

MÔ PHỎNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN THÍ NGHIỆM DẬP MẪU NHỎ CHO HỢP KIM NHÔM A1050-H14

FINITE ELEMENT SIMULATION OF SMALL PUNCH TEST FOR ALUMINUM ALLOY A1050-H14

Phạm Thị Hằng^{1,*}, Nghiên Văn Vinh¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.006>

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được mô hình hóa và mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình vật liệu Johnson-Cook được áp dụng cho hợp kim nhôm A1050-H14. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm đã được công bố trước đây. Từ đó, lựa chọn được thông số của mô hình Johnson-Cook để thu được kết quả phù hợp cho vật liệu nghiên cứu. Từ kết quả nghiên cứu mô phỏng có thể dự đoán cơ chế phá hủy trong mẫu thí nghiệm trong quá trình thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho hợp kim nhôm theo cơ chế phá hủy dẻo. Mẫu thí nghiệm sẽ bị thắt tại vùng tiếp xúc với mép chày sau đó phá hủy xảy ra từ mép dưới của mẫu và lan vào phía bên trong.

Từ khóa: Cơ tính vật liệu; mô hình hóa; mô phỏng máy tính; hợp kim nhôm; thí nghiệm dập mẫu nhỏ.

ABSTRACT

In this study, the small punch test is modelled and simulated by finite element method. Johnson-Cook plasticity model is applied for aluminum alloy A1050-H14. The results obtained from computational simulation are compared to the experimental results in previous study. Then, the parameters of Johnson-Cook plasticity model are chosen for investigated material. It can be proposed the fracture mechanism in the small punch test for aluminum alloy A1050-H14 is ductile fracture. The necking occurs in the area where the specimen is in contact with the edge of the punch at the certain level of displacement of the punch, then the initial crack might appear from outside of the specimen.

Keywords: Aluminum alloy; computational simulation; mechanics of materials; modeling; small punch test.

¹Trường Đại học Thủy Lợi

*Email: pthang@tlu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/5/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hợp kim nhôm 1050 là loại vật liệu sử dụng phổ biến trong công nghiệp thực phẩm, hóa chất, gia dụng do có độ bền trung bình, độ dẻo cao, khả năng chống ăn mòn tốt và giá thành khá rẻ [1]. Hợp kim nhôm 1050 chứa đến 99% nhôm nguyên chất, ngoài ra còn có một số nguyên tố hợp kim như silic, sắt, titan, mangan, đồng... Loại vật liệu này sử dụng chủ yếu ở dạng tấm và được tạo hình bằng

phương pháp gia công áp lực. Đặc biệt, nghiên cứu của Hallberg [2] cho thấy mác nhôm A1050-H14 có khả năng tăng độ bền cứng trong quá trình cán thay vì nhiệt luyện tôi - ram như các kim loại thông thường khác. Do đó, để tối ưu hóa sử dụng hợp kim nhôm A1050-H14 trong quá trình gia công áp lực, nghiên cứu tính chất cơ học của vật liệu này là rất cần thiết.

Trong số các phương pháp thử cơ tính vật liệu, phương pháp thí nghiệm dập mẫu nhỏ gần đây thu hút được sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới. Theo các nghiên cứu đây là phương pháp thí nghiệm đơn giản, chi phí thí nghiệm ít hơn so với các phương pháp thí nghiệm cơ tính truyền thống do sử dụng mẫu thí nghiệm rất bé [3, 4] và thực hiện thí nghiệm ngay trên thiết bị kéo nén thông thường [5]. Nhiều nghiên cứu mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã được thực hiện cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho các loại vật liệu khác nhau. Abendroth và cộng sự [6] đã nghiên cứu tính chất phá hủy của vật liệu dẻo dưới biến dạng dập mẫu nhỏ từ các kết quả mô phỏng máy tính. Phạm và cộng sự [7] đã thiết lập mô hình phần tử hữu hạn và thuật toán dịch chuyển của chày trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho thép không gỉ 304. Cárdenas và cộng sự [8] đã mô phỏng 3D thí nghiệm dập mẫu nhỏ sử dụng mẫu thí nghiệm có vết nứt ban đầu để tính toán tích phân J đánh giá độ dai phá hủy của vật liệu. Trong nghiên cứu của Cao và cộng sự [9], mô hình vật liệu Johnson-Cook được áp dụng trong mô phỏng tính chất cơ học của thép 304 và hợp kim nhôm 1060 ở tốc độ rất cao. Theo nghiên cứu này, mô hình Johnson-Cook hoàn toàn phù hợp để áp dụng khi mô phỏng vật liệu có tính dẻo cao như hợp kim nhôm, các loại thép.

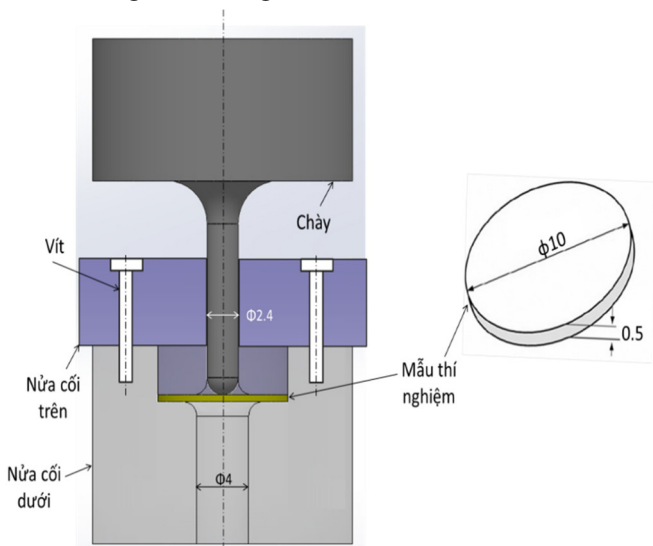
Trong nghiên cứu này, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được mô hình hóa và mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình vật liệu Johnson-Cook được áp dụng cho hợp kim nhôm A1050-H14. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm đã được công bố trước đây [10]. Từ đó, lựa chọn được thông số của mô hình Johnson-Cook để thu được kết quả phù hợp cho vật liệu nghiên cứu. Tính chất cơ học của vật liệu được thảo luận dựa trên các kết quả quan hệ lực tác dụng - độ dịch chuyển của chày, sự phân bố ứng suất và biến dạng dẻo trong mẫu thí nghiệm để có thể sáng tỏ cơ chế phá hủy trong mẫu hợp kim nhôm khi biến dạng dập nhỏ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

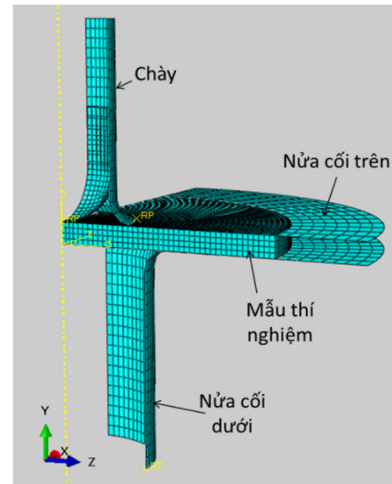
2.1. Mô hình hóa thí nghiệm dập mẫu nhỏ trong mô phỏng

Kết cấu bộ đồ gá của thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thể hiện trên hình 1. Bộ đồ gá bao gồm các chi tiết chính là nửa cối trên, nửa cối dưới, chày tác dụng lực và bạc dẫn hướng. Mẫu thí nghiệm được kẹp chặt giữa nửa cối trên và nửa cối dưới bằng các vít chìm. Mặc dù không có tiêu chuẩn cho mẫu thử dùng trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ, thông thường các nghiên cứu sử dụng mẫu có dạng hình đĩa có đường kính 2,4mm và chiều dày 0,5mm là phổ biến nhất. Vì vậy, nghiên cứu này cũng sử dụng loại mẫu này để tiến hành mô phỏng. Dựa trên kích thước mẫu thí nghiệm, kích thước đường kính đầu chày, đường kính trong của nửa cối trên và nửa cối dưới được tính toán phù hợp như thể hiện trên hình 1. Dưới tác dụng của lực nén qua đầu chày, mẫu thử sẽ bị biến dạng lõm xuống ở khu vực chày tác động, phần tiếp xúc với nửa cối trên và nửa cối dưới sẽ không bị biến dạng. Do kết cấu đơn giản, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thực hiện trên thiết bị kéo-nén thông thường.

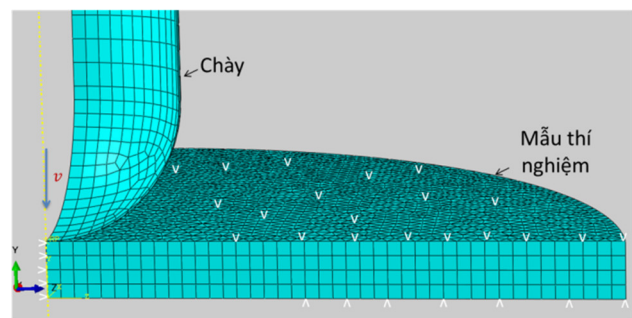
Do sơ đồ gá đặt và hình dạng hình học của các chi tiết trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ là đối xứng trục nên để giảm thiểu số lượng phần tử tính toán và thời gian tính toán, mô phỏng chỉ thực hiện trên mô hình bằng 1/4 chi tiết thực tế. Như vậy, từ mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ trên hình 1, mô hình phần tử hữu hạn được thiết lập như hình 2. Trong mô hình mô phỏng, chỉ có mẫu thí nghiệm là có thể biến dạng được, còn các chi tiết chày, nửa cối trên, nửa cối dưới được coi là các vật cứng không biến dạng. Mẫu thí nghiệm được hạn chế các bậc tự do chuyển động theo phương thẳng đứng tại các nút tiếp xúc với nửa cối trên và nửa cối dưới thông qua việc giới hạn chuyển động của nửa cối trên và nửa cối dưới tương ứng. Các nút ở mặt đối xứng của mẫu thí nghiệm được giới hạn bậc tự do theo phương vuông góc với mặt đối xứng. Chày có thể chuyển động tịnh tiến theo phương thẳng đứng (phương Y) với tốc độ v. Dạng phần tử của mẫu thí nghiệm là phần tử dạng nêm "wedge" 3D có 6 nút.



Hình 1. Mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ



a)



b)

Hình 2. a) Mô hình phần tử hữu hạn; b) điều kiện biên

2.2. Mô hình vật liệu

Do trong bài toán mô phỏng chỉ có mẫu là biến dạng dẻo nên chỉ cần thiết lập mô hình vật liệu cho mẫu thí nghiệm. Áp dụng mô hình vật liệu Johnson-Cook [11] cho hợp kim nhôm A1050-H14 với quan hệ ứng suất - biến dạng như sau:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C\ln\epsilon^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

Trong đó, σ là ứng suất, ϵ là tốc độ biến dạng dẻo, ϵ_0 là tốc độ biến dạng tham khảo, T là nhiệt độ tuyệt đối, T_r là nhiệt độ phòng, T_m là nhiệt độ nóng chảy của vật liệu, A, B, C là các hằng số. Các thông số của mô hình Johnson-Cook được sơ bộ lựa chọn như trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số mô hình Johnson - Cook cho hợp kim nhôm A1050-H14

Thông số	A (MPa)	B (MPa)	n	T_r (°K)	T_m (°K)	m	C	ϵ_0
Giá trị	300	90	0,46	297	828	1	0,002	0,001

Bảng khai báo thông số khối lượng riêng và mô đun đàn hồi của vật liệu nghiên cứu được cho trong bảng 2.

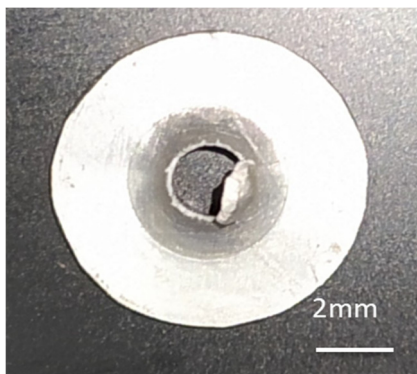
Bảng 2. Thông số vật liệu khai báo của hợp kim nhôm A1050-H14

Thông số	Giá trị
Khối lượng riêng (kg/m^3)	2700
Mô đun đàn hồi (GPa)	70
Hệ số Poisson	0,33

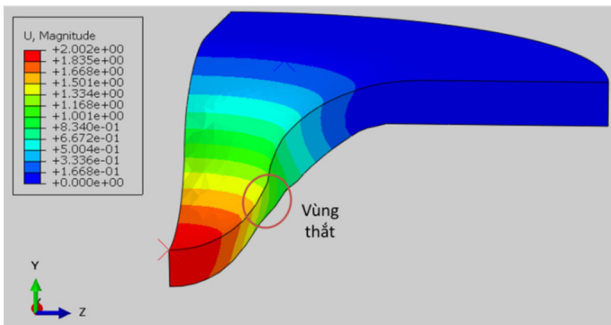
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình ảnh mẫu thí nghiệm sau khi biến dạng dập mẫu nhỏ được thể hiện trong Hình 3. Kết quả mô phỏng với độ dịch chuyển của chày là 2mm rất tương đồng với hình ảnh mẫu thu được từ thực nghiệm. Mẫu dịch chuyển lớn ở phần tiếp xúc với đầu chày, phần còn lại tiếp xúc với nửa cối trên và nửa cối dưới gần như không dịch chuyển theo phương tác dụng lực. Mẫu bị thắt tiết diện ở vùng tiếp xúc với mép đầu chày, nơi dự đoán sẽ bị phá hủy giống như vị trí phá hủy quan sát được từ thực nghiệm mặc dù vùng này độ dịch chuyển của mẫu không đạt giá trị lớn nhất.

Hình 4 thể hiện đường cong lực tác dụng - dịch chuyển của chày thu được từ mô phỏng (hình 4a) và so sánh với thực nghiệm (hình 4b). Kết quả thực nghiệm đã được công bố trong bài báo [10]. Đường cong mối quan hệ lực tác dụng - dịch chuyển của chày rất giống với dạng đường cong lực tác dụng - dịch chuyển của chày điển hình thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Theo Torres và cộng sự [12], trong biến dạng dập mẫu nhỏ, vật liệu trải qua các giai đoạn biến dạng tương ứng trên hình 4a bao gồm biến dạng đàn hồi (vùng 1), vùng chuyển tiếp đàn hồi - dẻo (vùng 2), vùng biến dạng dẻo (vùng 3), vùng biến dạng dẻo không ổn định (vùng 4) và vùng phá hủy (vùng 5). Như vậy, từ kết quả hình 3 và 4 cho thấy điều kiện biên được thiết lập trong mô phỏng là hoàn toàn hợp lý, đáng tin cậy. Tuy nhiên, so sánh với kết quả thực nghiệm, kết quả vẫn có sự sai khác. Điều này có thể do việc lựa chọn thông số của mô hình vật liệu Johnson-Cook chưa hợp lý đối với hợp kim nhôm A1050-H14. Chính vì vậy, các bước khảo sát tiếp theo với sự thay đổi thông số của mô hình Johnson-Cook là cần thiết.

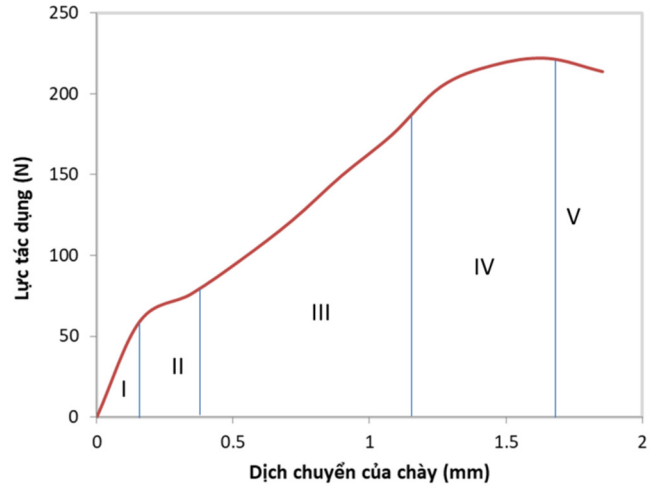


a)

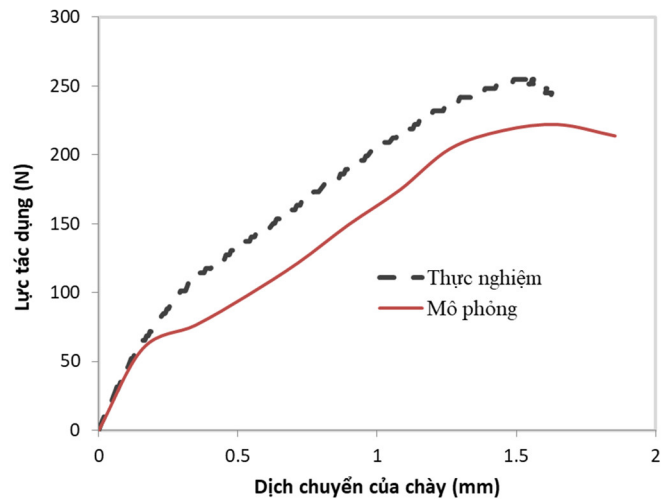


b)

Hình 3. Hình ảnh mẫu thí nghiệm thu được từ a) Thực nghiệm và b) Mô phỏng



a)



b)

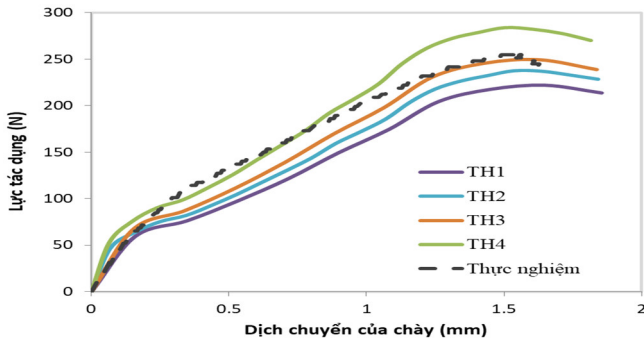
Hình 4. Quan hệ lực tác dụng - dịch chuyển của chày so sánh mô phỏng và thực nghiệm

Bảng 3 thể hiện các trường hợp thay đổi thông số của mô hình Johnson-Cook cho loại vật liệu nghiên cứu.

Bảng 3. Thay đổi thông số của mô hình Johnson-Cook

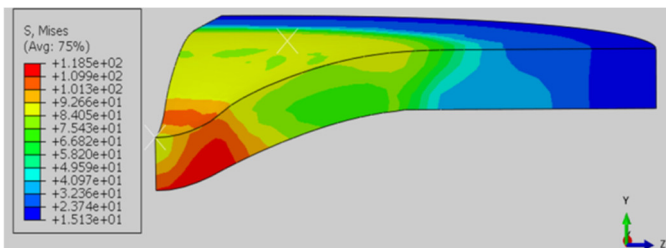
Thông số	A (MPa)	B (MPa)	n	T_r	T_m	m	C	ϵ'_0
TH1	300	90	0,46	297	828	1	0,002	0,001
TH2	330	88	0,55	297	828	1	0,002	0,001
TH3	350	85	0,46	297	828	1	0,002	0,001
TH4	400	92	0,46	297	828	1	0,002	0,001

Kết quả đường cong lực tác dụng - dịch chuyển của chày khi thay đổi thông số của mô hình Johnson-Cook được thể hiện trên hình 5. Trong trường hợp 3 với các thông số trong bảng 3 cho kết quả mô phỏng tương đồng với kết quả thực nghiệm nhất. Do đó, lựa chọn thông số mô hình Johnson-Cook cho hợp kim nhôm A1050-H14 như trường hợp 3 để nghiên cứu mô phỏng thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho vật liệu này.

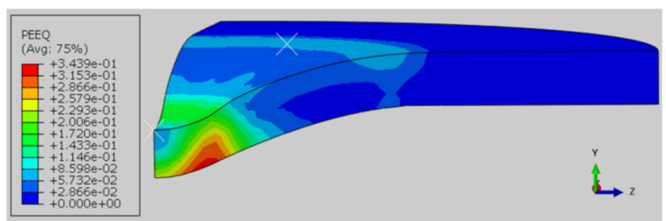


Hình 5. Quan hệ lực tác dụng - dịch chuyển của chày khi thay đổi thông số của mô hình Johnson-Cook

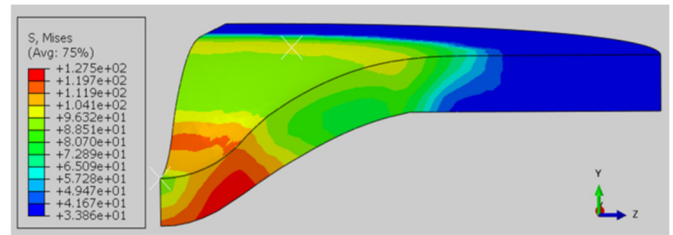
Mô phỏng dựa trên thông số của mô hình Johnson-Cook như trường hợp 3 được kết quả phân bố ứng suất như hình 6. Kết quả hình 6 cho thấy ứng suất và độ biến dạng dẻo tăng dần theo độ dịch chuyển của chày nhưng vùng ứng suất lớn nhất luôn tập trung ở mép dưới của mẫu thử ở khu vực tiếp xúc với mép chày. Tại độ dịch chuyển của chày $u = 2,04\text{mm}$, ứng suất lớn nhất tập trung ở vùng thắt của mẫu thí nghiệm. Khi đó, giá trị ứng suất tối đa đã vượt quá giới hạn bền của hợp kim nhôm A1050-H15. Trong khi đó, ứng suất ở các vùng khác vẫn nhỏ hơn giới hạn bền của vật liệu. Do đó, có thể thấy mẫu đã bị phá hủy ở vùng thắt. Kết quả này rất tương đồng với kết dự đoán vùng phá hủy của mẫu thí nghiệm như thực nghiệm. Hơn nữa, giá trị độ biến dạng dẻo tương đương ở mép dưới của mẫu thí nghiệm đều lớn hơn mép trên, giống như phân bố ứng suất. Như vậy, có thể dự đoán cơ chế phá hủy trong mẫu thí nghiệm bằng hợp kim nhôm A1050-H14 trong quá trình thí nghiệm dập mẫu nhỏ theo cơ chế phá hủy dẻo. Khi chày tác dụng xuống vùng mẫu thí nghiệm, mẫu sẽ dịch chuyển xuống theo phương lực tác dụng và bị biến dạng dẻo; khi chày đã đi xuống hết hành trình tương ứng với bán kính của chày (khoảng 1,2mm) thì xảy ra hiện tượng biến mỏng ở vùng tiếp xúc với mép đầu chày, mẫu sẽ bị thắt ở khu vực đó. Tiếp tục tác dụng lực, mẫu thí nghiệm sẽ phá hủy tại vùng thắt này theo cơ chế phá hủy dẻo. Phá hủy đầu tiên dự kiến sẽ xuất phát từ mép dưới của mẫu thí nghiệm.



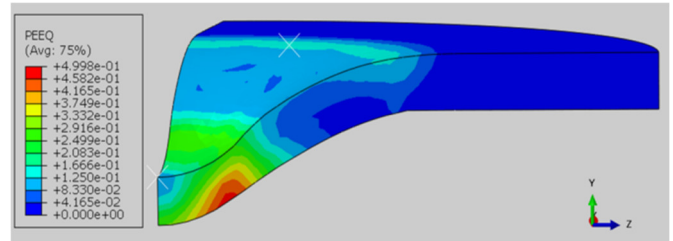
a) Phân bố ứng suất $u = 0,72\text{mm}$



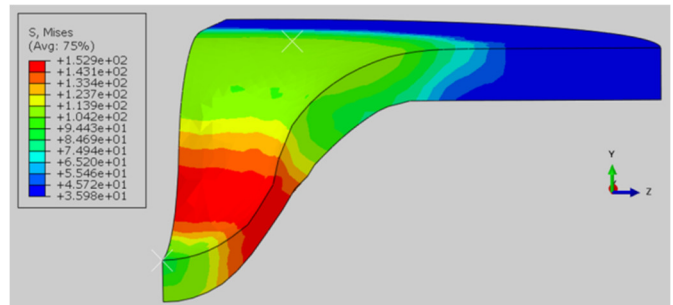
b) Phân bố biến dạng dẻo tương đương $u = 0,72\text{mm}$



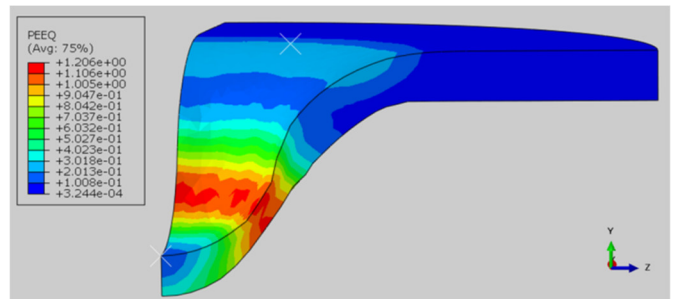
c) Phân bố ứng suất $u = 1,08\text{mm}$



d) Phân bố biến dạng dẻo tương đương $u = 1,08\text{mm}$



e) Phân bố ứng suất $u = 2,04\text{mm}$



f) Phân bố biến dạng dẻo tương đương $u = 2,04\text{mm}$

Hình 6. Phân bố ứng suất và biến dạng dẻo tương đương ở các độ dịch chuyển khác nhau của chày

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực hiện mô hình hóa và mô phỏng thí nghiệm dập mẫu nhỏ bằng phương pháp phần tử hữu hạn cho hợp kim nhôm 1050-H14 áp dụng mô hình vật liệu Johnson-Cook. Kết quả đường cong lực tác dụng - độ võng thu được rất giống với loại đường cong điển hình của thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Ngoài ra, biên dạng mẫu thu được với sự phân bố ứng suất, độ biến dạng dẻo cho thấy kết quả mô phỏng rất phù hợp với thực nghiệm như công bố trước đây. Khi so sánh kết quả mô phỏng quan hệ lực tác dụng - độ võng với thực nghiệm đã lựa chọn được thông số của mô hình Johnson-Cook cho vật liệu nghiên cứu. Từ kết quả nghiên cứu mô phỏng có thể dự đoán cơ chế phá hủy trong mẫu thí nghiệm trong quá trình thí nghiệm dập mẫu nhỏ

cho hợp kim nhôm theo cơ chế phá hủy dẻo. Mẫu thí nghiệm sẽ bị thắt tại vùng tiếp xúc với mép chày sau đó phá hủy xảy ra từ mép dưới của mẫu và lan vào phía bên trong.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Mohammad R.A., "Computing strain rate sensitivity of aluminium alloy 1050." *International Scientific Survey Journal*, 3 (2), 9-27, 2020.
- [2]. Hallberg H., "Influence of process parameters on grain refinement in AA1050 aluminum during cold rolling," *International Journal of Mechanical Sciences*, 66, 260-272, 2013.
- [3]. Arunkumar S., "Overview of Small Punch Test," *Metals and Materials International*, 26, 719-738, 2020.
- [4]. Lancaster R.J., Jeffs S.P., Illsley H.W., Argyrakis C., Hurst R.C., Baxter G.J., "Development of a novel methodology to study fatigue properties using the small punch test," *Material Science and Engineering A*, 748, 21-29, 2019.
- [5]. Pham Thi Hang, Nghiem Van Vinh, "Design and manufacturing of jig for small punch testing and its application for stainless steel." *University of Danang - Journal of Science and Technology*, 20 (9), 34-38, 2022.
- [6]. Abendroth M., Kuna M., "Determination of deformation and failure properties of ductile materials by means of the small punch test and neural networks," *Computational Materials Science*, 28, 633-644, 2003.
- [7]. Pham H. T., Iwamoto T., "An evaluation of fracture properties of type-304 austenitic stainless steel at high deformation rate using the small punch test," *International Journal of Mechanical Science*, 144, 249-261, 2018.
- [8]. Cárdenas E., Belzunce F.J., Rodríguez C., Penuelas I., Betegón C., "Application of the small punch test to determine the fracture toughness of metallic materials," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 35 (5), 441-450, 2012.
- [9]. Cao B., Yoshida S., Iwamoto T., Pham H.T., "Development of impact small punch test for investigating energy absorption," *International Journal of Mechanical Science*, 208, 106675, 2021.
- [10]. Doan Y.T, Pham T.H., Le Q.K, Nguyen T.H.N, Nghiem V.V., "Experimental evaluation of fracture properties of aluminium alloy 1050-H14 by small punch test," *Strength, Fracture and Complexity*, 16, 61-72, 2023.
- [11]. Johnson G.R., Cook W.H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48, 1985.
- [12]. Torres J., Gordon A. P., "Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials," *Journal of Materials Science*, 56, 10707-10744, 2021.

AUTHORS INFORMATION

Pham Thi Hang, Nghiem Van Vinh

ThuyLoi University, Vietnam