

## Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cán và xử lý nhiệt đến tổ chức và cơ tính của hợp kim QAl5 sau đúc

Triệu Khương, Trần Văn Cương, Ngô Văn Hoàn, Ngô Minh Tiến, Phạm Thị Thu Hạnh\*

Viện Hóa học-Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

\*Email: phamthuhanh85@gmail.com

Nhận bài: 10/9/2023; Hoàn thiện: 11/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.238-244>

### TÓM TẮT

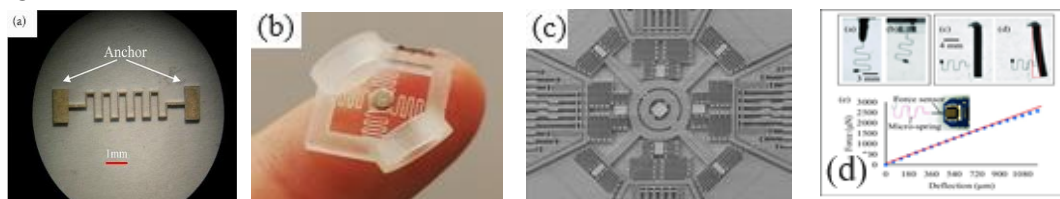
Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của biến dạng dẻo và chế độ xử lý nhiệt đến tổ chức và cơ tính của hợp kim QAl5. Hợp kim QAl5 có cấu trúc dạng sợi thu được bằng cách nấu luyện, cán và xử lý nhiệt. Kết quả nghiên cứu cho thấy: (1) Cấu trúc của hợp kim QAl5 được đúc bằng khuôn kim loại là tổ chức nhánh cây với hạt thô, kích thước hạt trung bình trên 500  $\mu\text{m}$  và phân bố kích thước không đồng đều. (2) Hợp kim QAl5 đúc có độ dẻo tốt nhưng độ bền thấp, độ giãn dài là 65,3%, giới hạn bền kéo là 237,7MPa và giới hạn chảy là 65 MPa. (3) Sau khi xử lý cán 30% và ủ tổ chức nhánh cây trạng thái đúc chuyển thành dạng hạt đồng trục cộng với một lượng nhỏ cấu trúc song tinh. Khi nhiệt độ ủ tăng từ 700  $^{\circ}\text{C}$  lên 850  $^{\circ}\text{C}$ , kích thước hạt trung bình tăng từ 25  $\mu\text{m}$  lên 125  $\mu\text{m}$ , sự phân bố kích thước hạt trở nên đồng đều hơn và ở nhiệt độ ủ 800  $^{\circ}\text{C}$  đạt được độ giãn dài lớn nhất là 58.57%, giới hạn bền chảy tăng trên 46%.

Từ khóa: QAl5 alloy; Brông nhôm; Hợp kim Cu-Al; Cán; Ủ.

### 1. MỞ ĐẦU

Các hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) là sự tích hợp của các thành phần điện và cơ khí có kích thước nano và micro. Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ điện tử, cơ khí chính xác [1], công nghệ micro/nano đang dần xuất hiện và việc thu nhỏ sản phẩm đã trở thành xu hướng chủ đạo trong ngành. Với kích thước nhỏ gọn, hiệu suất đáng tin cậy và chi phí sản xuất thiết bị MEMS thấp, các sản phẩm micro/nano được sử dụng rộng rãi trong hàng không vũ trụ, ô tô, vi điện tử, plasma và kỹ thuật y sinh và các lĩnh vực khác [2, 3]. Lò xo vi mô là một phần tử đàn hồi rất quan trọng đối với cấu trúc kết cấu của các thiết bị MEMS. Lò xo siêu nhỏ đàn hồi theo ba hướng phối hợp, có thể cung cấp lực đàn hồi và lưu trữ năng lượng cho vi cảm biến vi mô, có thể giảm rung, cung cấp vị trí chính xác và hỗ trợ cấu trúc thiết bị khi được kết nối với các thành phần khác. Do đó, lò xo vi mô đóng một vai trò quan trọng trong cảm biến vi mô, máy đo gia tốc vi mô, máy thu năng lượng, công tắc vi quán tính, bộ vi truyền động và kính hiển vi vi mô, cũng như các thiết bị an toàn và thiết bị MEMS. Đối với các vi lò xo phẳng, các phương pháp chế tạo dựa trên silicon vẫn là xu hướng chủ đạo trong ngành công nghiệp vi điện tử, bao gồm in khắc quang học, in khắc chùm tia điện tử, in khắc chùm ion tập trung,... Tuy nhiên, các phương pháp chế tạo vi mô dựa trên silicon truyền thống này đòi hỏi chi phí thiết bị cao trong điều kiện hạn chế về vật liệu và có những nhược điểm như chu kỳ xử lý dài, năng suất thấp và chi phí cao, trong điều kiện hạn chế về vật liệu và có những nhược điểm như chu kỳ xử lý dài, năng suất thấp và chi phí cao. Trong 30 năm qua, các kỹ thuật chế tạo vi mô không dựa trên silicon đã được phát triển [4], đóng vai trò rất quan trọng trong việc chế tạo các sản phẩm micro/nano kim loại. Microforming, như một phương pháp chế tạo vi mô dựa trên biến dạng dẻo, đã cho thấy sự hấp dẫn về năng suất cao, chi phí thấp, hình dạng và các tính chất cơ học tuyệt vời so với các kỹ thuật chế tạo vi mô không dựa trên silicon khác. Các nghiên cứu hiện tại đã chỉ ra rằng lò xo vi mô được xử lý bằng công nghệ vi tạo hình có thể chịu được tải trọng cao hơn và tuổi thọ mỏi tăng lên 19260 lần [5] so với 517 lần [6] của vi lò xo phẳng được chế tạo bằng phương pháp điện hóa và tuổi thọ tăng 37 lần. Một số hình ảnh vi lò xo được chế tạo bằng các công nghệ như

quang khắc, in 3D, LIGA, tạo hình biến dạng như trên hình 1, vi lò xo được ứng dụng rộng rãi trong các hệ cảm biến sensor, vi mạch,...



**Hình 1.** Một số phương pháp chế tạo vi lò xo điển hình.  
(a) Quang khắc; (b) In 3D; (c) LIGA; (d) Gia công biến dạng.

Hợp kim Bronze được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp hiện đại bộ phận có hàm lượng Al theo khối lượng dưới 10% [7]. Hợp kim chứa Al < 9.4% có tổ chức 1 pha  $\alpha$ . Pha  $\alpha$  là dung dịch rắn thay thế của Al trong đồng, có mạng lập phương diện tâm khá dẻo và bền. Vì vậy, các Bronze có cơ tính tổng hợp cao, khả năng chống mài mòn và độ bền mỏi khá tốt. Do bề mặt hợp kim được bao phủ bởi một lớp màng oxit  $Al_2O_3$  chặt sít nên khả năng chống ăn mòn tốt trong khí quyển và nước biển. Bronze được sử dụng rộng rãi trong hệ thống trao đổi nhiệt, lò xo tải dòng điện, chi tiết máy bơm, đồ dùng cho lính đánh thủy,... đặc biệt là các chi tiết lò xo phẳng trong chế tạo các chi tiết vi linh kiện MEM trong các hệ thống yêu cầu về độ mỏi cao và khả năng chống ăn mòn. Trong bài báo này, các tác giả đã nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ xử lý nhiệt và cán đến tổ chức và cơ tính của hợp kim QAl5 sau đúc nhằm đưa ra chế độ phù hợp trong quá trình sử dụng hệ vật liệu này trong chế tạo các chi tiết lò xo phẳng.

## 2. THỰC NGHIỆM

### 2.1. Nguyên vật liệu, thiết bị nghiên cứu

- Hoá chất: Chất trợ dung  $CaF_2$ ,  $Na_3AlF_6$ , NaCl, nước cất,...
- Vật liệu: Nhôm 1070 (99,7%); Đồng nguyên chất (99,0%), Mangan (99,7%).
- Phối liệu thành phần nấu luyện hợp kim QAl5 được trình bày trong bảng 1.

**Bảng 1.** Phối liệu thành phần nấu luyện hợp kim hóa QAl5.

| Vật liệu     | Nhôm 1070 | Cu | $CaF_2$ | NaCl    | $Na_3AlF_6$ | Mn  |
|--------------|-----------|----|---------|---------|-------------|-----|
| Hàm lượng, % | 5         | 95 | 2.5x0.4 | 2.5x0.2 | 2.5x0.4     | 0.3 |
| Cháy hao, %  | 2         | 1  | -       | -       | -           | -   |

- Lò cảm ứng cao tần WD-15KW; Thiết bị thử kéo UTM/CMT 5000; Thiết bị Spectrotest TXC03; Thiết bị hiển vi điện tử SU1510; Thiết bị hiển vi quang học Axio CSM 700; Thiết bị X-ray Bruker D8; Bột đánh bóng mẫu  $Al_2O_3$ , kích thước cỡ 0,03-0,05  $\mu m$ ; Máy cán Y225S-4, đường kính trục cán 122 mm, tốc độ 2 trục có thể thay đổi; Máy mài YM-2A, máy đánh bóng mẫu PG-2.

### 2.2. Quy trình nấu luyện hợp kim QAl5 trong lò cảm ứng cao tần:

- Chuẩn bị nguyên liệu ban đầu và các chất trợ dung, chất tinh luyện;
- Gia nhiệt nồi graphit đến khi nồi lò chuyển màu hồng đỏ;
- Cho vào nồi nấu 2/3 lượng đồng và 2/3 lượng chất trợ dung;
- Tiếp tục gia nhiệt đến 1200  $^{\circ}C$  để nấu chảy toàn bộ lượng đồng;
- Sau khi đồng nóng chảy hoàn toàn thì cho toàn bộ lượng nhôm vào và gia nhiệt đến khi nóng chảy toàn bộ;
- Thêm 1/3 lượng đồng, chất tinh luyện và chất trợ dung còn lại và gia nhiệt đến khi nóng chảy hoàn toàn;
- Làm sạch xỉ và khuấy đều kim loại nóng chảy, chuẩn bị khuôn để rót đúc;
- Rót kim loại nóng chảy vào khuôn kim loại.

### 2.3. Quy trình xử lý nhiệt và cán

Để có được cấu trúc hợp kim QA15 với các hạt kích thước nhỏ phù hợp và đồng đều, trước khi tiến hành quá trình ủ kết tinh lại đồng đều tổ chức, thành phần, hợp kim QA15 được thực hiện cán sơ bộ 30% QA15. Sau nhiều lần nghiên cứu thăm dò, mẫu hợp kim được xử lý nhiệt trong môi trường khí bảo vệ với các thông số của quá trình ủ cuối cùng được xác định để nghiên cứu là: 700 °C – 4 h, 800 °C- 4 h và 850 °C – 4 h.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Tổ chức và cơ tính của hợp kim QA15 sau đúc

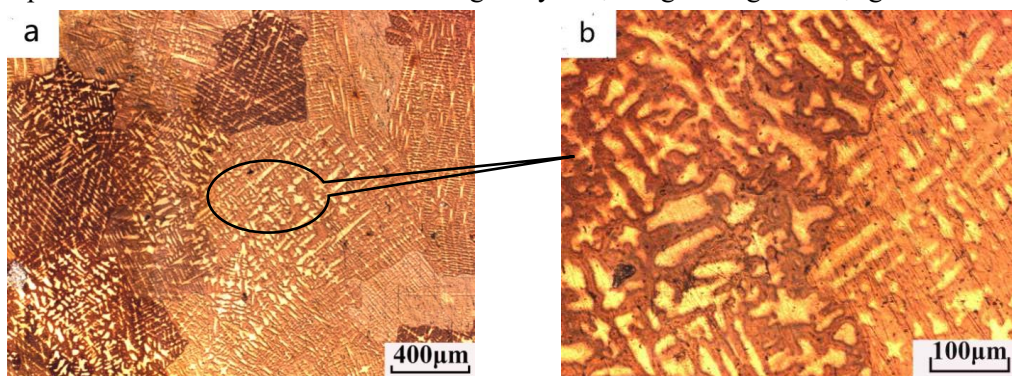
#### 3.1.1 Tổ chức tế vi và thành phần của hợp kim QA15 sau đúc

Trong bài báo này, khuôn kim loại được sử dụng để đúc hợp kim đồng nhôm, khuôn kim loại có tính dẫn nhiệt và khả năng tỏa nhiệt lớn, tốc độ làm nguội nhanh, kết cấu vật đúc nhỏ gọn, cơ tính vật đúc tốt, vật đúc có độ chính xác về kích thước cao, giá trị độ nhám bề mặt thấp và chất lượng ổn định. Ngoài ra, khuôn kim loại có thể được tái sử dụng nhiều lần. Hình 2 là mẫu phối hợp kim đồng nhôm QA15 sau khi đúc.



Hình 2. Hợp kim QA15 sau đúc.

Tổ chức tế vi của hợp kim QA15 sau đúc được thể hiện trên hình 3. Tổ chức tế vi dung dịch rắn một pha  $\alpha$  dạng nhánh cây, khi đúc trong khuôn kim loại do tốc độ làm nguội nhanh nên tốc độ kết tinh lớn hơn so với tốc độ khuếch tán thành phần nên tổ chức thu được dạng nhánh cây có thành phần không đồng đều. Kích thước hạt sau đúc lớn trong khoảng 400 - 700  $\mu\text{m}$ , kích thước hạt thô và rất không đồng đều nên không có lợi cho quá trình gia công các bước tiếp theo. Do đó, cần phải tiến hành tối ưu hóa cấu trúc bằng xử lý nhiệt và gia công biến dạng.



Hình 3. Tổ chức tế vi của hợp kim QA15 sau đúc

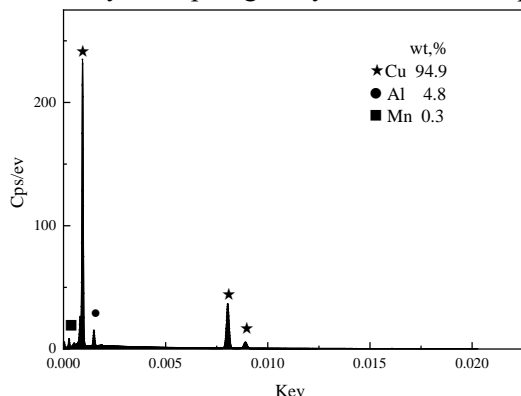
a) Độ phóng đại 100x; b) Độ phóng đại vùng.

Thành phần hóa học của hợp kim QA15 sau đúc được phân tích bằng thiết bị quang phổ phát xạ Spectrotest TXC03, thiết bị quang phổ EDS. Kết quả được thể hiện trong bảng 2 và hình 4. Theo bảng 2, thành phần hóa học của mẫu QA15 sau đúc tương đương với mác hợp kim QA15 theo tiêu chuẩn GB/T 5231. Hình 4, chúng ta thấy rằng, hàm lượng nhôm của mẫu này là khoảng 4,8%, hàm lượng mangan là khoảng 0,3% và Cu là còn lại.

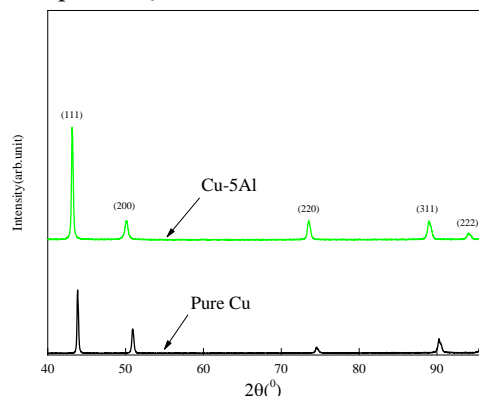
**Bảng 2.** Thành phần hóa học của hợp kim QAl5, % theo khối lượng.

| Cu      | Al     | Fe     | Mn     | P     | Zn     | Sn     | Si     | Pb     |
|---------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Còn lại | 4.7803 | 0.0150 | 0.3121 | 0.010 | 0.0195 | 0.0942 | 0.0942 | 0.0431 |

Tỷ lệ của từng thành phần hóa học về cơ bản như trong thành phần phối liệu ban đầu trước khi nấu luyện, đáp ứng các yêu cầu về thành phần của hợp kim QAl5.



**Hình 4.** Phổ EDS của hợp kim QAl5 sau đúc.

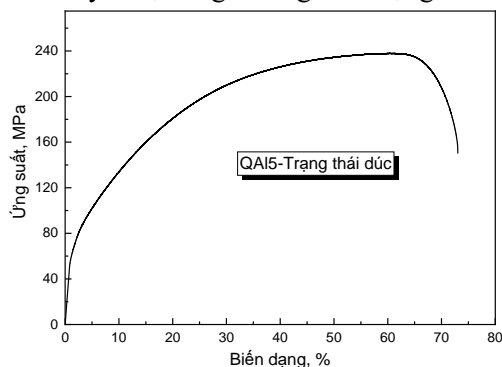


**Hình 5.** Phổ X-ray của hợp kim QAl5 sau đúc.

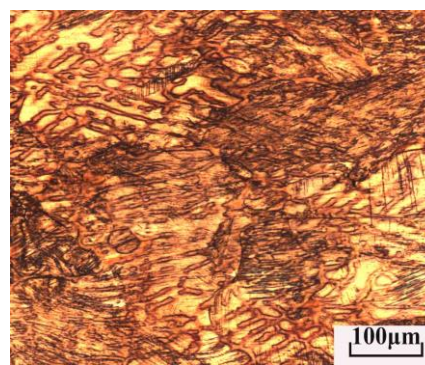
Hình 5 là giản đồ nhiễu xạ X-ray của đồng nguyên chất và hợp kim đồng-nhôm QAl5 sau đúc, so sánh với mẫu chuẩn có thể thấy trong QAl5 đúc sẵn chỉ có một pha  $\alpha$ , phù hợp với mô tả của sơ đồ pha hợp kim đồng-nhôm, nghĩa là khi hàm lượng nhôm thấp ở mức 7,5%, cấu trúc của hợp kim đồng-nhôm là  $\alpha$  một pha duy nhất.

### 3.1.2 Cơ tính của hợp kim QAl5 đúc

Đồ thị đường cong độ bền kéo ở nhiệt độ phòng điển hình của đồng nhôm đúc QAl5 được thể hiện trong Hình 6. Giới hạn chảy trung bình của QAl5 đúc chỉ là 65 MPa, độ bền kéo trung bình là 237,7 MPa và độ giãn dài trung bình là 65%. Tổ chức tế vi của hợp kim đồng nhôm đúc QAl5 gồm các hạt thô và phân bố không đồng đều là lý do làm cho hợp kim đồng nhôm QAl5 sau đúc có độ bền thấp. Để phù hợp với các mục đích sử dụng tiếp theo hợp kim này cần thiết phải tiến hành xử lý nhiệt và gia công biến dạng.



**Hình 6.** Đồ thị đường cong thử kéo của hợp kim QAl5 sau đúc.



**Hình 7.** Tổ chức tế vi của hợp kim QAl5 được cán 30%.

### 3.2. Ảnh hưởng của xử lý nhiệt đến tổ chức tế vi và cơ tính của đồng nhôm QAl5

Do cấu trúc sau đúc của đồng nhôm QAl5 là dạng nhánh cây thô, nên rất khó để có được cấu trúc sợi tốt bằng các phương pháp tạo hình dẻo như cán, do đó, cần phải thực hiện xử lý nhiệt để đạt được tổ chức đồng nhất đồng nhôm QAl5 đúc để thu được cấu trúc hạt cân bằng đồng nhất. Trong nghiên cứu này hợp kim QAl5 sau đúc trước khi ủ kết tinh lại tiến hành gia công biến dạng bằng phương pháp cán 30%. Mục đích của bước này là để các hạt tinh thể biến dạng lớn,

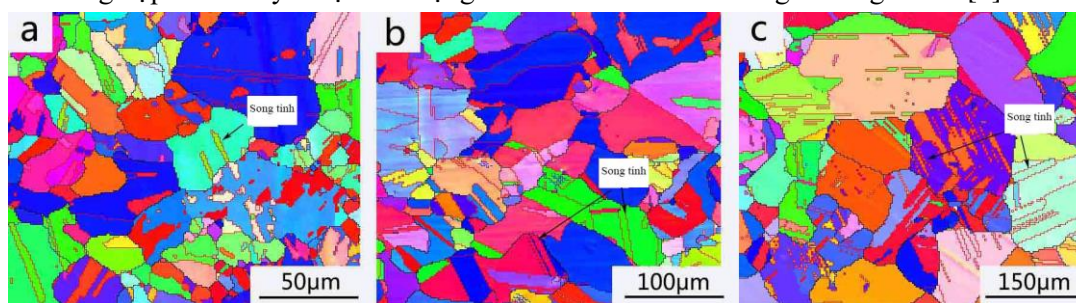
tích trữ một lượng lớn năng lượng biến dạng, ở nhiệt độ kết tinh lại một lượng lớn năng lượng biến dạng được giải phóng tạo năng lượng tạo mầm (năng lượng cần thiết để hình thành các hạt nhân tinh thể), mỗi hạt nhân tinh thể nhỏ được hình thành ở biên giới hạt sau đó sẽ lớn lên. Kiểm soát nhiệt độ kết tinh lại thì sẽ khống chế được kích thước hạt và sự lớn lên của các hạt này.

### 3.2.1. Ảnh hưởng của xử lý nhiệt đến tổ chức của đồng nhôm QAl5

Tổ chức tế vi của hợp kim đúc QAl5 sau khi cán với mức độ cán 30% như trên hình 7, có thể thấy rằng các sợi nhánh có hướng ngẫu nhiên đã được ưu tiên định hướng dọc theo hướng cán. Các sợi nhánh bị biến dạng dưới áp lực mạnh, nhưng các sợi nhánh không bị phá hủy hoàn toàn do hạt ban đầu thô và mức độ cán nhỏ. Mục đích của bước cán này chuẩn bị để cung cấp động lực cho quá trình ủ kết tinh lại cho bước tiếp theo.

Hình 8 là hình ảnh tổ chức tế vi của hợp kim đồng nhôm QAl5 ở các nhiệt độ ủ khác nhau sau khi cán. Do hợp kim đồng nhôm QAl5 được cán với mức độ biến dạng 30%, mạng tinh thể bị biến dạng, các hạt tinh thể bị vỡ và tạo ra ứng suất bên trong lớn, dẫn đến quá trình biến cứng lớn. Nhiệt độ kết tinh lại của đồng nhôm QAl5 được bắt đầu ở 350 °C. Nó được nung đến nhiệt độ thích hợp trên 350 °C và được giữ nhiệt. Trong cấu trúc biến dạng của đồng nhôm QAl5, các hạt mới song tinh được tạo ra. Trong quá trình kết tinh, các hạt mới tiếp tục phát triển cho đến khi cấu trúc bị biến dạng ban đầu biến mất hoàn toàn và thu được cấu trúc không có ứng suất bên trong và quá trình biến cứng, đồng thời các tính chất của đồng nhôm QAl5 cũng thay đổi đáng kể. QAl5 là kim loại có cấu trúc lập phương tâm diện, năng lượng xếp chồng thấp, trong quá trình ủ kết tinh lại, khi các hạt phát triển thông qua chuyển động của biên hạt, thứ tự xếp chồng của lớp nguyên tử trên mặt phẳng (111) tại biên hạt góc vô tình được xếp chồng lên nhau[8], một ranh giới song sinh đồng nhất sẽ xuất hiện và các song tinh ủ sau đó sẽ hình thành ở các góc biên giới hạt.

Từ hình 8, có thể thấy rằng các sợi nhánh thô ban đầu đã trở thành các tinh thể cân bằng tương đối đồng nhất và nhiệt độ ủ càng cao thì kích thước hạt thu được càng lớn. Thông qua tính toán thống kê thành phần song tinh thông qua phương pháp EBSD, thấy rằng các ranh giới song tinh ủ chiếm 34,5%, 39,5% và 55,6% trên tổng số ranh giới biên hạt trong các quy trình xử lý nhiệt 700 °C trong 4 h, 800 °C trong 4 h và 850 °C trong 4 h tương ứng khi tăng nhiệt độ ủ tổ chức song tinh tăng. Biến dạng trước lớn và nhiệt độ ủ cao có thể làm giảm giá trị tới hạn của ranh giới sinh đôi hình thành trong quá trình ủ, thúc đẩy sự hình thành ranh giới song tinh, đồng thời giúp cải thiện sự phân bố kích thước hạt trong hợp kim, ảnh hưởng đến ranh giới song tinh ủ trong hợp kim xử lý nhiệt biến dạng và có thể kiểm soát ranh giới song tinh ủ [3].



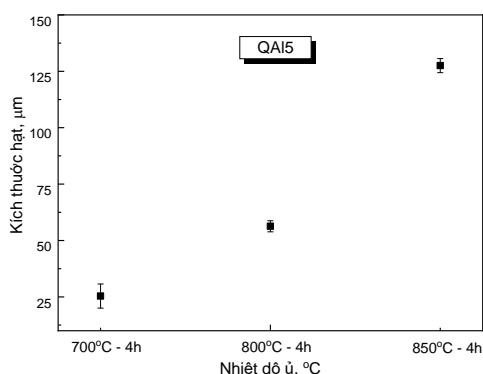
**Hình 8.** Tổ chức của hợp kim đồng nhôm QAl5 trong các quá trình xử lý nhiệt khác nhau sau khi cán trước 30%. a) 700 °C - 4 h; b) 800 °C - 4 h; c) 850 °C - 4 h.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của các chế độ xử lý nhiệt khác nhau đến sự thay đổi kích thước hạt, kích thước hạt trong các quy trình xử lý nhiệt khác nhau được đo nhiều lần và lấy giá trị trung bình. Sự thay đổi kích thước hạt của hợp kim đồng nhôm QAl5 trong các quá trình xử lý nhiệt khác nhau được thể hiện trong hình 9.

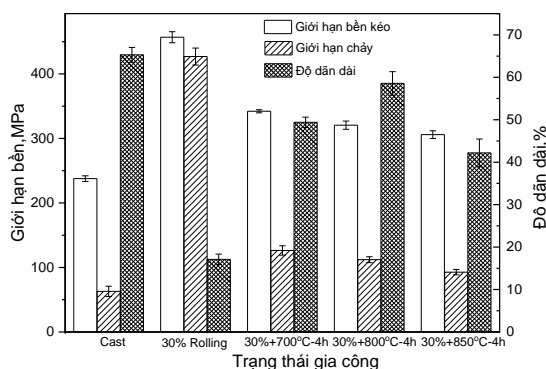
Điều kiện ủ là 700 °C trong 4 h, kích thước hạt trung bình là 25 μm, khi tham số ủ là 850 °C

trong 4 h, kích thước hạt trung bình là 126  $\mu\text{m}$ . Khi nhiệt độ ủ tăng, kích thước hạt ngày càng lớn, điều này là do nhiệt độ ủ càng cao, tốc độ kết tinh lại càng nhanh, có lợi cho sự di chuyển của biên giới hạt, hạt dễ phát triển nên càng lớn, kích thước hạt càng lớn. So với tổ chức đồng nhôm sau đúc, kích thước hạt giảm đáng kể và phân bố kích thước hạt đồng đều hơn, giúp cải thiện cơ tính của hợp kim QAl5, thuận lợi cho quá trình gia công tiếp theo.

**3.2.2. Ảnh hưởng của xử lý nhiệt đến cơ tính của hợp kim đồng nhôm QAl5**



**Hình 9.** Ảnh hưởng của nhiệt độ ủ đến kích thước hạt hợp kim QAl5.



**Hình 10.** Cơ tính tổng hợp của hợp kim đồng nhôm QAl5.

Hình 10 cho thấy các tính chất cơ học của hợp kim đồng nhôm QAl5 ở nhiệt độ phòng ở các chế độ xử lý khác nhau. Trạng thái sau đúc và sau đúc kết hợp cán 30%, hiệu ứng hóa bền của QAl5 đúc rõ ràng sau khi được gia công cán 30%, giới hạn bền tăng từ 65 MPa lên 430 MPa và độ giãn dài giảm từ 65,3% xuống còn 17,1%. So với trạng thái cán 30%, độ dẻo đã được cải thiện rất nhiều và độ bền giảm. So với trạng thái đúc, các tính chất cơ học của trạng thái ủ với quá trình cán sơ bộ trước đều có sự thay đổi lớn. Các tính chất cơ học của hợp kim với các quá trình ủ khác nhau, với sự gia tăng nhiệt độ xử lý nhiệt, tính dẻo của hợp kim tăng lên và độ bền giảm đi rõ ràng. Khi giữ nhiệt trong thời gian 4h thì nhiệt độ tăng từ 700 °C, 800 °C và 850 °C theo đồ thị hình 10 có thể thấy rõ kích thước hạt tăng lên, giới hạn bền và giới hạn chảy đều giảm đi, tuy nhiên, thì độ dẻo của hợp kim QAl5 ở nhiệt độ 700 °C tăng mạnh so với khi cán và đạt giá trị lớn nhất ở 800 °C sau đó lại giảm ở 850 °C điều này có thể được giải thích rằng khi ở nhiệt độ cao trên 800 °C kích thước hạt lớn lên dẫn đến độ bền giảm, độ dẻo giảm mạnh. Hợp kim QAl5 sau khi đúc kết hợp cán và ủ ở 800 °C trong thời gian 4 h cho cơ tính tổng hợp cao đặc biệt là độ dẻo lớn nhất sẽ phù hợp với quá trình biến dạng dẻo tiếp theo để gia công chi tiết phù hợp như lò xo phẳng [7].

**4. KẾT LUẬN**

Trong nghiên cứu này, hợp kim QAl5 có tổ chức tế vi dạng sợi định hướng thông qua nấu luyện, hợp kim hóa, biến dạng dẻo và xử lý nhiệt, đồng thời nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình đúc, cán và ủ kết tinh lại đến tổ chức tế vi và tính chất cơ học của hợp kim QAl5. Kết quả cho thấy: Cấu trúc của hợp kim QAl5 được đúc bằng khuôn kim loại là sợi nhánh với hạt thô, kích thước hạt trung bình trên 500  $\mu\text{m}$  và phân bố kích thước rất không đồng đều. Hợp kim QAl5 đúc có độ dẻo tốt nhưng độ bền thấp, độ giãn dài là 65,3%, giới hạn bền kéo là 237,7 MPa và giới hạn chảy là 65 MPa; Sau khi xử lý cán 30% và ủ tổ chức nhánh cây trạng thái đúc chuyển thành hạt đồng trục với một lượng nhỏ cấu trúc song tinh. Khi nhiệt độ ủ tăng từ 700 °C lên 850 °C, kích thước hạt trung bình tăng từ 25  $\mu\text{m}$  lên 126  $\mu\text{m}$ , sự phân bố kích thước hạt trở nên đồng đều hơn và độ giãn dài tăng, tuy nhiên, ở nhiệt độ ủ 800 °C đạt được độ giãn dài lớn nhất là 58,7% sau đó khi nhiệt độ tăng độ giãn dài giảm. So với trạng thái đúc, giới hạn chảy tăng lên trên 46%. Hợp kim đồng nhôm QAl5 với độ bền và độ giãn dài cao phù hợp với các nguyên công tiếp theo để chế tạo các chi tiết vi lò xo phẳng.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zhu J *et al.* “Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS[J]”. *Micromachines*, 11: 1-2, (2019).
- [2]. Hajare R, Reddy V, Srikanth R. “MEMS based sensors – a comprehensive review of commonly used fabrication techniques”. [J]. *Materials Today: Proceedings*, 49: 720-730, (2022).
- [3]. Tan Y, Dong Y, Wang X. “Review of MEMS electromagnetic vibration energy harvester”. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(1): 1-16, (2017).
- [4]. Xu J *et al.* “A review on micro/nanoforming to fabricate 3D metallic structures”. [J]. *Advanced Materials*, 33(6): 2000893, (2021).
- [5]. Dinh C *et al.* “Effect of electroforming parameters on fatigue properties of copper-based planar microsprings”. *Journal of Ordnance Industry*, 37(7): 1252-1257, (2016).
- [6]. Lv J *et al.* “Fabrication and mechanical characterization of cold extruded aluminum bronze planar microsprings”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(6): 2919-2927, (2017).
- [7]. Lê Công Dưỡng “*Vật liệu học*”, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật Hà Nội, tr. 390, (1997).
- [8]. Pradhan *et al.* “Influence of processing parameters on dynamic recrystallization and the associated annealing twin boundary evolution in a nickel base superalloy”. *Materials Science and Engineering A*, 700:49-58, (2017).

### ABSTRACT

#### **Studying the effect of rolling and heat treatment on the organization and mechanical properties of QA15 alloy after casting**

*In this paper, the influence of plastic deformation and heat treatment on the organization and mechanical properties of QA15 alloy is studied. Alloy QA15 has a fibrous structure obtained by smelting, rolling and heat treatment. Research results show that: (1) The structure of QA15 alloy cast by metal mold is twin organization with coarse grain, average grain size over 500  $\mu\text{m}$  and uneven size distribution. (2) Cast QA15 alloy has good ductility but low strength, elongation is 65.3%, tensile strength is 237.7 MPa and yield strength is 65 MPa. (3) After 30% rolling and annealing treatment, the cast state twig organization turns into coaxial granules plus a small amount of twinning structure. As the annealing temperature increased from 700  $^{\circ}\text{C}$  to 850  $^{\circ}\text{C}$ , the average grain size increased from 25  $\mu\text{m}$  to 125  $\mu\text{m}$ , the grain size distribution became more uniform and at 800  $^{\circ}\text{C}$  a large elongation was achieved. 58.57%, yield strength increased over 46%.*

**Keywords:** QA15 alloy; QA15 aluminium bronze; Rolling; Micro-forming.