

BÁO CÁO HỌC THUẬT NĂM HỌC 2020-2021

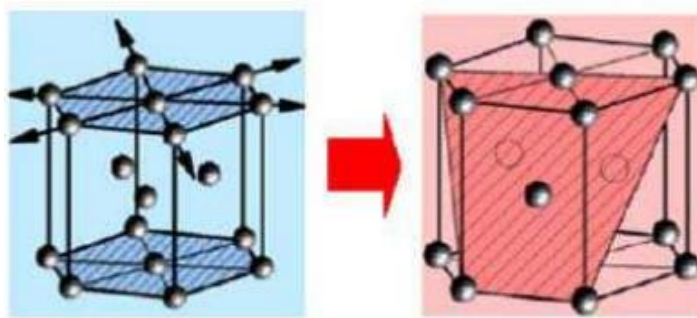
Đề tài: Nghiên cứu mô phỏng số và thực nghiệm quá trình biến dạng âm của hợp kim AZ31-O dạng tấm.

Tác giả: Phạm Thị Thủy

Bộ môn Kỹ thuật cơ khí

1. Đặt vấn đề

Vật liệu nhẹ đã được nghiên cứu rộng rãi hiện nay. Vì giảm trọng lượng trong khi vẫn duy trì các yêu cầu chức năng là một trong những mục tiêu chính trong các ngành công nghiệp để tiết kiệm vật liệu, năng lượng và chi phí, v.v. Magie là kim loại có khối lượng riêng chỉ bằng khoảng $\frac{2}{3}$ của nhôm và $\frac{1}{4}$ của sắt nên hợp kim của chúng rất nhẹ, có tiềm năng lớn để thay thế các vật liệu đã được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên, do tinh thể magie có cấu trúc mạng kiểu lục giác xếp chặt (HCP) nên magie có tính dẻo hạn chế khi thực hiện công nghệ biến dạng nguội. Chúng sẽ tăng tính dẻo, giảm ứng suất chảy nên được cải thiện rõ rệt khi thực hiện biến dạng ở nhiệt độ ấm hoặc nóng [1].



Hình 1.1. Kích hoạt các mặt trượt thứ cấp cho magie khi ở nhiệt độ cao.

Trong nghiên cứu này, vật liệu được tìm hiểu là AZ31-O tấm được tạo trên nguyên tố cơ sở là magie với các nguyên tố hợp kim chính gồm 3% nhôm và 1% kẽm. Độ dày tấm là 1,2mm. Tính dẻo và khả năng biến dạng của AZ31-O được nghiên cứu thông qua các thí nghiệm và mô phỏng số.

2. Thí nghiệm xác định cơ nhiệt ẩm cho AZ31

Phương pháp kéo có lẽ là thử nghiệm cơ học cơ bản nhất được thực hiện trong vật liệu bởi tính đơn giản, tương đối rẻ tiền và được tiêu chuẩn hóa đầy đủ. Kết quả từ thử nghiệm thường được sử dụng để chọn một vật liệu để đánh giá chất lượng và dự đoán khả năng chịu các loại lực tác dụng lên một vật liệu. Các chỉ tiêu được đo trực tiếp từ thử nghiệm kéo là giới hạn bền kéo, độ giãn dài tương đối, độ giảm diện tích tiết diện, v.v. Từ những kết quả của các phép đo, cho phép xác định các thuộc tính khác như: Mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, giới hạn chảy và các đặc tính làm hóa bền biến dạng cũng có thể được xác định. Nói chung, thử nghiệm kéo được sử dụng cho xác định các thông số sau [2, 3]:

- 1) Ứng suất chảy ban đầu và đặc tính hóa bền của vật liệu.
- 2) Tính dị hướng của vật liệu được.
- 3) Độ nhạy tốc độ biến dạng của vật liệu (Bằng cách thay đổi vận tốc tác dụng lực tại thời điểm kết thúc hành trình mẫu thử).

Vì hợp kim magiê thể hiện độ dẻo kém khi ở nhiệt độ thấp nên khi biến dạng trong công nghiệp các quá trình được thực hiện ở nhiệt độ ấm hoặc cao. Vì vậy, các thử nghiệm kiểm tra độ bền kéo ở đây được tiến hành ở khoảng nhiệt độ ấm. Thiết bị kiểm tra độ bền kéo được sử dụng là máy kéo thủy lực Instron 1341H® tải trọng tối đa của 300KN như hình 2.1, tiến hành thử ở các nhiệt độ khác nhau trong khoảng nhiệt độ phòng đến 300°C. Trong kiểm tra độ bền kéo ấm, lò nung đóng một vai trò quan trọng trong việc đảm bảo nhiệt độ mẫu thử, lò nung được bố trí cạnh máy thử kéo có nhiệt độ hoạt động đến 600°C, độ chính xác sai số đến $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Trước khi thử kéo, mỗi mẫu đều được nung và giữ ở nhiệt độ thử kéo trong 30 phút.



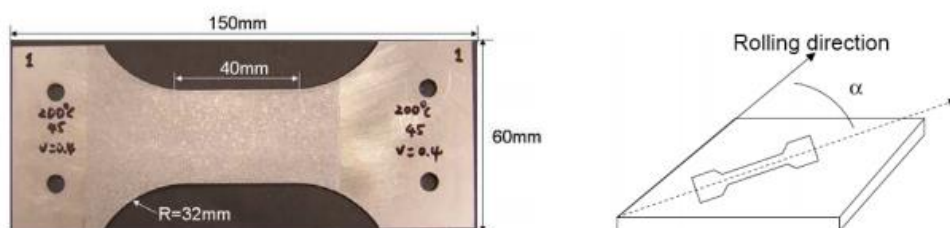
a) Máy thử kéo



b) Lò nung

Hình 2.1. Máy kéo nhiệt độ cao INSTRON và lò nung IN-SITU.

Hình dạng mẫu thử được thiết kế theo tiêu chuẩn ISO 6892-2 về quy định phương pháp kiểm tra độ bền kéo của vật liệu kim loại ở nhiệt độ cao hơn nhiệt độ phòng [4]. Các mẫu được cắt với kích thước 150mm × 60mm và bán kính góc lượn là 32mm, chiều dài thẳng là 40mm. Để nghiên cứu tính dị hướng của vật liệu, các mẫu thử đã được cắt theo các hướng khác nhau, cụ thể lấy theo hướng cán các góc tương ứng là 0° , 45° , 90° như hình 2.2 cho thấy kích thước của mẫu thử và hướng lấy các mẫu thử kéo.



Hình 2.2. Kích thước mẫu thử kéo và vị trí lấy mẫu.

Các mẫu thử được kẹp ở cả hai đầu và vận tốc không đổi để xác định độ nhay tương ứng là 0,04mm/s; 0,4mm/s và 4mm/s. Sau đó, theo chiều của mẫu, tốc độ biến dạng có thể được tính toán gần đúng với phương trình liên quan lần lượt là $0,001s^{-1}$, $0,01s^{-1}$ và $0,1s^{-1}$. Tất cả các mẫu đều được đánh bóng trước khi thử nghiệm để loại bỏ các vết xước lớn. Các quá trình thay đổi lực tác dụng và hành trình kéo được ghi lại liên tục bằng một máy tính có trang bị hệ thống thu thập dữ

liệu tự động. Ứng suất thực và biến dạng thực được rút ra từ phép đo mối quan hệ ứng suất-biến dạng danh nghĩa theo phương trình biến đổi [5]. Ứng suất và biến dạng biểu hiện như sau:

$$\sigma_N = \frac{F}{S}; \quad \varepsilon_N = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\sigma_T = \sigma_N e^{\varepsilon_N}; \quad e^{\varepsilon_N} \approx 1 + \varepsilon_N \text{ khi } \varepsilon_N \ll 1$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_N)$$

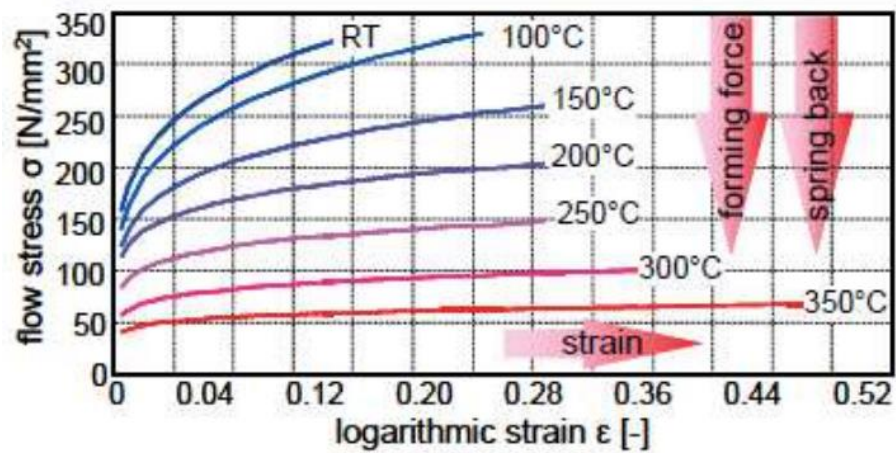
Trong đó:

σ_N, σ_T là ứng suất thực, ứng suất danh nghĩa;

$\varepsilon_N, \varepsilon_T$ là mức độ biến dạng thực và danh nghĩa.

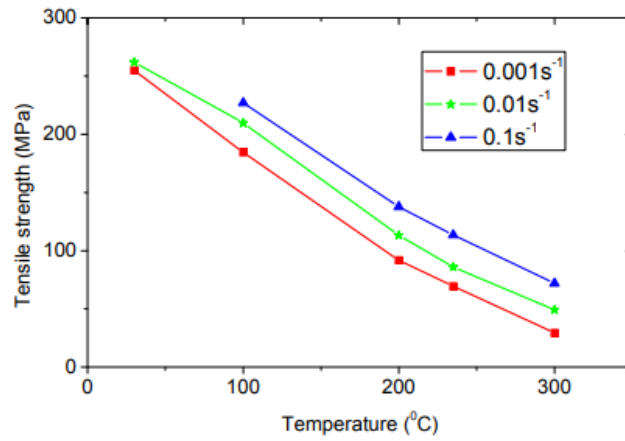
Tiến hành thử nghiệm độ bền kéo trong phạm vi nhiệt độ $150 \div 300^\circ\text{C}$, với tốc độ biến dạng $0.1 \div 0.0001 \text{ s}^{-1}$ được thực hiện trong phòng thí nghiệm đảm bảo độ tin cậy. Kết quả phân tích cho thấy rằng độ dẻo được tăng lên theo độ tăng nhiệt độ và giảm tốc độ biến dạng. Hơn nữa, ba loại mẫu thử được sử dụng với nhiều hướng khác nhau đối với hướng cán để nghiên cứu tính chất dị hướng của vật liệu. Thí nghiệm kết quả rõ ràng chỉ ra rằng, vật liệu có tính dị hướng ở nhiệt độ thấp hơn, nhưng tính dị hướng giảm khi tăng nhiệt độ. Tính dị hướng ít rõ ràng hơn nhiều so với 200°C . Vì vậy, tính chất dị hướng không được xem xét trong nghiên cứu này.

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của đường cong chảy đối với hợp kim magiê AZ31 được thể hiện trên hình 2.3. Từ mối quan hệ ứng suất chảy và biến dạng ở các nhiệt độ. Thứ nhất, nhiệt độ cao góp phần cải thiện độ dẻo và tăng khả năng biến dạng và thứ hai làm giảm điểm chảy của vật liệu, do đó làm giảm lực biến dạng. Bên cạnh đó, hiện tượng đàn hồi ngược cũng giảm khi nhiệt độ tăng lên.

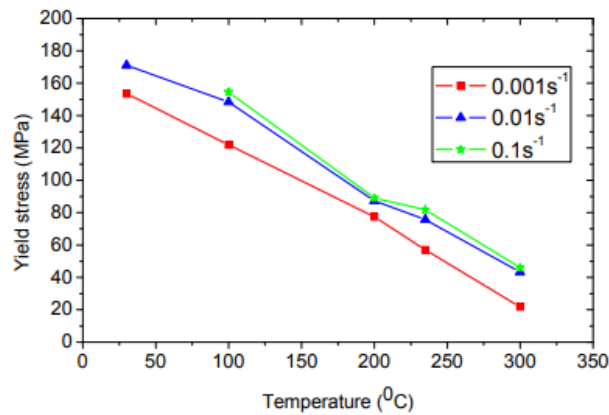


Hình 2.3. Đường cong ứng suất - biến dạng của AZ31 ở các nhiệt độ khác nhau

Độ bền kéo thử nghiệm và ứng suất chảy ở các nhiệt độ và tốc độ biến dạng khác nhau được biểu diễn như hình 2.4. Trong hình 2.4a, độ bền kéo giảm đáng kể với nhiệt độ ở mỗi tốc độ biến dạng không đổi, cho thấy hợp kim dẻo hơn rõ ràng khi ở nhiệt độ ấm. Sự khác biệt về độ bền kéo dưới các tốc độ biến dạng khác nhau trở nên rõ ràng hơn khi tăng nhiệt độ. Trong hình 2.4b, ứng suất chảy giảm đáng kể với nhiệt độ ở mỗi tốc độ biến dạng không đổi, và sự khác biệt cao hơn giữa các tỷ lệ biến dạng thấp hơn. Ứng suất chảy như nhau khi tốc độ biến dạng là $0,01s^{-1}$ và $0,1s^{-1}$ ở $200^{\circ}C$. Biến dạng đạt chính xác hơn khi ở tốc độ biến dạng thấp hơn, do đó ứng suất chảy giảm ở tốc độ biến dạng thấp hơn.



(a) Tensile strength vs. temperature

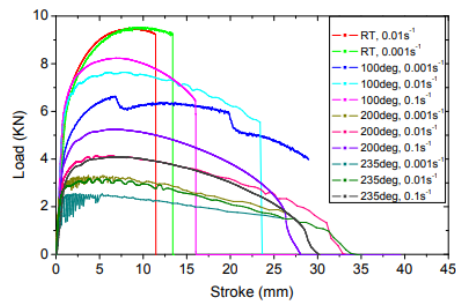


(b) Yield stress vs. temperature

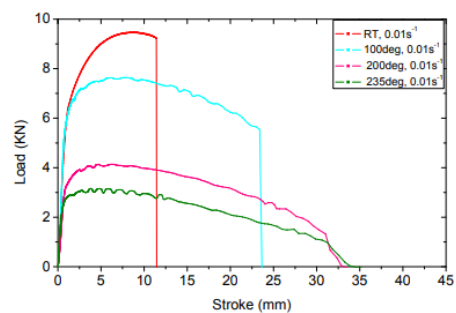
Hình 2.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến giới hạn bền kéo và ứng suất chảy của hợp kim AZ31 khi tốc độ biến dạng thay đổi.

Các đường cong hành trình – lực tác dụng được thể hiện ở các nhiệt độ và vận tốc khác nhau trong hình 2.5. Thứ nhất, có biến dạng hóa bền riêng biệt đối với các đường cong ứng suất ở nhiệt độ phòng. Các hiện tượng biến dạng dẻo sẽ tồn tại ở nhiệt độ cao và hiện tượng này rõ ràng hơn khi có nhiệt độ tăng. Thứ hai, độ giãn dài trước khi phá hủy là thấp và tốc độ biến dạng cao khi ở nhiệt độ phòng, nhưng ngược lại khi nhiệt độ cao hơn. Các đường cong hành trình - lực được so sánh ở các nhiệt độ khác nhau khi tốc độ biến dạng bằng $0,01s^{-1}$ thể hiện trong hình 2.5b. Sự hóa bền biến dạng thể hiện rõ ràng ở nhiệt độ thấp hơn, còn hiện tượng hóa mềm dẻo cao hơn khi nhiệt độ tăng. Ngoài ra, có một số "bước nhảy" trên các đường cong lực tác dụng, đặc biệt là ở tốc độ biến dạng thấp hơn. Hiện tượng này có thể thấy ở $100^{\circ}C$ khi tốc độ biến dạng bằng $0,001s^{-1}$, nó vẫn tồn tại

sau khi lặp lại một số lần trong cùng một điều kiện thử nghiệm. Có thể là do các tổ chức cấu trúc của AZ31 bị phát triển trong điều kiện thử nghiệm này. Hiện tượng này cần thiết được xem xét trong các nghiên cứu cụ thể khác. Cuối cùng, ứng suất thực và biến dạng thu được bởi phương trình biến đổi đã nêu. Trong ứng dụng, các đường cong ứng suất - biến dạng thực được suy ra sau khi tối ưu hóa tính toán từ dữ liệu hành trình – lực tác dụng ban đầu.



(a) Load - stroke curves at various temperature and strain rate

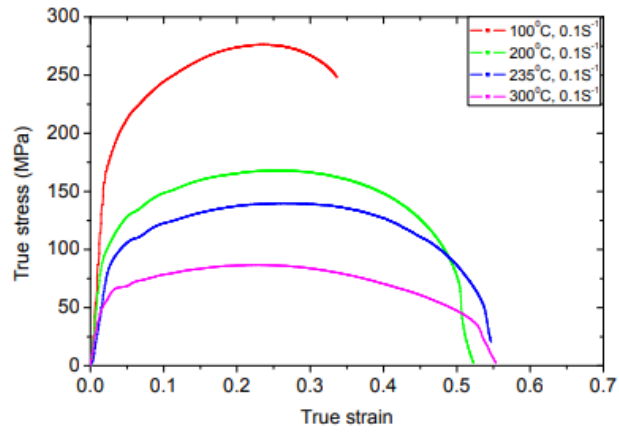


(b) Load - stroke curves at various temperature when $\dot{\epsilon} = 0.01s^{-1}$

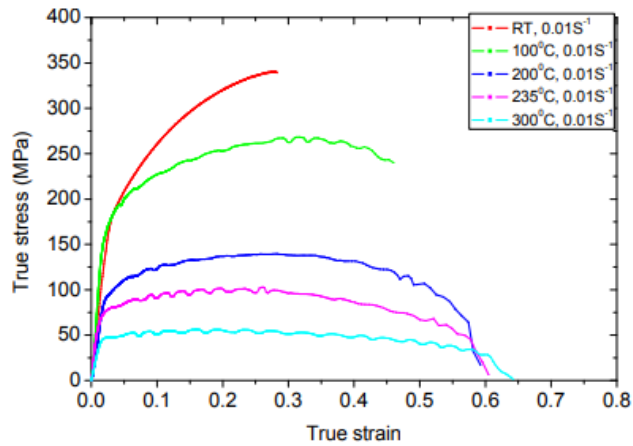
Hình 2.5. Đường cong lực – hành trình của hợp kim AZ31

thay đổi theo nhiệt độ và tốc độ biến dạng.

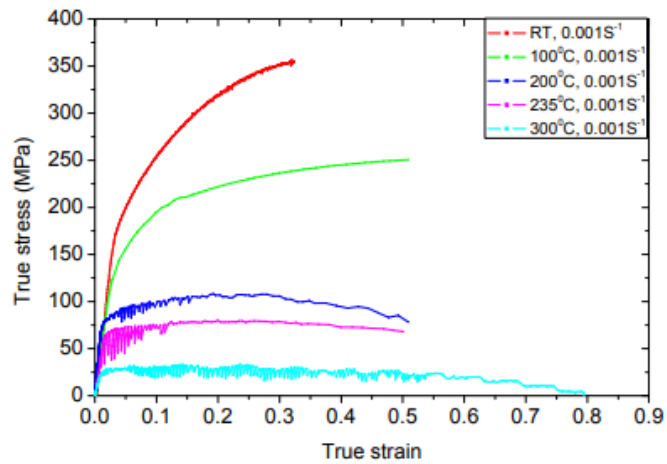
Các đường cong ứng suất thực - biến dạng thực ban đầu dưới các nhiệt độ và tốc độ biến dạng khác nhau là được hiển thị trong hình 2.6. Các đường cong này được xây dựng cho đến khi xuất hiện hiện tượng mẫu thử bị đứt gãy phá hủy.



(a) Stress-strain curves at $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$



(b) Stress-strain curves at $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



(c) Stress-strain curves at $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$

Hình 2.6. Đường cong ứng suất-biến dạng thực khi thay đổi nhiệt độ và tốc độ biến dạng.

Có thể thấy rằng, giới hạn chảy giảm nếu tăng nhiệt độ, trong khi biến dạng dẫn đến phá hủy lại tăng khi nhiệt độ tăng và ứng suất chảy cao hơn khi tốc độ biến dạng cao. Ở nhiệt độ phòng, biến dạng bền thể hiện rõ ràng cho mỗi tốc độ

biến dạng. Nhưng ở nhiệt độ cao hơn, ứng suất chảy là không phụ thuộc vào biến dạng, không có biến dạng cứng bền đáng kể được quan sát ở bất kỳ mẫu thử nào, đặc biệt ở 300°C.

3. Mô phỏng số quá trình biến dạng AZ31-O

Các mô phỏng kiểm tra độ bền kéo đơn giản cũng được thực hiện trong mô phỏng để xác nhận và chứng minh hiệu quả của các mô hình để phân tích các thông số ảnh hưởng tạo hình biến dạng. Sau đó, các thông số ảnh hưởng thực nghiệm đã được lấy để phân tích ảnh hưởng tương ứng của chúng đến khả năng tạo hình như nhiệt độ, vận tốc, chất bôi trơn,...

Phân tích mô phỏng phần tử hữu hạn là một công cụ hữu ích trong quá trình biến dạng kim loại và lĩnh vực sản xuất. Mô phỏng ngày càng gần với thực tế hơn sau khi có sự phát triển lý thuyết và ứng dụng. Lực tác dụng, nhiệt độ và phân bố độ dày được so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm. Phân tích từ lực tác dụng, kết quả cho thấy đường cong mô phỏng cao hơn đường cong thực nghiệm.

Cho đến nay, các mô hình vật liệu của hợp kim magiê AZ31 đã được nghiên cứu rộng rãi để mô tả hành vi vật liệu. Năm 2008, Cheng và cộng sự [6] đã công bố một phương trình ứng suất chảy của hợp kim magiê AZ31 tấm trong quá trình biến dạng kéo ẩm. Họ đã đề xuất một mô hình toán học với mẫu được làm dẻo thông qua các thử nghiệm kéo ẩm tại nhiệt độ và tốc độ biến dạng khác nhau. Dựa trên lực tác dụng ở giai đoạn làm biến dạng bền, biểu thức được mô tả như sau:

$$\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$$

Trong đó: K là hệ số cường độ, n là số mũ làm biến dạng hóa bền và m là số mũ độ nhạy cảm tốc độ biến dạng.

Các thông số được xác định bằng phương pháp giải tích sau khi có các kết quả thực nghiệm. Các phương trình hệ số được xác định như sau:

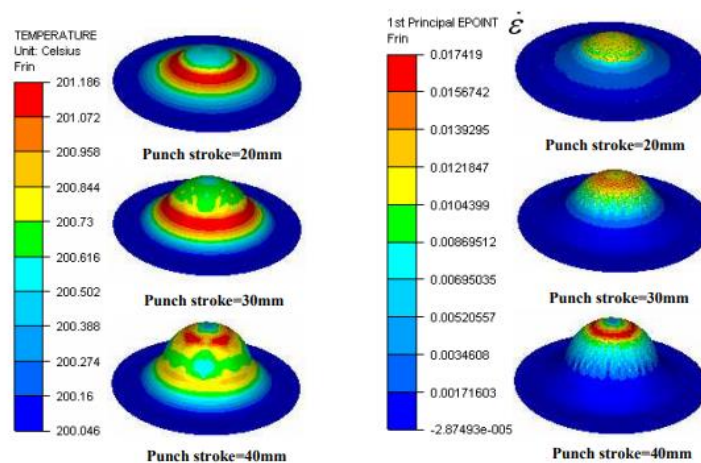
$$n = 0.031 + 0.031 \log \dot{\varepsilon} + \frac{97.1}{T}$$

$$m = \frac{-145.263}{T} + 0.377$$

$$K = -156.4 + 9.1 \log \dot{\varepsilon} + \frac{244980.4}{T}$$

$$[0.02 \leq \varepsilon \leq 0.3, 10^{-4} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^{-1} (\text{s}^{-1}), 423 \leq T \leq 573 (\text{K})]$$

Phân tích phần tử hữu hạn là một phương pháp được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu biến dạng hợp kim magiê AZ31 và đã có nhiều thành tựu đạt được trong hai thập kỷ qua. Palaniswamy et al. [7] đã nghiên cứu quá trình biến dạng tấm AZ31 ở nhiệt độ cao bằng mô phỏng số với phần mềm DEFORM®. Với mẫu là một cái cốc tròn, mô hình được thực hiện trong điều kiện không đẳng nhiệt. Lực tác dụng được tạo ra dưới nhiệt độ phòng, các dụng cụ và nhiệt độ ban đầu của mẫu được cố định ở 150°C, 200°C, 250°C và 300°C. Từ đó, nhiệt độ, lực tác dụng và sự phân bố độ dày được nghiên cứu chuyên sâu trong các quá trình tạo hình. Cuối cùng, đưa ra được kết luận rằng nhiệt độ tác dụng đóng một vai trò quan trọng trong quá trình biến dạng ấm, điều này ảnh hưởng đầu tiên của nhiệt độ đến hình dạng thành cốc và sau đó có thể làm tăng độ bền cho sản phẩm.

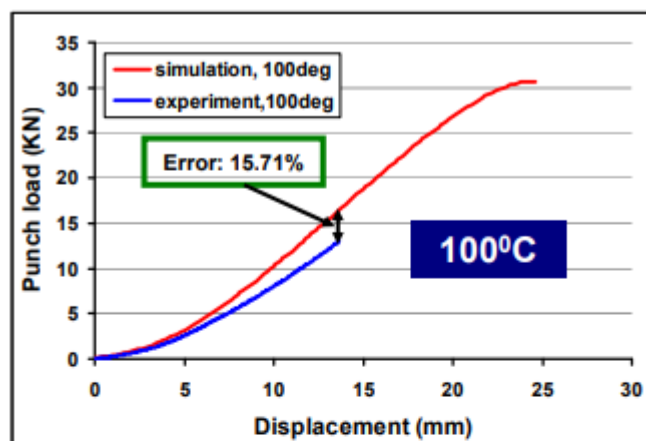


Hình 3.1. Kết quả mô phỏng số với lực tác dụng khác nhau.

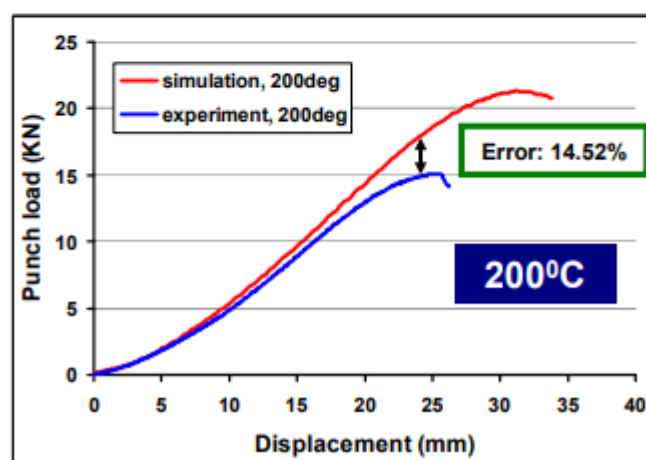
Sự phân bố nhiệt độ và tốc độ biến dạng ở các bước khác nhau được thể hiện trong hình 3.1. Nhiệt độ ở khu vực trung tâm của phôi là khác nhau, nơi tiếp

xúc ma sát xảy ra giữa phôi và chày. Trong suốt quá trình, nhiệt độ nằm ở vùng bán kính của chày là cao hơn các khu vực khác. Điều này có thể là do giả thiết thử nghiệm ở điều kiện kín và nhiệt sinh ra trong quá trình đập làm tăng nhiệt độ tại vùng bán kính chày. Sự phân bố tốc độ biến dạng cho thấy, biến dạng cục bộ xảy ra trong vùng tiếp xúc với vùng bán kính của chày. Chúng cao hơn thường nằm ở các vùng nhiệt độ cao hơn và đặc biệt là ở vùng ranh giới với bán kính của chày. Trong mô phỏng này, vận tốc chày không đổi và tốc độ biến dạng thay đổi một chút trong quá trình.

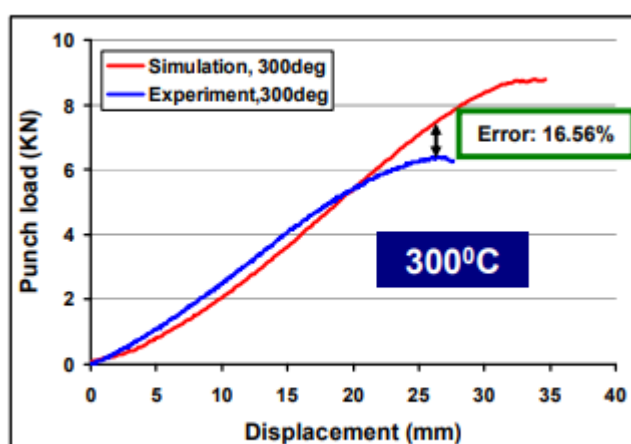
Lực tác dụng của chày nhận được từ mô phỏng ở các nhiệt độ khác nhau được so sánh với thực nghiệm như hình 3.2. Lực lớn nhất đạt được ở tất cả các nhiệt độ mô phỏng là cao hơn lực trong thử nghiệm. Tuy nhiên, xu hướng khác biệt rõ ràng khi nhiệt độ tăng, lực tác dụng của chày giảm xuống. Kết quả phù hợp với khi hành trình dịch chuyển còn nhỏ. Tuy nhiên, sự khác biệt xuất hiện đặc biệt ở mức hành trình dịch chuyển lớn. Đối với thử nghiệm ở 300°C, thậm chí sai số lớn nhất lên đến 16%. Nhiều lý do có thể giải thích cho những sai lệch này, thứ nhất là hệ số ma sát có lẽ quá cao đặc biệt là ở nhiệt độ thấp; thứ hai, mô hình hành vi thực tế được xác định từ thử nghiệm độ bền kéo mô tả tốt hành vi làm hóa bền ở mức nhỏ sự dịch chuyển ở mỗi nhiệt độ, nhưng có độ lệch khi độ dịch chuyển tăng lên vì làm hóa dẻo, đặc biệt là ở nhiệt độ cao hơn; thứ ba, trong mô phỏng, vật liệu là được coi là đẳng hướng. Tuy nhiên, hợp kim magiê tám thường tồn tại tính dị hướng.



(a) $T=100^{\circ}\text{C}$



(b) $T=200^{\circ}\text{C}$



(c) $T=300^{\circ}\text{C}$

Hình 3.2. Lực tác dụng thu được từ mô phỏng và thực nghiệm ở các nhiệt độ khác nhau.

Hình 3.3 và hình 3.4 cho thấy, sự phân bố nhiệt độ và độ dày trong mô phỏng. Rõ ràng là kết quả cho thấy, nhiệt độ thấp hơn ở vùng phôi tiếp xúc với chày so với chày tiếp xúc với khuôn (Hình 3.3). Kết quả này rất cần thiết cho quá trình dập sâu, bởi vì nó có thể làm tăng khả năng chống phá hủy vật liệu. Trong khi đó, độ mỏng tối đa đã được quan sát thấy dọc theo thành cốc ở các nhiệt độ, kết quả này trái với quy trình dập thông thường, nơi tối đa sự mỏng dần được quan sát ở bán kính chày (Hình 3.4). Điều này có thể là do độ bền của thành cốc không đều trong quá trình biến dạng dập ấm AZ31. Trong mô phỏng, tải trọng lớn nhất nhận được từ mô phỏng cao hơn tải trọng nhận được từ thí nghiệm với từng nhiệt độ tương ứng [7].

Ren và cộng sự [8] đã nghiên cứu khả năng vuốt của hợp kim magiê AZ31 trong phương pháp dập sâu ấm bằng mô phỏng số. Người ta khẳng định rằng yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến độ sâu khả năng vuốt của tấm hợp kim Mg là nhiệt độ. Hơn nữa, ảnh hưởng của việc hình thành vận tốc là đáng kể hơn nhiều ở nhiệt độ cao hơn. Ví dụ, cốc tròn có thể được biến dạng ở 150°C với vận tốc chày cao nhất là 6 mm/phút. Tuy nhiên, khi nhiệt độ biến dạng được tăng lên đến 250°C , nó có thể được vuốt với vận tốc chày lớn nhất là 120 mm/phút.

Huang và cộng sự [9] cũng nghiên cứu khả năng biến dạng của các tấm AZ31B bằng cách dập sâu không đẳng nhiệt bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết luận rằng, khi mô phỏng dập sâu thì LDR (Limit Drawing Ratio) trong môi trường không đẳng nhiệt cao hơn so với dập sâu thông thường. Ngoài ra, hiệu ứng bôi trơn trong quá trình dập sâu cũng được nghiên cứu bằng cách sử dụng MoS_2 và chất bôi trơn dầu, và kết luận là LDR cao nhất là 2.63 đối với MoS_2 và 2.37 đối với dầu ở 260°C đối với phôi tấm AZ31B dày 0.58mm.

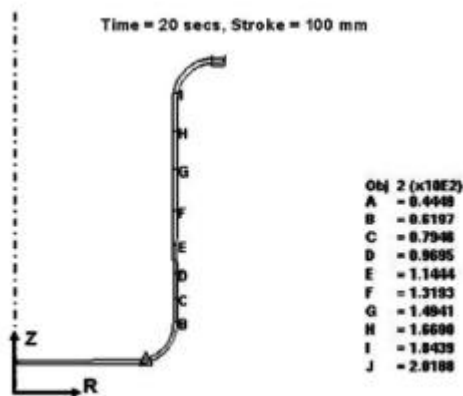


Fig.13. Temperature distribution [11].

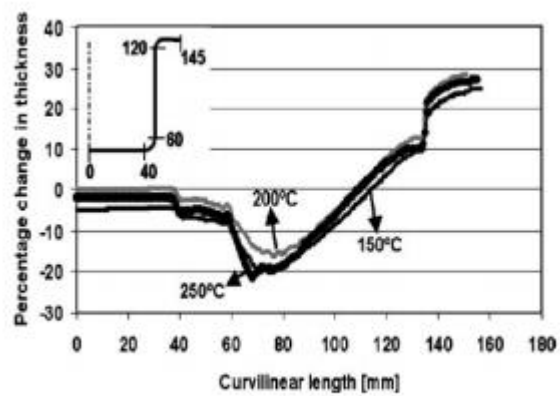


Fig.14. Thickness distribution for LDR of 2.3 [11].

Hình 3.3. Phân bố nhiệt độ

Hình 3.4. Phân bố chiều dày

4. Kết luận

Các thử nghiệm độ bền kéo ẩm đã được thực hiện ở nhiều nhiệt độ và tốc độ biến dạng khác nhau bởi máy kiểm tra độ bền kéo Instron. Hệ thống đo biến dạng ARAMIS được sử dụng để đo sự biến dạng của vật liệu. Ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ biến dạng được nghiên cứu trong các thí nghiệm này. Cuối cùng, kết quả phân tích cho thấy ứng suất chảy cao hơn và độ giãn dài nhỏ hơn tại nhiệt độ phòng với tốc độ biến dạng cao hơn, nhưng nó cải thiện đáng kể khi nhiệt độ tăng và tốc độ biến dạng giảm. Ba mẫu khác nhau được sử dụng với các hướng khác nhau với đối với hướng cán để nghiên cứu tính chất dị hướng của vật liệu. Kết quả thí nghiệm đã chỉ ra rằng vật liệu có tính dị hướng ở nhiệt độ thấp hơn, nhưng giảm dị hướng khi nhiệt độ tăng và không thể hiện rõ dị hướng khi trên 200°C. Nên tính chất dị hướng không được xem xét trong nghiên cứu này. Số liệu ứng suất thực và biến dạng thực được xác định theo hành trình từ bắt đầu tác dụng lực ban đầu. Những dữ liệu này được sử dụng để xác định phương trình mô hình vật liệu để nghiên cứu.

Thử nghiệm kéo ẩm ở nhiệt độ khác nhau và tốc độ biến dạng khác nhau được thực hiện bằng cách sử dụng các mẫu khác nhau. Các thử nghiệm này được thực hiện trong phòng thí nghiệm với máy thử kéo thủy lực. Mỗi mẫu đại diện cho một đường biến dạng. Ba nhiệt độ và hai vận tốc thử nghiệm đã được nghiên cứu. Với các mẫu vật đứt gãy phá hủy được thu thập và kết quả rõ ràng cho thấy rằng khả

năng biến dạng vật liệu tốt hơn ở nhiệt độ cao hơn. Thử nghiệm các thông số ảnh hưởng đã được tính đến để phân tích ảnh hưởng tương ứng của chúng đối với biến dạng. Ví dụ như nhiệt độ, mức độ biến dạng, chất bôi trơn, v.v. Phân tích kết quả đã trình bày trong nghiên cứu. Kết luận là nhiệt độ cao hơn và tốc độ biến dạng thấp hơn, khả năng biến dạng tạo hình tốt hơn đối với vật liệu AZ31-O.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Zhigang LIU (2012), “*Numerical and experimental study of AZ31-O magnesium alloy warm sheet forming*”.
- [2] W. M. Lai, D. Rubin, E. Krempl (2009), “*Introduction to Continuum Mechanics*”. Butterworth Heinemann.
- [3] R. Knockaert (2001), “*Etude expérimentale et numérique de la localisation de la deformation lors de la mise en forme de produits minces*”, PhD thesis, Ecole des mines de paris.
- [4] ISO 6892-2. Metallic materials - Tensile testing - Part 2: *Method of test at elevated temperature*. ICS: 77.040.10, TC/SC: TC 164/SC 1, International Organization for Standardization, 2011.
- [5] W. F. Hosford, R. Caddell. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 3rd Edition, Cambridge University, 2007.
- [6] Y. Q. Cheng, H. Zhang, Z. H. Chen, K. F. Xian. *Flow stress equation of AZ31 magnesium alloy sheet during warm tensile deformation*, Journal of Materials Processing Technology, 208 (2008), pp.29-34.
- [7] H. Palaniswamy, G. Ngaile, T. Altan. *Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperatures*. Journal of Materials Processing Technology, 146 (2004), pp.52-60.
- [8] L. M. Ren, S. H. Zhang, G. Palumbo, D. Sorgente, L. Tricarico. *Numerical simulation on warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 sheets*. Materials Science and Engineering A, 499 (2009), pp.40-44.
- [9] T. B. Huang, Y. A. Tsai, F. K. Chen. *Finite element analysis and formability of non-isothermal deep drawing of AZ31B sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 177 (2006), pp.142-145.