

# ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ HÓA GIÀ ĐẾN TỔ CHỨC TẾ VI VÀ CƠ TÍNH MỐI HÀN Ti6Al4V VỚI Ti-CP

## INFLUENCE OF AGING PROCESS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V - Ti-CP WELDING ZONE

SÁI MẠNH THẮNG<sup>1</sup>, NGUYỄN ANH XUÂN<sup>2,3\*</sup>, PHẠM MAI KHÁNH<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

\*Email liên hệ: nguyenganhxuan@vamaru.edu.vn

### Tóm tắt

Hàn TIG hợp kim Ti6Al4V và Ti-CP (ASTM Grade 2), tiến hành thử kéo mối hàn ở các trạng thái khác nhau gồm mối hàn không được xử lý nhiệt, được xử lý nhiệt gồm tôi và hóa già ở một số chế độ khác nhau, khảo sát sự thay đổi độ cứng và tổ chức tế vi mối hàn. Kết quả tổ chức cho thấy sự phân bố nguyên tố mối hàn ở vùng chuyển tiếp khuếch tán hợp kim có độ lớn khoảng (7÷8) $\mu\text{m}$ , đặc điểm vùng này hầu như không thay đổi kích thước khi xử lý nhiệt. Kết quả cho thấy xử lý nhiệt ảnh hưởng không đáng kể tới độ bền mối hàn nhưng ảnh hưởng tới độ giãn dài của hợp kim, sự phá hủy mối hàn chủ yếu xảy ra tại vùng lân cận mối hàn vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) về phía Ti-CP. Mẫu hàn Ti-CP và Ti6Al4V khi xử lý nhiệt gồm tôi 900°C-2h, hóa già 525°C cho giãn dài cao hơn so với trạng thái ủ và hóa già ở nhiệt độ 400°C và 650°C.

**Từ khóa:** Độ bền, độ dẻo, pha, chuyển biến pha, xử lý nhiệt.

### Abstract

TIG welding of two different titanium alloys Ti6Al4V and Ti-CP (ASTM Grade 2) with Ti6Al4V, conducting tensile test of welds in different states: after welding, heat treatment includes quenching and aging in several different modes, investigating the change about hardness and microstructure of the welding zone. The microstructure results show that the weld element distribution in the alloy diffusion transition zone has a distance of (7÷8) $\mu\text{m}$ , the characteristics of this zone almost do not change in size when heat treated. The results show that heat treatment has a negligible effect on weld strength but affects the elongation of alloy. The weld destruction mainly

occurs in the vicinity of the weld in the heat-affected zone (HAZ) towards Ti-CP. Welding samples of Ti-CP and Ti6Al4V when heat treated include quenching at 900°C-2h, and curing at 525°C for higher elongation compared to annealing and aging at temperatures of 400°C and 650°C.

**Keywords:** Strength, elongation, phase, phase transformation, heat treatment.

### 1. Mở đầu

Ti-CP có tổ chức một pha  $\alpha$  ở nhiệt độ thường, có độ bền chảy khoảng 250÷400 (MPa) tùy theo loại grade 1÷4, Ti-CP có độ dẻo và khả năng tạo hình tốt, nhẹ bằng 2/3 thép, chịu ăn mòn, tính hàn tốt và giá thành thấp hơn so với các loại hợp kim titan khác. Titan kỹ thuật là vật liệu phổ biến cho các ứng dụng công nghiệp nhất là trong công nghiệp hóa chất, đóng tàu và hàng không,... Giới hạn bền của nó tương đương với thép không gỉ austenit sau ủ [1, 2, 3].

Hợp kim Ti6Al4V thuộc nhóm hợp kim titan hai pha ( $\alpha + \beta$ ). Ở nhiệt độ phòng, hợp kim chứa khoảng 10%÷15% pha  $\beta$ , tùy thuộc vào quy trình xử lý cơ nhiệt Ti6Al4V có độ bền từ 800÷1200 (MPa). Hợp kim Ti6Al4V có độ bền, độ cứng cao, chịu ăn mòn, chịu môi, có khả năng hàn được. Hợp kim Ti6Al4V có nhiều ứng dụng trong công nghiệp máy bay, y học, dụng cụ đóng tàu, hóa chất. Hợp kim Ti6Al4V sử dụng chiếm hơn 80% lượng Ti và hợp kim Ti trong ngành hàng không vũ trụ.

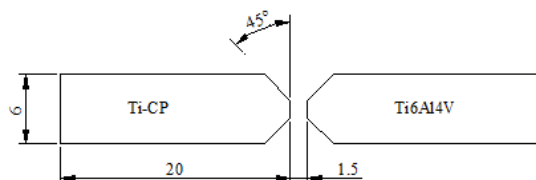
Khi xử lý nhiệt với Ti chỉ có một pha, sự chuyển pha  $\alpha$  (hoặc  $\alpha'$ ) nhận được khi làm nguội nhanh trên nhiệt độ  $T_\beta$  (nhiệt độ chuyển biến pha  $\beta$  của Ti là 885°C). Xử lý nhiệt hợp kim titan Ti6Al4V có liên quan chặt chẽ với sự phân bố lại các nguyên tố Al và V [7], kết cấu và kích thước các pha  $\alpha$ ,  $\beta$  và pha trung gian mactensit ( $\alpha'$ ) liên quan tới nhiệt độ chuyển biến pha  $\beta$  của Ti6Al4V (995°C) và tốc độ làm nguội. Sau

**Bảng 1. Thành phần hóa học Ti-CP [9, 10]**

Al	Zr	Mo	V	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Cu	W	O	N	Ti
0,004	<0,003	0,0005	<0,001	0,012	<0,001	0,014	0,002	0,12	0,003	<0,002	0,072	<0,002	99,8

**Bảng 2. Thành phần hóa học hợp kim Ti6Al4V và vật liệu bù cùng loại [12, 13]**

%	Al	Zr	Mo	V	Si	Cr	Ni	Fe	Cu	Ti
Ti6Al4V	6,27	0,002	0,0001	3,99	0,012	0,021	0,005	0,292	0,003	89,1



**Hình 1. Mặt cắt mỗi hàn**

tôi, tổ chức của hợp kim chủ yếu là mactensit  $\alpha'$  [4, 5, 6, 7, 8]. Khi làm nguội nhanh hợp kim từ nhiệt độ cao có các cấu trúc chính đi kèm được hình thành là cấu trúc phiến  $\alpha$  trong nền  $\beta$ , cấu trúc mactensit  $\alpha'$  và cấu trúc Widmanstatten trong các hạt  $\beta$  phát triển trước đó. Khi hóa già có sự khuếch tán của nguyên tố hợp kim Al, V và dẫn tới sự phân bố, kết cấu lại tổ chức và hình dạng các pha.

Khi hàn Ti-CP với Ti6Al4V cho phép tạo một hỗn hợp kết hợp các vật liệu nhẹ khác nhau, có tính chất sử dụng khác nhau giúp nâng cao hiệu quả chi phí của quy trình chế tạo. Với thiết kế mỗi ghép này, các phần khác nhau của cùng một mối hàn có các đặc tính cơ cần thiết cho các ứng dụng cụ thể, đồng thời giảm chi phí vật liệu khi phải sử dụng nhiều hợp kim đắt tiền hơn. Quy trình xử lý nhiệt của mối hàn Ti và Ti6Al4V bao gồm: Ủ, tôi và hóa già. Nhiệt độ hóa già của hợp kim Ti6Al4V trong khoảng nhiệt độ từ 450°C ÷ 650°C.

Trong nghiên cứu này thực hiện hàn TIG hai tấm khác loại là Ti-CP (ASTM Grade 2) với Ti6Al4V, tiến hành thử kéo mối hàn ở các trạng thái khác nhau gồm mối hàn không được xử lý nhiệt, được xử lý nhiệt gồm tôi và hóa già ở một số nhiệt độ khác nhau, khảo sát độ cứng mối hàn, khảo sát sự thay đổi tổ chức tế vi vùng mối hàn, xem xét sự phá hủy của mối hàn từ đó đánh giá ảnh hưởng của xử lý nhiệt đến chất lượng và độ bền của mối hàn.

## 2. Thực nghiệm hàn và xử lý nhiệt

Vật liệu hàn là tấm Ti-CP grade 2 và tấm hợp kim Ti6Al4V có chiều dày 6mm, thành phần hóa học như Bảng 1, 2.

Chọn chế độ công nghệ thí nghiệm hàn TIG như sau: Chiều dày tấm hàn 6mm. Điện cực vonfram

**Bảng 3. Thông số chế độ hàn TIG**

I (A)	U (V)	Lưu lượng khí (lít/phút)	Khí bảo vệ
150	35	15	Argon

WT20 (0,8%÷4,2% ThO<sub>2</sub>) đường kính 2,4mm. Khoảng cách từ điện cực tới bề mặt kim loại hàn thay đổi từ 1,5÷4,5 (mm).

Mẫu sau hàn được xử lý nhiệt ở các chế độ sau: Ủ ở nhiệt độ 900°C thời gian giữ nhiệt 02h và làm nguội cùng lò. Nung ở 900°C thời gian giữ nhiệt 02h, tôi trong nước và hóa già ở các chế độ khác nhau, ký hiệu mẫu sau xử lý nhiệt như ở Bảng 4.

**Bảng 4. Chế độ xử lý nhiệt mẫu**

Mẫu	Chế độ xử lý
M0	Mẫu sau hàn không xử lý nhiệt
M1	Ủ 900 °C -2h, nguội cùng lò
M2	Tôi 900°C - 2h, tôi nước
M3	Tôi 900°C - 2h, tôi nước, hóa già 400°C - 4h
M4	Tôi 900°C - 2h, tôi nước, hóa già 525°C - 1h
M5	Tôi 900°C - 2h, tôi nước, hóa già 525°C - 4h
M6	Tôi 900°C - 2h, tôi nước, hóa già 525°C - 7h
M7	Tôi 900°C - 2h, tôi nước, hóa già 650°C - 4h

Mẫu phân tích tổ chức tế vi được tầm thực bằng dung dịch 2% HF + 6% HNO<sub>3</sub> + 91% H<sub>2</sub>O. Quan sát tổ chức trên kính hiển vi quang học VHX. Mẫu kéo kiểm bền thực hiện trên máy kéo XFT-150. Mẫu được cắt dây qua mối hàn với kích thước mặt cắt ngang 4mmx5mm, diện tích mặt cắt ngang 20mm<sup>2</sup>. Mẫu đo độ cứng được thực hiện trên máy đo độ cứng tế vi Isoscan HV2 AC.

### 3. Kết quả và thảo luận

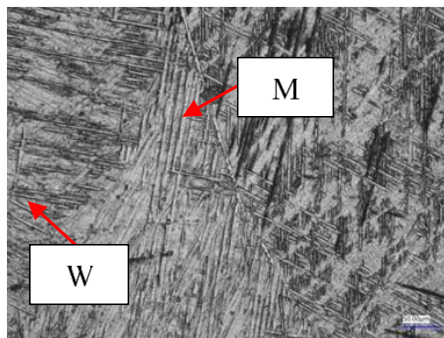
#### 3.1. Phân tích tổ chức

##### 3.1.1. Tổ chức tế vi mẫu M0

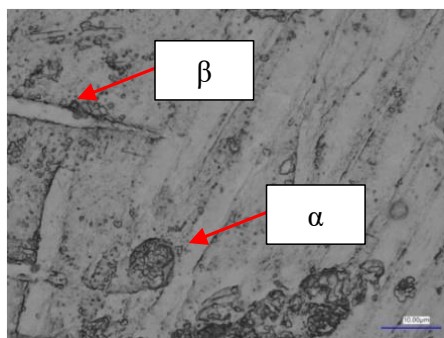
Các biến đổi trạng thái rắn xảy ra trong giai đoạn làm nguội mỗi hàn làm thay đổi cấu trúc vi mô cục bộ và phụ thuộc vào thành phần hợp kim. Khi nguội, từ trạng thái lỏng chuyển qua trạng thái rắn và biến đổi  $\beta \rightarrow \alpha$  xảy ra ở vùng hàn. Nhiệt độ cân bằng chuyển đổi đẳng hướng  $\beta \rightarrow \alpha$  phụ thuộc vào các nguyên tố hợp kim và trong khoảng 885°C đối với Ti nguyên chất. Vùng biên giới hàn có sự đan xen tổ chức, vùng nóng chảy có dạng các tấm  $\alpha$  song song đan xen pha  $\beta$  ở biên giới  $\alpha$ , Vùng nóng chảy khi nguội xuất hiện rải rác cấu trúc mactensit  $\alpha'$  và cấu trúc Widmanstatten



a) Vùng hàn



b) Pha Widmanstatten và mactensit

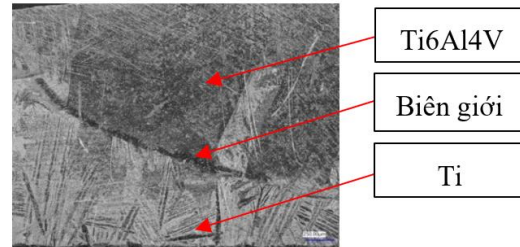


c) Pha  $\alpha$  và pha  $\beta$

**Hình 2. Tổ chức tế vi mẫu M0**

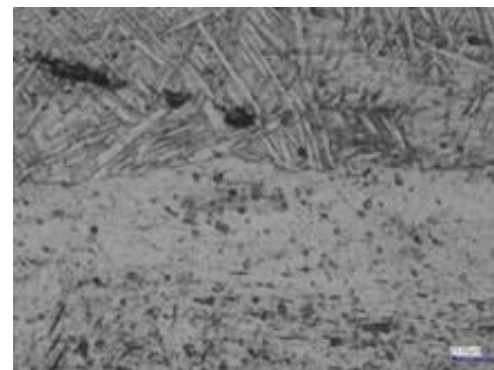
do tốc độ nguội khác nhau gây ra. Nó đã chỉ ra sự biến đổi  $\beta \rightarrow \alpha$  xảy ra bởi một quá trình tạo mầm và phát triển mầm, dẫn đến sự hình thành cấu trúc vi mô Widmanstatten.

##### 3.1.2. Tổ chức tế vi mẫu M1

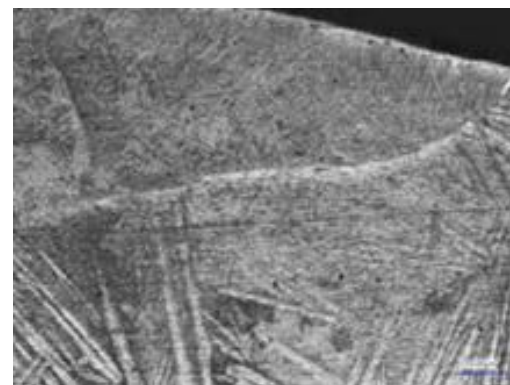


**Hình 3. Tổ chức tế vi mẫu M1**

Kết quả phân tích tổ chức tế vi mẫu M1 (Hình 3) cho thấy phần Ti-CP chỉ có pha  $\alpha$  không biến đổi, phần nóng chảy của mối hàn là hỗn hợp pha  $\alpha + \beta$ . Căn cứ trên thước đo của ảnh cho thấy vùng giao thoa hai hợp kim có kích thước 7÷8 ( $\mu\text{m}$ ). Tại đây có sự chuyển đổi về tổ chức do sự kết tinh và khuếch tán của hàm lượng nguyên tố hợp kim khác nhau, cụ thể là V và Al tạo lên cấu trúc pha kết nối khác. Có thể kết luận rằng V nằm hầu hết ở pha  $\beta$  và hầu như không có ở pha  $\alpha$ .



a) Biên giới đường hàn



b) Tổ chức tế vi biên giới đường hàn

**Hình 4. Tổ chức tế vi mẫu M2**

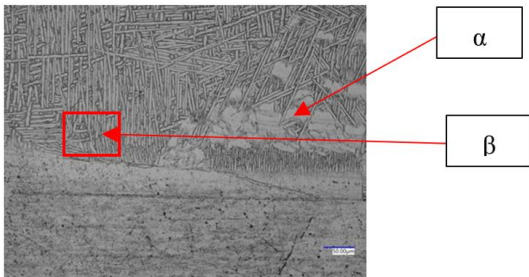


**3.1.3. Tổ chức tế vi mẫu M2**

Phân tích tổ chức tế vi mẫu M2 (Hình 4a và b) cho thấy biên giới hàn là hỗn hợp dài màu trắng kích thước 7÷8 (µm), từ biên giới phát triển vào vùng nóng chảy mỗi hàn là hỗn hợp tổ chức gồm các mactensit dạng kim  $\alpha'$  (pha M) kết quả từ nguội nhanh không khuếch tán khi tôi trên nền pha  $\alpha$  và pha  $\beta$  màu tối phát triển dọc theo biên giới pha  $\alpha$ .

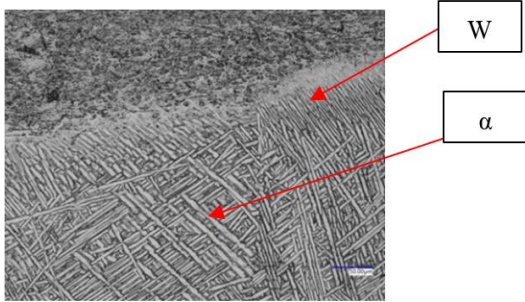
**3.1.4. Tổ chức tế vi mẫu M3**

Phân tích tổ chức tế vi mẫu M3 (Hình 5) cho thấy sự phát triển của các pha  $\alpha$  và trong vùng mỗi hàn nóng chảy với dây bù Ti6Al4V, sự phát triển của các pha  $\alpha$  và  $\beta$  từ biên giới mỗi hàn vào vùng nóng chảy mỗi hàn là hỗn hợp tổ chức gồm kim  $\alpha+\beta$  trên nền hợp kim Ti6Al4V.

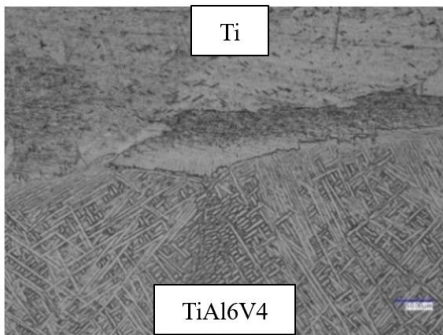


**Hình 5. Tổ chức tế vi mẫu M3**

**3.1.5. Tổ chức tế vi mẫu M5 và M6**



**Hình 6. Tổ chức tế vi mẫu M5**



**Hình 7. Tổ chức tế vi mẫu M6**

Phân tích tổ chức tế vi mẫu M5, M6 (Hình 6 và 7) nhận được sự thay đổi tổ chức khi tăng nhiệt độ và thời gian hóa già trong đó có sự thay đổi của biên giới và tổ chức pha. Quá trình hóa già chỉ làm thay đổi kết cấu pha và hỗn hợp pha  $\alpha+\beta$  mà không có sự thay đổi về tổ chức pha.

**3.1.6. Tổ chức tế vi mẫu M7**

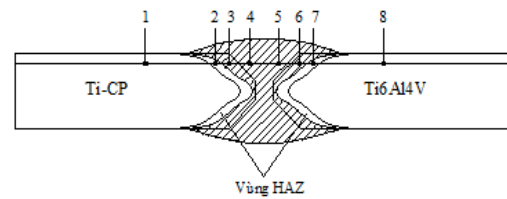
Phân tích tổ chức tế vi mẫu M7 (Hình 8) ở vùng biên giới mỗi hàn giống tổ chức các mẫu sau hóa già ở trên. Độ rộng của vùng khuếch tán các nguyên tố Al, V là khoảng 7÷8 (µm). Quá trình hóa già chỉ làm thay đổi các pha, tỷ lệ phân bố và kích thước các pha  $\alpha$ ,  $\beta$  trong nền phân hợp kim Ti6Al4V. Phần Ti-CP tổ chức là một pha  $\alpha$ .



**Hình 8. Tổ chức tế vi mẫu M7**

**3.2. Độ cứng mỗi hàn khi xử lý nhiệt**

Với kết quả phân tích tổ chức mỗi hàn Ti-CP và Ti6Al4V cho thấy vùng biên giới mỗi hàn là một vùng chuyển tiếp có kích thước 7÷8 (µm). Đây là một vùng đặc biệt có tổ chức khác với cả phần Ti-CP và phần mỗi hàn Ti6Al4V nóng chảy. Kết quả xử lý nhiệt không làm thay đổi độ rộng của đường biên này nhưng làm thay đổi thành phần của vùng biên giới do có sự khuếch tán nguyên tố hợp kim do sự khác biệt thành phần của hai hợp kim hàn. Để khảo sát ảnh hưởng của nhân tố này, thực hiện đo độ cứng mỗi hàn các mẫu M1÷M7. Hình 9 chỉ ra các vị trí đo độ cứng tế vi mỗi hàn điếm từ 1÷8 tính từ phía Ti-CP sang phía Ti6Al4V, tại vị trí số 1 tương ứng cho độ cứng nền Ti-CP, vị trí số 8 tương ứng với độ cứng của nền Ti6Al4V, kết quả đo của các mẫu được thể hiện trong Bảng 5.



**Hình 9. Vị trí đo độ cứng tế vi**

Bảng 5. Kết quả đo độ cứng tế vi mỗi hàn

Mẫu	Vị trí đo độ cứng, HV							
	1	2	3	4	5	6	7	8
M1	225	280	429	505	435	458	456	442
M2	197	276	407	531	452	438	499	349
M3	146	189	300	321	388	389	345	310
M4	142	150	257	274	330	336	353	323
M5	99	194	244	344	316	401	464	384
M6	116	130	283	343	357	308	352	234
M7	133	137	268	409	401	320	515	411

Kết quả đo độ cứng cho thấy khi xử lý nhiệt gồm ủ, tôi và hóa già hợp kim ở các nhiệt độ 400°C-4h; 525°C ở 1h, 4h, 07h; 650°C-4h (mẫu M1-M7) cho thấy vùng mối hàn có độ cứng cao hơn hẳn so với các vùng khác của mối hàn, chênh lệch độ cứng giữa đỉnh cao nhất của vùng mối hàn với nền Ti-CP lần lượt là 280 HV; 255 HV; 243 HV; 188 HV; 365 HV; 236 HV; 382 HV và chênh lệch với phần nóng chảy của Ti6Al4V là 63 HV, 182 HV, 79 HV, 30 HV, 80 HV, 123 HV, 104 HV. Kết quả độ cứng cao hơn so với vùng lân cận là do sự khác biệt về tổ chức pha và tạp chất có thể có trong mối hàn tạo nên.

### 3.3. Độ bền kéo

Kết quả thử kéo các mẫu hàn Ti -Ti6Al4V có vật liệu bù Ti6Al4V như ở Bảng 6.

Bảng 6. Kết quả thử kéo mối hàn Ti-CP - Ti6Al4V vật liệu bù Ti6Al4V

TT	Mẫu	Lực kéo đứt, N	Giãn dài mẫu khi phá hủy, mm	Độ bền, N/mm <sup>2</sup>
1	M1	7887	2,492	394,35
2	M3	8459	2,628	422,95
3	M4	8291	3,012	414,55
4	M5	8346	4,228	417,30
5	M6	8341	3,548	417,05
6	M7	8512	2,165	425,60

Nhận xét: Sự phá hủy đều xảy ra tại lân cận phần mối hàn Ti-CP, độ bền tương đương với tấm Ti-CP được xử lý ở các chế độ khác nhau từ 422MPa ÷ 425MPa. Giãn dài khi kéo tới phá hủy từ 2,1mm ÷ 4,2mm và phân tích mẫu sau thử kéo cho thấy phần kim loại tấm Ti6Al4V hầu như ít bị biến dạng dẫn tới bị phá hủy, phân biến dạng chủ yếu bên tấm

Ti-CP. Khi xử lý hóa già 525°C (M4; M5 và M6) cho giãn dài cao hơn so với trạng thái chỉ ủ (M1) và hóa già ở 400 °C (M3) và 650°C (M7). Kết quả thử kéo cho thấy mẫu M5 có giá trị độ bền đạt được là 417,3N/mm<sup>2</sup> độ giãn dài tốt nhất đạt được là 4,228mm.

### 4. Kết luận

Hàn TIG tấm Ti-CP với Ti6Al4V, xử lý nhiệt ở một số chế độ thu được kết quả như sau:

Tại đường biên giới hàn Ti-Ti6Al4V có vùng chuyển tiếp khuếch tán hợp kim có độ rộng 7μm ÷ 8μm, đặc điểm vùng này hầu như không thay đổi kích thước khi xử lý nhiệt. Kết quả độ cứng vùng mối hàn cao hơn so với các vùng khác là do sự khác biệt về tổ chức pha và tạp chất có mặt trong mối hàn tạo nên.

Kết quả kéo cho thấy sự phá hủy đều xảy ra tại lân cận phần mối hàn phía Ti-CP, độ bền tương đương với tấm Ti-CP được xử lý ở các chế độ khác nhau của quá trình xử lý nhiệt. Phía hợp kim Ti6Al4V hầu như không bị biến dạng.

Với mẫu hàn Ti-CP và Ti6Al4V khi xử lý nhiệt gồm tôi 900°C-2h, hóa già 525°C cho giãn dài cao hơn so với trạng thái ủ và hóa già ở nhiệt độ 400°C và 650°C.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Massab Junaid1, Taqi Ahmad Cheema (2020), *Influence of welding process on the properties of dissimilar titanium alloy weldments: a review*, JMST Advances, Vol.2, pp.61-76.
- [2] Fedor Fomin, Martin Freund, Volker Ventzke, Pedro Alvarez, Stefan Bauer Nikolai Kashaev (2018), *Metallurgical aspects of joining commercially pure titanium to Ti-6Al-4V alloy in a T-joint configuration by laser beam welding*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.97, pp.2019-2031.
- [3] Atishey Mittal, Dr Atul Kumar (2016), *Effect of Shielding Gas on Titanium CP (Gr- 2) By Using Gas Tungsten Arc Welding*, International Journal of Scientific Engineering and Technology, Volume No.5 Issue No.6, pp.339-345.
- [4] J. Barta, M. Maronek, B. Šimekova, D. Marić (2019), *Analysis of weld joints made of titanium alloy grade 2 produced by electron beam welding*, Metalurgija 58, Vol.3-4, pp.255-258.
- [5] Tim Pasang, Yuan Tao1, Mana Azizi, Osamu Kamiya, Masami Mizutani, and Wojciech Misiolek (2017), *Welding of titanium alloys*, MATEC Web of Conferences, Vol.123.

- [6] Serkan APAY (2022), *Weldability of Grade 2 Titanium Sheets with Pulsed Nd:YAG Microlaser Welding Filler and Without Filler*, Materials science.
- [7] Deepak Kumar Gope, Uday Kumar, S Chattopadhyaya and S Mandal (2018), *Investigation into the TIG welded joint of titanium G-5 alloy sheet*, International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol.377.
- [8] Abu Syed H. Kabir, Xinjin Cao, Javad Gholipour, Priti Wanjara, Jonathan Cuddy, Anand Birur, and Mamoun Medraj (2012), *Effect of Postweld Heat Treatment on Microstructure, Hardness, and Tensile Properties of Laser-Welded Ti-6Al-4V*, Metallurgical and materials transactions A, Volume 43A.
- [9] Sai Manh Thang, Nguyen Duong Nam, Pham Van Truong, and Pham Mai Khanh (2020), *Analyzing the Effect of Some Welding Parameters TIG to Properties and Microstructure of Titanium Materials*, Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable development (MMMS2020).
- [10] Nguyen Anh Xuan, Le Thi Nhung, Sai Manh Thang, Pham Mai Khanh (2021), *Study on the microstructure and hardness of Ti and TiAl6V4 welds*, Proceedings of the International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation, and Sustainable Development 2021 (AMAS2021).
- [11] Guangxu Yana, Ming Jen Tanb, Alexandru Crivoic, Feng Lid, Sandeep Kumare and Chern How Nicholas Chia (2017), *Improving the mechanical properties of TIG welding Ti-6Al-4V by post weld heat treatment*, International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17-22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, Procedia Engineering Vol.207, pp.633-638.
- [12] Robert Pederson, Licentiate thesis (2002), *Microstructure and phase transformation of Ti-6Al-4V*.

Ngày nhận bài:	06/04/2024
Ngày nhận bản sửa:	12/04/2024
Ngày duyệt đăng:	17/04/2024