



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA GÓC NGHIÊNG THÀNH LÒNG KHUÔN TỚI SỰ HÌNH THÀNH KHUYẾT TẬT TRONG QUÁ TRÌNH ÉP CHẢY MICRO BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

Phạm Việt Hoàng^{1*}, Phan Thanh Tùng¹, Phạm Văn Thuận²

¹Trường Đại học Cửu Long

²Trường Đại học Lê Quý Đôn

*Email: phamviethoang@mku.edu.vn

Ngày nhận bài: 06/07/2025; Ngày phản biện: 12/07/2025; Ngày duyệt bài: 15/12/2025

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu và đánh giá một cách có hệ thống ảnh hưởng của góc nghiêng thành lòng khuôn đến sự hình thành khuyết tật của chi tiết trong quá trình ép chảy micro. Quá trình này được phân tích và mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) thông qua phần mềm *Qform*, cho phép mô tả chi tiết trạng thái biến dạng, phân bố ứng suất – biến dạng và dòng chảy vật liệu trong suốt quá trình ép. Thông qua việc thay đổi các thông số hình học của dụng cụ, đặc biệt là góc nghiêng thành khuôn, nghiên cứu tập trung làm rõ cơ chế phát sinh các dạng khuyết tật đặc trưng trong ép chảy micro, từ đó đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng tham số đến chất lượng sản phẩm. Kết quả mô phỏng số được so sánh và đối chiếu với kết quả thực nghiệm nhằm kiểm chứng độ tin cậy của mô hình mô phỏng. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất phương án lựa chọn hình dạng dụng cụ tối ưu, góp phần giảm thiểu khuyết tật, nâng cao chất lượng chi tiết sau ép và tăng hiệu quả trong thiết kế, chế tạo dụng cụ cũng như sản xuất sản phẩm ép chảy micro trong thực tế.

Từ khóa: ép thuận nghịch, sự hình thành khuyết tật, FEM, CAE, *Qform*

ABSTRACT

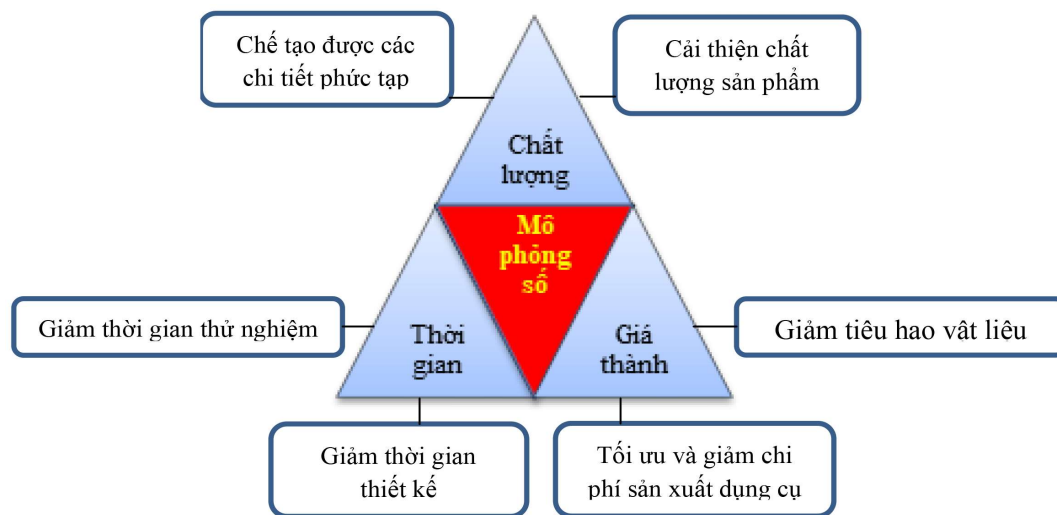
This paper presents a systematic study and evaluation of the influence of the die wall inclination angle on defect formation in micro-extrusion processes. The investigation is carried out using the finite element method (FEM) implemented in *Qform* software, enabling detailed analysis of material flow behavior, stress–strain distribution, and deformation characteristics during the extrusion process. By varying the geometric parameters of the tooling, with particular emphasis on the die wall inclination, the study clarifies the mechanisms leading to typical defects in micro-extrusion. The influence of tool geometry on material transformation is analyzed through numerical simulations, and the obtained results are compared with experimental data to validate the reliability of the simulation model. Based on the combined numerical and experimental analyses, optimal tool geometry parameters are proposed to minimize defect formation and improve product quality. The results provide practical guidance for tool design and process optimization in micro-extrusion manufacturing, contributing to improved efficiency and reliability of high-quality micro-formed products.

Keywords: Forward–backward extrusion, defect formation, finite element method (FEM), computer-aided engineering (CAE), *Qform*

1. Giới thiệu.

Xu hướng thu nhỏ sản phẩm và tích hợp đa chức năng đã dẫn đến việc giảm đáng kể kích thước các loại linh kiện trong thập kỷ qua. Kiến thức và dụng cụ để phân tích hành vi biến dạng kim loại ở quy mô thông thường đã được phát triển tốt và được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực tạo hình kim loại. Tuy nhiên khi các kích thước hình học được giảm từ cấp độ vĩ mô xuống cấp độ vi mô, các mô hình lý thuyết và kinh nghiệm được tích lũy trở nên không thể áp dụng được cho các quy trình vi mô do ảnh hưởng của hiệu ứng tỷ lệ. Ngoài ra việc thiết kế và sản xuất các công cụ làm việc ở kích thước micro phải đối mặt với nhiều thách thức liên quan đến đặc tính kích thước của chúng [1,2]. Việc phát triển và thiết kế các công cụ kích thước micro thường dựa trên kinh nghiệm và bí quyết thu được thông qua thử nghiệm và các sai sót [3]. Do đó, việc sử dụng phần mềm mô phỏng cho phép chúng ta tối ưu hóa quy trình nghiên cứu và thiết kế các công cụ ép micro, giảm thời gian và chi phí phát triển, đồng thời dự

đoán được các dạng khuyết tật có thể xảy ra trước khi bắt đầu quá trình sản xuất hàng loạt. Khác với mô phỏng vật lý, mô phỏng số được thực hiện bằng nhiều phương pháp tính khác nhau như: phương pháp phần tử hữu hạn, biến phân hoặc phần tử biên. Mỗi một phương pháp tính toán đều có những mặt mạnh riêng nhưng áp dụng phổ biến nhất trong việc khảo sát các bài toán cơ học nói chung và các bài toán biến dạng nói riêng là phương pháp phần tử hữu hạn bởi tính thích ứng với các bài toán có miền xác định bất kỳ và điều kiện biên phức tạp. Phương pháp mô phỏng số ứng dụng tính toán phần tử hữu hạn nhằm phân tích toàn bộ quá trình tạo hình được tiến hành trên máy tính (Hình 1). Trong bài nghiên cứu phần mềm được sử dụng là Qform. Qform là một phần mềm mô phỏng quá trình rèn dập và tạo hình kim loại, thường được sử dụng trong ngành cơ khí chế tạo và luyện kim. Nó giúp các kỹ sư thiết kế, tối ưu hóa và phân tích các quá trình rèn nóng, rèn nguội, dập kim loại và các phương pháp tạo hình khác [4, 5].



Hình 1. Ưu điểm của việc áp dụng mô phỏng số trong sản xuất dụng cụ

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Vật liệu phôi được sử dụng trong nghiên cứu là hợp kim đồng M1 với thành phần hóa

học được xác định (bảng 1) phù hợp theo tiêu chuẩn GOST 895-2001 và thành phần cơ tính được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hóa học của hợp kim đồng M1, % (GOST 859-2001)

Cu+Ag	Bi	Ni, Sb, As, Sn	Zn, S	Fe, Pb, O
99,9	≤0,001	≤0,002 mỗi chất	≤0,004 mỗi chất	≤ 0,005 mỗi chất

Bảng 2. Các thông số cơ bản của vật liệu phôi tại 20°C

Thông số cơ bản của vật liệu	Giá trị
Mật độ vật liệu, ρ [KG/m ³]	8 940
Giới hạn bền, σ_B [MPa]	260
Mô đun đàn hồi, E [MPa]	1,28
Hệ số Poisson, ν [-]	0,34

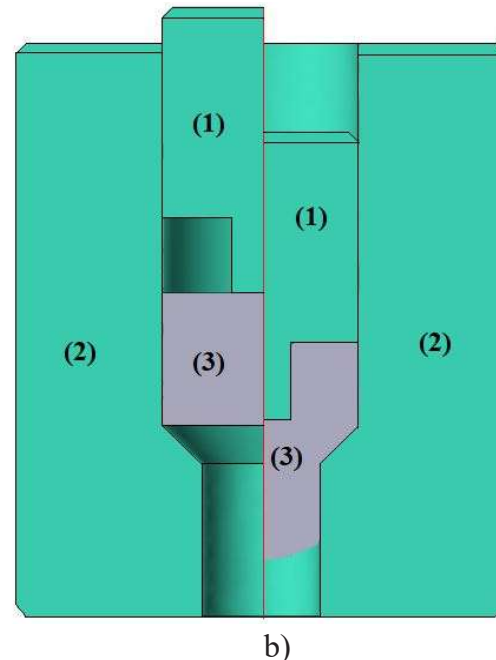
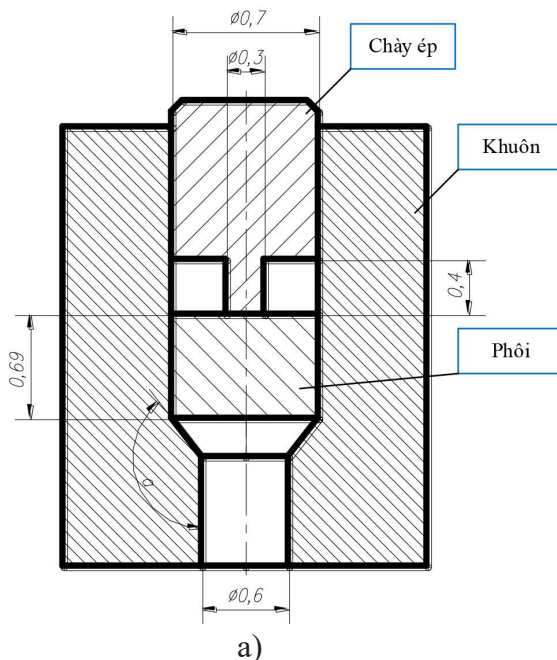
Thiết lập mô phỏng thử nghiệm

Trong nghiên cứu này, quá trình ép chảy

thuận, nghịch đã được thực hiện. Hình 2.a cho thấy sơ đồ hoạt động của quá trình ép chảy micro thuận, nghịch và kích thước của dụng cụ. Quá trình mô phỏng số được thực hiện bằng phần mềm Qform (hình 2b). Để đánh giá sự ảnh hưởng của góc nghiêng của thành khuôn tới sự hình thành khuyết tật của chi tiết, chúng ta sử dụng bốn giá trị của góc nghiêng α và quá trình mô phỏng thực hiện tại nhiệt độ phòng (20°C). Các thông số quá trình được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Thông số công nghệ của quá trình ép micro

Thông số công nghệ	Góc nghiêng (a)°	Hành trình của chày [mm]	Nhiệt độ [°C]	Hệ số Levanon [-]	Hệ số Pause [-]
Giá trị	125; 135;145;155	0.8	20	1,25	0,05



Hình 2. Quá trình ép micro: sơ đồ quá trình (a) và biên dạng đầu vào để mô phỏng trong chương trình Qform (b) (1- Chày ép; 2- Khuôn; 3- phôi)

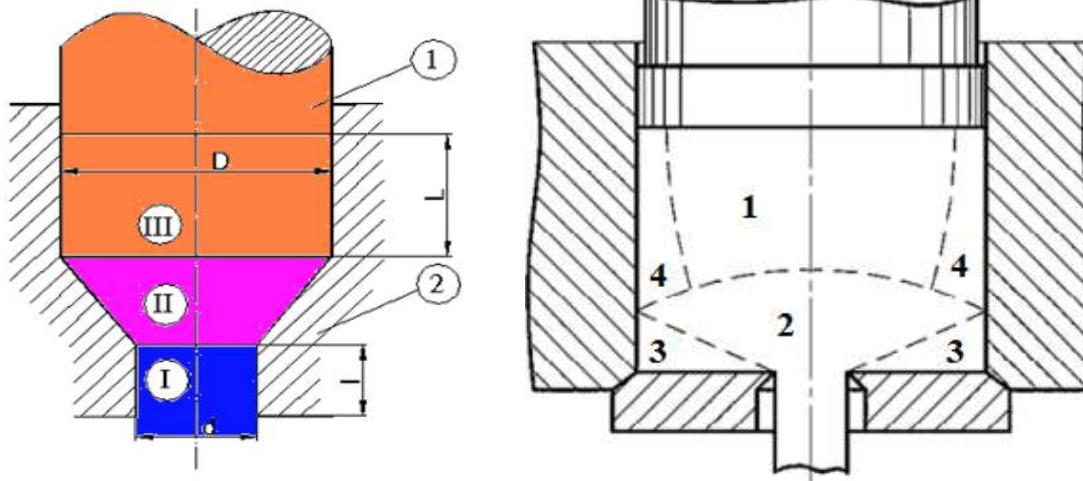
3. Kết quả và thảo luận

Quá trình ép chảy chi tiết chân tiếp điểm bao gồm 3 giai đoạn, được trình bày như trong hình 2.

- Giai đoạn 1: xảy ra từ đầu cho tới khi phôi phình ra chạm vào thành lòng khuôn. Giai đoạn này mang tính chất của nguyên công chôn nhiều hơn.

- Giai đoạn 2: bắt đầu từ khi chỗ phình tang trống của phôi chạm vào thành lòng khuôn cho đến khi cả lòng khuôn được điền đầy.

- Giai đoạn 3: bắt đầu từ khi lòng khuôn được điền đầy cho tới khi kim loại được ép chảy qua lỗ thoát đủ lượng cần thiết và kết thúc quá trình ép chảy.



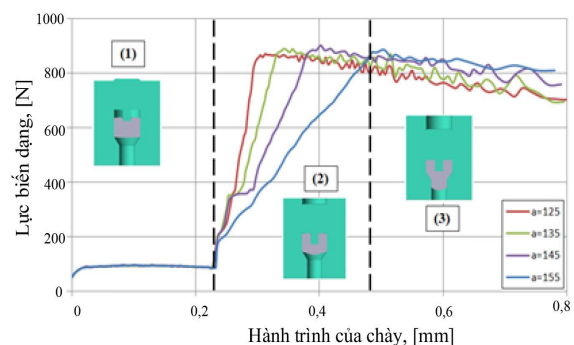
Hình 3. Các vùng phân bố biến dạng khi bị ép chảy

1- Vùng đàn hồi; 2- Vùng biến dạng dẻo; 3- Vùng “chết”; 4- Tiếp xúc với lớp biến dạng [6-8]

Quá trình ép thuận được đặc trưng bởi sự biến dạng không đồng đều đáng kể trên mặt cắt ngang. Sự phân bố biến dạng và dòng chảy động học của kim loại chỉ ra sự ảnh hưởng của các điều kiện của lực trong quá trình ép, độ bền và độ dẻo của phôi, điều kiện ma sát tiếp xúc, hình dạng của dụng cụ (hình dạng bộ phận làm việc của khuôn); mức độ và tốc độ biến dạng và các hệ số tỷ lệ. Nghiên cứu về bản chất của dòng chảy kim loại trong quá trình ép chỉ ra rằng toàn bộ thể tích biến dạng của phôi có thể được chia làm ba vùng: vùng biến dạng đàn hồi, vùng biến dạng dẻo (hoặc vùng biến dạng) và vùng ứ đọng hoặc vùng “chết”.

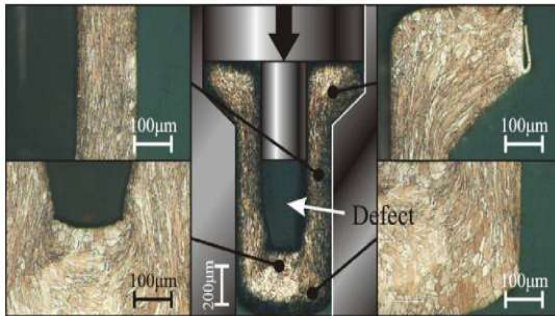
Từ kết quả thu được sau quá trình mô phỏng, đồ thị thể hiện mối liên hệ giữa lực biến dạng và hành trình di chuyển của chày đã được xây dựng (Hình 4). Kích thước phần thân trên và thân dưới của khuôn không thay đổi là $\varnothing 1$ và $\varnothing 0,69$. Sự khác biệt chỉ xảy ra tại phần côn ở giữa chuyển giao giữa hai kích thước đường kính khi góc nghiêng α được thay đổi từ 125° đến 155° . Từ sự thay đổi này dẫn tới sự thay đổi của hành vi biến dạng dẻo của kim loại thay đổi. Dựa trên nguyên lý định luật trở lực biến dạng lớn nhất trong lý thuyết biến dạng dẻo, khi góc nghiêng α của khuôn càng nhỏ thì vật liệu càng khó di

chuyển từ vùng côn (II) sang vùng trụ (III) và ngược lại. Điều này được chứng minh trên đồ thị hình 4. Khoảng cách đầu trượt chuyển từ giai đoạn 2 sang giai đoạn 3 đối với $\alpha=125^\circ$ là từ 0,23mm đến 0,3mm. Đối với $\alpha=135^\circ$ là từ 0,23mm đến 0,33mm. Đối với $\alpha=145^\circ$ là từ 0,23mm đến 0,4mm. Đối với $\alpha=155^\circ$ là từ 0,23mm đến 0,5mm. Khi góc nghiêng α của khuôn tăng lên dẫn đến khoảng cách di chuyển của chày từ giai đoạn 2 sang giai đoạn 3 cũng tăng lên. Cho ta thấy góc nghiêng α của khuôn có ảnh hưởng đến tốc độ biến dạng của vật liệu trong quá trình ép chảy. Cụ thể ở đây là khi góc nghiêng α của khuôn tăng lên thì tốc độ biến dạng của vật liệu sẽ giảm xuống

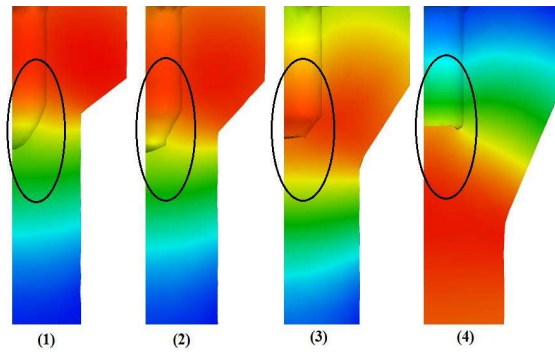


Hình 4. Đường cong lực biến dạng và hành trình của chày trong các quá trình ép micro khác nhau (1- Ép nghịch; 2- lấp đầy lòng khuôn; 3- ép thuận)

Trong kết quả nghiên cứu của W.L. Chan và M. W. Fu [9], các tác giả đã sử dụng góc nghiêng thành lòng khuôn $\alpha=135^\circ$. Với các điều kiện tương tự như quá trình mô phỏng, chi tiết thu được có một khuyết tật (một khoang rỗng) như trong hình 5. So sánh với kết quả mô phỏng thu được cũng cho kết quả tương tự, một khoang rỗng đã được hình thành trong quá trình dòng chảy của vật liệu di chuyển từ quá trình 2 sang quá trình 3.



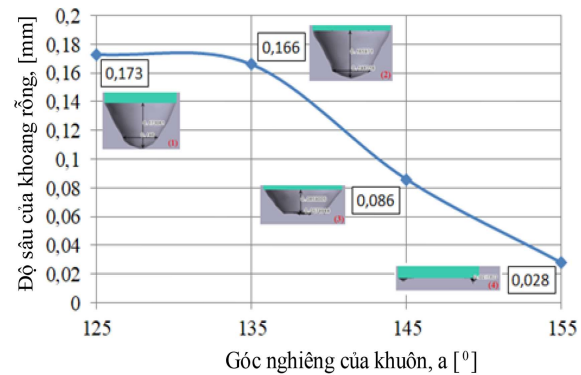
Hình 5. Cấu trúc vi mô của các bộ phận được tạo hình siêu nhỏ trong quá trình ép thanh kết hợp tiến-lùi [9]



Hình 6. Sự hình thành khuyết tật trong quá trình ép micro kết hợp tiến-lùi với các góc nghiêng khác nhau của lòng khuôn α (1)- $\alpha=125^\circ$; (2)- $\alpha=135^\circ$; (3)- $\alpha=145^\circ$; (4)- $\alpha=155^\circ$

Với các kích thước góc nghiêng α của khuôn khác nhau trong bảng 3, các thí nghiệm mô phỏng số đã được tiến hành. Các kết quả của chi tiết thu được sau quá trình mô phỏng được hiển thị trên hình 6. Dễ dàng nhận thấy khi kích thước góc nghiêng α của khuôn tăng dần thì khuyết tật (hình thành

khoang rỗng) cũng giảm dần. Độ sâu của các khoang rỗng đối với các trường hợp lần lượt là: Khi $\alpha=125^\circ$ là 0,173mm; Khi $\alpha=135^\circ$ là 0,166mm; Khi $\alpha=145^\circ$ là 0,086mm; Khi $\alpha=155^\circ$ là 0,028mm. Từ các kết quả thu được ta xây dựng đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của góc nghiêng α của khuôn tới sự hình thành khuyết tật (hình thành khoang rỗng) (hình 7). Đặc biệt với trường hợp $\alpha=155^\circ$ thì khoang rỗng rất nhỏ, gần như không đáng kể so với các trường hợp còn lại.



Hình 7. Ảnh hưởng góc nghiêng α của khuôn tới sự hình thành khuyết tật

4. Kết luận

Khi công nghệ kỹ thuật phát triển không ngừng, việc ứng dụng các công nghệ mô phỏng số trong quá trình nghiên cứu là điều cần thiết. So sánh các mô hình mô phỏng số với các mô hình thí nghiệm thực tế cho thấy không có sự khác biệt quá nhiều cho thấy độ tin cậy của các kết quả thu được sau quá trình mô phỏng số. Với kết quả đạt được chúng ta có thể đưa ra một số kết luận chính sau đây:

1. Bán kính góc nghiêng của khuôn làm cản trở sự di chuyển của dòng chảy vật liệu trong quá trình ép chảy, làm quá trình chuyển đổi từ giai đoạn 2 sang giai đoạn 3 kéo dài hơn.

2. Trong quá trình ép chảy góc nghiêng α của khuôn có ảnh hưởng tới sự hình thành khuyết tật (hình thành khoang rỗng) của chi tiết. Khi α càng lớn thì sự hình thành khuyết tật giảm.

3. Ứng dụng công nghệ mô phỏng số trong quá trình nghiên cứu giúp giảm thời gian, chi phí nghiên cứu và tối ưu chất lượng sản phẩm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Engel, U., & Eckstein, R. (2002). *Microforming – From basic research to its realization. Journal of Materials Processing Technology*, 125(1–3), 35–44 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00415-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00415-0)
- [2]. Egerer, E., & Engel, U. (2004). *Process characterization and material flow in microforming at elevated temperatures. Journal of Manufacturing Processes*, 6(1), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S15266125\(04\)70091-7](https://doi.org/10.1016/S15266125(04)70091-7)
- [3]. Chan, W. L., Fu, M. W., & others. (2009). *Simulation-enabled study of folding defect formation and avoidance in axisymmetrical flanged components. Journal of Materials Processing Technology*, 209(17), 5850–5859 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.06.004>
- [4]. QForm. (2018). *Моделирование процессов обработки металлов давлением*. Retrieved May 25, 2018, from <http://qform3d.ru/>
- [5]. Koloskov, S., et al. (2021). *Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm Extrusion. Solid State Phenomena*, 316, 288–294 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.288>
- [6]. Навроцкий, Г. А. (Ed.). (1973). *Холодная объемная штамповка: справочник*. Москва: Машиностроение
- [7]. Головин, В. А., Митькин, А. Н., & Резников, А. Г. (1970). *Технология холодной штамповки выдавливанием*. Москва: Машиностроение