

# SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG KÍCH THƯỚC HÌNH HỌC CỦA PHÔI DẠNG TẤM TRONG QUÁ TRÌNH DẬP VI MÔ ĐẾN CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ

ANALYSIS OF THE GEOMETRIC SIZE EFFECT OF SHEET BLANKS ON  
TECHNOLOGICAL PARAMETERS IN MICRO DEEP DRAWING USING  
FINITE ELEMENT SIMULATION

TS. Phạm Việt Hoàng\*, ThS. Nguyễn Thành Thắng, ThS. Nguyễn Đức Long,  
KS. Vương Hoàng Giang, KS. Nguyễn Trần Tùng Lâm  
Trường Đại học Trần Đại Nghĩa, Bộ Quốc phòng

\*Email: hoangsqktqs@gmail.com

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước hình học đến các thông số công nghệ trong quá trình dập vuốt vi mô bằng phương pháp mô phỏng số phần tử hữu hạn trên phần mềm QForm 10. Các mô hình hình học của phôi và bộ khuôn được xây dựng theo nguyên lý tương đồng hình học và phép biến đổi Affine, với hệ số tỷ lệ  $\lambda$  thay đổi từ 1 đến 0,125. Kết quả mô phỏng cho thấy lực dập lớn nhất giảm rõ rệt khi hệ số tỷ lệ giảm, thể hiện ảnh hưởng đáng kể của hiệu ứng kích thước trong dập vi mô. Sự phụ thuộc của lực dập vào tốc độ chày là không tuyến tính, với độ chênh lệch lực  $\Delta F$  khác nhau giữa các cấp kích thước. Phân tích trường nhiệt độ cho thấy tại tốc độ chày thấp, nhiệt độ của phôi hầu như không thay đổi, khi tốc độ chày và hệ số tỷ lệ tăng, nhiệt độ lớn nhất của phôi tăng đáng kể. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn và tối ưu hóa thông số công nghệ trong dập vuốt vi mô.

**Từ khóa:** Phép biến đổi Affine; Hệ số tỷ lệ  $\lambda$ ; Dập vuốt vi mô; QForm 10.

## ABSTRACT

This study investigates the influence of geometric size effects on key technological parameters in the micro deep drawing process using finite element simulation with QForm 10 software. The geometric models of the sheet blank and tooling were constructed based on geometric similarity and affine transformation, with the scaling factor  $\lambda$  varied from 1 to 0.125. The results show that the maximum drawing force decreases markedly with decreasing scaling factor, confirming the significant role of size effects in micro deep drawing. The relationship between drawing force and punch velocity is nonlinear, with different force variations observed across the investigated scales. Thermal analysis indicates that at low punch velocities the blank temperature remains nearly constant, whereas increasing punch velocity and scaling factor leads to a pronounced rise in the maximum blank temperature. These findings provide a scientific basis for the selection and optimization of technological parameters in microforming processes.

**Keywords:** Affine transformation; Scaling factor  $\lambda$ ; Micro Deep Drawing; QForm 10.

## 1. GIỚI THIỆU

Dập vi mô (micro-stamping/micro-forming) là một công nghệ tạo hình tiên tiến được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo các chi tiết có kích thước nhỏ và độ chính xác cao, đặc biệt trong các lĩnh vực vi cơ điện tử, thiết bị y sinh và linh kiện chính xác. Quá trình này thường được áp dụng cho các chi tiết có kích thước đặc trưng dưới 10 mm, trong đó hành vi biến dạng vật liệu có nhiều khác biệt so với dập vĩ mô truyền thống [1-3].

Khi kích thước hình học của phôi và bộ dụng cụ giảm xuống mức vi mô, các hiện tượng đặc thù, thường được gọi chung là hiệu ứng kích thước, trở nên chi phối quá trình tạo hình. Nhiều nghiên cứu cho thấy giới hạn chảy của vật liệu giảm khi kích thước phôi giảm, dẫn đến sự thay đổi đáng kể của lực dập và trạng thái biến dạng [4, 5]. Bên cạnh đó, tốc độ chảy có ảnh hưởng trực tiếp đến biến dạng, điều kiện ma sát và thời gian của quá trình dập, đặc biệt trong dập vuốt vi mô [6].

Ngoài ra, các nghiên cứu về tribology trong dập vi mô đã chỉ ra rằng hệ số ma sát hiệu dụng phụ thuộc mạnh vào kích thước hình học của dụng cụ, cụ thể là giảm khi đường kính chày tăng trong khoảng từ 1 đến 5 mm [7-9]. Những kết quả này cho thấy các quy luật thiết kế và kinh nghiệm áp dụng cho dập vĩ mô không còn phù hợp khi chuyển sang dập vi mô, đòi hỏi phải có các nghiên cứu chuyên sâu nhằm làm rõ bản chất của các hiệu ứng chi phối ở thang kích thước nhỏ.

Trong bối cảnh đó, mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn được xem là công cụ hiệu quả để nghiên cứu dập vi mô, cho phép phân tích chi tiết trạng thái ứng suất – biến dạng và các trường vật lý trong quá trình tạo hình. Tuy nhiên, để đánh giá chính xác ảnh

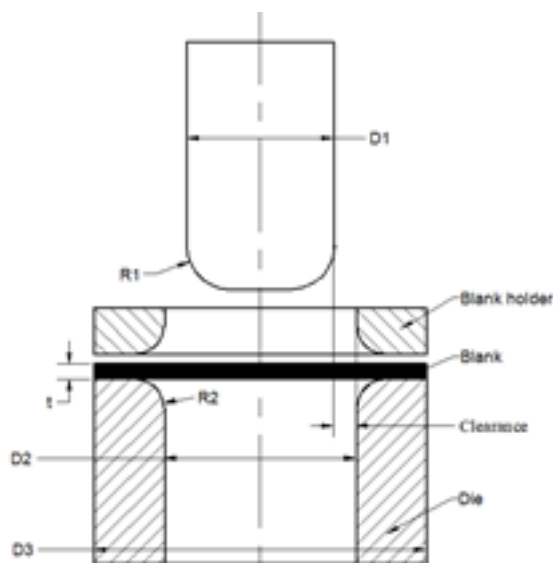
hưởng thuần túy của hiệu ứng kích thước, cần đảm bảo tính tương đồng hình học giữa các mô hình ở các cấp kích thước khác nhau. Xuất phát từ yêu cầu này, nghiên cứu hiện tại tập trung phân tích ảnh hưởng của kích thước hình học của phôi dạng tấm và bộ dụng cụ đến các thông số công nghệ trong quá trình dập vuốt vi mô.

## 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu là đồng thau L80 có thành phần hóa học theo tiêu chuẩn GOST 15527-2004 bao gồm: Cu (79%-81%); Zn (18,7%-21%);  $Fe \leq 0,10\%$ ;  $Pb \leq 0,03\%$ ;  $P \leq 0,01\%$ ;  $Sb \leq 0,005\%$ ;  $Bi \leq 0,002\%$ ; Tạp chất khác  $\leq 0,30$ .

Một tập hợp các mô hình 3D của phôi và dụng cụ được xây dựng bằng phần mềm Autodesk Inventor (Hình 1). Phôi tròn ban đầu được cắt từ băng vật liệu, sau đó được kéo vào lòng khuôn để tạo thành chi tiết dạng cốc trong một hành trình chảy. Lực chặn phôi được điều chỉnh bằng cơ cấu lò xo nhằm ngăn ngừa hiện tượng nhả ở vùng vành.

Các phép biến đổi Affine (là phép biến đổi hình học bảo toàn tính tương đồng hình học) và tính tương đồng hình học được sử dụng để nghiên cứu hiệu ứng kích thước. Hệ số tỷ lệ (SF)  $\lambda$  trong nghiên cứu này nhận các giá trị từ 1 đến 0,125 với bội số 0,5, được sử dụng để giảm tỷ lệ các tham số hình học của phôi và bộ khuôn. Đối với phôi, chiều dày tương ứng ( $t$ ) thay đổi từ 0,8 mm đến 0,1 mm, cũng theo bội số 0,5. Khe hở giữa chày và khuôn bằng  $1,5t$ , bán kính bo chày bằng  $3t$ , bán kính bo khuôn bằng  $2t$ . Các kích thước chi tiết của các phiên bản dụng cụ được trình bày trong Bảng 1. Tốc độ chảy, hành trình chảy và lực chặn phôi được trình bày trong Bảng 2. Mô phỏng số được thực hiện bằng phương pháp QE trong phần mềm QForm 10.



Hình 1. Sơ đồ quá trình dập vuốt vi mô.

Bảng 1. Hệ số tỷ lệ và kích thước hình học của bộ khuôn (mm)

| $\lambda$                  | 1    | 0,5 | 0,25 | 0,125 |
|----------------------------|------|-----|------|-------|
| Đường kính chày ( $D_1$ )  | 8    | 4   | 2    | 1     |
| Đường kính khuôn ( $D_2$ ) | 10,4 | 5,2 | 2,6  | 1,3   |
| Đường kính phôi ( $D_3$ )  | 18   | 9   | 4,5  | 2,25  |
| Bán kính chày ( $R_1$ )    | 2,4  | 1,2 | 0,6  | 0,3   |
| Bán kính khuôn ( $R_2$ )   | 1,6  | 0,8 | 0,4  | 0,2   |
| Khe hở chày-khuôn (C)      | 1,2  | 0,6 | 0,3  | 0,15  |
| Chiều dày phôi (t)         | 0,8  | 0,4 | 0,2  | 0,1   |

Hệ số tỷ lệ  $\lambda$  được xác định theo công thức:

$$\lambda = \frac{D_{Ch}^T}{D_{Ch}^b} \quad (1)$$

Trong đó:

$D_{Ch}^T$ : Đường kính chày hiện tại;

$D_{Ch}^b$ : Đường kính chày cơ sở lấy bằng 8mm.

Bảng 2. Các thông số công nghệ của quá trình dập vuốt vi mô

| Hệ số, $\lambda$<br>[-] | Tốc độ chày, V<br>[mm/s] | Hành trình chày, h<br>[mm] | Lực chặn phôi, F<br>[kN] |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1                       | 0,2                      | 9                          | 2                        |
| 0,5                     | 0,1                      | 4,5                        | 1                        |
| 0,25                    | 0,05                     | 2,25                       | 0,5                      |
| 0,125                   | 0,025                    | 1,125                      | 0,25                     |

Sự thay đổi nhỏ của lực dập được xác định bằng hiệu số giữa lực dập tại  $\lambda = 1$  và  $V = 1$  mm/s (giá trị cơ sở) và lực dập của trường hợp tương tự đang xét, theo công thức:

$$\Delta F = F_i - F_j \quad (2)$$

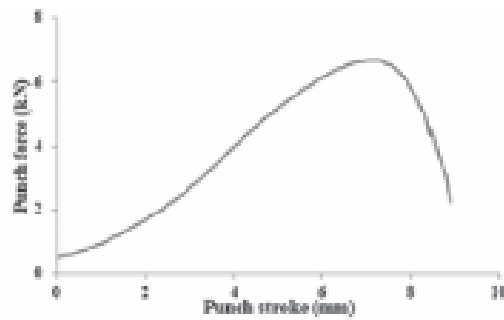
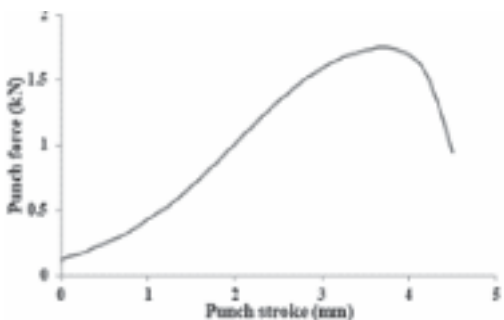
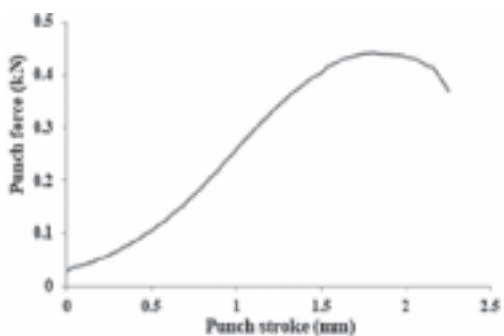
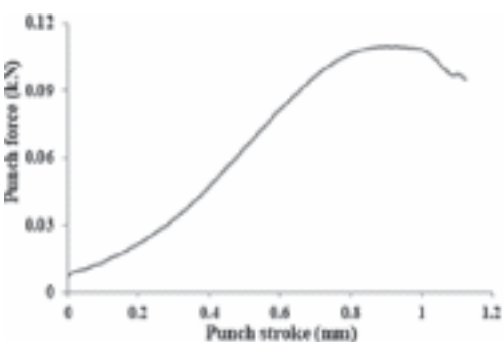
Trong đó:

$\Delta F$  – Chênh lệch lực dập lớn nhất;

$F_i, F_j$  – Lực dập tại các giá trị cơ sở của hệ số tỷ lệ và tốc độ chày.

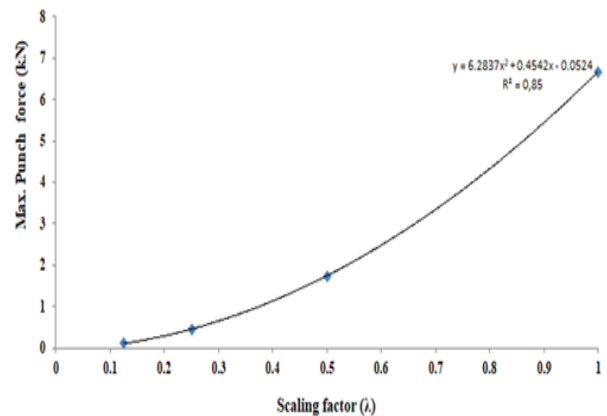
### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng cho thấy lực dập giảm khi hệ số tỷ lệ  $\lambda$  giảm từ 1 xuống 0,125 (Hình 2). Điều này được giải thích bởi việc giảm  $\lambda$  dẫn đến giảm tương ứng đường kính chày. Lực dập lớn nhất được định nghĩa là lực lớn nhất tác dụng lên phôi trong quá trình dập vuốt vi mô.


 a)  $\lambda = 1$ 

 b)  $\lambda = 0,5$ 

 c)  $\lambda = 0,25$ 

 d)  $\lambda = 0,125$ 

Hình 2. Đường cong lực dập trong mô phỏng dập vuốt vì mô

Dựa trên kết quả mô phỏng, giá trị lực dập lớn nhất ứng với từng hệ số tỷ lệ được xác định, từ đó xây dựng đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa lực dập lớn nhất và hệ số tỷ lệ (Hình 3).


 Hình 3. Quan hệ giữa lực dập lớn nhất và hệ số tỷ lệ  $\lambda$ 

Lực dập lớn nhất thay đổi không đáng kể đối với các giá trị  $\lambda$  khác nhau khi thay đổi tốc độ chày. Do đó, trong Hình 4 và Bảng 5, 6, các giá trị này cùng với chênh lệch  $\Delta F$  được trình bày so sánh với trường hợp cơ sở  $V = 0.1$  mm/s ( $N = 1$ ),  $V = 10$  mm/s ( $N = 2$ ) và  $V = 100$  mm/s ( $N = 3$ ).

Khi tốc độ chày tăng, giá trị lực lớn nhất giảm, điều này không phù hợp với hành vi lưu biến thông thường của các vật liệu kết cấu truyền thống, trong đó lực thường tăng khi tốc độ chày tăng. Giá trị  $\Delta F$  giảm khác nhau đối với các giá trị tốc độ khác nhau.

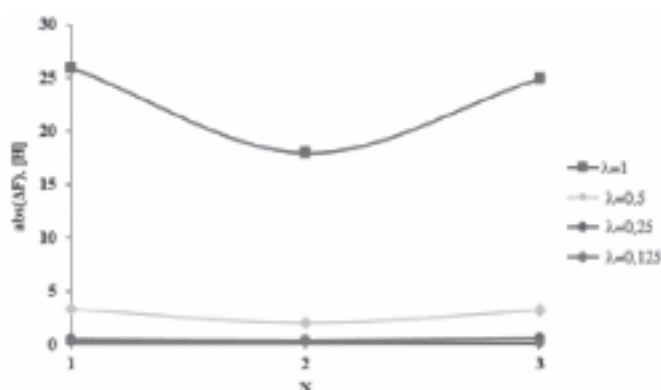


Bảng 5. Lực biến dạng cực đại và tốc độ chày

| Hệ số tỷ lệ, $\lambda$ [-] | 1      |        |        |        | 0,5    |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tốc độ chày, V [mm/s]      | 0,1    | 1      | 10     | 100    | 0,1    | 1      | 10     | 100    |
| Lực đập, F [kN]            | 6,671  | 6,645  | 6,627  | 6,620  | 1,7463 | 1,7430 | 1,7410 | 1,7398 |
| Hệ số tỷ lệ, $\lambda$ [-] | 0,25   |        |        |        | 0,125  |        |        |        |
| Tốc độ chày, V [mm/s]      | 0,1    | 1      | 10     | 100    | 0,1    | 1      | 10     | 100    |
| Lực đập, F [kN]            | 0,4374 | 0,4369 | 0,4365 | 0,4363 | 0,1095 | 0,1093 | 0,1095 | 0,1094 |

Bảng 6. Xác định độ chênh lệch của lực đập

| $\lambda$              | 1  |    |    | 0,5 |   |     | 0,25 |     |     | 0,125 |     |     |
|------------------------|----|----|----|-----|---|-----|------|-----|-----|-------|-----|-----|
| N                      | 1  | 2  | 3  | 1   | 2 | 3   | 1    | 2   | 3   | 1     | 2   | 3   |
| abs( $\Delta F$ ), [N] | 26 | 18 | 25 | 3,3 | 2 | 3,2 | 0,5  | 0,4 | 0,6 | 0,2   | 0,2 | 0,1 |

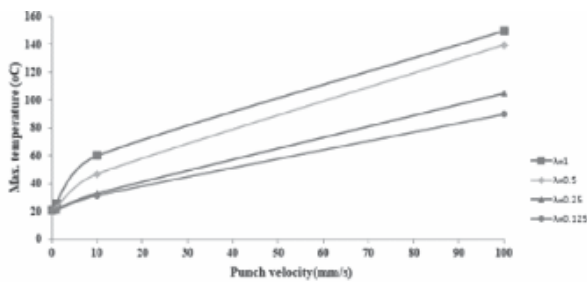


Hình 4. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của độ chênh lệch lực lớn nhất vào tốc độ chày

Bảng 7. Giá trị nhiệt độ phơi và tốc độ chày

| Hệ số tỷ lệ, $\lambda$ [-] | 1     |      |    |     | 0,5   |      |      |     |
|----------------------------|-------|------|----|-----|-------|------|------|-----|
| Tốc độ chày, V [mm/s]      | 0,1   | 1    | 10 | 100 | 0,1   | 1    | 10   | 100 |
| Nhiệt độ, [°C]             | 20,8  | 25,8 | 60 | 150 | 20,36 | 22,6 | 47   | 140 |
| Hệ số tỷ lệ, $\lambda$ [-] | 0,25  |      |    |     | 0,125 |      |      |     |
| Tốc độ chày, V [mm/s]      | 0,1   | 1    | 10 | 100 | 0,1   | 1    | 10   | 100 |
| Nhiệt độ, [°C]             | 20,23 | 21,3 | 33 | 105 | 20,08 | 20,8 | 31,5 | 90  |

Kết quả mô phỏng cho thấy tại tốc độ chày  $V = 0,1$  mm/s, nhiệt độ của chi tiết gần như không thay đổi, không phụ thuộc vào hệ số tỷ lệ (SF) và hệ số truyền nhiệt. Khi tăng tốc độ chày lên  $V = 100$  mm/s, nhiệt độ lớn nhất của phôi có đường kính 8 mm ( $\lambda = 1$ ) đạt khoảng  $150^{\circ}\text{C}$ . Trong khi đó, ở cùng tốc độ chày, nhiệt độ lớn nhất của chi tiết có đường kính 1 mm ( $\lambda = 0,125$ ) chỉ đạt khoảng  $90^{\circ}\text{C}$  (Hình 5).



Hình 5. Quan hệ giữa nhiệt độ lớn nhất của phôi và hệ số tỷ lệ  $\lambda$

#### 4. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng quá trình dập vuốt tạo chi tiết dạng cốc bằng đồng thau L80 cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của kích thước hình học ban đầu của phôi và bộ dụng cụ đến các thông số công nghệ của quá trình. Các quy luật chính được xác định như sau:

- Khi hệ số tỷ lệ giảm, lực dập tương ứng cũng giảm;
- Khi tốc độ chày tăng, lực dập lớn nhất có xu hướng tăng, tuy nhiên độ chênh lệch lực  $\Delta F$  không đồng đều đối với các giá trị tốc độ khác nhau;
- Ở tốc độ chày thấp ( $V = 0,1$  mm/s), nhiệt độ của quá trình dập hầu như không thay đổi trong suốt quá trình; khi tốc độ chày và hệ số tỷ lệ (SF) tăng, nhiệt độ của quá trình dập vì mô tăng lên rõ rệt. ❖

Ngày nhận bài: **16/3/2026**

Ngày phản biện: **30/3/2026**

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. A. Molotnikov, R. Lapovok, C.F. Gu, C.H.J. Davies, Y. Estrin, "Size effects in micro cup drawing". Materials Science and Engineering A, Vol. 550, 2012, pp. 312-319.
- [2]. Z. Jiang, J. Zhao, H. Xie, "Microforming technology theory, simulation and practice". Academic Press, 2017, p. 470.
- [3]. M.W. Fu, B. Yang, W.L. Chan, "Experimental and simulation studies of micro blanking and deep drawing compound process using copper sheet". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213(1), 2013, pp. 101-110.
- [4]. A. Messner, U. Engel, R. Kals, F. Vollertsen, "Size effect in the FE-simulation of microforming processes". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 45(1-4), 1994, pp. 371-376.
- [5]. W.L. Chan, M.W. Fu, J. Lu, J.G. Liu, "Modeling of grain size effect on micro deformation behavior in micro-forming of pure copper". Materials Science and Engineering A, Vol. 527(24-25), 2010, pp. 6638-6648.
- [6]. F. Vollertsen, Z. Hu, "Analysis of punch velocity dependent process window in micro deep drawing". Production Engineering, Vol. 4, 2010, pp. 553-559.
- [7]. F. Vollertsen, "Effects on the deep drawing diagram in micro forming". Production Engineering, 2012, Vol. 6, pp. 11-18.
- [8]. F. Vollertsen, Z. Hu, "Tribological Size Effects in Sheet Metal Forming Measured by a Strip Drawing Test". CIRP Annals, Vol. 55(1), 2006, pp. 291-294.
- [9]. U. Engel, R. Eckstein, "Microforming – from basic research to its realization". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, 2002, pp. 35-44.