

ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN KHẢ NĂNG BIẾN DẠNG HỢP KIM BT1-00 KHI THỰC HIỆN KẾT HỢP HAI KỸ THUẬT ÉP QUA KÊNH XOẮN VÀ KÊNH GẤP KHÚC TIẾT DIỆN KHÔNG ĐỐI

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE
DEFORMABILITY OF THE ALLOY BT-00 BY A COMBINATION OF THE TWIST
EXTRUSION AND EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

Tạ Đình Xuân¹, Nguyễn Trường An¹, Nguyễn Thanh Hải², Phạm Đình Hồng Thanh²,
Nguyễn Văn Cảnh³

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

³Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng sự kết hợp kỹ thuật ép qua kênh gấp khúc tiết diện không đối và ép qua kênh xoắn với mục tiêu nâng cao chất lượng phôi. Trên cơ sở mô phỏng số nhờ phần mềm QForm với các tham số đầu vào của góc xoắn β là 15° , 30° và 45° , sự thay đổi đối áp tại cửa ra, kết quả chỉ rõ sự đồng đều của cường độ biến dạng khi góc xoắn nhỏ, đồng thời, khi đối áp càng lớn thì khả năng biến dạng càng cao, tỉ số nén ứng suất nhận giá trị âm hoàn toàn khi đối áp $0,5\sigma_s$. Lực công nghệ có bước nhảy khi kết hợp hai quá trình, nếu có đối áp sẽ làm cho lực ép thay đổi đồng đều hơn và có xu hướng đi ngang. Kết quả khảo sát đối với vật liệu BT1-00 có ý nghĩa về khoa học và thực tiễn khi tính toán biến dạng cũng như thiết kế khuôn.

Từ khóa: Biến dạng dẻo mãnh liệt; Ép kênh gấp khúc tiết diện không đối; Ép qua kênh xoắn; Hợp kim Titan.

ABSTRACT

This paper presents the results of the simulation based on the combination of the equal channel angular pressing and twist extrusion to improve the quality of the workpiece. The finite element analysis by Qform Software was used to investigate the influence of the angle of the twist line slope on the channel β of 15° , 30° , 45° , and a back-pressure on the stress-strain state. The result indicates the uniformity when the small the angle of the twist line slope on the channel, and the back-pressure higher the ability to deform, the Stress triaxiality receives a negative value completely when the back-pressure is $0.5\sigma_s$. The technological force has a jump when combining two processes, however, the back-pressure makes the force change more evenly and tends to the sideway. The simulation results for BT1-00 alloy have science meaningful in deformation analysis and die design.

Keywords: SPD; ECAP; Twist extrusion; Titan alloy.

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu cấu trúc siêu nhỏ mịn ($\sim 1\mu\text{m}$) được tạo ra từ phương pháp biến dạng dẻo mãnh liệt (SPD – Severe Plastic Deformation) đang thu hút sự quan tâm của giới nghiên cứu bởi cơ tính tổng hợp tốt ở nhiệt độ thường, nhiệt độ cao cũng như thể hiện ứng xử ưu việt các đặc tính của vật liệu chức năng như tính chống mài mòn, hiệu ứng nhớ hình. Phương pháp SPD được hiểu là quá trình gia công biến dạng với mức độ biến dạng rất lớn đặt vào phôi dạng khối mà không làm thay đổi đáng kể kích thước tổng thể của phôi biến dạng, từ đó tạo ra được sản phẩm có tổ chức hạt nhỏ mịn và kích thước nanomet [1]. Trong phương pháp SPD có rất nhiều kỹ thuật khác nhau được đưa ra, được nghiên cứu trong những năm gần đây, như: Ép qua kênh gấp khúc tiết diện không đổi (ECAP), ép qua kênh xoắn (TE), xoắn dưới áp lực cao (HPT), rèn đa phương (MDF), đùn ép chu kỳ (CEC). Trong đó, phương pháp ECAP và TE được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng do có thể sử dụng thiết bị chuyển động tịnh tiến công nghiệp và kết cấu khuôn ép không quá phức tạp.

Những chi tiết máy quan trọng đòi hỏi sự đồng đều về tổ chức và cơ tính chế tạo từ phôi bằng phương pháp SPD có thể đáp ứng yêu cầu khắt khe này, tuy nhiên, phôi nhận được từ các phương pháp ECAP và TE thường có mức độ biến dạng không đồng nhất trên tiết diện ngang và bị giới hạn biến dạng tổng trong phôi trên một lần ép. Nhiều công trình công bố đã cải tiến các phương pháp này, hoặc là sự kết hợp giữa chúng để tạo ra sản phẩm có chất lượng cao hơn sau số lần ép ít nhất. R. Kocich [2-4], đã mô phỏng quá trình kết hợp ECAP và TE đối với nhôm sạch kỹ thuật với mức độ biến dạng cho một lần ép là 2,7 sau đó kết quả mô phỏng được kiểm nghiệm bằng khảo sát độ

cứng tế vi trên tiết diện ngang phôi ép. Kết quả cho thấy, khi kết hợp hai quá trình này thì nguy cơ dẫn đến sự nứt trong phôi giảm đồng thời cũng hạn chế được vùng cứng biến dạng dẫn đến sự tăng đồng đều biến dạng trên tiết diện phôi. Tương tự như sự kết hợp trên, Bisadi H. [5] sử dụng phần mềm ABAQUS/Explicit để khảo sát sự kết hợp ECAP và TE, sau đó so sánh với ECAP truyền thống đối với nhôm sạch kỹ thuật AA1050. Kết quả cũng được so sánh độ cứng tế vi trên tiết diện ngang và đưa đến kết luận quá trình kết hợp ECAP và TE cho sự đồng nhất biến dạng hơn so với phương pháp biến dạng truyền thống.

Theo hướng kết hợp khác, Mohamed I. A [6] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm DEFORM 3D để khảo sát đặc tính và sự đồng đều biến dạng cùng lực ép theo hành trình khi kết hợp ECAP với ép chảy, sau đó so sánh với quá trình ECAP cho hợp kim nhôm Al-1080. Số liệu phân tích dẫn đến kết luận rằng kết quả thực nghiệm phù hợp với mô phỏng và chỉ rõ độ đồng nhất trên tiết diện ngang phôi của ECAP cao hơn so với các kết hợp còn lại. Đối với mẫu có dạng đĩa sự kết hợp ECAP và xoắn dưới áp lực cao (HPT) là một sự lựa chọn hợp lý như trong công trình công bố của S. Sabbaghianrad [7], ở đó quá trình nén ECAP được thực hiện 4 lần và HPT thực hiện 20 lượt xoay. Theo đó, kết quả thực nghiệm nhận được cho độ cứng cao hơn, hạt mịn hơn nếu so sánh với phôi nhận được chỉ dùng kỹ thuật HPT.

Trong những công trình trên đã kết hợp các phương pháp với nhau để khảo sát đặc tính biến dạng và sự đồng nhất trên tiết diện ngang thông qua so sánh với độ cứng tế vi, tuy nhiên, việc khảo sát đồng thời các tham số như góc xoắn, đối áp và so sánh với quá trình ECAP, TE riêng rẽ đối với hợp kim Titan để đánh giá

trường ứng suất – biến dạng của phôi chưa được xem xét và đề cập đến. Trong bài báo này sẽ trình bày sự ảnh hưởng tổng hợp của các yếu tố đó đến mức độ đồng đều biến dạng, mức độ nén ứng suất và lực ép để chỉ ra tính khả thi của việc ứng dụng kết hợp quá trình ECAP và TE (gọi là TCAP). Do tính phức tạp của khuôn ép TCAP, nên việc sử dụng mô phỏng số dựa trên phần mềm phần tử hữu hạn QForm sẽ nhận được các số liệu tính toán mang tính định hướng có giá trị, nhằm tối ưu hóa quá trình biến dạng. Đồng thời, có thể nhận được hình ảnh trực quan trường ứng suất, biến dạng và lực ép để điều khiển quá trình công nghệ mang tính chủ động cao.

2. BÀI TOÁN MÔ PHỎNG ÉP KẾT HỢP KIM TITAN

Sử dụng mô phỏng số trong các nguyên công biến dạng tạo hình phức tạp mang lại nhiều lợi ích về mặt kỹ thuật và kinh tế, đặc biệt là quá trình biến dạng dẻo mãnh liệt như ECAP và TE, ngoài ra, khi khảo sát nhiều phương án khác nhau thì ứng dụng mô phỏng số tiết kiệm được về mặt thời gian trước khi thực nghiệm. Nhiều công trình đã sử dụng phương pháp số

để khảo sát đặc tính biến dạng của quá trình ECAP cũng như sự kết hợp giữa chúng và phương pháp khác. Abdrakhman Naizabekov [8] đã sử dụng Deform-3D mô phỏng sự kết hợp của ECAP và cán để khảo sát các tham số công nghệ chính đến trạng thái ứng suất biến dạng. Alateyah, A. I. [9] dùng mô phỏng số và thực nghiệm để khảo sát sự đồng nhất của tổ chức tế vi của Mg kỹ thuật. Các tác giả ở các công trình [10, 11] đã dùng mô phỏng số kết hợp với thực nghiệm cho quá trình ECAP với phôi tiết diện tròn và cho thấy sự phù hợp giữa mô phỏng và thực nghiệm. Trong bài báo này tập trung phân tích về sự đồng đều biến dạng cũng như trường ứng suất biến dạng của quá trình kết hợp ECAP và TE đối với vật liệu khó biến dạng dẻo nguội là hợp kim Titan, từ đó, cho những hiểu biết mang tính định hướng của quá trình biến dạng, tiết kiệm nguồn lực.

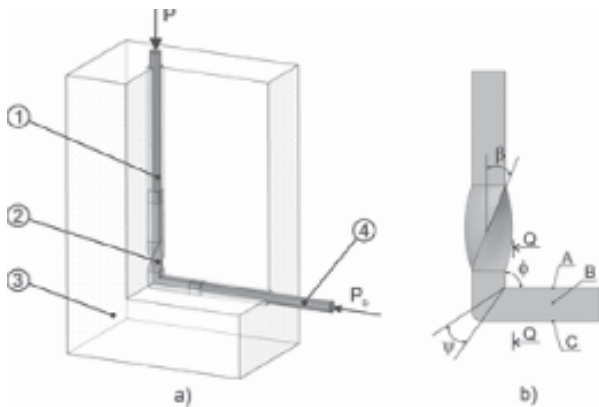
Trong nghiên cứu này, sử dụng phương pháp mô phỏng trên phần mềm chuyên dùng cho lĩnh vực phân tích quá trình biến dạng tạo hình QForm V10.2. Vật liệu dùng là BT1-00 theo tiêu chuẩn GOST 19807-91 là hợp kim Titan biến dạng có thành phần như bảng 1.

Bảng 1. Thành phần vật liệu BT-00 theo GOST 1980-91:

Nguyên tố	Si	Fe	O	H	N	C	Ti
% Khối lượng	0,08	0,15	0,1	0,008	0,04	0,05	Còn lại

Phôi dùng trong mô phỏng có tiết diện hình chữ nhật với kích thước 10 mm x 10 mm, chiều dài 100 mm được đặt trong hốc khuôn có kích thước lớn hơn 0,1 mm mỗi bên. Khuôn mô phỏng kết hợp được thể hiện trên hình 1, ở đó khuôn được cấu tạo bởi hai kênh vuông góc với nhau và có tiết diện không đổi, kênh thẳng đứng có vùng tiết diện xoắn quanh trục với góc xoắn β . Quá trình TE được diễn

ra trước với góc xoắn của kênh là β có giá trị lần lượt là 15° , 30° và 45° . Đối với quá trình ECAP, được thiết kế với góc giữa hai kênh $\phi = 90^\circ$ và góc lượn đảm bảo tối ưu cho sự đồng đều biến dạng $\psi = 20^\circ$ [1]. Quá trình ép kết hợp được thực hiện ở trạng thái nguội có nhiệt độ xác định tại 20°C để đảm bảo tính chất của quá trình biến dạng dẻo mãnh liệt là tạo tổ chức nhỏ mịn mà không có sự kết tinh lại.



Hình 1. Tham số phôi và khuôn TCAP

Đôi áp là một trong những thông số quan trọng giúp tạo trường ứng suất nén ba chiều nhằm tăng khả năng biến dạng cũng như giảm bớt lượng vát góc tại đầu phôi với mục tiêu tiết kiệm vật liệu. Đôi áp được khảo sát theo ứng suất chảy σ_s lần lượt là $p = 0,2\sigma_s$, $p = 0,5\sigma_s$ và $p = \sigma_s$ [12], sau đó lực đặt vào chày được tính toán dựa trên diện tích tiết diện ngang của chày với giá trị P_b được chỉ ra trên hình 1. Các quá trình được ký hiệu như sau: ECAP – Chỉ có quá trình ECAP; TCAPxy là quá trình kết hợp TE và ECAP với x nhận giá trị 1, 2, 3, tương ứng với góc β nhận giá trị 15° , 30° và 44° , còn giá trị y nhận giá trị 0, 1, 2, 3 tương ứng với không có đôi áp và đôi áp $0,2\sigma_s$, $0,5\sigma_s$ và σ_s . Cường độ biến dạng ϵ_i được lấy trên mặt cắt chính giữa dọc trục phôi và các điểm A, B, C như trên hình 1b, còn tỉ số nén ứng suất η được lấy trên mặt cắt Q-Q.

Các tham số khác được xác định dựa trên các kết quả đã công bố trước đó. Đối với ma sát trong quá trình ép nguội có hệ số nhỏ, trong điều kiện biến dạng nguội với trạng thái bề mặt không bị ảnh hưởng bởi nhiệt nên sự thay đổi hệ số ma sát không lớn, theo [1] hệ số ma sát không ảnh hưởng nhiều đến kết quả trường ứng suất biến dạng, vì vậy, trong mô phỏng này được lấy 0,12 phù hợp cho hợp kim Titan biến dạng nguội. Tốc độ ép cũng tương tự

như vậy, do đó, giá trị tốc độ chuyển động của chày được lấy là 10 mm/s, là giá trị tốc độ phổ biến đối với các máy ép thủy lực đang được sử dụng tại các cơ sở sản xuất.

Quá trình ép kết hợp được thực hiện ở trạng thái nguội có nhiệt độ xác định tại 20°C để đảm bảo tính chất của quá trình biến dạng dẻo mảnh liệt là tạo tổ chức nhỏ mịn mà không có sự kết tinh lại.

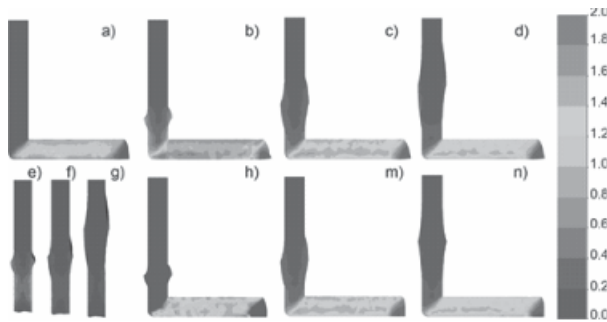
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Khảo sát đặc tính biến dạng và sự đồng đều trên tiết diện phôi được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, vì nó quyết định đến khả năng làm nhỏ hạt và sử dụng phôi sau biến dạng. Ở các công trình đã nói trên [2, 3, 5] đã chỉ ra khi kết hợp giữa ECAP với một số nguyên công khác sẽ cho sự đồng đều cao hơn so với nguyên công ECAP hay TE riêng rẽ. Trong bài báo này, trường ứng suất – biến dạng cùng sự đồng nhất của chúng được khảo sát khi quan tâm đến một số những yếu tố công nghệ khác mà các công trình trên chưa đề cập, ngoài ra, ép kết hợp quá trình ECAP và TE cho vật liệu khó biến dạng như Titan cũng chưa nhiều công trình công bố.

a) Trường cường độ biến dạng ϵ_i

Trên hình 2, thể hiện mặt cắt ngang chính giữa phôi đối với quá trình kết hợp ECAP và TE ở các góc xoắn cùng giá trị đôi áp khác nhau. Trên hình 2a, e, f, g là cường độ biến dạng chỉ riêng ECAP và TE riêng rẽ. Có thể thấy rằng, khi biến dạng ECAP thì khu vực giữa phôi có cường độ biến dạng lớn, trong khi đó, khu vực biên lại có cường độ biến dạng nhỏ hơn so với trường hợp giá trị lớn nhất cho ECAP là $\epsilon_i = 1,31$, ngược lại quá trình TE thì cường độ biến dạng khu vực tâm phôi thì nhỏ, còn vùng biên thì tăng dần và đạt giá trị lớn

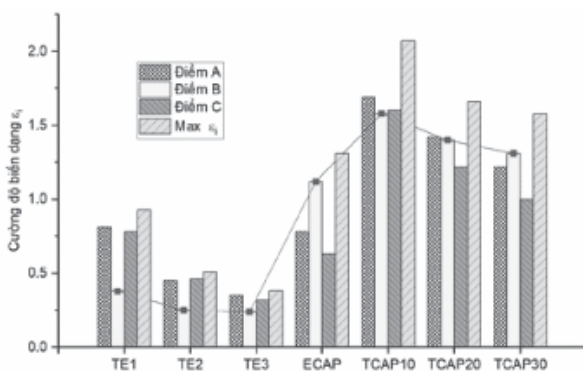
nhất khi góc $\beta = 15^\circ$ là $\epsilon_i = 0,79$. Từ hình ảnh cho thấy, khi kết hợp ECAP và TE sẽ cho ra phôi có sự biến dạng đồng đều trên tiết diện phôi như thể hiện trên hình 2b, c, d, h, m, n. Khi đó, giá trị cường độ biến dạng lớn nhất của phôi trên tiết diện này lần lượt là 2,07; 1,66 và 1,58 tương ứng với góc xoắn $\beta = 15^\circ, 30^\circ$ và 45° .



Hình 2. Trường cường độ biến dạng trên mặt cắt dọc chính giữa phôi:

a) ECAP; b) TCAP10; c) TCAP20; d) TCAP30; e) TE, $\beta = 45^\circ$; f) TE, $\beta = 30^\circ$; g) TE, $\beta = 15^\circ$; h) TCAP11; m) TCAP 21; n) TCAP31

Nhìn trên hình ảnh có thể thấy sự biến dạng đồng đều rõ ràng hơn so với từng quá trình riêng rẽ. Nhiệm vụ chính ở đây là tìm ra được góc xoắn của kênh sao cho mức độ biến dạng đồng nhất trên phôi đạt giá trị tối ưu. Do đó, độ sai khác giữa cường độ biến dạng tại tâm phôi và khu vực biên được đưa ra đánh giá như trên hình 3.

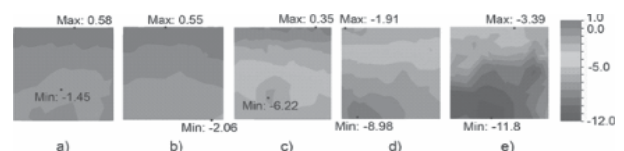


Hình 3. Sự khác nhau về cường độ biến dạng giữa tâm, ngoài biên của phôi và giá trị lớn nhất

Từ biểu đồ hình 3 cho thấy, đối với kỹ thuật ép xoắn thì khi góc xoắn $\beta = 15^\circ$, sự chênh lệch cường độ biến dạng giữa tâm phôi (điểm B) và mép biên (điểm A, C) đạt $\Delta\epsilon_i = 0,4$ và đối với giá trị cường độ biến dạng lớn nhất là 0,55. Giá trị này được thu hẹp dần khi tăng góc xoắn lên 30° và 45° lần lượt là 0,2 và 0,1 còn đối với giá trị lớn nhất là 0,26 và 0,14. Ngược lại với xu hướng trên, quá trình ECAP có cường độ biến dạng ở tâm phôi cao hơn so với mép ngoài của phôi là 0,34 (điểm A) và 0,49 (điểm C). Khi kết hợp hai quá trình với nhau cho thấy cường độ biến dạng đã đồng đều ở TCAP10, còn khi tăng góc xoắn thì có xu hướng biến dạng nhỏ hơn ở mặt dưới phôi (điểm C). Như vậy, có thể thấy sự kết hợp giữa góc xoắn $\beta = 15^\circ$ và góc kênh $\phi = 90^\circ$ cho cường độ biến dạng đồng đều hơn so với các quá trình còn lại.

b) Trường tỉ số nén ứng suất (Stress triaxiality - η)

Tỉ số nén ứng suất η , biểu hiện qua biểu thức $\eta = \sigma_{tb}/\sigma_i$, ở đây σ_{tb} là ứng suất trung bình, σ_i là cường độ ứng suất. Ý nghĩa biểu thức này, thể hiện qua giá trị khi đạt giá trị âm càng lớn thì vật liệu trong trạng thái có khả năng biến dạng dẻo tốt, đặc biệt đối với các hợp kim khó biến dạng như hợp kim Titan thì giá trị η cần có giá trị âm lớn để tránh hiện tượng nứt khi gia công. Trong bài báo này có sự so sánh của tỉ số nén ứng suất của các chế độ ép khác nhau có tính đến đối áp. Trên hình 4 cho thấy tỉ số nén ứng suất tại mặt cắt ngang phôi tại cửa ra của quá trình ECAP với sự so sánh khi không có TE và khi kết hợp TE và ECAP với các giá trị đối áp khác nhau.

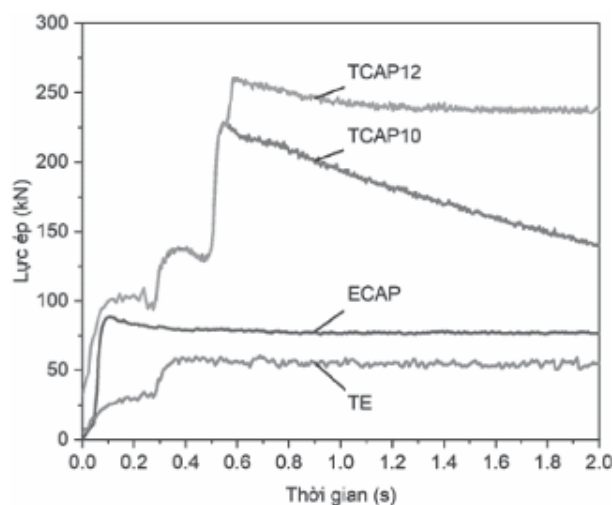


Hình 4. Tỉ số nén ứng suất trên mặt cắt ngang tại kênh ra

Hình 4a là quá trình ECAP mà không có TE và đối áp cho thấy η có giá trị lớn nhất mang dấu dương là 0,58, trong khi giá trị nhỏ nhất âm ở mức -1.45. Điều này thể hiện trạng thái ứng suất chưa thật sự tốt cho quá trình biến dạng nếu thực hiện ép nhiều lần vật liệu khó biến dạng. Khi có kết hợp TE trước đó thì giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của η đã giảm xuống, mặc dù vậy nó vẫn có giá trị chưa hoàn toàn mang dấu âm, chỉ đến khi đối áp đặt vào là $0,5\sigma_s$ thì toàn bộ trên tiết diện mặt cắt ngang của phôi có η đạt giá trị âm. Các khảo sát tiếp theo của góc xoắn 30° và 45° của quá trình TE không cho thấy sự khác nhau của tỉ số nén ứng suất.

c) Lực ép

Lực ép là yếu tố quan trọng liên quan khả năng thành công của quá trình ép do nó ảnh hưởng đến độ bền chảy và cốt. Thông thường áp lực riêng trong quá trình ECAP có giá trị rất lớn, dẫn đến dễ dàng phá hủy khuôn [13, 14]. Trên hình 5, thể hiện đồ thị lực ép quá trình TE, ECAP và TCAP, trong đó quá trình TCAP ở hai điều kiện là không có đối áp và đối áp bằng $0,5\sigma_s$. Ở quá trình TE và ECAP, khi lực ép ổn định ở mức lần lượt là 60kN và 80kN, tuy nhiên, khi kết hợp hai nguyên công này thì không đơn thuần là cộng hai giá trị đó lại mà chúng đạt giá trị lớn nhất 230kN. Đặc tính đồ thị lực có sự khác biệt với ba bước nhảy trước khi đạt giá trị cực đại, sau đó giảm dần. Tốc độ giảm dần của quá trình TCAP có đối áp nhỏ hơn so với khi không có đối áp và có xu hướng đi ngang. Khi dùng lực này để tính ứng suất phát sinh trong chảy thì nó nhận giá trị 600MPa, 800 MPa, 2300 MPa và 2600MPa lần lượt cho các nguyên công tương ứng TE, ECAP, TCAP10, TCAP12. Đây là những giá trị có ý nghĩa khi thiết kế khuôn cho quá trình kết hợp TE và ECAP.



Hình 4. Đồ thị lực ép theo thời gian

4. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phần mềm mô phỏng số QForm để nghiên cứu quá trình biến dạng khi kết hợp kỹ thuật ECAP và TE đồng thời so sánh đối với các quá trình riêng rẽ nhằm làm nổi bật nên ưu điểm của quá trình TCAP. Những nội dung cụ thể được thể hiện ở những điểm như sau:

1) Biến dạng không đồng nhất trên tiết diện ngang của phôi của quá trình TE và ECAP với xu hướng ngược nhau. Khi kết hợp hai quá trình này sẽ làm cho biến dạng đồng đều hơn, do đó sẽ đảm bảo tính chất phôi sau ép sẽ tốt hơn. Sự kết hợp góc xoắn nhỏ $\beta = 15^\circ$ và quá trình ECAP với $\phi = 90^\circ$ sẽ có sự chênh lệch biến dạng giữa tâm phôi và ngoại biên bé nhất.

2) Tỉ số nén của ứng suất η có ý nghĩa lớn vì nó cho biết khả năng biến dạng cao hay thấp. Đối với kim loại khó biến dạng như hợp kim Titan thì cần phải có η đạt giá trị âm càng lớn càng tốt, điều này có thể đạt được bằng kỹ thuật TCAP và đặt thêm đối áp cửa ra. Trong kết quả bài báo này cho thấy, với giá trị đối áp đạt $0,5\sigma_s$ thì η nhận được giá trị âm trên toàn tiết diện.



3) Đồ thị lực tác dụng lên chày cho thấy, quá trình TE và ECAP tương đối trơn đều, còn quá trình TCAP có bước nhảy có thể gây tác dụng không tốt lên dụng cụ. Giá trị lực có thể tăng gấp từ 3 ÷ 4 lần so với quá trình riêng lẻ. Những giá trị này có ý nghĩa thực tiễn khi chọn vật liệu và thiết kế khuôn nhằm đảm bảo quá trình ép thành công. ❖

Ngày nhận bài: **08/7/2022**

Ngày phản biện: **27/7/2022**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Valiev R.Z. and Langdon T.G., “Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement,” *Prog Mater Sci*, Vol. 51, No. 7 (2006), pp. 881–981.
- [2]. Kocich R., Kunická L., and Macháková A., “Twist Channel Multi-Angular Pressing (TCMAP) as a method for increasing the efficiency of SPD,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, Vol. 63, No. 1 (2014), pp. 44–65.
- [3]. Kocich R., Greger M., Kursá M., et al. (2010). “Twist channel angular pressing (TCAP) as a method for increasing the efficiency of SPD”. *Mater Sci Eng A*, Vol. 527, No. 23(2010), pp. 6386–6392.
- [4]. Kocich R., Kunčická L., Mihola M., et al. “Numerical and experimental analysis of twist channel angular pressing (TCAP) as a SPD process”. *Mater Sci Eng A*, Vol. 563 (2013), pp. 86–94.
- [5]. Bisadi H., Mohamadi M.R., Miyanaji H., et al. “A modification on ECAP process by incorporating twist channel”. *J Mater Eng Perform*, Vol. 22, No. 3(2013), pp. 875–881.
- [6]. Abd EL AAL M.I. “3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion”. *Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed)*, Vol. 27, No. 6 (2017), pp. 1338–1352.
- [7]. Sabbaghianrad S. and Langdon T.G. “A critical evaluation of the processing of an aluminum 7075 alloy using a combination of ECAP and HPT”. *Mater Sci Eng A*, Vol. 596 (2014), pp. 52–58.
- [8]. Naizabekov A., Lezhnev S., and Panin E. “Study of the influence of the main parameters of “rolling-ecap” process on the stress-strain state and the microstructure evolution using computer simulation”. *Procedia Manuf*, Vol. 37 (2019), pp. 459–466.
- [9]. Alateyah A.I., Ahmed M.M.Z., Alawad M.O., et al. “Effect of ECAP die angle on the strain homogeneity, microstructural evolution, crystallographic texture and mechanical properties of pure magnesium: numerical simulation and experimental approach”. *J Mater Res Technol*, Vol. 17 (2022), pp. 1491–1511.
- [10]. Priel E., Mittelman B., Trabelsi N., et al. “A computational investigation of Equal Channel Angular Pressing of molybdenum validated by experiments”. *J Mater Process Technol*, No. 264 (2018), pp. 469–485.
- [11]. Lee H.H., Kim W., Jung K.C., et al. (2018). “Circumferential twisting during route B equal-channel angular pressing”. *J Mater Process Technol*, Vol. 259 (December 2017), pp. 305–311.
- [12]. Rosochowski A., “Severe plastic deformation technology”, Whittles Publishing (2017).
- [13]. Djavanroodi F. and Ebrahimi M. “Effect of die parameters and material properties in ECAP with parallel channels”. *Mater Sci Eng A*, Vol. 527, No. 29–30 (2010), pp. 7593–7599.
- [14]. Vishnoi M., Senthil Murugan S., Veerendra Kumar A.N., et al. “Analysis of plastic deformation of A16063, Magnesium AZ91C and commercially used Titanium alloys using ECAP”. *Mater Today Proc*, Vol. 25 (2019), pp. 710–718.