

## MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH HÀN MA SÁT QUAY CỦA HỢP KIM TITAN

**Hồ Thị Mỹ Nữ\*, Phạm Văn Toàn,**

**Lý Thanh Hùng, Phan Hoàng Phụng**

*Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP.HCM*

\*Email: nuhtm@cntp.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/02/2018; Ngày chấp nhận đăng: 18/5/2018

### TÓM TẮT

Hợp kim titan (Ti-6Al-4V) là vật liệu nhẹ, có độ bền cao được ứng dụng rộng rãi trong công nghệ hàng không và vũ trụ. Mặt khác, hợp kim titan cũng là loại vật liệu rất quan trọng trong các lĩnh vực công nghệ chế tạo khác như công nghiệp ô tô và thiết bị dùng trong lĩnh vực y khoa. Nhằm mục đích mở rộng phạm vi ứng dụng của hợp kim titan trong các ngành kỹ thuật, các phương pháp hàn hợp kim titan được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, đặc biệt là hàn hợp kim titan với các kim loại khác. Trong số đó, hàn ma sát quay có sức hấp dẫn lớn vì tốn ít năng lượng và cho năng suất cao. 2 chi tiết hợp kim titan hình trụ có thể hàn với nhau nhờ sự sinh nhiệt do ma sát khi một chi tiết được giữ cố định trong khi chi tiết còn lại quay quanh trục đồng thời ép chặt vào chi tiết kia. Quá trình này được xem là hàn ở trạng thái rắn, vì nhiệt độ trong quá trình hàn thấp hơn điểm nóng chảy của vật liệu. Trong quá trình hàn ma sát quay, nhiệt độ, ứng suất, biến dạng thay đổi phụ thuộc các thông số của quá trình, sự hiểu biết mối liên hệ đó sẽ giúp xác định các thông số tối ưu của quá trình và là con đường để nâng cao chất lượng thiết kế và chế tạo các sản phẩm từ hàn ma sát quay. Bài báo này phân tích sự phân bố nhiệt, phân bố ứng suất, biến dạng và ảnh hưởng của các thông số quá trình hàn ma sát quay hợp kim titan bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng dựa trên phần mềm thương mại Abaqus/Standard. Mô phỏng số được xác lập để phân tích quá trình truyền nhiệt trong các chi tiết hàn, sự phân bố ứng suất và biến dạng làm cơ sở xác định thông số tối ưu của quá trình hàn.

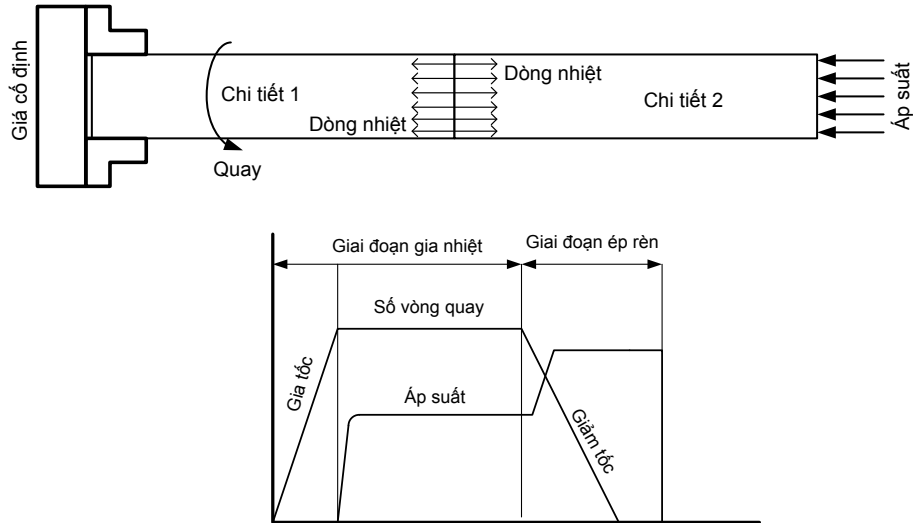
*Từ khóa:* Hàn ma sát quay, hợp kim titan, mô phỏng số, Abaqus/standard, truyền nhiệt.

### 1. GIỚI THIỆU

Titan là vật liệu được sử dụng phổ biến trong nền công nghiệp hàng không, vũ trụ, công nghệ ô tô, công nghiệp hạt nhân và thiết bị dùng trong lĩnh vực y khoa vì có khối lượng riêng thấp và độ bền cao [1]. Tuy nhiên, titan là loại vật liệu có giá thành cao nên khả năng ứng dụng của nó trong các thiết bị công nghiệp khác bị hạn chế. Để mở rộng phạm vi ứng dụng của loại vật liệu này, nhiều phương pháp hàn được nghiên cứu và phát triển để giảm lượng tiêu hao vật liệu do quá trình nóng chảy, hoặc giải pháp khác là hàn vật liệu titan với một vật liệu khác có giá thành thấp hơn để giảm giá thành sản phẩm.

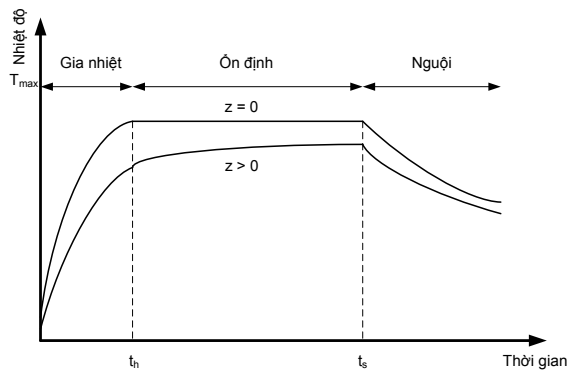
Một phương pháp hàn được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm trong lĩnh vực này là phương pháp hàn ma sát quay. 2 chi tiết hình trụ có thể hàn được với nhau nhờ sự sinh nhiệt do ma sát quay tạo ra bởi lực ép vào bề mặt tiếp xúc của 2 chi tiết như Hình 1. Quá trình hàn ma sát quay có 2 giai đoạn: gia nhiệt và ép rèn. Nhiệt sinh ra trong giai đoạn gia nhiệt làm mềm vật liệu tại mặt tiếp xúc 2 chi tiết. Sau đó, áp suất tăng lên ở giai đoạn ép rèn để hàn 2 chi tiết với nhau.

Như thế, 2 chi tiết được hàn với nhau ở trạng thái rắn mà không xảy ra quá trình nóng chảy vật liệu. Kèm theo hiện tượng ma sát là phần vật liệu bị ép lại và tạo thành hình hạt đặc trung mà kích thước của nó tăng dần trong giai đoạn ép rèn. Bên trong 2 chi tiết hàn xuất hiện vùng liên kim giữa 2 chi tiết và vùng chịu ảnh hưởng nhiệt (Heat affected zone) [2].



Hình 1. Nguyên lý hàn ma sát quay

So với các phương pháp hàn khác thì phương pháp hàn ma sát quay có nhiều ưu điểm, như: không xuất hiện khói và bụi hàn, không cần vật liệu đắp, không cần nguồn nhiệt từ bên ngoài, đặc biệt là tính chất cơ học và tính kim loại tốt làm cho mỗi hàn có độ bền cao nhưng thời gian hàn ngắn, khoảng vài giây [2, 3]. Nhiệt trong quá trình hàn ma sát quay diễn ra theo các giai đoạn như được trình bày như trong Hình 2.



Hình 2. Các giai đoạn nhiệt trong quá trình hàn ma sát quay

Trong giai đoạn gia nhiệt, nhiệt độ tại mặt tiếp xúc ( $z = 0$ ) tăng rất nhanh từ nhiệt độ ban đầu  $T_0$  đến nhiệt độ  $T_{max}$ . Trong giai đoạn ổn định, nhiệt độ tại mặt tiếp xúc đạt đến giá trị  $T_{max}$  và không đổi do sự cân bằng nhiệt động giữa sự sinh nhiệt và sự truyền nhiệt tại mặt tiếp xúc. Giai đoạn làm nguội bắt đầu khi chuyển động quay của chi tiết hàn dừng lại, nhiệt độ giảm dần do không còn nguồn nhiệt cung cấp tại mặt tiếp xúc của 2 chi tiết. Các điểm nằm ngoài mặt tiếp xúc ( $z > 0$ ) thì có nhiệt độ thấp hơn. Tuy nhiên, phương pháp hàn này cũng có những hạn chế nhất định, như: phải đảm bảo tính đồng trục cao giữa 2 chi tiết hàn cũng như khó khăn trong việc tách phần kim loại dẻo bị đẩy ra trong quá trình hàn [3].

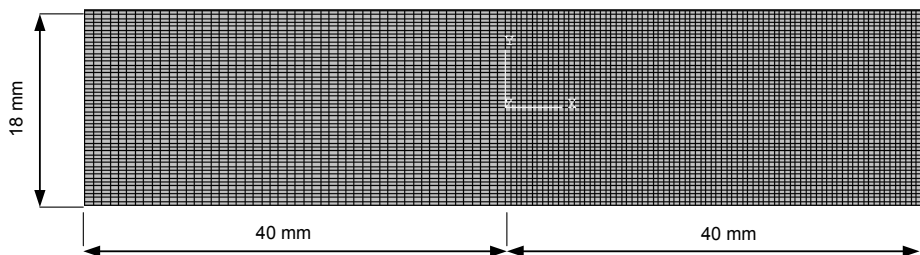
Nhiều công trình về hàn ma sát quay cho các dạng vật liệu khác nhau như: thép ANSI 304, các hợp kim nhôm, các dạng thép các bon, đồng và các vật liệu khác đã được công bố trong nhiều năm qua [2-4]. Nhưng còn khá ít nghiên cứu công bố về quá trình hàn ma sát quay của hợp kim titan đặc biệt về phương pháp hàn ma sát quay [1]. Các nghiên cứu trước đây cho thấy, hợp kim titan có thể hàn theo phương pháp ma sát khuấy, phương pháp ma sát trượt với cấu trúc tinh thể của mối hàn rất tốt [1]. Tuy nhiên, đặc tính phá hủy rất khó dự đoán vì cấu trúc tinh thể trong vùng liên kim là không đồng nhất. Hơn nữa, quá trình gia tăng nhiệt độ trong giai đoạn ma sát và quá trình giảm nhiệt độ trong giai đoạn làm nguội diễn ra phức tạp và có liên quan chặt chẽ đến vấn đề hình thành mối hàn. Điều này rất khó khảo sát từ thực nghiệm vì tính chất cơ nhiệt khá phức tạp, ví dụ như: sự thay đổi tính nhiệt của vật liệu khi nhiệt độ thay đổi cũng như cơ tính của vật liệu bị thay đổi khi biến dạng tăng lên. Tất cả các điều này gây khó khăn trong việc lắp đặt thiết bị đo nhiệt độ trực tiếp trên các chi tiết hàn. Mặt khác, các vật liệu có giá thành cao như titan nên được hạn chế thử nghiệm để giảm chi phí. Như vậy, mô phỏng số bằng các công cụ tính toán hiện đại sẽ giải quyết được những thách thức trong hàn ma sát quay đối với hợp kim titan.

Bài báo này trình bày một phương pháp mô phỏng số cho quá trình hàn ma sát quay bằng mô hình 2D dùng phần mềm thương mại Abaqus/Standard. Mô hình cơ nhiệt được sử dụng trên cơ sở mô hình vật liệu Johnson-Cook. Tính chất nhiệt của vật liệu thay đổi theo nhiệt độ cũng được xem xét trong quá trình mô phỏng. Sự ảnh hưởng của các thông số quá trình hàn lên biến thiên nhiệt độ, độ biến dạng, ứng suất theo phương trục và hướng kính của chi tiết được phân tích, đánh giá.

## 2. PHƯƠNG PHÁP SỐ

### 2.1. Mô hình 2D

Phần mềm mô phỏng số Abaqus/Standard được sử dụng để mô phỏng quá trình truyền nhiệt và biến dạng của các phần tử hàn trong quá trình hàn ma sát quay. Một số kỹ thuật tính toán hiện đại được sử dụng trong mô hình sẽ trình bày trong các phần tiếp theo. Mô hình 2D được sử dụng để tính toán và dự đoán kết quả của quá trình hàn ma sát quay. Mẫu chi tiết hàn có chiều rộng 18 mm và chiều dài 40 mm như được trình bày trong Hình 3. Phần bên trái được cố định trong khi phần bên phải quay quanh trục và ép vào chi tiết bên trái. Mô hình này sử dụng phần tử lưới cơ-nhiệt 4 nút bậc nhất. Số phần tử sử dụng trong mô hình là 104288 phần tử.



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn

### 2.2. Mô hình ma sát và nhiệt

Vấn đề thách thức trong việc mô hình hóa quá trình hàn ma sát quay là sự phân tích và xác định giá trị của hệ số ma sát  $\mu$ . Một số tác giả cho rằng hệ số ma sát là hằng số hoặc hàm số theo bán kính của chi tiết hàn [2, 3]. Nghiên cứu của Ylbaz B.S. *et al.* cho rằng hệ số ma sát tỷ lệ thuận với áp suất tác động lên bề mặt hàn và vận tốc góc [5]. Mặc dù hệ số ma sát thay đổi liên tục trong chu kỳ hàn, từ giá trị  $\mu > 1$  khi bắt đầu quá trình hàn do hiện tượng

trượt khô giữa 2 bề mặt tiếp xúc của 2 chi tiết hàn, sau đó tiến về 0 khi nhiệt độ đạt đến điểm nóng chảy tại bề mặt, nhưng để đơn giản và hoàn toàn phù hợp khi giả định rằng hệ số ma sát trong quá trình hàn ma sát quay là hằng số [4].

Mô hình hóa dòng nhiệt trong quá trình hàn ma sát quay là việc mô tả chính xác nhiệt lượng cung cấp tại các mặt tiếp xúc của các chi tiết hàn. Tổng quan, mô men cần thiết để tạo chuyển động quay cho các chi tiết hàn dưới tác động của áp suất ép dọc trục lên các chi tiết được xác định như sau [3]:

$$M = \int_0^{M_p} dM = \int_0^R \mu P(r) 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3} \mu \pi P(r) R^2 \quad [\text{N.m}] \quad (1)$$

Trong đó:  $M$  là mô-men xoắn,  $\mu$  là hệ số ma sát,  $R$  là bán kính mặt tiếp xúc, và  $P(r)$  là áp suất phân bố trên mặt tiếp xúc. Nếu toàn bộ công sinh ra tại mặt tiếp xúc chuyển toàn bộ sang nhiệt năng ma sát thì công suất nhiệt trên một đơn vị diện tích là [3]:

$$\frac{q_0}{A} = \frac{1}{A} \int_0^{M_r} \mu P v dA = \frac{1}{A} \int_0^R \mu P v_{max} \frac{r}{R} 2\pi r dr = \frac{2}{3} \mu P v_{max} \quad (2)$$

Trong đó:  $q_0$  là công suất nhiệt (W),  $P$  là áp suất (N/mm<sup>2</sup>),  $A$  là diện tích mặt cắt (mm<sup>2</sup>),  $v_{max}$  là vận tốc dài lớn nhất tại điểm ngoài cùng (m/s) và  $\mu$  là hệ số ma sát.

Như vậy, nhiệt lượng sinh ra tại mặt tiếp xúc 2 chi tiết hàn là hàm số theo vận tốc dài và áp lực. Trong bài báo này, hệ số ma sát được chọn là hằng số trong suốt thời gian mô phỏng.

### 2.3. Điều kiện biên

Điều kiện biên của dòng nhiệt có thể được xác định theo công thức (2) và được sử dụng làm nguồn nhiệt cho quá trình hàn ma sát quay.

Đối với điều kiện biên đối lưu, tồn tại một phần nhiệt lượng chuyển từ các chi tiết hàn đến môi trường không khí xung quanh, qua hiện tượng bức xạ và qua các bộ phận tiếp xúc với các chi tiết hàn. 2 thông số đầu tiên là hệ số đối lưu và hệ số bức xạ có thể tìm trong các sổ tay kỹ thuật. Phần mất nhiệt từ các chi tiết hàn sang các bộ phận tiếp xúc với các chi tiết hàn không đáng kể được bỏ qua trong mô phỏng do thời gian hàn ma sát rất ngắn.

Sự tương tác giữa 2 chi tiết được mô hình hóa thông qua kỹ thuật tiếp xúc giữa mặt phẳng và mặt phẳng trong Abaqus/Standard.

Nhiệt độ ban đầu của các chi tiết được lấy theo nhiệt độ môi trường là 25 °C. Hệ số truyền nhiệt đối lưu giữa các mặt của chi tiết hàn với môi trường xung quanh được chọn 100 W/(m<sup>2</sup> K) [2, 5].

### 2.4. Kỹ thuật lưới thích nghi ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)

Kỹ thuật lưới thích nghi ALE được Abaqus/Standard hỗ trợ và thường được sử dụng trong những bài toán có độ biến dạng do nhiệt lớn. Kỹ thuật này được dùng với mục đích duy trì trạng thái của lưới để nó không bị phá hủy do biến dạng lớn trong quá trình tính toán. Sau số bước tính toán nhất định, các phần tử được chia lưới lại để thích nghi với các thông số mới của mô hình để không bị phá hủy. Quá trình này lặp lại liên tục trong suốt quá trình tính toán cho đến khi mô phỏng kết thúc.

### 2.5. Mô hình vật liệu

Hợp kim titan TC4 (Ti-6Al-4V) được sử dụng để mô phỏng quá trình hàn ma sát quay. Khó khăn trong việc mô phỏng quá trình hàn ma sát quay là tính phi tuyến cao của mô hình vật liệu. Do hiệu ứng ma sát nên nhiệt độ các phần tử tăng cao làm mềm hóa vật liệu cộng với lực ép lớn nên ứng suất và tốc độ biến dạng thay đổi lớn. Việc lựa chọn đúng mô hình số

của vật liệu có tầm quan trọng đến độ chính xác của kết quả mô phỏng. Nghiên cứu này sử dụng mô hình vật liệu Johnson-Cook để mô phỏng quá trình hàn ma sát quay của hợp kim titan TC4. Trong mô hình này, ứng suất dẻo von Mises thay đổi theo nhiệt độ và tốc độ biến dạng như được trình bày trong công thức sau [2]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + (T^*)^m) \quad (3)$$

Trong đó:  $A, B, C, m, n$  là các hằng số vật liệu.  $\varepsilon_p$  là mức độ biến dạng dẻo,  $\dot{\varepsilon}^*$  là tỷ lệ biến dạng dẻo và  $T^*$  là thông số nhiệt độ được xác định như sau:

$$T = \begin{cases} 0 & \text{Khi } T_r < T_m \\ \frac{(T-T_r)}{(T_m-T_r)} & \text{Khi } T_r \leq T \leq T_m \\ 1 & \text{Khi } T > T_m \end{cases} \quad (4)$$

Với  $T_m$  là nhiệt độ nóng chảy của vật liệu,  $T_r$  là nhiệt độ môi trường. Trong mô phỏng này, nhiệt độ nóng chảy của vật liệu hợp kim titan TC4 được chọn để mô phỏng là 1680 °C [1]. Các thông số của mô hình được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Mô hình vật liệu hợp kim titan TC4

Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )	4430
Mô đun đàn hồi (GPa)	114
Hệ số Poisson	0,34
Johnson-Cook model	
A (MPa)	414,8
B (MPa)	394
n	0,47
C	0,035
m	1
Tr (°C)	25
Tm (°C)	1680
$\dot{\varepsilon}$	1

Bảng 2. Hệ số dẫn nhiệt theo nhiệt độ

Hệ số dẫn nhiệt W/(m.K)	Nhiệt độ (°C)
7	100
7,5	200
9	300
10	400
10,5	500
12	600
13,5	700
14	800
15	900
16	1000
17	1100

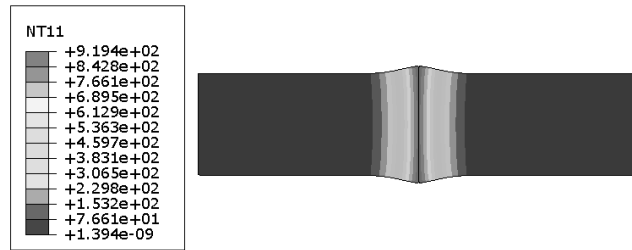
Khi nhiệt độ tăng cao, các đặc tính về nhiệt của vật liệu như: hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng cũng thay đổi theo nhiệt độ. Đối với hợp kim titan TC4, các mối liên hệ này được trình bày trong Bảng 2 và 3.

Bảng 3. Nhiệt dung riêng theo nhiệt độ

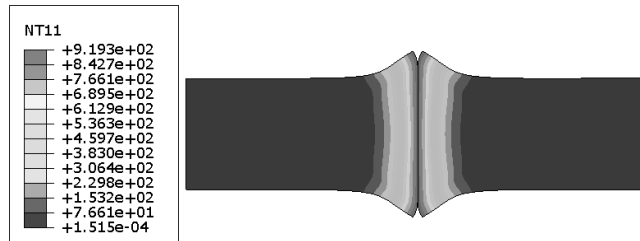
Hệ số dẫn nhiệt W/(m.K)	Nhiệt độ (°C)
610	100
625	200
655	300
690	400
700	500
710	600

## 2.6. Kết quả mô phỏng

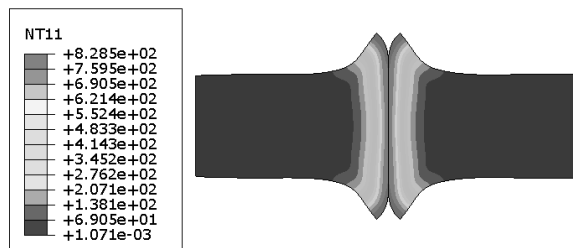
### 2.6.1. Xu hướng biến thiên nhiệt trong quá trình hàn ma sát quay của hợp kim titan TC4



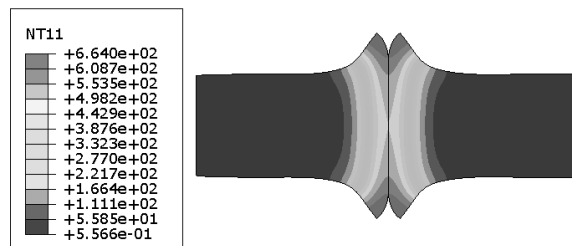
a) Trường biến thiên nhiệt độ khi kết thúc giai đoạn gia nhiệt



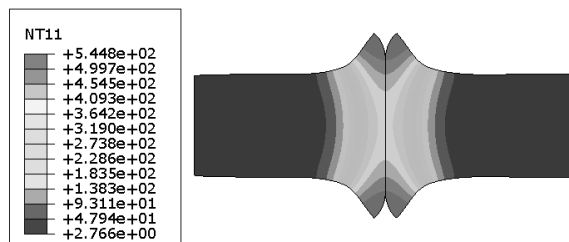
b) Trường biến thiên nhiệt độ sau 0,085 s khi bắt đầu giai đoạn ép rèn



c) Trường biến thiên nhiệt độ sau 0,105 s khi bắt đầu giai đoạn ép rèn



d) Trường biến thiên nhiệt độ sau 1,056 s khi bắt đầu giai đoạn ép rèn

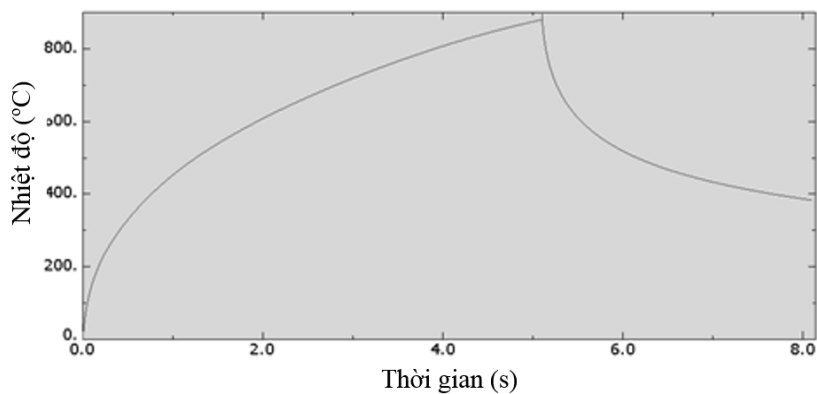


e) Trường biến thiên nhiệt độ sau 3 s khi bắt đầu giai đoạn ép rèn

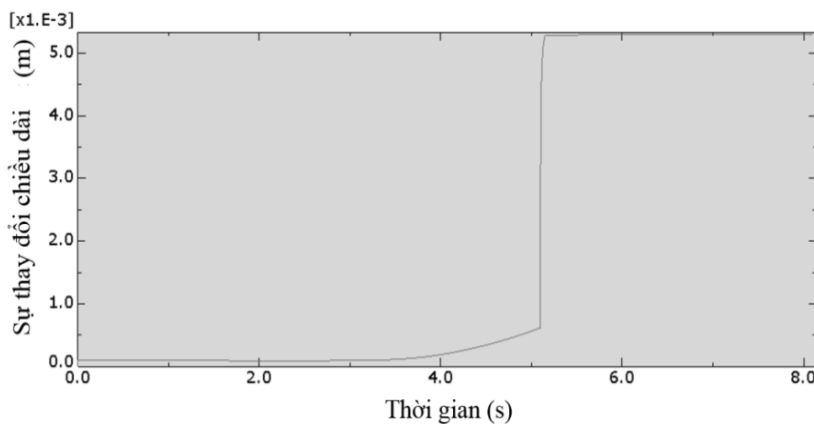
Hình 4. Xu hướng biến thiên nhiệt độ trong quá trình hàn ma sát quay.

Để mô phỏng xu hướng biến thiên nhiệt độ, số vòng quay được chọn là 1450 vòng/phút và áp suất ép trong giai đoạn gia nhiệt là 350 MPa, còn trong giai đoạn ép rèn là 385 MPa. Thời gian giai đoạn gia nhiệt là 5 s và thời gian ép rèn là 3 s. Nhiệt độ nóng chảy của hợp kim titan TC4 là 1680 °C và quá trình hàn có thể xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ nóng chảy. Theo kết quả mô phỏng ở Hình 4a, sau khoảng thời gian ma sát 5 s thì nhiệt độ tại mặt tiếp xúc giữa 2 chi tiết hàn tăng nhanh đến 919,4 °C. Trong giai đoạn ép rèn để hàn 2 chi tiết lại với nhau, biến dạng thay đổi theo thời gian như các Hình 4b, 4c, 4d và 4e. Tại mặt tiếp xúc, sau khi nhiệt độ tăng đến giá trị cực đại thì nhiệt độ giảm dần trong giai đoạn ép rèn, vì lúc này nguồn nhiệt đã mất do không còn ma sát giữa 2 chi tiết. Nhiệt độ giảm do nhiệt lượng truyền từ mặt tiếp xúc đến các vị trí có nhiệt độ thấp hơn và một phần đối lưu với môi trường xung quanh. Lực ép ở giai đoạn ép rèn tăng lên làm phần vật liệu đã mềm hóa tại mặt tiếp xúc của 2 chi tiết bị biến dạng và có xu hướng bị đẩy ra tạo thành hình hạt đặc trưng của quá trình hàn ma sát.

Sau khi quá trình gia nhiệt kết thúc, 2 chi tiết được chuyển sang giai đoạn ép rèn để hàn 2 chi tiết lại với nhau. Sau khoảng thời gian 0,085 s, 0,105 s, 1,056 s và 3 s thì nhiệt độ tại mặt tiếp xúc 2 chi tiết giảm tương ứng là 919,3 °C, 828,5 °C, 664 °C và 544,8 °C.



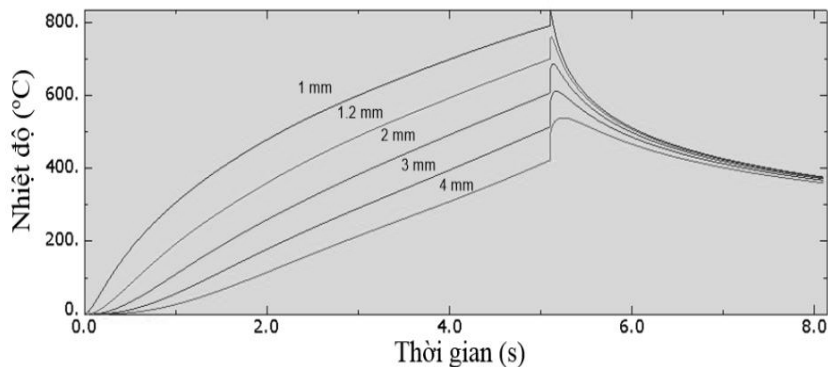
Hình 5. Sự thay đổi nhiệt độ tại mặt tiếp xúc của 2 chi tiết hàn.



Hình 6. Sự thay đổi chiều dài của 2 chi tiết (m) Thời gian (s)

Hình 5 trình bày sự thay đổi nhiệt độ tại mặt tiếp xúc theo thời gian tương ứng với các giai đoạn trong quá trình hàn ma sát quay của hợp kim titan TC4. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi mất nguồn nhiệt do ma sát sinh ra sau khi giai đoạn ma sát kết thúc thì nhiệt độ tại mặt tiếp xúc giảm dần. Trường nhiệt độ trong Hình 4 cho thấy, theo phương hướng kính, nhiệt độ tại các vùng gần tâm chi tiết giảm nhanh hơn so với các vùng xa tâm của chi tiết. Theo phương dọc trục, các điểm nằm ngoài mặt tiếp xúc sẽ đạt đến nhiệt độ cực đại trong

giai đoạn ép rên của quá trình hàn ma sát quay. Kết quả mô phỏng trong Hình 6 chứng minh rằng trong giai đoạn ép rên phần kim loại tại bề mặt tiếp xúc bị biến dạng lớn. Chiều dài của chi tiết bị ngắn lại theo thời gian trong giai đoạn ép rên. Tại thời điểm kết thúc giai đoạn gia nhiệt, chiều dài của các chi tiết hàn giảm đi một lượng rất bé, khoảng 0,72 mm. Nhưng bắt đầu vào giai đoạn ép rên, lực ép tăng lên làm chiều dài giảm đi nhanh. Tại thời điểm 0,109 s thì chiều dài giảm đến 5,25 mm. Sự thay đổi này rất ít cho đến khi kết thúc quá trình hàn, tại thời điểm 3 s thì chiều dài giảm đi một lượng 5,4 mm.



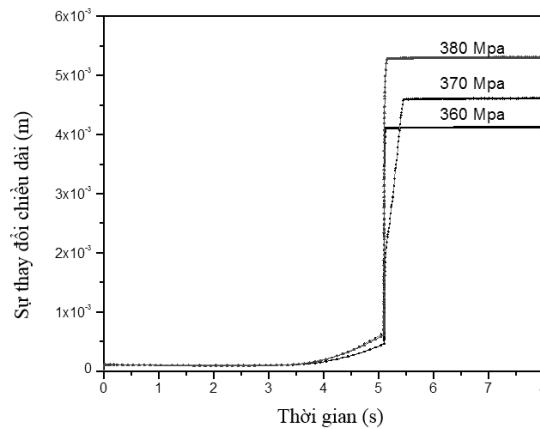
Hình 7. Sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí nằm ngoài mặt tiếp xúc

Hình 7 trình bày sự thay đổi nhiệt độ của các vị trí khác nhau trong chi tiết nằm trên đường tâm cách mặt tiếp xúc lần lượt là 1 mm, 1,2 mm, 2 mm, 3 mm và 4 mm. Các vị trí càng cách xa mặt tiếp xúc thì nhiệt độ càng giảm. Tuy nhiên, tại các vị trí này nhiệt độ cao nhất đạt được sau khi giai đoạn gia nhiệt kết thúc. Tại vị trí 1 mm cách mặt tiếp xúc, nhiệt độ cao nhất đạt đến 821 °C sau thời gian 5,1 s. Tại vị trí 4 mm, nhiệt độ cao nhất đạt đến 510 °C sau thời gian 5,5 s. Nhiệt độ cao nhất tại các vị trí này đạt được trong giai đoạn ép rên của quá trình hàn ma sát quay. Đối với vật liệu hợp kim titan TC4, ngưỡng nhiệt độ mà tại đó cấu trúc vật liệu thay đổi là 635 °C [7]. Như vậy, vùng bị ảnh hưởng nhiệt (HAZ) là khoảng chiều dài 2 mm tính từ mặt tiếp xúc hàn. Dựa vào bản đồ nhiệt như Hình 7, vùng bị ảnh hưởng nhiệt hoàn toàn xác định được. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc xác định các thông số tối ưu của quá trình hàn ma sát quay. Trong giai đoạn ép rên, nhiệt độ tại mặt tiếp xúc cũng như các vị trí khác giảm rất nhanh do sự chênh lệch nhiệt độ khá cao tại vị trí mặt tiếp xúc so với vị trí cuối của các chi tiết. Trong khoảng thời gian 3 s, nhiệt độ tại mặt tiếp xúc giảm từ 919,4 °C xuống 544,8 °C, tốc độ giảm khoảng 125 °C/s. Nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trong chi tiết có xu hướng giảm đến cùng một giá trị. Hình 7 cho thấy, sau 3 s từ thời điểm kết thúc quá trình gia nhiệt, nhiệt độ tại các vị trí khác nhau giảm về giá trị 380 °C.

Tốc độ biến thiên nhiệt độ có ảnh hưởng lớn đến cấu trúc tế vi của mối hàn [8]. Xu hướng thay đổi này phụ thuộc vào vận tốc góc và áp lực ép trong giai đoạn gia nhiệt.

### 2.6.2. Ảnh hưởng của áp suất trong giai đoạn ép rên

Để khảo sát ảnh hưởng của áp suất trong giai đoạn ép rên đến kết quả của quá trình hàn ma sát quay, 3 áp suất khác nhau trong giai đoạn ép rên lần lượt là 360 MPa, 370 MPa và 380 MPa được mô phỏng. Khi áp suất ở giai đoạn gia nhiệt và vận tốc quay là như nhau trong cả ba mô phỏng, tương ứng là 350 MPa và 1450 vòng/phút. Kết quả mô phỏng được trình bày như trong Hình 8.

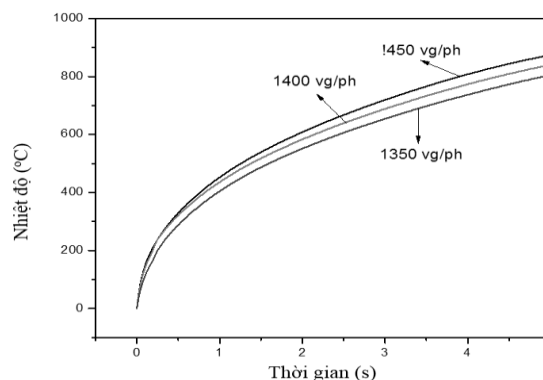


Hình 8. Biến thiên theo chiều dài theo áp suất ép rèn

Kết quả mô phỏng cho thấy, chiều dài của chi tiết hàn thay đổi tỷ lệ thuận với áp suất. Áp suất ép càng lớn thì chiều dài thay đổi càng nhiều và cũng có nghĩa là phần vật liệu nhô ra so với kích thước ban đầu cao hơn. Với áp suất ép là 370 MPa và 360 MPa thì sự thay đổi theo chiều dài của chi tiết tương ứng là 4,5 mm và 4,0 mm. Kết quả mô phỏng này là cơ sở để dự đoán sự thay đổi kích thước của các chi tiết trong quá trình hàn ma sát quay. Sự thay đổi chiều dài nếu quá lớn thì sẽ gây ra hiện tượng lệch trục giữa 2 chi tiết hàn. Chiều dài thay đổi tối ưu khoảng 4 mm hoặc nhỏ hơn [6, 7].

### 2.6.3. Ảnh hưởng của nguồn nhiệt

Nguồn nhiệt ảnh hưởng đến thời gian để đạt đến nhiệt độ hàn trong quá trình hàn ma sát. Nhiệt lượng sinh ra trong quá trình hàn ma sát quay là do quá trình ma sát giữa 2 chi tiết hàn. Nó phụ thuộc vào vận tốc quay hoặc áp suất ép trong giai đoạn gia nhiệt. Để mô phỏng ảnh hưởng của nguồn nhiệt lên thời gian đạt đến nhiệt độ hàn, bài báo này trình bày 3 kết quả mô phỏng với 3 giá trị vận tốc quay khác nhau là 1350 vòng/phút, 1400 vòng/phút và 1450 vòng/phút. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 9.



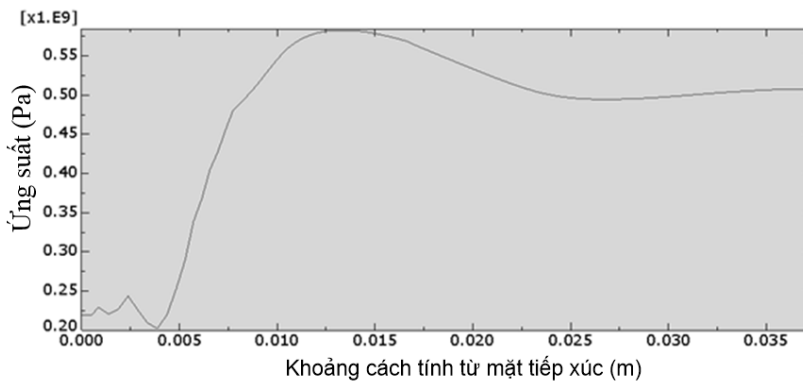
Hình 9. Số vòng quay ảnh hưởng lên tốc độ tăng nhiệt

Kết quả mô phỏng cho thấy tốc độ tăng nhiệt độ tỷ lệ thuận với nguồn nhiệt. Trong các mô phỏng này, áp suất ép được giữ cố định là 350 MPa, số vòng quay lần lượt thay đổi là 1350 vòng/phút, 1400 vòng/phút và 1450 vòng/phút. Sau khoảng thời gian 5 s, nhiệt độ tại mặt tiếp xúc của 2 chi tiết đạt được là 819,2 °C, 839,4 °C và 919,4 °C tương ứng. Đối với

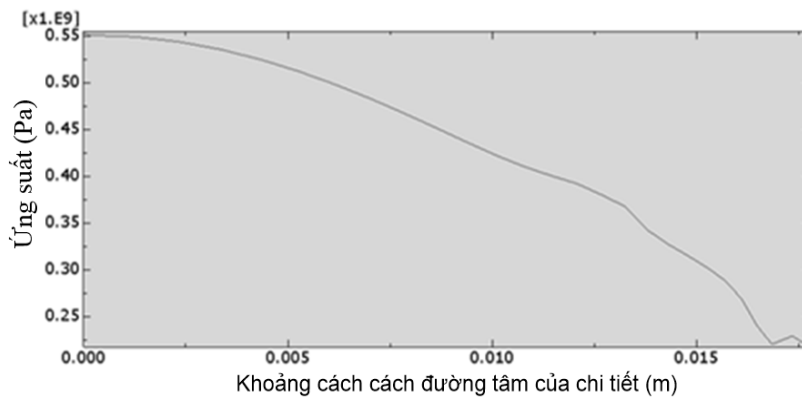
hợp kim titan TC4, nhiệt độ có thể thực hiện quá trình ép rèn của 2 chi tiết là từ 780 °C. Vậy, với áp suất ép là 350 MPa thì số vòng quay cần có là từ 1350 vòng/phút.

#### 2.6.4. Sự phân bố ứng suất

Mô phỏng số có thể được xem là công cụ phù hợp để phân tích sự phân bố ứng suất trong quá trình hàn ma sát vốn rất khó thực hiện bằng thực nghiệm. Mục đích chính của sự phân tích ứng suất là xác định các thông số quá trình sao cho giảm tối đa sự xuất hiện ứng suất. Hình 10 trình bày kết quả mô phỏng của sự phân bố ứng suất theo chiều dài của chi tiết. Các vị trí xa mặt tiếp xúc 2 chi tiết, sự thay đổi nhiệt độ không đủ cao và có thể bỏ qua, do vậy ứng suất xuất hiện gần với ứng suất ở trạng thái nhiệt độ phòng của vật liệu. Các vị trí nằm gần mặt tiếp xúc, do nhiệt độ tăng cao trong quá trình hàn nên mô-đun đàn hồi của vật liệu giảm. Điều đó làm cho ứng suất giảm. Tuy nhiên, các vị trí xa mặt tiếp xúc thì biến dạng đàn hồi dưới tác động của nhiệt bị cản trở do vùng vật liệu nguội xung quanh có nhiệt độ thấp hơn làm cho ứng suất tăng cao.



Hình 10. Phân bố ứng suất theo chiều dài của chi tiết



Hình 11. Phân bố ứng suất theo phương hướng kính của chi tiết

Hình 11 trình bày sự phân bố ứng suất theo phương hướng kính của các chi tiết. Kết quả mô phỏng cho thấy, ứng suất giảm khá nhiều theo phương hướng kính từ tâm cho đến các vị trí xung quanh. Điều này có thể được giải thích là do nhiệt tỷ lệ thuận theo khoảng cách so với đường tâm của chi tiết. Do vậy, nhiệt độ càng tăng cao tại các vị trí càng xa đường tâm. Kết quả là ứng suất sinh ra trong quá trình hàn ma sát quay tại các vị trí cách xa đường tâm càng giảm.

### 3. KẾT LUẬN

Phương pháp số phần tử hữu hạn mô phỏng quá trình hàn ma sát quay cho hợp kim titan TC4 sử dụng phần mềm Abaqus/Standard đã được nghiên cứu. Các thông số của quá trình hàn ảnh hưởng đến quá trình thay đổi nhiệt độ và chiều dài của chi tiết sau khi hàn cũng được phân tích, đánh giá. Kết quả mô phỏng cho thấy, nhiệt độ tại mặt tiếp xúc của 2 chi tiết hàn đạt đến 919,4 °C nếu áp suất ép là 350 MPa và vận tốc quay là 1450 vòng/phút trong khoảng thời gian 5 s. Tại nhiệt độ này, 2 chi tiết hợp kim titan có thể hàn được với nhau nhờ lực ép trong giai đoạn ép rên. Thời gian để đạt được đến nhiệt độ hàn thay đổi phụ thuộc vào các thông số của quá trình như vận tốc quay và lực ép. Các thông số này cũng ảnh hưởng đến giá trị nhiệt độ tại các điểm nằm ngoài mặt tiếp xúc, biết rằng các điểm nằm ngoài mặt tiếp xúc có nhiệt độ thấp hơn. Điều này có ý nghĩa đến sự xác định vùng bị ảnh hưởng nhiệt của chi tiết hàn (HAZ). Đối với hợp kim titan, vùng ảnh hưởng nhiệt tối ưu là khoảng 2 mm. Bản đồ nhiệt bên trong chi tiết trong quá trình hàn ma sát quay hoàn toàn xác định được nhờ phương pháp số.

Nếu lực ép trong giai đoạn ép rên tăng lên thì chiều dài của các chi tiết sau khi hàn càng ngắn đi. Với hợp kim titan TC4 thì áp suất có thể chọn là 360 MPa để chiều dài thay đổi khoảng 2 mm là chấp nhận được. Mô phỏng số có thể được dùng là công cụ dự đoán sự xuất hiện ứng suất trong các chi tiết hàn ma sát quay để làm cơ sở chọn thông số quá trình tối ưu.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Varis A., Frost M. - High frequency linear friction welding of a titanium alloy, *Wear* **217** (1) (1998) 117-131.
2. Daridon L., Oussouaddi O., Ahzi S. - Influence of the material constitutive models on the adiabatic shear band spacing: MTS, power law and Johnson-Cook models, *International Journal of Solids and Structures* **41** (11-12) (2004) 3109-3124.
3. Kotkunde N., Aditya D. Deole, Amit Kumar G., Swadesh Kumar S. - Comparative study of constitutive modeling for Ti-6Al-4V alloy at low strain rates and elevated temperatures, *Materials & Design* **55** (2014) 999-1005.
4. Kimura M. *et al.* - Observation of joining phenomena in friction stage and improving friction welding method, *JSME International Journal, Series A*, **46** (3) (2003) 384-390.
5. Ylbaz B.S. *et al.* - Friction welding of St-Al and Al-Cu materials, *Journal of Materials Processing Technology* **49** (3-4) (1995) 431-443.
6. Nessler C. G., Rutz D. A., Eng R. D., Vozzella P. A. - Friction welding of titanium alloys, *Welding Research supplement* (1971) 287-395.
7. Avinash M., Chaitanya G. V. K., Dhananjay Kumar Giri, Sarala Upadhyya, and Muralidhara B. K. - Microstructure and mechanical behavior of rotary friction welded titanium alloys, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* **1** (11) (2007) 641-643.
8. Sketchley P. D. - Friction welding titanium alloy tubes, TWI Report No. 221190/1/98, Mar. 1998.

**ABSTRACT**

NUMERICAL SIMULATION ON ROTARY FRICTION WELDING  
OF TITANIUM ALLOY

Ho Thi My Nu\*, Pham Van Toan  
Ly Thanh Hung, Phan Hoang Phung  
*Ho Chi Minh City University of Food Industry*  
\*Email: nuhtm@cntp.edu.vn

Titanium alloy (Ti-6Al-4V) is a light and high strength material that is widely used in aerospace and space technologies. On the other hand, titanium alloys place a vital role in other manufacturing technologies, such as automotive and medical devices. To expand the scope of titanium alloys in engineering, methods of welding a titanium alloy are of interest to many, especially titanium alloys with other metals. Rotary friction welding (RFW) is one of the most attractive methods due to low energy consumption and high productivity. RFW is a solid state welding process which produces welds due to the compressive force contact of workpieces which are either rotating or moving relative to one another. The temperature during welding is lower than the melting point of the material. In the process of friction welding, the temperature, stress and strain vary depending on the processing parameters. Understanding the relationship helps to determine the optimum process parameters and is a way to improve the design and manufacture of friction products. In this paper, the heat distribution, stress distribution, deformation, and the effect of the friction welding parameters of a titanium alloy using the finite element are analyzed. The simulation process are carried out with the commercial software Abaqus/Standard to analyze the heat transfer process in welding parts, stress distribution and deformation as a basis for determining the optimum parameters of the welding process.

*Keywords:* Friction welding, titanium alloys, numerical simulations, abaqus/standard, heat transfer.