

CÁC MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỢP KIM MAGIE GW103K Ở NHIỆT ĐỘ CAO KHÍ CHỊU NÉN

CONSTITUTIVE MODELS OF GW103K MAGNESIUM ALLOY UNDER HOT COMPRESSIVE DEFORMATION

NGUYỄN QUYẾT THÀNH

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: thanhngq@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Để tìm hiểu ứng xử biến dạng nóng (dưới nhiệt độ cao) của hợp kim magie GW103K (Mg-10Gd-3Y), tác giả đã tiến hành thực hiện làm các mô hình số học, với dữ liệu thu thập được từ các thí nghiệm nén đẳng nhiệt của nhiệt độ biến dạng là (623-773) K và tốc độ biến dạng (0,001-1) s⁻¹. Ứng suất và biến dạng thu được từ các thí nghiệm này được sử dụng để thiết lập các mô hình toán học, dựa trên mô hình chỉnh sửa Johnson-Cook và mô hình chỉnh sửa Zerilli-Armstrong. Các kết quả dự đoán từ hai mô hình này sau đó được so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Kết quả dự báo và thực nghiệm khá tương đồng với nhau. Thêm vào đó, sự chuẩn xác của các mô hình dự báo được đánh giá bởi hệ số tương quan (R) và sai số liên quan trung bình tuyệt đối (AARE). Từ các biểu đồ, tác giả nhận thấy nhiệt độ biến dạng và tốc độ biến dạng ảnh hưởng khá lớn tới dòng ứng suất của hợp kim magie GW103K. Trong bài báo này, tác giả đã thiết lập hai mô hình toán học để mô tả mối quan hệ giữa ứng suất của hợp kim magie chịu tác động của phổ rộng các nhân tố là biến dạng, tốc độ biến dạng, và nhiệt độ.

Từ khóa: Mô hình toán học, ứng xử biến dạng nóng, mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa, mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa, magie GW103K.

Abstract

To understand the hot deformation behavior of GW103K magnesium alloy (Mg-10Gd-3Y), the author conducted numerical constitutive modeling based on literature experimental data from isothermal compression tests under wide ranges of strain rates (0.001-1) s⁻¹ and deformation temperatures (623-773) K. The true stress and strain were acquired from those tests which were used to develop constitutive models based on the modified Johnson-Cook model and

modified Zerilli-Armstrong model. The predicted results from the two models were then compared with the data from the experiment. As a result, the experimental and the predicted data exhibit good agreement. Furthermore, the prediction accuracy of the developed models was assessed by calculating the average absolute relative error (AARE) and correlation coefficient (R). From figures, the author finds that the deformation temperatures and strain rates substantially affect the flow stress behavior of GW103K magnesium alloy. In this work, the author established that the two models could depict the flow stress behavior of the alloy at elevated temperatures throughout the entire ranges of strain, strain rate, and temperature.

Keywords: Constitutive model, hot deformation behavior, modified Johnson-Cook model, modified Zerilli-Armstrong model, GW103K magnesium.

1. Mở đầu

Ứng xử biến dạng nóng của các vật liệu hợp kim và kim loại là một quá trình phức tạp [1]. Các quá trình biến dạng nóng trên kim loại và hợp kim là một trong những khía cạnh quan trọng trong việc xác định các thuộc tính cơ học, cũng như độ chính xác về kích thước của sản phẩm đầu cuối như: cán nóng, rèn nóng, và ép nóng [2, 3]. Do đó, hiểu được ứng xử biến dạng nóng của những vật liệu này là rất cần thiết để kiểm soát được các đặc tính và hình dạng của sản phẩm đầu ra. Một cách tổng quát, ứng xử biến dạng được làm sáng tỏ bởi mối quan hệ giữa ứng suất và một vài thông số bao gồm: Biến dạng, tốc độ biến dạng và nhiệt độ; mối quan hệ này là phi tuyến [4]. Với mục đích để mô tả mối quan hệ này, một mô hình toán học là cần thiết để khái quát mối liên quan giữa ứng suất và các thông số trên.

Hiện nay, có một vài mô hình cơ bản để mô tả mối quan hệ số học của kim loại và hợp kim, được phân loại thành ba dạng chính sau: Mô hình mạng nơ ron, mô hình dựa vào vật lý, và mô hình hiện tượng - logic [5, 6]. Kiểu mô hình đầu tiên là mô hình dạng hiện tượng - logic. Mô hình này không quan tâm tới đặc tính cơ học siêu nhỏ của chất biến dạng, mà chỉ để ý tới ảnh hưởng của các thông số biến dạng lớn tới dòng ứng suất. Mô hình này được sử dụng rộng rãi là do có ít thông số cần tính toán, dẫn tới việc tính toán thuận lợi. Kiểu mô hình phổ biến này có thể kể ra như Johnson-Cook [7], Arrhenius [8], và biến dạng Arrhenius [9]. Mô hình dựa vào vật lý là kiểu mô hình thứ hai; nó xem xét tới các đặc tính biến dạng vật lý tại nhiệt độ cao, bao gồm nhiệt động học của các vết trượt tinh thể, sự dịch chuyển tinh thể, và quá trình kích hoạt nhiệt độ. Khi đem ra so sánh với mô hình đầu là hiện tượng - logic, mô hình dựa vào vật lý có tính chính xác cao hơn, phức tạp hơn, và các thông số để tính toán cũng nhiều hơn [10]. Hai mô hình của kiểu này là mô hình Zerilli-Armstrong [11], và tế bào tự động [12]. Mô hình cuối cùng được sử dụng là mạng nơ ron, với mô hình phổ biến là mạng nơ ron nhân tạo (ANN) [13-16]. Mạng ANN được đào tạo để dự đoán ứng xử biến dạng của kim loại, hợp kim, và vật liệu xi măng. Zhao và cộng sự [17] điều tra các mô hình từ việc mô phỏng đặc tính biến dạng nóng của hợp kim titan Ti600 với mô hình ANN.

Hợp kim magie đất hiếm GW103K là loại vật liệu có trọng lượng nhẹ, cường độ chịu lực cao, khả năng chống mài mòn lớn, cũng như chịu được nhiệt độ cao. Do đó, nó là loại vật liệu có tiềm năng lớn để ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như: Giao thông, không gian, điện, và các lĩnh vực khác [18-20]. Tuy nhiên, vật liệu này lại có nhược điểm là biến dạng không tốt dưới tác dụng của nhiệt độ thấp do giới hạn của nó trong hệ thống trượt [21]. Vì vậy, việc nghiên cứu ứng xử biến dạng nóng của hợp kim magie này dưới tác dụng của nhiệt độ quan tâm là điều cực kỳ quan trọng.

Với mục đích là tìm ra mối quan hệ giữa ứng suất và các đặc tính của vật liệu bao gồm biến dạng, tốc độ biến dạng, và nhiệt độ; bài báo này tập trung tìm hiểu đặc tính biến dạng nóng của hợp kim magie GW103k với hai mô hình chỉnh sửa của Johnson-Cook và Zerilli-Armstrong. Thêm nữa, hiệu năng của hai mô hình này được tính toán để so sánh dựa trên hai thông số xác suất là: Hệ số tương quan (R) và sai số liên quan trung bình tuyệt đối (AARE).

Hầu hết các nghiên cứu về vật liệu kim loại với mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa là các thí nghiệm kéo và xoắn dưới tác động của nhiệt độ cao. Ở thí nghiệm nén, sự phá hủy của kim loại dưới nhiệt độ cao được

đánh giá bởi mô hình như Zerilli-Armstrong chỉnh sửa. Tuy nhiên, trong cuộc sống thường nhật, chúng ta thường trải nghiệm với nhiệt độ trung bình. Không có nhiều thông tin về kim loại tại các điều kiện nhiệt độ trên. Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là tập trung vào sự dự đoán mối quan hệ ứng suất - biến dạng của các mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa, Zerilli-Armstrong chỉnh sửa tại các nhiệt độ trung bình với các thí nghiệm nén, để xem xét những mô hình này thể hiện ra sao tại các điều kiện mà ta quan tâm.

2. Thí nghiệm

Dữ liệu thực nghiệm của bài báo này được lấy từ nhóm tác giả Yin và cộng sự, với bài báo về hợp kim magie GW103K có khả năng chịu được nhiệt độ cao và có cường độ chịu lực lớn [18]. Ở trong thực nghiệm này, hợp kim magie được đúc thành các mẫu hình trụ với đường kính là 10mm và chiều cao là 15mm. Các mẫu này được mang đi làm thí nghiệm nén ở các nhiệt độ khác nhau là: 623K, 673K, 723K, 773K; và với tốc độ biến dạng khác nhau là: 0,001; 0,01; 0,1; 1 s⁻¹. Trước hết, các mẫu này được nung nóng với tốc độ nhiệt tăng dần là 5K/s cho tới nhiệt độ nén; sau đó, các mẫu này được giữ ở nhiệt độ đó trong 180 giây; cuối cùng đem mẫu ra làm thí nghiệm nén tại các tốc độ biến dạng khác nhau.

3. Phương pháp

3.1. Mô hình toán học chỉnh sửa của Johnson-Cook

Mô hình của Johnson-Cook được đề xuất lần đầu bởi Johnson và Cook vào năm 1985 [7]. Mô hình này đã đưa ra được mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của các vật liệu kim loại, với ba thông số độc lập với nhau là: Biến dạng, tốc độ biến dạng, và nhiệt độ [22-24]. Mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa được tạo ra bởi nhóm tác giả Lin và cộng sự nhằm cải thiện mối quan hệ giữa các thông số trên, tuân theo công thức dưới đây [25]:

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \exp[(\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*)(T - T_{ref})] \quad (1)$$

Trong đó, σ là ứng suất tương đương (Mpa); ε là biến dạng dẻo tương đương; $A_1, B_1, B_2, C_1, \lambda_1, \lambda_2$ là các hằng số; T là nhiệt độ biến dạng (K); T_{ref} là nhiệt độ tham chiếu (K); $\dot{\varepsilon}^*$ là tốc độ biến dạng không kích thước $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{ref}$, $\dot{\varepsilon}$ là tốc độ biến dạng; $\dot{\varepsilon}_{ref}$ là tốc độ biến dạng tham chiếu. Ở trong thí nghiệm này, ta lấy tốc độ biến dạng tham chiếu là 0.001s⁻¹, và nhiệt độ tham chiếu là 623K.

3.2. Mô hình toán học chỉnh sửa của Zerilli-Armstrong

Mô hình toán học chỉnh sửa của Zerilli-Armstrong lần đầu được giới thiệu bởi nhóm tác giả Samantary và cộng sự nhằm dự đoán dòng ứng suất của hợp kim trong điều kiện nhiệt độ cao [26]. Mô hình này được mô tả theo công thức sau [1]:

$$\sigma = (C_1 + C_2 \varepsilon^N) \exp\{-(C_3 + C_4 \varepsilon)T^* + (C_5 + C_6 T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*\} \quad (2)$$

Trong đó, σ là ứng suất (Mpa); ε là biến dạng dẻo tương đương; $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ và N là các hằng số. $T^* = T - T_{ref}$ với T và T_{ref} là các nhiệt độ thực nghiệm và nhiệt độ tham chiếu tương ứng. $\dot{\varepsilon}^*$ là tốc độ biến dạng không kích thước $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{ref}$; $\dot{\varepsilon}$ là tốc độ biến dạng; $\dot{\varepsilon}_{ref}$ là tốc độ biến dạng tham chiếu. Cũng giống như mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa, nhiệt độ tham chiếu của mô hình này là 623K, và tốc độ biến dạng tham chiếu là $0,001s^{-1}$.

4. Kết quả và thảo luận

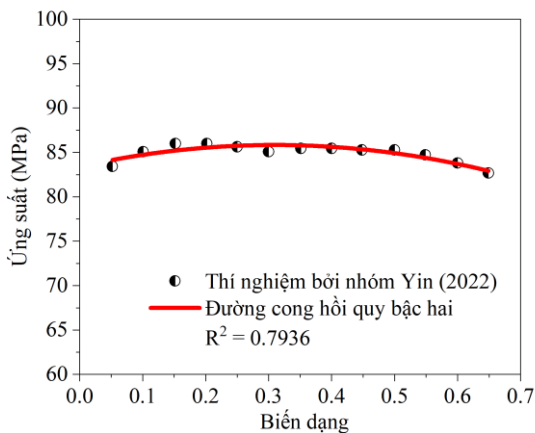
4.1. Mô hình toán học chỉnh sửa của Johnson-Cook

4.1.1. Xác định các hệ số A_1, B_1 , và B_2

Khi tốc độ biến dạng là $0,001s^{-1}$ và nhiệt độ biến dạng là 623K thì công thức (1) trở thành:

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2) \quad (3)$$

Ta đặt tất cả các điểm ứng suất và biến dạng dưới điều kiện này và vẽ ra được Hình. 1, là hình vẽ thể hiện mối quan hệ giữa ứng suất - biến dạng. Sau đó, ta tiến hành thực hiện đường hồi quy bậc hai. Dựa vào Hình 1 này, từ đường hồi quy bậc hai, ta thu được các hệ số A_1, B_1, B_2 với các giá trị tương ứng là: 83,41Mpa, 15,605Mpa, và -25,188Mpa.



Hình 1. Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

4.1.2. Xác định hằng số C_1

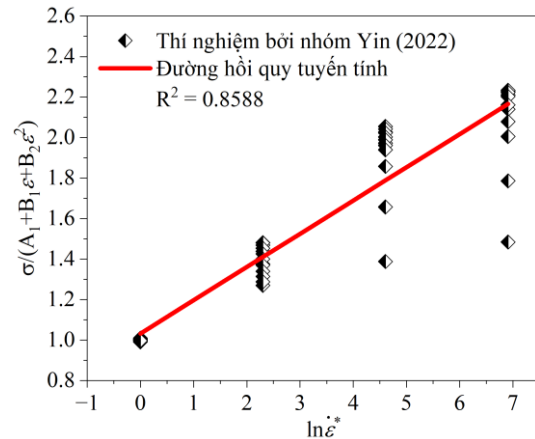
Khi nhiệt độ biến dạng là 623K thì công thức (1) biến đổi thành:

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (4)$$

Công thức (4) được sắp xếp lại dưới dạng sau:

$$\frac{\sigma}{A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2} = 1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^* \quad (5)$$

Từ công thức (5), ta đặt tất cả các điểm ứng suất - biến dạng liên quan tới nhiệt độ 623K, cùng với ba giá trị A_1, B_1, B_2 đã tính ở trên để tính các giá trị điểm mới. Sau đó, ta vẽ các điểm này với hai trục x và y lần lượt là $\ln \dot{\varepsilon}^*$ và $\sigma / (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)$. Tiếp theo, ta vẽ đường hồi quy tuyến tính đi qua các điểm trên. Hình vẽ thể hiện mối quan hệ này là Hình 2. Từ hình vẽ này, ta thu được giá góc dốc của đường hồi quy tuyến tính là C_1 với giá trị là $C_1 = 0,1703$.



Hình 2. Mối quan hệ giữa $\sigma / (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)$ và $\ln \dot{\varepsilon}^*$

4.1.3 Xác định các hằng số λ_1 và λ_2

Tái sắp xếp lại công thức (1) để tạo ra biểu thức mới:

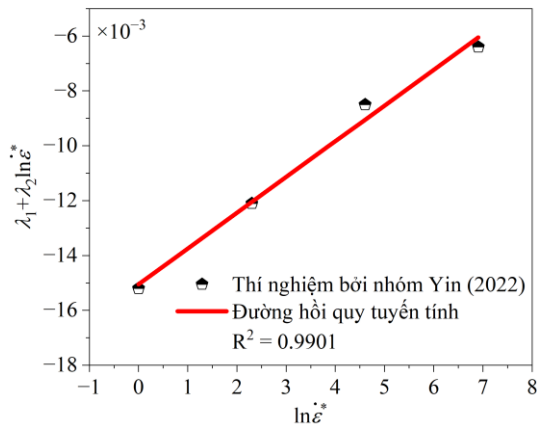
$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)} = \exp[(\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*)(T - T_{ref})] \quad (6)$$

Lấy giá trị logarit cả hai bên của công thức (6), ta thu được:

$$\ln \left\{ \frac{\sigma}{(A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)} \right\} = (\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*)(T - T_{ref}) \quad (7)$$

Với công thức (7), ta đưa toàn bộ các điểm với mọi tốc độ biến dạng, và các nhiệt độ khác nhau tương ứng, cùng với bốn giá trị đã tìm được ở trên là A_1, B_1, B_2 , và C_1 để tính các giá trị $(T-T_{ref})$ và $\ln\{\sigma/[(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln\varepsilon^*)]\}$. Sau đó, ta vẽ đồ thị các điểm trên với hai trục hoành và tung lần lượt là $(T-T_{ref})$ và $\ln\{\sigma/[(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)(1 + C_1 \ln\varepsilon^*)]\}$. Từ đồ thị này, ta vẽ đường hồi quy tuyến tính. Với mỗi hình trên, ta thu được giá trị góc dốc, các giá trị này chính là $(\lambda_1 + \lambda_2 \ln\varepsilon^*)$ tương ứng với các tốc độ biến dạng khác nhau là $0,001s^{-1}; 0,01s^{-1}; 0,1s^{-1}$ và $1s^{-1}$. Do đó, các giá trị này lần lượt là: $-0,0152; -0,0121; -0,0085$ và $-0,0064$.

Tiếp theo, ta vẽ đồ thị giữa các điểm với hai trục tọa độ x và y lần lượt là $\ln\varepsilon^*$ và $(\lambda_1 + \lambda_2 \ln\varepsilon^*)$. Từ đồ thị này, ta thực hiện đường hồi quy tuyến tính như Hình 3. Các giá trị λ_1, λ_2 chính là góc dốc và điểm giao cắt với trục hoành của đường hồi quy. Vì vậy, ta tìm được giá trị λ_1, λ_2 tương ứng là $-0,0151; 0,0013$.



Hình 3. Mối quan hệ giữa $\lambda_1 + \lambda_2 \ln\varepsilon^*$ và $\ln\varepsilon^*$

Với các giá trị đã tìm được ở trên, mô hình toán học chỉnh sửa của Johnson-Cook cho hợp kim magie GW103K được thể hiện ở công thức dưới đây:

$$\sigma = (83.41 + 15.605\varepsilon - 25.188\varepsilon^2) \left(1 + 0.1703 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{0.001} \right) \exp \left[\left(-0.0151 + 0.0013 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{0.001} \right) (T - 623) \right] \quad (8)$$

4.2. Mô hình toán học chỉnh sửa của Zerilli-Armstrong

4.2.1 Xác định hệ số C_1, C_2, N, C_3, C_4

Khi tốc độ biến dạng $\dot{\varepsilon} = 0,001$, công thức (2) biến đổi thành dạng sau:

$$\sigma = (C_1 + C_2 \varepsilon^N) \exp\{-(C_3 + C_4 \varepsilon) T^*\} \quad (9)$$

Từ công thức (9), lấy logarit cả hai phía của công thức để (9) trở thành:

$$\ln \sigma = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^N) - (C_3 + C_4 \varepsilon) T^* \quad (10)$$

Từ đây, chúng ta thay thế toàn bộ các điểm có giá trị ứng suất - biến dạng liên quan tới tốc độ biến dạng tham chiếu $\dot{\varepsilon} = 0,001$, với các nhiệt độ ($T = 623K, 673K, 723K, 773K$) và các biến dạng ($\varepsilon = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65$) vào công thức (10). Ta thu được các bộ điểm mới, sau đó vẽ biểu đồ các điểm này với giá trị hai trục x và y tương ứng là: T^* và $\ln \sigma$.

Với mỗi hình này, ta tiến hành hồi quy tuyến tính để thu được một đường thẳng hồi quy. Từ công thức (10), góc dốc và điểm giao cắt thu được như sau:

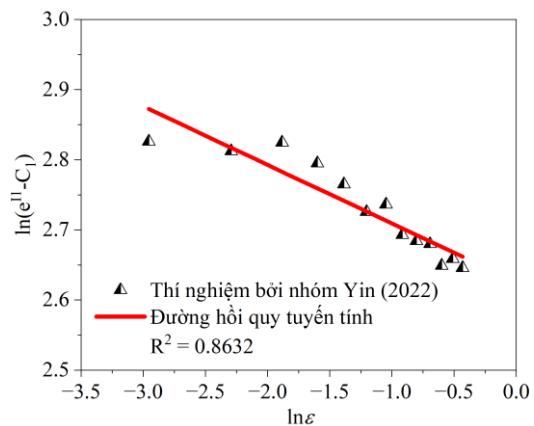
$$S_1 = -(C_3 + C_4 \varepsilon) \quad (11)$$

$$I_1 = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^N) \quad (12)$$

Công thức (12) có thể sắp xếp lại để thu được dạng mới sau:

$$\ln(\exp I_1 - C_1) = \ln C_2 + N \ln \varepsilon \quad (13)$$

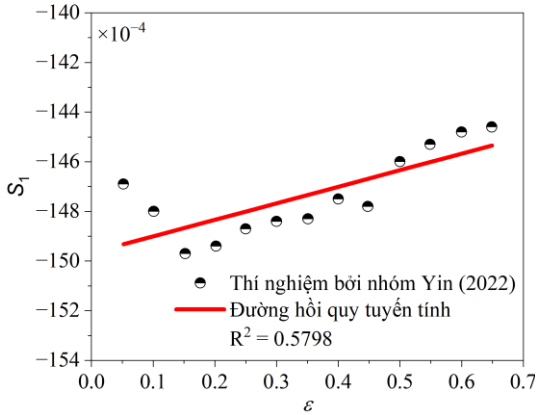
Ở trong thực nghiệm, giá trị C_1 là gần với điểm ứng suất chảy dưới điều kiện ở tốc độ biến dạng tham chiếu và nhiệt độ tham chiếu. Tuy nhiên, giá trị này có thể được tìm thấy ở dòng ứng suất, vì thế ta có thể chọn $C_1 = 64,74MPa$. Ở bước tiếp theo, dựa vào công thức (13), ta vẽ biểu đồ các điểm với hai trục x và y lần lượt là $\ln \varepsilon$ và $\ln(\exp I_1 - C_1)$, như mô tả của Hình 4. Sau đó, ta vẽ đường hồi quy tuyến tính cho các điểm dữ liệu này. Dựa vào đường hồi quy đó, ta thu được các giá trị góc dốc là $N = -0,0835$ và giá trị điểm giao cắt là $\ln C_2$, từ đó suy ra $C_2 = 1,81327$.



Hình 4. Mối quan hệ giữa $\ln(e^{I_1} - C_1)$ và $\ln \varepsilon$

Tương tự, từ công thức (11), ta vẽ biểu đồ các điểm với giá trị hai trục x và y lần lượt là ε và S_1 , như mô tả ở Hình 5. Tiếp theo, ta vẽ đường hồi quy tuyến tính đi qua các điểm trên. Dựa vào hình vẽ của đường hồi

quy này, góc dốc và điểm giao cắt lần lượt là $-C_4$ và $-C_3$. Từ đó, ta thu được các giá trị $C_3 = 0,01497$ và $C_4 = -0,00067$.



Hình 5. Mối quan hệ giữa S_1 và ϵ

4.2.2 Xác định hệ số C_5, C_6

Từ công thức (2), ta lấy logarit hai phía của công thức để (2) biến đổi thành dạng mới sau:

$$\ln \sigma = \ln(C_1 + C_2 \epsilon^N) - (C_3 + C_4 \epsilon) T^* + (C_5 + C_6 T^*) \ln \epsilon^* \quad (14)$$

Dựa vào công thức (14), nếu ta vẽ đồ thị các điểm với hai trục tọa độ x và y lần lượt là $\ln \epsilon^*$ và $\ln \sigma$, sau đó tìm đường hồi quy tuyến tính đi qua các điểm này, thì góc dốc của đường hồi quy này là: $(C_5 + C_6 T^*)$. Do đó, giá trị của góc dốc được tính dựa vào công thức dưới đây:

$$S_2 = C_5 + C_6 T^* \quad (15)$$

Ta có thể phân chia các điểm dữ liệu thành mười ba nhóm khác nhau dựa vào biến dạng: 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6 và 0,65. Giá trị S_2 được tìm thấy dựa vào đường hồi quy. Vì thế, với mỗi nhóm dữ liệu biến dạng, ta vẽ biểu đồ với các điểm dữ liệu này trên biểu đồ với hai trục x và y lần lượt là T^* và S_2 . Với mỗi biểu đồ này, ta thực hiện đường hồi quy tuyến tính. Dựa vào đường hồi quy, ta thu được các giá trị góc dốc và điểm giao cắt. Từ phương trình (15), điểm giao cắt và góc dốc lần lượt là C_5 và C_6 .

Bảng 1 thể hiện các giá trị C_5 và C_6 với các biến dạng khác nhau.

Mối quan hệ giữa C_5, C_6 và biến dạng ϵ có thể được mô tả như là một hàm đa thức bậc cao, ở đây tác giả chọn là hàm bậc bốn, như là mô tả ở Hình 6. Trước hết, ta vẽ biểu đồ với các điểm dữ liệu ở hai trục x và y lần lượt là biến dạng và C_5 hoặc C_6 . Tiếp theo, ta thực hiện đường hồi quy bậc bốn với các điểm dữ liệu này. Cuối cùng, ta thu được phương trình mô tả C_5 và

C_6 theo biến dạng ϵ như hai phương trình dưới đây:

$$C_5 = -0.0006 + 1.204\epsilon - 3.6602\epsilon^2 + 4.4178\epsilon^3 - 1.7105\epsilon^4 \quad (16)$$

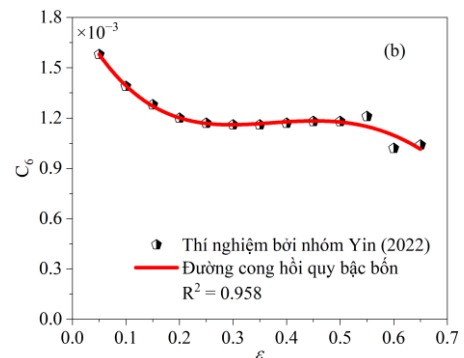
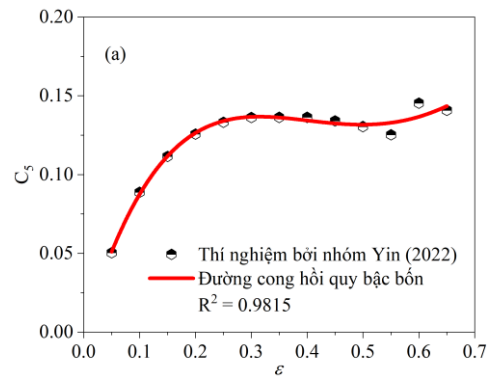
$$C_6 = 0.0018 - 0.0063\epsilon + 0.0194\epsilon^2 - 0.0227\epsilon^3 + 0.0071\epsilon^4 \quad (17)$$

Tổng kết lại, mô hình toán học chỉnh sửa của Zerilli-Armstrong cho hợp kim magie GW103K được mô tả dưới dạng công thức sau:

$$\sigma = (64.74 + 13.81327\epsilon^{-0.0835}) \exp \left\{ -(0.01497 - 0.00067\epsilon) T^* + [C_5(\epsilon) + C_6(\epsilon) T^*] \ln \epsilon^* \right\} \quad (18)$$

Bảng 1. Các giá trị của C_5 và C_6

ϵ	0.05	0.1	0.15	0.2
C_5	0.05043	0.08882	0.11156	0.12574
C_6	0.00158	0.00139	0.00128	0.0012
ϵ	0.25	0.3	0.35	0.4
C_5	0.13325	0.13624	0.13638	0.13636
C_6	0.00117	0.00116	0.00116	0.00117
ϵ	0.45	0.5	0.55	0.6
C_5	0.13412	0.13047	0.12526	0.14537
C_6	0.00118	0.00118	0.00121	0.00102
ϵ	0.65			
C_5	0.14084			
C_6	0.00104			



Hình 6. Mối quan hệ giữa (a) C_5 và ϵ , (b) C_6 và ϵ

4.3. Thảo luận

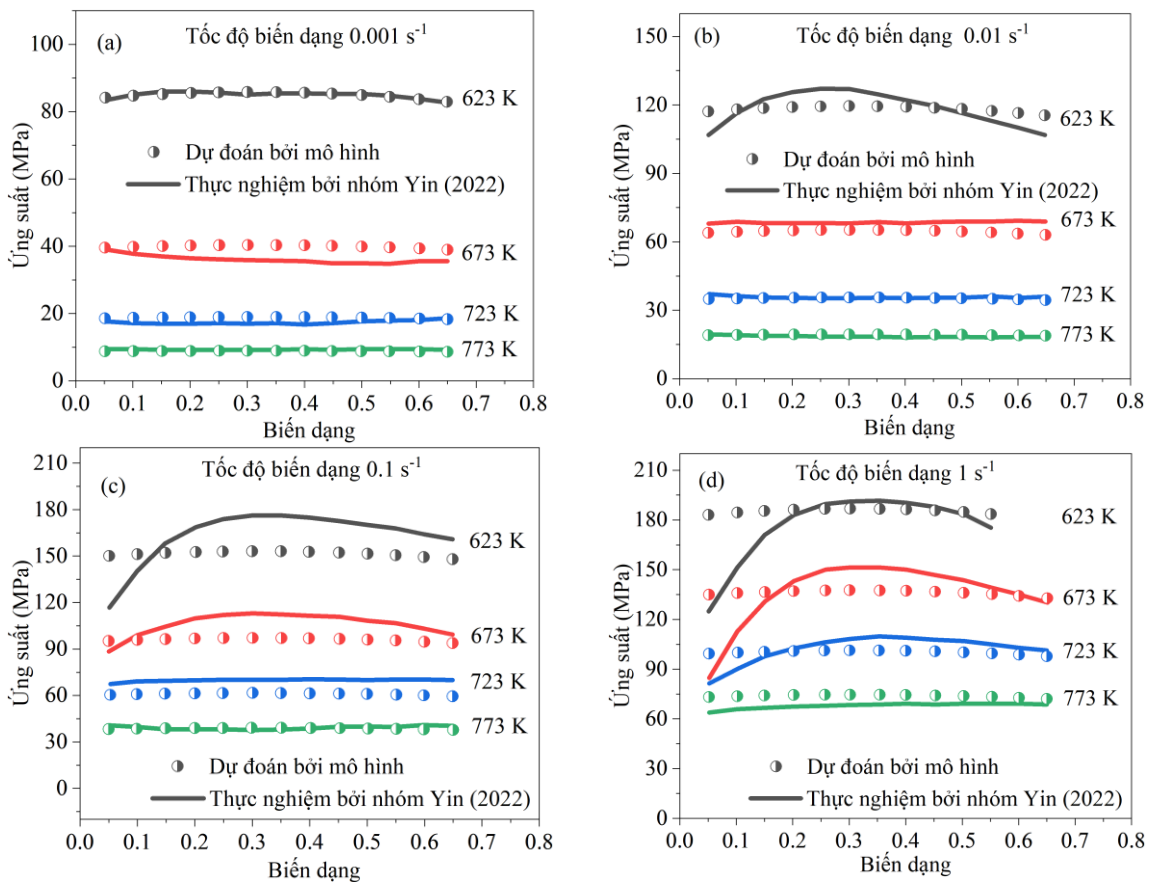
Sự so sánh giữa các điểm ứng suất - biến dạng của dữ liệu thực nghiệm với hai mô hình toán học chỉnh sửa của Johnson-Cook và Zerilli-Armstrong được thể hiện lần lượt trong Hình 7 và Hình 8.

Từ Hình 7, chúng ta có thể nhận thấy rằng: Có một sự khác biệt nhỏ giữa các giá trị ứng suất - biến dạng của mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa với với các giá trị ứng suất - biến dạng của thực nghiệm, đặc biệt là các điểm rất này gần nhau ở tốc độ biến dạng $0,001s^{-1}$.

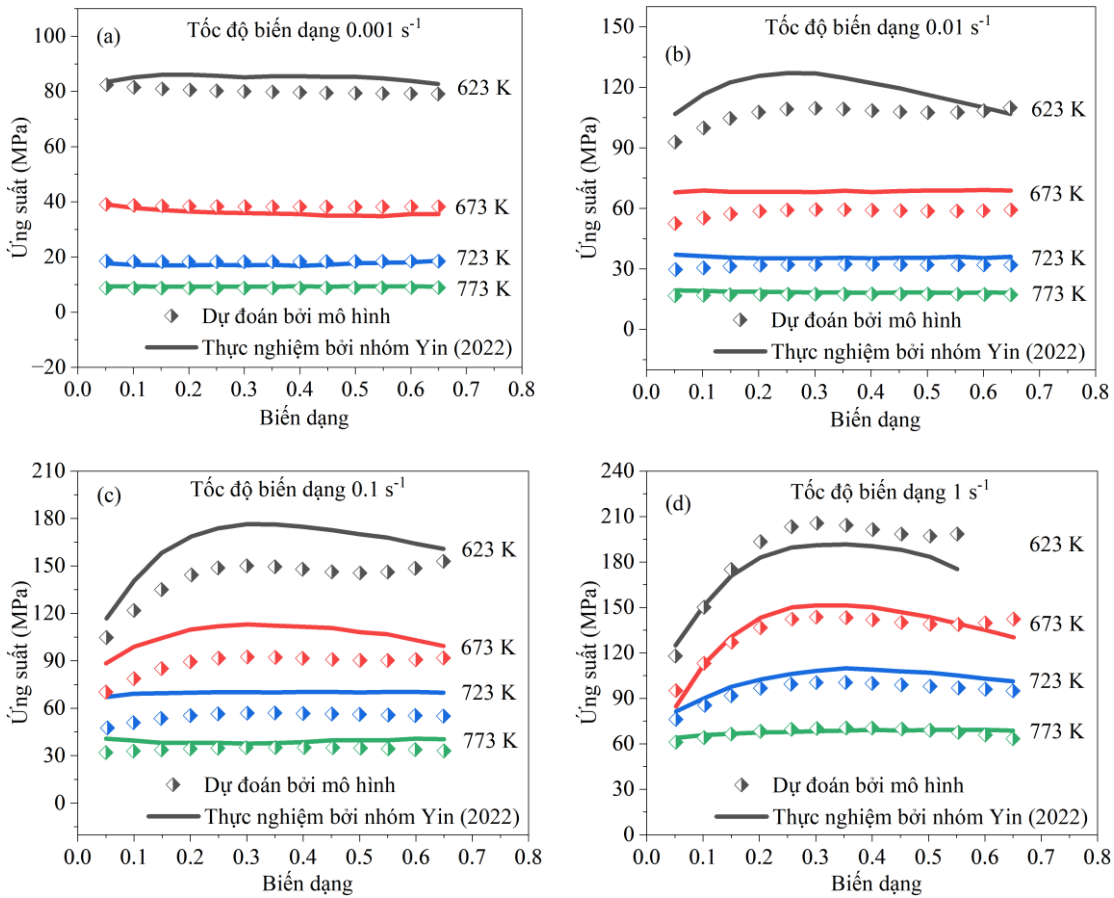
Ở tốc độ biến dạng $0,01s^{-1}$, các giá trị dự báo từ mô hình khi đem so sánh với các giá trị thí nghiệm cũng khá tương đồng, ngoại trừ cho trường hợp nhiệt độ thấp nhất là 623K. Tuy nhiên, tại tốc độ biến dạng $0,1s^{-1}$ và $1s^{-1}$, các giá trị ứng suất của mô hình Johnson-Cook khá phân tán so với các giá trị ứng suất thực nghiệm, đặc biệt là tại điều kiện nhiệt độ lớn nhất 773K. Với nhiệt độ thấp và tốc độ biến dạng cao, mô hình dự báo khá xa về ứng suất so với thực nghiệm. Tại điều kiện này, đường cong dự báo có hình dạng khác so với đường cong thực nghiệm. Lý do để giải

thích cho điều này có thể là do mô hình chỉnh sửa Johnson-Cook chỉ xem xét các ảnh hưởng đồng thời của biến dạng, tốc độ biến dạng, và nhiệt độ đối với thí nghiệm kéo; còn đối với thí nghiệm nén, mô hình này chưa mô tả một cách chính xác nhất [7].

Hình 8 mô tả sự so sánh giữa các giá trị ứng suất - biến dạng của mô hình chỉnh sửa Zerilli-Armstrong với các giá trị ứng suất - biến dạng của thí nghiệm. Những giá trị này khá gần nhau dưới điều kiện tham chiếu ở tốc độ biến dạng $0,001s^{-1}$. Khi tốc độ biến dạng tăng từ $0,001s^{-1}$ tới $1s^{-1}$; ở nhiệt độ ở giữa, mô hình dự báo Zerilli-Armstrong cho ra các giá trị ứng suất khá gần với các giá trị thực nghiệm; còn tại nhiệt độ thấp, các giá trị dự báo ứng suất khá phân tán so với các giá trị ứng suất thí nghiệm. Khi so sánh hai đường cong ứng suất - biến dạng của hai mô hình, thì ta có thể nhận thấy rằng: Đường cong dự báo của mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa bám khá sát về hình dạng với đường cong thực nghiệm, còn mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa thì không bám sát bằng. Ở nhiệt độ ở giữa, các giá trị dự báo ứng suất của mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa khá gần với các giá



Hình 7. So sánh giữa ứng suất thực nghiệm bởi Yin và cộng sự [18] và ứng suất của mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa với tốc độ biến dạng (a) $0.001 s^{-1}$; (b) $0.01 s^{-1}$; (c) $0.1 s^{-1}$; (d) $1 s^{-1}$



Hình 8. So sánh giữa ứng suất thực nghiệm bởi Yin và cộng sự [18] và ứng suất của mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa với tốc độ biến dạng (a) 0.001 s^{-1} ; (b) 0.01 s^{-1} ; (c) 0.1 s^{-1} ; (d) 1 s^{-1}

trị ứng suất của thực nghiệm; còn ở nhiệt độ thấp, chúng khá xa so với nhau. Lý do có thể giải thích cho điều này là: Mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa chịu trách nhiệm cho các ảnh hưởng của biến dạng đẳng hướng, biến dạng nhiệt độ, tốc độ biến dạng, và ảnh hưởng đồng thời của biến dạng, tốc độ biến dạng, và nhiệt độ [26].

Khả năng dự đoán của các mô hình được đánh giá dựa vào các thông số như: Hệ số tương quan R (correlation coefficient), sai số liên quan trung bình tuyệt đối AARE (average absolute relative error). Hệ số AARE là một hệ số thống kê, được sử dụng để đánh giá khả năng dự đoán của một mô hình như thế nào. Còn hệ số R đưa ra các thông tin về sự chính xác và hiệu quả của mối quan hệ tuyến tính giữa các điểm dự báo và điểm thực nghiệm. Các hệ số này được tính toán theo các công thức sau:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})(\sigma_p^i - \bar{\sigma}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_p^i - \bar{\sigma}_p)^2}} \quad (19)$$

$$\text{AARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{\text{exp}}^i - \sigma_p^i}{\sigma_{\text{exp}}^i} \right| \times 100\% \quad (20)$$

Trong đó: σ_{exp}^i là ứng suất thực nghiệm tại điểm i (MPa), $\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ là ứng suất trung bình của các điểm thực nghiệm (MPa), σ_p^i là ứng suất dự báo tại điểm i , $\bar{\sigma}_p$ là ứng suất trung bình của các điểm dự báo (MPa), và N là tổng các điểm dữ liệu.

Hệ số tương quan R của hai mô hình chỉnh sửa Johnson-Cook và Zerilli-Armstrong lần lượt là: 0,982 và 0,986. Sai số liên quan trung bình tuyệt đối AARE tương ứng của hai mô hình lần lượt là: 7,066 và 9,454. Hệ số tương quan R của mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa là cao hơn so với mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa, chứng tỏ rằng mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa là tốt hơn ở hạng mục đường hồi quy tuyến tính so với mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa, tức là dữ liệu dự báo và thực nghiệm gần sát nhau hơn. Tuy nhiên, sai số liên quan trung bình tuyệt đối AARE của mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa là nhỏ hơn so với mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa, điều đó có

nghĩa rằng mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa dự báo nhiều điểm sát với thực nghiệm so với mô hình còn lại. Tổng quan, cả hai mô hình đều có khả năng dự báo dòng ứng suất tại nhiệt độ đánh giá dưới một phổ rộng của biến dạng, tốc độ biến dạng và nhiệt độ.

5. Kết luận

Bài báo này đánh giá ứng xử biến dạng nóng của hợp kim magie GW103K, bằng việc điều tra so sánh sử dụng các công thức mô hình toán học chỉnh sửa của Zerilli-Armstrong và Johnson-Cook. Các thí nghiệm nén đẳng nhiệt được thực hiện với các tốc độ biến dạng là $(0.001-1) s^{-1}$, và phổ của nhiệt độ biến dạng là $(623-773) K$. Từ đây, ta có thể đưa ra một kết luận rằng: Ứng suất của hợp kim magie GW103K bị ảnh hưởng khá nhiều bởi tốc độ biến dạng và nhiệt độ biến dạng. Dòng ứng suất tăng khi tăng tốc độ biến dạng và giảm khi tăng nhiệt độ biến dạng.

Hệ số tương quan R và sai số liên quan trung bình tuyệt đối AARE của mô hình Johnson-Cook chỉnh sửa và mô hình Zerilli-Armstrong chỉnh sửa lần lượt là: 0,982; 7,066; 0,986; và 9,454. Hai mô hình này có thể dự đoán tốt dòng ứng suất dưới điều kiện nhiệt độ trung bình của thí nghiệm nén, do có xem xét đến ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và tốc độ biến dạng.

Với thí nghiệm nén, ở phổ nhiệt độ trung bình 623K- 773K, hai mô hình này có thể dự đoán một cách chính xác mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng ở phần cận trên của phổ nhiệt độ, nhưng tại phần cận dưới của phổ nhiệt độ, chúng không đủ tốt để mô tả mối quan hệ này, ngoại trừ tại nhiệt độ 623K và tốc độ biến dạng $0,001s^{-1}$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] He A., Xie G., Zhang H., and Wang X. (2014), *A Modified Zerilli-Armstrong Constitutive Model To Predict Hot Deformation Behavior of 20CrMo Alloy Steel*, Materials and Design, Vol. 56, pp. 122-127.
- [2] Wang M. Han, Wang G. Tian, and Wang R. (2016), *Flow Stress Behavior and Constitutive Modeling of 20MnNiMo Low Carbon Alloy*, Journal of Central South University, Vol. 23, Issue 8, pp. 1863-1872.
- [3] Chen L., Zhao G., and Yu J. (2015), *Hot Deformation Behavior and Constitutive Modeling of Homogenized 6026 Aluminum Alloy*, Materials and Design, Vol.74, pp.25-35.
- [4] Samantaray D., Mandal S., Bhaduri A.K., Venugopal S., and Sivaprasad P. V. (2011), *Analysis and Mathematical Modelling of Elevated Temperature Flow Behaviour of Austenitic Stainless Steels*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, Issue.4-5, pp.1937-1943.
- [5] Lin Y.C. and Chen X.M. (2011), *A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Descriptions for Metals and Alloys in Hot Working*, Materials and Design, Vol. 32, Issue 4, pp. 1733-1759.
- [6] Chaboche J.L. (2008), *A Review of Some Plasticity and Viscoplasticity Constitutive Theories*, International Journal of Plasticity, Vol. 24, Issue 10, pp.1642-1693.
- [7] G. R. Johnson and W. H. Cook (1985), *Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures*, Engineering Fracture Mechanics, 21(1), pp.31-48.
- [8] Peng W., Zeng W., Wang Q., and Yu H. (2013), *Comparative Study on Constitutive Relationship of As-Cast Ti60 Titanium Alloy during Hot Deformation Based on Arrhenius-Type and Artificial Neural Network Models*, Materials and Design, Vol.51, pp.95-104.
- [9] Tan Y.B., Ma Y.H., and Zhao F. (2018), *Hot Deformation Behavior and Constitutive Modeling of Fine Grained Inconel 718 Superalloy*, Journal of Alloys and Compounds, Vol.741, pp.85-96.
- [10] Zerilli F.J. and Armstrong R.W. (1987), *Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations*, Journal of Applied Physics, Vol.61(5), pp.1816-1825.
- [11] Mirzaie T., Mirzadeh H., and Cabrera J.M. (2016), *A Simple Zerilli-Armstrong Constitutive Equation for Modeling and Prediction of Hot Deformation Flow Stress of Steels*, Mechanics of Materials, Vol.94, pp.38-45.
- [12] Wu H. (2020), *A Cellular Automaton Coupled FEA Model for Hot Deformation Behavior of AZ61 Magnesium Alloys*, Journal of Alloys and Compounds, Vol.816.
- [13] Brito Oliveira G.A., Cardoso R.A., Freire Júnior R.C.S., and Araújo J.A. (2023), *A Generalized ANN-Multi-axial Fatigue Nonlocal Approach to Compute Fretting Fatigue Life for Aeronautical Al Alloys*, Tribology International, Vol.180.
- [14] Wang D. (2022), *Hot Deformation Behaviors of AZ91 Magnesium Alloy: Constitutive Equation*,

- ANN-Based Prediction, Processing Map and Microstructure Evolution*, Journal of Alloys and Compounds, Vol.908.
- [15] Pham T.T., Nguyen T.T., Nguyen L.N., and Nguyen P.V. (2020), *A Neural Network Approach for Predicting Hardened Property of Geopolymer Concrete*, International Journal of GEOMATE, Vol.19, Issue 74, pp.176-184.
- [16] Husnah, Tisnawan R., Maizir H., and Suryanita R. (2022), *Prediction Of The Compressive Strength Of Foam Concrete Using The Artificial Neural Network*, International Journal of GEOMATE, Vol.23, Issue 99, pp.134-140.
- [17] Zhao J., Ding H., Zhao W., Huang M., Wei D., and Jiang Z. (2014), *Modelling of the Hot Deformation Behaviour of a Titanium Alloy Using Constitutive Equations and Artificial Neural Network*, Computational Materials Science, Issue 92, pp.47-56.
- [18] Yin L. and Wu Y. (2022), *Comparison of Constitutive Models and Microstructure Evolution of GW103K Magnesium Alloy during Hot Deformation*, Materials, Vol. 15, Issue 12.
- [19] Song J., She J., Chen D., and Pan F. (2020), *Latest Research Advances on Magnesium and Magnesium Alloys Worldwide*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 8, Issue 1, pp. 1-41.
- [20] Liang M.J., Wu G.H., Ding W.J., and Wang W. (2011), *Effect of Inclusion on Service Properties of GW103K Magnesium Alloy*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), Vol.21, Issue 4, pp.717-724.
- [21] Li L. and Zhang X. (2011), *Hot Compression Deformation Behavior and Processing Parameters of a Cast Mg-Gd-Y-Zr Alloy*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, Issue 3, pp.1396-1401.
- [22] Lin Y.C. and Liu G. (2010), *A New Mathematical Model for Predicting Flow Stress of Typical High-Strength Alloy Steel at Elevated High Temperature*, Computational Materials Science, Vol. 48, Issue 1, pp.54-58.
- [23] Lin Y.C. and Chen X.M. (2010), *A Combined Johnson-Cook and Zerilli-Armstrong Model for Hot Compressed Typical High-Strength Alloy Steel*, Computational Materials Science, Vol. 49, Issue 3, pp. 628-633.
- [24] He A., Xie G., Zhang H., and Wang X. (2013), *A Comparative Study on Johnson-Cook, Modified Johnson-Cook and Arrhenius-Type Constitutive Models to Predict the High Temperature Flow Stress in 20CrMo Alloy Steel*, Materials and Design, Vol. 52, pp.677-685.
- [25] Lin Y.C., Chen X.M., and Liu G. (2010), *A Modified Johnson-Cook Model for Tensile Behaviors of Typical High-Strength Alloy Steel*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, Issue 26, pp. 6980-6986.
- [26] Samantaray D., Mandal S., Borah U., Bhaduri A.K., and Sivaprasad P. V. (2009), *A Thermo-Viscoplastic Constitutive Model to Predict Elevated-Temperature Flow Behaviour in a Titanium-Modified Austenitic Stainless Steel*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 526, Issue 1-2, pp.1-6.

Ngày nhận bài:	19/04/2024
Ngày nhận bản sửa:	11/05/2024
Ngày duyệt đăng:	20/05/2024