

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ QUY TRÌNH CÔNG NGHỆ CÁN THANH V3600 TỪ THÉP TẤM MỎNG 0,3MM BẰNG PHƯƠNG PHÁP SLAB VÀ KIỂM CHỨNG BẰNG MÔ PHÒNG PHẦN TỬ HỮU HẠN

RESEARCH ON THE DESIGN OF A PROCESS FOR ROLLING V3600 BARS FROM 0.3MM THIN STEEL PLATES USING SLAB METHOD AND VERIFICATION BY FINITE ELEMENT SIMULATION

Huỳnh Công Lớn*, Lương Văn Tới

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: huynhconglon@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Thanh V3600 là sản phẩm thép tạo hình nguội từ thép tấm mỏng, có tiết diện hở và yêu cầu cao về độ chính xác hình học. Đối với thép tấm mỏng dày 0,3 mm, việc thiết kế quy trình cán đóng vai trò quyết định nhằm đảm bảo phân bố biến dạng hợp lý, tránh nứt gãy và quá tải trục cán. Bài báo này tập trung nghiên cứu thiết kế quy trình công nghệ cán thanh V3600 từ thép tấm mỏng bằng phương pháp slab. Trên cơ sở phân tích kết cấu sản phẩm, số bước cán cần thiết được xác định và quy trình tạo hình tuần tự được xây dựng. Ứng suất cán và lực cản tổng tác dụng lên trục cán được tính toán theo mô hình giải tích. Kết quả tính toán được kiểm chứng bằng mô phỏng phần tử hữu hạn trong phần mềm ABAQUS, qua đó đánh giá tính hợp lý của quy trình cán đề xuất.

Từ khóa: Cán nguội tạo hình; Mô hình giải tích slab; Abaqus; Công nghệ cán thép mỏng.

ABSTRACT

This paper presents a study on the design of a roll-forming process for producing V3600 profiles from thin steel sheets with a thickness of 0.3 mm. Based on an analysis of the product geometry, the number of forming passes is determined and a sequential roll-forming process is established. Rolling stress and total resisting force acting on the roll shafts are calculated using an analytical slab-based model. Finite element simulations are performed in ABAQUS to evaluate stress distribution and to validate the analytical results. The comparison confirms the feasibility of the proposed roll-forming process for thin sheet steel.

Keywords: Cold roll forming; Analytical slab model; ABAQUS finite element software; Thin steel roll forming technology.

1. GIỚI THIỆU

Cán nguội định hình (cold roll forming) là một trong những công nghệ gia công biến dạng dẻo quan trọng, được sử dụng rộng rãi trong sản xuất các cấu kiện thép mỏng có tiết diện hở và hình dạng phức tạp, đặc biệt trong lĩnh vực xây dựng và công nghiệp nhẹ. Quá trình này cho phép tạo hình liên tục từ thép tấm thông qua nhiều cặp trục cán, trong đó mỗi bước chỉ thực hiện một phần nhỏ biến dạng nhưng tổng biến dạng tích lũy đủ để đạt được tiết diện mong muốn. Ưu điểm của cán nguội định hình là năng suất cao, độ chính xác hình học tốt và khả năng gia công các sản phẩm mảnh, mỏng với chiều dài lớn [1], [2]. Tuy nhiên, đối với các sản phẩm được tạo hình từ thép tấm mỏng, đặc biệt khi chiều dày phôi nhỏ hơn 0,5 mm, quá trình cán trở nên nhạy cảm với sự phân bố biến dạng và ứng suất. Nếu quy trình cán không được thiết kế hợp lý, vật liệu dễ phát sinh các khuyết tật như nứt mép, nhăn phôi, sai lệch hình dạng tiết diện hoặc ứng suất dư lớn sau khi cán xong. Các hiện tượng này không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm mà còn làm tăng tải trọng tác dụng lên hệ thống trục cán và truyền động, dẫn đến giảm tuổi thọ thiết bị [3].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung phân tích cơ chế biến dạng và phân bố ứng suất trong quá trình cán nguội định hình. Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM) được sử dụng rộng rãi để mô phỏng quá trình tạo hình, cho phép đánh giá chi tiết phân bố ứng suất, biến dạng và ứng suất dư trong sản phẩm cán nguội. Các kết quả nghiên cứu cho thấy FEM có khả năng dự đoán chính xác các vùng tập trung ứng suất tại góc uốn, biến dạng không đều cũng như hiện tượng hồi phục đàn hồi sau khi cán [4], [5]. Tuy nhiên, do yêu cầu thời gian tính toán lớn và phụ thuộc mạnh vào điều kiện biên và mô hình vật liệu, phương pháp FEM chưa thực sự thuận tiện cho

giai đoạn thiết kế sơ bộ quy trình công nghệ. Song song với mô phỏng số, các mô hình giải tích và bán giải tích đã được phát triển nhằm hỗ trợ tính toán nhanh các thông số công nghệ trong quá trình cán nguội. Trong số đó, phương pháp slab được sử dụng phổ biến để phân tích lực và ứng suất trong các quá trình biến dạng dẻo như cán, kéo và ép chảy. Phương pháp này dựa trên việc chia phôi thành các phần tử vi phân và thiết lập phương trình cân bằng lực, từ đó xác định áp suất tiếp xúc, ứng suất cán và lực cản tổng tác dụng lên trục cán [6]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng kết quả tính toán theo phương pháp slab có độ phù hợp tốt với thực nghiệm và mô phỏng số khi được áp dụng cho thiết kế sơ bộ quy trình cán nguội [7].

Thanh V3600 là một sản phẩm thép tạo hình nguội có tiết diện chữ V, được sản xuất từ thép tấm mỏng dày 0,3 mm và sử dụng phổ biến trong hệ trần xây dựng. Do đặc điểm tiết diện hở và chiều dày nhỏ, quá trình cán tạo hình thanh V3600 đòi hỏi phải xác định hợp lý số bước cán cũng như trình tự tạo hình nhằm đảm bảo biến dạng dẻo ổn định và hạn chế ứng suất tập trung. Trong thực tế sản xuất, việc lựa chọn số bước cán vẫn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm, dẫn đến khó kiểm soát tải trọng trục cán và chất lượng sản phẩm. Xuất phát từ thực tế đó, bài báo này tập trung nghiên cứu thiết kế quy trình công nghệ cán thanh V3600 từ thép tấm mỏng 0,3 mm. Trên cơ sở phân tích kết cấu hình học của sản phẩm, số bước cán cần thiết được xác định và quy trình tạo hình tuần tự được xây dựng. Ứng suất cán và lực cản tổng tác dụng lên trục cán tại mỗi bước được tính toán bằng phương pháp slab. Để đánh giá độ tin cậy của mô hình giải tích, quá trình cán được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong phần mềm ABAQUS nhằm xác định phân bố ứng suất trong thanh V3600 và so sánh với kết quả tính toán lý thuyết.



2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ CÁC MÔ HÌNH TOÁN TRONG PHÂN TÍCH CÁN NGUỘI ĐỊNH HÌNH

2.1. Các mô hình lý thuyết trong nghiên cứu cán nguội định hình

Trong nghiên cứu quá trình cán nguội định hình thép tấm mỏng, nhiều mô hình lý thuyết đã được đề xuất nhằm mô tả cơ chế biến dạng, phân bố ứng suất và xác định lực cán. Các mô hình này có thể được phân loại thành ba nhóm chính: mô hình uốn thuần túy, mô hình giải tích dựa trên cân bằng lực và mô hình số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn.

a) Mô hình uốn thuần túy

Mô hình uốn thuần túy được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu ban đầu về cán nguội định hình, trong đó biến dạng của thép tấm được coi là uốn quanh một bán kính xác định. Theo lý thuyết uốn cổ điển, ứng suất uốn tại một điểm cách trục trung hòa một khoảng y được xác định bởi [9]:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (1)$$

Trong đó:

- M là mômen uốn;
- I là mômen quán tính tiết diện.

Mô hình này cho phép đánh giá nhanh ứng suất uốn và xác định bán kính uốn tối thiểu của vật liệu. Tuy nhiên, mô hình uốn thuần túy không xét đến ảnh hưởng của ma sát, áp suất tiếp xúc và lực dọc trục, do đó chỉ phù hợp để ước lượng sơ bộ trong giai đoạn thiết kế ban đầu [4], [9].

b) Mô hình giải tích cân bằng lực trong cán nguội

Để khắc phục hạn chế của mô hình uốn thuần túy, Avitzur [6] và Johnson & Mellor [11] đã phát triển các mô hình giải tích dựa trên cân bằng lực trong vùng tiếp xúc giữa phôi và dụng cụ. Trong các mô hình này, phôi được chia thành các phần tử vi phân và phương trình cân bằng lực được thiết lập nhằm xác định ứng suất và áp suất tiếp xúc. Đối với quá trình cán, Avitzur đề xuất phương trình cân bằng lực cho một phần tử vi phân theo phương chuyển động của phôi như sau [6]:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{2\tau}{t} \quad (2)$$

Ứng suất ma sát τ được xác định theo mô hình Coulomb:

$$\tau = f \cdot p \quad (3)$$

Các mô hình này cho phép xác định áp suất tiếp xúc và lực cán với độ chính xác chấp nhận được, đồng thời có ưu điểm là dễ triển khai và phù hợp cho thiết kế sơ bộ quy trình cán. Tuy nhiên, khi áp dụng cho các tiết diện phức tạp, mô hình thường phải sử dụng các giả thiết đơn giản hóa.

c) Mô hình bán giải tích cho cán nguội định hình

Một số tác giả đã đề xuất các mô hình bán giải tích nhằm mô tả quá trình cán nguội định hình cụ thể hơn. Bhattacharyya và Smith [5] xây dựng mô hình kết hợp giữa lý thuyết biến dạng dẻo và điều kiện tiếp xúc để dự đoán lực cán trong quá trình cán nguội, sau đó kiểm chứng bằng FEM. Kết quả cho thấy lực cán tính toán bằng mô hình giải tích có sai lệch nhỏ hơn 15% so với mô phỏng số. Wang và cộng sự [7] cũng đề xuất mô hình giải tích để dự đoán lực cán và mômen trục cán trong cán nguội định hình, trong đó ảnh hưởng của chiều dày phôi và

hệ số ma sát được xét đến rõ ràng. Các mô hình này cho thấy phương pháp giải tích vẫn có giá trị thực tiễn cao khi được sử dụng kết hợp với mô phỏng số.

2.2. Mô hình phần tử hữu hạn trong phân tích cán nguội

Phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng rộng rãi để mô phỏng quá trình cán nguội nhằm đánh giá phân bố ứng suất, biến dạng và ứng suất dư trong sản phẩm. Kobayashi và cộng sự [8] đã chứng minh rằng FEM có thể mô phỏng chính xác các bài toán biến dạng lớn và tiếp xúc phức tạp trong gia công áp lực. Các nghiên cứu gần đây sử dụng ABAQUS cho thấy mô phỏng FEM có khả năng dự đoán chi tiết ứng suất von Mises tại các góc uốn, biến dạng không đều và hiện tượng springback sau khi cán [13], [14]. Tuy nhiên, FEM đòi hỏi thời gian tính toán lớn và khó sử dụng trực tiếp trong giai đoạn thiết kế sơ bộ quy trình công nghệ.

2.3. Lựa chọn mô hình nghiên cứu trong bài báo

Từ tổng quan các mô hình lý thuyết đã công bố có thể thấy rằng:

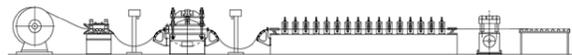
- Mô hình uốn thuần túy phù hợp cho ước lượng sơ bộ nhưng thiếu độ chính xác;
- FEM cho kết quả chi tiết nhưng không thuận lợi cho thiết kế nhanh;
- Các mô hình giải tích dựa trên cân bằng lực, đặc biệt là phương pháp slab, có sự cân bằng tốt giữa độ chính xác và tính đơn giản.

Do đó, trong nghiên cứu này, phương pháp slab được lựa chọn để xây dựng mô hình toán tính toán ứng suất cán và lực cản tổng trên trục cán cho quy trình cán thanh V3600 từ thép tấm mỏng 0,3 mm. Mô hình giải tích sau đó được kiểm chứng bằng mô phỏng phần tử hữu

hạn trong phần mềm ABAQUS nhằm đánh giá độ tin cậy và khả năng ứng dụng của phương pháp.

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC CHO QUY TRÌNH CÁN THANH V3600

Như đã trình bày ở mục 2, trong số các mô hình lý thuyết đã được công bố, phương pháp slab cho thấy sự cân bằng hợp lý giữa độ chính xác và tính đơn giản khi áp dụng cho thiết kế sơ bộ quy trình cán nguội định hình. Do đó, trong nghiên cứu này, phương pháp slab được sử dụng để xây dựng mô hình toán học nhằm tính toán ứng suất cán và lực cản tổng tác dụng lên trục cán trong quá trình tạo hình thanh V3600 từ thép tấm mỏng, qua đó đề xuất các bước cán hợp lý cho toàn bộ quy trình cán thanh V3600. Dây chuyền công nghệ cán thanh V3600 được trình bày ở hình 1 [15] bao gồm các cụm chính như sau: cụm xả liệu, cụm chỉnh sửa phôi, cụm cán, cụm cắt và bàn thu sản phẩm.



Hình 1. Dây chuyền công nghệ cán thanh V3600

3.1. Các giả thiết của mô hình

Mô hình toán được xây dựng dựa trên các giả thiết đã được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu về cán và cán nguội định hình [6], [7], cụ thể:

- Vật liệu thép được coi là đàn-dẻo lý tưởng;
- Biến dạng xảy ra chủ yếu tại các vùng uốn, bỏ qua biến dạng theo chiều dài;
- Áp suất tiếp xúc giữa phôi và trục cán được giả thiết phân bố đều;
- Ma sát giữa phôi và trục cán tuân theo quy luật Coulomb.



Những giả thiết này phù hợp với mục tiêu thiết kế quy trình cán và cho phép đơn giản hóa mô hình mà vẫn đảm bảo độ tin cậy của kết quả tính toán. Thông số đầu vào của vật liệu cán là thép tấm mỏng dạng cuộn có tiết diện ngang rộng 46mm, dày 0,3mm, dài 2000m. Thông số sản phẩm ra có dạng thanh V, có chiều dài 3600mm và có biên dạng tiết diện ngang như hình 2.

3.2. Mô hình slab cho một bước cán

Xét một phần tử vi phân của phôi trong vùng tiếp xúc với trục cán tại một bước tạo hình. Phương trình cân bằng lực theo phương chuyển động của phôi được viết như sau [6]:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{2\tau}{t} \quad (4)$$

Trong đó, σ_x là ứng suất theo phương chuyển động, τ là ứng suất ma sát và t là chiều dày phôi.

Ứng suất ma sát được xác định theo mô hình Coulomb [6], [11]:

$$\tau = f \cdot p \quad (5)$$

Điều kiện chảy dẻo của vật liệu được

xác định theo tiêu chuẩn von Mises [10]. Trong phân tích sơ bộ quá trình cán, áp suất tiếp xúc trung bình được xấp xỉ bằng giới hạn chảy của vật liệu, giả thiết này đã được nhiều tác giả sử dụng khi thiết kế quy trình cán nguội định hình [6], [7].

3.3. Xác định lực cản và mômen trên trục cán

Lực cản tổng tác dụng lên trục cán tại bước cán thứ i được xác định theo biểu thức [7], [11]:

$$F_i = p_i \cdot b_i \cdot l_i \quad (6)$$

Trong đó:

p_i là áp suất tiếp xúc trung bình tại bước cán thứ i ;

b_i là chiều rộng vùng tiếp xúc;

l_i là chiều dài tiếp xúc giữa phôi và trục cán.

Mômen xoắn tác dụng lên trục cán được xác định theo [1]:

$$M_i = F_i \cdot R \quad (7)$$

Các giá trị lực cản và mômen là cơ sở để đánh giá tải trọng làm việc của hệ thống trục cán và lựa chọn công suất truyền động phù hợp được trình bày trong bảng 1, bảng 2 [15].

Bảng 1. Kích thước khuôn cán trong quy trình công nghệ cán 7 bước

Bước	D_{tr}	D_r	D_{ld}	D_d	B	B_{tr}	B_d
1	200				100		
2	200	210	200	180	100	40,3	40
3	200	210	200	180	100	40,8	40,1
4	200	202	195	198	100	40,6	36,4
5	200		199		100		
6	200	225	199	160	100	60,35	60
7	200	245	198,5	150	100	45	48,5

Bảng 2. Giá trị lực cản tương ứng từng bước cán

Bước	Góc uốn (α), độ	Lực uốn P_u , N	Lực cản $P_{cán}$, N
1	0	18,77	280,68
2	45	32,05	293,95
3	90	18,77	280,68
4	135	32,05	293,95
5	180	37,55	299,45
6	45	32,05	293,95
7	90	18,77	280,68
8	90	9,39	271,29

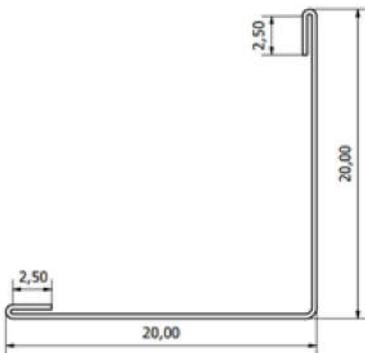
4. TÍNH TOÁN VÀ THIẾT KẾ CÁC BƯỚC CÁN THANH V3600

4.1. Phân tích hình học sản phẩm

Thanh V3600 có tiết diện chữ V với các đoạn uốn liên tiếp, được tạo hình từ thép tấm mỏng dày 0,3 mm. Quá trình tạo hình chủ yếu là uốn dẻo cục bộ tại các góc uốn của tiết diện. Đối với thép cường độ cao, bán kính uốn tối thiểu phải thỏa mãn điều kiện [4], [12], [15]:

$$r_{\min} \geq c \cdot t \quad (8)$$

Điều kiện này được sử dụng làm cơ sở để phân chia biến dạng và xác định số bước cán hợp lý.



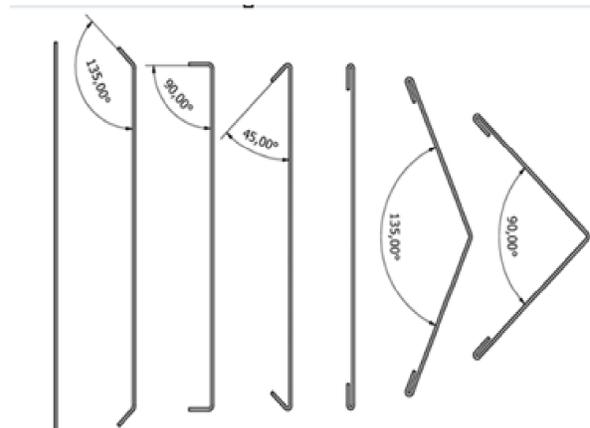
Hình 2. Biên dạng mặt cắt ngang thanh V3600 sau khi cán

4.2. Xác định số bước cán

Tổng góc uốn cần tạo hình cho thanh V3600 được phân chia thành nhiều bước nhỏ nhằm đảm bảo biến dạng dẻo ổn định. Góc uốn tại mỗi bước được xác định theo nguyên tắc phân bố đều [1], [4]:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{\text{total}}}{n} \quad (9)$$

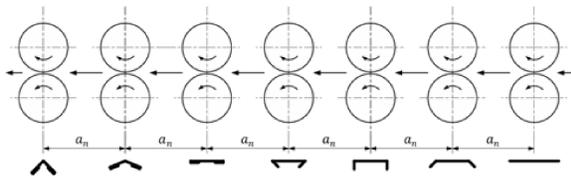
Dựa trên giới hạn bán kính uốn, đặc tính vật liệu và kinh nghiệm thiết kế cán nguội cho thép tấm mỏng, quy trình cán thanh V3600 được lựa chọn gồm 07 bước cán. Cách phân chia này đảm bảo mỗi bước cán chỉ thực hiện một phần biến dạng nhỏ, tránh tập trung ứng suất.



Hình 3. Sơ đồ chia góc cán tương ứng từng bước cán thanh V3600

4.3. Kết quả tính toán theo phương pháp slab

Kết quả tính toán cho thấy lực cản và ứng suất cán tăng dần từ các bước đầu đến các bước tạo hình chính, sau đó giảm ở các bước hiệu chỉnh cuối. Quy luật phân bố này phù hợp với cơ chế biến dạng trong cán nguội định hình đã được đề cập trong các nghiên cứu trước [3], [7], [15]. Quy trình công nghệ cán được đề xuất như hình 4.



Hình 4. Sơ đồ quy trình công nghệ cán thanh V3600

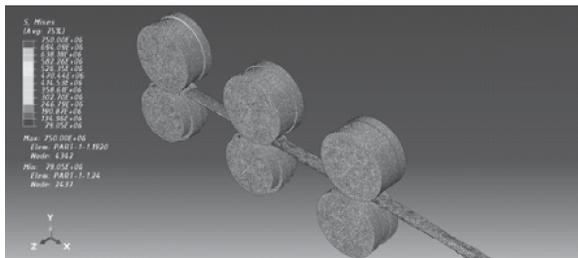
5. MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH CÁN BẰNG PHẦN MỀM ABAQUS

5.1. Thiết lập mô hình phần tử hữu hạn

Để kiểm chứng mô hình giải tích, quá trình cán thanh V3600 được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong phần mềm ABAQUS. Việc sử dụng ABAQUS cho mô phỏng cán nguội đã được chứng minh là phù hợp trong nhiều nghiên cứu trước [5], [13]. Phôi được mô hình hóa bằng phần tử vỏ với vật liệu đàn-dẻo, trong khi trục cán được coi là vật rắn tuyệt đối. Điều kiện tiếp xúc giữa phôi và trục cán sử dụng mô hình ma sát Coulomb [5], [14], [15].

5.2. Kết quả mô phỏng trạng thái ứng suất

Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất von Mises tập trung chủ yếu tại các góc uốn của tiết diện, đặc biệt tại các bước cán giữa. Giá trị ứng suất cực đại xấp xỉ giới hạn chảy của vật liệu, phù hợp với giả thiết được sử dụng trong mô hình slab.



Hình 5. Kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn quy trình cán bằng ABAQUS

6. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

6.1. Kết quả tính toán theo phương pháp slab

Trên cơ sở mô hình toán học đã xây dựng ở mục 3 và quy trình cán được thiết kế ở mục 4, các đại lượng cơ học đặc trưng của quá trình cán thanh V3600, bao gồm ứng suất cán và lực cán tổng tác dụng lên trục cán, đã được tính toán cho từng bước tạo hình. Kết quả cho thấy lực cán tác dụng lên trục cán tăng dần từ các bước cán đầu, đạt giá trị lớn nhất tại các bước cán giữa – nơi biến dạng uốn là chủ yếu – và giảm dần ở các bước cán cuối do chức năng của các bước này chủ yếu là hiệu chỉnh hình dạng tiết diện. Quy luật biến thiên này phù hợp với cơ chế biến dạng dẻo trong quá trình cán nguội định hình đã được các tác giả trước đó chỉ ra [1], [3], [7]. Từ kết quả tính toán có thể nhận thấy rằng giá trị ứng suất cán tại các bước tạo hình chính không vượt quá giới hạn chảy của vật liệu, cho thấy quy trình cán được thiết kế đảm bảo điều kiện biến dạng dẻo ổn định và không gây quá tải cục bộ.

6.2. Kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn

Kết quả mô phỏng quá trình cán thanh V3600 bằng phần mềm ABAQUS cho phép đánh giá trực quan phân bố ứng suất trong vật liệu tại từng bước tạo hình. Phân bố ứng suất von Mises cho thấy ứng suất tập trung chủ yếu tại các góc uốn của tiết diện, đặc biệt ở các bước cán giữa – nơi góc uốn tăng nhanh. Giá trị ứng suất von Mises cực đại thu được từ mô phỏng xấp xỉ giới hạn chảy của thép G550, phù hợp với giả thiết sử dụng trong mô hình slab và các nghiên cứu tương tự về cán nguội định hình thép tấm mỏng [5], [14]. Ngoài ra, phân bố ứng suất dọc theo chiều dài thanh tương đối đồng đều, không xuất hiện các vùng ứng suất quá lớn mang tính cục bộ, chứng tỏ quy trình cán đề xuất có tính ổn định cao.

6.3. So sánh và thảo luận kết quả

So sánh kết quả tính toán theo phương pháp slab và kết quả mô phỏng FEM cho thấy:

- Xu hướng phân bố lực cản và ứng suất là tương đồng;
- Sai lệch giữa hai phương pháp nằm trong giới hạn cho phép đối với thiết kế sơ bộ quy trình cán;
- Phương pháp slab cho phép ước lượng nhanh và hiệu quả các thông số cơ học chính của quá trình cán.

Sự khác biệt giữa kết quả giải tích và mô phỏng số chủ yếu xuất phát từ các giả thiết đơn giản hóa trong mô hình slab, đặc biệt là giả thiết áp suất tiếp xúc phân bố đều và bỏ qua ảnh hưởng của biến cứng vật liệu. Tuy nhiên, với mục tiêu thiết kế quy trình công nghệ cán và lựa chọn số bước cán hợp lý, phương pháp slab kết hợp với mô phỏng FEM cho thấy hiệu quả và tính khả thi cao.

7. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu thiết kế quy trình công nghệ cán thanh V3600 từ thép tấm mỏng dày 0,3 mm dựa trên phương pháp slab và kiểm chứng bằng mô phỏng phần tử hữu hạn trong phần mềm ABAQUS. Trên cơ sở phân tích kết cấu hình học của sản phẩm, số bước cán hợp lý đã được xác định và quy trình tạo hình tuần tự được xây dựng.

Mô hình toán học theo phương pháp slab cho phép xác định ứng suất cản và lực cản tổng tác dụng lên trục cán tại từng bước tạo hình. Kết quả tính toán cho thấy quy trình cán được thiết kế đảm bảo biến dạng dẻo ổn định và không gây quá tải cơ học. Kết quả mô phỏng

FEM cho thấy phân bố ứng suất trong thanh V3600 phù hợp với kết quả tính toán lý thuyết, qua đó khẳng định độ tin cậy của mô hình giải tích được đề xuất.

Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp slab, khi được sử dụng kết hợp với mô phỏng phần tử hữu hạn, là công cụ hiệu quả trong thiết kế và đánh giá quy trình cán nguội định hình cho các sản phẩm thép tấm mỏng.

HƯỚNG PHÁT TRIỂN:

Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình có thể được mở rộng theo các hướng:

- Xét đến ảnh hưởng của biến cứng vật liệu và ứng suất dư sau cán;
- Nghiên cứu ảnh hưởng của sai lệch hình học trục cán đến chất lượng sản phẩm;
- Kết hợp mô hình giải tích với tối ưu hóa số bước cán nhằm giảm lực cản và tiêu hao năng lượng. ❖

Ngày nhận bài: **05/12/2025**

Ngày phản biện: **18/12/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Halmos, G. T. (chủ biên), “*Roll Forming Handbook*”. CRC Press, Boca Raton, USA, 2006.
- [2]. Lindgren, L. E., “*Cold roll forming of thin sheet metals*”. *Journal of Materials Processing Technology*, tập 114, số 2, tr. 141-147, 2001.
- [3]. Kang, C., Sun, B., Zhang, X., Yao, C., “*Research on the mechanism and processability of roll forming*”. *Materials*, tập 17, số 13, bài số 3126, 2024.
- [4]. Wagoner, R. H., Chenot, J. L., “*Metal Forming Analysis*”. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.

- [5]. Bhattacharyya, D., Smith, P. D., “*Prediction of deformation length in cold roll forming*”. International Journal of Mechanical Sciences, tập 35, số 9, tr. 751-760, 1993.
- [6]. Avitzur, B., “*Metal Forming: Processes and Analysis*”. McGraw-Hill, New York, USA, 1968.
- [7]. Wang, X., Liu, H., Li, S., Chen, W., “*Process design and forming characteristics of complex thin-walled sections in cold roll forming*”. Journal of Materials Processing Technology, tập 268, tr. 1-12, 2019.
- [8]. Kobayashi, S., Oh, S. I., Altan, T., “*Metal Forming and the Finite Element Method*”. Oxford University Press, Oxford, UK, 1989.
- [9]. Dieter, G. E., “*Mechanical Metallurgy*”. Lần xuất bản thứ 3, McGraw-Hill, New York, USA, 1986.
- [10]. von Mises, R., “*Mechanics of solid bodies in the plastically deformable state*”. Proceedings of the Göttingen Society of Sciences, Mathematical-Physical Class, tr. 582-592, 1913.
- [11]. Johnson, W., Mellor, P. B., “*Engineering Plasticity*”. Ellis Horwood, London, UK, 1983.
- [12]. ASM International, “*ASM Handbook, Volume 14: Forming and Forging*”. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2005.
- [13]. Dassault Systèmes, “*ABAQUS Documentation: Theory and User Manuals*”. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, USA, 2023.
- [14]. Zhang, Y., Lang, L., Wang, Y., Chen, H., Du, J., Jiao, Z., “*Springback behavior of large multi-feature thin-walled parts in sequential forming processes*”. Materials, tập 15, số 8, bài số 2608, 2022.
- [15]. Liu Vinh Huy, “*Design automatic V3600 roll-forming machine productivity of 60m/min*”. Luận văn tốt nghiệp, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, 2025.