

- Cơ tính của mối hàn (độ bền kéo) giảm khi tỉ số WP tăng, tỉ số này trong khoảng 4 đến 12 (tùy từng vùng mà có sự thay đổi đôi chút). Trong khoảng này mối hàn đảm bảo cơ tính bằng 70% so với kim loại cơ bản.

- Đã xây dựng các hàm thực nghiệm thông số hàn như tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu xâm nhập vai dụng cụ.

- Khuyết tật mối hàn hình thành phụ thuộc chủ yếu vào tốc độ quay và vận tốc hàn. Với tốc độ quay 900 - 1200 v/ph thì WP phải chọn lớn hơn 4 và nhỏ hơn 10 thì mối hàn mới đạt cơ tính tốt, với tốc độ quay lớn hơn 1200 – 1600 v/ph thì WP có thể nhỏ hơn 4 đến 12, tức là vận tốc hàn có thể lớn hơn vùng phía dưới – vùng có tốc độ quay thấp. Đây là cơ sở để các nhà sản xuất lựa chọn thông số công nghệ trong quá trình hàn ma sát khuấy cho các chi tiết dạng tấm bằng hợp kim nhôm biến dạng.

Luận án cho thấy các thông số cơ bản có ảnh hưởng lớn đến quá trình hàn ma sát khuấy là: tốc độ quay dụng cụ hàn, vận tốc hàn và chiều sâu xâm nhập của vai dụng cụ hàn lên bề mặt phôi, việc chọn lựa các thông số hàn phù hợp thì nguồn nhiệt sinh ra trong quá trình hàn cho sự biến dạng của các lớp vật liệu vùng hàn đồng đều, từ đó sẽ tác động tích cực đến cơ tính và tổ chức của mối hàn, mối hàn đảm bảo chất lượng và không bị khuyết tật.

Đã nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng số và thực nghiệm, xây dựng được biểu đồ giới hạn công nghệ cho hợp kim nhôm 6061 có chiều dày trong khoảng (3 – 5) mm (hình 5.44).

#### **Hướng phát triển**

- Nghiên cứu cho các loại hợp kim nhôm biến dạng có tính hàn khó như hợp kim AA 2xxx và AA 7xxx.

- Tối ưu cho miền mô phỏng nhiệt.

- Thực nghiệm cho các vật liệu dày, hàn hai phía.

- Nghiên cứu các dạng liên kết hàn khác như: hàn chồng, hàn góc, hàn chữ “T”.

- Nghiên cứu quá trình xử lý nhiệt trong và sau khi hàn.

## **MỞ ĐẦU**

### **1. Lý do chọn đề tài:**

Công nghệ hàn ma sát khuấy được phát triển để chế tạo các chi tiết và các kết cấu dạng tấm, mối hàn hình thành được liên kết ở trạng thái rắn (không nóng chảy), công nghệ hàn ma sát khuấy được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành như đóng tàu, ô tô, hàng không vũ trụ,... loại hình công nghệ này có ứng dụng thực tế cao.

Nghiên cứu quá trình hàn là nghiên cứu các biến số: ma sát, biến dạng, tốc độ biến dạng, sự thay đổi ứng suất, các thông số hình học của dụng cụ hàn tác động đồng thời đến quá trình sinh nhiệt theo thời gian. Để giải quyết bài toán đòi hỏi sự kết hợp giữa các phương pháp: Mô hình hóa - Mô phỏng - Thực nghiệm.

Luận án có tính cấp thiết và thiết thực cho việc ứng dụng các phương pháp sản xuất tiên tiến, cho năng suất cao, thân thiện môi trường vào sản xuất công nghiệp tại nước ta.

### **2. Mục đích nghiên cứu**

Nghiên cứu sự ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đến quá trình hàn, tối ưu hóa các thông số nhằm nâng cao chất lượng mối hàn, loại bỏ các khuyết tật mối hàn, tăng năng suất và khả năng ứng dụng của công nghệ hàn ma sát khuấy.

### **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

Chi tiết dạng tấm phẳng, liên kết hàn giáp mối bằng hợp kim nhôm 6061.

Nghiên cứu quá trình sinh nhiệt do ma sát và biến dạng dẻo của dụng cụ hàn và vật hàn.

Mối liên hệ giữa các thông số hàn, sự ảnh hưởng của các thông số hàn đến tổ chức tế vi và tính chất cơ học của mối hàn, nhằm xác lập ra miền thông số hàn tối ưu, đảm bảo chất lượng mối hàn là tốt nhất.

#### 4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết công nghệ hàn ma sát khuấy, lý thuyết mô hình hóa quá trình sinh nhiệt, ứng xử cơ - nhiệt của vật liệu, lý thuyết biến dạng dẻo. Từ đó kết hợp các phương pháp nghiên cứu: Lý thuyết - Mô phỏng - Thực nghiệm nhằm kiểm soát được các thông số của quá trình công nghệ hàn ma sát khuấy.

Nghiên cứu được tiến hành tại các phòng thí nghiệm và kiểm tra tại Khoa Cơ khí Trường ĐHBK – ĐHQG Tp. HCM, Công ty Quatest 3, Buehler,...

#### 5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn của luận án

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu, các nhà sản xuất lựa chọn chế độ công nghệ phù hợp, nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả kinh tế. Ngoài ra, luận án còn là tài liệu tham khảo trong lĩnh vực hàn, tạo hình vật liệu.

Ứng dụng các mô hình toán, mô hình vật lý để tính toán và phân tích quá trình sinh nhiệt khi hàn. Xây dựng các công thức lý thuyết và thực nghiệm, hệ thống hóa và làm phong phú thêm cơ sở lý thuyết áp dụng cho công nghệ hàn ma sát khuấy ở nước ta.

#### 6. Những kết quả đạt được và những đóng góp mới của luận án

Luận án đã phân tích các mô hình vật liệu, mô hình đàn dẻo vật liệu, mô hình hóa và mô phỏng quá trình, so sánh với kết quả thực nghiệm cho thấy sự phù hợp và tương thích cao.

Mô phỏng số quá trình hàn đã được thực hiện, kết quả mô phỏng xác định được các thông số quá trình công nghệ. Dựa vào miền thông số vừa xác lập, tiến hành thực nghiệm hàn trên nhôm tấm 6061 dày 3, 4, 5 mm, các mối hàn này được kiểm tra bằng phương pháp kiểm tra không phá hủy (chụp X-Ray), phương pháp kiểm tra phá hủy (soi tổ chức tế vi) và kiểm tra cơ tính (độ bền kéo) để kiểm tra chất lượng mối hàn, từ đó tìm miền thông số công nghệ thích hợp cho công nghệ hàn.

#### 5.11 Kết luận

Kết quả thực nghiệm khẳng định độ chính xác của mô hình, kết quả mô phỏng và việc lựa chọn xác lập mô hình để nghiên cứu quá trình hàn cho được kết quả chính xác.

Qua kiểm tra (đặc biệt là tổ chức tinh thể và độ bền kéo), đánh giá và phân tích thì có thể khẳng định rằng ba thông số (tốc độ quay dụng cụ hàn, vận tốc hàn và chiều sâu xâm nhập của vai dụng cụ vào vật hàn) có tác động nhiều nhất đến chất lượng mối hàn.

Miền thông số thích hợp cho mối hàn có chiều dày tấm 3 mm là tốc độ quay 700 – 1600 (v/ph), vận tốc hàn 100 – 400 (mm/ph), WP từ 4 - 7 và chiều sâu xâm nhập là 0.1 mm.

Miền thông số thích hợp cho mối hàn có chiều dày tấm 4 mm là tốc độ quay 800 – 1600 (v/ph), vận tốc hàn 100 – 400 (mm/ph), WP từ 8 - 4 và chiều sâu xâm nhập là 0.1 mm.

Miền thông số thích hợp cho mối hàn có chiều dày tấm 3 mm là tốc độ quay 900 – 1600 (v/ph), vận tốc hàn 50 – 350 (mm/ph), WP từ 16- 5 và chiều sâu xâm nhập là 0.2 mm.

### KẾT LUẬN CHUNG

#### Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã phân tích các mô hình vật liệu, mô hình đàn dẻo vật liệu, mô hình hóa và mô phỏng quá trình, so sánh với kết quả thực nghiệm cho thấy sự phù hợp và tương thích cao.

Bằng việc phân tích, xác lập và sử dụng mô hình nhiệt hợp lý đã thành lập được miền thông số hàn mô phỏng, từ đó cũng đã thành lập được miền thông số thực và đã thiết kế, triển khai quy trình công nghệ hàn cho hợp kim nhôm AA6061.

- Miền thông số thích hợp cho AA6061 có tốc độ quay từ 700 – 1600 (v/ph), vận tốc hàn trong khoảng 100 – 350 (mm/ph), hệ số WP từ 4 đến 12. Với tốc độ quay thấp 900 – 1200 (v/ph) thì WP là 5 – 9, nhưng với tốc độ quay 1200 – 1600 (v/ph) thì WP là 4 – 12.

### 5.9.3.3 Khuyết tật do thiếu độ xâm nhập dụng cụ:

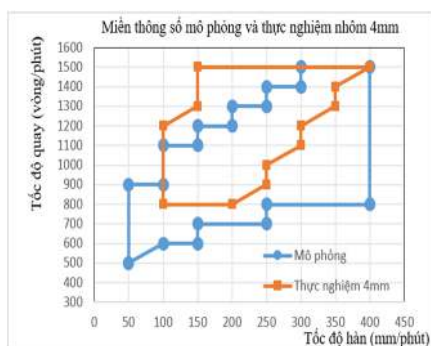
Khuyết tật sinh ra do chiều dài đầu khuấy không phù hợp với chiều dày phôi, đặc biệt khi sử dụng đầu khuấy có chiều dài cố định mà vật liệu có chiều dày thay đổi dọc theo đường hàn.



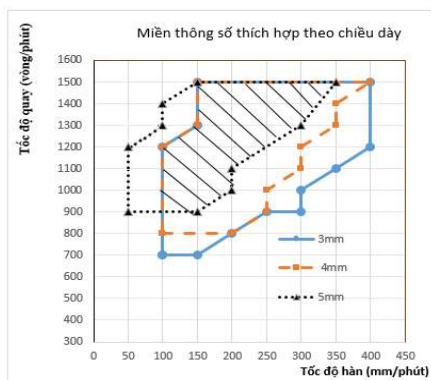
Hình 5.42 Ảnh tế vi mối hàn thiếu độ xâm nhập của đầu khuấy.

## 5.10 Miền thông số thực nghiệm

Dựa vào giá trị độ bền đo được, khi giá trị này trên 70% của kim loại cơ bản [79], thì miền thông số được chọn như hình 5.44.



Hình 5.43 Miền thông số thực so với miền thông số mô phỏng tấm 4 mm



Hình 5.44 Miền thông số thực hợp kim nhôm AA6061

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc lựa chọn mô hình cơ nhiệt được xây dựng trên cơ sở giải quyết bài toán truyền nhiệt trong phôi hàn sau đó sử dụng kết quả trường nhiệt độ để tính toán ứng suất và biến dạng theo mô hình vật liệu rắn dẻo nhớt Zener - Holoman, việc lựa chọn phần mềm mô phỏng và mô hình thực nghiệm đã thực hiện là hoàn toàn chính xác, mang lại hiệu quả cao.

## Nội dung của luận án

Luận án gồm 5 chương:

**Chương 1:** Giới thiệu công nghệ hàn ma sát khuấy

**Chương 2:** Trình bày cơ sở lý thuyết về sự hình thành nhiệt do ma sát và biến dạng dẻo vật liệu kim loại của quá trình hàn ma sát khuấy.

**Chương 3:** Phân tích và xác lập mô hình truyền nhiệt của quá trình hàn ma sát khuấy.

**Chương 4:** Sử dụng mô hình đã có vào mô phỏng số, đưa ra miền thông số của quá trình hàn.

**Chương 5:** Thực nghiệm theo kết quả mô phỏng, kiểm tra, phân tích để xác định miền thông số tối ưu của công nghệ hàn.

Kết luận những kết quả đạt được và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

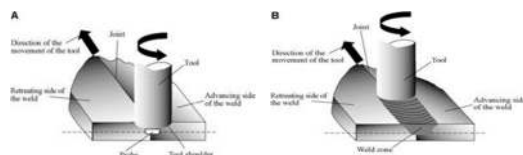
## CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

### 1.1 Giới thiệu quá hình hàn ma sát khuấy:

Hàn ma sát khuấy là phương pháp hàn không nóng chảy tạo ra những liên kết hàn ưu việt nhất, có thể hàn được các loại hợp kim nhôm mà các phương pháp hàn truyền thống không hàn được. Công nghệ hàn này cho mối hàn chịu lực cao, tăng giới hạn bền mỏi, giảm biến dạng, không bị khuyết tật.

### 1.1.1 Nguyên lý hàn ma sát khuấy

Nguyên lý cơ bản của phương pháp hàn ma sát khuấy tương đối đơn giản: Dùng một dụng cụ xoay được thiết kế đặc biệt có một đầu khuấy (có ren hoặc không có ren) và phần vai để tiếp xúc với bề mặt của phôi hàn.



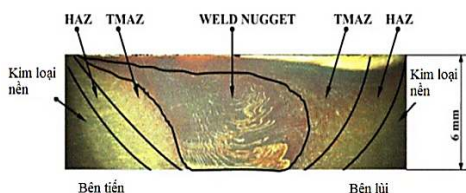
Hình 1.1 Dụng cụ đi xuống và bắt đầu hàn [1].

### 1.1.2 Các thông số cơ bản của quá trình

Lực dọc trục, tốc độ quay và vận tốc hàn, hệ số tỉ số giữa tốc độ quay và vận tốc hàn WP.

### 1.2 Tổ chức tế vi mối hàn

Quá trình hàn ma sát khuấy được thực hiện ở pha rắn dưới điểm nóng chảy của vật liệu, từ đó hình thành các hạt kết tinh lại nhỏ mịn, các tổ chức nhỏ mịn này cho ra một cơ tính tốt [1].



Hình 1.6 Các vùng tổ chức tế vi trong mối hàn ma sát khuấy [47].

### 1.3 Kết luận

Qua nghiên cứu tổng quan tài liệu về lý thuyết và công nghệ hàn cho thấy công nghệ hàn ma sát khuấy là phương pháp hàn tiên tiến. Mặc dù có nhiều ưu điểm nhưng công nghệ này vẫn chưa được ứng dụng tại Việt Nam. Tuy nhiên, công nghệ này còn thiếu những nghiên cứu, tài liệu hướng dẫn đầy đủ về thông số và quy trình công nghệ, khuyết tật cơ học và biện pháp loại bỏ khuyết tật cơ học hình thành trong quá trình hàn.



Hình 5.37 Ảnh chụp X-Ray mối hàn với  $n=700$  v/ph và  $V_h=150$  mm/ph.



Hình 5.38 Ảnh chụp mối hàn bị khuyết tật do thiếu nhiệt



Hình 5.39 Mối hàn hình thành trong điều kiện thiếu nhiệt

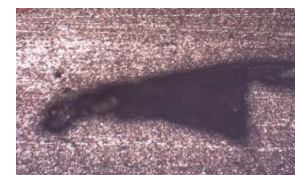
#### 5.9.3.2 Mối hàn bị hình thành ba-via do dư nhiệt:

Khi hàn với tốc độ vòng quay lớn hơn 1500 v/ph, vận tốc hàn nhỏ hơn 150 mm/ph thì mối hàn hình thành ba-via.

Tuy nhiên, trong hàn ma sát khuấy hiện tượng dư nhiệt khó có thể dễ dàng phân biệt bằng mắt thường được cho tất cả các loại vật liệu. Đối với việc hàn nhôm hoặc hợp kim nhôm của nó thì thành phần hóa học khác nhau dẫn tính chất nhiệt lý khác nhau ví dụ như về sự khác nhau giữa nhiệt độ đường rắn và nhiệt dẫn suất.



Hình 5.40 Hiện tượng kim loại trôi khỏi vai hình thành ba-via



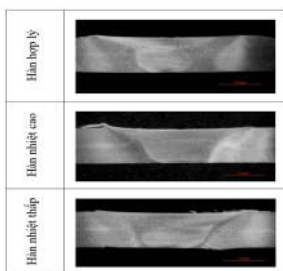
Hình 5.41 Ảnh tế vi mối hàn bị dư nhiệt

## 5.9.2 Tổ chức tế vi

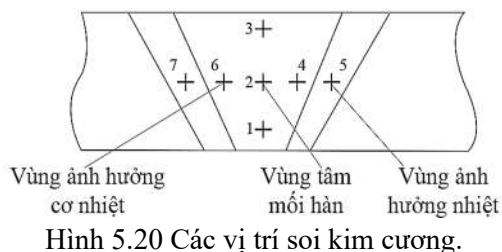
### 5.9.2.1 Tổ chức thô đại:

Hình dưới đây thể hiện cấu trúc tế vi ở điều kiện hàn thích hợp, điều kiện hàn nóng và hàn nguội.

Tổ chức tế vi của mối hàn chất lượng tốt được trình bày ở hình 5.20 Hình a là tổ chức kim loại cơ bản, hình b thể hiện vùng tâm mối hàn có cấu trúc hạt mịn, hình c là vùng ảnh hưởng cơ nhiệt và ảnh hưởng nhiệt, hình d là ranh giới giữa vùng tâm hàn và vùng ảnh hưởng cơ-nhiệt.



Hình 5.19 Mặt cắt mối hàn ở các điều kiện hàn khác nhau



Hình 5.20 Các vị trí soi kim cương.

## 5.9.3 Sự hình thành khuyết tật

### 5.9.3.1 Mối hàn thiếu nhiệt

Khi hàn với tốc độ vòng quay nhỏ 700 v/ph, vận tốc hàn 50 mm/ph thì mối hàn không hình thành.



Hình 5.36 Hiện tượng thiếu nhiệt khi hàn

Các nghiên cứu cho thấy rằng cơ tính và tổ chức kim loại mối hàn phụ thuộc chủ yếu vào các thông số công nghệ hàn cũng như tính chất của vật liệu hàn. Tuy nhiên những nghiên cứu trên vẫn còn những hạn chế nhất định, chỉ áp dụng cho những công trình của riêng mà chưa có một bộ thông số chế độ công nghệ hàn cụ thể. Đặc biệt ở trong nước chưa có công trình nghiên cứu nào được công bố. Vì vậy vấn đề này được lựa chọn để nghiên cứu trong luận án. Để nghiên cứu vấn đề trên, luận án tập trung giải quyết:

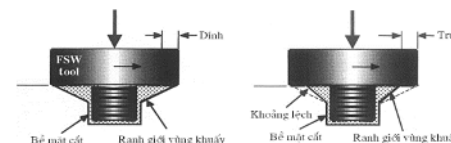
- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết quá trình sinh nhiệt, truyền nhiệt khi hàn, xác định rõ các thông số cơ bản trong quá trình hàn, mối liên hệ của sự sinh nhiệt của đầu khuấy và vai dụng cụ hàn, phân tích các mô hình của dòng chảy vật liệu ảnh hưởng đến chất lượng của mối hàn, một số đặc điểm của chúng cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến sự hình thành mối hàn.
- Phân tích, lựa chọn, xác lập mô hình nhiệt của quá trình hàn.
- Mô phỏng số quá trình hàn, tiến hành thực nghiệm kiểm chứng mô hình.
- Áp dụng mô hình nhiệt và mô hình số xác định miền thông số hàn, thực nghiệm và tối ưu các thông số hàn, xây dựng miền thông số thích hợp của quá trình hàn.

## CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1 Quá trình sinh nhiệt khi hàn:

#### 2.1.1 Đặc điểm chung

Quá trình nhiệt khi hàn là sự tăng nhiệt độ của vật hàn dưới ảnh hưởng của sự tạo nhiệt, sự truyền nhiệt vào vật hàn và sự thoát nhiệt vào môi trường xung quanh (và vào tấm đe dưới).



Hình 2.1. Ảnh hưởng của điều kiện trượt - dính đến quá trình sinh nhiệt [1].

## 2.1.2 Lượng nhiệt sinh ra trong quá trình hàn

### \* Nhiệt sinh ra trong lúc hàn:

Với trường hợp lý tưởng, moment xoắn cần thiết để quay dụng cụ trên bề mặt phôi dưới tác dụng của tải dọc trục được tính [1]:

$$\int_0^R dM = \int_0^R \mu P(r) 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3} \pi \mu p R_s^3 \quad (2.1)$$

Với: M: là moment xoắn,  $\mu$ : hệ số ma sát, R: là bán kính vai.

$P(r)$ : lực phân bố trên bề mặt (ở đây xem như không đổi).

Nếu tất cả quá trình cắt ở bề mặt được chuyển đổi thành nhiệt ma sát, lượng nhiệt vào trung bình trên mỗi đơn vị diện tích và thời gian trở thành:

$$Q_1 = \int_0^R \omega dM = \int_0^R \omega 2\pi \mu P r^2 dr \quad (2.2)$$

Trong đó:  $Q_1$ : là năng lượng có ích [W] (công suất hiệu dụng)

$\omega = 2\pi n$ : vận tốc góc [rad/s], n: tốc độ quay/giây

Từ đó, phương trình 2.2 trở thành:

$$Q_1 = \int_0^R 4\pi^2 \mu \cdot P \cdot n \cdot r^2 dr = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P n R_s^3 \quad (2.3)$$

Sự tạo nhiệt của đầu khuấy cũng có thể được ước tính bằng cách dùng điều kiện ma sát dính. Với đầu khuấy có bán kính  $R_p$  và chiều dài  $L_p$ , quay với vận tốc góc  $\omega$  thì sự lượng nhiệt được sinh ra được tính theo công thức:

$$Q_2 = 2\pi \cdot k \cdot \omega \cdot L_p R_p^2 \quad (2.9)$$

Trong đó:  $Q_2$ : Lượng nhiệt do đầu khuấy tạo ra.

### 2.1.3 Sự truyền nhiệt vào vật hàn:

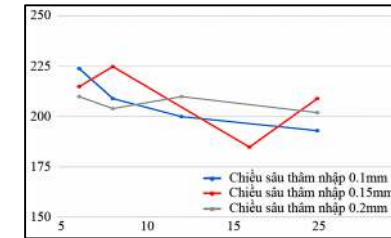
Trong hàn FSW, hầu hết nguồn nhiệt được phân bố trên khắp dụng cụ. Dòng nhiệt phân bố trên một đơn vị diện tích của vai được xác định [1]:

$$q_1 = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{Q_1 \cdot r}{R_s^3 - R_p^3} \quad [W/m^2] \quad (2.10)$$

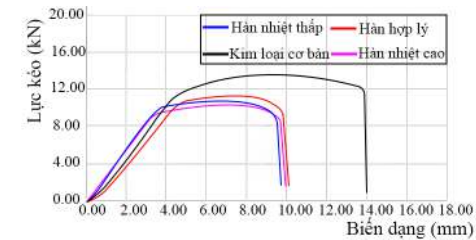
Đối với đầu khuấy lượng nhiệt vào có thể phân bố khắp thể tích của nó:

### 5.9.1.1 Ảnh hưởng của thông số hàn đến độ bền kéo

Các mối hàn đã thực hiện độ bền kéo đều đạt trên 60% đến hơn 85% so với kim loại cơ bản. Với kết quả đo độ bền kéo, có thể thấy rằng khi hàn với hệ số n/v (WP) càng nhỏ thì độ bền kéo càng cao và ngược lại.



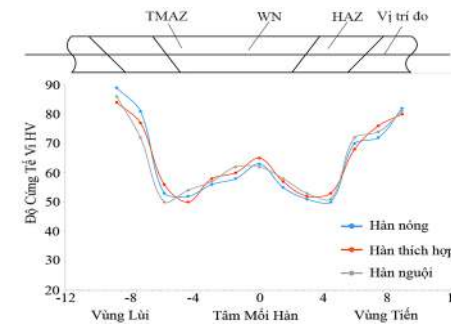
Hình 5.13 Mối liên hệ giữa thông số WP đến độ bền kéo mối hàn nhôm 4 mm



Hình 5.17 Mối liên hệ giữa lực kéo và biến dạng của kim loại cơ bản và mối hàn

### 5.9.1.2 Ảnh hưởng của thông số hàn đến độ cứng tế vi

Độ cứng của mối hàn có dạng chữ “W” [1] như hình 5.18.



Hình 5.18 Mối liên hệ giữa hệ số WP đến độ cứng tế vi mối hàn



## 5.7 Phương pháp phân tích kết quả

Sử dụng phương pháp qui hoạch thực nghiệm Box - Behnken, xác lập phương trình hồi quy và xác định giá trị tối ưu của quá trình hàn.

Bảng 5.4 Bảng thông số hàn và kết quả kiểm tra các mối hàn nhôm dày 4 mm

STT	Tốc độ quay (v/ph)	Vận tốc hàn (mm/ph)	Chiều sâu ép (mm)	Kết quả thí nghiệm 1 (Mpa)	Kết quả thí nghiệm 2 (Mpa)	Kết quả thí nghiệm 3 (Mpa)	Giá trị TB (Mpa)
	n	v	h	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	Y
1	800	50	0.15	184.3	184.2	185.666	184.722
2	1200	50	0.15	210.1	208.6	208.717	209.139
3	800	150	0.15	203.6	202.3	207.996	204.632
4	1200	150	0.15	222.3	220.9	230.738	224.646
5	800	100	0.1	198.5	198.5	207.437	201.479
6	1200	100	0.1	202.4	201.4	196.263	200.021
7	800	100	0.2	199.8	204.2	206.833	203.611
8	1200	100	0.2	208.5	212.4	209.475	210.125
9	1000	50	0.1	190.7	191.5	196.551	192.917
10	1000	150	0.1	220.3	224.1	228.308	224.236
11	1000	50	0.2	215.4	216.4	222.167	218.139
12	1000	150	0.2	211.1	211.4	206.873	209.791
13	1000	100	0.15	216.8	217.2	220.873	218.291
14	1000	100	0.15	218.5	218.7	222.593	219.931
15	1000	100	0.15	216.7	214.4	224.526	218.542

## 5.8 Xác định miền thông số thực nghiệm thích hợp

Bảng 5.15 Thông số hàn xác định miền thông số thực.

Tốc độ quay(v/ph)	Vận tốc hàn (mm/ph)							
	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Mức 4	Mức 5	Mức 6	Mức 7	Mức 8
700	50	100	150	200	250	x	x	x
800	50	100	150	200	250	x	x	x
900	50	100	150	200	250	300	x	x
1000	50	100	150	200	250	300	350	x
1100	50	100	150	200	250	300	350	x
1200	50	100	150	200	250	300	350	400
1300	50	100	150	200	250	300	350	400
1400	50	100	150	200	250	300	350	400
1500	50	100	150	200	250	300	350	400

## 5.9 Kết quả

Các mối hàn được kiểm tra cơ tính, soi tổ chức tế vi và chụp X-Ray để đánh giá và phân tích.

### 5.9.1 Ảnh hưởng của thông số hàn đến cơ tính mối hàn

Kiểm tra độ bền kéo trên máy kéo nén vạn năng theo tiêu chuẩn ASTM- E8, mỗi phôi hàn được cắt 3 mẫu để kiểm tra đoạn đầu, giữa và cuối đường hàn.

$$q_2 = \frac{Q_2}{\pi \cdot R_p^2 \cdot L_p} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (2.12)$$

## 2.2 Kết luận

Quá trình sinh nhiệt khi hàn là vấn đề quan trọng nhất của quá trình hàn, xác định rõ các thông số cơ bản trong quá trình hàn, mối liên hệ của sự sinh nhiệt của đầu khuấy và vai dụng cụ là cần thiết.

## CHƯƠNG 3 MÔ HÌNH NHIỆT

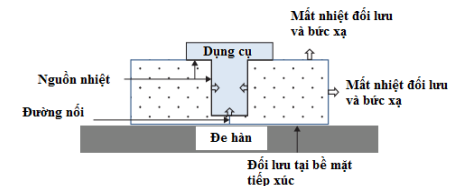
### 3.1 Mô hình truyền nhiệt

Nhiệt tạo thành trong hàn ma sát khuấy bị chi phối bởi hai cơ chế chính. Một là do ma sát và một là do biến dạng dẻo, với nhiệt được truyền vào phôi theo định luật truyền nhiệt Fourier. Trong phân tích số, trường nhiệt độ tức thời T (là hàm theo thời gian và tọa độ không gian (x,y,z)), được xác định từ phương trình truyền nhiệt phi tuyến 3D với hệ tọa độ di chuyển theo hướng di chuyển của dụng cụ hàn y dương:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} - V_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.1)$$

Với  $\rho$ ,  $C_p$ , và  $k$  lần lượt là khối lượng riêng, nhiệt dung riêng và hệ số dẫn nhiệt có hướng của phôi,  $\dot{Q}$  là tốc độ sinh nhiệt,  $V_T$  là vận tốc hàn. Biểu thức điều kiện ban đầu cho việc tính toán là:

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad (3.2)$$



Hình 3.1 Miền tính toán và các biên tương tác [53].

Suy ra, phương trình truyền nhiệt tức thời có thể được điều chỉnh trong hệ trục tọa độ di chuyển là:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( k_\xi \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = -\rho C_p V_T \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (3.7)$$

### 3.2 Mô hình dòng vật liệu

Phương trình bảo toàn động lượng và khối lượng ở trạng thái tức thời được biểu diễn ở dạng vector [54] như sau:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \vec{F} \quad (3.8)$$

$$\text{Và} \quad \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.9)$$

Với  $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$  là toán tử gradient,  $\vec{V} = \{u \ v \ w\}^T$  là vận tốc dòng kim

loại,  $\vec{\sigma}$  là tensor ứng suất tổng,  $\rho$  là khối lượng riêng của vật liệu,  $\vec{F}$  là vector lực toàn phần, và  $t$  là biến thời gian. Tensor ứng suất tổng trong phương trình (3.8) được biểu diễn theo định luật Stoke [55]:

$$\vec{\sigma} = \mu \left[ (\nabla \vec{V}) + (\nabla \vec{V})^T \right] - P \vec{I} \quad (3.10)$$

Với  $P$  là áp lực thủy tĩnh,  $\mu$  là độ nhớt của vật liệu và  $\vec{I}$  là ma trận đơn vị. Từ phương trình 3.8 và 3.9, cùng với các hiệu chỉnh phù hợp do dụng cụ di chuyển, phương trình bảo toàn động lượng có thể được viết thành:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \nabla \cdot \left[ (\nabla \vec{V}) + (\nabla \vec{V})^T \right] + \rho \vec{U} \cdot (\nabla \vec{V}) + \vec{F} \quad (3.11)$$

Phương trình điều khiển tổng quát về sự truyền nhiệt trong hệ tọa độ Descartes:

$$\nabla \cdot (\vec{k} \nabla T) + \dot{Q} = \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla T - \vec{V} \cdot \nabla T \right) \quad (3.12)$$

Giả sử một điểm 'A' trên phôi ở bán kính  $r$  và một góc  $\theta$  so với phương của vận tốc hàn  $V_T$ . Vật liệu quay ở một tốc độ quay  $\omega$ . Các thành phần vận tốc tuyến tính trên biên của bề mặt trên của vai dụng cụ được biểu diễn như sau:

$$v = \omega r \sin \theta - V_T; u = \omega r \cos \theta, \quad R_p \leq r \leq R_s \quad (3.13)$$

Vận tốc tại chu vi của đầu khuấy là:

$$v = \omega R_p \sin \theta - V_T; u = \omega R_p \cos \theta, \quad R_p = r; 0 \leq \theta \leq H_p \quad (3.14)$$

Miền thông số dự đoán có xu hướng mở rộng về phía tốc độ quay và tốc độ hàn cao, tuy nhiên do giới hạn của khả năng vận hành của thiết bị nên các giá trị cao hơn sẽ không được xem xét.

## CHƯƠNG 5 THỰC NGHIỆM

### 5.1 Máy và các thông số hàn:

Thí nghiệm được thực hiện trên máy phay CNC VP3000, công suất 7.5 HP và tốc độ quay lớn nhất 4000 vòng/phút.

### 5.2 Phương pháp hàn và chế độ hàn

Mỗi hàn giáp mí, phôi được kẹp chặt bởi bộ đồ gá bằng thép trên bàn chạy dao của máy phay như hình 5.2.



Hình 5.2 Gá kẹp phôi khi hàn

### 5.3 Giới hạn các thông số nghiên cứu thực nghiệm

Với quá trình hàn FSW, chất lượng hàn và thời gian hàn là chỉ tiêu quan trọng.

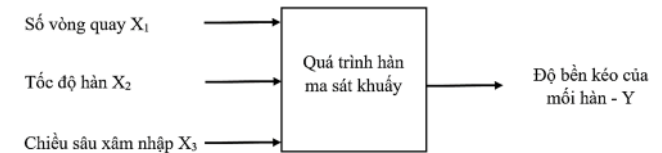
### 5.4 Phôi và dụng cụ hàn

Dụng cụ có đầu khuấy hình trụ, có ren, góc lõm ở vai là  $3^\circ$ , được chế tạo bằng thép SKD 11.

### 5.5 Quy hoạch thực nghiệm

Bảng 5.4 thể hiện các thông số và giá trị thực nghiệm.

### 5.6 Hàm mục tiêu của hệ thống



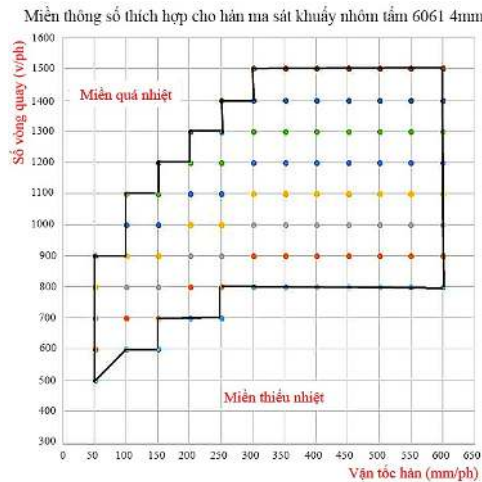
Hình 5.4 Bài toán hộp đen cho quá trình hàn FSW



## 4.6 Kết luận

Mô hình cơ nhiệt được xây dựng trên cơ sở giải quyết bài toán truyền nhiệt trong phôi hàn sau đó sử dụng kết quả trường nhiệt độ để tính toán ứng suất và biến dạng theo mô hình vật liệu rắn dẻo nhớt Zener - Holoman. Nguồn nhiệt trong mô hình tính toán tạo thành do ma sát và biến dạng tại bề mặt tiếp xúc giữa dụng cụ và phôi. Nhiệt sinh ra giữa vai dụng cụ và phôi được giả thiết là do điều kiện dính (lực ma sát cắt), còn hai bề mặt còn lại coi như có tiếp xúc trượt (ma sát Coulomb). Dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng được thống kê để ước lượng sai số giữa nhiệt độ thí nghiệm và mô phỏng và kết quả chênh lệch nằm trong khoảng từ 5 – 7 %.

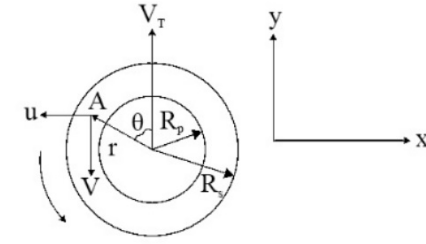
- Nhiệt độ cao nhất thu được tại tâm hàn xung quanh đầu khuấy dụng cụ. Nhiệt độ đỉnh của mỗi hàn tăng khi tăng tốc độ quay, giảm vận tốc hàn.



Hình 4.31 Miền thông số mô phỏng nhôm tấm 6061 dày 4 mm

Biểu đồ nhiệt độ theo thời gian trong suốt quá trình hàn cho thấy độ dốc của nhánh gia nhiệt tăng chứng tỏ tốc độ sinh nhiệt tăng khi tăng tốc độ quay và tốc độ hàn.

Nhiệt độ cao nhất thu được tại mỗi vị trí ở thời điểm dụng cụ đã vượt qua khỏi vị trí đo, điều này hợp lý khi kết quả mô phỏng cho thấy miền nhiệt độ mở rộng ở phía sau dụng cụ do chuyển động tiến của dụng cụ.



Hình 3.2 Điều kiện biên vận tốc trong hàn ma sát khuấy.

Điều kiện biên vận tốc tại bề mặt đỉnh đầu khuấy là:

$$v = \omega r \sin \theta - V_T; u = \omega r \cos \theta, \quad 0 \leq r \leq R_p \quad (3.15)$$

Với  $R_s$ ,  $R_p$  và  $H_p$  lần lượt là bán kính của vai, bán kính đầu khuấy và chiều cao đầu khuấy của dụng cụ dạng trụ. Nếu bỏ qua chuyển động tiến của dụng cụ, tức là dụng cụ đứng yên, thì khi đó điều kiện biên ở trên trở thành:  $V_T=0$ .

Vì dòng vật liệu có tính chất dẻo nhớt phi Newton, độ nhớt có thể được tính toán theo mô hình đơn giản của Hart [56], với ứng suất chảy được chia thành hai thành phần dẻo và nhớt như sau:

$$\sigma_e = \sigma_p + \sigma_y \quad (3.16)$$

Với thành phần nhớt đại diện cho trở lực ma sát gây nên xô lệch do trượt và thành phần dẻo đại diện cho sự cản trở dòng chảy gây nên xô lệch do rớt. Mối tương quan theo thực nghiệm của thành phần nhớt và dẻo như sau:

$$\sigma_p = K \exp \left[ - \left( \frac{b}{\dot{\epsilon}} \right)^\lambda \right] \quad (3.17)$$

$$\text{Và } \sigma_v = G \left( \frac{\dot{\epsilon}}{a} \right)^{1/M} \quad (3.18)$$

$$\text{Với } b = b_0 \left( \frac{K}{G} \right)^N \exp \left( - \frac{Q}{RT} \right) \quad (3.19)$$

$\dot{\epsilon}$  là tốc độ biến dạng và  $G$ ,  $Q$ ,  $Q_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $\lambda$ ,  $N$  và  $M$  là các thông số vật liệu được xác định từ thí nghiệm [57].

### 3.2.1 Nguồn nhiệt đứng yên (không xét ảnh hưởng của vận tốc hàn)

Xét hệ số  $\eta_Q$  là hệ số chuyển đổi nhiệt [63], tổng lượng nhiệt sinh ra trong quá trình hàn ma sát khuấy -  $Q_t$  là được viết theo năng lượng tạo ra từ dụng:

$$Q_t = \eta_Q P_a [W], \quad \eta_Q = (0, 1) \quad (3.36)$$

Năng lượng cơ phụ thuộc vào tốc độ góc  $\omega$  và moment xoắn  $M_t$ , nên lượng nhiệt tổng sinh ra là:

$$Q_t = \omega M_t \quad (3.40)$$

$$\text{Và } dQ_t = \omega dM_t = \omega r dF_t = \omega r \tau_c dA \quad (3.41)$$

Trong đó  $dF_t$  là vi phân lực tác dụng,  $r$  là khoảng cách đến phân tố,  $dA$  là diện tích của phân tố,  $\tau_c$  là ứng suất cắt tiếp xúc trong vật liệu.

Biến trạng thái tiếp xúc  $\delta$  được giả thiết là thay đổi tuyến tính theo khoảng cách đến tâm dụng cụ, ta có:

$$\delta = 1 - \frac{V_m}{V_t} \quad (3.42)$$

Với  $V_m$  là vận tốc biên của vật liệu phôi và  $V_t$  là vận tốc biên của dụng cụ. Do đó, khi  $\delta=1$  thì không có vật liệu dính lên dụng cụ do đó tất cả lượng nhiệt tạo từ ma sát. Ngược lại,  $\delta=0$  thì nhiệt tạo thành hoàn toàn từ biến dạng dẻo.

Lượng nhiệt do ma sát và biến dạng vật liệu sinh ra trong phương trình 3.41 đối với ứng suất cắt tiếp xúc [20]:

$$T_{\text{cont}} = \begin{cases} \mu p, & \text{sự sinh nhiệt do ma sát} \\ \tau_y, & \text{sự sinh nhiệt do biến dạng vật liệu} \end{cases} \quad (3.43)$$

Với  $\mu$  là hệ số ma sát,  $p$  là áp lực tiếp xúc,  $\tau_{y\text{ield}}$  là (giới hạn cắt) độ bền chảy dẻo của vật liệu  $\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$  với  $\sigma_y$  là giới hạn chảy phụ thuộc vào nhiệt độ.

### 3.2.2 Nguồn nhiệt chuyển động

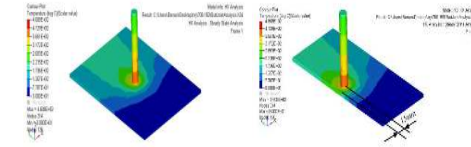
Như vậy tốc độ sinh nhiệt trên một đơn vị diện tích là hàm theo góc  $\theta$ :

$$q_1(\theta) = \eta[\delta\tau_y(\omega r - V\sin\theta) + (1-\delta)\mu p] \quad R_p \leq r \leq R_s \quad (3.57)$$

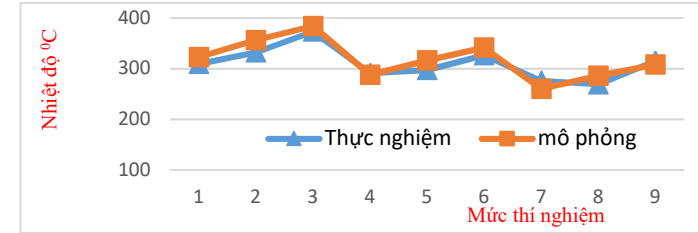
$$q_2(\theta) = \eta[\delta\tau_y(\omega R_p - V\sin\theta) + (1-\delta)\mu p] \quad r = R_p; 0 \leq h \leq H_p \quad (3.58)$$

$$q_3(\theta) = \eta[\delta\tau_y(\omega r - V\sin\theta) + (1-\delta)\mu p] \quad 0 \leq r \leq R_p \quad (3.59)$$

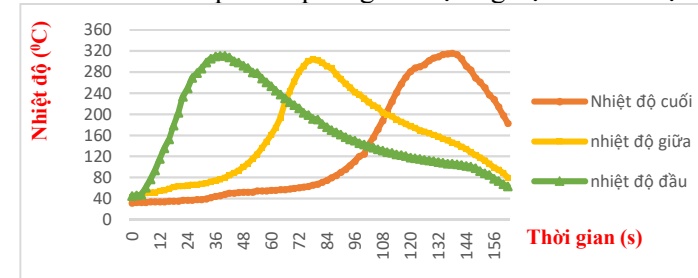
Với  $\eta$  là hệ số hiệu suất chuyển đổi năng lượng cơ thành nhiệt. Thông lượng nhiệt sẽ được tính trực tiếp tại mỗi nút với một góc  $\theta$  tương ứng.



Hình 4.20 Trường nhiệt độ với mỗi hàn 700 v/ph, 150 mm/ph



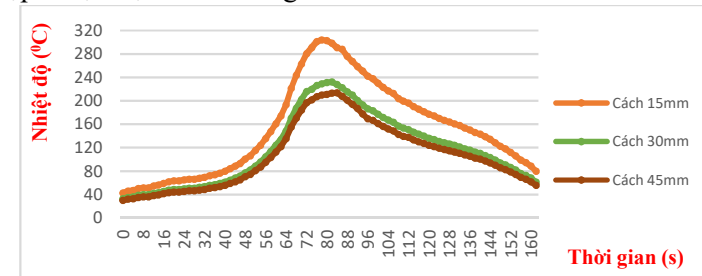
Hình 4.28 Kết quả mô phỏng và thực nghiệm đo bề mặt



Hình 4.29 Kết quả đo nhiệt độ tại 3 điểm song song với đường hàn theo thời gian

Tốc độ quay 900 v/ph tốc độ hàn 100 mm/ph

Quá trình thay đổi nhiệt độ tại các vị trí đầu, giữa và cuối đường hàn được ghi lại bằng cặp nhiệt điện K cho từng mỗi hàn:



Hình 4.30 Kết quả đo nhiệt độ theo khoảng cách so với tâm hàn

Tốc độ quay 900 v/ph tốc độ hàn 100 mm/ph



Hình 4.16 Bố trí cặp nhiệt điện tại 3 vị trí ( đầu, giữa, cuối) dọc theo đường hàn



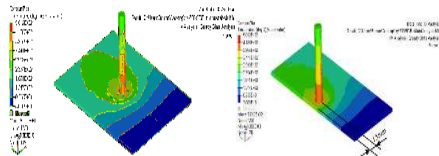
Hình 4.17 Bố trí cặp nhiệt điện tại 3 vị trí vuông góc với đường hàn

#### 4.5 Kết quả mô phỏng trường nhiệt độ và trường vận tốc

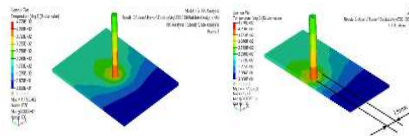
Kết quả mô phỏng trên hợp kim nhôm 6061 cho thấy nhiệt độ cao nhất xung quanh tâm hàn từ 300 – 600 °C so với nhiệt độ nóng chảy của nhôm 6061 là 582 - 652 °C.

##### 4.5.1 Kết quả đo nhiệt độ bề mặt bằng máy đo hồng ngoại

Máy đo nhiệt độ hồng ngoại ghi lại nhiệt độ tại biên vai trong suốt quá trình hàn. Kết quả được thu lại là giá trị nhiệt độ cao nhất tương ứng với từng môi hàn.



Hình 4.18 Trường nhiệt độ với môi hàn 700 v/ph, 50 mm/ph



Hình 4.19 Trường nhiệt độ với môi hàn 700 v/ph, 100 mm/ph

## CHƯƠNG 4 MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

### 4.1 Phương trình phần tử hữu hạn

Để giải quyết bài toán truyền nhiệt và dòng vật liệu trong hàn ma sát khuấy, ta sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn.

#### 4.1.1 Mô hình truyền nhiệt

Áp dụng phương pháp phần dư có trọng Galerkin cho phương trình điều khiển dạng thông thường là:

$$\int_{\Omega} \phi \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} \right\} d\Omega = 0 \quad (4.5)$$

#### 4.1.2 Mô hình dòng vật liệu

Phương pháp sai số được chọn lựa để đưa ra phương trình liên tục của thông số sai lệch là:

$$\frac{P}{\lambda} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.20)$$

Tiến hành rời rạc hóa các phần tử để viết phương trình bảo toàn động lượng dưới dạng tuyến tính theo 3 phương x, y, z.

#### 4.1.3 Mô hình tương tác cơ – nhiệt

Ngoài phương pháp động học lưu chất, trường vận tốc có thể thu được từ mô hình tương tác cơ nhiệt. Phương trình cân bằng lực là:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + \rho b_i &= 0, \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{ji} \end{aligned} \quad (4.54)$$

Với  $\sigma_{ij}$  là tensor ứng suất,  $b_i$  là lực khối,  $\rho$  là mật độ phân bố lực. Phương trình quan hệ cho mô hình nhiệt đàn dẻo được biểu diễn theo dạng ứng suất tăng theo biến dạng với phương pháp Lagrange.

Ứng suất chảy được tính toán thông qua mô hình phụ thuộc nhiệt độ và tốc độ biến dạng Zener-Hollomon [1].

$$Z = \exp \left( \frac{Q}{RT} \right); \quad \sigma = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left( \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right) \quad (4.64)$$

### 4.3 Mô phỏng quá trình hàn

#### 4.3.1 Sơ lược về các phần mềm phần tử hữu hạn

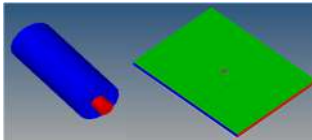
Có 2 phương pháp tiếp cận chính là:

Phương pháp cơ học vật rắn phần tử hữu hạn (FEM) với việc áp dụng mô hình tính toán Lagrangian.

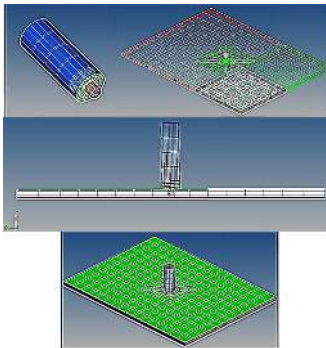
Phương pháp động lực học lưu chất (CFD) trên nền tảng thể tích hữu hạn (FVM) với việc áp dụng mô hình tính toán Eulerian.

#### 4.3.2 Mô phỏng quá trình hàn ma sát khuấy trên phần mềm HyperWork

Sử dụng các giả thiết sau: 90% năng lượng cơ được chuyển hóa thành năng lượng hàn. Các điều kiện biên trên đều được sử dụng các giả thuyết của Colegrove [16].



Hình 4.2 Dụng cụ và phôi hàn



Hình 4.3 Chia lưới cho mô hình

### 4.4 Thực nghiệm kiểm chứng mô hình nhiệt và mô hình cơ nhiệt

Kết quả mô phỏng sẽ được thực nghiệm kiểm chứng độ tin cậy từ đó sử dụng mô hình để dự đoán các kết quả về cơ nhiệt mà việc thực nghiệm và đo lường khó tiến hành.

Mục tiêu chính của mô hình thực nghiệm này là đo nhiệt độ trong suốt quá trình hàn ma sát khuấy trên hợp kim nhôm AA 6061 tại các vị trí xác định. Kết quả

thực nghiệm sẽ so sánh với giá trị tương ứng trong mô phỏng để đánh giá mô hình phần tử hữu hạn.

#### 4.4.1 Máy và các thông số hàn ma sát khuấy

Thí nghiệm được thực hiện trên máy phay CNC VP3000 công suất 7.5 HP và tốc độ quay lớn nhất 4000 vòng/phút (Hình 4.7).



Hình 4.7 Máy phay CNC

##### 4.4.1.1 Thí nghiệm đo nhiệt

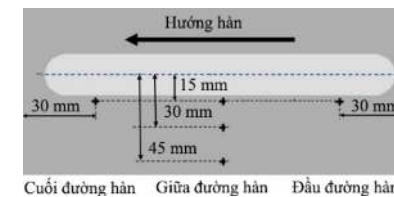
Giới hạn khả thi của các thông số sẽ được lựa chọn bằng cách quan sát các khuyết tật hàn hình thành trên các mẫu thử, vùng được chọn là vùng không có khuyết tật nhìn thấy.

##### 4.4.1.2 Bố trí thực nghiệm và phương pháp đo

Giá trị nhiệt độ được ghi lại theo thời gian hàn. Hình 4.14 đến hình 4.17 biểu diễn vị trí lắp cặp nhiệt điện:



Hình 4.14 Bố trí máy đo nhiệt dọc theo đường hàn



Hình 4.15 Sơ đồ bố trí cặp nhiệt điện đo nhiệt độ bên trong phôi