

## Phân tích và mô phỏng trường nhiệt khi hàn liên kết ống bằng phần mềm Sysweld

Analysis and simulation of temperature field during pipe joint welding using Sysweld software

Ngô Hữu Mạnh<sup>1,\*</sup>, Mạc Văn Giang<sup>1</sup>, Nguyễn Hồng Thanh<sup>2</sup>, Nguyễn Tiến Dương<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sao Đỏ

<sup>2</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định

<sup>3</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: manh.weldtech@gmail.com

Mobile: 0936847980

---

### Tóm tắt

#### Từ khóa:

GMAW, trường nhiệt hàn, liên kết ống, liên kết chữ K, mô phỏng số.

Bài báo nghiên cứu phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô phỏng số trường nhiệt độ khi hàn liên kết ống chữ K với đường kính ống chính là 219 mm và đường kính ống nhánh là 102 mm; chiều dày lần lượt tương ứng là 12,7 mm và 8 mm. Sự biến thiên nhiệt độ tại một điểm (node) trong quá trình nguồn nhiệt di động cũng được khảo sát. Công nghệ hàn sử dụng chế tạo liên kết dạng này đang được sử dụng rộng rãi không riêng gì ở Việt Nam mà trên cả thế giới trong chế tạo kết cấu thép là quá trình hàn điện cực nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ (GMAW). Mô hình hóa và mô phỏng trường nhiệt độ khi hàn liên kết ống chữ K được thực hiện trên cơ sở mô hình Solid (3D) sử dụng gói phần mềm Sysweld của ESI [1]. Đây là công cụ mô phỏng rất hữu ích vì nó có thể giải được các bài toán phức tạp về cơ nhiệt và quá trình luyện kim khi hàn bao gồm cả các bài toán phi tuyến, trạng thái giả ổn định, động học,...

### Abstract

#### Keywords:

GMAW, welding temperature field, piping joint, K pipe joint, numerical simulation.

This paper studies the finite element method (FEM) to simulate the temperature field of K pipe joint welding, with diameter of main pipe being 219 mm and branch pipe being 102 mm; The thickness are respectively 12.7 mm and 8 mm. Temperature variations at a point (node) in the heat source's movement are examined. This welding technology is widely used for steel fabrication not only in Vietnam but also in the world, referred to as gas metal arc welding (GMAW) process. The modeling and simulation of the temperature field when welding K pipe joint was established on the basis of the model Solid (3D), using ESI's Sysweld program [1]. This is an useful simulation tool, as it can solve the complex problems of thermomechanical and metallurgical in welding, including nonlinear problems, pseudo steady state, kinetics,...

---

Ngày nhận bài: 07/07/2018

Ngày nhận bài sửa: 07/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

---

## 1. GIỚI THIỆU

Ngày nay cùng với sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghệ thông tin, các công cụ tính toán và mô phỏng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực trong đó có công nghệ hàn. Việc ứng dụng kỹ thuật mô phỏng cho phép rút ngắn được thời gian nghiên cứu, giảm chi phí thực nghiệm mà vẫn cho phép nhận được kết quả tốt.

Mô phỏng số quá trình hàn là một trong những phương pháp hữu hiệu nhất để có thể dự đoán trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng trong hàn bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Qua nghiên cứu thấy rằng, chu trình nhiệt có ảnh hưởng trực tiếp đến sự ứng xử của kết cấu trong quá trình hàn như cơ tính và tổ chức tế vi. Trong quá trình hàn, vật hàn bị nung nóng cục bộ ở nhiệt độ cao [2]. Theo tính chất lý hóa của kim loại và hợp kim khi nóng sẽ giãn nở và co lại khi được làm nguội. Sự giãn nở này bị hạn chế bởi các vùng có nhiệt độ thấp hơn hoặc bị gá kẹp [3]. Điều này dẫn đến sự xuất hiện ứng suất nhiệt tức thời trong vật hàn và ứng suất dư sau khi vật hàn được làm nguội. Việc xác định trường nhiệt khi hàn đóng vai trò quan trọng trong việc xác định ứng suất dư, biến dạng hàn và tổ chức tế vi của các vùng trong liên kết hàn.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Mô hình nguồn nhiệt

Sự phân bố nhiệt trong vật hàn chính là nhiệt lượng của cột hồ quang hàn, khả năng dẫn nhiệt của kim loại cơ bản, sự tỏa nhiệt ra môi trường và tính nhiệt của vật liệu đó. Với nguồn nhiệt hàn hồ quang, tổng công suất hiệu dụng được xác định theo công thức sau [4]:

$$P = \eta \cdot U_h \cdot I_h \quad (1)$$

Trong đó:

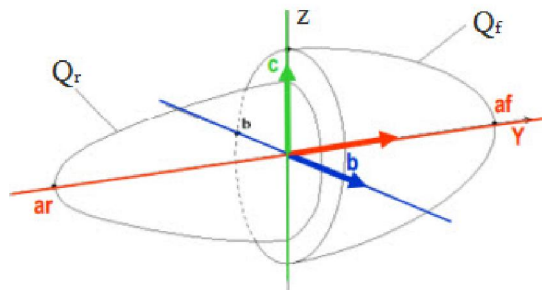
P là công suất nhiệt (W)

$U_h$  là điện áp hồ quang (V)

$I_h$  là cường độ dòng điện hàn (A)

$\eta$  là hiệu suất hồ quang hàn (0,6 ÷ 0,9)

Goldak và cộng sự [5] đã đưa ra mô hình nguồn nhiệt có mật độ phân bố ellipsoid kép được xác định bằng cách phối hợp hai khối bán ellipsoid khác nhau để tạo thành một nguồn nhiệt (Hình 1). Mật độ nhiệt bên trong từng khối bán ellipsoid được mô tả bằng hai phương trình riêng.



Hình 1. Mô hình nguồn nhiệt hàn GMAW [5]

Theo [4, 5], với một điểm bất kỳ (x,y,z) bên trong khối bán ellipsoid đầu tiên (phía trước hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình sau:

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

Với một điểm bất kỳ  $(x, y, z)$  bên trong khối bán ellipsoid thứ hai (phía sau hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình dưới đây.

$$Q_R(x, y, z, t) = Q_r \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_r^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (3)$$

Trong hai phương trình trên,  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$  và  $c$  là các thông số hình học của nguồn nhiệt khối ellipsoid kép;  $Q_R$  là hàm mật độ nguồn nhiệt.

Như vậy có thể thấy rằng nguồn nhiệt khối ellipsoid kép phân bố Gauss này có thể được biểu diễn bởi 5 thông số. Đó là hiệu suất hồ quang  $\eta$  và 4 thông số hình học của nguồn nhiệt  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$  và  $c$ .

Goldak và các cộng sự [5] đã chỉ ra mối tương quan giữa kích thước của nguồn nhiệt và kích thước của bể hàn, đồng thời cho rằng có thể nhận được những giá trị thích hợp cho  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$  và  $c$  bằng cách đo trực tiếp các thông số hình học của bể hàn (Bảng 1).

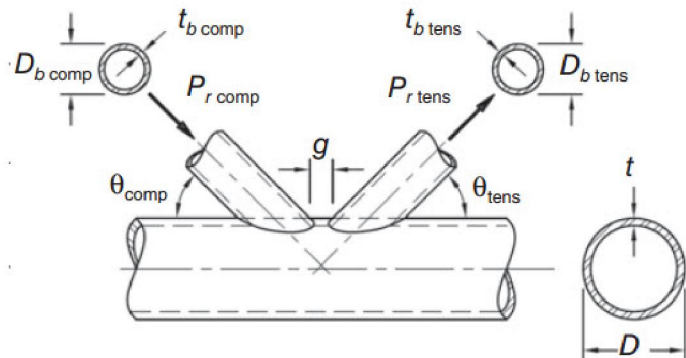
**Bảng 1.** Thông số hình học của nguồn nhiệt

Lớp hàn/đường hàn	b (mm)	c (mm)	$a_f$ (mm)	$a_r$ (mm)
Lớp 1 (1,2)	7	4	3	5
Lớp 2 (3,4)	6	4	3	5
Lớp 2 (5,6)	6	4	3	5

## 2.2. Các thông số của vật liệu

Vật liệu sử dụng trong chế tạo liên kết ống là thép các bon kết cấu và vật liệu sử dụng trong mô phỏng là thép S355J2G3, tương đương với vật liệu để chế tạo kết cấu ống. Thành phần hóa học của thép S355J2G3: C (0,18%), Mn (1,6%), Si (0,55%), S (0,035%), P (0,035%) và có nhiệt độ nóng chảy là 1500°C [6]. Vật liệu S355J2G3 có giới hạn chảy 355MPa, mô đun đàn hồi  $E = 210$  GPa (tại 20°C), hệ số poisson là 0,33. Mô phỏng quá trình hàn, nhóm tác giả nghiên cứu sự biến thiên nhiệt độ từ 20°C đến trạng thái nhiệt độ nóng chảy của vật liệu (1500°C).

Kích thước của liên kết nút chữ K được thiết kế theo tiêu chuẩn của AISC [7]. Các thông số của liên kết ống chữ K được mô tả trong Bảng 2.



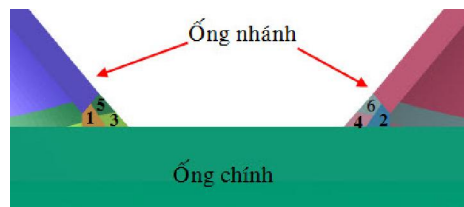
**Hình 2.** Liên kết hàn ống chữ K

**Bảng 2.** Thông số của liên kết ống chữ K

Thông số	Mô tả	Đơn vị	Giá trị
D	Đường kính ngoài ống chính	mm	219
t	Chiều dày ống chính	mm	12,7
$D_{btens}, D_{bcomp}$	Đường kính ống nhánh	mm	102
$t_b$	Chiều dày ống nhánh	mm	6
$\theta$	Góc giữa ống nhánh và chính	°	50
g	Khe hở giữa ống nhánh	mm	50
D/t	Tỷ số đường kính ống chính với chiều dày	-	17,24
$D_b/t_b$	Tỷ số đường kính ống nhánh với chiều dày	-	17
$D_b/D$	Tỷ số đường kính ống nhánh với ống chính	-	0,47

### 2.3. Mô hình hoá và trình tự hàn

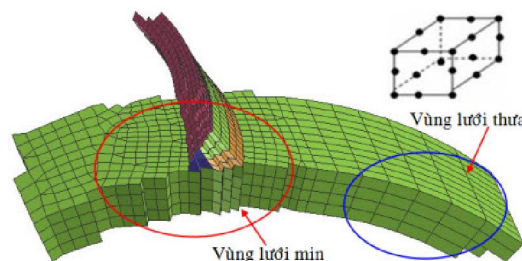
Để mô phỏng chính xác phải mô tả trên mô hình FEM đúng như quá trình hàn diễn ra trong thực tế, bao gồm: Quỹ đạo đường hàn, đường dẫn đầu hàn, điểm bắt đầu và điểm kết thúc đường hàn. Với chiều dày ống nhánh là 8 mm, có vát mép tiến hành hàn 2 lớp với 3 đường hàn như Hình 3.



**Hình 3.** Bố trí các lớp hàn

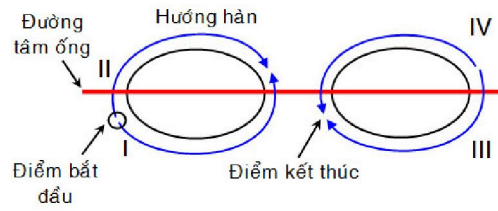
Liên kết hàn ống chữ K được rời rạc hóa với 145.126 phần tử (elements) và 115.495 nút (nodes). Trong đó, số phần tử solid (hexa, penta, tetra) sử dụng trong mô hình là 94.288.

Để tăng mức độ chính xác khi mô phỏng, lưới được chia mau ở mỗi hàn và vùng lân cận mỗi hàn (vùng ảnh hưởng nhiệt - HAZ), các vùng còn lại khoảng cách giữa các nút thưa dần để giảm thời gian tính toán cũng như số lượng phần tử, số lượng nút của mô hình (Hình 4).



**Hình 4.** Kiểu lưới và vùng chia lưới

Với kết cấu ống chữ K, trình tự thực hiện các đường hàn, lớp hàn được bố trí như Hình 3. Như vậy, để hàn hoàn thành liên kết này sẽ phải thực hiện tất cả 12 đường hàn ngắn (một nửa ống).



**Hình 5.** Trình tự thực hiện các đường hàn trong một lớp hàn

Trong bài báo này tác giả chọn điểm bắt đầu đường hàn từ phía góc hẹp và kết thúc ở phía góc rộng. Thứ tự hàn các đường hàn lần lượt là I, II, III, IV như Hình 5. Các lớp hàn (đường hàn) sau cũng áp dụng trình tự và thứ tự hàn như trên. Điểm bắt đầu và kết thúc các đường hàn so le nhau một khoảng sao cho chúng không trùng nhau.

Trên cơ sở mặt cắt ngang của liên kết hàn so sánh với trường nhiệt độ khi mô phỏng để hiệu chỉnh thông số chế độ hàn (năng lượng đường, góc nghiêng mỏ hàn, các thông số  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$  và  $c$ ) cho phù hợp với chiều sâu ngấu cũng như chiều rộng vùng HAZ của liên kết hàn.

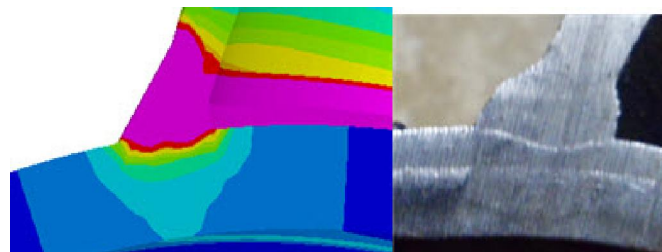
**Bảng 3.** Chế độ hàn thực nghiệm liên kết ống chữ K

Lớp hàn/Đường hàn	$I_h$ (A)	$U_h$ (V)	$V_h$ (mm/s)	$D_d$ (mm)	Năng lượng đường (J/mm)
Lớp hàn 1 (1, 2)	150	25	5	1,0	720
Lớp hàn 2 (3, 4)	170	26	5	1,0	880
Lớp hàn 2 (5, 6)	170	26	5	1,0	880

Trong đó:  $V_h$ : Vận tốc hàn (mm/s);  $D_d$ : Đường kính dây hàn (mm).

**Bảng 4.** Thông số mô phỏng liên kết ống chữ K

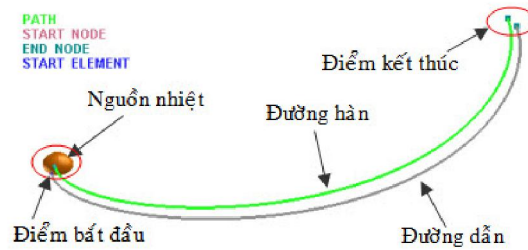
Lớp hàn/Đường hàn	Năng lượng đường (J/mm)	Vận tốc hàn (mm/s)
Lớp hàn 1 (1, 2)	720	5
Lớp hàn 2 (3, 4)	880	5
Lớp hàn 2 (5, 6)	880	5



**Hình 6.** Mô hình nguồn nhiệt

Phân tích Hình 6 thấy rằng, với thông số mô phỏng như Bảng 4 cho kết quả của chiều sâu ngấu giữa mô phỏng và thực nghiệm gần giống nhau và hoàn toàn có thể chấp nhận được. Như vậy, có thể sử dụng chế độ nhiệt này để mô phỏng cơ nhiệt của toàn bộ quá trình hàn.

Để có kết quả mô phỏng chính xác cần thiết phải mô tả trên mô hình FEM các thông số chế độ đúng như quá trình hàn diễn ra trong thực tế, bao gồm: Quỹ đạo đường hàn, đường dẫn đầu hàn, điểm bắt đầu và điểm kết thúc đường hàn (Hình 7). Quá trình thiết lập này được thực hiện trên phần mềm Visual Weld.

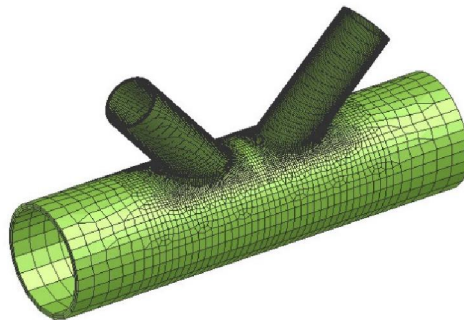


**Hình 7.** Quỹ đạo đường hàn, đường dẫn

Quỹ đạo đường hàn được thiết lập (bắt buộc) để có thể điều chỉnh nguồn nhiệt theo phương  $x,y,z$ . Nguồn nhiệt di chuyển theo quỹ đạo của đường dẫn và mặt cắt ngang của nguồn nhiệt thuộc mặt phẳng chứa đường hàn và đường dẫn.

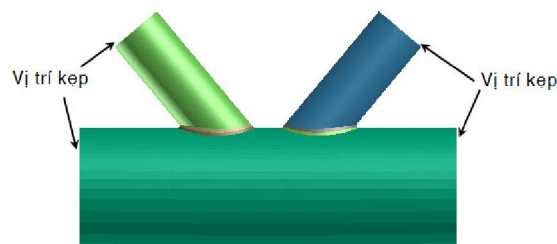
#### 2.4. Tạo lớp trao đổi nhiệt và gá kẹp

Trong Sysweld, thường sử dụng phần tử 2D (2D element) cho điều kiện biên nhiệt độ. Đó chính là lớp vỏ trao đổi nhiệt (Hình 8). Nó được tạo từ mô hình 3D của liên kết, và được thực hiện trên phần mềm Visual Mesh. Việc tạo lớp vỏ (skin) này liên quan đến sự trao đổi và bức xạ nhiệt với môi trường xung quanh trong quá trình hàn. Mục đích là quá trình mô phỏng được diễn ra với các điều kiện gần giống thực nghiệm.



**Hình 8.** Mô hình vỏ trao đổi nhiệt

Liên kết ống chữ K được ngàm như Hình 9, trong đó ống chính được ngàm chặt hai đầu theo cả 3 phương ( $x,y,z$ ) và 2 ống nhánh chỉ bị ngàm theo phương  $z$ . Mỗi đầu ống chỉ ngàm 4 điểm đối xứng nhau đi qua tâm. Thời gian ngàm được duy trì trong suốt quá trình mô phỏng (4500s).

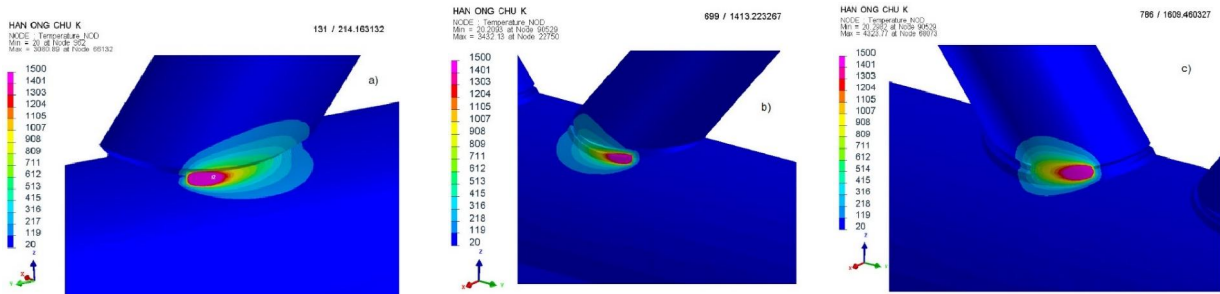


**Hình 9.** Vị trí ngàm liên kết ống chữ K

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

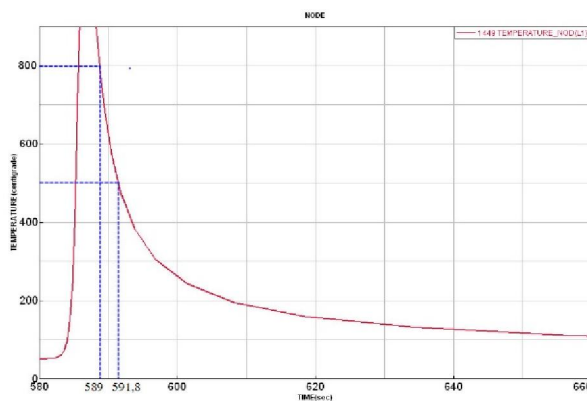
#### 3.1. Trường nhiệt độ

Khi nguồn nhiệt hàn di chuyển dọc theo đường hàn trong liên kết sẽ xuất hiện một trường phân bố nhiệt độ tức thời và ứng suất nhiệt. Trên Hình 10.a biểu diễn sự phân bố nhiệt độ của bề hàn và vùng HAZ khi hàn đường thứ nhất. Hình 10.b là kết quả phân bố nhiệt độ của bề hàn và vùng HAZ khi hàn đường thứ nhất và thứ hai. Hình 10.c là kết quả phân bố nhiệt độ bề hàn và vùng HAZ khi hàn đường hàn 3 với thông số chế độ nhiệt như đã nêu ở Bảng 4.



**Hình 10.** Hình dạng kích thước bề hàn  
a) Đường hàn 1    b) Đường hàn 2    c) Đường hàn 3

Hình 10 mô tả hình dạng kích thước bề hàn và đường bao đẳng nhiệt của từng đường hàn. Trong phần này, tác giả sử dụng kỹ thuật tiêu diệt và tái sinh phần tử (Element death and born) của Sysweld để thể hiện kích thước bề hàn và đường bao đẳng nhiệt một cách đầy đủ nhất.



**Hình 11.** Đồ thị nhiệt độ tại nút 1449

Trên Hình 11 là nhiệt độ tại nút 1449 thuộc vùng HAZ trên ống chính. Dựa trên đồ thị mô phỏng xác định thời gian nguội từ 800 xuống 500°C, cho giá trị  $\Delta t_{8/5} \approx 2,8s$  và theo tính toán ở trên  $\Delta t_{8/5} \approx 2,23s$ . Như vậy, tốc độ nguội giữa tính toán và mô phỏng đều nằm trong phạm vi cho phép với hàn GMAW là  $2 \div 50s$  [4].

#### 3.2. Chu trình nhiệt

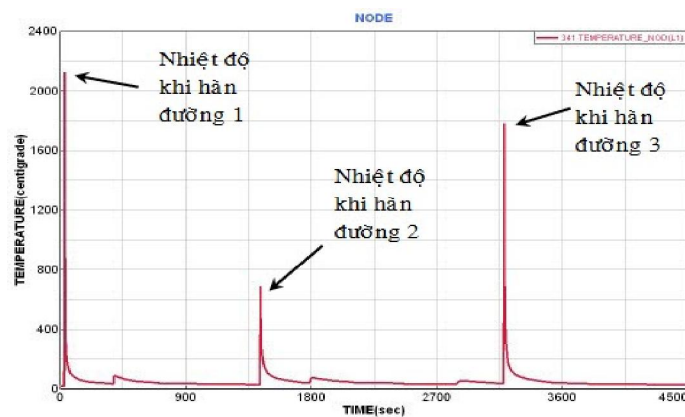
Trên Hình 12 là sự phân bố nhiệt độ tại nút 341 thuộc đường hàn 1 của liên kết hàn ống chữ K với công suất nhiệt hữu ích và tốc độ hàn tương ứng. Phân tích thấy rằng, tại giây thứ

33,1946 nhiệt độ là 2125,14°C là thời điểm bể hàn nóng chảy đi qua. Sau khoảng 317s nhiệt độ của cả liên kết giảm xuống 38°C lúc đó ta mới tiến hành hàn đường tiếp theo.

Tại giây thứ 1435,65 nhiệt độ tại nút này là 685,3°C, nguyên nhân tăng là do hàn đường thứ 2. Tuy nhiên, đường hàn thứ 2 nằm bên dưới nút này do đó tại thời điểm này nút 341 chịu tác động nhiệt giống như vùng HAZ.

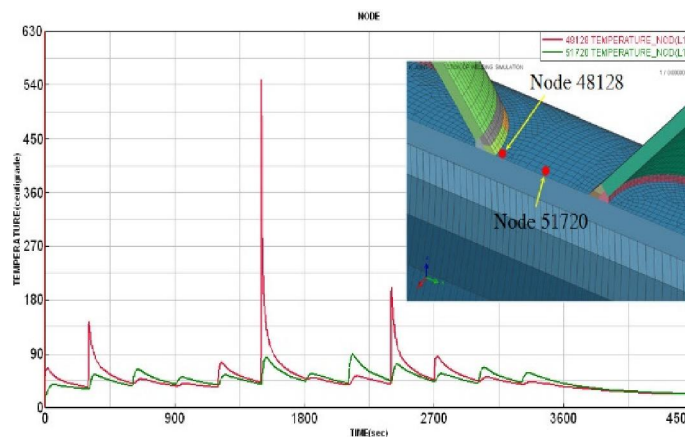
Tại giây thứ 3181,56 nhiệt độ tại nút này là 1785,97°C vượt qua nhiệt độ nóng chảy của vật liệu. Nguyên nhân là bể hàn nóng chảy của đường hàn thứ 3 tại thời điểm đó đi qua nút này và làm nóng chảy một phần đường hàn 1.

Phân tích thấy rằng, đường hàn 1 chịu ảnh hưởng nhiệt do 2 đường hàn sau gây ra. Đây cũng là nguyên nhân ảnh hưởng trực tiếp đến cơ tính, quá trình luyện kim và cấu trúc kim loại của mỗi hàn löt.



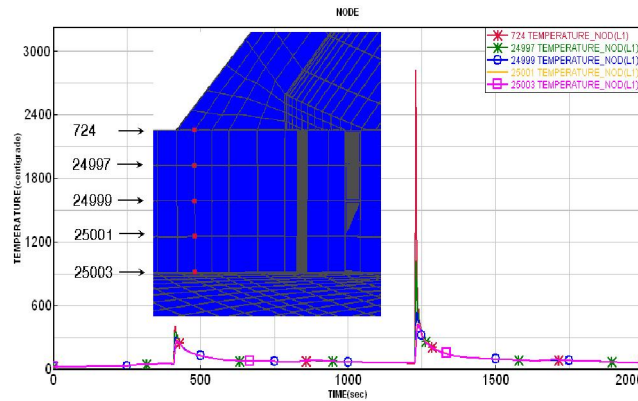
**Hình 12.** Chu trình nhiệt tại nút 341

Phân tích Hình 13 thấy rõ sự biến thiên nhiệt độ của nút 48128 vùng HAZ và nút 51720 không thuộc vùng HAZ nằm trên ống chính. Phân tích nút 48128 gần tâm nguồn nhiệt khi hàn đường hàn 3 nên có nhiệt độ cao hơn (550°C), nút 51720 xa nguồn nhiệt nên có nhiệt độ thấp hơn (90°C). Như vậy nút 48128 và 51720 chịu tác động nhiệt của tất cả các đường hàn. Tuy nhiên, nhiệt độ đỉnh của nút 48128 khi đường hàn 1 và 3 chỉ vào khoảng 200°C và hầu như không ảnh hưởng gì tới cơ tính cũng như tổ chức tế vi.



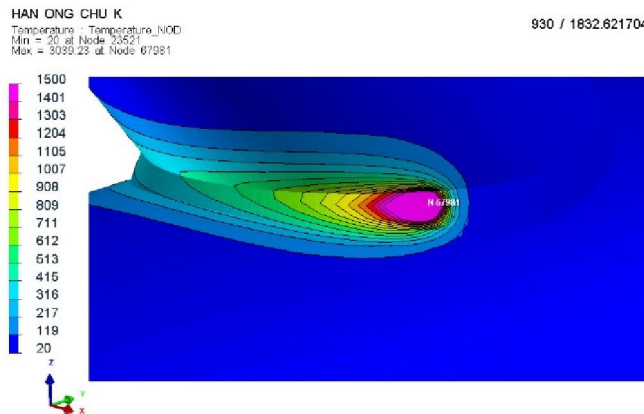
**Hình 13.** Chu trình nhiệt tại nút 48128 và 51720





**Hình 14.** Chu trình nhiệt của các nút theo chiều dày thành ống chính

Hình 14 mô tả sự phân bố nhiệt theo chiều dày thành ống chính của liên kết hàn nút giàn dạng ống chữ K. Phân tích đồ thị thấy rằng, nhiệt độ giảm dần theo chiều dày thành ống từ trên bề mặt xuống dưới.



**Hình 15.** Bề hàn và đường đẳng nhiệt khi hàn

Hình 15 mô tả hình dáng, kích thước bề hàn và các đường bao đẳng nhiệt khi hàn đường hàn thứ 3 đối với liên kết hàn nút giàn dạng ống chữ K. Nhiệt độ lớn nhất tại nút 67981 là 3039°C.

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã mô phỏng trường nhiệt độ cho liên kết ống chữ K khi hàn GMAW nhiều đường nhiều lớp (2 lớp, 3 đường) bằng phần mềm Sysweld.

Mô hình hoá quá trình hàn và sự phân bố nhiệt độ trong quá trình hàn. Phân tích đầy đủ cơ sở dữ liệu về sự phân bố nhiệt độ trên ống chính và ống nhánh trong quá trình hàn.

Phân tích và mô phỏng sự biến thiên nhiệt độ tại một thời điểm bất kỳ trong liên kết hàn ống bằng phần mềm chuyên ngành Sysweld. Kết quả nhận được đảm bảo độ chính xác, giống thực tế. Đây là cơ sở quan trọng để tối ưu hóa các thông số chế độ hàn nhằm kiểm soát tốt chất lượng mối hàn.

## DANH MỤC DANH PHÁP/KÝ HIỆU

- $a_f, a_r, b, c$  : Các thông số hình học của nguồn nhiệt khối ellipsoid kép  
 $Q_R$  : Hàm mật độ nguồn nhiệt  
 $GMAW$  : Hàn điện cực nóng chảy trong môi trường khí hoạt tính bảo vệ  
 $HAZ$  : Vùng ảnh hưởng nhiệt hàn  
 $A_{t/5}$  : Thời gian nguội

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. ESI Group, 2010. 99 Rue Des, Solets Silic 112 94513 Rungis Cedex FRANCE
- [2]. Nguyễn Tiến Dương, 2008. *Mô phỏng quá trình truyền nhiệt khi hàn*. NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [3]. Zienkiewicz, O. C, 1977. *The Finite Element Method*. Mc Graw - Hill Company, London.
- [4]. Nguyen, N.T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., and Maeda, Y, (1999). Analytical solutions for transient temperature of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat sources. *Welding Journal Research Supplement*, pp.265-274.
- [5]. J. Goldak, M. Bibby, J. Moore and B. Patel, 1986. Computer Modling of Heat Flow in Welds. *Metallurgical Transactions B*, Volume 17, Issue 3, pp 587–600.
- [6]. Trần Văn Địch, 2004. *Sổ tay thép thế giới*. NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [7]. Jeffrey Packer, 2010. *Steel Design Guide*. AISC, USA.