analytical techniques," *Welding Journal*, vol. 66, no. 1, pp. 1-s-10-s, 1987.
- [9] E. Feulvarch, V. Robin, and J. Bergheau, "Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contact conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153, pp. 436-441, 2004.
- [10] B. Chang and Y. Zhou, "Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, no. 1-3, pp. 635-641, 2003.
- [11] S. Pandre, P. Takalkar, N. Kotkunde, S. K. Singh, and A. U. Haq, "Influence of temperatures and strain rates on tensile deformation behaviour of DP 590 steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 2603-2610, 2019.
- [12] K. C. Mills, *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead publishing, 2002.
- [13] Z. Feng, N. Ma, W. Li, K. Narasaki, and F. Lu, "Efficient analysis of welding thermal conduction using the Newton-Raphson method, implicit method, and their combination," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 111, no. 7, pp. 1929-1940, 2020.
- [14] H. Oikawa, G. Murayama, T. Sakiyama, Y. Takahashi, and T. Ishikawa, "Resistance spot weldability of high strength steel (HSS) sheets for automobile," *Shinnittetsu Giho*, vol. 385, pp. 39-45, 2006.
- [15] V. H. Pham, T. H. Vo, D. D. Vu, J. Choi, S. Park, D. T. Nguyen, B.-I. Lee, and J. Oh, "Development of scanning acoustic microscopy system for evaluating the resistance spot welding quality," *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 33, no. 3, pp. 123-137, 2022.
- [16] A. H. Committee and A. I. H. Committee, *Metals Handbook: Properties and selection*, vol. 2, American Society for Metals, 1978.