

STUDY ON INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE WALL THICKNESS DISTRIBUTION IN TUBE NOSING FROM BIMETAL

Nguyen Manh Tien^{1*}, Nguyen Duc Thuan²

¹Le Quy Don Technical University, ²Z113 - General Department of Defense Industry

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 04/12/2023 Revised: 23/02/2024 Published: 23/02/2024	This paper presents the results of a numerical simulation study on the influence of process parameters on the deformation ability in the nosing process from a hollow cylindrical workpiece made of Bimetal F11. The Deform 2D software is used in numerical simulation. The process parameters studied include coefficient of friction (μ), die angle (α), and nosing ratio (K_T). The deformation ability is evaluated through the wall thickness difference Δs (mm) of the product. The response surface method (RSM) aims to determine the relationship between input parameters and the objective function. ANOVA analysis of variance shows that wall thickness difference decreases when increasing the friction coefficient, increasing the nosing ratio, or decreasing the die angle. The optimization algorithm determines the minimum wall thickness difference to be 0.05 mm at the coefficient of friction of 0.15, the die angle of 15°, and the nosing ratio of 0.8. The obtained results allow analysis and selection of reasonable process parameter ranges of the forming process, serving to manufacture details as case, bullet of infantry cartridges.
KEYWORDS Nosing process Numerical simulation Process parameters Simulation planning Bimetal	

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN SỰ PHÂN BỐ CHIỀU DÀY THÀNH CHI TIẾT KHI TÓP VẬT LIỆU BIMETAL

Nguyễn Mạnh Tiến^{1*}, Nguyễn Đức Thuận²

¹Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, ²Nhà máy Z113 - Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/12/2023 Ngày hoàn thiện: 23/02/2024 Ngày đăng: 23/02/2024	Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng biến dạng trong quá trình bóp từ phôi trụ rỗng chế tạo bằng vật liệu Bimetal F11. Phần mềm Deform 2D được sử dụng trong bài toán mô phỏng số. Các thông số công nghệ được nghiên cứu bao gồm hệ số ma sát (μ), góc côn của cối (α) và hệ số bóp (K_T). Khả năng biến dạng được đánh giá thông qua độ chênh lệch chiều dày thành Δs (mm) sản phẩm bóp. Phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) nhằm đánh giá mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và hàm mục tiêu. Phân tích phương sai ANOVA cho thấy độ chênh lệch chiều dày thành giảm khi tăng hệ số ma sát, tăng hệ số bóp hoặc giảm góc côn cối bóp. Thuật toán tối ưu hóa xác định độ chênh lệch chiều dày thành đạt nhỏ nhất là 0,05 mm khi $\mu = 0,15$, $\alpha = 15^\circ$ và $K_T = 0,8$. 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 vỏ liều, đầu đạn của đạn súng bộ binh.
TỪ KHÓA Tóp miệng Mô phỏng số Thông số công nghệ Quy hoạch mô phỏng Vật liệu Bimetal	

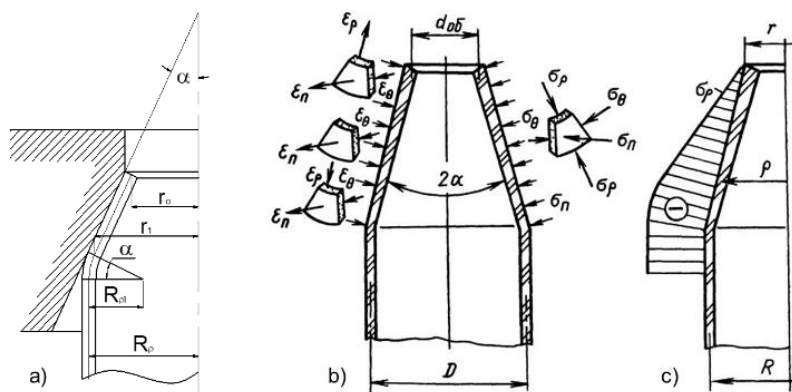
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9339>

* Corresponding author. Email: manhtiennguyen84@lqdtu.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Tóp miệng là nguyên công thu nhỏ tiết diện ngang của vật rỗng hoặc ống. Dụng cụ duy nhất để thực hiện nhiệm vụ biến dạng kim loại đó là cối tóp. Trong quá trình tóp, phôi được nén vào trong lòng cối có mặt công tác là hình côn hoặc cong với bán kính không đổi để thu nhỏ kích thước ngang của phôi. Một số chi tiết như đầu đạn, vỏ liều, âm đun nước, khung xe đạp, các thiết bị điện... thường được sản xuất bằng cách sử dụng nguyên công này [1] - [3].

Mô hình bài toán của quá trình tóp sử dụng để xác định sự thay đổi chiều dày phôi được trình bày trên Hình 1a [2]. Phôi hình trụ rỗng, chiều dày s_0 có bán kính trung bình R_p được tóp trong cối có góc côn 2α . Hệ số ma sát giữa mặt ngoài của phôi và thành cối là μ . Trạng thái ứng suất biến dạng của sản phẩm sau tóp được thể hiện trên Hình 1b và Hình 1c. Quan sát Hình 1b ta thấy, toàn bộ các phần tử tại ổ biến dạng trong quá trình tóp đều chịu ứng suất nén 3 chiều. Tuy nhiên, bề mặt bên trong của phôi không có tải trọng, còn thành phần ứng suất pháp σ_n (được truyền qua cối tóp tác dụng vào mặt ngoài của phôi) thì nhỏ hơn nhiều so với ứng suất chảy σ_s , đặc biệt là với những phôi có chiều dày thành mỏng. Do vậy có thể coi trạng thái ứng suất khi tóp là trạng thái ứng suất phẳng bao gồm 2 thành phần nén không đều nhau là σ_p và σ_θ . Ngoài ra biểu đồ phân bố ứng suất cho thấy càng về phía phần miệng thì ứng suất càng giảm, tại phần miệng ứng suất đạt giá trị nhỏ nhất bằng 0 (Hình 1c). Trạng thái biến dạng tại ổ biến dạng khi tóp cũng không đồng nhất nhau. Tại phần miệng có trạng thái biến dạng khối với 2 chiều kéo, 1 chiều nén; tại phần thân có trạng thái biến dạng phẳng trong khi trạng thái biến dạng ở phần cung chuyển tiếp là 2 chiều nén, 1 chiều kéo. Chính thành phần biến dạng kéo ε_n làm cho chiều dày thành sản phẩm sau khi tóp luôn có xu hướng bị dày lên. Thành phần biến dạng nén ε_θ nếu quá lớn sẽ gây ra sai hỏng sản phẩm khi tóp là bị nứt [4] - [6].



Hình 1. Mô hình quá trình tóp phôi trụ rỗng (a), sơ đồ trạng thái ứng suất - biến dạng khi tóp (b) và biểu đồ phân bố ứng suất tại ổ biến dạng (c) [4]

Qua phân tích, nhận thấy đặc điểm chung của các quá trình tạo hình bằng nguyên công tóp là thường gây ra biến dạng vật liệu, đặc biệt là ở phần miệng của sản phẩm (phần thu nhỏ đường kính nhiều nhất). Điều này ảnh hưởng đến kích thước hình học, dung tích lòng trong của ống hoặc sản phẩm bị nứt..., ngoài ra nếu một sản phẩm được biến dạng qua nhiều bước tóp thì việc bị biến dạng sau mỗi bước tóp sẽ ảnh hưởng không nhỏ đến các bước tóp tiếp theo. Chính vì vậy để thu được chiều dày bán sản phẩm như mong muốn sau mỗi bước tóp, cần nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số quá trình công nghệ như hệ số tóp, góc côn của cối tóp, ma sát tiếp xúc và bôi trơn,... đến sự phân bố chiều dày thành sản phẩm sau khi tóp [7] - [12]. Tuy nhiên, các công bố liên quan đến việc nghiên cứu ảnh hưởng tương hỗ của các thông số công nghệ và khuôn tóp đến khả năng biến dạng của phôi tóp còn hạn chế.

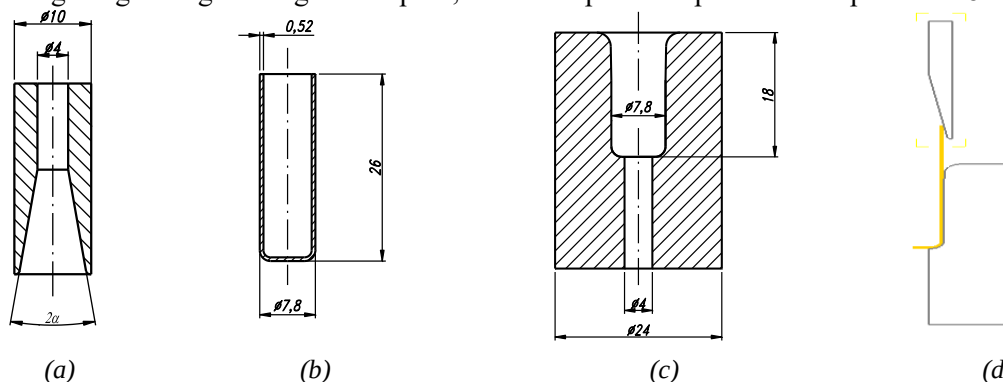
Bimetal là một loại vật liệu phổ biến đang được sử dụng rộng rãi để chế tạo vỏ liều và vỏ đầu đạn cho các loại đạn súng bộ binh với những ưu điểm nổi trội như: giá thành rẻ hơn rất nhiều so với hợp kim đồng mà vẫn đảm bảo độ bền ở nhiệt độ cao và áp suất cao, lớp đồng mỏng ở ngoài cùng giúp giảm lực cản tác dụng lên lòng nòng súng khi bắn, khả năng chống gỉ, mài mòn dưới tác dụng của môi trường bảo quản cao hơn so với vật liệu thép... [13] - [15]. Trong nước có rất ít công trình nghiên cứu về loại vật liệu và các phương pháp công nghệ sử dụng loại vật liệu này. Do vậy, việc nghiên cứu công nghệ tóe miệng nói riêng và các nguyên công dập nguội khác từ vật liệu Bimetal là một việc làm cần thiết, có ý nghĩa cao đối với nền công nghiệp quốc phòng.

Bài báo sử dụng mô phỏng số nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến quá trình biến dạng chi tiết dạng trụ rỗng từ vật liệu Bimetal bằng nguyên công tóe. Các thông số công nghệ được nghiên cứu bao gồm hệ số tóe ($K_T = d/D$), góc côn của cối (α), hệ số ma sát (μ). Khả năng biến dạng được đánh giá qua độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tóe Δs (mm). 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 dân dụng.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Xây dựng bài toán mô phỏng số quá trình biến dạng

Bài toán mô phỏng quá trình tóe được thực hiện trên phần mềm mô phỏng Deform 2D. Kết cấu khuôn bao gồm cối tóe, phôi và bạc ôm được thể hiện trên Hình 2. Cối tóe có đường kính ngoài là $\Phi 10$ mm, góc côn làm việc α , giá trị α được lấy bằng các giá trị 15° , 20° và 25° [2], [3]. Phôi sau dập vuốt có kích thước $\Phi 7,8$ mm x 26 mm, chiều dày thành 0,52 mm. Bạc ôm có đường kính trong bằng đường kính ngoài của phôi, chiều cao phần ôm phôi bán sản phẩm là 18 mm.



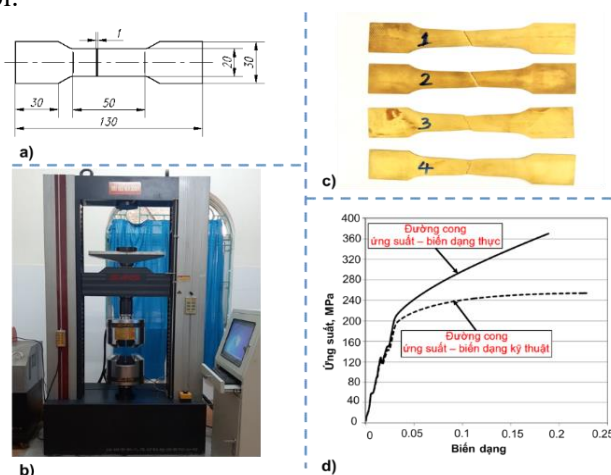
Hình 2. Kết cấu khuôn tóe gồm cối tóe (a), phôi (b), bạc ôm (c) và mô hình hình học (d)

Để xây dựng mô hình vật liệu của phôi, trước hết thực hiện thí nghiệm thử kéo để xác định đường cong ứng suất - biến dạng kỹ thuật [16]. Mẫu kéo được cắt ra từ bằng vật liệu Bimetal F11 và gia công chế tạo theo tiêu chuẩn TCVN 197-1:2014 (Hình 3a). Quá trình thử kéo được thực hiện trên máy thử kéo nén V1.0.250 ở nhà máy Z113/Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, tốc độ kéo của máy là 2 mm/phút (Hình 3b). Sau khi phá hủy mẫu kép (Hình 3c), máy tự động xuất ra đồ thị đường cong ứng suất - biến dạng kỹ thuật của mẫu kéo. Sau đó, xác định các giá trị ứng suất thực - biến dạng thực (Hình 3d) và tính toán các giá trị K (mức hoá bền biến dạng - MPa), n (hệ số biến cứng) trong mô hình dẻo biến cứng theo P.Ludviga $\sigma = K\epsilon^n$ [16]. Đối với vật liệu Bimetal, qua thí nghiệm thử kéo và tính toán, tác giả đã xác định được các hệ số $K = 510$, $n = 0,26$; từ đó xây dựng được mô hình vật liệu trong phần mềm Deform.

Trong bài toán mô phỏng số, giả thiết hệ số ma sát tiếp xúc (μ) giữa phôi và các dụng cụ là không đổi. Hệ số ma sát giữa cối tóe và phôi được lựa chọn tương đương với các trường hợp bôi trơn với các chất bôi trơn khác nhau có giá trị là 0,05, 0,1 và 0,15. Hệ số ma sát giữa bạc ôm và

phôi được lấy cố định là 0,12. Trong quá trình biến dạng, cối tóp chuyển động với tốc độ không đổi 10 mm/s. 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 phần tử lưới khoảng 2500 phần tử. Kích thước phần tử nhỏ hơn 0,1 mm. Bài toán được thiết lập với điều kiện dừng mô phỏng khi cối tóp dịch chuyển được hành trình H theo hướng chuyển động của nó. Giá trị của H được tính toán theo hệ số tóp K_T và góc côn α của cối tóp, trong đó K_T được lấy bằng 0,75; 0,775 và 0,8 tương ứng với vật liệu thép mềm có chiều dày thành từ 0,05 mm đến 1 mm và α được lấy từ 15° đến 25° để đảm bảo lực tóp tối ưu [2].

Kết quả các bài toán mô phỏng được phân tích là độ chênh lệch chiều dày thành Δs (mm). Độ chênh lệch chiều dày thành miệng sản phẩm tóp được xác định theo công thức $\Delta s = s_1 - s$, trong đó s_1 là chiều dày thành tại vị trí có chiều dày thành lớn nhất (miệng sản phẩm) và s là chiều dày thành ban đầu của phôi.



Hình 3. Mẫu thử kéo (a), thiết bị kéo (b), mẫu sau thử kéo (c) và đường cong tải trọng - lượng giãn dài (d)

2.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ đến độ chênh lệch chiều dày thành khi tóp bằng quy hoạch mô phỏng

Bài báo này nhằm mục đích tối ưu hóa các thông số công nghệ để giảm độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tóp. Các yếu tố được xem xét bao gồm hệ số ma sát (μ), góc côn cối tóp (α) và hệ số tóp (K_T), trong khi các hàm mục tiêu là độ chênh lệch chiều dày thành Δs (mm). Đầu tiên, tiến hành các “thí nghiệm mô phỏng” theo phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) để xem xét mối quan hệ giữa đầu ra và đầu vào. Sau đó, phân tích phương sai (ANOVA) được tiến hành để xác minh ý nghĩa phản hồi và ảnh hưởng của các tham số. Cuối cùng, một thuật toán tối ưu hóa được sử dụng để xác định bộ thông số công nghệ tối ưu [17], [18].

Theo Bảng 1, giới hạn của các yếu tố được biểu thị là -1, 0, +1 cho các giá trị thấp, trung bình và cao. Các yếu tố đầu vào được biểu thị là A cho hệ số ma sát, B cho góc côn cối tóp ($^\circ$) và C cho hệ số tóp.

Bảng 1. Mức và giá trị của các thông số công nghệ

Ký hiệu	Thông số công nghệ	Mức -1	Mức 0	Mức +1
μ	A: Hệ số ma sát	0,05	0,10	0,15
α	B: Góc côn cối tóp ($^\circ$)	15	20	25
K_T	C: Hệ số tóp	0,750	0,775	0,800

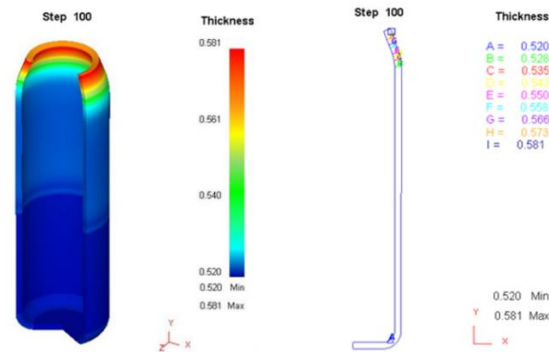
Trong quy hoạch Box-Behnken (BBD), cần có ba cấp độ cho mỗi thông số thiết kế, với tất cả các điểm thiết kế nằm trên cùng một hình cầu và có ít nhất ba hoặc năm điểm tại tâm. BBD được áp dụng thay vì các phương pháp quy hoạch trực giao để giảm số lượng thử nghiệm và đảm bảo độ chính xác của dự đoán. Mô hình toán học dự đoán sau đó được phát triển đối với các thông số

công nghệ sử dụng RSM. Sau đó, một phân tích phù hợp được thực hiện để điều tra tầm quan trọng của mô hình được đề xuất và yếu tố được chọn. Để giải quyết vấn đề tối ưu hóa, một kỹ thuật tiên tiến có tên hàm mong muốn (DF) được áp dụng để thu được các giá trị tối ưu. Ngoài các điểm thiết kế, một tập hợp các điểm ngẫu nhiên được kiểm tra để xem có giải pháp nào phù hợp hơn không. Sự ảnh hưởng của các tham số đến hàm mục tiêu sẽ giúp ích cho quá trình thiết kế công nghệ. Do đó, cách tiếp cận tích hợp kết hợp BBD, RSM và DF có thể được coi là một phương pháp thích hợp để tìm các tham số quá trình tối ưu hóa [17], [18].

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Phân tích mô hình hồi quy

Trong nghiên cứu này, ANOVA được sử dụng để xác định tính đầy đủ và ý nghĩa của các mô hình. Ngoài ra, nó được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của sự thiếu phù hợp đối với các mô hình và ý nghĩa của hệ số mô hình riêng lẻ. Có 17 “thí nghiệm mô phỏng” được thực hiện dựa trên thiết kế của phương pháp thử nghiệm như trong Bảng 2. Đối với mỗi “thí nghiệm mô phỏng”, sau khi thiết lập các thông số đầu vào, tiến hành chạy mô phỏng và khai thác giá trị sự phân bố chiều dày thành sau khi tóp (Hình 4). Từ đó, xác định các giá trị độ chênh lệch chiều dày thành miệng sản phẩm tóp của từng “thí nghiệm” đưa vào Bảng 2.



Hình 4. Kết quả mô phỏng của “Thí nghiệm mô phỏng”

Bảng 2. Kết quả quy hoạch mô phỏng

Số TN	Yếu tố 1	Yếu tố 2	Yếu tố 3	Kết quả
	A: Hệ số ma sát	B: Góc côn cối tóp (°)	C: Hệ số tóp	R: Độ chênh lệch chiều dày thành Δs (mm)
1	-1	-1	0	0,062
2	+1	-1	0	0,053
3	-1	+1	0	0,066
4	+1	+1	0	0,064
5	-1	0	-1	0,072
6	+1	0	-1	0,063
7	-1	0	+1	0,057
8	+1	0	+1	0,055
9	0	-1	-1	0,063
10	0	+1	-1	0,072
11	0	-1	+1	0,052
12	0	+1	+1	0,056
13	0	0	0	0,061
14	0	0	0	0,061
15	0	0	0	0,061
16	0	0	0	0,061
17	0	0	0	0,061

Kết quả ANOVA về độ chênh lệch chiều dày thành miếng sản phẩm tốp được trình bày trong Bảng 3. Các hệ số có ý nghĩa được chọn dựa trên giá trị p của các tham số được xem xét. Các tham số được mô hình hóa bằng cách sử dụng mức độ tin cậy 95%. Do đó, các yếu tố có giá trị p nhỏ hơn 0,05 được coi là có ý nghĩa. Quan sát Bảng 3, giá trị F là 156,79 cho thấy các mô hình hồi quy là có ý nghĩa. Trong mô hình độ chênh lệch chiều dày thành, tất cả các số hạng đơn (A - μ , B - α và C - K_T) và các số hạng tương tác (AB, BC, CA) được coi là các số hạng mô hình quan trọng. Các số hạng không quan trọng (B^2 và C^2) có giá trị p > 0,10, nên được loại bỏ trong không gian thiết kế để tiết kiệm thời gian tính toán. Ngoài ra, giá trị R^2 của độ chênh lệch chiều dày thành là 0,9951, cho thấy 99,51% tổng số biến thể được giải thích bởi mô hình. Hơn nữa, kết quả so sánh từ giá trị R^2 điều chỉnh và giá trị R^2 dự đoán bằng cách sử dụng ANOVA chỉ ra rằng đối với độ chênh lệch chiều dày thành, mô hình bậc nhất nên được sử dụng. Giá trị độ chính xác đầy đủ (Adeq. Precision) của mô hình là 44,180 lớn hơn 4 cho thấy mô hình đảm bảo độ tin cậy trong không gian thiết kế [18].

Bảng 3. Kết quả ANOVA cho mô hình độ chênh lệch chiều dày thành

Nguồn (Source)	Tổng bình phương (SS)	Bậc tự do (DF)	Phương sai (MS)	F	p	Độ tương thích (Significance)
Model	0,0005	9	0,0001	156,79	< 0,0001	Tương thích
A-A	0,0001	1	0,0001	169,40	< 0,0001	-
B-B	0,0001	1	0,0001	274,40	< 0,0001	-
C-C	0,0003	1	0,0003	875,00	< 0,0001	-
AB	0,0000	1	0,0000	34,30	0,0006	-
AC	0,0000	1	0,0000	34,30	0,0006	-
BC	6,250E-06	1	6,250E-06	17,50	0,0041	-
A ²	1,645E-06	1	1,645E-06	4,61	0,0690	-
B ²	5,921E-07	1	5,921E-07	1,66	0,2388	-
C ²	6,579E-08	1	6,579E-08	0,1842	0,6807	-
Phần dư	2,500E-06	7	3,571E-07	-	-	-
Độ thiếu phù hợp	2,500E-06	3	8,333E-07	-	-	-
Lỗi thuần túy	0,0000	4	0,0000	-	-	-
Tổng lượng sửa	0,0005	16	-	-	-	-
R²	0,9951	-	-	-	-	-
R² hiệu chỉnh	0,9887	-	-	-	-	-
R² dự đoán	0,9210	-	-	-	-	-
Độ chính xác đầy đủ	44,180					

Mô hình về mối quan hệ giữa độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tốp với các tham số đầu vào được xây dựng bằng cách sử dụng RSM. Từ các kết quả mô phỏng, các hệ số của phương trình hồi quy được tính toán. Hệ số hồi quy của các số hạng không đáng kể được loại bỏ dựa trên kết quả ANOVA. Mô hình đáp ứng bề mặt hồi quy cho thấy độ chênh lệch chiều dày thành Δs (mm) được biểu thị bằng phương trình (1).

$$\Delta s = 0,2139 - 1,280 \times A + 0,00775 \times B - 0,19 \times C + 0,007 \times A \times B + 1,4 \times A \times C - 0,001 \times B \times C \quad (1)$$

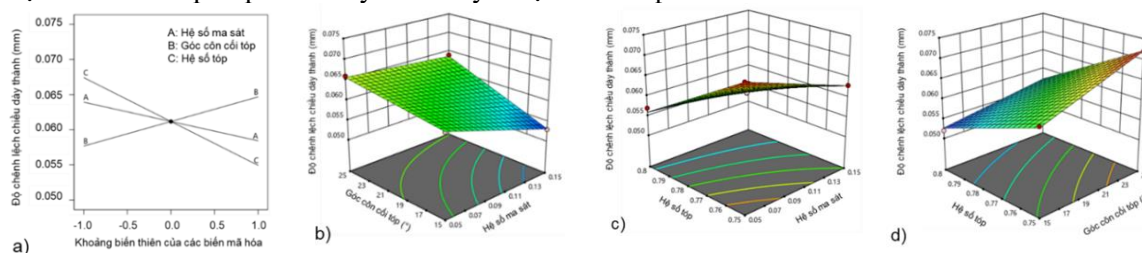
3.2. Phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến hàm hồi quy

Để so sánh mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến hàm mục tiêu Δs , sử dụng công thức (2) [19]. Trong đó: X_i^* là các đại lượng tham chiếu đặc trưng cho A, B, C dùng để so sánh mức độ ảnh hưởng đến hàm mục tiêu; $x_i^+ = 1$ và $x_i^- = -1$; còn y_i^+ và y_i^- là các giá trị của hàm hồi quy tương ứng với khi các tham số i ở mức +1 và -1.

$$X_i^* = \frac{1}{4} \left| \sum x_i^+ \hat{y}_i^+ + \sum x_i^- \hat{y}_i^- \right| \quad (2)$$

Căn cứ vào các số liệu trong Bảng 2, xác định được $A^* = 0,0055$, $B^* = 0,007$, $C^* = 0,0126$. Do $A^* < B^* < C^*$, vậy đối với mô hình độ chênh lệch chiều dày thành Δs thì trong các yếu tố công nghệ được xét, mức độ ảnh hưởng của hệ số ma sát μ là nhỏ nhất và mức độ ảnh hưởng của hệ số tóp K_T là lớn nhất đến hàm mục tiêu.

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ chênh lệch chiều dày thành Δs được thể hiện ở Hình 5. Từ Hình 5a, nhận thấy khi tăng hệ số ma sát hay tăng hệ số tóp thì độ chênh lệch chiều dày thành giảm, còn khi tăng góc côn của cối tóp thì độ chênh lệch chiều dày thành tăng. Việc xác định được ảnh hưởng của các thông số công nghệ và mức độ ảnh hưởng của chúng đến độ chênh lệch chiều dày thành Δs góp phần cho việc lựa chọn các thông số công nghệ hợp lý nhằm giảm thiểu sự biến dạng tại phần miệng của chi tiết dạng trụ rỗng sau tóp, đảm bảo cho việc thực hiện các bước tóp tiếp theo và yêu cầu kỹ thuật của sản phẩm.



Hình 5. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ chênh lệch chiều dày thành

3.3. Xác định bộ thông số công nghệ tối ưu và thực nghiệm kiểm chứng

Sau khi xây dựng mô hình hồi quy cho thấy mối quan hệ giữa các thông số công nghệ đến giá trị hàm mục tiêu, sử dụng các hàm hồi quy này để tối ưu hóa thông số công nghệ. Theo các kết quả phân tích ở trên, có thể kết luận rằng các thông số công nghệ như hệ số ma sát, góc côn cối tóp và hệ số tóp có ảnh hưởng đáng kể và phức tạp đến độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tóp. Vấn đề tối ưu hóa có thể được giải quyết bằng cách sử dụng phương pháp RSM. Sử dụng phần mềm Design Expert 12, cho ra kết quả độ chênh lệch chiều dày thành nhỏ nhất là 0,05 mm ứng với hệ số ma sát $\mu = 0,15$, góc côn cối tóp $\alpha = 15^\circ$ và hệ số tóp $K_T = 0,8$.

Thực hiện lại “thí nghiệm mô phỏng” với bộ thông số công nghệ tối ưu vừa xác định được để kiểm chứng, nhận được giá trị chiều dày thành lớn nhất $s_{\max} = 0,569$ mm tương ứng $\Delta s = 0,049$ mm. Như vậy, có thể thấy các kết quả tính toán của phần mềm Design Expert 12 và kết quả mô phỏng của phần mềm Deform 2D có độ tương thích với nhau.



Hình 6. Sản phẩm thực nghiệm sau bước tóp bước 1 từ phôi trụ

Để kiểm chứng kết quả mô phỏng, tiến hành tóp bước 1 từ phôi trụ với các thông số công nghệ tương ứng với các thông số tối ưu đã xác định được từ mô phỏng và quy hoạch thực nghiệm. Thiết bị tóp là máy ép trục khuỷu J21-63A. Sản phẩm sau tóp được cắt theo mặt cắt dọc trục đối xứng của sản phẩm tóp (Hình 6). Chiều dày của phần miệng côn của sản phẩm được đo trên máy trên thiết bị kính hiển vi vạn năng JENA (Đức) tại trung tâm đo lường, viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng. Kết quả thu được chiều dày thành lớn nhất $s_{\max} = 0,578$ mm. Kết quả này cho thấy sự tương đồng với kết quả mô phỏng số. Sai số đạt được nhỏ hơn 2% cho thấy sự tin cậy của các kết quả mô phỏng trên phần mềm Deform 2D.

4. Kết luận

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

1) Bài báo tiến hành nghiên cứu quá trình tót chi tiết dạng trụ rỗng chế tạo từ vật liệu Bimetal F11. Đánh giá sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ như hệ số ma sát (μ), góc côn cối tót (α) và hệ số tót (K_T) đến độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tót bằng cách sử dụng phần mềm mô phỏng biến dạng Deform 2D.

2) Bài báo đã thực hiện quy hoạch mô phỏng bằng phương pháp đáp ứng bề mặt RSM, và phân tích ANOVA. Kết quả chỉ ra rằng các thông số công nghệ như hệ số ma sát, góc côn cối tót và hệ số tót ảnh hưởng đáng kể đến độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tót. Mô hình hàm hồi quy được xác định, mô hình đối với độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tót là mô hình bậc nhất.

3) Độ chênh lệch chiều dày thành sản phẩm tót giảm khi tăng hệ số ma sát, tăng hệ số tót hoặc giảm góc côn cối tót. Độ chênh lệch chiều dày thành đạt nhỏ nhất là 0,05 mm khi $\mu = 0,15$, $\alpha = 15^\circ$ và $K_T = 0,8$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] L. Chu, L. Shi, Y. Bi, and D. Bi, "Finite element simulation of the nosing process of metal tubes with a conical die," *Materials Science Forum*, vol. 704-705, pp. 1444-1450, 2012.
- [2] L. Chu, Q. Wang, Y. Bi, and D. Bi, "A study on mathematical model of deformation force for tube nosing with conical die," *Materials Science Forum*, vol. 704-705, pp. 1429-1436, 2012.
- [3] C. T. Kwan, C. H. Fang, C. J. Chiu, and S. W. Chen, "An analysis of the nosing process of metal tubes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, pp. 190-196, 2004.
- [4] M. Al-Kaladi, M. Ali, and M. M. Mubarak, "Theoretical and finite element investigation for nosing brass tubes at room temperatures," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 10, pp. 2085-2094, 2019.
- [5] K. Dai and Z. R. Wang, "Graphical description of shear stress in the drawing of a thin-wall tube with a conical die," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, pp. 174-178, 2000.
- [6] Y. H. Lu, "Study of preform and loading rate in the tube nosing process by spherical die," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, pp. 2839-2858, 2005.
- [7] I. Hassab-Allah, "Forming limits in the nosing of metallic tubes through conical dies," *Journal of Engineering Science*, vol. 33, pp. 509-525, 2005.
- [8] C. T. Kwan, "An analysis of the eccentric nosing process of metal tubes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, pp. 530-534, 2003.
- [9] M.-C. Tang and S. Kobayashi, "An Investigation of the Shell Nosing Process by the Finite-Element Method. Part 1: Nosing at Room Temperature (Cold Nosing)," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 104, pp. 305-311, 1982.
- [10] M. Salih and A. R. Ismail, "Investigation Die Profile Effect on Nosing Process Using Finite Element Method," *Modern Applied Science*, vol. 5, pp. 212-222, 2011.
- [11] Y. R. Cho, "Clad metals: fabrication, properties, and applications," *Metals*, vol. 8, pp. 1-5, 2021.
- [12] W. Wei and Q. N. Shi, "Bonding mechanism of Cu/Steel clad sheet in asymmetrical rolling of bimetal," *Chinese Journal of Rare Metals*, vol. 25, pp. 307-311, 2001.
- [13] D. Münster and G. Hirt, "Copper clad steel strips produced by a modified twin-roll casting process," *Metals*, vol. 9, pp. 1-19, 2019.
- [14] S. J. Hu, Z. Marciniak, and J. L. Duncan, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002, pp. 1-29.
- [15] M. T. Nguyen, T. A. Nguyen, D. H. Tran, and V. T. Le, "Optimization of superplastic forming process of AA7075 alloy for the best wall thickness distribution," *Advances in Technology Innovation*, vol. 6, pp. 251-261, 2021.
- [16] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response surface methodology process and product optimization using designed experiments*, 4th edition, Wiley series in probability and statistics, USA, 2016.
- [17] A. Dean and D. Voss, *Design and Analysis of Experiments*, Springer, New York, 1999, pp. 547-592.