

# NGHIÊN CỨU SỰ BIẾN ĐỔI TỔ CHỨC VÀ ĐỘ GIÃN DÀI CỦA HỢP KIM Al-Zn-Mg-Cu SAU BIẾN TÍNH VÀ XỬ LÝ CƠ NHIỆT

## INVESTIGATION ON THE MICROSTRUCTURE AND DUCTILITY OF Al-Zn-Mg-Cu AFTER MODIFICATION AND THERMO-MECHANICAL

BÙI THỊ NGỌC MAI

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: maibtn@vamaru.edu.vn

### Tóm tắt

Trong bài báo này, trình bày những kết quả nghiên cứu về sự biến đổi tổ chức và độ giãn dài của hợp kim Al-Zn-Mg-Cu được biến tính bằng La, Ce kết hợp với xử lý cơ nhiệt. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng: Sau biến tính kết hợp với xử lý cơ nhiệt độ giãn dài của hợp kim đạt tới 667%. Những kết quả nghiên cứu về tổ chức cho thấy được vai trò là tâm mầm kết tinh của  $Al_{11}Ce_3$  và vai trò ngăn cản sự phát triển hạt của  $Al_3La$ . Sau biến dạng và xử lý nhiệt, độ hạt thu được của hợp kim nghiên cứu là dưới  $10\mu m$  với hạt nhỏ, mịn là cơ sở quan trọng cho việc hợp kim đạt độ giãn dài là 667%

**Từ khóa:** Độ giãn dài, pha liên kim, độ hạt, biến tính.

### Abstract

In the article, the results about microstructure changing and increasing ductility of Al-Zn-Mg-Cu alloy which were modified by La, Ce and combined with thermo-mechanical treatment, are presented. Research results show that: After modification combined with thermo-mechanical treatment, the ductility of the alloy reaches 667%. The results of the microstructure show the role of  $Al_{11}Ce_3$  as the nucleation of the solidification process and the role of preventing grain growth of  $Al_3La$ . After deformation and heat treatment, the grain size of a studied alloy is less than  $10\mu m$  with grain fine and have important basis for increasing the ductility of the studying alloy.

**Keywords:** Ductility, intermetallic phase, grain size, modification.

### 1. Mở đầu

Trong số các hợp kim độ dẻo cao, hợp kim nhôm được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp chế tạo cơ khí và lắp ráp ô tô xe máy do tính ứng dụng cao, tương đối phổ biến, giá thành vật liệu cũng như chi phí trong việc chế tạo thấp hơn so với những hợp kim độ dẻo cao khác. Để vật liệu có đặc tính dẻo cao thì kích thước hạt trong tổ chức kim loại phải nhỏ mịn và đều

nằm trong khoảng từ 10nm đến nhỏ hơn  $10\mu m$ . Hiện có nhiều biện pháp làm nhỏ hạt như biến tính, xử lý cơ - nhiệt hoặc kết hợp cả hai phương pháp [1]-[4].

Những nghiên cứu về ảnh hưởng cơ nhiệt [5], [6], [7] đến độ dẻo cao với các tốc độ kéo khác nhau. Hệ hợp kim được nghiên cứu là Al-Zn-Mg-Cu, các mẫu được chuẩn bị được chia làm 2 nhóm: Nhóm A có 0,15% Sc còn nhóm B có 2,8% Ni. Các mẫu được đúc ở dạng tấm và được đồng đều hóa ở  $450^\circ C$  (cho cả 2 mẫu A và B); với mẫu B được tiến hành ủ đồng đều hóa tiếp tục ở  $500^\circ C$ . Sau đó, cả hai mẫu được cán nóng tại  $410\pm 10^\circ C$  và cuối cùng được cán nguội tới khi giảm độ dày của tấm đến 1mm. Kết quả là hợp kim thí nghiệm có chứa Ni cho thấy độ giãn dài 450% - 480% tại tốc độ biến dạng bất biến trong khoảng từ  $10^{-2}$  tới  $10^{-1}$  ( $s^{-1}$ ), trong khi đó hợp kim với Sc cho thấy độ giãn dài 300%-600% tại tốc độ biến dạng nhỏ hơn nhiều  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  ( $s^{-1}$ ), và không có tính độ dẻo cao được quan sát tại tốc độ biến dạng lớn hơn.

Theo như nghiên cứu của A. Kumar và các cộng sự [8] về nghiên cứu ảnh hưởng của Sc đến tính dẻo của hợp kim nhôm cho thấy: Hợp kim có chứa Sc đạt giá trị cao nhất 'm' là 0,7 ở  $475^\circ C$  với tốc độ biến dạng là  $1,9 \times 10^{-2} s^{-1}$ . Kết quả kiểm tra độ bền kéo thực nghiệm đúng với kết quả dựa trên đồ thị được thống kê với độ giãn dài cao nhất lên tới 650% ở  $475^\circ C$ . với độ giãn dài là 650% tốc độ biến dạng  $1,9 \times 10^{-2} s^{-1}$  thì cấu trúc hạt thực sự kết tinh hoàn toàn, ổn định so với độ giãn dài 100% hình thành ít hạt tái kết tinh hơn.

Với hàm lượng La, Ce lớn khả năng La, Ce có thể hình thành các pha liên kim với nhôm với mục đích tạo tâm mầm cho quá trình kết tinh tạo tổ chức có kích thước nhỏ mịn hoặc có vai trò chốt chặn trong việc ngăn quá trình lớn lên của các hạt khi tiến hành ủ đồng đều hóa. Như vậy, có thể thấy rằng với phương án sử dụng hợp kim trung gian đã đưa được La, Ce vào hợp kim với hàm lượng lớn hơn so với việc đưa trực tiếp La, Ce. Từ những phân tích về thành phần khối lượng cho thấy với khối lượng (La, Ce)/Al là phù hợp để hình thành các pha của Al với (La, Ce) như dạng pha

**Bảng 1. Thành phần hóa học của hợp kim nghiên cứu (% về khối lượng)**

| Mẫu | Zn   | Mg   | Cu   | Si     | Fe     | Mn   | La   | Ce   | Al      |
|-----|------|------|------|--------|--------|------|------|------|---------|
| M1  | 6,10 | 2,20 | 1,74 | ≤ 0,34 | ≤ 0,24 | 0,14 | -    | -    | Còn lại |
| M2  | 5,60 | 2,10 | 1,56 | ≤ 0,34 | ≤ 0,24 | 0,17 | 0,21 | 0,16 | Còn lại |

**Bảng 2. Chế độ xử lý của mẫu hợp kim**

| Chế độ         | Nội dung chế độ  |
|----------------|--|
| Ủ đồng đều hóa | Tiến hành ủ tại 480 °C, thời gian giữ nhiệt là 16 tiếng. Làm nguội mẫu cùng lò cho đến khi nhiệt độ của mẫu ổn định với nhiệt độ môi trường. |
| Cán biến dạng  | Mẫu sau khi ủ đồng đều hóa được cán biến dạng từ chiều dày 6mm xuống 2mm.  |
| Ủ kết tinh lại | Mẫu sau khi cán biến dạng được tiến hành ủ kết tinh lại với các nhiệt độ ủ kết tinh lại 350; 400; 450°C trong khoảng thời gian 02 giờ.       |

Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub> và Al<sub>3</sub>La. Trong đó pha Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub> có cấu trúc mặt đáy tương tự như mặt đáy và mặt bên của Al; có sự tương đồng về thông số mạng như vậy Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub> đóng vai trò như là tâm mầm kết tinh. Còn pha liên kim Al<sub>3</sub>La hình thành ở biên giới hạt đóng vai trò chốt chặn ngăn cản sự phát triển của hạt Al.

Để tăng độ dẻo của hợp kim nghiên cứu có ba cơ chế được sử dụng để giải thích cho quá trình này: Cơ chế trượt biên hạt; sự dịch chuyển các lệch trong hạt và khuếch tán của hợp kim. Ba cơ chế này có mối quan hệ chặt chẽ với nhau [9].

Hiện nay chưa có nghiên cứu biến tính bằng La; Ce kết hợp với xử lý cơ nhiệt cho hợp kim Al-Zn-Mg-Cu để tăng tính dẻo của hợp kim nghiên cứu. Đây là nội dung chính của bài báo này.

## 2. Vật liệu và phương pháp

Hợp kim nghiên cứu là hợp kim nhôm hệ Al-Zn-Mg-Cu; thành phần hợp kim tương đồng với mác hợp kim 7475(AA) thuộc nhóm hợp kim nhôm biến dạng

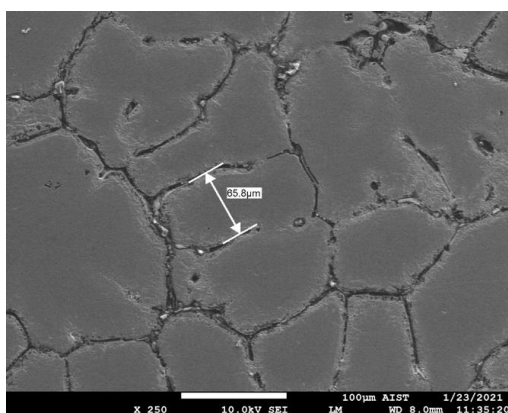
(Bảng 1). Sau quá trình nấu luyện (Bảng 2) và biến tính thu được các mẫu có thành phần và tính chất mong muốn.

Mẫu được phân tích tổ chức trên kính hiển vi quang học Axiovert 25A, kính hiển vi điện tử quét; phân tích EDS trên thiết bị FESEM Jeol 7600 và thử kéo trên thiết bị của hãng Devontrans và sử dụng lò nung Nabertherm.

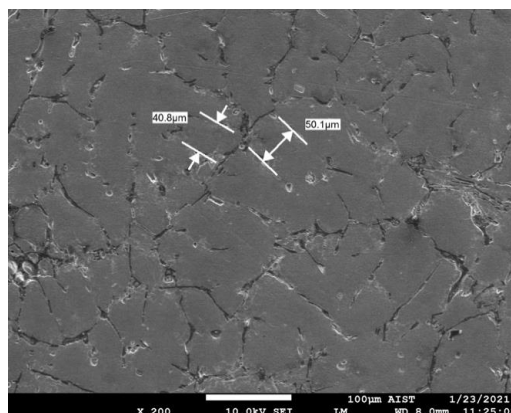
## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Tổ chức tế vi

Hình 1 cho thấy tổ chức mẫu sau đúc bằng kính hiển vi điện tử quét: Khoảng cách giữa các nhánh cây của hợp kim sau đúc không có La và Ce là khoảng 65µm; tuy nhiên đối với mẫu khi có La và Ce thì khoảng cách này giảm còn từ 40 đến 50 (µm). Điều này, có thể được giải thích nhờ vai trò của của pha liên kim Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>; Al<sub>3</sub>La và đất hiếm trong mẫu làm giảm kích thước của các nhánh cây. Tuy vậy, với thành phần của Re trong hợp kim nghiên cứu có thể xuất hiện pha liên kim của Al với các nguyên tố này. Điều này sẽ

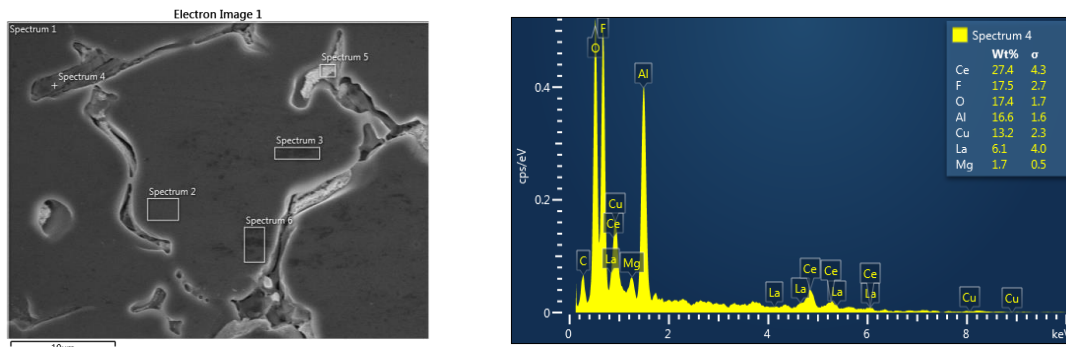


a) M1

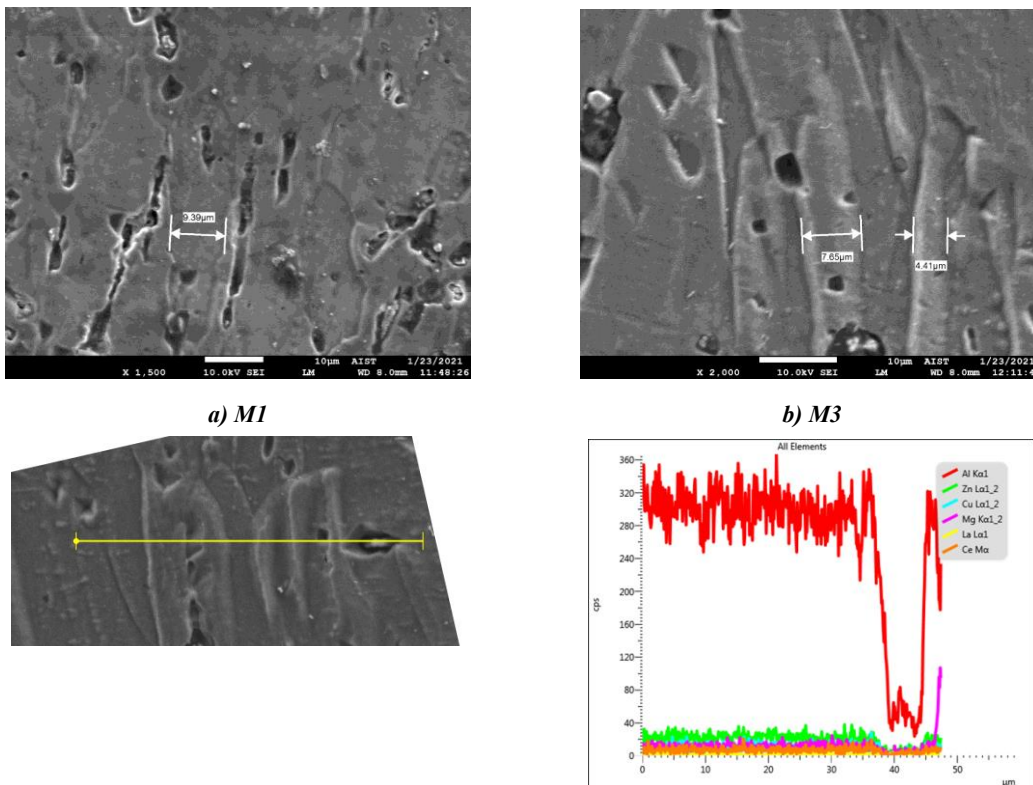


b) M2

**Hình 1. Ảnh hiển vi điện tử quét mẫu sau đúc**



Hình 2. Phân tích phổ năng lượng điểm mẫu M2



a) M1

b) M3

Hình 3. Ảnh hiển vi điện tử quét và EDS đường mẫu sau biến dạng theo phương cán

được minh chứng bằng những phân tích khác như XRD hoặc SEM. Bằng kết quả phân tích hiển vi quang học và hiển vi điện tử có thể thấy các pha nền là dung dịch rắn của nhôm còn phần màu đen có thể dự đoán là các pha liên kim của Zn, Mg, Cu và cũng có thể có sự có mặt của nguyên tố đất hiếm phía bên trong kẽ của pha màu đen đối với mẫu được làm nhỏ mịn hạt bằng đất hiếm.

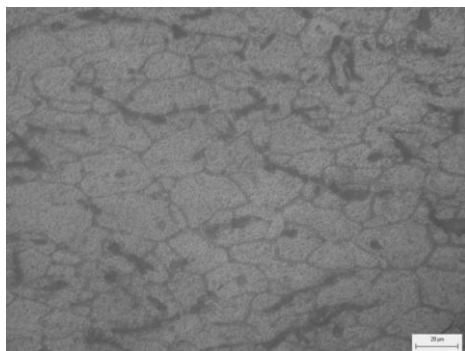
Phân tích các kết quả mẫu sau biến tính có thể nhận thấy sự có mặt của đất hiếm trên toàn bộ bề mặt của các pha, cả ở trên pha nền cũng như ở cả biên giới pha. Chất làm nhỏ mịn hạt ở đây là đất hiếm không hòa tan vào trong kim loại lỏng (nhiệt độ nóng chảy của La, Ce cao hơn nhiệt độ biến tính) nó hình thành

các pha liên kim của Al với La và Ce. Căn cứ theo giản đồ pha của Al-Ce thì có thể có sự xuất hiện của pha  $Al_{11}Ce_3$  được hình thành như tâm mầm kết tinh. Điều này được minh chứng ở kết quả phân tích thành phần spectrum 4; với hàm lượng Ce là 27,4% tính theo tỷ phần khối lượng xác định được cấu trúc của pha liên kim là  $Al_{11}Ce_3$ ; với thành phần La là 6,1% thì công thức của hợp kim nghiên cứu là  $Al_3La$  (Hình 2).

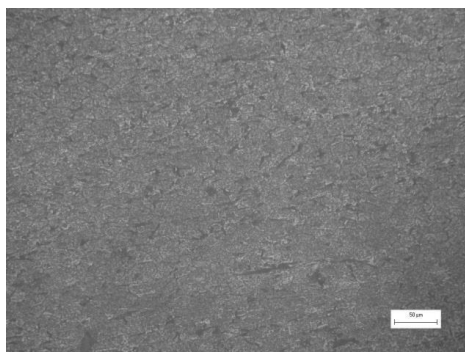
Phân tích ảnh tổ chức mẫu sau biến dạng cho thấy mẫu có La và Ce sau biến dạng khoảng cách các tổ biến dạng là nhỏ hơn so với mẫu không có La và Ce. Phân tích sự phân bố nguyên tố bằng đường quét EDS cho thấy các nguyên tố chính có trong hợp kim nghiên



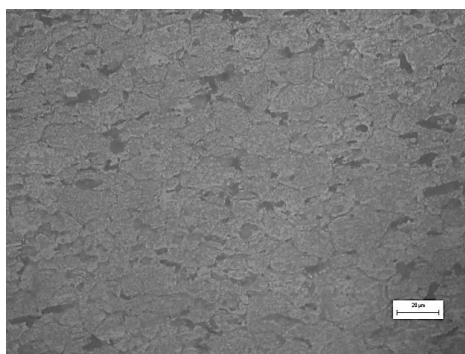
cứu vẫn có sự đồng đều của các nguyên tố (Hình 3). Các hạt sau biến dạng được biến dạng dài; với việc tạo được hạt nhỏ ngay trong quá trình đúc; quá trình ủ đồng đều hóa các hạt không phát triển lên; hình thái hạt dạng tròn đã tạo thuận lợi cho quá trình biến dạng. Số lượng biên giới hạt nhiều và có sự tập trung các lệch và khuyết tật sau biến dạng ở biên giới hạt có vai trò quan trọng trong việc hình thành các tâm mầm kết tinh lại ở giai đoạn ủ kết tinh lại.



a) 350°C



b) 400°C



c) 450°C

Hình 4. Mẫu M2 sau ủ kết tinh lại ở các nhiệt độ khác nhau

Ngoài ra, sau ủ đồng đều hóa và biến dạng vẫn xuất hiện các pha liên kim có kích thước nhỏ mịn nằm ở biên giới hạt cũng đóng vai trò là tâm mầm của quá trình ủ kết tinh lại.

Phân tích tổ chức Hình 4a nhận thấy tổ chức tế vi của mẫu M2 sau khi ủ kết tinh lại vẫn còn các hạt chưa kết tinh lại chỉ có một phần là các hạt sau biến dạng đã kết tinh lại. Điều này được giải thích do chưa đủ về nhiệt độ và thời gian cho quá trình ủ kết tinh lại của hợp kim nghiên cứu.

Trên Hình 4b nhận thấy: Hình thái hạt có sự thay đổi so với mẫu trước khi ủ. Tổ chức dạng thớ sau biến dạng đã bước đầu được khử bỏ một phần; ở độ phóng đại 500 lần thì vẫn thấy tổ chức dạng thớ. Phân tích mẫu biến tính và không biến tính cho thấy mẫu không biến tính có kích thước hạt thô và không đều trên toàn bộ tiết diện. Đối với mẫu biến tính kích thước hạt đều hơn và độ hạt nhỏ hơn so với mẫu không biến tính. Tổ chức dạng thớ do biến dạng vẫn còn ở hai mẫu.

Trên Hình 4c, phân tích tổ chức tế vi của mẫu sau khi ủ kết tinh lại ở 450°C giữ nhiệt trong 2 giờ nhận thấy: Tổ chức tế vi của mẫu không biến tính và biến tính đều không còn tổ chức thớ sau biến dạng. Đối với mẫu không biến tính sau ủ kết tinh lại kích thước hạt thô (khoảng 40μm) có thể sẽ ảnh hưởng đến độ dẻo của hợp kim sau này. Đối với mẫu biến tính kích thước hạt nhỏ mịn (dưới 10μm) hình thái hạt đồng đều; có thể sẽ giúp nâng cao độ dẻo của hợp kim khi thử kéo. Quá trình làm nhỏ hạt sau khi biến dạng và ủ kết tinh lại là có vai trò của La và Ce. Các nguyên tố này kết hợp với Al hình thành pha liên kim như đã phân tích ở trên tạo độ hạt nhỏ ngay sau quá trình đông đặc sẽ góp phần làm mịn hóa và đồng đều hóa tổ chức hạt.

Với độ phóng đại lớn (x1000 và x3000) Hình 5 cho thấy các hạt α-Al “nguyên thủy” vẫn còn trong đó có các phần tử pha tiết ra nhỏ mịn và phân bố đều, tạo ra các hạt nhỏ như là những hạt mới sau ủ kết tinh lại trong hạt nguyên thủy ban đầu. Với mẫu có La, Ce độ hạt của những hạt mới này có kích thước khoảng 7μm so với mẫu không có La, Ce độ hạt của những hạt mới này là khoảng từ 13 đến 18 (μm). Như vậy, có thể nhận thấy vai trò của La, Ce trong quá trình làm nhỏ hạt từ sau khi đúc, đồng đều hóa và ủ kết tinh lại. Ngoài kích thước hạt giảm với mẫu có La, Ce độ hạt trở nên đồng đều hơn so với mẫu không có La, Ce. Việc sử dụng các chất làm nhôm mịn hạt kết hợp với quá trình biến dạng và ủ kết tinh lại đã góp phần làm nhỏ mịn hạt của hợp kim nghiên cứu xuống dưới 10μm. Với kích thước hạt của hợp kim sau xử lý nhỏ mịn là nguyên nhân tăng độ dẻo của hợp kim nghiên cứu. Điều này đã góp phần vào chứng minh cơ chế siêu dẻo của hợp kim dựa trên hạt nhỏ và đều.

### 3.2. Sự thay đổi về độ dẻo

Tính toán lượng biến dạng sau khi kết thúc quá

trình cán cho thấy:

- Đối với mẫu không chứa La và Ce có:

$$\Delta_1 = \left| \ln \frac{1,8}{5,8} \right| \cdot 100\% = 117\% \quad (1)$$

- Đối với mẫu có chứa La và Ce có:

$$\Delta_2 = \left| \ln \frac{1,4}{5,7} \right| \cdot 100\% = 140\% \quad (2)$$

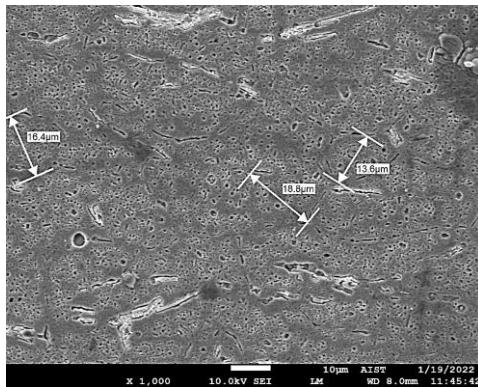
Như vậy có thể thấy đối với mẫu có chứa La và Ce mặc dù chiều dày mẫu giảm không nhiều so với mẫu không có La và Ce nhưng lượng biến dạng của mẫu này là 140% so với mẫu không có La và Ce là 117%.

Hai loại mẫu được cán sau khi đã ủ đồng đều hóa ở 480°C trong 16 giờ. Mỗi lần cán giảm 15%-25% độ dày và mẫu sẽ được ủ khử ứng suất ở 400°C trong 15 phút. Đối với mẫu không chứa La, Ce, sau quá trình cán giảm 117% độ dày, mẫu có hiện tượng nứt viền và

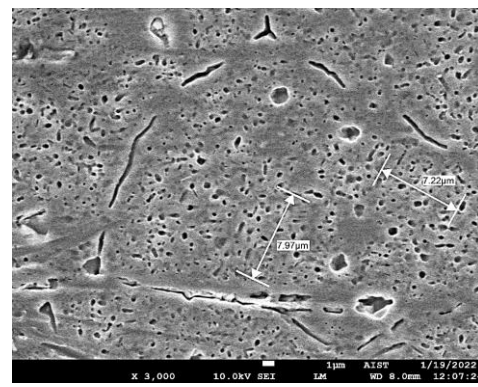
**Bảng 3. Chiều dày biến dạng (mm)**

| Lần cán | M1  | M2  |
|---------|-----|-----|
| 0       | 5,8 | 5,7 |
| 1       | 4,1 | 4,4 |
| 2       | 3,6 | 3,8 |
| 3       | 3,1 | 3,5 |
| 4       | 2,5 | 3,0 |
| 5       | 1,8 | 2,4 |
| 6       |     | 1,4 |

có khả năng sẽ phá hủy nếu cán tiếp, điều này cho thấy sau quá trình ủ của mẫu không chứa La, Ce thì hạt thô, kích thước hạt lớn và chênh lệch nhau nhiều, tổ chức mẫu không đồng đều. Theo Bảng 3 nhận thấy mẫu không chứa La, Ce có mức độ giảm chiều dày sau mỗi lần cán nhanh hơn mẫu biến tính 5% (chỉ sau 5 lần cán

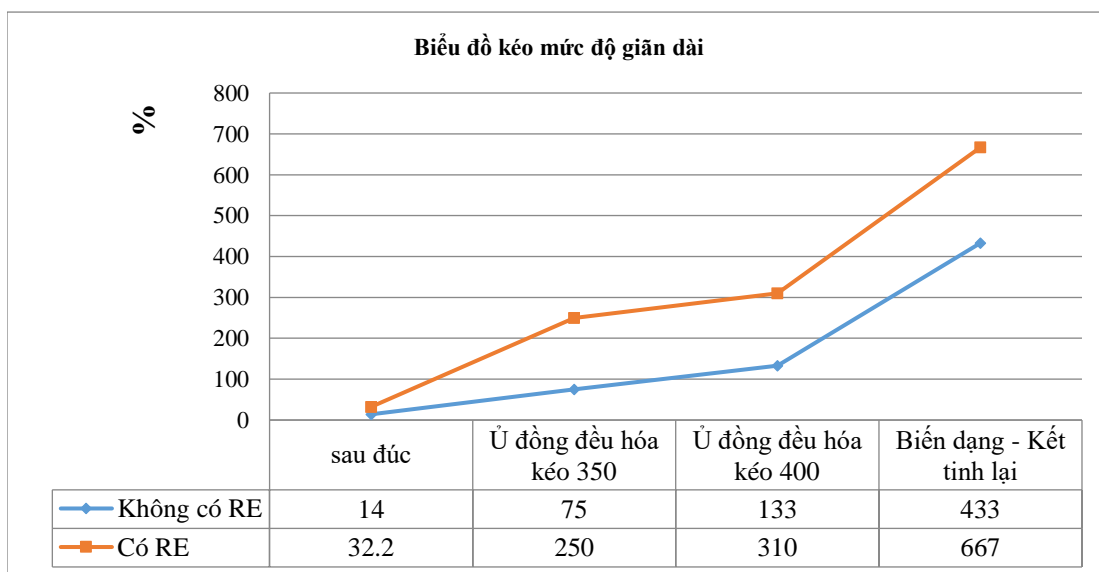


a) M1



b) M2

**Hình 5. Tổ chức tế vi mẫu sau ủ kết tinh lại ở 450°C**



**Hình 6. Biểu đồ mức độ giãn dài của mẫu ở các chế độ khác nhau**

đã giảm 117%) tuy nhiên mẫu đã biến dạng đến gần phá hủy. Đối với mẫu chứa La và Ce, sau 6 lần cán mẫu giảm 140% độ dày, sau quá trình cán đó mẫu không có hiện tượng phá hủy nếu cán tiếp. Điều này cho thấy rằng mẫu chứa La và Ce, sau ủ đồng đều hóa thì hạt có độ mịn tốt, kích thước hạt nhỏ và tổ chức hạt đồng đều hơn mẫu không chứa La và Ce. Mẫu có biến tính độ giảm chiều dày thấp hơn mẫu không biến tính sau quá trình cán, chứng tỏ mẫu có chứa La và Ce có độ bền tốt hơn mẫu không chứa La và Ce.

Phân tích Hình 6 có thể thấy rõ sự chênh lệch mức độ biến dạng tối đa của mẫu có La, Ce và mẫu không có La, Ce. Phân tích các kết quả ở các trạng thái khác nhau cho thấy mẫu có La, Ce có biến dạng lớn hơn so với mẫu không có La, Ce. Đối với chế độ sau đúc mẫu không có La, Ce mức độ biến dạng là 14% trong khi đó mẫu có La, Ce mức độ biến dạng là 32,2%. Điều này, có thể thấy mặc dù độ hạt giảm không nhiều nhưng hiệu quả tăng khả năng biến dạng dẻo là lớn. Sau khi xử lý ủ đồng đều hóa mức độ biến dạng của hợp kim được tăng lên đáng kể ở cả hai nhiệt độ thử kéo. Tại nhiệt độ kéo ở 350°C mức độ biến dạng lần lượt là 75% đối với mẫu không có RE so với mẫu có RE mức độ biến dạng là 250%. Còn điều này tại nhiệt độ thử kéo là 400°C thì lần lượt là 133% và 310%. Kết quả thực nghiệm này cho thấy, sau khi xử lý nhiệt đồng đều hóa mức độ biến dạng dẻo tăng lên đáng kể ở cả hai nhóm mẫu là do tổ chức tế vi sau đúc đã được khử bỏ và trở nên đồng đều hơn. Theo tổ chức tế vi của các mẫu không có chứa La và Ce, các hạt  $\alpha$  nhôm còn biên giới chứa các pha liên kim thô đại (màu đen). Sau biến dạng và ủ kết tinh lại có hình thành các hạt mới, tuy nhiên vẫn còn các pha liên kim. Khi biến dạng, sự cản trở của các phần tử pha liên kim thô trên biên hạt  $\alpha$ -Al nguyên thủy đã giảm rất nhiều đối với quá trình biến dạng.

Đối với hợp kim có La và Ce sau đúc và sau nhiệt luyện, lượng pha liên kim của Al và các nguyên tố như Zn, Mg, Cu đã giảm đi và không còn tập trung ở biên giới hạt tạo thuận lợi cho quá trình trượt biên hạt. Sau biến dạng và ủ kết tinh lại như các kết quả phân tích về tổ chức cho thấy hạt mới có kích thước nhỏ mịn nằm trong các hạt nguyên thủy, tròn đều là yếu tố thuận lợi cho quá trình trượt của hạt; tăng độ dẻo cho hợp kim nghiên cứu. Những pha liên kim  $Al_{11}Ce_3$  và  $Al_3La$  còn tồn tại ở dạng nhỏ mịn và phân tán góp phần cho quá trình biến dạng nhờ cơ chế khuếch tán.

Đối với hợp kim sau biến dạng dẻo và ủ kết tinh lại ở cùng tốc độ kéo và nhiệt độ kéo là 400°C mức độ giãn dài của hợp kim tăng lên đáng kể. Đối với hợp kim không có La và Ce mức độ giãn dài là 433% trong

khí đó hợp kim có La và Ce thì mức độ giãn dài là 667%. Kết quả phân tích cho thấy hiệu quả của biến tính kết hợp với biến dạng và xử lý nhiệt góp phần làm tăng mức độ giãn dài của hợp kim nghiên cứu. Những kết quả về mức độ giãn dài phù hợp với tổ chức tế vi của hợp kim sau biến dạng và ủ kết tinh lại. Sau ủ kết tinh lại kích thước hạt của hợp kim nhỏ dưới 10 $\mu$ m; hạt tròn đều là yếu tố quan trọng để tăng độ dẻo cho hợp kim. Ngoài ra, việc xuất hiện một lượng nhỏ pha liên kim của Al với La và Ce là yếu tố thuận lợi cho quá trình biến dạng dẻo.

## 5. Kết luận

Bằng thực nghiệm kết hợp với lập luận về lý thuyết đã xác định được vai trò của các pha liên kim  $Al_{11}Ce_3$  đóng vai trò làm tâm mầm kết tinh và pha liên kim  $Al_3La$  đóng vai trò như pha ngăn cản quá trình phát triển hạt.

Đã xác định được chế độ công nghệ để tăng độ dẻo của hợp kim Al-Zn-Mg-Cu: Làm nhỏ mịn hạt bằng hợp kim trung gian có chứa đất hiếm; ủ đồng đều hóa ở 480°C trong 16 giờ; biến dạng với mức độ biến dạng nguội 275%. Sau ủ kết tinh lại ở 450°C trong 2 giờ tổ chức hạt thu được có kích thước nhỏ dưới 10 $\mu$ m; độ giãn dài đạt được là 667%.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT22-23.40.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Chemingui et al. (2018), *Effect of heat treatment on microstructure, hardening and plasticity of a commercial Al-Zn-Mg-Cu alloy*, Int. J. Mater. Res., Vol.109, pp.1113-1121.
- [2] G. H. Strijbos and W. H. Kool (1995), *Superplastic behaviour of a rapidly solidified 7475 aluminium alloy*, Mater. Sci. Eng. A, Vol.194, No.2, pp.129-136.
- [3] J. Yang, E. Giraud, P. Dal Santo, S. Boude, and J. L. Lebrun (2019), *Prediction of superplastic forming of 7475 aluminium alloy sheets*, Materials Science and Engineering, Vol.576, No.1, pp.1-10.
- [4] S. Li, Z. Huang, and S. Jin (2019), *Superplastic behavioral characteristics of fine-grained 5A70 aluminum alloy*, Metals (Basel), Vol.9, No.1, pp.1-21.
- [5] K. T. Kashyap and T. Chandrashekar (2001), *Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys*, Bull. Mater. Sci., Vol.24, No.4, pp.345-353.

- [6] V. V. Bryukhovetsky, D. E. Myla, V. P. Poyda, and A. V. Poyda (2020), *Effect of Homogenization on the Superplasticity and Microsuperplasticity of the Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy*, J. Nano- Electron. Phys., Vol.12, No.6, pp.06025-1-06025-8.
- [7] R. K. Mahidhara (1995), *Superplastic flow and failure in a fine-grained 7475 al alloy*, Materials Letters, Vol.25, No.3-4. pp.111-116.
- [8] A. Kumar, A. K. Mukhopadhyay, and K. S. Prasad (2010), *Superplastic behaviour of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy AA7010 containing Sc*, Materials Science and Engineering A, Vol.527, No.3. pp.854-857.
- [9] H. Mircadeh, *Superplasticity and superplastic forming.pdf*.

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Ngày nhận bài:     | 23/10/2022 |
| Ngày nhận bản sửa: | 31/10/2022 |
| Ngày duyệt đăng:   | 07/11/2022 |