

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

HỒ THỊ MỸ NỮ

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH CỦA MÔI HÀN MA SẮT QUAY HỢP KIM
TITAN VÀ TỐI ƯU CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí
Mã số chuyên ngành: 62520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2021

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn 1: PGS.TS Nguyễn Hữu Lộc

Người hướng dẫn 2: TS. Lưu Phương Minh

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

GIỚI THIỆU

1. Tính cấp thiết của luận án

Ti6Al4V là một trong những hợp kim titan được sử dụng rộng rãi, chiếm khoảng 45% tổng sản lượng titan tiêu thụ trong công nghiệp. Ti6Al4V là vật liệu nhẹ, bền được sử dụng rộng rãi trong máy bay, thiết bị hàng không vũ trụ và nhiều lĩnh vực khác chẳng hạn như linh kiện xe hơi, dụng cụ y tế, và các ngành công nghiệp trang trí. Trước đây, một khối vật liệu titan hoặc hợp kim titan lớn được sử dụng để gia công các chi tiết máy thông qua các quá trình cắt gọt vật liệu. Tuy nhiên, kỹ thuật gia công này gây ra sự lãng phí đáng kể vì phần lớn nguyên liệu bị loại bỏ trong quá trình gia công. Để giảm thiểu chi phí, các kết cấu được chế tạo từ phương pháp hàn rất được quan tâm, tuy nhiên, việc hàn nóng chảy các hợp kim titan độ bền cao thường dẫn đến cơ tính kém. Hàn ma sát là phương pháp tiềm năng để đạt được đặc tính cơ học. Bên cạnh đó, để hàn các chi tiết trụ đặc (ví dụ như trục của tua bin khí của máy bay) thì các phương pháp hàn truyền thống là không phù hợp. Hiện nay, các nghiên cứu về hàn ma sát quay Ti6Al4V được công bố còn rất ít và chưa được báo cáo một cách tổng thể về sự tác động của các thông số công nghệ đến cơ tính mối hàn trong các nghiên cứu thực nghiệm. Hơn nữa, việc sử dụng phần mềm để mô phỏng số quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V còn hạn chế. Quá trình mô phỏng số nhằm xác định sự ảnh hưởng của các thông số quá trình đến cơ tính mối hàn một cách linh hoạt để tiết kiệm chi phí thực nghiệm.

2. Mục tiêu của luận án

Nghiên cứu đặc điểm và tính chất của mối hàn ma sát quay hợp kim Ti6Al4V, ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính đến chất lượng mối hàn và từ đó tìm ra miền thông số làm việc phù hợp đảm bảo chất lượng mối hàn.

3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu tổng hợp lý thuyết công nghệ hàn ma sát quay, mô hình hóa quá trình sinh nhiệt, ứng xử cơ - nhiệt của vật liệu, lý thuyết biến dạng dẻo bằng phần mềm CAE, phương pháp thử nghiệm cơ tính, phân tích tổ chức tế vi của mối hàn,

phương pháp quy hoạch thực nghiệm tìm các giá trị thông số công nghệ tối ưu. Trên cơ sở kết hợp các phương pháp nghiên cứu: Lý thuyết - Mô phỏng - Thực nghiệm để xác định bộ thông số tối ưu cho quá trình hàn ma sát quay.

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

4.1 Ý nghĩa khoa học

Luận án đã xác định được qui luật quan hệ ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn đến cơ tính của mối hàn ma sát quay hợp kim titan Ti6Al4V. Kết quả của luận án cho thấy rằng phương pháp hàn ma sát quay là phương pháp hàn phù hợp để hàn vật liệu hợp kim titan Ti6Al4V vốn dĩ khó thực hiện hàn bằng phương pháp hàn nóng chảy.

4.2 Ý nghĩa thực tiễn

Các kết quả và kết luận nhận được từ thực nghiệm là cơ sở ban đầu cho việc tiếp tục triển khai nghiên cứu và áp dụng công nghệ hàn ma sát hợp kim Ti6Al4V vào thực tiễn nhằm mở rộng phạm vi ứng dụng của hợp kim titan Ti6Al4V.

5. Các điểm mới của luận án

5.1 Luận án đã xây dựng được mô hình số để mô phỏng quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V sử dụng phần mềm CAE. Kết quả đạt được từ mô phỏng số giúp xác định vùng ảnh hưởng của các thông số hàn đến nhiệt độ, biến dạng và ứng suất của mối hàn ma sát quay. Nó góp phần giảm chi phí nghiên cứu khi giảm thiểu phần lớn các thực nghiệm.

5.2 Luận án đã khảo sát cơ tính của mối hàn theo hai phương hướng tâm và dọc trục, kết quả nghiên cứu chứng tỏ rằng mối hàn ma sát quay có cơ tính không đồng nhất giữa các điểm trong mối hàn và đưa ra giải pháp để giảm thiểu sự không đồng đều của mối hàn.

5.3 Luận án xác định được miền thông số làm việc đảm bảo chất lượng mối hàn ma sát quay hợp kim Ti6Al4V.

6 Nội dung nghiên cứu

Chất lượng của mỗi hàn ma sát có liên quan chặt chẽ đến các thông số quá trình, để các sản phẩm hàn đạt chất lượng, các thông số quá trình cần phải được xem xét và tối ưu hóa. Điều này thường được thực hiện thông qua thực nghiệm, phương pháp thực nghiệm có hiệu quả nhưng chi phí cao, đặc biệt đúng cho hàn siêu hợp kim. Vì vậy, luận án đã tiến hành nghiên cứu các nội dung sau:

Nội dung 1, luận án nghiên cứu xây dựng mô hình số cơ - nhiệt dùng để mô phỏng quá trình hàn ma sát quay nhằm dự báo nhiệt độ, ứng suất, độ rộng vùng chịu ảnh hưởng nhiệt. Kết quả mô phỏng số được đưa ra trong nội dung là cơ sở để lựa chọn các thông số công nghệ hàn cho quá trình hàn ma sát quay.

Nội dung 2, luận án nghiên cứu thực nghiệm và phân tích tổ chức tế vi của mỗi hàn ma sát quay và kiểm tra các cơ tính của mỗi hàn ma sát như độ cứng, độ bền kéo và độ dai va đập của mỗi hàn. Từ kết quả thực nghiệm này, luận án sẽ xác định qui luật quan hệ ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn đến cơ tính của mỗi hàn ma sát quay hợp kim titan Ti6Al4V.

Nội dung 3, luận án đưa ra bộ thông số công nghệ phù hợp cho quá trình hàn ma sát quay đối với Ti6Al4V được xác định thông qua phương pháp qui hoạch thực nghiệm.

CHƯƠNG I NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ HÀN MA SÁT VÀ VẬT LIỆU Ti6Al4V

1.1. Nguyên lý hàn ma sát quay

Đây là quá trình biến đổi cơ năng thành nhiệt năng. Một chi tiết được kẹp chặt và quay quanh trục của nó trong khi chi tiết hàn khác được kẹp chặt và không quay nhưng di chuyển theo phương dọc trục để tiếp xúc với chi tiết quay. Chi tiết sẽ ngừng quay khi đạt đến nhiệt độ dưới nhiệt độ nóng chảy của vật liệu và tiếp tục tác động lực ép để hàn. Trong quá trình đó nhiệt được tạo ra do ma sát và được tập trung cục bộ tại bề mặt tiếp xúc, cấu trúc hạt được kết tinh lại trong quá trình gia công nóng.

1.2. Cơ chế hàn ma sát quay

Chu kỳ hàn có thể được chia thành hai giai đoạn: giai đoạn cọ xát hoặc gia nhiệt và giai đoạn hàn. Nhiệt hàn được sinh ra trong giai đoạn đầu và mối hàn hình thành và nguội trong giai đoạn thứ hai của quá trình hàn.

1.3. Các thông số cơ bản của quá trình hàn ma sát quay

Ba thông số quan trọng là tốc độ quay, áp lực hàn và thời gian gia nhiệt có ảnh hưởng riêng hoặc là sự kết hợp giữa chúng để tạo ra mối hàn kim loại cơ bản.

1.4. Tình hình nghiên cứu trên thế giới và trong nước về hàn ma sát Ti6Al4V

Tình hình nghiên cứu trên thế giới: rất nhiều các công trình nghiên cứu về hàn ma sát quay kim loại và hợp kim titan đã công bố trong nhiều năm qua, phần nhiều trình bày kết quả đạt được mà chưa phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ. Đặc biệt, sự khác biệt cơ tính theo phương hướng tâm trong mối hàn ma sát quay hợp kim titan sẽ cản trở ứng dụng của phương pháp hàn ma sát quay. Mặc dù, xét toàn cục mối hàn có thể đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đang ứng dụng, nhưng tồn tại các vị trí cục bộ trong mối hàn không đáp ứng được tiêu chuẩn của ứng dụng đó [45]. Vì vậy, khảo sát cơ tính mối hàn theo phương hướng tâm nhằm xác định được vị trí không đồng đều về cơ tính của mối hàn và đưa ra giải pháp để hạn chế sự không đồng đều này là cần thiết. Bên cạnh đó, mô phỏng số là công

cụ tính toán mạnh và phù hợp để mô phỏng quá trình hàn ma sát phức tạp. Nó là công cụ hữu ích để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng mối hàn. Nhưng mô hình số chưa cung cấp một đánh giá trọn vẹn về kết quả hàn ma sát của hợp kim titan như khả năng hàn của hợp kim titan, độ bền kéo của mối hàn, sự thay đổi tổ chức tế vi và phân bố độ cứng, mà các đặc tính này cần phải định lượng thông qua thực nghiệm.

Các nghiên cứu trong nước: Đã có một số các công trình nghiên cứu về hàn ma sát của các nhà nghiên cứu trong nước công bố trong thời gian gần đây. Tuy nhiên, vấn đề nghiên cứu hàn ma sát quay hợp kim titan Ti6Al4V vẫn còn khá mới mẻ với tình hình nghiên cứu trong nước.

Kết luận chương 1

Phương pháp hàn ma sát là phương pháp hàn đầy hứa hẹn có thể được sử dụng để gia công và chế tạo các thành phần, bộ phận trong các ứng dụng hàng không vũ trụ dùng vật liệu titan Ti6Al4V nói riêng và các sản phẩm công nghiệp khác nói chung. Trên cơ sở tổng hợp nghiên cứu trên, nội dung nghiên cứu của luận án được chia thành 3 phần chính như sau:

1. Mô phỏng số quá trình hàn ma sát quay để xác định được ảnh hưởng của các thông số quá trình như tốc độ quay, thời gian gia nhiệt, áp lực hàn đến trường phân bố nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của chi tiết được khảo sát.
2. Xác định ảnh hưởng của các thông số quá trình đến cơ tính mối hàn ma sát quay được khảo sát thực nghiệm và so sánh kết quả với phần mô phỏng.
3. Xác định bộ thông số tối ưu của quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V và kiểm tra cơ tính của mẫu hàn trong bộ thông số tối ưu.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Nguyên lý sinh nhiệt trong hàn ma sát quay

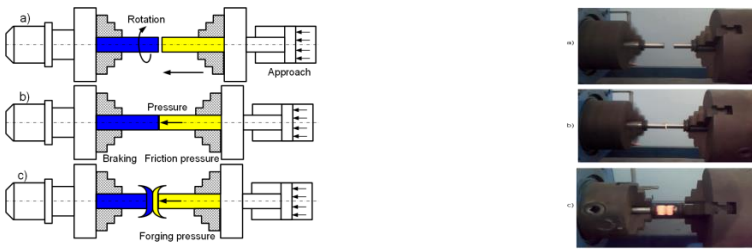
Hàn ma sát là một quá trình hàn trạng thái rắn. Nó liên quan đến cả nhiệt độ làm nóng và biến dạng dẻo của vật liệu gốc dưới tốc độ biến dạng và nhiệt độ mãnh liệt. Nhiệt đầu vào trung bình trên một đơn vị diện tích và thời gian được tính là

$$\frac{q_0}{A} = \frac{1}{A} \int_0^{Mr} \mu P v dA = \frac{1}{A} \int_0^R \mu P v_{max} \frac{r}{R} 2\pi r dr = \frac{2}{3} \mu P v_{max} \quad (2.4)$$

Trong đó q_0 là công suất nhiệt (W), P là áp lực (N/mm²), A là diện tích mặt cắt (mm²), v_{max} là vận tốc dài lớn nhất (m/s) và μ là hệ số ma sát.

2.2. Cơ chế hàn ma sát quay

Chu kỳ hàn có thể được chia thành hai giai đoạn: giai đoạn cọ xát hoặc ma sát và giai đoạn rèn. Nhiệt hàn được phát sinh ra trong giai đoạn đầu và mối hàn hình thành và làm nguội trong giai đoạn thứ hai của quá trình hàn. Các bước cơ bản của hàn ma sát quay được minh họa trong Hình 2.1 và Hình 2.2.



Hình 2. 1 Sơ đồ các pha hàn ma sát quay Hình 2. 2 Các giai đoạn hàn ma sát quay thực tế
a) Giai đoạn chuẩn bị (phôi 1 quay); b) Giai đoạn gia nhiệt; c) Giai đoạn hàn

2.3. Đặc trưng mối hàn ma sát Ti6Al4V

2.3.1 Vùng hàn

Vùng hàn gồm vùng hàn trung tâm (CWZ), vùng ảnh hưởng nhiệt cơ học (TMAZ) và vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) trước khi đến vùng vật liệu gốc (PM).

2.3.2 Độ rộng của vùng hàn

Độ rộng vùng hàn được định nghĩa là khoảng cách giữa giao diện mỗi hàn và cạnh ngoài cùng của HAZ. Các mối hàn quán tính xuất hiện dưới dạng đường cong, với vùng hàn tại bề mặt vật liệu dày hơn so với vùng hàn tại trung tâm. Đặc trưng của mối hàn Ti6Al4V: Ti6Al4V có tính dẫn nhiệt kém nên vùng hàn và độ rộng vùng hàn rất nhỏ so với các kim loại khác.

2.4. Cơ tính của mối hàn ma sát quay

2.4.1 Độ cứng tế vi

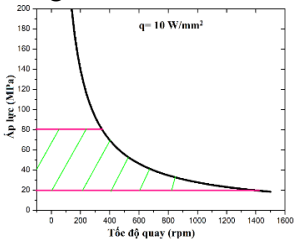
Kết quả đo độ cứng cho thấy rằng có sự chênh lệch khá lớn về độ cứng tế vi giữa vùng bên trong và bên ngoài của mối hàn.

2.4.2 Độ bền kéo

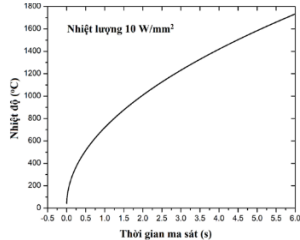
Vùng hàn có độ bền kéo cao hơn so với vật liệu gốc trong Ti6246 và các mẫu thử kéo luôn bị đứt gãy tại vùng vật liệu gốc cách xa vùng hàn. Sự tăng độ bền kéo trong vùng hàn là cấu trúc vi mô rất mịn do sự kết tinh lại.

2.5. Dãy thông số công nghệ hàn ma sát cho vật liệu Ti6Al4V

Để đưa ra thông số công nghệ hàn phù hợp, luận án tham khảo các thông số công nghệ của các công trình nghiên cứu trước đây như đã trình bày trong Bảng 2.1. Với công suất nhiệt là 10 W/mm² thì sau thời gian gia nhiệt từ 4 s đến 6 s thì nhiệt độ tại mặt tiếp xúc của hợp kim titan Ti6Al4V có thể đạt tới 1 400 °C đến 1 650 °C (Hình 2.7) là có thể đạt đến nhiệt độ để hàn ma sát, luận án đề xuất khoảng thông số về hàn ma sát dùng cho mô phỏng số và thực nghiệm trong luận án như Bảng 2.2:



Hình 2.6 Quan hệ giữa áp lực và tốc độ quay trên nhiệt lượng



Hình 2.7 Nhiệt độ tại mặt tiếp xúc (z=0) theo thời gian

Bảng 2.2 Dãy thông số công nghệ hàn ma sát dùng trong luận án

Các thông số công nghệ	Dãy giá trị
Tốc độ quay	(1 200 – 1 500) rpm
Thời gian gia nhiệt	(4 – 6) s
Áp lực gia nhiệt	(30 – 40) MPa
Áp lực hàn	(42,5 – 80) MPa

Kết luận chương 2

Hàn ma sát là phương pháp hàn ở trạng thái rắn khi mà nhiệt độ trong quá trình hàn chưa đạt đến nhiệt độ nóng chảy của vật liệu. Trong giai đoạn gia nhiệt, lớp vật liệu tại giao diện hàn bị cọ xát và trượt ra ngoài. Đồng thời, dưới tác động của áp lực hàn các phân tử được khuếch tán qua giao diện hàn tạo nên mối hàn ma sát quay. Hơn nữa, phần vật liệu bên ngoài vùng ảnh hưởng hàn chưa bị mềm hóa có vai trò định hướng dòng vật liệu bị biến dạng dẻo. Sự thay đổi trường nhiệt và trường ứng suất trong chi tiết hàn làm thay đổi mãnh liệt tổ chức tế vi của vật liệu, đặc biệt là đối với vật liệu Ti6Al4V, tạo nên tổ chức tế vi hai pha. Các thông số công nghệ của quá trình hàn như tốc độ quay, áp lực ép có ảnh hưởng lớn đến quá trình sinh nhiệt và biến dạng mãnh liệt vật liệu. Việc nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hàn ma sát đến tổ chức tế vi của vật liệu và các cơ tính của mối hàn ma sát là rất quan trọng để nâng cao chất lượng mối hàn.

CHƯƠNG 3 MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH HÀN MA SÁT QUAY

3.1 Mô hình số mô phỏng hàn ma sát quay hợp kim Ti6Al4V

Hàn ma sát quay là một quá trình vật lý phức tạp. Cả hai quá trình truyền nhiệt và cơ học diễn ra trong quá trình hàn ma sát quay đều có tính phi tuyến mạnh. Để quá trình mô phỏng số trở nên đơn giản, thông thường một số giả định được đề xuất để đơn giản hóa mô hình số. Trong mô phỏng số quá trình hàn ma sát, mật độ lưới được sử dụng phải đủ nhỏ để loại bỏ hiệu ứng nguồn nhiệt không đồng đều giữa các phần tử hình học. Tùy thuộc vào độ chính xác của kết quả mô phỏng, hiện tượng đối lưu có thể xuất hiện trong các phương trình cơ - nhiệt. Các giả định này được khai báo trong môi trường ABAQUS khi thực hiện mô phỏng số quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V.

3.2 Mô hình phần tử hữu hạn

Mẫu chi tiết hàn có chiều rộng 18 mm và chiều dài 40 mm như được trình bày. Phần bên trái được cố định trong khi phần bên phải quay quanh trục và ép vào chi tiết bên trái. Mô hình hình học được chia lưới tự do. Trong mô hình này, phần tử lưới cơ - nhiệt 8 nút bậc nhất được sử dụng. Số phần tử sử dụng trong mô hình là 104 288 phần tử. Kỹ thuật lưới thích nghi ALE được Abaqus/Standard 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.

3.3 Mô hình vật liệu trong luận án

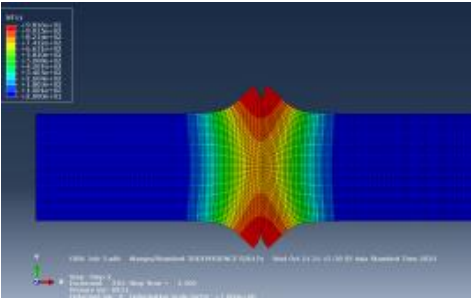
Mô hình vật liệu JC đã được các nhà nghiên cứu sử dụng để mô phỏng quá trình hàn ma sát thành công cho các dạng vật liệu khác nhau [57]. Đối với hợp kim Ti6Al4V thì mô hình vật liệu JC đã được các nhà nghiên cứu sử dụng để mô phỏng cho quá trình LFW, các tài liệu tham khảo cho thấy mô hình vật liệu JC là mô hình phù hợp cho quá trình hàn phức tạp như quá trình RFW.

3.4 Kết quả mô phỏng hàn ma sát quay Ti6Al4V

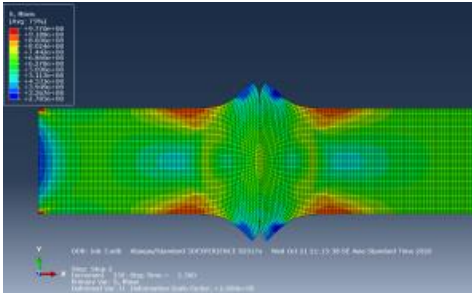
Sử dụng phần mềm ABAQUS được để mô phỏng quá trình hàn ma sát quay hợp kim titan Ti6Al4V và sử dụng mô hình vật liệu Jonhson-Cook. Các

phương trình nhiệt độ, ma sát, biến dạng dẻo được xem xét trong quá trình mô phỏng. Kỹ thuật chia lưới động cập nhật theo độ biến dạng được vận hành để thích nghi với biến dạng lớn xảy ra trong mô phỏng.

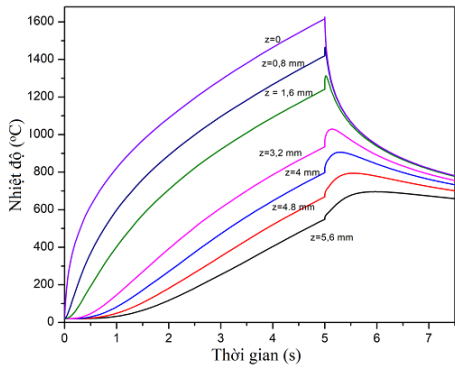
Các điều kiện biên về chuyển vị, áp lực, vận tốc quay và thời gian gia nhiệt trong mô hình này là một chi tiết được cố định tất cả các bậc tự do. Chi tiết còn lại thì tự do di chuyển theo phương dọc trục. Kết quả mô phỏng cho thấy tính đối xứng về phân bố nhiệt và ứng suất trên các chi tiết hàn. Các kết quả của quá trình hàn ma sát quay sẽ được trình bày như sau:



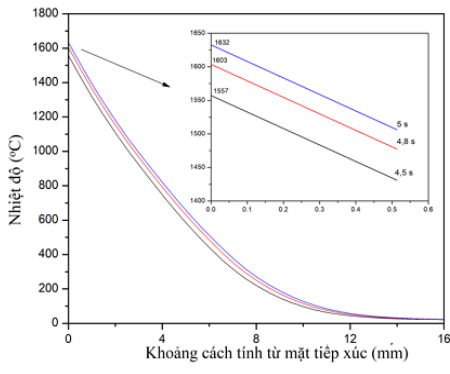
Hình 3.5 Kết quả mô phỏng về phân bố nhiệt



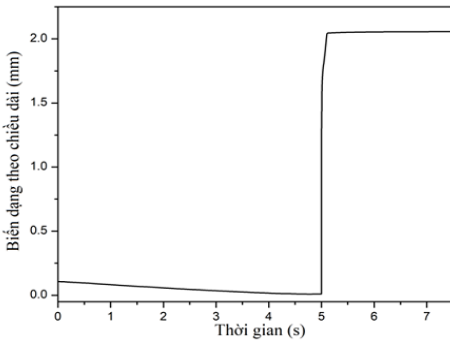
Hình 3.6 Kết quả mô phỏng về phân bố ứng suất von-Mises



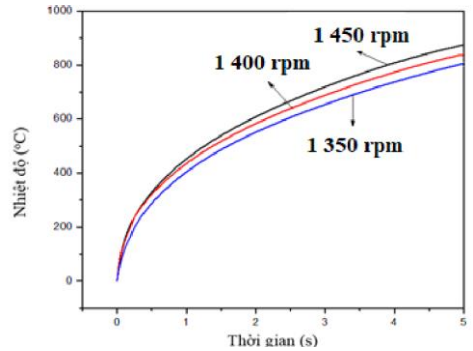
Hình 3.9 Sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí khác nhau



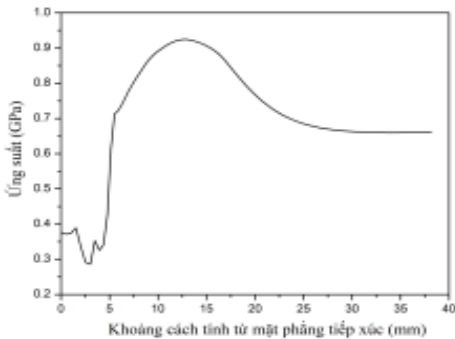
Hình 3.10 Ảnh hưởng của thời gian ma sát đến nhiệt độ



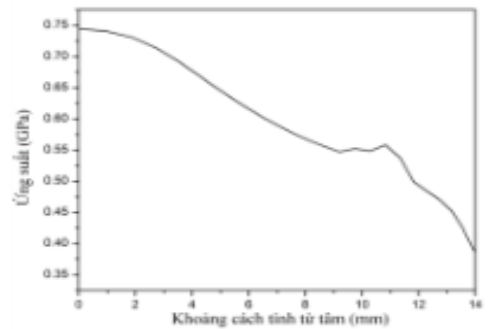
Hình 3.11 Sự rút ngắn chiều dài chi tiết hàn



Hình 3.14 Số vòng quay ảnh hưởng lên tốc độ tăng nhiệt



Hình 3.16 Phân bố ứng suất theo chiều dài của chi tiết



Hình 3.17 Phân bố ứng suất theo phương hướng tâm của chi tiết

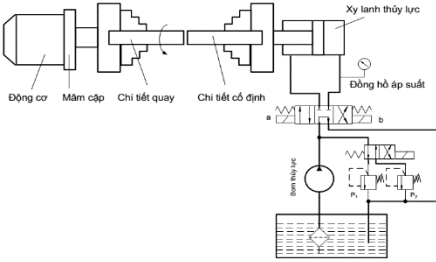
3.6 Kết luận chương 3

Mô phỏng số được thực hiện để đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V. Kết quả của quá trình mô phỏng trong Chương 3 đã dự đoán được sự phân bố nhiệt độ và ứng suất trong vùng hàn. Tuy nhiên, các mô hình số chưa xét đến cơ tính của mỗi hàn như độ bền kéo, độ dai va đập, độ cứng tế vi và tổ chức tế vi, sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn ma sát quay đến độ bền kéo, độ dai va đập, độ cứng tế vi và tổ chức tế vi của mỗi hàn. Như vậy để đánh giá được trọn vẹn về chất lượng của mỗi hàn, luận án đã tiến hành các thực nghiệm và phân tích trong chương tiếp theo.

CHƯƠNG 4 THỰC NGHIỆM HÀN MA SẮT VÀ TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ

4.1 Phân tích thực nghiệm xác định qui luật ảnh hưởng của các thông số công nghệ đế cơ tính mối hàn

4.1.1 Chuẩn bị mẫu và thiết bị



Hình 4.5 Sơ đồ nguyên lý máy hàn ma sắt

Bảng 4.1 Thành phần hóa học của Ti6Al4V

Al (wt. %)	V (wt. %)	O (wt. %)	Fe (wt. %)	C (wt. %)	N ₂ (wt. %)	H ₂ (wt. %)	Y (wt. %)	B (wt. %)	Ti (wt. %)
3.5-6.75	3.5-4.5	0.17*	0.30	0.1	0.03	0.01	0.1	0.001	remainder
		0.23	Max	Max	Max	Max	Max	Max	



Hình 4.1 Mẫu hàn

4.1.2 Kết quả và thảo luận

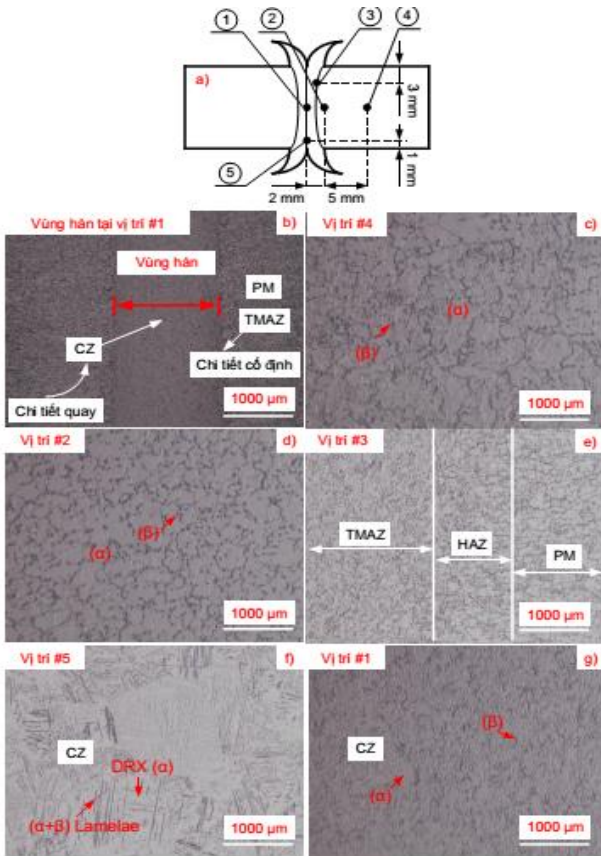
4.1.2.1 Nhiệt độ hàn

Để hàn ma sắt thành công, nhiệt độ phải nằm trong khoảng 800 °C và 1 000 °C [34-37]. Hình 4.7 trình bày hình ảnh chụp nhiệt độ dùng máy đo nhiệt hồng ngoại tại thời điểm $t = 2$ s với các thông số hàn ma sắt là: tốc độ quay là 1 500 rpm và áp lực trong giai đoạn gia nhiệt là 50 MPa, còn trong giai đoạn hàn là 85 MPa. Tại thời điểm $t = 2$ s, nhiệt độ cao nhất đo được tại giao diện hàn là 976 °C. Kết quả này cũng khá tương đồng với kết quả mô phỏng.



Hình 4.7 Nhiệt độ tại thời điểm $t = 2$ s tại giao diện hàn

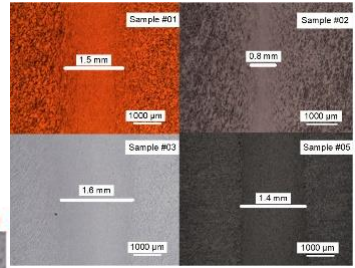
4.1.2.2 Tổ chức tế vi: Mẫu mối hàn số 03 được sử dụng làm đại diện để khảo sát những thay đổi về tổ chức tế vi trong mối hàn ma sắt. Tổ chức tế vi của mối hàn được kiểm tra tại các điểm 1, 2, 3, 4 và 5, như trong Hình 4.8.



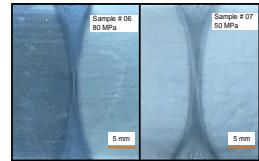
Hình 4.8 Tổ chức tế vi tại các vị trí khác nhau trong vùng hàn

4.1.2.3 Ảnh hưởng của các thông số hàn ma sát đến cơ tính của mối hàn:

Ảnh hưởng của thời gian gia nhiệt và tốc độ quay đến chiều rộng của các mối hàn. Kết quả trên Hình 4.9 cho thấy mẫu hàn # 02 với thời gian gia nhiệt 4 s có chiều rộng mối nối là 0,8 mm và mẫu hàn # 01 với thời gian gia nhiệt là 4,5 s có chiều rộng là 1,5 mm. Để khảo sát tác động của áp lực hàn lên bề rộng mối hàn, hai mẫu hàn, # 06 và # 07 Hình 4.10, được nghiên cứu và phân tích. Cả hai mẫu hàn đều có cùng các thông số về tốc độ quay, áp lực gia nhiệt và thời gian gia nhiệt lần lượt là 1 500 rpm, 30 MPa và 6 s. Mẫu hàn số #06 được chế tạo với áp lực hàn là 80 MPa và mẫu hàn số 07 được chế tạo với áp lực hàn là 50 MPa.



Hình 4.9 Ảnh hưởng của thời gian gia nhiệt và tốc độ quay đến chiều rộng của mối hàn



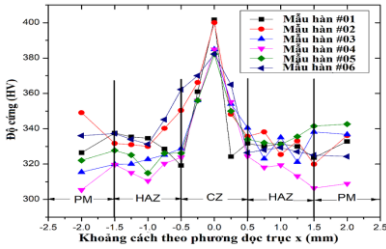
Sự thay đổi độ rộng mối hàn theo áp lực chôn



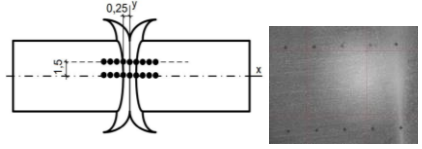
Sự thay đổi chiều dài chi tiết hàn

Hình 4.10 Ảnh hưởng của áp lực hàn đến chiều rộng mối hàn

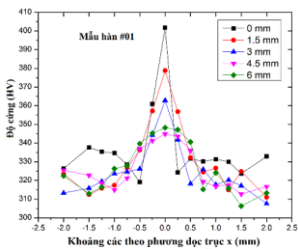
4.1.2.4 Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ cứng vi mô



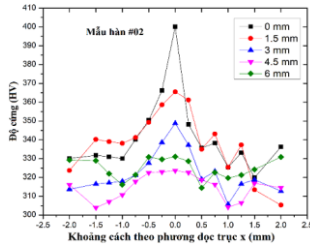
Hình 4.12 Độ cứng theo trục x



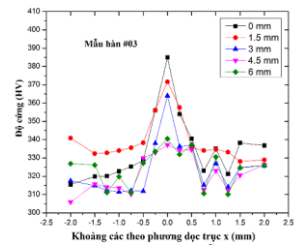
Hình 4.11 Các vị trí được sử dụng để đo độ cứng HV trong các môi hàn



a) Độ cứng đo được của mẫu hàn #01

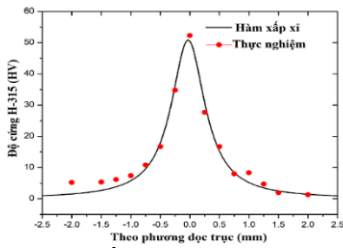


b) Độ cứng đo được của mẫu hàn #02

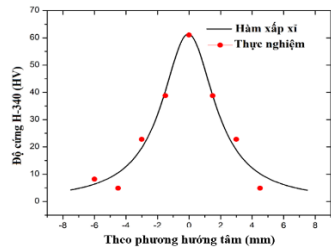


c) Độ cứng đo được của mẫu hàn #03

Hình 4.13 Độ cứng được đo theo phương hướng tâm x



Hình 4.14 Mối quan hệ giữa độ cứng và vị trí đi qua tâm



Hình 4.15 Mối quan hệ giữa độ cứng vào vị trí theo phương hướng tâm

Hàm xấp xỉ mô tả sự phụ thuộc độ cứng vào vị trí theo phương dọc trục:

$$H = 315 + (0,0196763 + 0,162842(x + 0,030168)^2)^{-1} \quad (4.1)$$

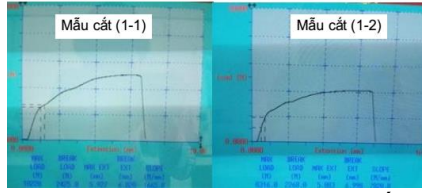
Hàm phụ thuộc độ cứng vào vị trí phương hướng tâm:

$$H = 340 + (0,0162894 + 0,00395765(y + 0,047027)^2)^{-1} \quad (4.2)$$

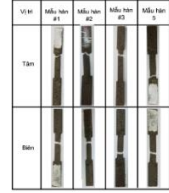
4.2.5 Ảnh hưởng của các thông số kỹ thuật đến độ bền kéo



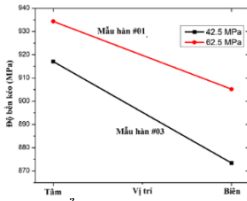
Hình 4.17 Các mẫu thử nghiệm độ bền kéo



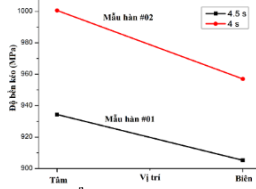
Hình 4.18 Đường cong ứng suất-biến dạng mỗi hàn trong mẫu số 01



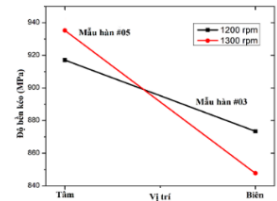
Hình 4.19 Vị trí mặt gãy các lát cắt ở giữa và các lát cạnh



a) Ảnh hưởng của áp lực hàn

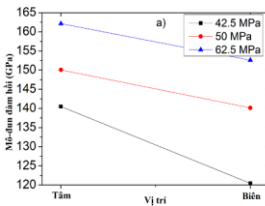


b) Ảnh hưởng của thời gian gia nhiệt



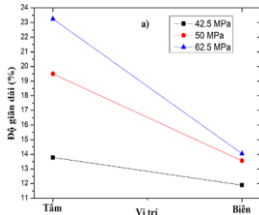
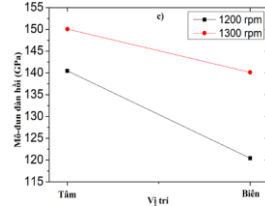
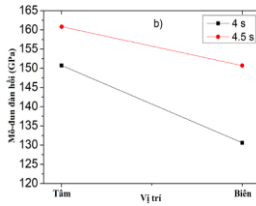
c) Ảnh hưởng của số vòng quay

Hình 4.21 Ảnh hưởng của thông số hàn ma sát lên độ bền kéo



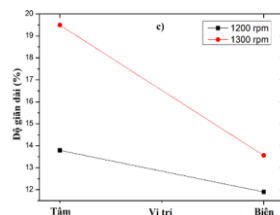
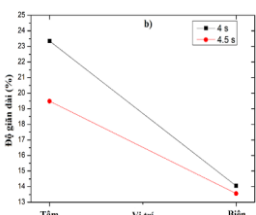
Hình 4.22. Ảnh hưởng của thông số hàn ma sát lên mô đun đàn hồi

a) Ảnh hưởng của áp lực chèn; b) Ảnh hưởng của thời gian ma sát; c) Ảnh hưởng của số vòng quay



Hình 4.23 Ảnh hưởng của thông số hàn ma sát lên độ giãn dài

a) Ảnh hưởng của áp lực hàn; b) Ảnh hưởng của thời gian gia nhiệt; c) Ảnh hưởng của tốc độ quay



4.2 Qui hoạch thực nghiệm

Luận án sử dụng án sủa thực nghiệm để làm giảm chiều dài của các bộ phận được hàn. Các cấu trúc tế vi khác nhau trong các khu vực hàn do sự khác biệt về sự thay đổi của nhiệt độ. Nội dung trong Chương 4 đã khảo sát được sự ảnh hưởng của các thông số công ớc của đồ thị, và các nhân tố ảnh hưởng nhiều nhất cũng như ít nhất. Trên cơ sở thực nghiệm được thiết kế theo phương pháp Taguchi với ba mức giá trị, và trong luận án thực hiện thêm 02 thí nghiệm ở tâm và thu được phương trình hồi quy bậc hai. Sự kết hợp giữa phương pháp Taguchi và phương trình hồi quy bậc hai cần tổng cộng 11 thực nghiệm là ít hơn số thực nghiệm trong trường hợp sử dụng thuần túy phương pháp qui hoạch bậc hai đơn thuần [68], có phân tích, đánh giá phương trình hồi quy thu được theo các tiêu chuẩn thống kê. Lợi ích của phương trình hồi quy là nó cung cấp miền thông số công nghệ hợp lý và tối ưu để đạt được mức đầu ra chấp nhận được. Lưu ý rằng các thực nghiệm thực hiện để qui hoạch có thể không hoàn toàn giống các thực nghiệm để phân tích các ảnh hưởng các thông số công nghệ mà luận án đã trình bày trong phần trước. Các thực nghiệm qui hoạch cần tuân thủ các qui luật quy hoạch thực nghiệm để đảm bảo tính hội tụ của kết quả phân tích. Luận án này đã hoàn thành các thực nghiệm theo phương pháp Taguchi trên cơ sở dãy thông số các thông số công nghệ hàn đã kiểm nghiệm bởi các nội dung trước của luận án.

4.2.1 Phương pháp Taguchi

Trên cơ sở đánh giá ảnh hưởng riêng lẻ các nhân tố, quá trình này có thể tìm ra được tổ hợp các nhân tố công nghệ tối ưu cho kết quả đặc tính đầu ra mong muốn. Do một nhân tố có ba mức độ sẽ cho hai bậc tự do và trên Bảng 4.5 trình bày các nhân tố đầu vào. Bảng ma trận trực giao theo phương pháp Taguchi được trình bày trong Bảng 4.5. Trên mỗi thực nghiệm ta tiến hành $n = 3$ thí nghiệm lặp, giá trị kết quả thực nghiệm của ma trận trực giao L9 và xác định giá trị trung bình 3 lần lặp như được trình bày như Bảng 4.6.

Phân tích tỉ lệ S/N: Kết quả của các thí nghiệm hàn ma sát được nghiên cứu bằng cách sử dụng S/N và ANOVA. Dựa trên các phân tích ANOVA và tỉ lệ S/N các nhân tố tối ưu quá trình hàn ma sát được xác định và được kiểm tra bằng thực

nghiệm. Bảng đáp ứng cho các nhân tố và giá trị phản hồi được hiển thị trong Bảng 4.7.

Bảng 4.5 Bảng mức giá trị các nhân tố

STT	Nhân tố	Ký hiệu tự nhiên	Ký hiệu mã hóa	Mức dưới 1	Mức cơ sở 2	Mức trên 3	Khoảng thay đổi
1	Tốc độ quay, (rpm)	n	A	1 200	1 350	1 500	150
2	Thời gian gia nhiệt,(s)	t	B	4	5	6	1
3	Áp lực hàn, (MPa)	p	C	45	62,5	80	17,5

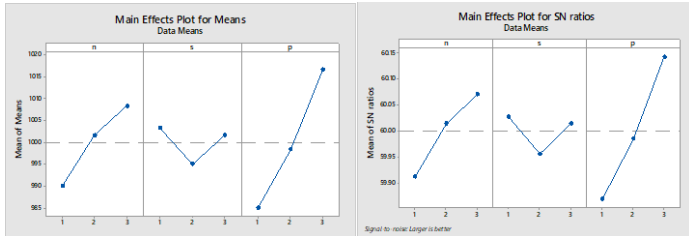
Bảng 4.6 Bảng ma trận quy hoạch L9 và kết quả thực nghiệm

N	Mã hóa			Tự nhiên			Kết quả đo độ bền kéo			
	A	B	C	Tốc độ quay n, (rpm)	Thời gian gia nhiệt t, (s)	Áp lực hàn p, (MPa)	Mẫu 1 y ₁ , (MPa)	Mẫu 2 y ₂ , (MPa)	Mẫu 3 y ₃ , (MPa)	Giá trị trung bình, (MPa)
1	1	1	1	1 200	4	45	978	981,0	982	980,33
2	1	2	2	1 200	5	62,5	982	986,0	987	985
3	1	3	3	1 200	6	80	1 002	1 004,0	1 007	1 004,33
4	2	1	2	1 350	4	62,5	1 002	1 001,0	997	1 000
5	2	2	3	1 350	5	80	1 016	1 009,0	1 020	1 015
6	2	3	1	1 350	6	45	990	991,0	989	990
7	3	1	3	1 500	4	80	1 029	1 031,2	1 029	1 029,73
8	3	2	1	1 500	5	45	978	986,0	993	985,66
9	3	3	2	1 500	6	62,5	1 008	1 014,0	1 008	1 010

Hình 4.24 trình bày đồ thị biểu diễn mức độ ảnh hưởng của các nhân tố công nghệ đến độ bền kéo đạt được khi sử dụng phương pháp Taguchi. Nó cho thấy mức độ ảnh hưởng của các yếu tố qua độ dốc của đồ thị, và các nhân tố ảnh hưởng nhiều nhất cũng như ít nhất. Đồ thị cho thấy rằng áp lực hàn có ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo. Nhân tố có mức độ ảnh hưởng thấp hơn là tốc độ quay còn thời gian gia nhiệt có mức độ ảnh hưởng không đáng kể đến độ bền kéo. Kết quả này cũng trùng khớp với kết quả thực nghiệm đã được phân tích. Độ bền kéo lớn nhất tại các điểm n₃t₁p₃ và nhỏ nhất tại các điểm n₁t₂p₁.

Bảng 4.7 Giá trị phản hồi trung bình

Ký hiệu	Nhân tố	Giá trị phản hồi trung bình				
		Mức 1	Mức 2	Mức 3	Delta	Rank
n	Tốc độ quay	989,9	1 001,7	1 008,5	18,6	2
t	Thời gian gia nhiệt	1 003,4	995,2	1 001,4	8,1	3
p	Áp lực hàn	985,3	998,3	1 016,4	31,0	1



Hình 4.24 Mức độ ảnh hưởng các thông số đến độ bền kéo

Phân tích phương sai (ANOVA): Kết quả phân tích ANOVA cho thấy rằng áp lực hàn là nhân tố có ảnh hưởng lớn nhất (68,9%) đến độ bền kéo, mức độ ảnh hưởng tiếp theo là tốc độ quay (23,5%) trong khi thời gian gia nhiệt là nhân tố có mức độ ảnh hưởng ít nhất đến độ bền kéo (5,3 %).

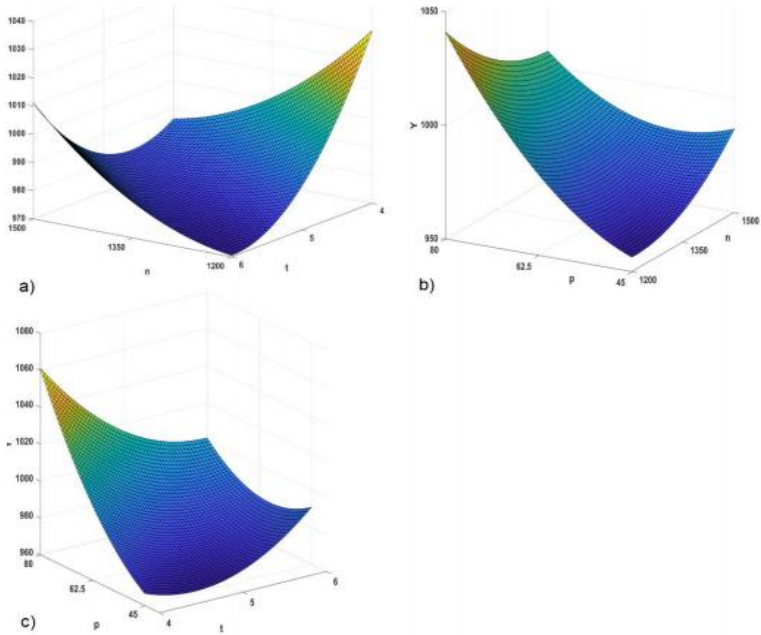
4.2.2 Phương trình hồi quy bậc 2

Các kết quả thực nghiệm thu được từ Bảng 4.9 và bổ sung 2 thực nghiệm ở tâm (N=11) được đưa vào phần mềm xử lý số liệu Minitab để xử lý kết quả thực nghiệm (mô đun Response Surface với 3 thí nghiệm lặp). Phân tích phương sai phương trình hồi quy từ phần mềm Minitab được trình bày như Bảng 4.10. Phương trình hồi quy bậc hai dạng tự nhiên từ số liệu thực nghiệm có dạng:

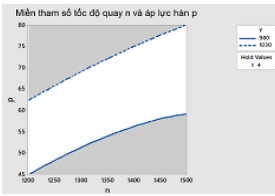
$$\sigma = 2267 - 1,393n - 284,5t + 11,08p + 0,000380n^2 + 13,94t^2 + 0,05388p^2 + 0,1600nt - 0,007196np - 1,302pt \quad (4.4)$$

Phân tích ANOVA phương trình hồi quy: Xác định mức ý nghĩa các hệ số phương trình hồi quy theo phép kiểm Student (T-test). Giá trị phân phối Student

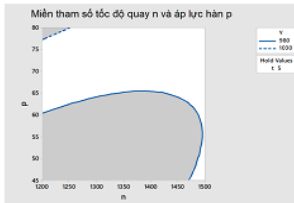
tính toán được trình bày trong Bảng 4.10 cột T-value. Giá trị R-square = 97,30% nên phương trình hồi quy thu được là thích hợp.



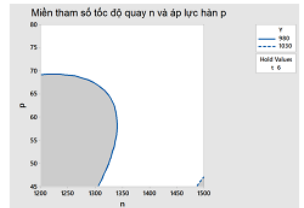
Hình 4.28 Các biểu đồ bề mặt phụ thuộc độ bền kéo vào các thông số công nghệ



Hình 4.29 Miền giá trị tốc độ quay n và áp lực hàn p khi $t = 4$ s, $1030 \geq \sigma \geq 980$ MPa



Hình 4.30 Miền giá trị tốc độ quay n và áp lực hàn p khi $t = 5$ s, $1030 \geq \sigma \geq 980$ MPa



Hình 4.31 Miền giá trị tốc độ quay n và áp lực hàn p khi $t = 6$ s, $1030 \geq \sigma \geq 980$ MPa

Từ phương trình hồi quy thu được, các biểu đồ bề mặt như được trình bày trong Hình 4.28. Dựa trên cơ sở phương trình hồi quy ta thu được miền giá trị các nhân tố công nghệ để độ bền kéo nằm trong khoảng giá trị cho trước. Một vài trường

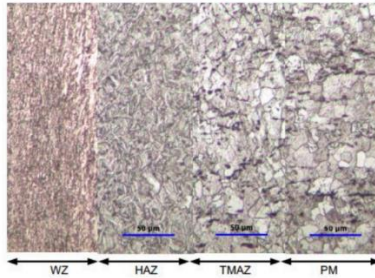
hợp được thể hiện trong các Hình 4.29 và 4.30, 4.31 để minh họa cho nhận định trên. Chẳng hạn, nếu thời gian gia nhiệt được chọn là $t = 4s$ thì để đạt được độ bền kéo của mối hàn lớn hơn $1030 \geq \sigma \geq 980MPa$ áp lực hàn và tốc độ quay được chọn tương ứng như trong Hình 4.29. Tương ứng khi $t = 5s$ và $6s$ - áp lực hàn và tốc độ quay được chọn tương ứng như trong Hình 4.30, Hình 4.31.

4.3 Thực nghiệm kiểm tra kết quả tối ưu

Để đánh giá các nhân tố công nghệ trong vùng tối ưu, các mẫu hàn kiểm nghiệm đã được thực hiện với giá trị thông số công nghệ như sau: mẫu 1 có tốc độ quay $n = 1\,500\text{ rpm}$; thời gian gia nhiệt $6s$, áp lực hàn 80 MPa ; mẫu 2 có tốc độ quay $n = 1\,350\text{ rpm}$; thời gian gia nhiệt $5s$, áp lực hàn $62,5\text{ MPa}$.

4.3.1 Cấu trúc tế vi của mối hàn tối ưu (Hình 4.32)

Kết quả chụp tổ chức tế vi cho thấy cấu trúc hạt đã thay đổi rõ nét và đáng kể trong quá trình hàn ma sát quay. Tại vùng hàn WZ, cấu trúc hạt rất mịn chứng tỏ độ cứng và độ bền kéo tăng cao trong quá trình hàn ma sát quay. Kết quả này hoàn toàn tương đồng với các kết quả thực nghiệm đã phân tích trong luận án này.

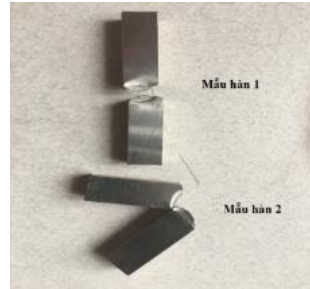
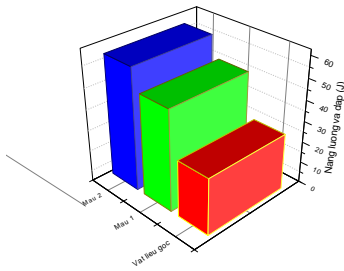


Hình 4.32 Tổ chức tế vi mối hàn tối ưu với $n = 1\,350\text{ rpm}$, $t = 5\text{ s}$,
 $P = 62,5\text{ MPa}$

4.3.2 Kiểm tra độ dai va đập

Các mẫu thử va đập được thiết kế theo tiêu chuẩn ASTM E23. Phương pháp thử nghiệm va đập Charpy được sử dụng để xác định độ dai va đập của 2 mẫu hàn ở nhiệt độ phòng ($27\text{ }^\circ\text{C}$). Búa được sử dụng có công suất cực đại là 292 J và vận tốc cực đại là $5,2\text{ m/s}$. Kết quả kiểm tra độ dai va đập được trình bày trong

Hình 4.35. Vật liệu gốc Ti6Al4V có độ dai va đập là 27 J, mẫu hàn 1 có độ dai va đập là 48 J, còn mẫu hàn 2 được hàn theo thông số tối ưu có độ dai va đập là 58 J. Kết quả đo độ dai va đập trình bày trong Hình 4.35 cho thấy rằng độ dai va đập của các mẫu hàn ma sát quay tăng đáng kể so với mẫu kim loại gốc.



a) Độ dai va đập

b) Tình trạng các mẫu thử

Hình 4.35 Độ dai va đập của các mẫu thử

4.3.3 Thử độ bền kéo

Mỗi hàn số 1 cũng đã được kiểm tra theo tiêu chí độ bền kéo kết quả cho thấy rằng độ bền kéo đạt được là 1008 MPa so với 1012,05 MPa nếu tính theo phương trình hồi quy. Ngoài ra mỗi hàn bị phá hủy tại vị trí cách xa tâm mỗi hàn giống như kết quả thử nghiệm về độ bền kéo của các mẫu hàn đã trình bày.

Kết luận chương 4

Có thể kết luận rằng áp lực hàn là yếu tố quyết định chất lượng của mỗi hàn. Đối với hàn ma sát quay, độ bền kéo và độ cứng càng xa tâm thì càng giảm. Kết quả phân tích thực nghiệm cho thấy rằng nhân tố có ảnh hưởng mạnh nhất đến độ bền kéo của mỗi hàn là áp lực hàn, các nhân tố còn lại như tốc độ quay, thời gian gia nhiệt có mức độ ảnh hưởng đến độ bền kéo thấp hơn so với áp lực hàn.

KẾT LUẬN

Luận án đã nghiên cứu xây dựng mô hình số cơ - nhiệt để dự báo nhiệt độ, ứng suất, độ rộng vùng chịu ảnh hưởng nhiệt. Trên cơ sở các kết quả mô phỏng số, các miền thông số hàn được giới hạn để luận án tiến hành bước nghiên cứu thực nghiệm. Hàng loạt các thực nghiệm được thực hiện để đánh giá và phân tích ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đến cơ tính mối hàn ma sát quay Ti6Al4V như độ bền kéo, độ cứng HV, độ giãn dài và độ dai va đập theo cả hai phương hướng kính và dọc trục. Ngoài ra, bộ thông số công nghệ tối ưu cho quá trình hàn ma sát quay đối với hợp kim Ti6Al4V được xác định qua phương pháp Taguchi, phương trình hồi quy bậc hai và phân tích phương sai (ANOVA). Các kết quả nghiên cứu đã đạt được các mục tiêu của đề tài nghiên cứu. Cụ thể các kết quả đã đạt được trong luận án như sau:

1. Mô hình số cơ-nhiệt dựa trên mô hình JC đã được thiết lập để mô phỏng số quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V. Quá trình biến thiên nhiệt độ tại các điểm khác nhau trong vùng hàn ma sát quay trong kết quả mô phỏng số và kết quả thực nghiệm có sự tương thích cao. Điều này chỉ ra rằng mô hình JC là phù hợp để dùng mô phỏng số quá trình hàn ma sát quay Ti6Al4V. Kết quả mô phỏng số giúp tiết kiệm được số lượng lớn thực nghiệm trong thực tế sản xuất, xác định giới hạn miền thông số công nghệ hàn ma sát quay để đạt được cơ tính mối hàn tốt.

2. Với hàn ma sát quay vật liệu Ti6Al4V thì độ cứng HV tại đường tâm của mối hàn tăng cao hơn nhiều so với vật liệu gốc: có giá trị từ khoảng 380 HV đến 400 HV so với độ cứng của vật liệu gốc là 320 MPa - 340 MPa. Vùng có độ cứng cao nhất là vùng nằm trong khoảng từ giao diện hàn đến 1,5 mm. Sự gia tăng độ cứng vi mô này là do vật liệu bị nén trong quá trình hàn. Quá trình hàn ma sát với tốc độ quay thấp và áp lực cao sẽ tạo ra các mối hàn có độ cứng vi mô cao. Tuy nhiên, áp lực hàn cao sẽ làm giảm chiều dài chi tiết hàn. Do đó, chọn các thông số kỹ thuật cần phải cân đối giữa hai yếu tố là độ cứng HV và chiều dài còn lại của chi tiết sau khi hàn.

3. Độ bền kéo ở mỗi hàn vùng mép nhỏ hơn độ bền kéo ở mỗi hàn tại tâm khoảng 5 %. Trong các thực nghiệm đã khảo sát độ bền kéo của mỗi hàn dao động trong khoảng từ 971 MPa - 1 031,2 MPa (Bảng 4.4) so với độ bền kéo của vật liệu gốc là từ 880 MPa - 920 MPa [22]. Ngoài ra, độ bền kéo tại vùng tâm mỗi hàn lớn hơn nhiều so với kim loại gốc nhưng có xu hướng giảm khi đi ra xa đường tâm hàn (Hình 4.20). Độ bền kéo tăng khi áp lực hàn tăng. Điều này cũng đúng với giá trị của mô đun đàn hồi E ở vị trí tâm và mép biên của các mẫu hàn ma sát xấp xỉ 140 và 120 GPa, 150 và 142 GPa, 162 và 155 GPa. Giá trị của mô đun đàn hồi ở vùng trung tâm lớn hơn vùng biên, điều này có thể giải thích rằng vật liệu ở vùng trung tâm chịu nén nhiều hơn vùng biên. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy mô đun đàn hồi tăng khi áp lực tăng, nhưng nếu tăng thời gian gia nhiệt mô đun đàn hồi có xu hướng giảm. Tất cả các mẫu hàn ma sát quay Ti6Al4V đều bị phá hủy ở phần vật liệu gốc cách xa giao diện hàn trong các thử nghiệm. Có thể kết luận rằng chất lượng mỗi hàn không đồng nhất theo hướng tâm trong quá trình hàn ma sát quay của hợp kim. Sự khác biệt hướng tâm sẽ trở nên đáng kể khi bán kính của chi tiết hàn tăng lên. Điều này có nghĩa khi sử dụng công nghệ hàn ma sát quay thì phải giới hạn đường kính các chi tiết được hàn. Thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến chất lượng mỗi hàn là áp lực hàn. Yếu tố này ảnh hưởng mạnh đến độ bền kéo, độ cứng vi mô, mô đun đàn hồi và độ giãn dài của mỗi hàn.

4. Xuất hiện các tổ chức tế vi khác nhau trong các khu vực hàn do sự khác biệt nhiệt độ của quá trình gia nhiệt và làm nguội. Đặc biệt là cơ chế tổ chức hai pha của 2 pha α và β hình thành trong vùng vật liệu hàn cộng hưởng quá trình kết tinh động tại mỗi hàn làm cho cơ tính mỗi hàn thay đổi mạnh so với kim loại gốc trong hàn ma sát quay

5. Nếu tốc độ quay được thay đổi nhỏ hơn 100 rpm ảnh hưởng của nó đến chất lượng mỗi hàn là không đáng kể nếu đường kính của phần tử hàn nhỏ hơn 15 mm.

6. Luận án đã đưa ra phương pháp xác định miền thông số công nghệ tối ưu cho quá trình hàn ma sát quay hợp kim Ti6Al4V như các Hình 4.29 - 4.31. Chọn 2 bộ thông số công nghệ trong miền này. Mẫu 1 với tốc độ quay 1500 rpm, thời gian gia nhiệt là 6 s, áp lực hàn là 80 MPa và Mẫu 2 với tốc độ quay 1350 rpm, thời gian gia nhiệt là 5 s, áp lực hàn là 62,5 MPa để thực nghiệm kiểm chứng kết quả. Với chế độ hàn tối ưu này, mối hàn ma sát quay hợp kim Ti6Al4V có độ bền kéo, độ dai và đập cao hơn rất nhiều so với kim loại gốc. Cụ thể, độ dai va đập của vật liệu gốc Ti6Al4V là 27 J [12], mẫu hàn được hàn theo thông số tối ưu có độ dai va đập là 58 J lớn hơn xấp xỉ 2,5 lần so với vật liệu gốc.

7. Kết quả nghiên cứu của luận án cho thấy nhiệt lượng cung cấp cho quá trình hàn ma sát quay là yếu tố quan trọng để đảm bảo chất lượng mối hàn. Nguồn nhiệt này phụ thuộc đồng thời cả 3 thông số là tốc độ quay, thời gian gia nhiệt và áp lực hàn.

Có thể kết luận rằng hàn ma sát quay là phương pháp hàn phù hợp áp dụng cho hợp kim Ti6Al4V để mở rộng phạm vi ứng dụng của loại vật liệu này.