

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN NHẪM ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA QUÁ TRÌNH UỐN TỚI ĐỘ CHÍNH XÁC GIA CÔNG ỐNG THÉP TÀU THỦY

BUILDING A MATHEMATICAL MODEL TO ASSESS THE IMPACT OF BENDING
PROCESS ON THE ACCURACY OF PROCESSING SHIP STEEL PIPE

TS. Ngô Gia Việt

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: vietng.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Quy trình công nghệ thiết kế, sản xuất, gia công và lắp ráp hệ thống đường ống trong các ngành công nghiệp, đặc biệt trong ngành công nghiệp đóng tàu có tỉ trọng kết cấu lớn, có độ phức tạp cao, đòi hỏi tính chính xác, ổn định. Việc dự đoán được các khả năng sai số có thể xảy ra khi gia công ống cho phép đề xuất các phương án điều chỉnh và bù hòa sai số khi lắp ráp ống ngay trong giai đoạn thiết kế, thông qua đó tăng cường tính chính xác lắp ráp và nâng cao tỉ lệ ống gia công theo bản vẽ thiết kế. Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình uốn ống, xây dựng mô hình toán mô tả tọa độ thực tế của ống có tính tới các sai lệch khi gia công, là cơ sở để xác định miền sai số của đoạn ống trong các giai đoạn thiết kế và gia công.

Từ khóa: Hệ thống đường ống; Sai số; Thiết kế tàu thủy; Quy trình công nghệ; Mô hình toán.

ABSTRACT

The technological process of designing, manufacturing, processing and assembling pipeline systems in industries, especially in the shipbuilding industry, has a large structural proportion, high complexity, and requires accuracy and stability. Predicting possible errors that may occur during pipe processing allows proposing solutions to adjust and compensate for errors during pipe assembly right in the design stage, thereby increasing the accuracy of assembly and increasing the rate of pipes processed according to design drawings. The article focuses on studying the influence of the pipe bending process, building a mathematical model describing the actual coordinates of the pipe taking into account the deviations during processing, which is the basis for determining the error domain of the pipe section during the design and processing stages.

Keywords: Piping system; Error; Ship design; Technological process; Mathematical description.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ống thép với những ưu điểm nổi bật về khả năng chịu lực tốt, chịu được bào mòn và áp suất cao được ứng dụng phổ biến trong nhiều ngành công nghiệp. Trong ngành công nghiệp đóng tàu, ống thép chiếm vai trò và tỉ trọng kết cấu lớn, có mặt trong hầu hết các hệ thống chức năng trên tàu thủy như hệ thống bơm và cung cấp nhiên liệu, hệ thống nước dẫn, hệ thống cứu hỏa, hệ thống hút khô và các hệ thống chuyên dụng khác. Đặc biệt, cùng với yêu cầu ngày càng đa dạng trong lĩnh vực vận tải đường thủy, các con tàu được thiết kế và đóng mới có xu hướng ngày càng hiện đại và mang tính chuyên môn hóa cao, được trang bị nhiều hệ thống phức tạp, trong đó hệ thống đường ống đóng vai trò quan trọng. Mức độ phức tạp trong quá trình thiết kế tàu thủy ngày càng tăng kéo theo mật độ phân bố ống ngày càng lớn, đòi hỏi hệ thống đường ống phải có độ chính xác cao trong ngay trong quá trình thiết kế, gia công và lắp ráp.

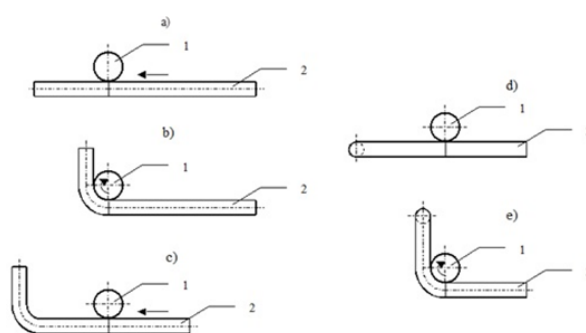
Hiện nay, việc ứng dụng các công nghệ, phần mềm hiện đại cho phép thiết kế hệ thống đường ống trên tàu thủy một cách chi tiết. Toàn bộ ống riêng lẻ của hệ thống đường ống được mô tả thông qua các bản vẽ với đầy đủ kích thước cụ thể. Mặc dù vậy, vẫn còn tồn tại một lượng lớn các ống không thể gia công trực tiếp theo bản vẽ thiết kế [1-3]. Vấn đề trên xuất phát từ việc trong giai đoạn thiết kế không thể dự đoán được các sai số có thể phát sinh trong quá trình gia công và lắp ráp đường ống [4, 5]. Vì vậy, việc phân tích các yếu tố ảnh hưởng tới độ chính xác gia công và lắp ráp đường ống, đồng thời đánh giá được ảnh hưởng của chúng đến kích thước cuối cùng của ống có ý nghĩa trong việc ra quyết định phương án gia công, giúp giảm tỉ lệ gián đoạn và nâng cao hiệu quả sản xuất.

Trong bài báo, tác giả đề xuất nghiên cứu ảnh hưởng của các quy trình công nghệ, đặc biệt là quá trình uốn tới độ chính xác gia công ống, thông qua đó xây dựng mô hình toán nhằm xác định miền sai số phát sinh trong quá trình gia công, cho phép dự đoán các phương án bù hòa sai số và tăng cường tính chính xác lắp ráp của hệ thống đường ống ngay trong giai đoạn thiết kế.

2. QUY TRÌNH CÔNG NGHỆ GIA CÔNG ỐNG THÉP TÀU THỦY

2.1. Quy trình công nghệ gia công ống thép tàu thủy

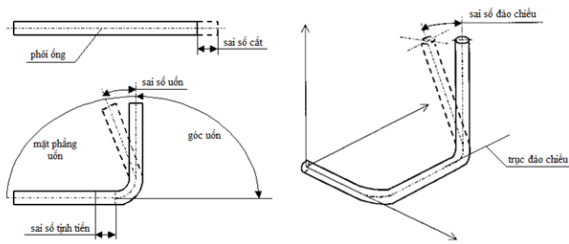
Quy trình công nghệ gia công ống thép tàu thủy bao gồm các công đoạn cắt, uốn và các công đoạn phụ trợ khác nhằm tạo hình ống thép theo kích thước tọa độ từ bản vẽ thiết kế. Các bước gia công bao gồm đẩy tịnh tiến, uốn, đảo chiều và cắt, trong đó, mỗi công đoạn thực hiện trên các thiết bị tương ứng với một sai số nhất định nằm trong giới hạn cho phép. Uốn ống được thực hiện trên các máy uốn dạng điều chỉnh thủ công, bán tự động và tự động, đi kèm quá trình cắt trên các máy cắt chuyên dụng.



Hình 1. Quy trình công nghệ gia công ống:
a – Đẩy tịnh tiến 1; b – Uốn; c – Đẩy tịnh tiến 2;
d – Đảo chiều; e – Uốn

Sai số gia công trong từng công đoạn ảnh hưởng trực tiếp tới sai số cuối cùng của 

đoạn ống thành phẩm, được xác định bởi tọa độ điểm đầu và điểm cuối ống. Các sai số được chia thành hai nhóm chính, sai số độ dài liên quan đến quá trình cắt và đẩy tịnh tiến, sai số góc liên quan đến quá trình uốn và đảo chiều, trong đó các sai số góc phức tạp và khó dự đoán hơn, đồng thời có ảnh hưởng lớn hơn đến tọa độ điểm cuối đoạn ống.



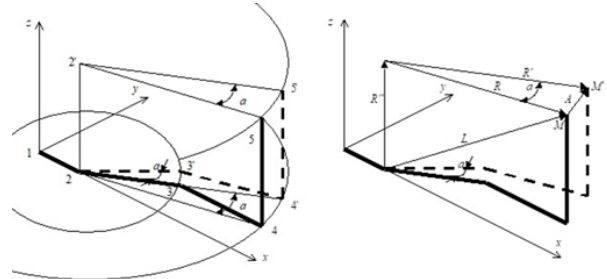
Hình 2. Các dạng sai số trong gia công ống.

Quá trình gia công tạo hình ống thép được thực hiện bởi tổng hợp các công đoạn riêng lẻ với trình tự nhất định, phụ thuộc vào hình dáng đoạn ống. Do đó, việc dự đoán chính xác sai số của điểm cuối ống trong quá trình gia công là không khả thi. Một trong những giải pháp nhằm khắc phục vấn đề trên là đề xuất xây dựng mô hình toán của miền sai số ngay trong giai đoạn thiết kế, đặc biệt là các sai số phát sinh trong các công đoạn uốn ống, qua đó cho phép sơ bộ lên phương án bù hòa miền sai số trong quá trình lắp ráp.

2.2. Phân tích ảnh hưởng của quá trình uốn tới độ chính xác gia công ống thép

Nhằm đánh giá chính xác ảnh hưởng của quá trình uốn tới sai số gia công ống, xét một đoạn ống có hình dáng thiết kế được mô phỏng trong hệ tọa độ không gian ba chiều XYZ với góc tọa độ đặt tại điểm đầu đoạn ống (Hình 3). Đoạn ống được tạo hình với ba điểm uốn tại các vị trí số 2, 3 và 4, trong đó vị trí số 4 có kết hợp đảo chiều ống. Trên hình, vị trí thiết kế lý thuyết được thể hiện bằng nét liền đậm, vị trí thực tế của đoạn ống sau gia công có tính đến các sai số được thể hiện bởi nét đứt.

vị trí thực tế của đoạn ống sau gia công có tính đến các sai số được thể hiện bởi nét đứt.



Hình 3. Vị trí thiết kế lý thuyết và thực tế của đoạn ống.

Xét công đoạn uốn tại điểm 2 được thực hiện xung quanh trục uốn 22' vuông góc với mặt phẳng uốn (123). Độ lệch của một điểm bất kỳ trên đoạn ống dưới ảnh hưởng của độ lệch góc quay uốn (α) được xác định trên mặt phẳng uốn, hoặc trên mặt phẳng song song (255'). Đối với các điểm nút, độ lệch được xác định bởi độ dài cung quay 33' bán kính /23/ đối với nút 3, cung quay 44' bán kính /24/ đối với nút 4 và cung quay 55' bán kính /2'5/ đối với nút 5. Trong đó /23/, /24/, /2'5/ được xác định là các đường tâm bán kính tương ứng với các nút 3, 4, 5: /33'/ = /23/· α , /44'/ = /24/· α , /55'/ = /2'5/· α .

Công thức chung tính độ lệch tại một điểm bất kỳ được xác định bởi: $A = R \cdot \alpha$ trong đó R tương ứng với bán kính tâm quay tại mỗi điểm.

Độ lệch của tọa độ điểm cuối đoạn ống M được mô tả bởi vectơ $A(x_a, y_a, z_a)$, là hiệu của hai vectơ bán kính uốn thực tế và lý thuyết $R'(X', Y', Z')$ và $R(X-X'', Y-Y'', Z-Z'')$:

$$\vec{A} = \vec{R}' - \vec{R} = \vec{R}' - (\vec{L} - \vec{R}'')$$

Trong đó, các vectơ $L(X, Y, Z)$ và $R''(X'', Y'', Z'')$ được thể hiện trên hình 3.

Sai số kích thước của điểm cuối đoạn ống theo các chiều x, y, z dưới ảnh hưởng của độ lệch góc uốn (a) được xác định theo công thức:

$$x_a = X' - (X - X''), y_a = Y'(Y - Y''), z_a = Z' - (Z - Z'')$$

Gọi $N'(N'_x, N'_y, N'_z)$ – Véc tơ pháp tuyến của mặt phẳng uốn, là tích có hướng của hai véc tơ $L_1(X_1, Y_1, Z_1)$ và $L_2(X_2, Y_2, Z_2)$:

$$N'_x = Y_1 \cdot Z_2 - Z_1 \cdot Y_2, N'_y = Z_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot Z_2, N'_z = X_1 \cdot Y_2 - Y_1 \cdot X_2$$

Góc hợp bởi các véc tơ $N'(N'_x, N'_y, N'_z)$ và $L(X, Y, Z)$ được xác định bởi công thức:

$$\cos(\phi) = \frac{N'_x \cdot X + N'_y \cdot Y + N'_z \cdot Z}{\sqrt{N'^2_x + N'^2_y + N'^2_z} \cdot \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}$$

Mặt khác, $R'' = L \cdot \cos(\phi)$ với

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Ta nhận được phương trình:

$$R'' = \frac{N'_x \cdot X + N'_y \cdot Y + N'_z \cdot Z}{\sqrt{N'^2_x + N'^2_y + N'^2_z}}$$

Do các véc tơ $N'(N'_x, N'_y, N'_z)$ và $R''(X'', Y'', Z'')$ cùng phương vuông góc với mặt phẳng uốn, do đó ta được tỉ lệ tương ứng của các véc tơ cùng phương như sau:

$$\frac{X''}{R''} = \frac{N'_x}{N'} \Rightarrow X'' = N'_x \cdot \frac{R''}{N'}$$

$$\frac{Y''}{R''} = \frac{N'_y}{N'} \Rightarrow Y'' = N'_y \cdot \frac{R''}{N'}$$

$$\frac{Z''}{R''} = \frac{N'_z}{N'} \Rightarrow Z'' = N'_z \cdot \frac{R''}{N'}$$

Từ công thức xác định độ dài:

$$N' = \sqrt{N'^2_x + N'^2_y + N'^2_z}$$

Ta nhận được:

$$X'' = \frac{N'_x \cdot (N'_x \cdot X + N'_y \cdot Y + N'_z \cdot Z)}{N'^2_x + N'^2_y + N'^2_z}$$

$$Y'' = \frac{N'_y \cdot (N'_x \cdot X + N'_y \cdot Y + N'_z \cdot Z)}{N'^2_x + N'^2_y + N'^2_z}$$

$$Z'' = \frac{N'_z \cdot (N'_x \cdot X + N'_y \cdot Y + N'_z \cdot Z)}{N'^2_x + N'^2_y + N'^2_z}$$

Góc uốn lý thuyết được xác định bởi góc hợp bởi các véc tơ $N(N_x, N_y, N_z)$ và $R(X-X'', Y-Y'', Z-Z'')$:

$$\cos(\phi) = \frac{N_x \cdot (X - X'') + N_y \cdot (Y - Y'') + N_z \cdot (Z - Z'')}{\sqrt{N^2_x + N^2_y + N^2_z} \cdot \sqrt{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2 + (Z - Z'')^2}}$$

Trong đó, $N(N_x, N_y, N_z)$ – Véc tơ pháp tuyến của mặt phẳng hợp bởi $L(X, Y, Z)$ và $N'(N'_x, N'_y, N'_z)$:

$$N_x = Y \cdot N'_z - Z \cdot N'_y, N_y = Z \cdot N'_x - X \cdot N'_z, N_z = X \cdot N'_y - Y \cdot N'_x$$

Góc uốn trên thực tế có bao gồm các sai số uốn được xác định bởi công thức:

$$\phi' = a + \phi$$

Vậy:

$$\cos(a + \arccos(\frac{N_x \cdot (X - X'') + N_y \cdot (Y - Y'') + N_z \cdot (Z - Z'')}{\sqrt{N^2_x + N^2_y + N^2_z} \cdot \sqrt{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2 + (Z - Z'')^2}})) = \frac{N_x \cdot X' + N_y \cdot Y' + N_z \cdot Z'}{\sqrt{N^2_x + N^2_y + N^2_z} \cdot \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}} \quad (1)$$

Mặt khác, do bán kính uốn tới điểm cuối đoạn ống là không thay đổi, nên:

$$R = R' \Rightarrow \sqrt{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2 + (Z - Z'')^2} = \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2} \quad (2)$$



Phương trình mặt phẳng uốn được xác định bởi phương trình mặt phẳng qua hai véc-tơ $N(N_x, N_y, N_z)$ và $R(X-X'', Y-Y'', Z-Z'')$:

$$\begin{vmatrix} X' & Y' & Z' \\ N_x & N_y & N_z \\ X-X'' & Y-Y'' & Z-Z'' \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

Giải hệ phương trình (1), (2), (3) với các biến số X', Y', Z' cho phép xác định tọa độ thực tế của điểm cuối đoạn ống, đã được tính toán với ảnh hưởng của công đoạn uốn, thông qua đó có thể xác định được miền sai số của điểm cuối đoạn ống có thể xảy ra trong quá trình uốn.

Trong trường hợp tổng quát, độ lệch (A_i) đối với một điểm bất kỳ trên đoạn ống với tọa độ lý thuyết điểm cuối đoạn ống $M(x,y,z)$ dưới ảnh hưởng của độ lệch góc uốn (a_i) (hình 4) được xác định bởi phương trình véc-tơ:

$$A_i \begin{pmatrix} xa_i \\ ya_i \\ za_i \end{pmatrix} = R' \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} - \left(L \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - R'' \begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} \right),$$

Trong đó, véc-tơ $R' \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$ cho phép xác

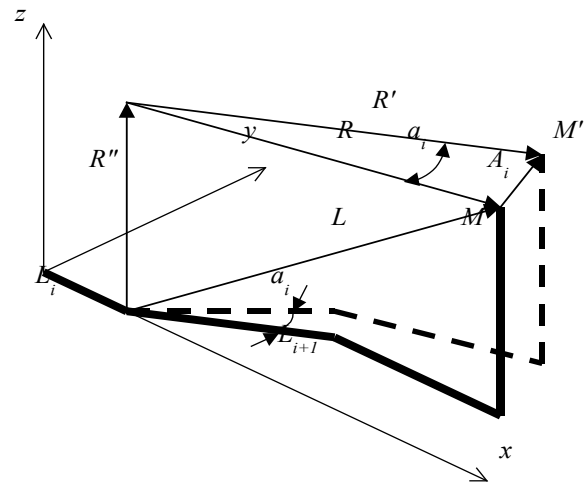
định tọa độ thực tế của điểm cuối đoạn ống là nghiệm của hệ phương trình:

$$\left. \begin{aligned} \cos \left(a_i + \arccos \left(\frac{N \cdot (L-R)}{|N| \cdot |L-R|} \right) \right) &= \frac{N \cdot R'}{|N| \cdot |R'|} \\ |L-R''| &= |R'| \\ R' \cdot N \cdot (L-R'') &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$L \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - x_{i+1} \\ y - y_{i+1} \\ z - z_{i+1} \end{pmatrix};$$

$$R'' \begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} \cdot \frac{(L_i \times L_{i+1}) \cdot L}{|L_i \times L_{i+1}|};$$

$$N = (L \times (L_i \times L_{i+1}))$$



Hình 4. Ảnh hưởng của quá trình uốn tới kích thước tọa độ đoạn ống.

4. KẾT LUẬN

Nội dung nghiên cứu tập trung đánh giá ảnh hưởng của các quy trình công nghệ tới sai số gia công đường ống thép tàu thủy, đặc biệt phân tích ảnh hưởng của quá trình uốn tới độ chính xác của kích thước ống. Kết quả nghiên cứu được thể hiện trong các nội dung sau:

- Phân tích quy trình công nghệ gia công ống thép và các loại sai số phát sinh.

- Xây dựng mô hình toán học cho phép đánh giá xác định tọa độ thực tế và miền sai số

của đoạn ống sau quá trình gia công, dưới ảnh hưởng từ sai số uốn.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở nhằm xây dựng các phương án bù hòa sai số gia công ngay trong giai đoạn thiết kế, cho phép nâng cao tỉ lệ ống được gia công trực tiếp theo bản vẽ thiết kế, nâng cao tính chính xác trong quá trình lắp ráp hệ thống đường ống nói riêng và thi công đóng tàu nói chung.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.51.❖

Ngày nhận bài: **01/4/2025**

Ngày phản biện: **15/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ngô Gia Việt, “Tăng cường tính chính xác lắp ráp của hệ thống đường ống tàu thủy trên cơ sở ứng dụng phép quay các cặp đoạn ống song song”. *Giao thông vận tải*, T9, (2021) 108-111.
- [2]. Ngô Gia Việt, “Mô hình hóa phương án bù hòa sai số trong quá trình lắp ráp hệ thống đường ống tàu thủy”. *Giao thông vận tải*, T9, (9/2023) 87-90.
- [3]. OCT 5.95057-90, “Системы судовые и системы судовых энергетических установок”. *Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов – РТП НПО “Ритм”*.
- [4]. S.-H. Kim, W.-S. Ruy, B. S. Jang, “The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization”. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* (2013), Vol. 5, Is. 3, pp. 468-477. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0146.
- [5]. Y. Ando, H. Kimura, “An automatic piping algorithm including elbows and bends”. *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS2011)*. Trieste, Italy, 20-22, September 2011, Vol. 3, pp. 153-158.