

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN KHẢ NĂNG BIẾN DẠNG CỦA HỢP KIM NHÔM ĐỘ BỀN CAO KHI ÉP CHẢY KẾT HỢP

STUDY ON INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON DEFORMATION ABILITY IN COMBINED EXTRUSION FROM HIGH-STRENGTH ALUMINIUM ALLOY

Nguyễn Mạnh Tiến^{1*},
Nguyễn Trường An¹, Đào Văn Lưu¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.001>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng biến dạng khi tạo phôi chi tiết dạng tròn xoay từ hợp kim nhôm độ bền cao bằng phương pháp ép chảy kết hợp. Phần mềm Deform 3D được sử dụng trong bài toán mô phỏng số. Các thông số công nghệ được nghiên cứu bao gồm tốc độ gia công (v), bán kính lượn cổ (r_c), hệ số ma sát (μ). Khả năng biến dạng được đánh giá thông qua hệ số điền đầy thể tích lòng khuôn η và lực ép chảy lớn nhất P_{cn} (Tấn). Các kết quả thu được cho phép phân tích và lựa chọn các khoảng thông số công nghệ hợp lý của quá trình công nghệ tạo hình, phục vụ chế tạo các chi tiết trong trang bị vũ khí, đạn và công nghiệp.

Từ khóa: Ép chảy kết hợp; mô phỏng số; thông số công nghệ; hợp kim nhôm AA7075.

ABSTRACT

This paper presents the results of a study on the influence of process parameters on the deformation ability for axial symmetry detail from high-strength aluminum alloy by the combined extrusion method. The Deform 3D software is used in numerical simulation. The process parameters studied include machining speed (v), die radius (r_c), and coefficient of friction (μ). The deformation ability is evaluated through the die filling factor η and the maximum forming force P_{cn} (Tons). The obtained results allow analysis and selection of reasonable process parameter ranges of the forming process, serving to manufacture details in defense and industry.

Keywords: Combined extrusion; numerical simulation; process parameters; aluminium alloy AA7075.

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: manhtiennguyen84@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

DANH MỤC DANH PHÁP/KÝ HIỆU

v : Tốc độ gia công (mm/s)

r_c : Bán kính lượn cổ (mm)

μ : Hệ số ma sát

η : Hệ số điền đầy lòng khuôn

η_{yc} : Hệ số điền đầy lòng khuôn yêu cầu

P_{cn} : Lực công nghệ (tấn)

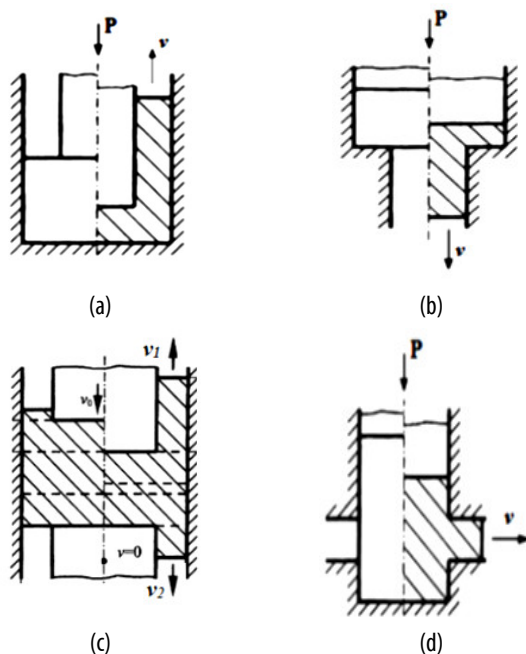
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ép chảy là một phương pháp biến dạng tạo hình vật liệu. Công nghệ này đảm bảo nâng cao cơ tính sản phẩm, giảm chi phí kim loại so với gia công cắt gọt [1]. Ngoài ra, quá trình ép chảy còn cho năng suất cao và có lợi thế là kinh tế so với các quy trình sản xuất khác. Công nghệ ép chảy được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực sản xuất để tạo phôi hoặc chi tiết có hình dạng khác nhau, nhất là các sản phẩm dạng đối xứng trục có tiết diện ngang đặc hoặc rỗng thay đổi đều đặn hoặc liên tục dọc chiều dài. Sản phẩm ép chảy được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp trọng điểm [2, 3]: công nghiệp chế tạo ô tô, hàng không vũ trụ, công nghiệp đóng tàu, công nghiệp quốc phòng...

Căn cứ vào nhiệt độ tạo hình, ép chảy được phân loại thành các dạng: ép chảy nguội, ép chảy nóng, ép chảy bán nóng [4, 5]. Căn cứ vào chiều chảy tương đối của vật liệu so với chiều của ngoại lực tác dụng, ép chảy được phân thành các dạng: ép chảy xuôi, ép chảy ngược, ép chảy kết hợp, ép chảy ngang (hình 1) [6].

Trong các phương pháp ép chảy, ép chảy xuôi và ép chảy ngược được ứng dụng rộng rãi để tạo phôi cho các quá trình gia công tiếp theo vì kết cấu khuôn và hình dạng bán sản phẩm đơn giản. Để tạo hình được các sản phẩm có hình dạng phức tạp hơn thì phương pháp ép chảy kết hợp và ép chảy ngang chiếm ưu thế. Tuy nhiên, việc ứng dụng các quá trình ép chảy phụ thuộc đáng kể vào tính công nghệ của kết cấu sản phẩm, đặc tính của vật liệu, trình tự các bước tạo hình, các thông số quá trình, độ bền và kết cấu của khuôn dập [7]. Đặc

biệt trong quá trình ép chảy kết hợp việc đảm bảo điều kiện điển đầy lòng khuôn tương đối khó khăn do quá trình chảy của kim loại lên trên (tương tự ép chảy ngược) và xuống dưới (tương tự ép chảy xuôi) khó kiểm soát. Việc kiểm soát sự điển đầy khuôn có thể được thực hiện bằng các biện pháp hạn chế sự chảy của vật liệu (tương tự quá trình dập trong khuôn kín), nhưng khi đó lực ép chảy sẽ tăng lên rất lớn, ảnh hưởng đến độ bền thiết bị và khuôn ép chảy [8].



Hình 1. Phân loại quá trình ép chảy [6]

a) ép chảy ngược; b) ép chảy xuôi; c) ép chảy kết hợp; d) ép chảy ngang

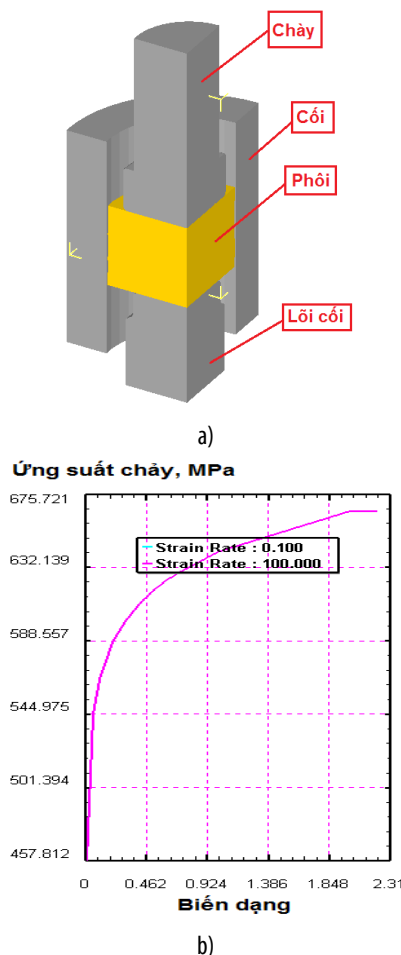
Hợp kim nhôm độ bền cao hệ Al - Zn - Mg - Cu được ứng dụng nhiều trong ngành hàng không vũ trụ và công nghiệp ô tô do các đặc tính nổi trội của chúng, với sự kết hợp giữa độ bền (tương đương một số loại thép [9]), khối lượng nhẹ và khả năng chống ăn mòn [10]. Hợp kim nhôm AA7075 là một trong những hợp kim được sử dụng nhiều trong các bộ phận của máy bay hiện đại nhất hiện nay Boeing 787 và các dòng xe ô tô hạng sang Audi R8 [11]. Bên cạnh đó, hợp kim này cũng được ứng dụng trong một số sản phẩm quốc phòng.

Vì vậy, bài báo ứng dụng mô phỏng số nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến quá trình biến dạng chi tiết dạng tròn xoay từ hợp kim nhôm độ bền cao bằng phương pháp ép chảy kết hợp. Các thông số công nghệ được nghiên cứu bao gồm tốc độ gia công (v), bán kính lượn cổ (r_c), hệ số ma sát (μ). Khả năng biến dạng được đánh giá thông qua hệ số điển đầy thể tích lòng khuôn (η) và lực ép chảy lớn nhất P_{cn} (tấn). Các kết quả thu được cho phép phân tích và lựa chọn các khoảng thông số công nghệ hợp lý của quá trình công nghệ tạo hình, phục vụ chế tạo các chi tiết trong trang bị vũ khí, đạn và công nghiệp.

2. XÂY DỰNG BÀI TOÁN MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH BIẾN DẠNG

Bài toán mô phỏng quá trình ép chảy kết hợp được thực hiện trên phần mềm mô phỏng Deform 3D. Mô hình hình

học bao gồm chày, cối, phôi và lõi cối được thể hiện trên hình 2a. Chày ép chảy kết hợp có đường kính phần ép là 48 mm, bán kính lượn chày là 1,5mm. Cối ép chảy kết hợp có đường kính trong là 61 mm. Lõi cối có đường kính lớn là 47mm và đường kính nhỏ là 41 mm. Mô hình vật liệu hợp kim nhôm AA7075 được lấy trong thư viện phần mềm Deform 3D (hình 2b).



Hình 2. Mô hình hình học (a) và mô hình vật liệu (b)

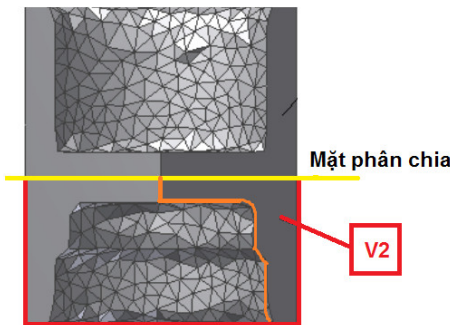
Quá trình ép chảy kết hợp hợp kim AA7075 được thực hiện trong trạng thái nguội. Trong bài toán mô phỏng số giả thiết hệ số ma sát tiếp xúc (μ) giữa phôi và các dụng cụ là không đổi. Trong quá trình biến dạng, chày ép dọc trục chuyển động với tốc độ không đổi (v). Phôi được chia lưới kích thước phần tử đủ nhỏ, đảm bảo các kết quả tính toán hội tụ. Với chi tiết nghiên cứu, số lượng khoảng 100.000 phần tử. Bài toán được thiết lập với điều kiện dùng mô phỏng khi chày ép chuyển được 20mm theo hướng chuyển động của nó.

Các bài toán mô phỏng số quá trình ép chảy kết hợp được thực hiện với các thông số công nghệ khác nhau. Tốc độ gia công (tốc độ thiết bị gia công) có giá trị lần lượt là 5mm/s, 15mm/s và 30mm/s (tương ứng với tốc độ dịch chuyển đầu trượt của một số máy ép thủy lực). Bán kính cối thay đổi với các giá trị lần lượt là 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm. Hệ số ma sát được lựa chọn tương đương với các

trường hợp không bôi trơn và bôi trơn với các chất bôi trơn khác nhau có giá trị lần lượt là 0,4; 0,3; 0,2; 0,1.

Kết quả các bài toán mô phỏng được phân tích bao gồm hệ số điền đầy thể tích lòng khuôn η và lực ép chảy lớn nhất P_{cn} (tấn). Hệ số điền đầy thể tích lòng khuôn được xác định theo công thức 1, trong đó V là thể tích toàn bộ bán sản phẩm sau ép chảy, V_2 là thể tích phần bán sản phẩm tính từ mặt phẳng trung tâm của đoạn màng ngăn lỗ xuống dưới (phần này vật liệu chảy xuôi xuống phía dưới cối) (hình 3).

$$\eta = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

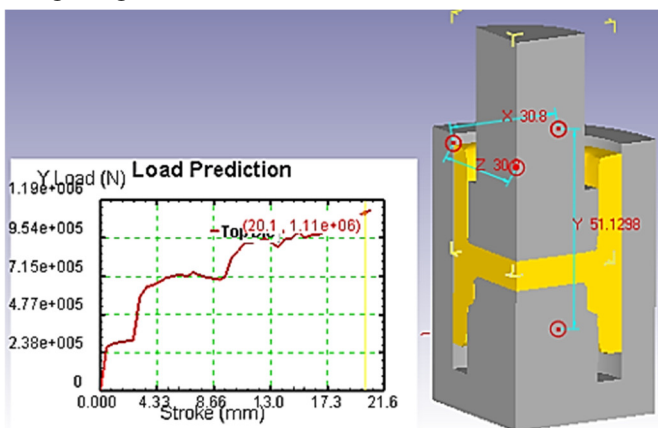


Hình 3. Vật dập sau khi ép chảy kết hợp

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ BÀN LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của tốc độ gia công đến khả năng biến dạng của vật liệu

Tốc độ gia công phụ thuộc vào đặc điểm của máy ép thủy lực. Trong các bài toán mô phỏng được thực hiện, tốc độ gia công được lựa chọn gồm ba giá trị tương đương với tốc độ chậm ($v = 5\text{mm/s}$), tốc độ trung bình ($v = 15\text{mm/s}$) và tốc độ nhanh ($v = 30\text{mm/s}$). Bán kính cối và hệ số ma sát có giá trị không đổi và có giá trị lần lượt là 3mm và 0,2. Biểu đồ lực dập của quá trình ép chảy kết hợp được thể hiện trên hình 4. Giá trị lực ép chảy lớn nhất P_{cn} (tấn), hệ số điền đầy lòng khuôn η được tính toán với các trường hợp và tổng hợp trong bảng 1 và hình 5.



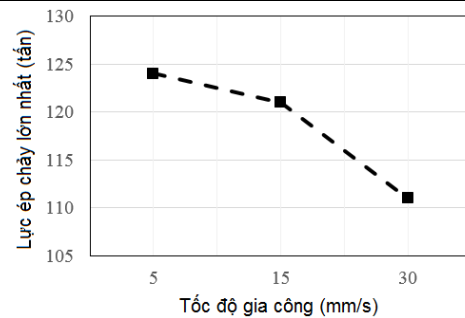
Hình 4. Biểu đồ lực ép chảy khi vận tốc gia công $v = 30\text{ mm/s}$

Từ kết quả thu được theo bảng 1 và hình 5, nhận thấy rằng khi tốc độ gia công tăng làm cho kim loại dễ chảy lên trên hơn [12]. Vì vậy, hệ số điền đầy lòng khuôn η giảm từ

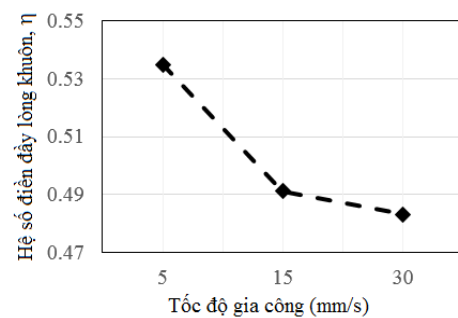
0,545 xuống còn 0,483 tương ứng với tốc độ gia công chậm và nhanh. Đối chiếu các giá trị thu được với hệ số điền đầy lòng khuôn yêu cầu của quá trình tạo phôi cho chi tiết đã lựa chọn (0,560) cho thấy khi ép chảy kết hợp với tốc độ chậm ($v = 5\text{mm/s}$) cho khả năng điền đầy lòng khuôn tốt nhất. Đối với giá trị lực ép chảy thì cũng có sự sai khác khi tạo hình với các tốc độ gia công khác nhau. Khi ép chảy với tốc độ gia công nhanh ($v = 30\text{mm/s}$) lực ép chảy đạt giá trị nhỏ nhất (111 tấn). Lực ép chảy trong trường hợp này đạt giá trị nhỏ nhất là do lúc này vật liệu chảy nhiều lên phía trên (phần vật liệu chảy theo nguyên lý ép chảy ngược), ở giai đoạn này lực ma sát xuất hiện ở phần thành bên giữa chày và phôi không thay đổi vì diện tích tiếp xúc không tăng [13].

Bảng 1. Kết quả mô phỏng quá trình ép chảy với các tốc độ gia công khác nhau

| TT | Vận tốc gia công v (mm/s) | Lực ép chảy max P_{cn} (tấn) | Hệ số điền đầy lòng khuôn η | Hệ số điền đầy lòng khuôn yêu cầu, η_{yc} |
|----|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|
| 1 | 5 | 124 | 0,545 | 0,560 |
| 2 | 15 | 121 | 0,491 | |
| 3 | 30 | 111 | 0,483 | |



a)



b)

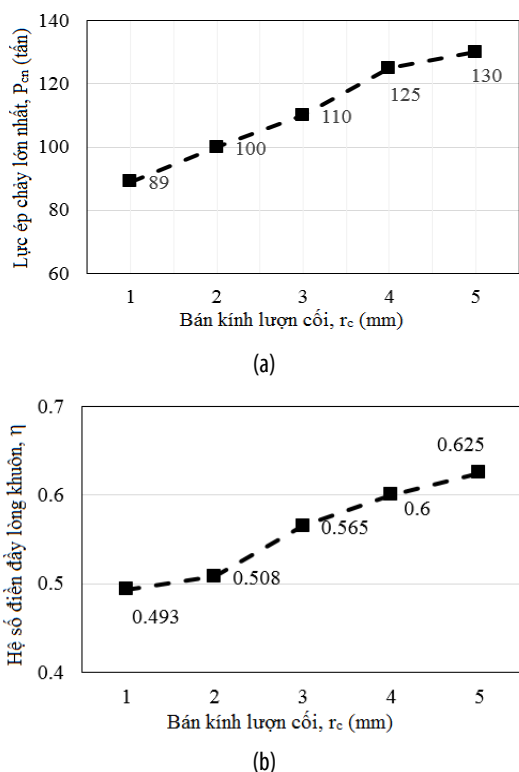
Hình 5. Đồ thị lực ép chảy lớn nhất (a) và hệ số điền đầy lòng khuôn (b) với các tốc độ gia công khác nhau

3.2. Ảnh hưởng của bán kính lượn cối đến khả năng biến dạng của vật liệu

Việc lựa chọn kích thước hình học dụng cụ (bán kính lượn cối ép chảy) có vai trò nhất định trong quá trình tạo hình sản phẩm. Việc lựa chọn bán kính lượn cối hợp lý giúp cho quá trình chảy của kim loại diễn ra thuận lợi, đảm bảo khả năng điền đầy lòng khuôn. Trong phạm vi vấn đề nghiên cứu ta sẽ lần lượt thay đổi bán kính lượn cối để đánh giá sự ảnh hưởng đến khả năng tạo hình khi ép chảy kết hợp. Các giá trị bán

kính lượn cối được xác định để nghiên cứu là 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm. Tốc độ gia công và hệ số ma sát có giá trị không đổi và có giá trị lần lượt là 5mm/s và 0,2. Với bán kính lượn cối quá lớn sẽ làm cho vật dập thiếu chính xác. Giá trị lực ép chảy lớn nhất P_{cn} , hệ số điền đầy lòng khuôn η được tính toán với các trường hợp bán kính lượn cối ép chảy khác nhau được tổng hợp và thể hiện trên hình 6.

Từ kết quả thu được theo hình 6b, nhận thấy rằng với bán kính lượn cối ép chảy càng tăng thì khả năng điền đầy lòng khuôn dưới càng tốt, vật liệu chảy xuống phía dưới (theo nguyên tắc ép chảy xuôi) càng nhiều. Chính vì vậy, hệ số điền đầy lòng khuôn tăng tương ứng khi bán kính lượn tăng từ 1mm đến 5mm. Với bán kính $r_c = 1$ mm, vật liệu khó chảy xuống phía dưới, hệ số điền đầy lòng khuôn thấp ($\eta = 0,493$) chưa đáp ứng được yêu cầu tạo hình vật liệu (vì $\eta_{yc} = 0,560$). Với các bán kính lớn hơn, hệ số η tăng lên, tuy vậy với r_c có giá trị lớn hơn 3mm ($r_c = 4$ mm và $r_c = 5$ mm) thì hệ số η quá lớn ($> 0,560$), có nghĩa là vật liệu chảy xuống phía dưới quá nhiều (V_2 quá lớn), điều này làm cho chiều cao của phần bán sản phẩm phía trên không đảm bảo. Với giá trị bán kính lượn $r_c = 3$ mm, hệ số điền đầy lòng khuôn thu được ($\eta = 0,565$) xấp xỉ hệ số điền đầy lòng khuôn yêu cầu, sản phẩm đạt được độ chính xác về hình dạng và kích thước hình học.

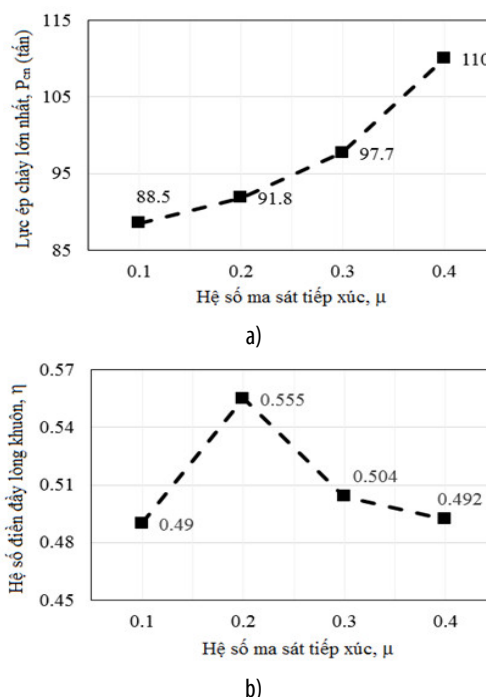


Hình 6. Đồ thị lực ép chảy lớn nhất (a) và hệ số điền đầy lòng khuôn (b) với các bán kính cối khác nhau

Bên cạnh đó lực ép chảy lớn nhất thu được (hình 6a) cũng phản ánh đúng quy luật, đó là với hệ số điền đầy lòng khuôn tăng thì lực ép chảy kết hợp sẽ tăng. Điều này được giải thích là khi vật liệu điền đầy lòng khuôn càng nhiều thì ma sát tiếp xúc giữa lòng cối và bán sản phẩm càng lớn, dẫn đến tăng lực công nghệ [13].

3.3. Ảnh hưởng của hệ số ma sát tiếp xúc đến khả năng biến dạng của vật liệu

Trong công nghệ ép chảy, ma sát tiếp xúc và chất bôi trơn có vai trò rất quan trọng, nó ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình biến dạng tạo hình kim loại [14]. Việc bôi trơn hợp lý góp phần định hướng chiều chảy của vật liệu theo ý muốn, tăng khả năng điền đầy lòng khuôn, giảm lực ép chảy. Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, xem xét đến việc sử dụng các hệ số ma sát khác nhau theo các điều kiện bôi trơn để khảo sát sự điền đầy lòng khuôn của vật liệu và lực ép. Thông thường với quá trình ép chảy nguội hợp kim nhôm hệ số ma sát tiếp xúc được xác định để nghiên cứu là 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 [15]. Tốc độ gia công và bán kính lượn cối có giá trị không đổi và có giá trị lần lượt là 5 mm/s và 3 mm. Giá trị lực ép chảy lớn nhất P_{cn} , hệ số điền đầy lòng khuôn η được tính toán với các trường hợp hệ số ma sát tiếp xúc khác nhau được tổng hợp và thể hiện trên hình 7.



Hình 7. Đồ thị lực ép chảy lớn nhất (a) và hệ số điền đầy lòng khuôn (b) với các hệ số ma sát tiếp xúc khác nhau

Từ kết quả thu được theo hình 7a, nhận thấy khi hệ số ma sát tiếp xúc giữa phôi và dụng cụ ép chảy càng giảm thì lực ép chảy cũng có xu hướng giảm tương ứng. Điều này được giải thích là khi hệ số ma sát nhỏ, lực ma sát tiếp xúc giảm, vật liệu sẽ dễ điền đầy lòng khuôn (tức là vật liệu chảy lên phía trên hoặc chảy xuống phía dưới đều thuận lợi hơn), vì thế dẫn đến giảm lực công nghệ [16].

Tuy nhiên, theo hình 7b, khi hệ số ma sát tăng từ 0,2 đến 0,4 thì hệ số điền đầy lòng khuôn η có xu hướng giảm (từ 0,555 xuống 0,492), do khi đó kim loại sẽ khó chảy xuống phía dưới do lực ma sát tiếp xúc cản trở sự chảy của dòng vật liệu (chảy lên phía trên sẽ thuận lợi hơn). Tuy nhiên, khi hệ số ma sát tiếp tục giảm xuống ($\mu = 0,1$) thì hệ số điền đầy lòng khuôn có xu hướng giảm ($\eta = 0,49$). Xây ra kết quả này là do với hệ

số ma sát quá nhỏ, sự chảy của vật liệu trôi lên phía trên diễn ra thuận lợi hơn nhiều so với sự chảy xuống phía dưới, vì vậy lòng khuôn dưới rất khó điền đầy, vật dập khó đảm bảo độ chính xác theo như thiết kế. Trong các trường hợp xem xét, với hệ số ma sát $\mu = 0,2$ hệ số điền đầy lòng khuôn xấp xỉ hệ số yếu cầu ($\eta_{yc} = 0,560$), quá trình ép chảy kết hợp được kiểm soát hiệu quả.

4. KẾT LUẬN

Các kết luận chính có thể được rút ra qua nghiên cứu:

1) Bài báo đã tiến hành nghiên cứu quá trình ép chảy kết hợp chi tiết dạng tròn xoay từ hợp kim nhôm độ bền cao (AA7075). Phân tích sự điền đầy lòng khuôn và lực ép chảy lớn nhất với các thông số công nghệ như tốc độ gia công, bán kính lượn cổ và hệ số ma sát tiếp xúc khác nhau được thực hiện bằng phần mềm mô phỏng biến dạng Deform 3D.

2) Trong các khoảng thông số công nghệ và dụng cụ được nghiên cứu, hệ số điền đầy lòng khuôn (η) đạt được có giá trị hợp lý (xấp xỉ hệ số điền đầy lòng khuôn yêu cầu $\eta_{yc} = 0,560$) với bộ thông số công nghệ bao gồm: tốc độ gia công $v = 5\text{mm/s}$, bán kính lượn cổ $r_c = 3\text{mm}$, hệ số ma sát tiếp xúc $\mu = 0,2$.

3) Các kết quả thu được qua các bài toán mô phỏng là cơ sở ban đầu và quan trọng để lựa chọn, xác định chế độ công nghệ ép chảy kết hợp, nhằm thu được sản phẩm đạt độ chính xác cao về hình dạng và kích thước.

4) Các nghiên cứu về tác động tương hỗ của các thông số công nghệ đến khả năng biến dạng của vật liệu khi ép chảy kết hợp và vấn đề tối ưu hóa sẽ được nghiên cứu trong các công trình tiếp theo trong thời gian tiếp theo.

[9]. George E. Totten and D. Scott MacKenzie, *Handbook of Aluminum. Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*. New York, 2003.

[10]. R.C. Dorward, T.R. Pritchett, "Advanced aluminium alloys for aircraft and aerospace applications," *Materials & Design*, 9, 63-69, 1998.

[11]. N. Eswara Prasad, Amol A. Gokhale, and R.J.H. Wanhill, *Aluminum-Lithium: Alloys Processing, Properties, and Applications*. Elsevier, UK, 2014.

[12]. H. Jafarzadeh, M. Zadshakoyan, and E. Abdi Sobbouhi, "Numerical Studies of Some Important Design Factors in Radial-Forward Extrusion Process," *Materials and Manufacturing Processes*, 25, 857-863, 2010.

[13]. Rahul Ranjan Yadav, Yogesh Dewang and Jitendra Raghuvanshi, "A study on metal extrusion process," *International Journal of LNCT*, 2, 124-130, 2018.

[14]. Tomasz Trzepieciński, and Hirpa G. Lemu, "Frictional Conditions of AA5251 Aluminium Alloy Sheets Using Drawbead Simulator Tests and Numerical Methods," *Journal of Mechanical Engineering*, 60, 51-60, 2014.

[15]. Chandan Mondal, A. K. Mukhopadhyay, T. Raghu, and K. S. Prasad, "Extrusion Processing of High-Strength Al Alloy 7055," *Materials and Manufacturing Processes*, 22, 424-428, 2007.

[16]. Dan Wang, He Yang, Heng Li, "Advance and trend of friction study in plastic forming," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24, 1263-1272, 2014.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Manh Tien, Nguyen Trung An, Dao Van Luu

Military Technical Academy, Vietnam

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. J. T. Black, Ronald A. Kohser, *Materials and Processes in Manufacturing*. John Wiley & Sons, United States of America, 398-440. 2012.

[2]. Avitzur B., "Metal forming," *Encyclopedia of Physical Science & Technology*, San Diego: Academic Press, 13, 80-109, 1987.

[3]. E.A. Starke Jr, J.T. Staley, "Application of modern aluminum alloys to aircraft," *Progress in Aerospace Sciences*, 32, 131-172, 1996.

[4]. Degarmo. E. Paul, Black. J. T, and Kohser Ronald. A., *Materials and Processes in Manufacturing*. Wiley, 2011.

[5]. G.W. Kuhlman, *Forging of Aluminum Alloys*. ASM Handbook, 14A, 2005.

[6]. Wojciech Z. Misiolek, Richard M. Kelly, and Werner Co., *Extrusion of Aluminum Alloys*. ASM Handbook, 14A, 522-527, 2005.

[7]. L. Aliieva, N. Hrudkina, I. Aliiev, I. Zhbankov, O. Markov, "Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 15-22, 2020.

[8]. Cheng Yang, Shengdun Zhao, "Research on Combined Hot Extrusion Forming Process of Alternator Poles," *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 1, 16-22, 2013.