

Nghiên cứu xác định góc nêm tối ưu trong gia công biến dạng dẻo bề mặt kim loại phẳng

Study on optimal wedge angle in surface plastic deformation of flat metal sheets

Nguyễn Văn Tứ, Cao Xuân Điệp

Trường Đại học Ngô Quyền

Tác giả liên hệ: Cao Xuân Điệp. Email liên hệ: cao.dieppt@gmail.com

Tóm tắt: Trong ngành công nghiệp sản xuất vật liệu, việc nghiên cứu phương pháp gia công vật liệu tối ưu luôn là một ưu tiên hàng đầu. Bằng phần mềm thiết kế 3D (SolidWorks 2019) và mô phỏng tính toán (ANSYS Workbench 19.2), một mô hình quá trình tăng độ cứng của chi tiết hình trụ bằng các công cụ dạng phẳng đã được xây dựng để tính toán và đánh giá trạng thái ứng suất – biến dạng (NDS) của phôi trong vùng biến dạng và ứng suất dư trong chi tiết sau gia công. Dựa trên phân tích kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn, đã xác định được giá trị hợp lý của góc phần hình nêm của tấm phẳng là 45° . Với góc này, ứng suất tạm thời lớn nhất trong quá trình tăng cứng nhỏ hơn giới hạn bền của vật liệu, nhờ đó đảm bảo quá trình tăng cứng không gây hư hỏng bề mặt phôi, đồng thời ứng suất dư được phân bố đều trên bề mặt.

Từ khóa: Gia công tăng bền; lớp bề mặt; trạng thái ứng suất – biến dạng; tấm hình chữ nhật; tấm hình nêm.

Abstract: In the material manufacturing industry, the study of optimal material processing methods is always a top priority. Using 3D design software (SolidWorks 2019) and computational simulation tools (ANSYS Workbench 19.2), a model of the surface hardening process for a cylindrical workpiece using flat tools was developed to calculate and evaluate the stress–strain state (SSS) of the workpiece in the deformation zone, as well as the residual stresses in the finished part. Based on the analysis of finite element simulation results, a reasonable value of the wedge angle of the flat tool was determined to be 45° . At this angle, the maximum transient stress during the hardening process is lower than the material's yield strength, thereby ensuring that the hardening does not cause surface damage to the workpiece, while also achieving a uniform distribution of residual stresses on the surface.

Keywords: *urface hardening; surface layer; stress–strain state; rectangular plate; wedge-shaped plate; surface plastic deformation.*

1. Mở đầu

Từ lâu, các quốc gia hàng đầu thế giới đã coi trọng việc phát triển ngành công nghiệp nặng, từ đó đặt nền móng cho việc phát triển các ngành sản xuất khác, điển hình là Liên Xô. Nhờ có ngành chế tạo máy, gia công và luyện kim tiên tiến và hiện đại, có chiều sâu

cao nên các loại sản phẩm kỹ thuật vật liệu của họ đáp ứng được tiêu chuẩn rất cao, đặc biệt là vũ khí và phương tiện vận tải. Tuy nhiên, khi tìm hiểu sâu vào các chi tiết nhỏ, từ dạng thô cấu thành nên các sản phẩm công nghiệp này lại luôn có những vấn đề thú vị để cho chúng ta nghiên cứu. Và điển hình cho

Nghiên cứu xác định góc nêm tối ưu trong gia công biến dạng dẻo bề mặt kim loại phẳng
những chi tiết đó là những khối vật liệu kim loại hình trụ, được đưa vào máy để gia công, thay đổi các tính chất vật lý trước khi đưa vào sử dụng phục vụ mục đích chế tạo máy móc.

Các chi tiết dạng khối hình trụ thường mềm, có độ cứng thấp làm từ thép carbon được sử dụng rộng rãi trong ngành chế tạo máy làm phôi cho các chi tiết như trục, trục quay, thanh piston, cần và các chi tiết khác [1] [2] [3]. Chúng đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định tuổi thọ của các thiết bị và cơ cấu khác nhau.

Tuy nhiên, các chi tiết có độ cứng thấp thường khó chế tạo, thứ nhất là bởi vì chúng không chịu được tải trọng cơ học, điều này thường khiến chúng bị nứt, gãy trước khi hoàn thiện thành các chi tiết hoàn chỉnh mà chúng ta cần. Thứ hai là độ bền nhiệt của chúng rất kém, đòi hỏi một quá trình gia công phải xử lý nghiêm ngặt về nhiệt độ và ma sát nhiệt [4] [5]. Và quan trọng hơn hết đó là sau khi gia công, chúng dễ bị biến dạng hình học trong thời gian sử dụng ban đầu, ngay cả dưới tác động của các ứng suất dư nhỏ – vốn là điều khó tránh khỏi trong quá trình xử lý cơ và nhiệt. Do đó, ở giai đoạn cuối cùng, các chi tiết này thường được tôi giảm ứng suất (ủ hoặc ram), nắn thẳng và gia công tinh bổ sung [1] [6].

2. Cơ sở lý thuyết

Nhiều nhà khoa học đầu ngành ở Liên Xô (nay là Liên bang Nga) và các quốc gia khác trên thế giới đã nghiên cứu các phương pháp gia công và nắn thẳng các chi tiết bằng thép carbon có độ cứng thấp. Có thể kể đến một số công

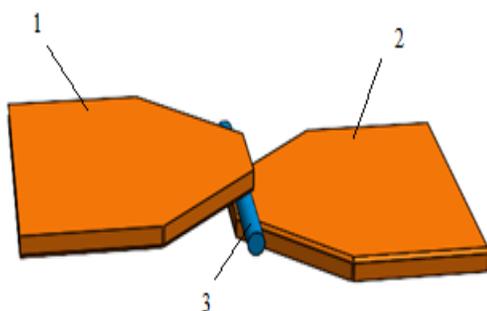
trình nghiên cứu tiêu biểu như: phương pháp gia công nắn thẳng trục bằng các thiết bị uốn ly tâm sử dụng bi cầu [7]; các nhà nghiên cứu Trung Quốc phát triển phương pháp nắn thẳng bằng cán trục bằng con lăn, giúp tăng giới hạn mỏi của phôi thông qua quá trình lăn đồng thời lên bề mặt lõi và lõm của trục [8]; phương pháp nắn các chi tiết dài bằng cách uốn đi động dọc theo chiều trục [9].

Các phương pháp được đưa ra ở trên đều mang tính ưu việt, tiên tiến về mặt khoa học, tuy nhiên rằng mặc dù các phương pháp nắn hiện có như trên đã được ứng dụng trong thực tế, nhưng các phương pháp này đa số mang tính lý thuyết quá cao, chỉ mang lại hiệu quả tạm thời hoặc gây hư hại bề mặt, điều này không thể chấp nhận được khi phục hồi độ thẳng của các chi tiết máy có kích thước nhỏ [10] [11]. Ngoài ra, sự không đồng đều và không ổn định của trạng thái ứng suất sau khi nắn cũng là một hạn chế khiến quá trình này khó được áp dụng trong sản xuất các chi tiết đòi hỏi độ chính xác cao, đặc biệt là các ứng suất dư nhỏ dưới các sai số trong gia công bằng máy móc hiện nay.

Nhận thấy được các điểm yếu này, hiện nay các phương pháp mới đang được phát triển để nắn thẳng và gia công tăng bền các chi tiết trụ có độ cứng thấp, chẳng hạn như trục và trục quay. Nhóm tác giả của chúng tôi đã nghiên cứu một mô hình phương pháp rất khoa học, đó là phương pháp nắn và gia công tăng bền kết hợp. Phương pháp này được nghiên cứu chủ yếu dành phục vụ cho việc gia công, xử lý các chi tiết làm từ

kim loại và hợp kim dẻo, biến đổi các tính chất chưa đạt của vật liệu chế tạo chi tiết máy để đáp ứng khả năng làm việc, độ bền cơ học cũng như độ tin cậy và tuổi thọ của các chi tiết này. Phương pháp được phát triển dựa trên nguyên lý lăn ép chi tiết bằng các tấm nhẵn. [12]

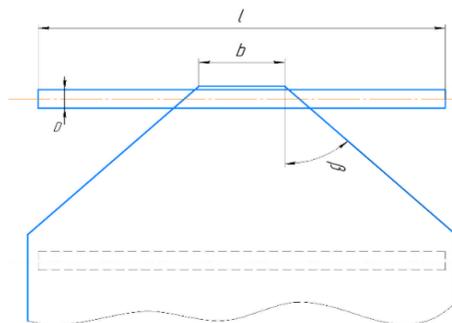
3. Mô hình nghiên cứu



Hình 1. Nguyên lý của phương pháp gia công tăng bền

1 – Tấm trên; 2 – Tấm dưới; 3 – Phôi.

Sau khi nắn thẳng cục bộ một đoạn của phôi bằng cách tác dụng lực hướng tâm, theo phương vuông góc với tấm trên, cần tiến hành lăn ép toàn bộ chiều dài phôi. Sự quay của phôi được thực hiện thông qua chuyển động của tấm trên với vận tốc v ($v = \text{const}$). Trạng thái ứng suất trong chi tiết trong quá trình này phụ thuộc vào hình dạng hình học của các tấm và độ ép tương đối.



Mục đích của phương pháp này nằm ở việc dựa trên kết quả phân tích trạng thái ứng suất – biến dạng trong vùng biến dạng và ứng suất dư trong các chi tiết đã được gia công tăng bền, lựa chọn và xác định giá trị tối ưu của góc phần hình nêm trên các tấm phẳng, nhằm đảm bảo chất lượng lớp tăng bền đạt yêu cầu.

Để đạt được mục tiêu đề ra, nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), cho phép xác định số trị trạng thái ứng suất – biến dạng tại vùng biến dạng của chi tiết cũng như cường độ lớn nhất của ứng suất tức thời và ứng suất dư. Đây là một phương pháp thuận tiện để mô tả hành vi phức tạp của vật liệu, thông qua việc mô phỏng chính xác các hiện tượng vật lý bằng các phương trình vi phân [7].

Nghiên cứu được thực hiện trong phần mềm ANSYS Mechanical với việc sử dụng mô-đun Transient Structural. Các phôi sử dụng trong mô phỏng là các mẫu hình trụ có chiều dài $l=200$ mm, với đường kính của chúng lần lượt có các giá trị là $D=10$ và 20 mm. Vật liệu của phôi được lựa chọn là thép kết cấu carbon structural steel St.3, có đặc tính đàn – dẻo, với các thông số cơ lý như sau: mô đun đàn hồi $E = 1,8 \cdot 10^5$ MPa; hệ số Poisson $\mu=0,3$; biểu đồ biến dạng vật liệu là hai đoạn tuyến tính; giới hạn chảy $\sigma_T = 255$ MPa; giới hạn bền $\sigma_B = 480$ MPa; mô đun tăng bền $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ MPa. [13]

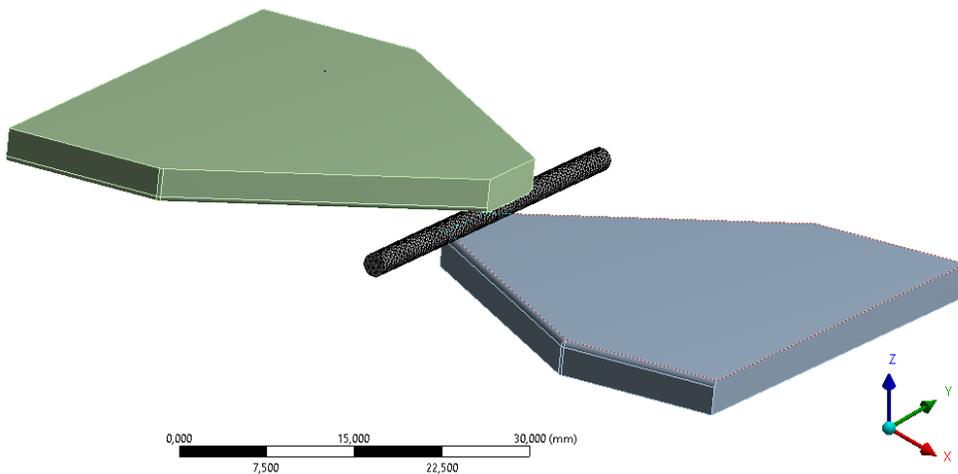
Vật liệu được sử dụng cho các tấm hình nêm là thép kết cấu có độ bền và độ cứng cao. Trong mô phỏng, dụng cụ làm việc được giả định là vật thể tuyệt đối cứng. Hệ số ma sát lẫn giữa hai bề mặt thép trong vùng tiếp xúc giữa phôi và các tấm được lấy là $f = 0,05$.

Các thông số hình học chính của phần đầu vào trên tấm hình nêm (hình 1) bao gồm: góc nâng α , chiều dài l và chiều rộng b .

Để đánh giá ảnh hưởng của kích thước hình học của phần đầu vào trên tấm phẳng đến trạng thái ứng suất – biến dạng của phôi, nghiên cứu đã lựa chọn các khoảng giá trị sau: $\alpha = 0 \div 8^\circ$ và $\varphi = 0 \div 360^\circ$. Để đảm bảo khả năng nắn thẳng cục bộ của phôi đồng thời duy trì hình dạng tròn của mặt cắt ngang, chiều rộng của phần đầu vào bbb được lấy bằng 40 mm. [14]

Khi xây dựng lưới phần tử hữu hạn, các thông số từ thư viện của phần mềm Ansys 19.1 được sử dụng. Xét đến tương tác cơ học giữa phôi thép và vật thể cứng tuyệt đối, các phần tử hữu hạn dạng tứ diện đã được lựa chọn. Lưới phần tử được xây dựng với kích thước không đổi là 0,5 mm và sử dụng một loại phần tử duy nhất cho toàn bộ thể tích của phôi. Mô hình phần tử hữu hạn của quá trình được thể hiện ở hình 2.

Các thông số chính của quá trình bao gồm độ ép tương đối của phôi Q và vận tốc chuyển động của tấm trên v . Để xác định ảnh hưởng của góc nêm β của các tấm phẳng đến trạng thái ứng suất – biến dạng của phôi, trong nghiên cứu này các thông số $Q = 1\%$, $v = 10$ mm/s được giữ không đổi, còn góc β được thay đổi.



Hình 2. Mô hình phần tử hữu hạn của quá trình tăng bền phôi hình trụ bằng các tấm hình nêm

4. Kết quả nghiên cứu

Trong quá trình gia công tăng bền bằng các tấm hình nêm, góc nêm β (xem hình 1) đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành trạng thái ứng suất –

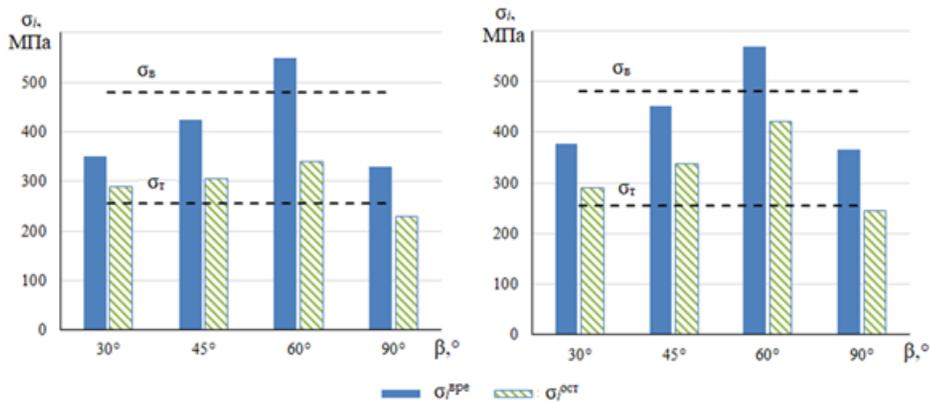
biến dạng của phôi hình trụ. Khi góc β tăng, diện tích tiếp xúc ban đầu giữa phôi và các tấm nêm cũng tăng, bởi vì trong trường hợp này các bề mặt bên của tấm tiếp xúc với phôi dưới góc nhọn

hơn, dẫn đến tăng diện tích tiếp xúc dọc theo chiều dài của phôi.

Trên đoạn đầu vào của các tấm có góc nâng α , cường độ ứng suất làm việc σ_i tăng lên khi phôi quay trên đoạn này, và góc α càng lớn thì ứng suất càng cao với cùng một góc quay φ . Cụ thể, khi $\alpha = 8^\circ$, ứng suất làm việc đạt đến giới hạn bền của vật liệu ngay tại góc quay $\varphi = 180^\circ$. Ngược lại, với $\alpha = 2^\circ$, sau một vòng quay hoàn chỉnh của phôi, ứng suất làm việc vẫn nhỏ hơn giới hạn bền của vật liệu.

Kết quả nghiên cứu cường độ ứng suất lớn nhất trong phôi hoàn toàn phù hợp với kết quả tính toán lý thuyết, cho thấy rằng: càng tăng các góc α và φ thì độ nén phôi càng lớn, dẫn đến kết quả là ứng suất trong quá trình lăn ép cũng tăng tương ứng.

Hình 3 trình bày cường độ lớn nhất của ứng suất tức thời và ứng suất dư trên bề mặt dọc theo chiều dài phôi, tương ứng với các giá trị khác nhau của góc β của phần nêm và với các đường kính phôi khác nhau.



Hình 3. Cường độ lớn nhất của ứng suất tức thời và ứng suất dư trên bề mặt phôi tại các giá trị khác nhau của góc β : a) $D=10$ mm; b) $D=20$ mm.

Từ hình 3 cho thấy rằng, khi gia công tăng bền phôi bằng các tấm hình nêm, cường độ lớn nhất của ứng suất tức thời và ứng suất dư trên bề mặt phôi cao hơn so với khi gia công bằng các tấm hình chữ nhật (ứng với $\beta = 90^\circ$). Hơn nữa, càng tăng góc β của phần nêm trên tấm, cường độ ứng suất dư càng lớn, và giá trị cực đại đạt được tại $\beta = 60^\circ$.

Điều này được lý giải là do khi tăng góc β , diện tích tiếp xúc giữa tấm nêm và phôi tăng, dẫn đến sự gia tăng ứng

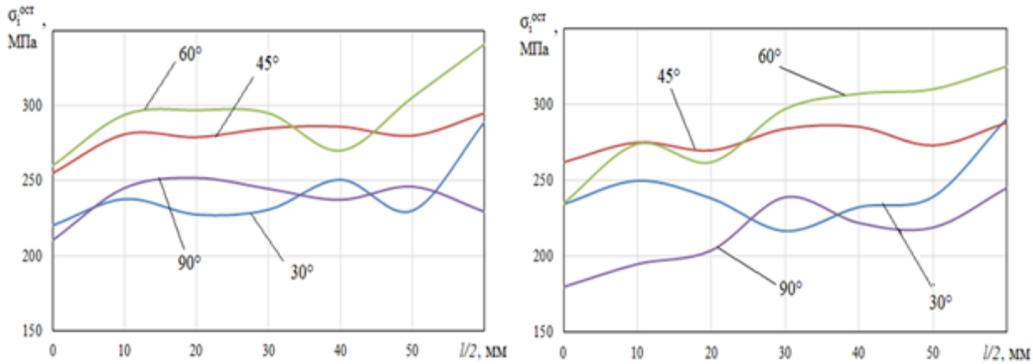
suất cục bộ trên bề mặt phôi. Điều này có thể nâng cao hiệu quả quá trình gia công tăng bền, nhưng đồng thời cũng tăng nguy cơ xuất hiện các hư hỏng trên bề mặt chi tiết.

Kết quả mô phỏng trong hình 3 cho thấy rằng tại $\beta = 60^\circ$, giá trị cực đại của ứng suất tức thời vượt quá giới hạn bền của vật liệu (đối với vật liệu nghiên cứu là $\sigma_B = 480$ MPa), điều này cho thấy khả năng xuất hiện khiếm khuyết trên bề mặt phôi.

Một trong những đặc tính quan trọng nhất của quá trình gia công tăng bền là độ đồng đều trong phân bố ứng suất dư

trên bề mặt phôi. Hình 4 trình bày phân bố cường độ ứng suất dư theo chiều dài của phôi tương ứng với các kích thước

Nghiên cứu xác định góc nêm tối ưu trong gia công biến dạng dẻo bề mặt kim loại phẳng đường kính khác nhau và các giá trị khác nhau của góc β của phần nêm trên các tấm phẳng



Hình 4. Phân bố cường độ ứng suất dư theo chiều dài phôi tại các giá trị khác nhau của góc β : a) $D=10$ mm; b) $D=20$ mm.

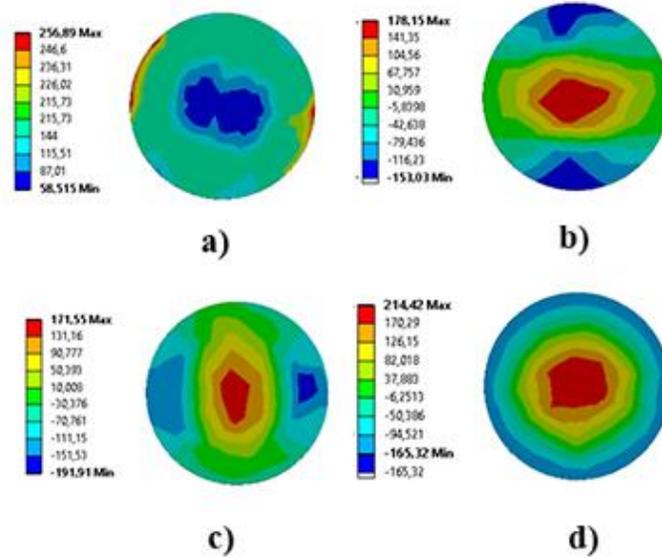
Tâm của hệ tọa độ dùng để tính toán trạng thái ứng suất – biến dạng được đặt tại mặt cắt ngang trung tâm của phôi, còn trục Oy được chọn dọc theo chiều dài phôi. Vì hệ thống là đối xứng, nên chỉ cần xét phân bố ứng suất từ tâm đến một đầu của phôi (tương ứng theo trục Oy từ 0 đến 60 mm).

Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất lớn nhất xuất hiện ở phần đầu của phôi. Từ hình 4 có thể thấy rằng, với các đường kính khác nhau của phôi, sự phân bố ứng suất dư đồng đều nhất theo chiều dài phôi xảy ra khi góc $\beta = 45^\circ$. Trong các trường hợp còn lại, phân bố ứng suất dư không đều rõ rệt, điều này có thể dẫn đến tập trung ứng suất.

Hình 5 thể hiện các trường phân bố của cường độ ứng suất dư và các thành phần của tensor ứng suất trong trường hợp $\beta = 45^\circ$, $D = 10$ mm. Từ hình 5 cho thấy, các giá trị cực đại của ứng suất dư

xuất hiện trên bề mặt phôi và giảm dần về phía trung tâm (hình 5a). Ứng suất tiếp tuyến, ứng suất dọc trục và ứng suất hướng kính đều có tính chất thay đổi dấu. Ở phần trung tâm của mặt cắt hình thành vùng ứng suất kéo, trong khi trên bề mặt là ứng suất nén. Ứng suất kéo lớn nhất thuộc về thành phần dọc trục.

Các biểu đồ phân bố ứng suất dư và các thành phần của tensor ứng suất trong quá trình gia công tăng bền bằng tấm nêm được so sánh với kết quả nghiên cứu khi gia công bằng các tấm phẳng hình chữ nhật [8]. Phân tích cho thấy, dù theo sơ đồ tăng bền nào, các thành phần tensor ứng suất dư có đặc điểm phân bố tương tự, tuy nhiên ứng suất nén dọc trục trong trường hợp sử dụng tấm hình nêm có giá trị lớn hơn, điều này tạo ra ảnh hưởng tích cực đối với độ bền mỗi chu kỳ của phôi trong quá trình khai thác.



Hình 5. Các dải đẳng ứng suất của cường độ ứng suất dư (a) và các thành phần của tensor ứng suất σ_φ (b), σ_r (c), σ_z (d) при $D = 10$ мм и $\beta = 45^\circ$

5. Đánh giá và kết luận

Trên cơ sở mô phỏng với việc sử dụng module Transient Structural trong Ansys Workbench 2019a để phân tích ứng xử phi tuyến theo thời gian, có xét đến biến dạng dẻo, tiếp xúc, ma sát. Đây là module chuẩn để mô phỏng va chạm, ép, cán, dập... quá trình gia công tăng bền các chi tiết hình trụ có độ cứng thấp bằng các tấm hình nêm, có thể rút ra các kết luận sau:

- Giá trị hợp lý của góc phân hình nêm trong tấm phẳng được xác định là $\beta = 45^\circ$, tương ứng với phân bố ứng suất dư theo chiều dài phôi đạt mức độ đồng đều cao nhất. Trong trường hợp này, ứng suất tức thời cực đại phát sinh trong quá trình gia công tăng bền không vượt quá giới hạn bền của vật liệu, đảm bảo chất lượng lớp tăng bền và độ ổn định hình học của chi tiết sau xử lý.

- Khi sử dụng góc nêm lớn hơn (ví dụ $\beta = 45^\circ$), ứng suất cục bộ trên bề mặt phôi tăng đáng kể, có thể ảnh hưởng tiêu

cực đến tính chất cơ học tổng thể và giảm hiệu quả của quá trình gia công tăng bền. Giảm góc β là một giải pháp hiệu quả nhằm giảm sự tập trung ứng suất và nâng cao tính đồng đều của trường ứng suất dư trong chi tiết sau xử lý.

- Kết quả mô phỏng số đã xác định được kích thước hình học hợp lý của đoạn đầu vào các tấm nêm dùng để nắn chỉnh cục bộ chi tiết phôi hình trụ. Trong tất cả các trường hợp được xem xét, để đảm bảo độ bền của chi tiết bằng thép carbon, cần thực hiện một vòng quay hoàn chỉnh của phôi ($\varphi = 360^\circ$) với góc nâng $\alpha = 2^\circ$.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. G. Suslov, Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy, Moscow: Mashinostroenie, 2006, p. 446.

Nghiên cứu xác định góc nêm tối ưu trong gia công biến dạng dẻo bề mặt kim loại phẳng

- [2] S. A. Zaides, B. M. Dung and B. B. Ponomarev, "Pravka lokal'nogo uchastka tsilindricheskikh detaley pered obkatkoy gladkimi plitami," Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, vol. 22, no. 3, pp. 71-80, 2024.
- [3] V. P. Kuznetsov, A. S. Skorobogatov and E. A. Kolubaev, "Effect of the Tool Path on Hardness Uniformity in an Annular Zone of X20Cr13 Steel Surface-Hardened by Friction Stir Processing," Phys. Mesomech., vol. 26, pp. 593-607, 2023.
- [4] V. Tupnytskyi, Y. Kusi, E. Dragašius, S. Baskutis and R. Chatys, "Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts," in Advanced Manufacturing Processes V. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Moscow, 2024, pp. 233-243.
- [5] A. A. Bogatov, "Ostatotchnye napryazheniya i razrushenie metalla," Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem, vol. 10, pp. 27-34, 2007.
- [6] S. A. Zaides and B. M. Dung, "Sposob pravki i uprochneniya tsilindricheskikh detaley". RF Patent 2827624 C1, 15 3 2024.
- [7] Y. Zhao, D. Guo and F. Hu, "Finite element simulation of web falling during heavy rail roller straightening," Procedia Earth Planet. Sci., vol. 2, pp. 44-49, 2011.
- [8] S. A. Zaides and D. F. Fam, "Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates," Russ. Eng. Res., vol. 22, no. 12, pp. 921-925, 2018.
- [9] С. А. Савран, "Экспериментальные исследования правки длинномерных деталей продольным перемещением подвижного изгиба," Научные преобразования в эпоху глобализации: сб. статей Междунар. науч.-прак. конф., Екатеринбург: НИЦ АЭТЕРНА, 2016.
- [10] А. А. Богатов, "Остаточные напряжения и разрушение металла. Кузнечно-штамповочное производство.," Обработка материалов давлением, vol. 10, pp. 27-34, 2007.
- [11] В. И. Матяш, В. В. Максимов и А. В. Анкин, "Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов," Вестник машиностроения, vol. 2, pp. 27-30, 1997.
- [12] N. T. Giảng, L. T. Hùng, N. N. Huynh và N. T. Kiên, Mô phỏng số quá trình biến dạng, Hà Nội: NXB Bách khoa Hà Nội, 2011.
- [13] N. T. Giảng, L. T. Hùng, Đ. V. Hải và L. V. Lịch, Biến dạng dẻo kim loại ở nhiệt độ cao, Hà Nội: NXB Bách khoa Hà Nội, 2019.
- [14] N. T. Tranh, Cơ sở cắt gọt kim loại, Hà Nội, Việt Nam: NXB Giáo dục, 2008.

Ngày nhận bài: 17/10/2025

Ngày hoàn thành sửa bài: 12/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/12/2025