

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ TRONG QUÁ TRÌNH HÀN SIÊU ÂM HỢP KIM NHÔM AI 6061

## RESEARCH ON THE INFLUENCE OF PARAMETERS IN THE ULTRASONIC WELDING PROCESS OF ALUMINUM ALLOY AI 6061

Đinh Lê Cao Kỳ, Trương Thị Phương Hồng, Lê Phú Vinh, Lê Thế Truyền, Hồ Thị Mỹ Nữ\*

Trường Đại học Công thương Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nuhtm@huit.edu.vn

(Nhận bài / Received: 09/4/2024; Sửa bài / Revised: 24/4/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 29/7/2024)

**Tóm tắt** - Hàn siêu âm đang được sử dụng rộng rãi để hàn các điện cực nhôm dùng trong sản xuất pin lithium-ion cho xe điện vì phương pháp hàn có nhiều ưu điểm. Kiểm soát các thông số của quá trình hàn là yếu tố thiết yếu để nâng cao chất lượng mối hàn. Tuy nhiên, việc mô hình hóa và dự đoán sự thay đổi về ứng suất, biến dạng dẻo và nhiệt độ trong vật liệu hàn lại gặp nhiều khó khăn do tương tác phức tạp giữa các trường cơ và nhiệt xảy ra trong quá trình hàn. Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào trong quá trình hàn lên các kết quả đầu ra của mối hàn siêu âm trên vật liệu nhôm. Kết quả của nghiên cứu cho thấy, tần số dao động đóng vai trò quan trọng trong cả biến thiên nhiệt độ và chiều rộng của vùng ảnh hưởng nhiệt. Tần số cao hơn dẫn đến biến thiên nhiệt độ nhanh hơn và vùng ảnh hưởng nhiệt lớn hơn do chuyển động tương đối của các tấm hàn tăng lên.

**Từ khóa** - Nhôm; Phần tử hữu hạn; Pin Li-Ion; Hàn siêu âm

### 1. Giới thiệu

Nhu cầu ngày càng tăng đối với các nguồn năng lượng xanh và thân thiện với môi trường đang thúc đẩy sự chuyển đổi công nghệ đáng kể trong ngành công nghiệp ô tô lai (hybrid) và ô tô điện [1]. Các phương tiện này đạt được khả năng di chuyển cần thiết bằng cách sử dụng các bộ pin lithium-ion. Bộ pin thường bao gồm nhiều ô pin riêng lẻ, và vật liệu nhôm thường được sử dụng để kết nối chúng do khả năng dẫn điện và dẫn nhiệt tốt của nó. Sử dụng các phương pháp hàn nóng chảy thông thường để kết nối các vật liệu mỏng đặt ra những thách thức do sự xuất hiện của các vùng kim loại giòn ở vị trí tiếp xúc của mối nối. Kết quả là độ bền của mối nối sau khi hàn bị suy giảm đáng kể. Các kỹ thuật hàn ở trạng thái rắn, chẳng hạn như hàn siêu âm (USW), giảm thiểu sinh nhiệt trong quá trình hàn và cho phép tạo các mối nối ở nhiệt độ dưới điểm nóng chảy của vật liệu. Do đó, khả năng hình thành các vùng kim loại giòn giảm đi đáng kể. Với ưu điểm này, ngành công nghiệp ô tô đã sử dụng rộng rãi kỹ thuật hàn siêu âm để kết nối các cực pin.

Trong hàn siêu âm, mối nối tạo liên kết giữa các tấm kim loại được hình thành dưới tác dụng của áp lực kẹp không đối kết hợp đồng thời với rung động có tần số cao. Phương pháp này có ưu điểm là tạo ra các mối hàn mà không cần làm nóng chảy vật liệu. Hơn nữa, nó còn có ưu điểm là sử dụng ít năng lượng và không cần vật liệu hàn bổ sung [2]. Chất lượng của cấu trúc vi mô tại mặt tiếp xúc mối hàn trong USW phụ thuộc

**Abstract** - Thanks to its many advantages, ultrasonic metal welding (UMW) is often used as a popular method for welding aluminium electrodes in the production of lithium-ion battery for electric vehicles. The control of welding process parameters is essential for achieving superior joint quality. However, simulating and investigating the behavior of the weld material and the entire weld production process is a substantial difficulty due to the complex interactions between mechanical and thermal fields occurring during the welding process. The main objective of this research is to determine the essential factors that have a substantial influence on the result of the ultrasonic welding process. The results of this study show that the oscillation frequency plays an important role in both temperature variation and the width of the heat-affected zone. The higher oscillation frequency leads to faster temperature variation and larger heat-affected zone due to increased relative motion of the weld plates.

**Key words** - Aluminium; Finite element model; Li-Ion battery; Ultrasonic welding

vào nhiệt sinh ra và biến dạng dẻo. Vì vậy, việc lựa chọn các thông số quy trình hàn phù hợp có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng mối hàn. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, nhiệt sinh ra do ma sát gây ra biến dạng dẻo mãnh liệt và nóng chảy cục bộ tại vùng tiếp xúc có thể tạo thành các mối hàn giữa các kim loại khác nhau. Để hiểu toàn diện về quá trình hàn siêu âm, cần xem xét quá trình sinh nhiệt, sự phân bố nhiệt độ, và mức độ biến dạng dẻo.

Trong những thập kỷ gần đây, các thực nghiệm đã được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu sâu về quá trình của hàn siêu âm kim loại. Trong nghiên cứu của Watanabe [3] về quá trình hàn siêu âm của tấm thép với tấm hợp kim Al-Mg, nhóm tác giả nhận thấy, cường độ kéo của mối hàn bị giảm dần nếu thời gian hàn và áp lực kẹp tăng. Kong và các cộng sự [4, 5] đã thực hiện hàn siêu âm hai hợp kim nhôm khác nhau là AA 6061 và AA 3003. Nghiên cứu này cho thấy, độ cứng tại vùng tiếp xúc của mối hàn lớn hơn nhiều so với độ cứng của các vùng ở xa mặt phân cách mối hàn. Sự thay đổi về giá trị độ cứng này được cho là do hai yếu tố: tác động của ma sát lên bề mặt tiếp xúc của mối hàn và sự làm mềm bằng sóng âm diễn ra trong vật liệu trong quá trình hàn. Đối với nhôm AA6061, nghiên cứu do Yang và các cộng sự [6] thực hiện cho thấy thời gian của quá trình hàn ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền cắt của mối hàn. Người ta thấy, khi thời gian hàn tăng lên, khả năng chịu tải cắt cũng tăng lên cho đến khi đạt đến một ngưỡng nhất định, sau đó bắt đầu giảm.

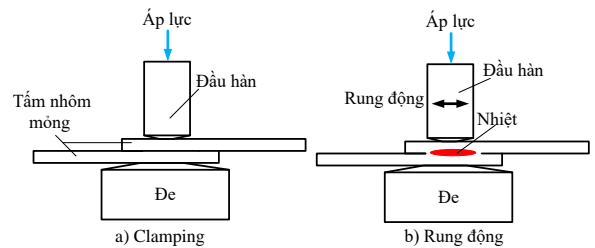
<sup>1</sup> Ho Chi Minh University of Industry and Trade, Vietnam (Dinh Le Cao Ky, Truong Thi Phuong Hong, Le Phu Vinh, Le The Truyen, Ho Thi My Nu)

Zhao [7] đã tiến hành một loạt các thí nghiệm để đánh giá tác động của năng lượng hàn lên các mối hàn siêu âm Al-Cu ở các mức năng lượng siêu âm khác nhau. Khi năng lượng hàn giảm, chỉ có các mối hàn nhỏ xuất hiện ở vùng tiếp xúc mối nối. Elangovan [8] phát hiện ra rằng thời gian hàn siêu âm của đồng có ảnh hưởng lớn đến độ bền của mối nối, trong khi biên độ và áp lực kẹp ít ảnh hưởng hơn. Song song với các nghiên cứu thực nghiệm thì các nghiên cứu mô phỏng về quá trình hàn siêu âm cũng được các nhà nghiên cứu quan tâm. Mô hình hóa và mô phỏng quy trình hàn siêu âm được xem là rất quan trọng để thiết kế và cải thiện quy trình hàn thông qua việc kết nối các tham số quy trình với các đặc tính và chất lượng của mối hàn. Tuy nhiên, việc mô hình hóa quy trình UMW có nhiều thách thức. Khó khăn thứ nhất là mô phỏng các tương tác quan trọng giữa các lĩnh vực cơ, nhiệt và luyện kim. Vật liệu trải qua quá trình biến cứng phi tuyến và bị làm mềm do nhiệt sinh ra do ma sát trong quá trình UMW dưới tác động của tải theo chu kỳ với tần số 20 kHz hoặc cao hơn. Năng lượng của đầu hàn siêu âm được truyền đến hầu hết các chỗ trống trong mạng tinh thể và ranh giới giữa các hạt trong mạng tinh thể [8]. Siddiq và Ghassemieh [9] đã tiến hành phân tích mô hình cơ-nhiệt của quá trình hàn siêu âm các hợp kim nhôm. Mô hình dẻo tuần hoàn được đề xuất, bao gồm các hệ số hồi phục nhiệt và âm, xem xét ảnh hưởng của cả hiệu ứng thể tích và hiệu ứng bề mặt. Elangovan [10] đã tiến hành một loạt các thí nghiệm sử dụng các tấm đồng có độ dày khác nhau. Những phát hiện thu được từ thực nghiệm đã được xác nhận thêm bằng phân tích phần tử hữu hạn (FEA). Ngược lại với mô hình phi tuyến thường thấy trong các phép đo nhiệt độ, nhiệt độ trong hàn siêu âm có mối tương quan tuyến tính với thời gian. Jedrasiak và cộng sự [11] đã tạo ra một mô hình toán học sử dụng phân tích phần tử hữu hạn để mô phỏng quá trình hàn siêu âm. Mô hình này đặc biệt tập trung vào hàn nhôm 6111 với magie AZ31 và thép cacbon thấp DC04. Khó khăn thứ hai liên quan đến việc mô hình hóa động lực học của quá trình hàn siêu âm và ứng xử của vật liệu dưới tải trọng rung động tại tần số cao. Lee [12] đã sử dụng mô hình 2D để thực hiện mô phỏng phần tử hữu hạn của UMW để khảo sát ảnh hưởng yếu của tổ hình học của đầu hàn đến sự phân bố biến dạng dẻo trong các vật liệu hàn. Nghiên cứu của họ đã chứng minh sự xuất hiện của ứng suất, biến dạng dẻo và biến dạng theo hướng nén do rung động. Chen và cộng sự [13] đã tạo ra mô hình phần tử hữu hạn cơ - nhiệt 3D cho các vật liệu khác nhau (nhôm và đồng). Mô hình bao gồm các điều kiện biên làm mềm vật liệu nhưng nó không mô tả rõ ràng sự rung động siêu âm của đầu hàn. Để duy trì khả năng cạnh tranh với các quy trình sản xuất pin khác nhau như hàn laser và hàn điện trở, đồng thời khai thác tối đa lợi ích của hàn siêu âm cho kim loại, nhu cầu am hiểu quá trình hàn là điều cần thiết. Mục đích của nghiên cứu này là khảo sát mức độ ảnh hưởng của các thông số quá trình trong quá trình USW bằng cách sử dụng các phương pháp mô phỏng số. Nghiên cứu này sử dụng phân tích phần tử hữu hạn để mô phỏng quá trình hàn siêu âm các điện cực giữa các tấm nhôm, bao gồm biên độ rung động, tần số rung động và áp lực kẹp với đầu hàn có khóa. Mục tiêu là đánh giá ảnh hưởng của các thông số này đến độ rộng của vùng ảnh hưởng nhiệt, tốc độ biến thiên và phân bố nhiệt độ tại vùng hàn. Độ rộng vùng ảnh hưởng nhiệt càng lớn thì diện tích kết nối của mối hàn càng

rộng và mối hàn càng bền vững. Ngoài ra, nhiều thực nghiệm đã chứng minh rằng nhiệt lượng quá cao tạo nên mối hàn siêu âm thiếu bền vững vì nhiệt độ tăng quá cao sẽ làm mềm các tấm và dưới tác động của lực ép tại đầu hàn thì vùng vật liệu tại liên kết bị mỏng đi, làm yếu mối hàn siêu âm [10, 14-16]. Vì vậy, dự đoán nhiệt độ và phân bố nhiệt tại vùng hàn để tránh hiện tượng nhiệt quá cao là rất cần thiết để thiết lập các thông số của quá trình hàn siêu âm. Kết quả mô phỏng được sử dụng để kiểm tra cơ chế ảnh hưởng của các thông số đầu vào của quá trình đến sự biến thiên và phân bố nhiệt độ tại vùng hàn. Dựa trên kết quả mô phỏng, có thể dự đoán mức độ ảnh hưởng khác nhau của các thông số công nghệ ảnh hưởng đến nhiệt độ cao nhất tại vùng hàn để xây dựng và thiết kế quy trình hàn siêu âm hiệu quả.

## 2. Phân tích cơ nhiệt của hàn siêu âm

Hàn siêu âm tạo mối nối bằng cách sử dụng năng lượng rung động siêu âm tác dụng lên vật liệu hàn. Quy trình này bao gồm tác dụng áp lực kẹp theo hướng vuông góc với bề mặt của phôi. Đồng thời, rung động theo chu kỳ được áp dụng theo hướng song song với mặt tiếp xúc. Kết quả của hai yếu tố này là sinh ra nhiệt do ma sát và nhiệt độ tăng lên tại điểm tiếp xúc. Do đó, quá trình hàn này được xem là quá trình tương tác giữa trường cơ và trường nhiệt. Khái niệm về hàn siêu âm được minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Nguyên lý hàn siêu âm

Quy trình hàn siêu âm bao gồm hai giai đoạn chính: kẹp phôi và tạo rung động có tần số cao. Do đó, phương pháp phần tử hữu hạn có thể sử dụng để mô phỏng quá trình này. Áp lực kẹp tác dụng vuông góc với mặt dưới của đầu hàn siêu âm. Đầu hàn siêu âm có khả năng di chuyển theo chiều dọc, trong khi để được xem là cố định trong suốt quá trình hàn. Rung động làm vật liệu bị ma sát lẫn nhau, dẫn đến nhiệt độ tăng lên tại các bề mặt tiếp xúc. Quá trình sinh nhiệt diễn ra nhanh chóng do hiệu ứng của ma sát là yếu tố chính để vật liệu liên kết với nhau. Bài báo này trình bày một phân tích mô phỏng quá trình hàn siêu âm hợp kim nhôm (AA) 6060/6061. Hợp kim nhôm này thường được sử dụng do sở hữu đặc tính nhiệt ưu việt và đặc tính cơ học tốt, khiến nó có tiềm năng ứng dụng cao. AA 6060/6061 được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp, bao gồm hàng không vũ trụ, hàng hải, ô tô và điện/điện tử, do độ bền tốt, độ bóng bề mặt cao, khả năng hàn và khả năng gia công dễ dàng.

### 2.1. Mô hình số

Khi phân tích quá trình hàn siêu âm thì các quá trình sinh nhiệt, truyền nhiệt phải được xem xét đồng thời, song song với phân tích các đặc tính cơ học như ứng suất, biến dạng... Trong quá trình hàn siêu âm, nhiệt sinh ra do tác dụng của ma sát tại bề mặt tiếp xúc và do sự hình thành và phát triển biến dạng dẻo trong tấm vật liệu. Do đó, cần thiết phải xem quá trình hàn siêu âm là một vấn đề tương tác cơ - nhiệt. Mô

hình phải bao gồm rung động siêu âm của đầu hàn, biến dạng của tâm và sự sinh nhiệt, truyền nhiệt. Nghiên cứu này sử dụng mô hình biến dạng 3D, bao gồm hai bước phân tích: kẹp phôi và rung động siêu âm của đầu hàn. Mô hình để tính toán nhiệt độ được xây dựng dựa trên các yếu tố về nhiệt độ và áp lực kẹp đồng thời xét đến ảnh hưởng của ma sát.

### 2.1.1. Mô hình vật liệu

#### Mô hình dẻo tuần hoàn (Isothermal cyclic plasticity model)

Các chuyển động cơ học của hàn siêu âm bao gồm chuyển động trong mặt phẳng chi tiết hàn lặp đi lặp lại với tần số siêu âm và áp lực kẹp được sử dụng để giữ các phôi lại với nhau. Chaboche [14] đã trình bày tổng quan về mô hình cấu thành phù hợp để đánh giá tính dẻo của kim loại dưới tải trọng lặp đi lặp lại. Giả định cơ bản là tổng tốc độ biến dạng  $\dot{\epsilon}$  có thể bị phân tách thành các thành phần riêng lẻ:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{pl} \quad (1)$$

Các đại lượng  $\dot{\epsilon}^{el}$  và  $\dot{\epsilon}^{pl}$  lần lượt biểu thị các thành phần đàn hồi và dẻo của tốc độ biến dạng chung. Hành vi đàn hồi có thể được biểu diễn bằng mô hình sau:

$$\sigma = D^{el}: e \quad (2)$$

Trong mô hình đàn hồi được trình bày trong công thức (2) thì tenxơ đàn hồi bậc 4 được ký hiệu là  $D^{el}$ , trong khi đó tenxơ ứng suất và biến dạng bậc 2 được biểu thị lần lượt bằng  $\sigma$  và  $e$ . Toán tử ":" biểu thị tích vô hướng, và nó có thể được biểu thị bằng ký hiệu Einstein là  $\mathbf{a}:\mathbf{b} = a_{\alpha\beta}b_{\beta\alpha}$ . Ở đây,  $\mathbf{a}$  và  $\mathbf{b}$  là các tensor, trong khi  $\alpha$  và  $\beta$  là các chỉ số đại diện cho các thành phần của cả hai tensor.

Hành vi dẻo trong quá trình biến dạng được cung cấp bởi biểu thức (3) như sau:

$$d\epsilon^{pl} = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3)$$

Trong đó,  $d\lambda$  là hệ số dẻo thỏa mãn điều kiện nhất quán Kuhn-Tucker sau:

$$F \leq 0; d\lambda \geq 0, d\lambda \cdot F \cong 0 \quad (4)$$

Độ cứng đẳng hướng ( $R$ ) định lượng sự giãn nở của bề mặt chảy dẻo và về mặt lý thuyết được biểu diễn dưới dạng hàm số mũ của biến dạng dẻo tích lũy. Về cơ bản, độ cứng đẳng hướng bị ảnh hưởng bởi biến dạng dẻo trong quá khứ [15]:

$$R = Q \left( 1 - e^{-b\bar{\epsilon}^{pl}} \right) \quad (5)$$

Trong đó,  $Q$  và  $b$  là các tham số vật liệu với  $Q$  là sự thay đổi tối đa về kích thước của bề mặt chảy dẻo và  $b$  là tốc độ mà tại đó kích thước của bề mặt chảy dẻo thay đổi khi biến dạng dẻo thay đổi.

Một mô hình động học biến cứng phi tuyến đã được sử dụng để mô tả chính xác các đặc tính làm cứng phi tuyến và quá trình chuyển đổi lũy tiến từ biến dạng đàn hồi sang biến dạng dẻo. Mô hình động học biến cứng phi tuyến mô tả sự phát triển của ứng suất ngược ( $\alpha$ ) khi nó hình thành và phát triển [16-18]:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} \quad (6)$$

Giá trị của  $\sigma^0 = (\sigma_y + R)$  được xác định bằng cách cộng ứng suất chảy  $\sigma_y$  ở biến dạng dẻo bằng 0 vào tham số  $R$ . Các tham số vật liệu  $C$  và  $\gamma$  có thể được xác định thông

qua thử nghiệm theo số chu kỳ. Tham số  $\gamma$  chi phối tốc độ mà tại đó giá trị bão hòa của quá trình biến cứng động học giảm đi khi biến dạng dẻo tăng lên. Biến  $C$  biểu thị sự dịch chuyển của bề mặt chảy dẻo. Phương trình (6) cung cấp dạng tích phân của định luật phát triển đối với ứng suất ngược trong trường hợp tải trọng một hướng là:

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} \left( 1 - e^{-\gamma \bar{\epsilon}^{pl}} \right) + \alpha_1 e^{-\gamma \bar{\epsilon}^{pl}} \quad (7)$$

Trong đó,  $\alpha_1$  thu được từ chu trình ổn định và được cho bởi:

$$\alpha_1 = \sigma_1 - \sigma^s \quad (8)$$

Ứng suất khi bắt đầu chu kỳ ổn định được ký hiệu là  $\sigma_1$ , trong khi kích thước ổn định của bề mặt chảy dẻo được biểu thị bằng  $\sigma^s$ . Biểu thức cho kích thước ổn định của bề mặt chảy dẻo được cho bởi:

$$\sigma^s = \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_n}{2} \right) \quad (9)$$

với  $\sigma_1$  và  $\sigma_n$  là ứng suất lúc bắt đầu và kết thúc chu trình ổn định. Nguyên lý biến cứng đẳng hướng/động học phi tuyến được đề cập ở trên đòi hỏi phải xác định các tham số ( $Q$ ,  $b$ ,  $C$ ) dựa trên dữ liệu ứng suất-biến dạng theo chu kỳ, dữ liệu làm mềm nhiệt và dữ liệu làm mềm âm thanh (siêu âm). Các thông số vật liệu đẳng nhiệt ( $Q$ ,  $b$ ,  $C$ ,  $\gamma$ ) được nêu trong Bảng 1 [9].

**Bảng 1.** Thông số độ cứng đẳng hướng/động học phi tuyến

$Q$ (MPa)	$b$	$C$ (GPa)	$\gamma$
100	20	15	60

*Mô hình dẻo tuần hoàn có làm mềm nhiệt (Cyclic plasticity model with thermal softening)*

Một số kim loại trải qua quá trình ủ đã cho thấy ảnh hưởng đáng kể của lịch sử biến thiên nhiệt độ trong quá trình xử lý vật liệu [16]. Nghiên cứu này áp dụng mô hình cơ-nhiệt do Johnson và Cook đề xuất [19]. Định luật biến cứng đẳng hướng phi tuyến được biểu thị như sau:

$$R_{\infty} = Q \left( 1 - e^{-p\bar{\epsilon}^{pl}} \right) (1 - T_{\infty}^m) \quad (10)$$

Trong biểu (10), tham số vật liệu được ký hiệu là  $m$  ( $m=1.642081$  đối với nhôm Al 6061) trong khi nhiệt độ không thứ nguyên được biểu thị bằng  $T_{\infty}$  là:

$$T_{\infty} = \frac{(T - T_1)}{(T_m - T_1)} \quad (11)$$

$T_1$  biểu thị nhiệt độ chuyển tiếp mà dưới đó ứng suất chảy không thay đổi theo nhiệt độ, trong khi  $T_m$  tương ứng với nhiệt độ xảy ra sự nóng chảy của vật liệu.

### 2.1.2. Mô hình nhiệt

Trong nghiên cứu này, các tính chất nhiệt học và cơ học của vật liệu được xem xét là các đại lượng thay đổi theo nhiệt độ. Các số liệu thực nghiệm về mối tương quan giữa hệ số nhiệt và nhiệt độ được chuyển thành các phương trình nhằm nâng cao độ chính xác của kết quả mô phỏng. Các mối quan tâm về nhiệt của phôi trong hàn siêu âm cần được quan tâm tỉ mỉ vì lượng nhiệt đáng kể sinh ra từ ma sát giữa phôi. Để giải quyết vấn đề này cần phải giải phương trình truyền nhiệt sau:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-k(T) \nabla T) + S \quad (12)$$

Các ký hiệu  $\rho$ ,  $(T)$  và  $k(T)$  lần lượt biểu thị mật độ, nhiệt dung riêng và độ dẫn nhiệt của vật liệu. Đại lượng "S" trong phương trình (12) biểu thị lượng nhiệt sinh ra theo thể tích, tuy nhiên nó không được xem xét trong nghiên cứu này.

Nguồn tạo nhiệt chính trong quá trình hàn siêu âm là sự tiêu tán nhiệt ma sát do sự cọ xát của các phôi hàn. Vì vậy, để phân tích tính chất nhiệt của phôi trong quá trình hàn, cần sử dụng các mô hình bao gồm cả ma sát và sự tiêu tán nhiệt do ma sát. Nghiên cứu này sử dụng mô hình ma sát Coulomb. Sự tiêu tán nhiệt do ma sát, ký hiệu là  $q^{fr}$ , có thể được xác định khi có chuyển động tương đối giữa hai phôi:

$$q^{fr} = \eta \cdot \mu \cdot s \quad (13)$$

Tham số  $\eta$  biểu thị tỷ lệ tản nhiệt do ma sát, nằm trong khoảng từ 0 đến 1. Ký hiệu  $s$  mô tả tốc độ thay đổi vận tốc trong chuyển động trượt, trong khi  $\mu$  được dùng để biểu thị hệ số ma sát. Tham số  $\eta$  chưa được biết rõ ràng nhưng nó có thể được suy luận từ dữ liệu thực nghiệm. Quá trình hàn siêu âm đòi hỏi phải xem xét yếu tố nhiệt gọi là độ dẫn khe hở, tạo ra sự gián đoạn nhiệt độ giữa hai phôi tiếp xúc với nhau. Thuật ngữ "độ dẫn khe hở", được biểu thị bằng ký hiệu  $\kappa$ , được định nghĩa chính xác là:

$$q^g = \kappa \cdot \Delta T \quad (14)$$

Biến  $q^g$  biểu thị sự truyền nhiệt diễn ra giữa hai bề mặt phôi tiếp xúc, trong khi  $\Delta T$  biểu thị sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt này. Độ dẫn khe hở, như được suy ra từ các thực nghiệm, liên quan đến cấu hình tiếp xúc cụ thể và các bất thường trên bề mặt [20]:

$$G = \frac{k_g}{\kappa \cdot f} \quad (15)$$

Ký hiệu  $k_g$  thể hiện độ dẫn nhiệt của khí nằm giữa hai phôi. Khoảng cách khe hở ký hiệu là  $f$ , bị chi phối bởi các yếu tố như độ nhám bề mặt và áp suất kẹp. Do đó, độ dẫn khe hở có thể được tính toán gần đúng bằng phương trình này, các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy  $G = 1$  khi áp suất khí ở mức khí quyển.

### 2.1.3. Mô hình ma sát

Mô hình ma sát được trình bày trong nghiên cứu này được xây dựng dựa trên mối tương quan giữa hệ số ma sát và nhiều yếu tố khác, bao gồm số chu kỳ  $N$ , nhiệt độ  $T$  và các thông số  $a$  và  $b$ , phụ thuộc vào độ trượt và áp suất tiếp xúc như đã trình bày trong phương trình (16) [21]:

$$\mu_0 = \mu_s + \mu_s(a \cdot \log(N) + b) \quad (16)$$

Hệ số ma sát có mối tương quan tỉ lệ thuận với số chu kỳ dao động, tăng dần cho đến khi đạt đến một ngưỡng nhất định, lúc này nó ổn định và không đổi. Thực nghiệm đã phân tích hành vi ma sát bằng cách sử dụng mối tương quan logarit đơn giản. Các hệ số ma sát, ký hiệu là  $a$  và  $b$ , phụ thuộc vào biên độ trượt và áp suất tiếp xúc. Ngược lại,  $\mu_s$  biểu thị hệ số ma sát tĩnh ban đầu, trong khi  $N$  biểu thị số lượng chu kỳ. Giá trị của các biến  $a$  và  $b$  được xác định bởi các mức áp suất tiếp xúc và biên độ dịch chuyển khác nhau [22]. Zhang và cộng sự [23] kiểm tra mối tương quan giữa nhiệt độ và hệ số ma sát. Bằng chứng thực nghiệm chỉ ra rằng hệ số ma sát có xu hướng tăng khi nhiệt độ tăng cho đến khi đạt đến một ngưỡng nhất định, sau đó hệ số ma sát sẽ giảm. Tác động của nhiệt độ lên hiện tượng này đã được

xem xét bằng cách đưa thêm một đa thức bậc bốn làm hàm số thay đổi theo nhiệt độ như trình bày trong biểu thức sau:

$$\mu = \mu_0 \cdot (p \cdot T^4 + q \cdot T^3 + r \cdot T^2 + s \cdot T + t) \quad (17)$$

Các thông số ma sát bổ sung  $p$ ,  $q$ ,  $r$ ,  $s$ ,  $t$  được xác định bằng kết quả thực nghiệm:  $p = 8,485E-10$ ,  $q = -8,842E-7$ ,  $r = 1,969E-4$ ,  $s = 9,762E-3$ ,  $t = 1,12$  [14]. Bảng 2 và 3 trình bày các tính chất cơ học và nhiệt của nhôm và thép.

**Bảng 2.** Tính chất nhiệt và cơ lý của AA 6060/6061

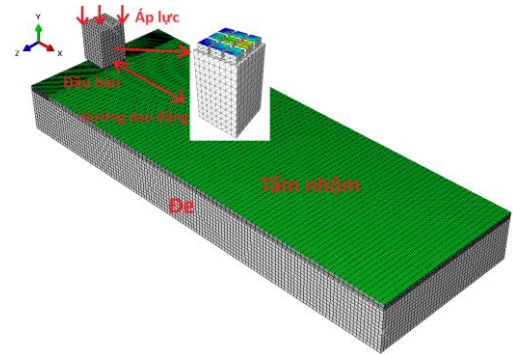
Tính chất nhiệt		Tính chất cơ lý	
Hệ số dẫn nhiệt	235 W/ m.K	Mô-đun đàn hồi	66.24 GPa
Hệ số giãn nở vì nhiệt	23E-6/°C	Hệ số Poisson	0.33
Nhiệt dung riêng	896 J/kg.K	Giới hạn chảy	50 MPa
Khối lượng riêng	2700 kg/m <sup>3</sup>		

**Bảng 3.** Tính chất nhiệt và cơ lý của thép (dành cho đầu hàn và đe)

Tính chất nhiệt		Tính chất cơ lý	
Hệ số dẫn nhiệt	80 W/ m.K	Mô-đun đàn hồi	200 GPa
Hệ số giãn nở vì nhiệt	11E-6/°C	Hệ số Poisson	0.27
Nhiệt dung riêng	440 J/kg K		
Khối lượng riêng	7800 kg/m <sup>3</sup>		

### 3. Mô hình phần tử hữu hạn

Mô hình 3D kết hợp cơ-nhiệt đã được xây dựng bằng phần mềm Abaqus để phân tích quá trình hàn siêu âm xảy ra với kim loại. Việc mô phỏng sẽ cung cấp hiểu biết khoa học về việc thiết kế sản phẩm/quy trình gia công ảnh hưởng như thế nào đến chất lượng mối hàn. Hình 3 minh họa mô hình 3D được xây dựng trong môi trường Abaqus để mô phỏng quá trình hàn siêu âm của hợp kim nhôm Al 6601. Đầu hàn có kích thước 8 x 8 x 12 mm với tạo hình các khía có kích thước 2 mm x 2 mm x 1 mm để đảm bảo độ bám dính với tấm nhôm phía trên. Tấm nhôm có độ dày 0,2 mm.



**Hình 3.** Mô hình phần tử hữu hạn

Điều kiện biên và tải trọng tác dụng khi mô phỏng quá trình kẹp và tạo rung động siêu âm được tóm tắt trong Hình 3 và được giải thích sau:

a) Trong giai đoạn kẹp, được minh họa ở Hình 3, chuyển vị của các nút ở các mặt xung quanh của tấm kim loại bị hạn chế. Cụ thể, các dịch chuyển theo hướng UX và UZ bị giới hạn bằng 0, trong khi dịch chuyển theo hướng UY không bị khống chế để các tấm phôi có thể ép vào nhau dưới tác động của lực ép. Đe được giữ cố định trong suốt quá trình hàn.

b) Áp lực kẹp được thể hiện bằng một hàm phụ thuộc thời gian, tăng dần từ 0 đến độ lớn yêu cầu. Sự thay đổi diễn ra trong khoảng thời gian 2,5 mili giây bằng cách sử



dụng một tính năng từ Abaqus. Mô phỏng với áp lực kẹp có giá trị là 80 MPa hoặc 100 MPa. Áp lực kẹp được chọn để không gây ra biến dạng dẻo quá mức.

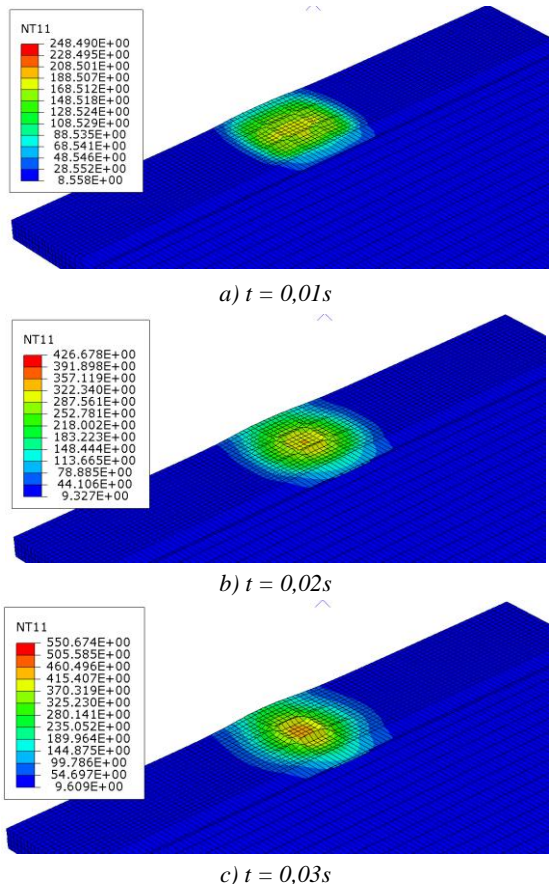
Mô phỏng hàn siêu âm có hai giai đoạn riêng biệt: kẹp và hàn. Quá trình kẹp được mô phỏng ở bước 1, sử dụng các điều kiện được thiết lập trước. Kết quả thu được từ giai đoạn kẹp sau đó được sử dụng làm các tham số ban đầu cho giai đoạn hàn. Khi bắt đầu giai đoạn hàn, điều kiện biên và tải trọng tác dụng có sự thay đổi. Giới hạn dịch chuyển cho các nút của tấm đã được gỡ bỏ. Giới hạn dịch chuyển của đầu hàn theo hướng UX được thay thế bằng điều kiện rung động, được biểu thị bằng  $u(t) = u_0 \cdot \sin(2\pi ft)$ . Phương trình này mô tả chính xác rung động của đầu hàn trong quá trình hàn. Áp lực kẹp ở giai đoạn trước vẫn giữ nguyên trong suốt giai đoạn hàn.

**Bảng 4.** Điều kiện biên và tải trọng

Phần tử	GIAI ĐOẠN 1: ÉP		GIAI ĐOẠN 2: HÀN	
	Tải trọng	Chuyển vị	Tải trọng	Chuyển vị
Tấm trên		UY không bị giới hạn		UX và UY không bị giới hạn
Tấm dưới		UY không bị giới hạn		UX và UY không bị giới hạn
Đầu hàn	Áp lực kẹp	UY không bị giới hạn	Áp lực kẹp	$u = u_0 \sin(2\pi ft)$ , UY không bị giới hạn
Đe		Cố định		Cố định

**4. Kết quả và thảo luận**

**4.1. Phân bố nhiệt độ**



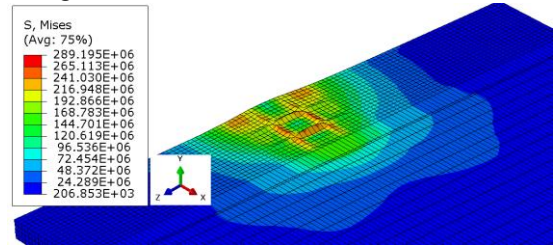
**Hình 4.** Phân bố nhiệt tại 0,01 s, 0,02 s và 0,03 s

Hình 4 minh họa sự phân bố nhiệt độ trong quá trình

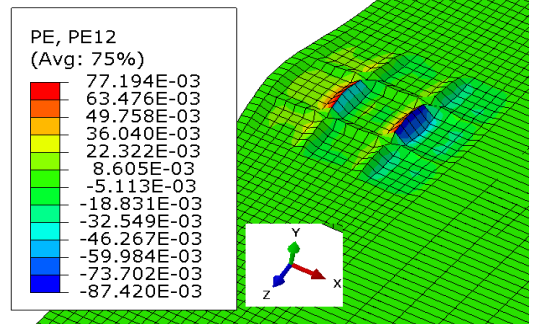
hàn siêu âm với biên độ 20 μm, tần số rung động của biên dạng là 20 kHz và áp lực kẹp là 100 MPa tại các thời điểm 0,01 giây, 0,02 giây và 0,03 giây. Nhiệt độ trong tấm nhôm tăng nhanh, với mức tăng khoảng 180°C xảy ra trong khoảng thời gian khoảng 0,01 giây tại điểm có nhiệt lớn nhất. Quá trình thay đổi nhiệt độ này cho thấy thời gian hàn siêu âm đối với các vật liệu có độ dẫn nhiệt cao, chẳng hạn như nhôm, được diễn ra rất ngắn. Dựa trên các kết quả mô phỏng được minh họa trong Hình 4, có thể thấy, có sự liên hệ trực tiếp giữa sự tăng nhiệt độ và thời gian hàn.

**4.2. Phân bố ứng suất**

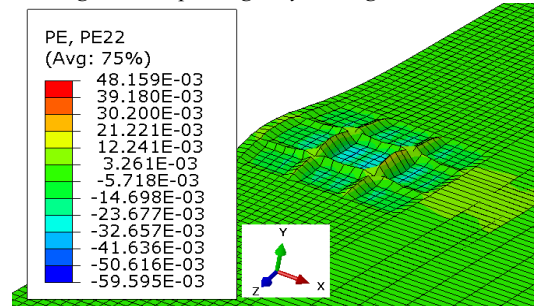
Hình 5 minh họa “ứng suất von Mises” trong vật liệu xảy ra trong quá trình UMW. Các giá trị này được ghi nhận tại thời điểm 0,03 giây. Trong Hình 5, ứng suất đạt cực đại tại vị trí tiếp xúc đầu hàn, vùng này được xem là vùng có biến dạng dẻo lớn nhất.



**Hình 5.** Phân bố “ứng suất von Mises”



a) Biến dạng dẻo theo phương chuyển động của đầu hàn siêu âm



b) Biến dạng dẻo theo phương vuông góc hướng chuyển động của đầu hàn siêu âm

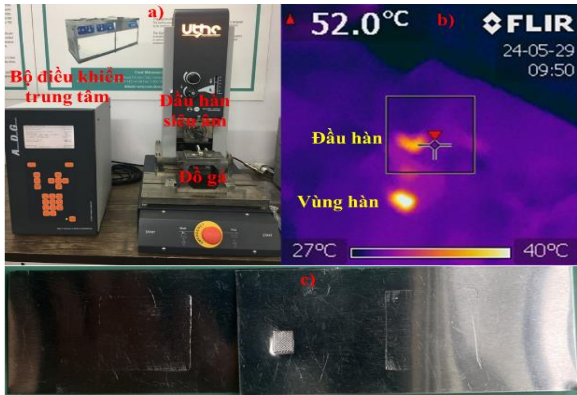
**Hình 6.** Biến dạng dẻo của các tấm nhôm

Hình 6 trình bày các biến dạng dẻo của các tấm sau khi kết thúc quá trình hàn siêu âm theo phương chuyển động và theo phương vuông góc của hướng chuyển động đầu hàn. Kết quả trình bày trong Hình 6a cho thấy, biến dạng dẻo trong hướng dao động của đầu hàn bị nén ở phía của đỉnh nơi có khía của đầu hàn di chuyển trong khi kéo ở phía đối diện. Điều này chỉ ra rằng, trong một chu kỳ dao động, đầu hàn đã nén các tấm nhôm ở một bên và giải phóng nén ở phía bên kia của đỉnh các khía trên đầu hàn. Kết quả trình bày trong Hình 6b cho thấy, vật liệu của các tấm bị kéo căng ở

vùng trống trên đầu hàn, trong khi vùng vật liệu ngay bên dưới các khía của đầu hàn bị nén theo chiều của áp lực kẹp.

**4.3. Kiểm nghiệm mô hình số**

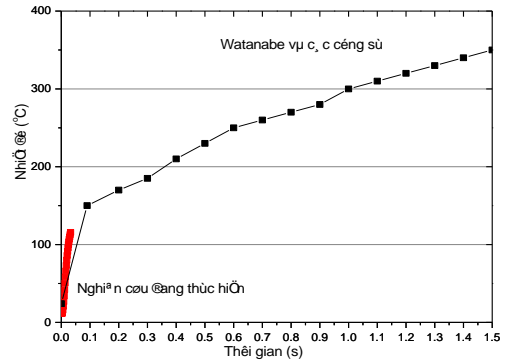
Thực nghiệm hàn siêu âm sử dụng tần số 20 kHz, biên độ 20 μm và áp suất kẹp 100 MPa, tương đương với áp suất 5,5 bar áp dụng lên đầu hàn siêu âm được thực hiện. Thiết bị hàn siêu âm được dùng trong nghiên cứu này được sản xuất bởi công ty UTHE Co. Ltd, Nhật Bản, như được thể hiện trong Hình 7a. Hình 7b hiển thị hình ảnh nhiệt hồng ngoại ghi lại nhiệt độ của vùng hàn sau khi đầu hàn đã trở về vị trí ban đầu. Hình 7c mô tả mẫu đã được hàn thành công. Nhiệt độ đo được trong Hình 7b không phải là chỉ số nhiệt độ cao nhất của vùng hàn trong quá trình hàn siêu âm. Điều này là do quá trình hàn rất ngắn và camera hồng ngoại được sử dụng để giám sát nhiệt độ không đủ nhanh để bắt được nhiệt độ tại thời điểm chính xác nó xảy ra. Vì vậy, hình ảnh nhiệt này chỉ minh họa sự tập trung nhiệt độ trong khu vực hàn trong quá trình hàn siêu âm. Hình 7b cũng cho thấy nhiệt độ tăng cao của đầu hàn. Mẫu hàn đã được hàn thành công như trình bày trong Hình 7c. Độ bền kéo của mỗi hàn được xác định bằng thử nghiệm thực nghiệm, bao gồm việc đánh giá kết quả của ba mẫu hàn. Độ bền kéo trung bình đạt được là 85,45 MPa.



**Hình 7.** a) Máy hàn siêu âm, b) ảnh nhiệt hồng ngoại, c) mẫu hàn

Việc đánh giá tính chính xác trong mô hình số trước khi đi vào phân tích sự biến thiên của nhiệt độ là thật sự cần thiết trong nghiên cứu này. Để đánh giá độ chính xác của mô hình số, kết quả mô phỏng thu được trong nghiên cứu này được so sánh trực tiếp với kết quả thực nghiệm do Wanatabe và các công sự [24] thực hiện. Nghiên cứu [24] cũng liên quan đến ứng dụng hàn siêu âm trên nhôm Al 6061. Đầu hàn được sử dụng trong các thí nghiệm của Wanatabe có kích thước 10 mm x 10 mm, tương tự với kích thước được sử dụng trong nghiên cứu đang thực hiện. Tần số dao động được sử dụng trong các thí nghiệm của Wanatabe là 15 kHz. Nhiệt độ được đo ở rìa của mỗi hàn ở phía mẫu tiếp xúc với đế. Để tối ưu hóa hiệu quả tính toán, mô phỏng được giới hạn trong khoảng thời gian 0,03 giây vì thời gian mô phỏng quá trình hàn siêu âm càng lớn thì thời gian thực hiện chương trình mô phỏng càng dài. Kết quả so sánh được trình bày trong Hình 8. Wanatabe và các công sự đã tiến hành một nghiên cứu trong đó nhiệt độ được giám sát liên tục trong khoảng thời gian 1,5 giây. Kết quả so sánh cho thấy, sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng thu được trong nghiên cứu này và dữ liệu thực nghiệm được trình bày trong tài liệu tham khảo [24]. Trong thí nghiệm được thực hiện trong tài liệu tham khảo [24], tốc độ thay đổi nhiệt độ trong suốt thời gian so sánh 0,03 giây thấp hơn một chút so với các

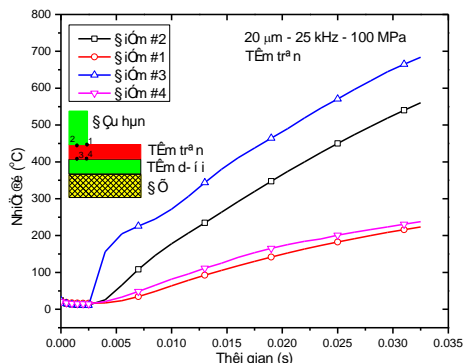
giá trị thu được từ mô phỏng. Sự khác biệt này có thể được giải thích bởi điều kiện biên trong mô phỏng là lý tưởng và tần số dao động thực hiện bởi mô phỏng là 20 kHz cao hơn so với tần số 15 kHz được sử dụng bởi thực nghiệm trong [24]. So sánh kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm đã chứng minh tính chính xác của mô hình mô phỏng được sử dụng trong nghiên cứu này. Vì vậy, mô hình phần tử hữu hạn được sử dụng trong nghiên cứu này có thể được sử dụng để hiểu thêm về quá trình hàn siêu âm.



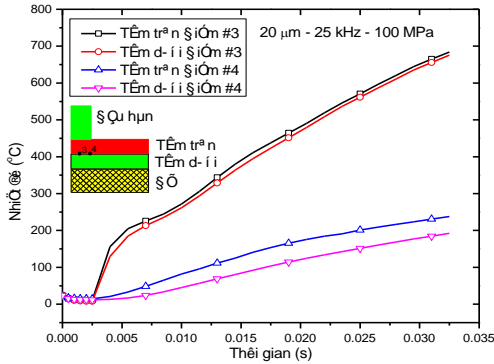
**Hình 8.** So sánh kết quả thực nghiệm [24] và kết quả mô phỏng

**4.4. Phân bố nhiệt độ trong vùng hàn**

Trong phần này, báo cáo nghiên cứu chi tiết vùng hàn để làm cơ sở cho việc thiết kế quy trình hàn siêu âm cho vật liệu nhôm. Các thông số của quá trình hàn siêu âm trong các mô phỏng này là 20 kHz, 20 μm và áp suất kẹp 100 MPa. Hình 9 minh họa giá trị nhiệt độ tại các vị trí 1, 2, 3 và 4, cụ thể là ở vùng tâm trên tiếp xúc với đầu hàn và tâm trên tiếp xúc với tấm dưới. Nhiệt độ tại vị trí 3 đạt cực đại là 516°C. Mặc dù nằm gần điểm trung tâm của đầu hàn, vị trí 2 có nhiệt độ nhỏ hơn, khoảng 426°C. Hiện tượng này có thể do nhiệt độ tăng lên trong vùng hàn làm vật liệu giãn nở, tạo áp lực lên một phần của tấm trên và đảm bảo sự tiếp xúc liên tục giữa tấm trên với đầu hàn. Do đó, dịch chuyển tương đối giữa đầu hàn và tấm trên được đảm bảo ở mức nhỏ nhất có thể. Nguồn nhiệt sinh ra tại vị trí tiếp xúc với đầu hàn ở trên tấm trên là nguồn nhiệt thụ động. Nguồn sinh nhiệt chính xảy ra ở vị trí 3, tương ứng với tiếp xúc giữa tấm trên và dưới. Nguồn nhiệt khuếch tán qua các tấm kim loại và truyền đến các vị trí 2, 4 và 1. Rõ ràng, giá trị nhiệt độ tại các vị trí 1 và 4 gần như nhau, cho thấy nhiệt độ tại các vị trí này bắt nguồn từ nhiệt tại vị trí 3 truyền đến.



**Hình 9.** Biến thiên nhiệt độ tại vị trí 1, 2, 3 và 4 ở tấm trên



Hình 10. Biến thiên nhiệt độ tại vị trí 3 và 4 ở tấm trên và dưới

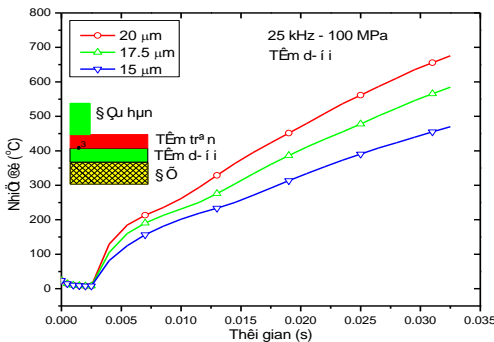
Trong giai đoạn kẹp từ đầu đến 0,025 giây, nhiệt độ hầu như không tăng, nhưng khi bắt đầu giai đoạn hàn siêu âm, nhiệt độ tăng rất nhanh. Nhiệt độ tại vị trí 3 đạt đến nhiệt độ hàn 500°C sau 0,025 giây sau khi bước vào giai đoạn hàn. Nhiệt độ tại vị trí 4 tăng không đáng kể. Do đó, vùng vật liệu đạt đến nhiệt độ hàn để liên kết không phải là toàn bộ vùng tiếp xúc với đầu hàn. Vì vậy, diện tích đầu hàn được khuyến nghị là không quá lớn vì diện tích vùng bị ảnh hưởng nhiệt của vật liệu không chịu ảnh hưởng bởi diện tích này.

Hình 10 minh họa nhiệt độ được ghi lại tại các vị trí 3 và 4 trên cả tấm nhôm trên và dưới. Giá trị được minh họa trong Hình 10 cho thấy, nhiệt độ tại các vị trí cụ thể này khá giống nhau. Điều này có thể được giải thích rằng, thực tế là năng lượng nhiệt truyền đi là như nhau trong các tấm khi hàn siêu âm trên hai vật liệu tương tự.

4.5. Ảnh hưởng của các thông số

4.5.1. Ảnh hưởng của biên độ rung động

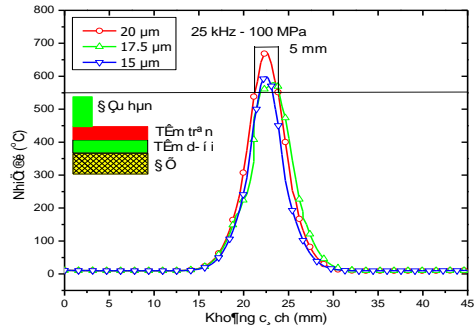
Kết quả từ nghiên cứu chỉ ra rằng ngay cả những thay đổi nhỏ trong biên độ rung động của đầu hàn, thường nằm trong khoảng vài micromet, cũng có ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ và độ bền mối nối đạt được trong quá trình hàn. Độ bền của mối hàn chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi diện tích bề mặt của vật liệu được sử dụng để tạo nên liên kết hàn. Biên độ dao động quyết định mức độ nhiệt do ma sát được tạo ra trong quá trình này, từ đó xác định nhiệt độ đạt được trong vùng hàn.



Hình 11. Ảnh hưởng của biên độ đến nhiệt độ

Hình 11 minh họa kết quả về thay đổi nhiệt độ tại điểm 3 của tấm dưới. Biên độ dao động sử dụng là 15, 17,5 và 20 μm

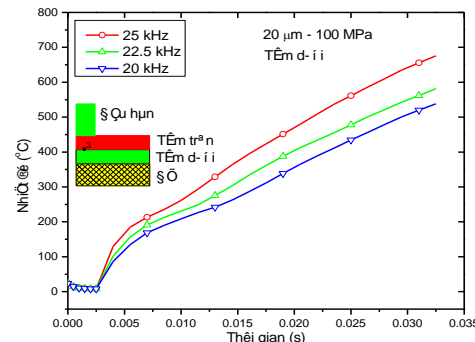
với tần số dao động 25 kHz và áp lực kẹp 100 MPa. Mặc dù sự khác biệt về biên độ chỉ là 2,5 μm, nhiệt độ đạt được trong ba trường hợp này lại rất khác nhau. Khả năng sinh nhiệt lớn hơn với biên độ lớn hơn được nhận thấy trong trường hợp này. Ở cuối giai đoạn hàn, nhiệt độ đạt cực đại khoảng 700°C khi biên độ là 20 μm, cao hơn nhiều so với nhiệt độ 600°C khi biên độ là 17,5 μm và 500°C khi biên độ là 15 μm. Khi nhiệt độ tăng lên, cụ thể là lên đến khoảng 700°C, độ bền của vật liệu giảm đi và có thể quan sát thấy vật liệu bị mềm đi rất nhiều với những thay đổi trong cấu trúc vi mô của nó, chẳng hạn như hạt thô hơn. Nhiệt độ kết tinh của nhôm nằm trong khoảng từ 425°C đến 650°C, tùy thuộc vào mức độ biến dạng. Ở biên độ 20 μm, nhiệt độ nhanh chóng đạt đến khoảng này trong khoảng 0,025 s sau khi bắt đầu quá trình hàn. Tuy nhiên, biên độ dao động ít ảnh hưởng đến chiều rộng của vùng ảnh hưởng nhiệt, được minh họa trong Hình 11. Vùng ảnh hưởng nhiệt được định nghĩa là vùng có nhiệt độ xấp xỉ 90 % nhiệt độ nóng chảy [4]. Đối với hợp kim nhôm thì nhiệt độ này là xấp xỉ 550°C. Như được trình bày trong Hình 12, thay đổi biên độ chỉ ảnh hưởng đến khả năng sinh nhiệt và nhiệt độ tối đa, ngược lại có ít ảnh hưởng đến chiều rộng của vùng ảnh hưởng nhiệt.



Hình 12. Ảnh hưởng của biên độ đến độ rộng vùng ảnh hưởng nhiệt

4.5.2. Ảnh hưởng của tần số rung động

Hình 13 minh họa kết quả mô phỏng về sự thay đổi nhiệt độ tại điểm 3 của tấm dưới. Tần số dao động sử dụng lần lượt là 20, 22,5 và 25 kHz. Biên độ dao động là 25 μm và áp lực kẹp là 100 MPa. Kết quả cho thấy, khi tần số dao động tăng lên, khả năng sinh nhiệt cũng tăng tương ứng và làm tăng vùng vật liệu bị ảnh hưởng nhiệt.

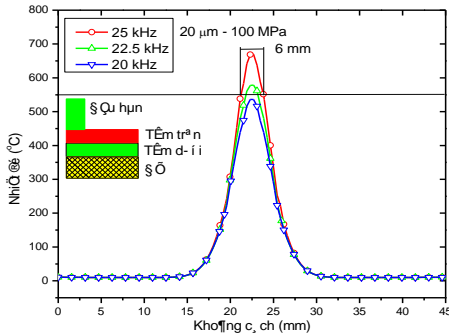


Hình 13. Ảnh hưởng của tần số đến nhiệt độ của điểm 3 ở tấm dưới

Cụ thể, khi tần số dao động tăng lên, có thể quan sát được sự gia tăng kích thước của vùng ảnh hưởng nhiệt như minh



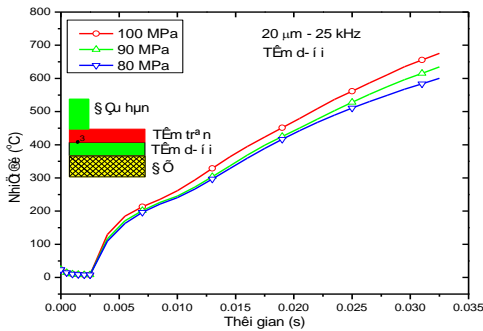
họa trong Hình 14 với đường kính xấp xỉ 6 mm tương ứng với tần số 25 kHz. Kích thước của vùng ảnh hưởng nhiệt mở rộng tỉ lệ thuận với tần số dao động. Điều này xảy ra do mối quan hệ trực tiếp giữa sự gia tăng tần số dao động của đầu hàn và sự gia tăng tương ứng về tốc độ chuyển động của các tấm, vì vậy nó dẫn đến sự mở rộng của vùng ảnh hưởng nhiệt.



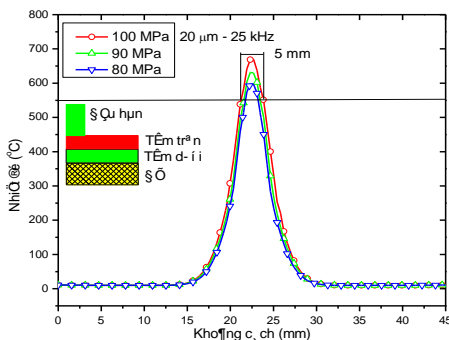
**Hình 14.** Ảnh hưởng của tần số đến độ rộng vùng ảnh hưởng nhiệt

**4.5.3. Ảnh hưởng của áp lực kẹp**

Hình 15 trình bày kết quả mô phỏng nhiệt độ biến thiên theo áp lực kẹp. Từ kết quả mô phỏng minh họa ở Hình 15, khi áp lực kẹp tăng từ 80, 90 lên 100 MPa, biến thiên nhiệt độ đều gần giống nhau ở cả hai trường hợp. Do đó, việc lựa chọn tăng giảm áp lực kẹp sẽ không ảnh hưởng nhiều đến thời gian quá trình hàn siêu âm. Với cùng biên độ và tần số rung động, áp lực kẹp chỉ làm tăng nhẹ biến thiên nhiệt độ mà không ảnh hưởng đến bề rộng của vùng hàn, như minh họa ở Hình 15.



**Hình 15.** Ảnh hưởng của áp lực kẹp đến nhiệt độ của điểm 3 ở tấm dưới



**Hình 16.** Ảnh hưởng của áp lực kẹp đến độ rộng vùng ảnh hưởng nhiệt

Các kết quả mô phỏng trên đây đã chứng minh rằng, các thông số áp lực kẹp, biên độ và tần số rung động có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình sinh nhiệt và quá trình truyền nhiệt khi hàn siêu âm. Tần số dao động có ảnh hưởng đến cả hai thông số là tốc độ biến thiên nhiệt độ và độ rộng của vùng bị ảnh hưởng nhiệt, trong khi áp lực kẹp ít có ảnh hưởng quá trình biến thiên nhiệt độ.

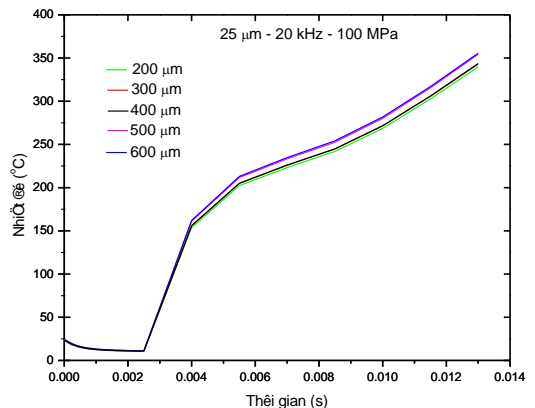
**4.6. Phân tích độ nhạy của lưới**

Kích thước lưới có ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của các kết quả mô phỏng, đặc biệt khi mô hình số liên quan đến biến dạng dẻo. Trong trường hợp hàn siêu âm, tấm trên nằm gần đầu hàn chịu sự tập trung ứng suất đáng kể, dẫn đến bị lõm sâu xuống khi nhiệt độ tăng. Trong nghiên cứu này, kích thước lưới được khảo sát nhằm đánh giá ảnh hưởng của nó đến kết quả mô phỏng. Mô hình số chỉ mô phỏng một giai đoạn 0,01 giây vì nếu thực hiện hết toàn bộ quá trình hàn sẽ tốn rất nhiều thời gian. Kích thước lưới tối thiểu khác nhau từ 200 µm đến 600 µm được khảo sát tương ứng với trường hợp 1 đến 5. Trong các trường hợp này, lưới của đầu hàn và đế được giữ nguyên do hai chi tiết này được xem như là không biến dạng trong suốt quá trình hàn. Nghiên cứu phân tích năm trường hợp với các kích thước lưới tối thiểu khác nhau từ 200 đến 600 µm. Chi tiết về năm trường hợp được thấy trong Bảng 5.

**Bảng 5.** Thời gian chạy mô phỏng khi thực hiện quá trình hàn trong 0,1 s

Trường hợp	1	2	3	4	5
Cỡ lưới nhỏ nhất (µm)	600	500	400	300	200
Thời gian chạy (s) ( $\times 10^4$ )	3.80	4.95	13.3	17.2	35.3

Các kết quả được mô tả trong Hình 17 chỉ ra rằng trường hợp 1 và trường hợp 2, kích thước lưới lớn hơn 400 µm cho thấy nhiệt độ lệch đáng kể so với các trường hợp có các lưới nhỏ hơn. Kết quả của trường hợp 3, với thông số giá trị 400 µm, hiển thị một số điểm không nhất quán trong giai đoạn ban đầu. Tuy nhiên, nhìn chung, các sự biến thiên gần như tương ứng với của trường hợp 4 và trường hợp 5. Theo kết quả nhiệt độ từ các mô phỏng, kích thước lưới tối thiểu là 400 µm là cần thiết để mô phỏng hiệu quả các biến đổi nhiệt, biến đổi cơ học trong tất cả các giai đoạn của quá trình hàn siêu âm.



**Hình 17.** Nhiệt độ tức thời tại điểm giữa tại mặt tiếp xúc của tấm trên và tấm dưới



## 5. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất một phương pháp mô phỏng số 3D cho quá trình hàn siêu âm hợp kim nhôm dùng phần tử hữu hạn. Phương pháp này có thể được xem là lựa chọn hiện đại và hiệu quả nhất hiện nay để mô hình hóa và mô phỏng quá trình hàn siêu âm phức tạp. Đồng thời, nội dung nghiên cứu này cũng cung cấp kiến thức về khoa học và các hướng dẫn về kỹ thuật cho các kỹ sư. Kết quả mô phỏng có thể được dùng để lựa chọn các thông số kỹ thuật và nâng cao hiệu quả của hàn siêu âm trong sản xuất cụm pin. Một số kết luận có thể được tổng kết như sau:

- **Biên độ rung động:** Chủ yếu ảnh hưởng đến biến thiên nhiệt độ, và ít ảnh hưởng đến chiều rộng của vùng hàn. Ngay cả những thay đổi nhỏ về biên độ (vài micromet) cũng có thể làm thay đổi đáng kể biến thiên nhiệt độ.

- **Áp lực kẹp:** Ít ảnh hưởng đến các thông số nhiệt hoặc chiều rộng của vùng hàn. Điều quan trọng là chọn áp lực kẹp đủ lớn để đảm bảo khả năng truyền năng lượng rung động thích hợp từ đầu hàn sang các tấm.

- **Tần số:** Đóng vai trò quan trọng trong cả biến thiên nhiệt độ và chiều rộng của vùng ảnh hưởng nhiệt. Tần số cao hơn dẫn đến biến thiên nhiệt độ nhanh hơn và vùng ảnh hưởng nhiệt lớn hơn do chuyển động tương đối của các tấm tăng lên. Vùng ảnh hưởng nhiệt càng lớn thì diện tích kết nối của mỗi hàn càng cao làm tăng độ bền của mỗi hàn.

Trong tương lai, mô hình mô phỏng 3D có thể được sử dụng để đẩy nhanh quá trình thiết kế quy trình hàn siêu âm và giảm thiểu các yếu tố rủi ro bằng cách tiến hành mô phỏng với các điều kiện biên khác nhau trong các giới hạn cho phép của máy hàn siêu âm. Có thể thiết lập mối tương quan giữa chất lượng mỗi hàn với các yếu tố mô hình bao gồm việc thay đổi của vật liệu trong quá trình hàn, thay đổi biên độ, áp lực kẹp và tần số dao động.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 76/HĐ-DCT ngày 15 tháng 8 năm 2023.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Bansal and K. M. Kockelman, "Forecasting Americans' Long-Term Adoption of Connected and Autonomous Vehicle Technologies", *Transportation Research. Part A, Policy and Practice*, vol. 95, Elsevier BV, pp. 49–63, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.013>.
- [2] G. Harman and J. Albers, "The Ultrasonic Welding Mechanism as Applied to Aluminum-and Gold-Wire Bonding in Microelectronics", *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, vol. 13, no. 4, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 406–412, 1977, <https://doi.org/10.1109/tphp.1977.1135225>.
- [3] T. Watanabe, H. Sakuyama, and A. Yanagisawa, "Ultrasonic Welding between Mild Steel Sheet and Al–Mg Alloy Sheet", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 15–16, Elsevier BV, pp. 5475–5480, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.006>.
- [4] C. Y. Kong, R. C. Soar, and P. M. Dickens, "Characterisation of Aluminium Alloy 6061 for the Ultrasonic Consolidation Process", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 363, no. 1–2, Elsevier BV, Dec. 2003, pp. 99–106.
- [5] C. Y. Kong, R. C. Soar, and P. M. Dickens, "A Model for Weld Strength in Ultrasonically Consolidated Components", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 219, no. 1, SAGE Publications,

- pp. 83–91, 2005, <https://doi.org/10.1243/095440605x8315>.
- [6] Z. Yang and Z. Wang, "Cyclic Deformation and Fracture Behavior of Al Alloy 6061 Under the Action of Positive Mean Stresses", *Metallurgical Transactions A*, vol. 24, no. 9, Springer Science and Business Media LLC, pp. 2083–93, 1993.
- [7] J. Zhao, H. Li, H. Choi, W. Cai, J. A. Abell, and X. Li, "Insertable Thin Film Thermocouples for in Situ Transient Temperature Monitoring in Ultrasonic Metal Welding of Battery Tabs", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 15, no. 1, Elsevier BV, pp. 136–140, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.10.002>.
- [8] S. Elangovan, S. Semeer, and K. Prakashan, "Temperature and Stress Distribution in Ultrasonic Metal Welding - An FEA-Based Study", *Journal of Material Processing Technology*, vol. 209, pp. 1143–1150, 2009.
- [9] A. Siddiq and E. Ghassemieh, "Theoretical and FE Analysis of Ultrasonic Welding of Aluminum Alloy 3003", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 131, no. 4, ASME International, p. 041007, 2009, <https://doi.org/10.1115/1.3160583>.
- [10] S. Elangovan, S. Semeer, and K. Prakashan, "Temperature and Stress Distribution in Ultrasonic Metal Welding-An FEA-Based Study", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 3, Elsevier BV, pp. 1143–1150, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.032>.
- [11] P. Jedrasiak, H. R. Shercliff, Y. C. Chen, L. Wang, P. Prangnell, and J. Robson, "Modeling of the Thermal Field in Dissimilar Alloy Ultrasonic Welding", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 24, no. 2, Springer Science and Business Media LLC, pp. 799–807, 2015, <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1342-8>.
- [12] D. Lee, E. Kannatey-Asibu, and W. Cai, "Ultrasonic Welding Simulations for Multiple Layers of Lithium-Ion Battery Tabs", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, no. 6, ASME International, 2013, <https://doi.org/10.1115/1.4025668>.
- [13] K. K. Chen and Y. S. Zhang, "Numerical Analysis of Temperature Distribution during Ultrasonic Welding Process for Dissimilar Automotive Alloys", *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 20, no. 6, SAGE Publications, pp. 522–531, 2015, <https://doi.org/10.1179/1362171815y.0000000022>.
- [14] J. L. Chaboche, "A Review of Some Plasticity and Viscoplasticity Constitutive Theories", *International Journal of Plasticity*, vol. 24, no. 10, Elsevier BV, pp. 1642–93, Oct. 2008, <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.03.009>.
- [15] J. L. Chaboche, "Viscoplastic constitutive equations for the description of cyclic and anisotropic behaviour of metals", *Acad. Polo. Sci., Sev. Sc. Et. Techn.*, vol. 25, pp. 39–48, 1977.
- [16] N. Ohno and J. D. Wang, "Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery. Part I: Formulation and Features for Ratcheting Behaviour", *Int. J. Plasticity*, vol. 9, pp. 373–390, 1993.
- [17] N. Ohno and J. D. Wang, "Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery. Part II: Application to Experiments of Ratcheting Behaviour", *Int. J. Plasticity*, vol. 9, pp. 391–403, 1993.
- [18] T. S. Srivatsan, S. Sriram, and C. Daniels, "Influence of Temperature on Cyclic Stress Response and Fracture Behavior of Aluminum Alloy 6061", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 56, no. 4, Elsevier BV, pp. 531–50, 1997.
- [19] G. R. Johnson and W. Cook, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, no. 1, Elsevier BV, pp. 31–48, 1985, [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9).
- [20] J. G. Kaufman, "Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures", *ASM, Metals Park, OH 44073-0002, USA*, 1999.
- [21] B. Langenecker, "Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals", *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 13, no. 1, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 1–8, 1966.
- [22] K. Chen and Y. Zhang, "Mechanical Analysis of Ultrasonic Welding Considering Knurl Pattern of Sonotrode Tip", *Materials & Design*, vol. 87, Elsevier BV, pp. 393–404, 2015.
- [23] C.B. Zhang, X.J. Zhu, and L.J. Li, "A Study of Friction Behaviour in Ultrasonic Welding (Consolidation) of Aluminium", *AWS Conference: Session 7: Friction and Resistance Welding/Materials Bonding Processes*, 2006.
- [24] T. Watanabe, H. Itoh, A. Yanagisawa, and M. Hiraishi, "Ultrasonic welding of heat-treatable aluminium alloy A6061 sheet", *Welding International*, vol. 23, no. 9, pp. 633–639, 2009.