

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ CHẤN ĐẾN BÁN KÍNH CONG CỦA ỐNG

STUDY ON THE INFLUENCE OF FORMING PARAMETERS ON THE BENDING RADIUS OF TUBES

Nguyễn Hoàng Vũ, Nguyễn Phan Anh, Phan Thanh Nhân, Vũ Quang Huy*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144426@student.hcmute.edu.vn; anhnp@hcmute.edu.vn;

nhanpt@hcmute.edu.vn; *huyvq@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Việc tạo hình ống tròn bằng phương pháp bẻ ống là một kỹ thuật quan trọng trong các ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng và ô tô, xuất phát từ nhu cầu sản xuất các bộ phận có độ chính xác, độ bền và chất lượng cao. Phương pháp này cho phép tạo ra các ống tròn với độ chính xác cao mà không làm hỏng cấu trúc vật liệu, giảm thiểu lãng phí và tối ưu hóa chi phí sản xuất. Với sự tiến bộ không ngừng của công nghệ và yêu cầu ngày càng cao về hiệu suất và độ bền của sản phẩm, bẻ ống trở thành yếu tố then chốt trong việc cải tiến và nâng cao hiệu quả sản xuất, đáp ứng nhanh chóng và hiệu quả nhu cầu thị trường. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và phân tích dữ liệu để đánh giá và so sánh bán kính cong của ống tròn inox Ø10mm bằng phương pháp phủ lưới. Nghiên cứu cung cấp thông tin để tối ưu hóa quy trình bẻ ống, góp phần nâng cao độ chính xác và hiệu quả chi phí trong các ứng dụng công nghiệp.

Từ khóa: Thông số chấn; Quy trình chấn kim loại; Sản phẩm dạng ống; Biến dạng dẻo; Ống có thành mỏng.

ABSTRACT

The forming of round tubes through tube bending is a critical technique in industries such as mechanics, construction, and automotive, driven by the need for precise, durable, and high-quality components. This method enables the production of round tubes with high accuracy without compromising material integrity, minimizing waste and optimizing production costs. With continuous technological advancements and increasing demands for product performance and durability, tube bending plays a vital role in enhancing production efficiency and meeting market needs effectively. This article presents the results of experimental research and data analysis to evaluate and compare the bending radii of Ø10mm stainless steel round tubes using the grid overlay method. The study provides insights into optimizing the bending process, contributing to improved manufacturing precision and cost-effectiveness in industrial applications.

Keywords: Forming parameters; Metal forming process; Tubular products; Plastic deformation; Thin-walled tubes.



1. TỔNG QUAN

Sự phát triển của các ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng, ô tô và nội thất tại Việt Nam đã làm nổi bật tầm quan trọng của các quy trình tạo hình kim loại, đặc biệt là kỹ thuật bẻ ống [1]. Bẻ ống, một phương pháp gia công cơ bản, đóng vai trò cốt lõi trong việc tạo ra các sản phẩm ống tròn với hình dạng và kích thước đa dạng, phục vụ nhiều ứng dụng từ kết cấu công trình đến các sản phẩm trang trí [2]. Tuy nhiên, việc đảm bảo độ chính xác, độ bền và tính đồng nhất của các sản phẩm ống cong vẫn đối mặt với nhiều thách thức do ảnh hưởng của các thông số như độ dày vật liệu, lực chấn, bán kính uốn và hạn chế về công nghệ [3]. Các phương pháp bẻ ống truyền thống thường tốn thời gian, công sức và chi phí, dẫn đến hiệu suất sản xuất thấp và giá thành sản phẩm cao, gây bất lợi cho cả doanh nghiệp và người tiêu dùng [4].

Nghiên cứu về ảnh hưởng của các thông số chấn đến bán kính cong của ống mang ý nghĩa kinh tế và xã hội quan trọng, góp phần cải thiện hiệu quả sản xuất và nâng cao chất lượng sản phẩm [5]. Bằng cách tối ưu hóa các thông số kỹ thuật, doanh nghiệp có thể giảm chi phí sản xuất, tăng khả năng cạnh tranh trên thị trường trong nước và quốc tế, đồng thời cung cấp các sản phẩm chất lượng cao đáp ứng nhu cầu ngày càng khắt khe của khách hàng [6]. Các sản phẩm ống cong được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, bao gồm hệ thống dẫn nước và khí trong xây dựng, khung kết cấu trong ngành ô tô, và các sản phẩm nội thất có tính thẩm mỹ cao [7]. Đặc biệt, trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh công nghiệp hóa, việc cải tiến kỹ thuật bẻ ống không chỉ giúp giảm phụ thuộc vào sản phẩm nhập khẩu mà còn thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành sản xuất [8].

Một trong những yếu tố quan trọng trong quá trình bẻ ống là kiểm soát bán kính cong, vì thông số này ảnh hưởng trực tiếp đến tính chất cơ học, độ bền và thẩm mỹ của sản phẩm [9]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng các thông số như lực chấn, tốc độ chấn, độ dày thành ống và loại vật liệu có thể tác động đáng kể đến hình dạng và chất lượng của ống cong [10]. Tuy nhiên, việc xác định các điều kiện tối ưu để đạt được bán kính cong mong muốn với độ chính xác cao vẫn là một thách thức, đặc biệt khi áp dụng vào các loại ống thành mỏng [11]. Ngoài ra, các khuyết tật như nứt, biến dạng hoặc giảm độ dày thành ống trong quá trình uốn có thể làm giảm chất lượng sản phẩm, đòi hỏi sự phân tích kỹ lưỡng về mối quan hệ giữa các thông số chấn và kết quả tạo hình [12].

Nghiên cứu này tập trung phân tích ảnh hưởng của các thông số chấn (lực chấn, tốc độ chấn, góc uốn, và độ dày vật liệu) đến bán kính cong của ống, nhằm xác định các điều kiện tối ưu để nâng cao hiệu suất và chất lượng sản xuất. Phương pháp phủ lưới được sử dụng để đo đạc và phân tích bán kính cong, cung cấp dữ liệu chính xác về hình dạng và kích thước của ống sau khi uốn. Kết quả thực nghiệm không chỉ đóng góp vào việc cải thiện quy trình tạo hình ống thành mỏng mà còn cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để giảm lãng phí vật liệu, tối ưu hóa chi phí sản xuất và nâng cao tính cạnh tranh của sản phẩm trong nước so với hàng nhập khẩu.

Hơn nữa, nghiên cứu mở ra các hướng phát triển mới, chẳng hạn như thử nghiệm với các loại vật liệu khác nhau, cải tiến thiết kế khuôn chấn, hoặc tích hợp các công nghệ điều khiển tự động tiên tiến để tăng độ chính xác và tính linh hoạt trong sản xuất [13]. Những cải tiến này có tiềm năng thúc đẩy sự đổi mới trong

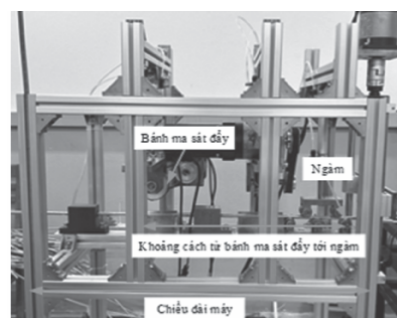
ngành công nghiệp gia công kim loại, đồng thời hỗ trợ các doanh nghiệp Việt Nam đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế. Cuối cùng, nghiên cứu góp phần vào mục tiêu phát triển bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí tài nguyên, tối ưu hóa quy trình sản xuất và nâng cao chất lượng sản phẩm, từ đó cải thiện chất lượng cuộc sống và khả năng cạnh tranh của ngành công nghiệp Việt Nam trên trường quốc tế [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

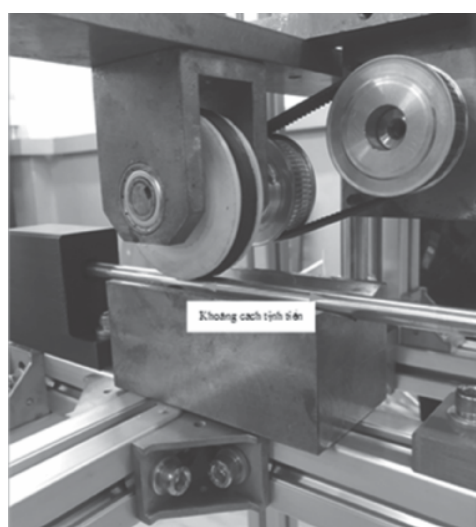
Quá trình tạo hình ống tròn bằng phương pháp bẻ ống là một kỹ thuật quan trọng trong gia công kim loại, đặc biệt trong các ngành cơ khí, xây dựng và ô tô. Cơ sở lý thuyết của nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích các thông số ảnh hưởng đến bán kính cong của ống, bao gồm độ dày vật liệu, lực bẻ, khoảng cách tịnh tiến, hành trình chẵn và khoảng cách ngàm. Những yếu tố này quyết định độ chính xác, độ bền và tính đồng nhất của sản phẩm, đồng thời ảnh hưởng đến hiệu suất và chi phí sản xuất.

Phương pháp phủ lưới được áp dụng để xác định các thông số tối ưu cho quá trình thực nghiệm. Phương pháp này cho phép phân chia các biến số thành các tập hợp giá trị cụ thể, tạo điều kiện để đánh giá toàn diện tác động của từng thông số đến kết quả đầu ra. Các thông số đầu vào, như khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), hành trình chẵn (3-5 mm) và khoảng cách ngàm (30-54 mm), được thiết lập và nhập vào phần mềm Excel để lập kế hoạch thực nghiệm. Sau khi thực hiện các thí nghiệm theo số lần bẻ được xác định từ phương pháp phủ lưới, sản phẩm ống tròn được đo đặc kỹ lưỡng để xác định bán kính cong trong và ngoài. Các phép đo này đảm bảo độ chính xác cao trong việc thu thập dữ liệu.

Dữ liệu thu thập được phân tích bằng Excel để xây dựng các biểu đồ miền, giúp trực quan hóa mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và đầu ra. Các biểu đồ này cho phép xác định các giá trị tối ưu, chẳng hạn như khoảng cách tịnh tiến 12 mm, hành trình chẵn 3 mm và khoảng cách ngàm 30 mm, đạt độ cong lớn nhất trong một số trường hợp. Phân tích này cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa quy trình bẻ ống, giảm thiểu biến dạng không mong muốn và nâng cao hiệu quả sản xuất. Đồng thời, lý thuyết về biến dạng dẻo và cơ học vật liệu được áp dụng để giải thích hiện tượng uốn cong, đảm bảo sản phẩm đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật và thẩm mỹ. Nghiên cứu này đặt nền tảng cho việc cải tiến công nghệ bẻ ống, hỗ trợ sản xuất bền vững và cạnh tranh.



Hình 1. Thiết bị thí nghiệm



Hình 2. Khoảng cách tịnh tiến



3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phủ lưới để xác định các thông số tối ưu cho quá trình bể ống, tập trung vào ba thông số ảnh hưởng đến bán kính cong của sản phẩm: khoảng cách tịnh tiến (a), khoảng cách ngàm tới con lăn bể ống (b) và hành trình chấn (c). Phương pháp phủ lưới chia không gian thông số thành các ô lưới nhỏ, cho phép đánh giá toàn diện các tổ hợp giá trị trong khoảng xác định, nhằm tìm ra các điều kiện tối ưu với số lượng thí nghiệm tối thiểu.

Bước 1 – Xác định không gian lưới:

Ba thông số được chọn với các khoảng giá trị: khoảng cách tịnh tiến (a: 4, 8, 12, 16, 20 mm), khoảng cách ngàm (b: 30, 36, 42, 48, 54 mm) và hành trình chấn (c: 3, 3.5, 4, 4.5, 5 mm). Mỗi thông số được chia thành 5 giá trị, tạo ra không gian lưới ba chiều với $5 \times 5 \times 5 = 125$ tổ hợp.

Bước 2 – Xây dựng lưới phủ: Tất cả 125 tổ hợp của ba thông số được tạo ra để đảm bảo phủ kín không gian thí nghiệm. Các tổ hợp này được lập thành bảng với 125 hàng, mỗi hàng đại diện cho một trường hợp, gồm 8 cột: số thứ tự, ba cột cho giá trị đầu vào (a, b, c) và bốn cột

cho kết quả đầu ra (bán kính cong đo lần thứ nhất R_1 , lần thứ hai R_2 , lần thứ ba R_3 và bán kính trung bình R_{TB}).

Bước 3 – Thực nghiệm và đo đạc: Do số lượng tổ hợp lớn, nghiên cứu chọn ba trường hợp đại diện (TH1, TH2, TH3) với 15 tổ hợp để thực nghiệm, trong đó khoảng cách tịnh tiến (a) thay đổi từ 4-20 mm, còn các thông số b và c được giữ cố định:

- TH1: b = 30 mm, c = 3 mm;
- TH2: b = 36 mm, c = 4 mm;
- TH3: b = 42 mm, c = 5 mm.

Sau khi bể ống theo các thông số đầu vào, bán kính cong của sản phẩm được đo ba lần (R_1 , R_2 , R_3) để tính giá trị trung bình (R_{TB}), đảm bảo độ chính xác.

Bước 4 – Phân tích dữ liệu: Dữ liệu được nhập vào Excel để xây dựng bảng và biểu đồ miền, phân tích mối quan hệ giữa thông số đầu vào và bán kính cong. Kết quả giúp xác định các giá trị tối ưu, cải thiện hiệu suất và độ chính xác của quy trình bể ống, đồng thời giảm thiểu biến dạng không mong muốn.

Bảng 1. Khoảng thông số sau khi chia theo phương pháp phủ lưới

Thông số đầu vào	Khoảng giá trị				
Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	$a_1 = 4$	$a_2 = 8$	$a_3 = 12$	$a_4 = 16$	$a_5 = 20$
Khoảng cách ngàm tới con lăn bể ống (b) (mm)	$b_1 = 30$	$b_2 = 36$	$b_3 = 42$	$b_4 = 48$	$b_5 = 54$
Hành trình chấn (c) (mm)	$c_1 = 3$	$c_2 = 3.5$	$c_3 = 4$	$c_4 = 4.5$	$c_5 = 5$

Bảng 2. Thông số thí nghiệm

STT	Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	Khoảng cách ngàm tới con lăn bể ống (b) (mm)	Hành trình chấn (c) (mm)
1	4	36	4
2	8	36	4
3	12	36	4
4	16	36	4
5	20	36	4

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Quá trình đo đặc bán kính cong của ống sau khi bẻ được thực hiện bằng dụng cụ đo chuyên dụng trên bàn máy CNC. Đồng hồ đo được căn chỉnh về 0 bằng cách đặt ba điểm tiếp xúc thẳng hàng với căn mẫu, đảm bảo hiển thị “CCCC” và bốn số 0. Để xác nhận độ chính xác, quá trình căn chỉnh được lặp lại, đảm bảo không có sai lệch. Sau khi thiết lập, bán kính cong của ống được đo ba lần (R_1 , R_2 , R_3) tại ba vị trí khác nhau, và giá trị trung bình (R_{TB}) được tính để đánh giá kết quả.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

Thông số đầu ra					
Tổ hợp	STT	R_1 (mm)	R_2 (mm)	R_3 (mm)	R_{TB} (mm)
1	1387,8	1372,5	1385,267		
	1504,9	1495,9	1498,900		
	1	1387,8	1387,8	1372,5	1385,267
	2	991,19	1504,9	1495,9	1498,900
	3	1049,5	1387,8	1387,8	2818,333
	4	1167,2	991,19	1504,9	1508,100
	5	1274,5	1049,5	2839,6	2059,433
2	1	1387,8	1167,2	1514	1377,633
	2	991,19	1274,5	1249	982,197
	3	1049,5	2839,6	2807,7	1072,333
	4	1167,2	1514	1487	1156,467
	5	1274,5	1249	1218,5	1247,333
3	1	813,59	824,33	811,973	742,023
	2	818,93	824,33	829,983	811,973
	3	964,39	968,13	963,173	829,983
	4	734,64	738,98	735,367	963,173
	5	732,48	734,64	738,98	735,367



Kết quả đo đạc cho 15 trường hợp thuộc ba tổ hợp (TH1, TH2, TH3) được trình bày trong Bảng 3. Cụ thể: TH1 ($b = 30$ mm, $c = 3$ mm): Bán kính trung bình cao nhất đạt 2818,333 mm khi $a = 12$ mm, thấp nhất là 1385,267 mm khi $a = 4$ mm. TH2 ($b = 36$ mm, $c = 4$ mm): Bán kính trung bình cao nhất đạt 1377,633 mm khi $a = 4$ mm, thấp nhất là 982,197 mm khi $a = 8$ mm. TH3 ($b = 42$ mm, $c = 5$ mm): Bán kính trung bình cao nhất đạt 963,173 mm khi $a = 16$ mm, thấp nhất là 735,367 mm khi $a = 20$ mm.

Dữ liệu được nhập vào Excel để xây dựng biểu đồ miền, trực quan hóa mối quan hệ giữa các thông số đầu vào (khoảng cách tịnh tiến, khoảng cách ngàm, hành trình chấn) và bán kính cong. Các biểu đồ cho thấy sự thay đổi rõ rệt của bán kính cong theo từng tổ hợp thông số.



Hình 3. Sản phẩm nhóm 1



Hình 4. Sản phẩm nhóm 2



Hình 5. Sản phẩm nhóm 3

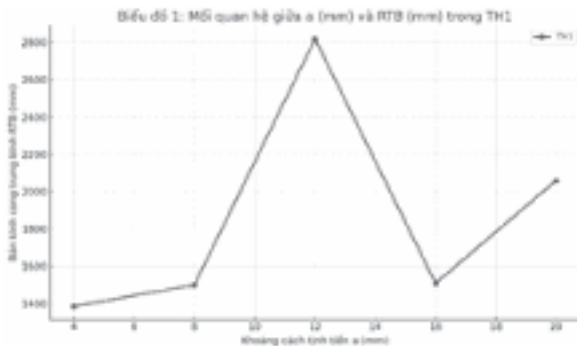
Phân tích biểu đồ miền cho thấy các thông số đầu vào có ảnh hưởng đáng kể đến bán kính cong. Trong TH1, tổ hợp $a = 12$ mm, $b = 30$ mm, $c = 3$ mm tạo ra bán kính cong lớn nhất, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ cong cao. Ngược lại, TH2 và TH3 cho thấy bán kính cong giảm khi khoảng cách ngàm và hành trình chấn tăng, với giá trị tối ưu tại $a = 16$ mm. Điều này chỉ ra rằng sự cân bằng giữa các thông số là yếu tố then chốt để đạt hiệu quả tối đa.

Kết quả cũng phản ánh hạn chế của các thông số không tối ưu, như trong TH2 với $a = 8$ mm, dẫn đến bán kính cong thấp, ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm. Việc sử dụng phương pháp phủ lưới và phân tích Excel đã giúp xác định chính xác các giá trị tối ưu, giảm thiểu thử nghiệm không cần thiết. Tuy nhiên, nghiên cứu chỉ tập trung vào ống inox 201, cần mở rộng sang các vật liệu khác để tăng tính ứng dụng. Tích hợp công nghệ điều khiển tiên tiến trong tương lai có thể cải thiện độ chính xác và hiệu suất, hỗ trợ sản xuất bền vững.

Hình 6 cho thấy bán kính cong đạt giá trị cao nhất (2818,333 mm) khi $a = 12$ mm. Trước và sau giá trị này, R_{TB} có xu hướng tăng lên rồi giảm xuống, tạo nên dạng “hình chuông”. Điều này chứng minh rằng khi khoảng cách tịnh tiến được tối ưu (ở $a = 12$ mm), lực tác động trong quá trình uốn được phân bố đều, giúp tạo ra bán kính cong lớn nhất. Ngược lại, khi a nhỏ hơn hoặc lớn hơn 12 mm, lực phân bố không đồng đều dẫn đến bán kính cong giảm.

Sự biến thiên này rất quan trọng trong việc thiết lập chương trình uốn ống tự động trên máy CNC. Với bán kính cong lớn, sản phẩm có khả năng chịu tải tốt hơn trong một số ứng dụng cơ khí. Tuy nhiên, điều này có thể không cần thiết hoặc không phù hợp trong các ứng

dụng yêu cầu bán kính cong nhỏ hơn để tiết kiệm không gian lắp đặt.



Hình 6. Bán kính ống thay đổi với nhóm thí nghiệm 1

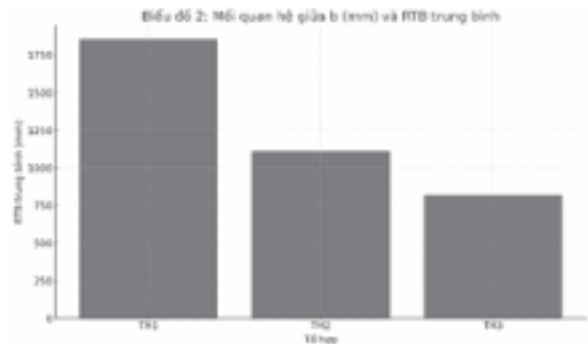
Hình 7 cho thấy bán kính cong trung bình giảm dần khi b tăng từ 30 mm lên 42 mm. Điều này giải thích rằng khi khoảng cách ngàm tăng, lực uốn tập trung hơn vào phần giữa ống, dẫn đến độ cong nhỏ hơn. Đây là hiện tượng dễ quan sát trong uốn ống, vì khoảng cách ngàm lớn đồng nghĩa với việc khu vực chịu lực uốn bị thu hẹp.

Từ kết quả này, có thể rút ra kết luận rằng để đạt được bán kính cong lớn, khoảng cách ngàm nên được giữ nhỏ. Tuy nhiên, giảm b quá nhiều có thể dẫn đến nguy cơ nứt gãy ống hoặc biến dạng không mong muốn. Việc lựa chọn b hợp lý cần tính đến yêu cầu ứng dụng cụ thể, đảm bảo độ bền và hình dáng sản phẩm.

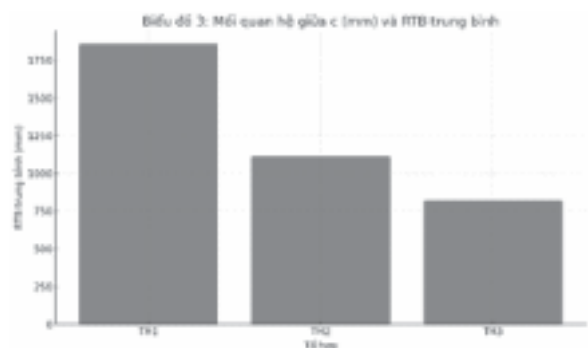
Từ Hình 8, có thể nhận thấy rõ ràng rằng khi hành trình chần tăng từ 3 mm lên 5 mm, bán kính cong giảm mạnh. Hành trình chần lớn làm cho lực tác động sâu hơn vào vật liệu, ép chặt ống hơn, dẫn đến độ cong giảm.

Phân tích sâu hơn chỉ ra rằng hành trình chần (c) đóng vai trò quyết định trong việc điều chỉnh bán kính cong, đặc biệt là trong giai đoạn hoàn thiện uốn ống. Trong TH3 với c = 5 mm,

R_{TB} chỉ còn 816,904 mm, phù hợp với các ứng dụng yêu cầu bán kính nhỏ như hệ thống ống dẫn chật hẹp. Ngược lại, c nhỏ hơn (TH1, 3 mm) giúp duy trì bán kính lớn, thích hợp với các sản phẩm yêu cầu tính thẩm mỹ hoặc khả năng uốn cong cao.



Hình 7. So sánh bán kính trong 3 trường hợp



Hình 8. Quan hệ giữa thông số c và bán kính ống

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu chế tạo và tối ưu hóa module bẻ ống tròn đã đạt được những kết quả quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả quy trình uốn ống inox 201 trong sản xuất công nghiệp. Kết quả thực nghiệm cho thấy các thông số như khoảng cách tịnh tiến (12 mm), hành trình chần (3 mm) và khoảng cách ngàm (30 mm) ở TH1 mang lại bán kính cong tối ưu, trong khi các giá trị không phù hợp làm giảm hiệu quả. Phương pháp phủ lưới kết hợp với phân tích Excel đã giúp xác định chính xác các thông số tối ưu, 

giảm thiểu lãng phí vật liệu và chi phí sản xuất so với nhập khẩu. Module này đáp ứng nhu cầu đa dạng trong các ngành ô tô, cơ khí và xây dựng, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới về tự động hóa. Tuy nhiên, hạn chế của nghiên cứu nằm ở phạm vi thử nghiệm tập trung vào inox 201. Trong tương lai, việc mở rộng thử nghiệm trên các vật liệu khác và tích hợp công nghệ điều khiển tiên tiến sẽ nâng cao hiệu suất và tính linh hoạt. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để thúc đẩy sản xuất bền vững, tăng cường năng lực cạnh tranh của ngành công nghiệp chế tạo Việt Nam.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Hoàng Vũ, Nguyễn Phan Anh, Phan Thanh Nhân, Vũ Quang Huy.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-357.❖

Ngày nhận bài: 05/5/2025

Ngày phản biện: 22/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Li, M., Xu, Y., Zhang, S. H., & et al. (2020), "Effect of pre-bending and hydroforming on thickness distribution for automobile decorative tailpipe". Forging & Stamping Technology, 45(3), 41-46.
- [2]. Zong, H. C., Shao, X. L., Cheng, C., & et al. (2022), "Investigation on variation characteristics of bent tube axis and determination of bending die motion trajectory in free bending process". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 124(10), 3371-3389.
- [3]. Long, L., Jian, J. W., Meng, Y. W., & et al. (2024), "A novel acquisition strategy of process parameters for spatial tubes with variable curvature formed by free bending technology". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 132(7-8), 4069-4086.
- [4]. Cui, X. L., Wang, X. S., & Yuan, S. J. (2015), "The bulging behavior of thick-walled 6063 aluminum alloy tubes under double-sided pressures". Journal of Occupational Medicine, 67, 909-915.
- [5]. Wang, X., Yuan, S., Peng, S., & et al. (2012), "Plastic deformation on hydroforming of aluminum alloy tube with rectangular sections". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22, s350-s356.
- [6]. He, Z. R., Li, G. J., Yang, J. C., & et al. (2023), "Insight into the deformation transition effect in free bending of tubes". Materials Letters, 348, Article 134673.
- [7]. Yan, L. L., Shuo, W., Quan, Q., & et al. (2023), "Theoretical and experimental research on a novel bending process for high-strength steel thin-walled tubes". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 129(5-6), 2457-2474.
- [8]. Li, Q. N., Qi, Z., & Bin, H. (2022), "Material characteristics evaluation for DC04-welded tube hydroforming". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 119(11-12), 7075-7088.
- [9]. Zhang, X., Zhao, C. C., Du, B., & et al. (2021), "Research on hydraulic push-pull bending process of ultra-thin-walled tubes". Metals, 11(12), 14.
- [10]. Yuan, S. J. (2020), "Fundamentals and processes of fluid pressure forming technology for complex thin-walled components". Engineering, 7(3), 358-366.
- [11]. Marlapalle, B. G., & Hingole, R. S. (2023), "Numerical and experimental predictions of formability parameters in tube hydroforming process". Australian Journal of Mechanical Engineering, 21(3), 991-1007.
- [12]. Feng, Y., Jia, Y., Chen, G., & et al. (2024), "Predictive modeling of loading paths for hydroforming of bi-layered y-shaped tubes". International Journal of Material Forming, 17(4), 40.
- [13]. Wei, L., Xu, X., Fan, Y., & et al. (2022), "Multi-step hydroforming process and wall thickness optimization of 5A02 aluminum alloy five-way tube with different branch diameters". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 120(9), 6365-6375.
- [14]. Ghorbani-Menghari, H., Kahhal, P., Jung, J., & et al. (2023), "Multi-objective evolutionary neural network optimization of process parameters for double-stepped tube hydroforming". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 24(6), 915-929.