

## MỤC LỤC

|  |    |
|--|----|
| 1. Đặt vấn đề.....   | 2  |
| 2. Magie và hợp kim magie.....   | 2  |
| 2.1 Đặc điểm của magie và hợp kim magie .....                          | 2  |
| 2.2 Ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng biến dạng .....                | 6  |
| 2.3 Tổ chức và cơ tính ban đầu của hợp kim magie AZ31 .....            | 8  |
| 2.3.1 Tổ chức tế vi của hợp kim AZ31 .....                             | 8  |
| 2.3.2 Độ cứng và độ bền của hợp kim AZ31 .....                         | 10 |
| 2.4 Tổ chức và cơ tính của hợp kim magie AZ31 sau khi biến dạng nóng.. | 11 |
| 2.4.1 Cơ tính sau khi thử xoắn và nén.....                             | 11 |
| 2.4.2 Tổ chức tế vi sau khi nén .....                                  | 13 |
| Kết luận .....   | 17 |
| Tài liệu tham khảo.....  | 18 |

**Đề tài: Tìm hiểu tổ chức và tính chất cơ học của hợp kim magie AZ31 sau khi biến dạng nóng**

## **1. Đặt vấn đề**

Tính năng của magie không chỉ thể hiện ở trạng thái sau khi đúc mà chúng còn bộc lộ được những ưu việt vượt trội nhờ sự thay đổi cấu trúc sau khi biến dạng dẻo. Qua tìm hiểu một số các kết quả nghiên cứu đã công bố và quy trình sản xuất các dạng bán thành phẩm từ hợp kim magie cho thấy, hầu hết các nhà khoa học đều đưa ra kết luận rằng hợp kim magie có thể thay đổi tính chất một cách đáng kể, đặc biệt là độ bền tăng mà không làm xấu đi tính dẻo thông qua công nghệ biến dạng dẻo nhằm chủ yếu để làm giảm kích thước hạt. Hiện tại, các lĩnh vực khoa học chuyên sâu đang tập trung tiến hành để tối ưu hóa các quá trình xử lý nhiệt và gia công nóng của các hợp kim magie. Trong bài báo cáo này trình bày về sự thay đổi tổ chức và tính chất cơ học của hợp kim magie AZ31 sau khi biến dạng nóng.

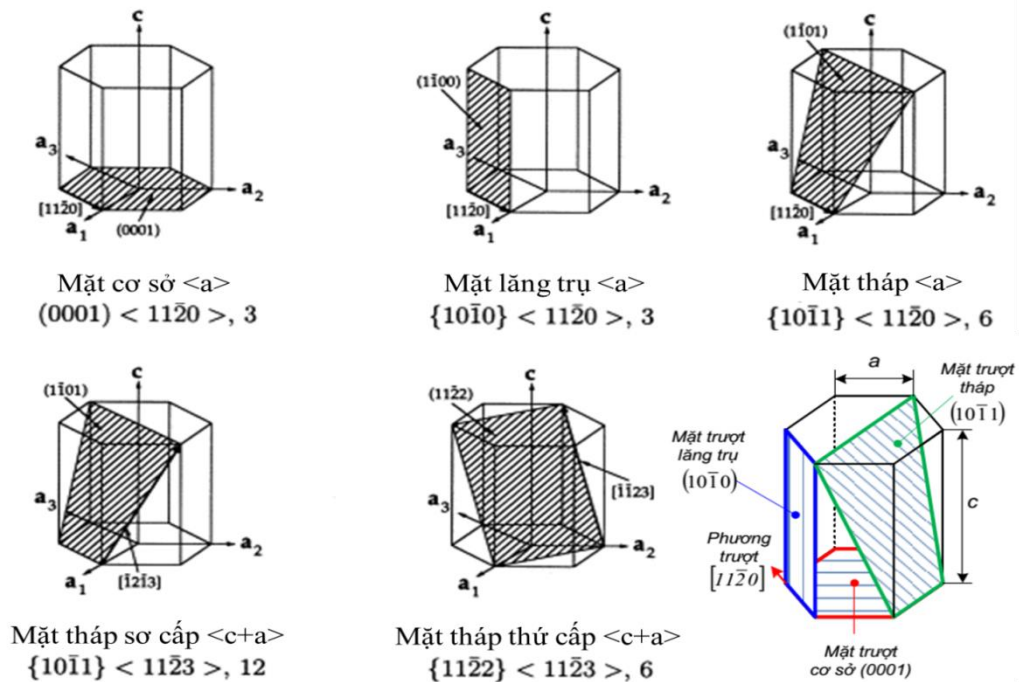
## **2. Magie và hợp kim magie**

### **2.1 Đặc điểm của magie và hợp kim magie**

Magie là một nguyên tố kim loại có trữ lượng rất lớn, chiếm khoảng 2.7% trọng lượng vỏ trái đất và là nguyên tố phổ biến thứ 8 trong vỏ trái đất. Magie không tồn tại ở nguyên tử nhưng dưới dạng hợp chất thì ta có thể dễ dàng tìm thấy khắp nơi trên thế giới, có trong thành phần của gần 200 khoáng vật. Một số dạng hợp chất phổ biến chứa magie là magiezit, dolomit, cacnalit hoặc đặc biệt trong nước biển, đại dương (magie hòa tan trong nước biển đến  $1.1\text{kg/m}^3$ , là phần tử dồi dào thứ 3 trong nước biển). Người ta dùng hai phương pháp chủ yếu để tạo ra magie là nhiệt điện và điện phân, magie nguyên chất được tạo ra vào đầu thế kỷ 19 do nhà hóa học Humphry Davy.

Magiê ở áp suất khí quyển có kiểu mạng lục giác xếp chặt với các thông số  $a = 0.320\text{ nm}$ ,  $c = 0.520\text{ nm}$ , tỉ số  $c/a = 1.624$ , hệ trượt ( $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ ) là hệ trượt chiếm ưu thế, quá trình trượt sẽ xảy ra sớm nhất và chiếm ưu thế trên hệ này.

Hệ trượt quan trọng khác là hệ thứ cấp  $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ , kiểu tháp I  $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$  và kiểu tháp II  $\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$  (Hình 2.1).



**Hình 2.1 Mặt và phương trượt trong mạng tinh thể của Mg và hợp kim Mg**

Thực nghiệm và lý thuyết đều cho biết chỉ có thành phần ứng suất tiếp trên mặt và phương trượt mới gây ra trượt, còn ứng suất pháp không gây trượt. Để kim loại bắt đầu trượt, thành phần ứng suất tiếp phải đạt tới giá trị nhất định. Người ta gọi ứng suất tiếp cần thiết để kim loại bắt đầu trượt là ứng suất tiếp tới hạn  $\tau_{th}$ .

Cùng một ngoại lực tác dụng thì trên các mặt trượt và phương trượt có định hướng khác nhau có giá trị ứng suất tiếp sẽ khác nhau. Như vậy, góc định hướng tương đối giữa ngoại lực với mặt và phương trượt có ý nghĩa quan trọng đến khả năng xảy ra trượt kè nhau.

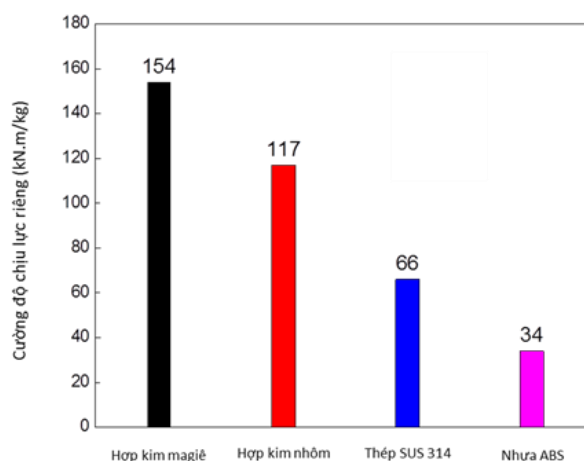
Do đó, chỉ có hệ trượt cơ sở mới không phụ thuộc vào các hệ trượt khác ở trên hệ đó, biến dạng dẻo là đồng nhất theo điều kiện dẻo Von-Mises [22]. Vì vậy, biến dạng dẻo trên những hệ trượt không phải cơ sở sẽ chịu tác động của các hệ trượt khác.

Ở nhiệt độ cao, các hệ trượt kết hợp với nhau và trở nên năng động hơn. Vì thế, magiê có thể biến dạng ở nhiệt độ cao với nhiều hệ trượt khác nhau, không chỉ riêng hệ trượt cơ sở. Tỷ lệ của ứng suất cắt trên hệ trượt cơ sở và các hệ trượt

không phải là cơ sở khác nhau rất lớn, tùy thuộc vào hợp kim magiê với các nguyên tố khác.

Nhiệt độ nóng chảy của magiê không cao, chỉ khoảng  $650^{\circ}\text{C}$ . Tính đúc của magiê tốt, nhất là khi đúc áp lực cao. Magiê có tính hàn tốt trong các môi trường. Ưu điểm nổi trội của magiê là nguyên tố kim loại rất nhẹ, khối lượng riêng của magiê chỉ  $1.738\text{g/cm}^3$ , so với sắt thì magiê nhẹ chỉ bằng 0.22 lần và nhẹ hơn cả nhôm, trọng lượng riêng của magiê chỉ bằng 0.64 lần so với nhôm. Tuy nhiên, magiê nguyên chất bị hạn chế sử dụng do có mô đun đàn hồi thấp, giới hạn bền và khả năng chống dãn ở nhiệt độ cao là kém, hoạt tính hóa học cao nên kém bền ăn mòn. Đó đó, tính sử dụng của magiê chỉ phát huy khi chúng tồn tại ở dạng hợp kim và sau khi áp dụng các biện pháp công nghệ gia công.

Khi kết hợp các nguyên tử của các nguyên tố khác nhau vào tạo ra các hợp kim, giúp cải thiện tính chất của các kim loại nguyên chất. Magiê là một kim loại có hoạt tính cao, nó có thể kết hợp, phản ứng hoặc hòa tan với các kim loại hoặc hợp kim khác để tạo thành hợp kim đa nguyên. Hợp kim magiê đa số đều nhiều pha, những pha này ảnh hưởng lớn đến cấu trúc và tính chất của các hợp kim magiê. Độ bền, độ cứng và các tính chất cơ học khác của hợp kim magiê đều chịu ảnh hưởng của pha nền magiê. Al, Sn, Zn, Pb, Cu, Mn, Ni, Si, W, Zr, Th,... là những kim loại có thể kết hợp được với magiê. Trong các nguyên tố hợp kim đó, nhôm có khả năng kết hợp được với nhiều các nguyên tố khác tạo ra các pha liên kim nên nhôm luôn có mặt trong tất cả các hợp kim của magiê để chế tạo các hợp kim có cơ tính cao, tăng giới hạn bền của hợp kim magiê ở nhiệt độ cao, tăng cường khả năng chống dãn và cải thiện khả năng chống ăn mòn cho vật liệu [2]. Đồ thị so sánh cường độ chịu lực riêng của hợp kim magiê với một số vật liệu khác được thể hiện như trên hình 2.2.



**Hình 2.2 Cường độ chịu lực riêng của: hợp kim magiê, hợp kim nhôm, thép tiêu chuẩn và nhựa ABS**

Các hợp kim magiê được đặt tên theo phương pháp phổ biến chung là: phần chữ cái chỉ các nguyên tố hợp kim chính, con số phía sau chữ là chỉ hàm lượng % khối lượng được làm tròn đến số nguyên của các nguyên tố tương ứng đó. Một số mác hợp kim của magiê: AZ31, AZ80, AZ91, ZE41A, AE21, AE42, LAE442,...

Tùy theo mục đích sử dụng mà ta sử dụng các nguyên tố hợp kim với thành phần phù hợp để cải thiện tính chất của magiê. Một trong những mác hợp kim magiê thông dụng phải kể đến mác vật liệu AZ31 được sử dụng rất rộng rãi trong các ứng dụng công nghiệp.

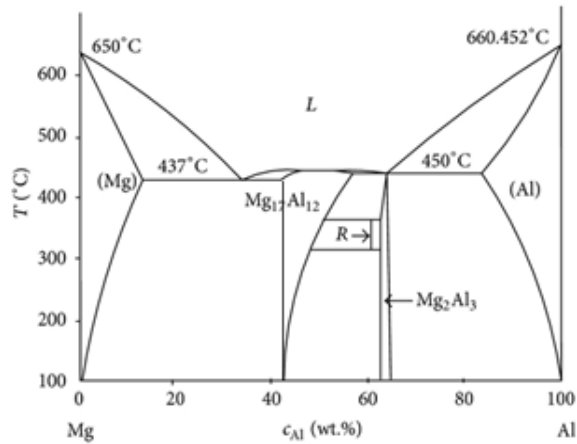
Theo sổ tay ASM Metals Reference Book (1992), thành phần của hợp kim magiê AZ31 được trình bày trong bảng 2.1.

**Bảng 2-1 Thành phần hóa học của hợp kim magiê AZ31**

| Nguyên tố | Al      | Zn      | Si     | Cu     | Mn      | Ni      | Mg    |
|-----------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|-------|
| wt. %     | 2.5÷3.5 | 0.6÷1.4 | ≤ 0.08 | ≤ 0.01 | 0.2÷0.5 | ≤ 0.001 | 95÷96 |

AZ31 là một hợp kim rèn phổ biến nhất. Nó tồn tại chủ yếu một pha dung dịch rắn Mg(Al)-  $\alpha$ , hợp chất  $Mg_2Al_3$ , pha  $Mg_{17}Al_{12} - \gamma$  và hỗn hợp cơ học ( $\alpha + \gamma$ ). Với các hợp kim magiê thương mại có thể có chứa Mn nên có thêm các pha hóa

bền Al-Mn. Nếu hợp kim nung ở nhiệt độ cao, chính các pha hóa bền này sẽ giữ cho các hạt không bị phát triển thô to hơn. Giản đồ pha hợp kim Mg-Al được thể hiện trên hình 2.3. [1-7].



**Hình 2.3 Giản đồ pha hệ Mg-Al**

## 2.2 Ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng biến dạng

Khi nâng nhiệt độ kim loại sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến cơ tính của vật liệu. Có một số chỉ số dẻo của kim loại giảm trong vùng nhiệt độ mà ở đó có thể xuất hiện biến dạng nóng không hoàn toàn và trong vùng nhiệt độ chuyển biến pha (thông thường cả hai hiện tượng này xảy ra gần như ở cùng một nhiệt độ). Sự giảm tính dẻo trong vùng nhiệt độ chuyển biến pha là do trong kim loại biến dạng tồn tại đồng thời hai pha có các tính chất khác nhau, dẫn đến sự không đồng nhất về trạng thái ứng suất sẽ tăng lên.

Ở vùng nhiệt độ dưới sát nhiệt độ nóng chảy, tính dẻo của kim loại sẽ giảm đi một cách đáng kể do có hiện tượng kích thước hạt tinh thể phát triển thô to hơn, kim loại bị hiện tượng quá nung, dẫn đến oxy hóa đường biên giới hạt.

Phần lớn kim loại và hợp kim có tính dẻo cao tại nhiệt độ kết tinh lại (khoảng nhiệt độ tiến hành gia công nóng), vì khi đó độ bền và trở lực biến dạng của kim loại và hợp kim đều thấp, sự hoạt động của nguyên tử càng cao. Điều này khiến hiện tượng hàn vết nứt tế vi trong quá trình gia công cũng dễ thực hiện hơn.

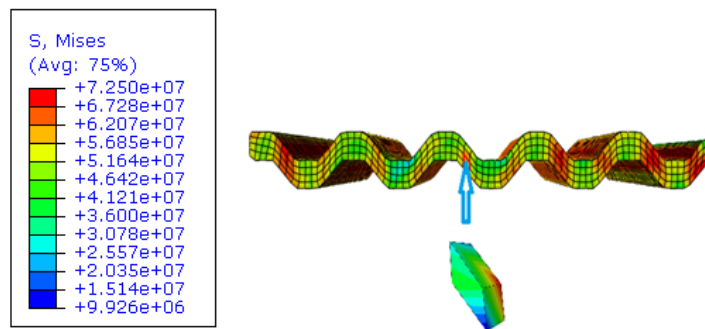
Tuy nhiên, gia công nóng thường chỉ áp dụng được cho các vật thể có kích thước vừa và lớn (phôi tấm có chiều dày khoảng 10mm trở lên). Còn các phôi có

kích thước nhỏ và các tấm mỏng thường được gia công nguội hoặc biến dạng không hoàn toàn.

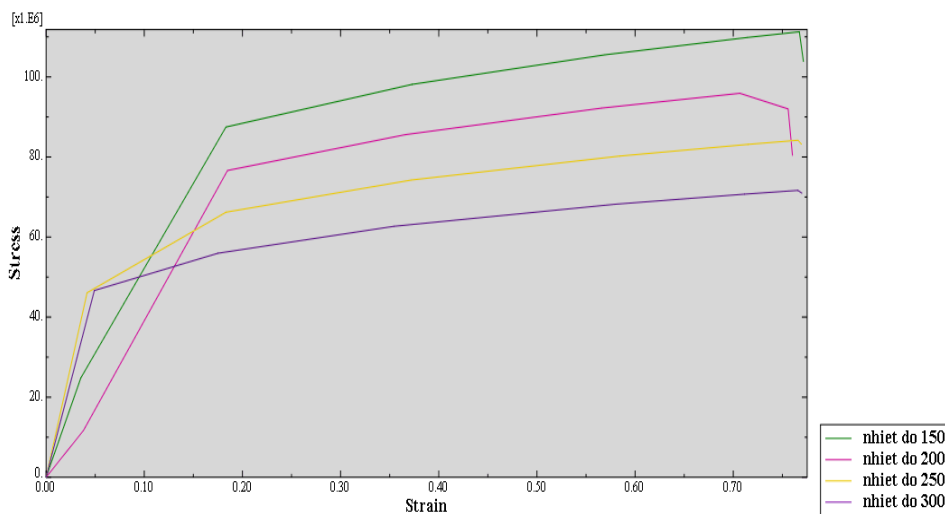
Sự thay đổi cấu trúc tế vi và cơ tính của vật liệu phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ tạo hình. Nhiệt độ nung phôi ảnh hưởng tới các quá trình hồi phục và kết tinh lại của vật liệu. Yếu tố này quyết định sự hình thành kích thước hạt.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ trong quá trình nén ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau, chọn nhiệt độ ban đầu của phôi lần lượt bằng 150°C, 200°C, 250°C, 300°C để mô phỏng số. Căn cứ để chọn vùng thông số này được tham khảo trong tài liệu. Trong quá trình mô phỏng, chỉ thay đổi nhiệt độ, các điều kiện về ma sát và chiều dày phôi giữa nguyên.

Xét một phân tử ở vùng nghiêng của phôi- vùng chịu biến dạng lớn nhất như hình 2.4. Ứng xử của ứng suất biến dạng cho thấy, với sự tăng mức độ biến dạng, ứng suất tăng. Điều này cho thấy, vật liệu đã bị hóa bền. Nhiệt độ biến dạng càng thấp thì giới hạn bền của vật liệu càng cao.



**Hình 2.4** Phân tử vật liệu chịu ứng suất lớn nhất



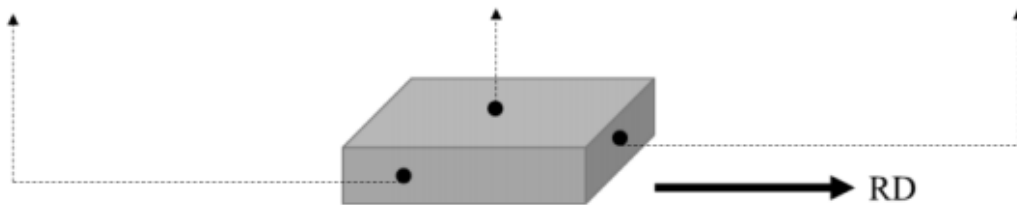
**Hình 2.5** Sự thay đổi đường cong ứng suất biến dạng xét ở phần tử nằm ở vùng nghiêng tại những nhiệt độ khác nhau ở bước đập thứ 1.

Từ kết quả mô phỏng nhận thấy, nhiệt độ tạo hình vật liệu thấp thì ứng suất bên của vật liệu cao, khó biến dạng, phôi dễ bị phá hủy giòn. Nếu nhiệt độ cao, giới hạn chảy của vật liệu thấp, tuy nhiên cùng với sự tăng nhiệt độ, hiện tượng kết tinh lại xảy ra, làm cho kích thước hạt tăng. Vì vậy, lựa chọn nhiệt độ thực hiện quá trình nén khoảng 250<sup>0</sup>C-300<sup>0</sup>C.

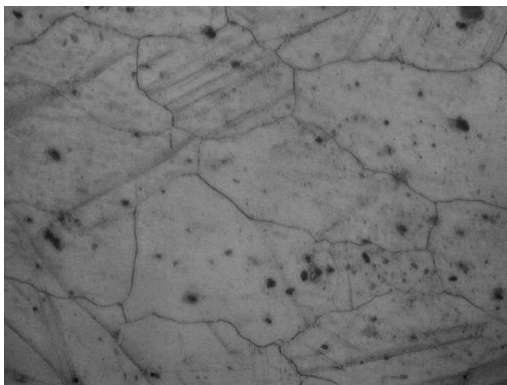
### 2.3 Tổ chức và cơ tính ban đầu của hợp kim magie AZ31

#### 2.3.1 Tổ chức tế vi của hợp kim AZ31

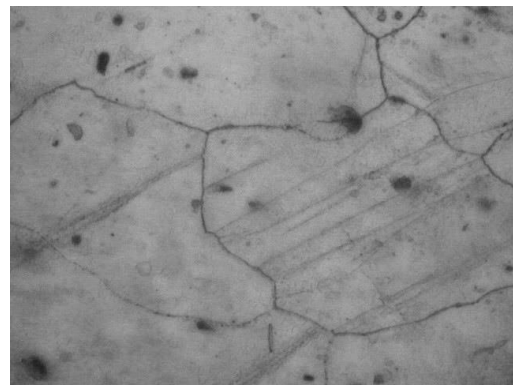
Với mẫu hợp kim AZ31 (xuất xứ Trung Quốc) ban đầu ở trạng thái ủ, sau khi chuẩn bị mẫu, tiến hành soi tổ chức tế vi bằng kính hiển vi quang học với các mức độ phóng đại khác nhau, ta nhận được tổ chức ban đầu của hợp kim AZ31 khi ở trạng thái cung cấp như sau:



*Hình 2.6 Bề mặt mẫu soi tổ chức*



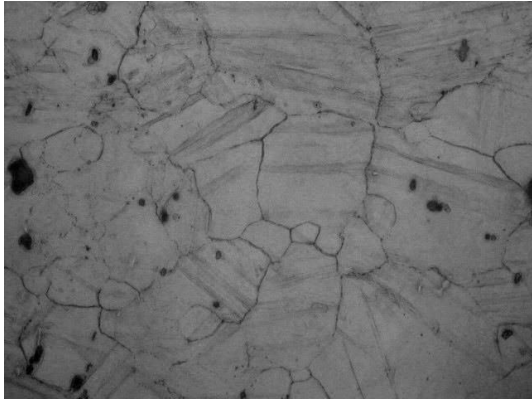
X500



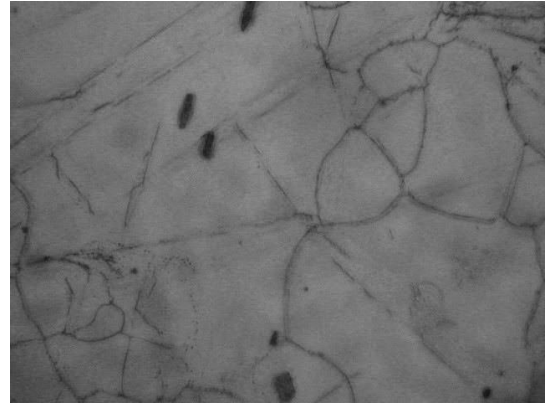
X1000

*Hình 2.7 Tổ chức theo mặt bề mặt cắt dọc mẫu*



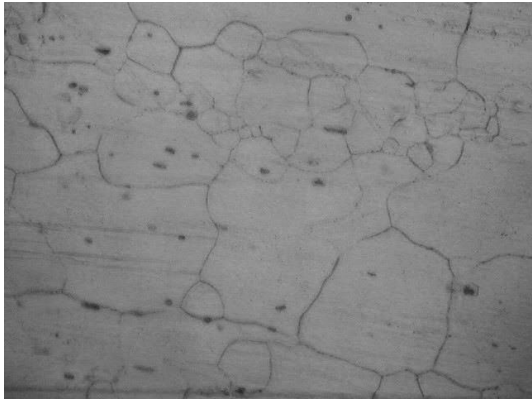


X500

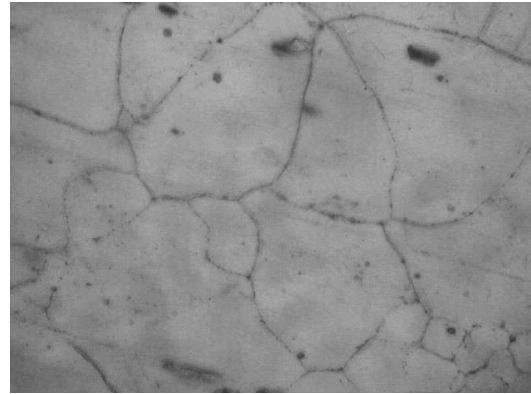


X1000

***Hình 2.8 Tổ chức theo mặt cắt ngang mẫu***



X500

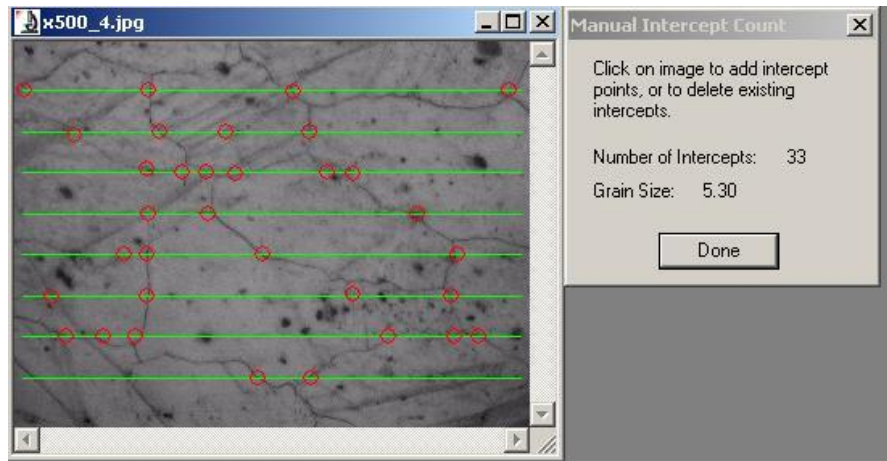


X1000

***Hình 2.9 Tổ chức theo mặt cắt vuông góc mẫu***

Từ ảnh tổ chức tế vi cho ta thấy, cấu trúc các hạt tinh thể ban đầu của hợp kim có kích thước hạt không đồng đều.

Cấp hạt ban đầu của phôi cũng được xác định, kết quả thể hiện trên hình 2.10.

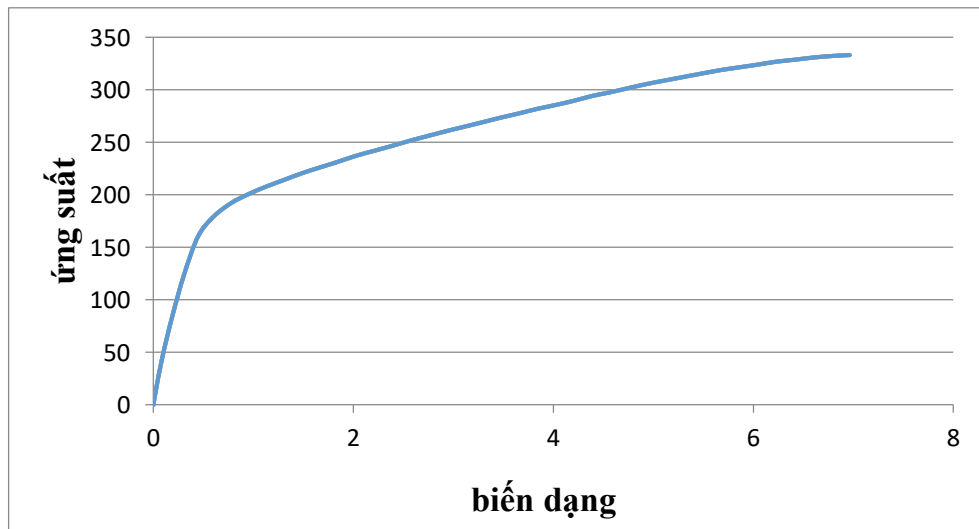


**Hình 2.10 Cấp hạt ban đầu của mẫu AZ31**

Tương ứng với cấp hạt 5,3 tra kết quả tương ứng với độ hạt 62,5  $\mu\text{m}$ , kích thước hạt tương đối thô đại.

### 2.3.2 Độ cứng và độ bền của hợp kim AZ31

Tiến hành chuẩn bị mẫu để đo độ cứng bằng phương pháp Vicke HV0.1 và kéo mẫu thử cơ tính. Kết quả nhận được như trong thấy AZ31 có độ cứng khoảng  $52^{\pm 0.2}\text{HV}$



**Hình 2.11 Đường cong ứng suất-biến dạng của hợp kim AZ31 ban đầu**

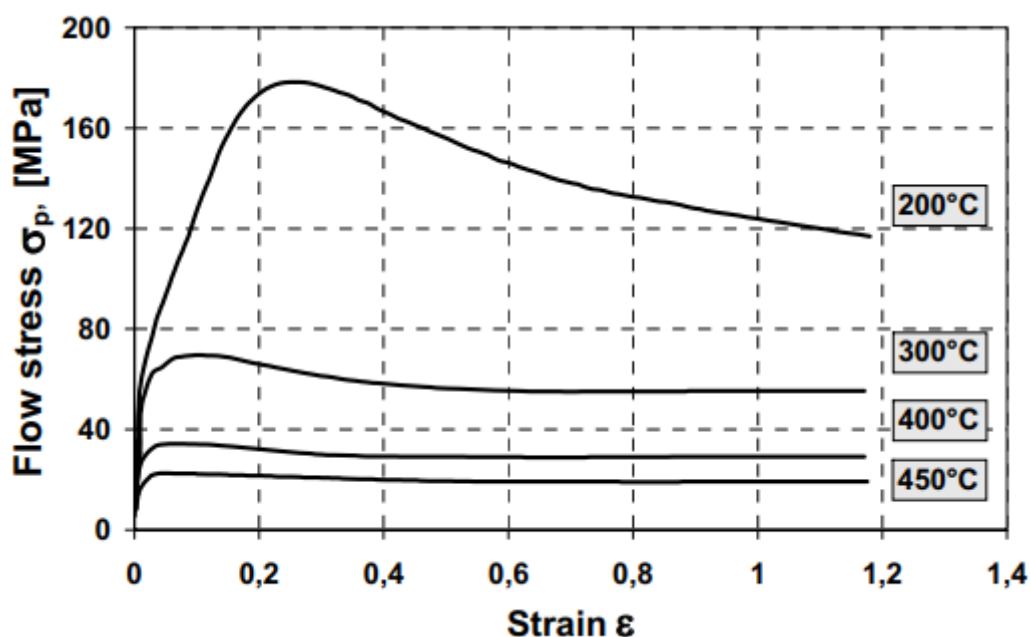
## 2.4 Tổ chức và cơ tính của hợp kim magie AZ31 sau khi biến dạng nóng

### 2.4.1 Cơ tính sau khi thử xoắn và nén

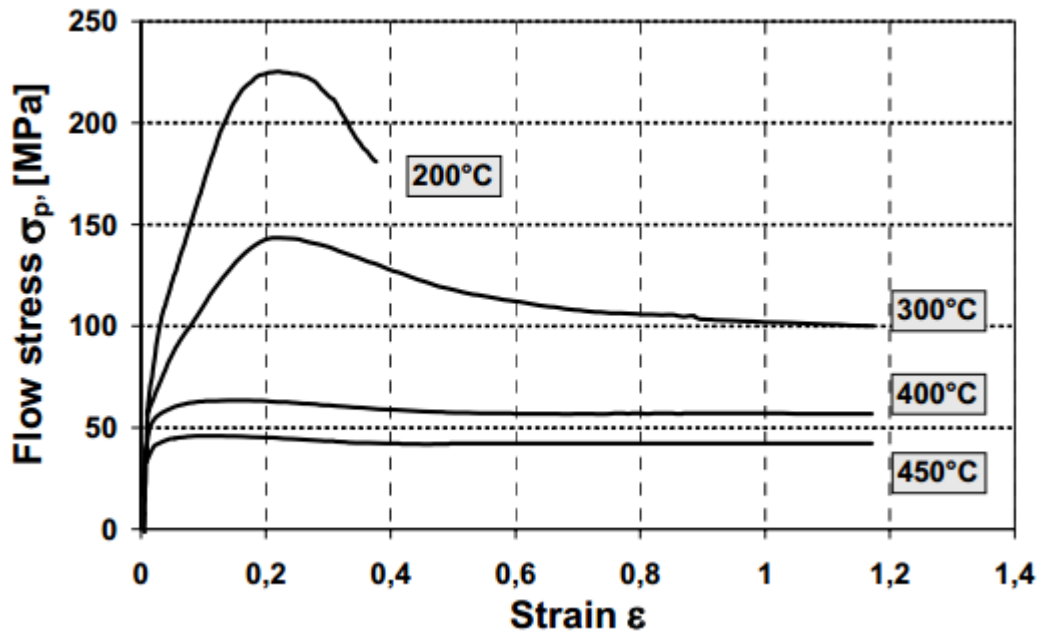
Với mẫu ban đầu có đường kính 10mm, dài 12mm được tiến hành biến dạng kiểu xoắn ở các nhiệt độ: 300, 400 và 450°C với tốc độ quay 65 vòng / phút. Các kết quả nhận được và sau khi tính toán như bảng 2.2.

*Bảng 2-2 Các thông số công nghệ biến dạng xoắn*

| Nhiệt độ biến dạng | Tốc độ biến dạng $\dot{\epsilon}$ , $s^{-1}$ | Độ bền kéo $\sigma_b$ , MPa | Mức độ biến dạng, $\epsilon$ |
|--------------------|--|-----------------------------|------------------------------|
| 300                | 1  | 123.8                       | 0.60                         |
| 400                | 1  | 65.8                        | 0.52                         |
| 450                | 1  | 51.5                        | 0.55                         |



*Hình 2.12 Đường cong ứng suất-biến dạng của hợp kim sau khi thử xoắn với tốc độ  $0.01s^{-1}$  ở các giá trị nhiệt độ khác nhau*

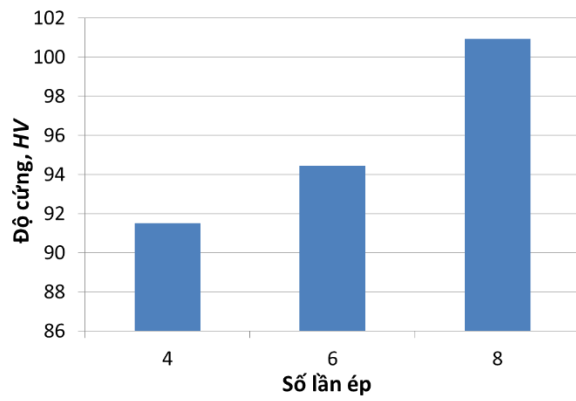


**Hình 2.13 Đường cong ứng suất-biến dạng của hợp kim sau khi thử xoắn với tốc độ  $1s^{-1}$  ở các giá trị nhiệt độ khác nhau**

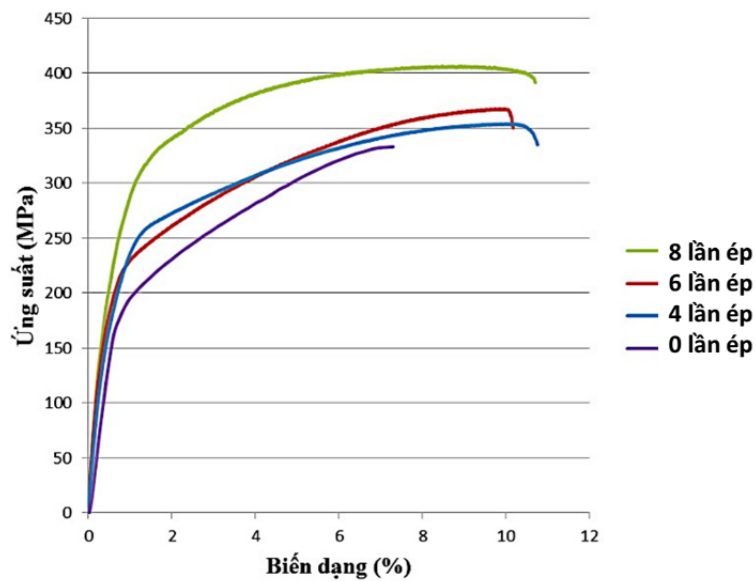
Các mẫu thử nghiệm hình trụ có đường kính 10mm, cao 12mm được nén ở nhiệt độ trong khoảng 200 – 450<sup>0</sup>C, tốc độ biến dạng là 0.01 và  $1s^{-1}$ . Mức độ biến dạng tối đa đến 1.2. Các kết quả nhận được và sau khi tính toán như bảng 2.3.

**Bảng 2-3 Các thông số công nghệ biến dạng nén**

| Nhiệt độ biến dạng | Tốc độ biến dạng $\dot{\epsilon}$ , $s^{-1}$ | Độ bền kéo $\sigma_b$ , MPa | Mức độ biến dạng, $\epsilon$ |
|--------------------|--|-----------------------------|------------------------------|
| 200                | 0.01   | 178.2                       | 0.26                         |
|                    | 1  | 225.8                       | 0.23                         |
| 300                | 0.01   | 69.2                        | 0.08                         |
|                    | 1  | 143.4                       | 0.22                         |
| 400                | 0.01   | 34.1                        | 0.07                         |
|                    | 1  | 63.2                        | 0.17                         |
| 450                | 0.01   | 22.5                        | 0.03                         |
|                    | 1  | 45.2                        | 0.13                         |



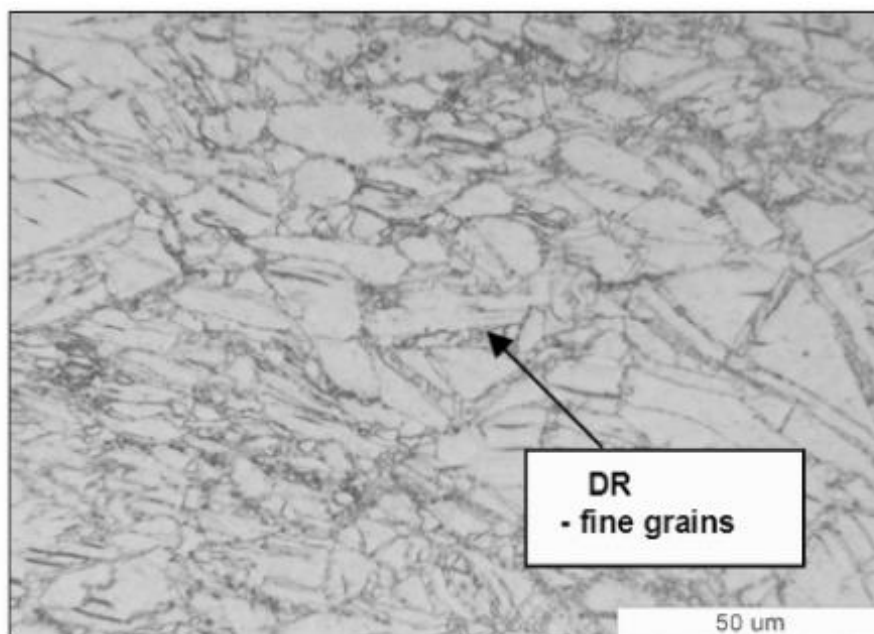
**Hình 2.14 Sự thay đổi độ cứng HV trung bình của hợp kim AZ31 sau khi ép ở 250°C**



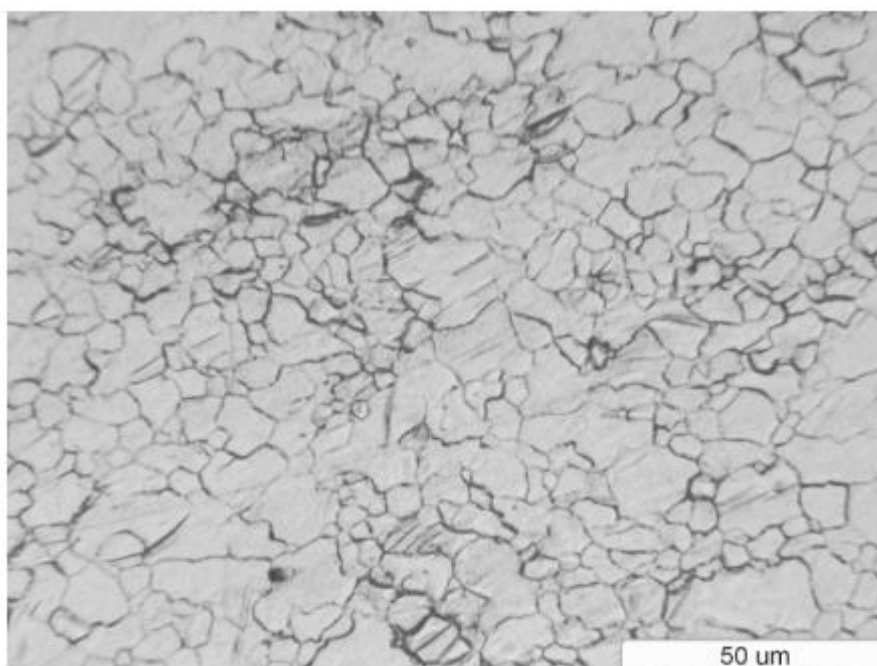
**Hình 2.15 Độ bền kéo của hợp kim AZ31 trước và sau khi ép ở 250°C**

#### 2.4.2 Tổ chức tế vi sau khi nén

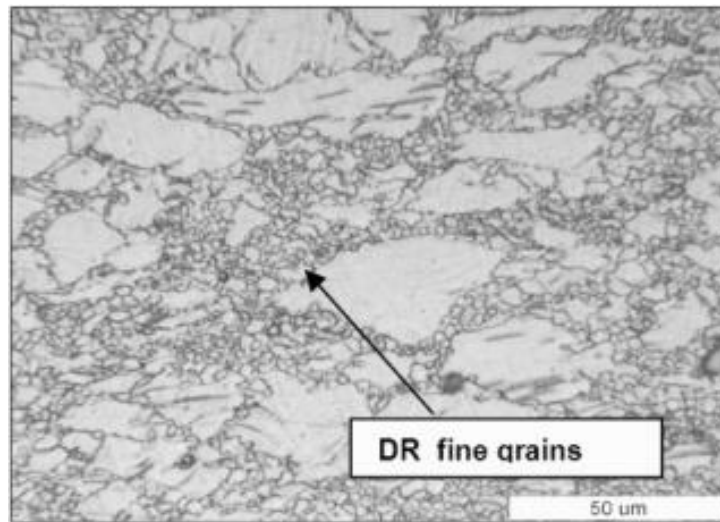
Sau khi được nén ở nhiệt độ trong khoảng 200 – 450°C, tốc độ biến dạng là 0.01 và 1s<sup>-1</sup>. Dùng kính hiển vi quang học tiến hành soi các mẫu thử đã được chuẩn bị sau khi nén. Hình ảnh tổ chức tế vi như hình 2.16 đến hình 2.19.



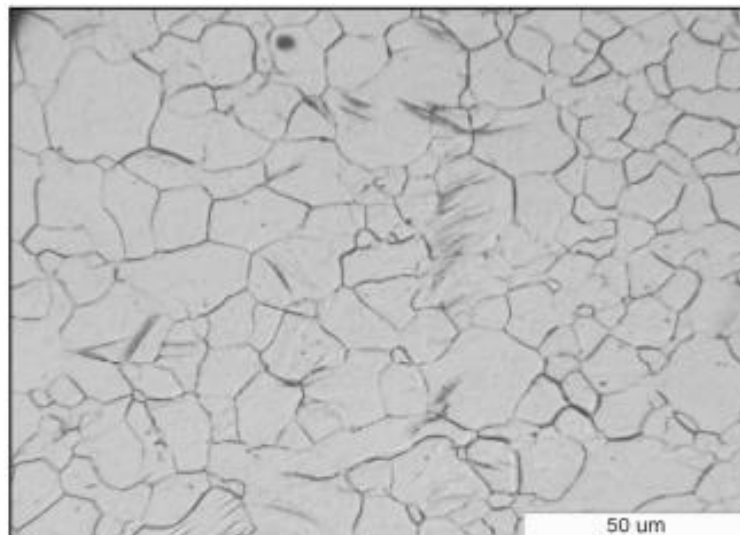
**Hình 2.16** Tổ chức tế vi của hợp kim AZ31 sau khi nén ở 200°C với tốc độ  $1s^{-1}$



**Hình 2.17** Tổ chức tế vi của hợp kim AZ31 sau khi nén ở 300°C với tốc độ  $0.01s^{-1}$



**Hình 2.18** Tổ chức tế vi của hợp kim AZ31 sau khi nén ở 300<sup>0</sup>C với tốc độ 1s<sup>-1</sup>



**Hình 2.19** Tổ chức tế vi của hợp kim AZ31 sau khi nén ở 450<sup>0</sup>C với tốc độ 1s<sup>-1</sup>

Qua tổ chức tế vi hình 2.16 cho thấy, các hạt tinh thể kéo dài ra, xảy ra quá trình kết tinh lại, xuất hiện nhưng hạt mịn ở biên giới giữa các hạt và các vị trí có song tinh. Các mẫu khi biến dạng ở tốc độ thấp sẽ xảy ra quá trình kết tinh lại dễ dàng hơn là ở tốc độ cao. Hình 2.17, sau khi biến dạng ở nhiệt độ 300<sup>0</sup>C, với tốc độ 0.01s<sup>-1</sup> cho ta thấy được sự hình thành các cấu trúc hạt mịn do quá trình kết tinh lại tạo ra. Trong khi đó, đối với trường hợp tốc độ biến dạng là 1s<sup>-1</sup> cao hơn, thì xuất hiện các chuỗi hạt kết tinh thể nhỏ mịn được quan sát thấy rõ rệt trên ranh giới của hạt sơ cấp khi bị biến dạng như hình 2.18. Tuy nhiên, nếu tăng nhiệt độ biến dạng đến 400 - 450<sup>0</sup>C thì quá trình kết tinh lại xảy ra mãnh liệt hơn, đồng

thời hạt tinh thể lại bị phát triển thô to hơn rất nhiều, còn rất ít những hạt song tinh như hình 2.19.



## Kết luận

Hợp kim magiê được đặc trưng bởi dạng cấu trúc một pha, với nhiều cặp song tinh biến dạng được hình thành trong quá trình cán. Ngâm hợp kim trước khi biến dạng dẻo dẫn đến hạt phát triển và giảm số lượng cặp song tinh biến dạng. Các kết quả kiểm tra khi biến dạng xoắn cho thấy, độ biến dạng hợp kim rất tốt sau cán nóng. Các kết quả phân tích của cấu trúc sau khi nén nóng cho thấy xu hướng hợp kim Mg-Al-Zn có xảy ra sự kết tinh lại.

Biến dạng hợp kim ở nhiệt độ 200°C ở cả hai tốc độ biến dạng và ở nhiệt độ 300°C với tốc độ 1s<sup>-1</sup> đều dẫn đến sự kết tinh lại. Các quá trình kết tinh lại diễn ra có ảnh hưởng đáng kể đến giới hạn chảy của hợp kim. Tuy nhiên, cấu trúc hạt kết tinh lại rất nhỏ mịn nhận được sau khi nén ở nhiệt độ 300°C với tốc độ 0,01s<sup>-1</sup>. Nếu tăng nhiệt độ biến dạng dẫn đến sự phát triển quá trình kết tinh lại và hạt sẽ thô to. Kết quả là, sau khi biến dạng tại nhiệt độ 450°C kích thước hạt lớn hơn đáng kể so với trước khi biến dạng.

Nghiên cứu này sẽ là tiền đề được sử dụng cho sự phát triển mô hình toán học, có xét đến những thay đổi động lực học về cấu trúc diễn ra trong quá trình kết tinh lại của hợp kim AZ31 khi biến dạng ở nhiệt độ cao.

## Tài liệu tham khảo

- [1] OKAMOTO, H. Desk handbook: *phase diagrams for binary alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- [2] AVEDESIAN, M. M. and Hugh BAKER, eds. *Magnesium and magnesium alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 1999.
- [3] MORDIKE, Barry L. and K. U. KAINER, eds. *Magnesium alloys and their applications*. Frankfurt:Volkswagenwerk,Werkstoff N Informationsgesellschaft, 1998.
- [4] MORDIKE, B.L. and T. EBERT. Magnesium: Properties — applications — potential. *Materials Science and Engineering: A*. 2001, vol. 302, no. 1, pp. 37-45.
- [5] CAHN, R. W., P. HAASEN and E. J. KRAMER, eds. *Materials science and technology: a comprehensive treatment*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [6] LYON, P., T. WILKS and I. SYED. The influence of alloying elements and heat treatment upon properties of Elektron 21 (EV31A) alloy. In: NEAL R. NEELAMEGGHAM, Howard I. KAPLAN and Bob Ross POWELL, eds. *Magnesium technology 2005: Proceedings of the symposium*. Warrendale, Pa: TMS, 2005, p. 303-308.
- [7] GUPTA, M. *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. New York: John Wiley & Sons, 2011.