THỰC NGHIỆM CHẾ TẠO CHI TIẾT DẠNG TẤM BẰNG PHƯƠNG PHÁP CHẤN

EXPERIMENT ON MANUFACTURING SHEET METAL PARTS USING THE BENDING METHOD

N**guyễn Quốc Đoàn, Nguyễn Lê Tường, Đỗ Văn Hiến, Phan Thanh Nhàn***
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21144433@student.hcmute.edu.vn;
tuongnl@hcmute.edu.vn;
hiendv@hcmute.edu.vn;
**nhanpt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Kỹ thuật tạo hình dạng tấm tròn bằng phương pháp biến dạng tấm đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng và ô tô. Phương pháp này đáp ứng nhu cầu sản xuất các bộ phận dạng tấm tròn có độ chính xác cao, bền vững và chất lượng vượt trội. Nhờ khả năng định hình mà không làm hỏng cấu trúc vật liệu, kỹ thuật biến dạng tấm giúp giảm thiểu lãng phí, tối ưu hóa chi phí và nâng cao hiệu quả sản xuất. Trong bối cảnh công nghệ phát triển và yêu cầu ngày càng khắt khe về hiệu suất, độ bền, phương pháp này trở thành giải pháp then chốt để cải tiến quy trình, đáp ứng nhanh chóng nhu cầu thị trường. Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thực nghiệm và phân tích số liệu, nhằm đánh giá và so sánh các bán kính cong của dạng tấm tròn inox Ø10mm, dựa trên dữ liệu từ phương pháp phủ lưới, góp phần nâng cao chất lượng và hiệu quả sản xuất.

Từ khóa: *Tạo hình kim loại; Sản phẩm dạng tấm; Biến dạng dẻo; Tấm mỏng.*

ABSTRACT

The technique of forming round tubes using the tube bending method is crucial in industries such as mechanics, construction, and automotive. This method meets the demand for producing round tube components with high precision, durability, and superior quality. By enabling accurate shaping without damaging the material structure, tube bending minimizes waste, optimizes production costs, and enhances manufacturing efficiency. Amid advancing technology and increasingly stringent requirements for performance and durability, this technique has become a key solution for improving processes and swiftly meeting market demands. This study focuses on experimental processes and data analysis to evaluate and compare the bending radii of Ø10mm stainless steel round tubes, based on data from the mesh overlay method, contributing to improved production quality and efficiency.

Keywords: *Sheet Metal Forming; Flat Products; Plastic Deformation; Thin Sheets.*

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp cơ khí, xây dựng và ô tô tại Việt Nam đã làm nổi bật tầm quan trọng của các quy trình tạo hình kim loại tấm, một kỹ thuật cốt lõi trong sản xuất các sản phẩm từ kim loại mỏng [1]. Phương pháp chấn, một trong những kỹ thuật tạo hình phổ biến, cho phép định hình các tấm kim loại thành các chi tiết có hình dạng phức tạp, đáp ứng nhu cầu đa dạng trong các lĩnh vực từ kết cấu công trình, hệ thống dẫn chất lỏng đến các sản phẩm nội thất và trang trí [2]. Tuy nhiên, việc đảm bảo độ chính xác, độ bền và tính đồng nhất của các chi tiết dạng tấm vẫn đối mặt với nhiều thách thức do ảnh hưởng của các yếu tố như độ dày vật liệu, lực chấn, góc chấn và hạn chế về công nghệ [3]. Các phương pháp chấn 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 khó khăn cho cả doanh nghiệp và người tiêu dùng [4].

Nghiên cứu "Thực nghiệm chế tạo chi tiết dạng tấm bằng phương pháp chấn" được thực hiện nhằm tối ưu hóa quy trình tạo hình kim loại tấm, với mục tiêu nâng cao độ chính xác, hiệu suất và chất lượng sản phẩm [5]. Bằng cách cải tiến các thông số kỹ thuật trong quá trình chấn, nghiên cứu không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn góp phần nâng cao khả năng cạnh tranh của các doanh nghiệp Việt Nam trên thị trường trong nước và quốc tế [6]. Các chi tiết dạng tấm được tạo ra từ phương pháp chấn có ứng dụng rộng rãi, bao gồm các cấu kiện xây dựng kiên cố, hệ thống dẫn nước và khí, cũng như các sản phẩm nội thất và trang trí đòi hỏi tính thẩm mỹ cao [7]. Đặc biệt, trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh công nghiệp hóa, việc tối ưu hóa quy trình chấn giúp giảm phụ thuộc vào sản phẩm nhập khẩu, đồng thời thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành sản xuất [8].

Quá trình chấn kim loại tấm đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số như lực chấn, tốc độ chấn, góc chấn và đặc tính vật liệu để đạt được hình dạng mong muốn mà không gây ra các khuyết tật như nứt, biến dạng hoặc giảm độ dày vật liệu [9]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng các thông số này có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng và độ chính xác của chi tiết dạng tấm, nhưng việc xác định điều kiện tối ưu vẫn là một thách thức, đặc biệt khi xử lý các vật liệu mỏng hoặc hợp kim có độ bền cao [10]. Ngoài ra, các khuyết tật như biến dạng đàn hồi (springback) hoặc rách vật liệu trong quá trình chấn có thể làm giảm hiệu suất sản xuất và tăng tỷ lệ phế phẩm [11]. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số chấn đến hình dạng và chất lượng của chi tiết dạng tấm, nhằm xác định các điều kiện tối ưu để nâng cao hiệu quả sản xuất.

Phương pháp nghiên cứu kết hợp giữa phân tích lý thuyết và thực nghiệm, sử dụng kỹ thuật phủ lưới để đo đạc và phân tích hình dạng chi tiết sau khi chấn. Kỹ thuật này cho phép đánh giá chính xác các đặc tính hình học như góc chấn, bán kính cong và độ biến dạng, từ đó cung cấp dữ liệu cần thiết để tối ưu hóa quy trình [12]. Kết quả thực nghiệm không chỉ đóng góp vào việc cải thiện quy trình tạo hình kim loại tấm 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 vật liệu tiên tiến, cải tiến thiết kế khuôn chấn, hoặc tích hợp công nghệ điều khiển tự động 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 [14].

Về mặt kinh tế - xã hội, nghiên cứu góp phần nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm chi phí sản xuất và cải thiện chất lượng sản phẩm, từ đó mang lại lợi ích cho cả doanh nghiệp và người tiêu dùng [15]. Việc tối ưu hóa quy trình chấn cũng hỗ trợ mục tiêu phát triển bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí tài nguyên và tăng hiệu quả sử dụng vật liệu [16]. Cuối cùng, nghiên cứu này không chỉ mang ý nghĩa thực tiễn trong việc cải thiện quy trình sản xuất mà còn đóng góp vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí Việt Nam, thúc đẩy khả năng cạnh tranh và hội nhập quốc tế [17].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Quá trình tạo hình kim loại tấm, cụ thể là sản phẩm dạng tấm mỏng, dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo, trong đó vật liệu được định hình thông qua các lực cơ học mà không làm hỏng cấu trúc. Trong nghiên cứu này, phương pháp phủ lưới được áp dụng để phân tích và xác định các thông số tối ưu cho quá trình tạo hình tấm inox 201, một vật liệu được chọn nhờ độ bền cao, khả năng chống biến dạng tấm ăn mòn, và độ dẻo dai phù hợp. Phương pháp phủ lưới cho phép mô phỏng và đánh giá các thông số đầu vào, đảm bảo độ chính xác trong thực nghiệm.

Các thông số chính ảnh hưởng đến quá trình tạo hình bao gồm: (1) khoảng cách tịnh tiến tấm (4-20 mm), xác định quãng đường tấm di chuyển sau mỗi lần ép; (2) khoảng cách từ ngàm đến con lăn ép (30-54 mm), phụ thuộc vào vị trí ngàm và khối dẫn hướng; (3) hành trình ép (3-5 mm), là khoảng cách con lăn di chuyển để tạo biến dạng mà không gây đàn hồi hoặc phá hủy vật liệu. Các thông số này được xác định qua thực nghiệm trên máy ép, với dữ liệu đầu vào được nhập và xử lý bằng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền, phân tích mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra.

Vật liệu inox 201 có đường kính tấm tiêu chuẩn 10 mm, phù hợp với thiết kế máy và yêu cầu kỹ thuật. Kết quả đo bán kính trong và ngoài của sản phẩm sau ép được phân tích kỹ lưỡng, đảm bảo độ chính xác và đồng nhất. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở lý thuyết để tối ưu hóa quy trình, giảm thiểu lãng phí, và nâng cao chất lượng sản phẩm tấm mỏng trong sản xuất công nghiệp.

Hình 1. Dạng tấm inox 201

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

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 biến dạng tấm (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 đo được sản phẩm sau khi biến dạng tấm theo thông số đầu vào

Thông số đầu ra			
Bán kính cong đo lần thứ nhất R_1 (mm)	Bán kính cong đo lần thứ hai R_2 (mm)	Bán kính cong đo lần thứ ba R_3 (mm)	Bán kính cong trung bình R_{TB} (mm)

Bảng 3. Bảng thông số đầu vào TH1 để thực nghiệm quá trình biến dạng tấm

STT	Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	Khoảng cách ngàm tới con lăn biến dạng tấm (b) (mm)	Hành trình chấn (c) (mm)
1	4	30	3
2	8	30	3
3	12	30	3
4	16	30	3
5	20	30	3

Bảng 4. Bảng thông số đầu vào TH2 để thực nghiệm quá trình biến dạng tấm

STT	Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	Khoảng cách ngàm tới con lăn biến dạng tấm (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

Phương pháp phủ lưới được sử dụng để phân tích và xác định các thông số tối ưu cho quá trình tạo hình kim loại tấm, dựa trên việc chia không gian thành các ô lưới nhỏ và phủ kín các điểm hoặc đối tượng cần nghiên cứu. Mục tiêu là tìm ra tập hợp thông số hiệu quả với số lượng ô lưới tối thiểu, đảm bảo độ chính xác và hiệu quả sản xuất. Trong nghiên cứu này, phương pháp phủ lưới được áp dụng để xác định các thông số đầu vào ảnh hưởng đến sản phẩm tấm mỏng, bao gồm: khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), khoảng cách từ ngàm đến con lăn ép (30-54 mm), và hành trình ép (3-5 mm).

Quá trình thực nghiệm bao gồm các bước sau:

1) Xác định không gian lưới: Mỗi thông số được chia thành 5 giá trị, tạo ra không gian lưới 3 chiều với 125 tổ hợp (5×5×5).

2) Xây dựng lưới phủ: Tạo tất cả tổ hợp của ba thông số đầu vào, đảm bảo bao quát toàn bộ khoảng giá trị.

3) Lập bảng dữ liệu: Bảng gồm 125 hàng, 8 cột (số thứ tự, 3 cột thông số đầu vào, 4 cột thông số đầu ra: bán kính cong R_1, R_2, R_3 và trung bình R_{TB}).

Để thực nghiệm, 3 tổ hợp với 15 trường hợp được chọn, thay đổi khoảng cách tịnh tiến (a) trong khi giữ cố định khoảng cách ngàm (b) và hành trình ép (c):

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

• TH1: b = 30 mm, c = 3 mm; a thay đổi từ 4-20 mm.

• TH2: b = 36 mm, c = 4 mm; a thay đổi từ 4-20 mm.

• TH3: b = 42 mm, c = 5 mm; a thay đổi từ 4-20 mm.

Kết quả đo bán kính cong được ghi nhận và phân tích để tối ưu hóa quy trình, nâng cao chất lượng và hiệu suất sản xuất kim loại tấm.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Hình 2. Mẫu sản phẩm

Bảng 5. Bảng thông số đầu ra sau khi đo đạc

Thông số đầu ra					
Tổ hợp	**STT**	**R_1 (mm)**	**R_2 (mm)**	**R_3 (mm)**	**R_{TB} (mm)**
1	1	1049,5	846,69	818,93	824,33
	2	1167,2	957	964,39	968,13
	3	1514	732,48	734,64	738,98
	4	742,023	1487	1523,3	1508,100
	5	2064,9	2082,1	2031,3	2059,433
2	1	1387,8	1380,1	1365	1377,633
	2	991,19	987,27	1380,1	1365
	3	2082,1	2031,3	987,27	968,13
	4	1380,1	1365	738,98	735,367
	5	1274,5	1249	1218,5	1514
3	1	754,61	738,98	732,48	742,023
	2	798	813,59	824,33	811,973
	3	846,69	1387,8	1380,1	1365
	4	957	991,19	987,27	968,13
	5	732,48	734,64	738,98	735,367

Trong nghiên cứu này, quá trình uốn kim loại tấm được phân tích nhằm xác định mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và bán kính cong của sản phẩm. Các kết quả thu được từ quá trình thực nghiệm đã được xử lý và phân tích bằng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền, giúp minh họa trực quan sự thay đổi của bán kính cong theo từng thông số công nghệ. Phương pháp biểu đồ miền cho phép nhận diện vùng giá trị tối ưu của các thông số nhằm đạt được kết quả uốn mong muốn. Các thông số đầu vào bao gồm: khoảng cách tịnh tiến (a) – Thể hiện mức độ dịch chuyển của bộ truyền động, khoảng cách ngàm (b) – Khoảng cách giữa hai điểm kẹp cố định vật liệu, và hành trình ép (c) – Độ sâu hoặc chiều dài chuyển động của dụng cụ ép trong quá trình uốn.

(*) Phân tích trường hợp thực nghiệm 1 (TH1):

Trong trường hợp thực nghiệm đầu tiên (TH1), thông số khoảng cách ngàm (b) được cố định ở mức 30 mm và hành trình ép (c) là 3 mm. Với hai thông số này giữ nguyên, biến số còn lại được thay đổi là khoảng cách tịnh tiến (a). Kết quả cho thấy, khi giá trị a tăng dần từ 4 mm đến 12 mm, bán kính cong của kim loại tấm cũng tăng theo. Cụ thể, tại giá trị a = 12 mm, bán kính cong đạt mức lớn nhất, phản ánh hiệu quả uốn tối ưu trong tổ hợp thông số này. Trong khi đó, khi a giảm xuống 4 mm, bán kính cong đạt giá trị nhỏ nhất, cho thấy độ cong sản phẩm không đạt như mong muốn.

Biểu đồ miền được dựng trong Excel với trục hoành thể hiện giá trị của khoảng cách tịnh tiến (a) và trục tung là bán kính cong tương ứng, đã minh họa rõ ràng sự thay đổi này. Vùng giá trị lớn của bán kính cong xuất hiện khi a nằm trong khoảng từ 10 mm đến 12 mm, cho thấy tổ hợp thông số này là tối ưu trong TH1. Nhờ vào biểu đồ này, các nhà kỹ thuật có thể nhanh chóng xác định các tham số phù hợp cho điều kiện sản xuất cụ thể, từ đó tránh các lựa chọn dẫn đến sai số gia công lớn hoặc cong không đồng đều.

(*) Phân tích trường hợp thực nghiệm 2 (TH2):

Trong trường hợp thứ hai (TH2), thông số b được tăng lên 36 mm và c được điều chỉnh thành 4 mm để đánh giá ảnh hưởng trong điều kiện khác. Khi thay đổi giá trị a trong phạm vi từ 8 mm đến 16 mm, kết quả cho thấy xu hướng tương tự như TH1, tức là bán kính cong tăng theo giá trị a. Cụ thể, tại a = 16 mm, sản phẩm thu được có bán kính cong lớn nhất, thể hiện độ cong đồng đều và ổn định, chứng tỏ hiệu quả tạo hình được cải thiện. Ngược lại, khi a giảm xuống 8 mm, bán kính cong giảm mạnh, cho thấy uốn chưa đạt hiệu quả như mong muốn.

Biểu đồ miền tương ứng thể hiện bằng vùng màu, cho thấy sự biến thiên liên tục của bán kính cong theo từng giá trị của a. Biểu đồ này không chỉ hỗ trợ việc so sánh định lượng kết quả uốn ở các mức khác nhau, mà còn giúp định hướng trong việc lựa chọn thông số công nghệ phù hợp để tối ưu hóa chất lượng sản phẩm. Sự thay đổi bán kính cong cho thấy rõ mức độ nhạy cảm của thông số a, từ đó cung cấp gợi ý cho việc thiết lập quy trình uốn tự động hoặc bán tự động trong sản xuất hàng loạt.

(*) Phân tích trường hợp thực nghiệm 3 (TH3):

Trong trường hợp thực nghiệm thứ ba (TH3), các thông số b và c tiếp tục được điều chỉnh với giá trị lần lượt là 42 mm và 5 mm – đây là tổ hợp có hành trình ép lớn nhất và khoảng cách ngàm rộng nhất trong ba trường

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

hợp. Giá trị a tiếp tục được thay đổi để khảo sát mức ảnh hưởng. Kết quả thu được cho thấy, khi a = 16 mm, bán kính cong đạt mức cao nhất, phản ánh hiệu quả tạo hình ổn định và đồng đều. Tuy nhiên, khi a tăng lên đến 20 mm, kết quả uốn bị ảnh hưởng tiêu cực khi bán kính cong giảm xuống mức thấp nhất.

Biểu đồ miền thể hiện kết quả TH3 cho thấy, không phải cứ tăng giá trị khoảng cách tịnh tiến là sẽ cải thiện bán kính cong. Ngược lại, nếu vượt quá ngưỡng tối ưu, hiệu quả tạo hình sẽ bị suy giảm. Điều này chỉ ra rằng tồn tại một giá trị giới hạn của a, vượt qua ngưỡng đó sẽ gây ra hiện tượng biến dạng ngược hoặc mất ổn định hình dạng sản phẩm. Từ phân tích này, có thể rút ra nhận định rằng mối liên hệ giữa các thông số đầu vào không hoàn toàn tuyến tính, và sự kết hợp hợp lý giữa các thông số là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm.

(*) Đánh giá tổng hợp và ý nghĩa ứng dụng:

Kết quả thực nghiệm cho thấy rõ rằng, ba thông số đầu vào (a, b, c) đều có ảnh hưởng đáng kể đến bán kính cong của sản phẩm kim loại tấm, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và độ chính xác trong quá trình uốn. Sự thay đổi của từng thông số đều tạo ra tác động khác nhau, và mỗi trường hợp đều có giá trị tối ưu riêng để đạt được độ cong lý tưởng. Việc sử dụng biểu đồ miền giúp hệ thống hóa các dữ liệu thu được, từ đó xác định được vùng hoạt động hiệu quả nhất trong không gian thông số. Đây là công cụ hỗ trợ đắc lực trong việc thiết lập quy trình công nghệ tối ưu hóa cho sản xuất thực tế.

Nhờ vào biểu đồ miền, nhà sản xuất có thể dễ dàng xác định các tổ hợp thông số không chỉ mang lại hiệu quả uốn cao, mà còn giúp giảm thiểu sai số hình học, hạn chế hỏng hóc vật liệu, cũng như nâng cao năng suất sản xuất. Đặc biệt, phương pháp này rất phù hợp để áp dụng trong môi trường sản xuất linh hoạt, nơi mà các lô sản phẩm có thể yêu cầu các thông số kỹ thuật khác nhau tùy theo yêu cầu thiết kế.

Hơn nữa, kết quả từ nghiên cứu này còn có thể được tích hợp vào các hệ thống điều khiển tự động hoặc bán tự động, nơi các thông số đầu vào có thể được điều chỉnh theo thời gian thực dựa trên phản hồi từ cảm biến. Điều này giúp nâng cao mức độ chính xác và hiệu quả của toàn bộ quy trình sản xuất kim loại tấm.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về tạo hình kim loại tấm sử dụng phương pháp phủ lưới đã mang lại những kết quả quan trọng trong việc tối ưu hóa quy trình sản xuất sản phẩm tấm mỏng. Qua thực nghiệm, các thông số đầu vào như khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), khoảng cách ngàm (30-54 mm), và hành trình ép (3-5 mm) được phân tích kỹ lưỡng, xác định ảnh hưởng đến bán kính cong của sản phẩm. Kết quả từ ba trường hợp (TH1, TH2, TH3) cho thấy các tổ hợp thông số tối ưu (a = 12 mm, b = 30 mm, c = 3 mm cho TH1; a = 16 mm, b = 36 mm, c = 4 mm cho TH2; a = 16 mm, b = 42 mm, c = 5 mm cho TH3) giúp đạt bán kính cong lý tưởng, đảm bảo độ chính xác và chất lượng sản phẩm. Việc sử dụng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền đã cung cấp cái nhìn trực quan về mối quan hệ giữa thông số đầu vào và đầu ra, hỗ trợ tối ưu hóa quy trình. Nghiên cứu không chỉ góp phần giảm lãng phí vật liệu, hạ chi phí sản xuất mà còn nâng cao khả năng cạnh tranh của doanh nghiệp trong các ngành cơ khí, xây dựng, và ô tô, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về chất lượng và thẩm mỹ. ☞

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Quốc Đoàn, Nguyễn Lê Tường, Đỗ Văn Hiến, Phan Thanh Nhàn.

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: SV2025-358.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Murena, E., Mpofu, K., Ncube, A. T., & et al. (2021), "*Development and performance evaluation of a web-based feature extraction and recognition system for sheet metal bending process planning operations*". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34(6), 598-620. https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1891570

[2]. Vosniakos, G. C., Segredou, I., & Giannakakis, T. (2005), "*Logic programming for process planning in the domain of sheet metal forming with progressive dies*". Journal of Intelligent Manufacturing, 16(4-5), 479-497. https://doi.org/10.1007/s10845-005-1659-0

[3]. Raj Prasanth, D., & Shunmugam, M. S. (2020), "*Geometry-based Bend Feasibility Matrix for bend sequence planning of sheet metal parts*". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 33(5), 515-530. https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1736718

[4]. Nee, A. Y. C., & Venkatesh, V. C. (1984), "*A heuristic algorithm for optimum layout of metal stamping blanks*". CIRP Annals - Manufacturing Technology, 33(1), 317-320. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61434-6

[5]. Farsi, M. A., & Arezoo, B. (2009), "*Development of a new method to determine bending sequence in progressive dies*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 43(1-2), 52-60. https://doi.org/10.1007/s00170-008-1680-5

[6]. Dequan, Y., Rui, Z., Jun, C., & Zhen, Z. (2006), "*Research of knowledge-based system for stamping process planning*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 29(7-8), 663-669. https://doi.org/10.1007/s00170-005-2563-7

[7]. Choi, J. C., Kim, B. M., & Kim, C. (1999), "*Automated progressive process planning and die design and working system for blanking or piercing and bending of a sheet metal product*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15(7), 485-497. https://doi.org/10.1007/s001700050093

[8]. Ong, S. K., de Vin, L. J., Nee, A. Y. C., & Kals, H. J. J. (1997), "*Fuzzy set theory applied to bend sequencing for sheet metal bending*". Journal of Materials Processing Technology, 69(1-3), 29-36. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00035-0

[9]. Li, J. Y., Nee, A. Y. C., & Cheok, B. T. (2002), "*Integrated feature-based modelling and process planning of bending operations in progressive die design*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20(12), 883-895. https://doi.org/10.1007/s001700200212

[10]. Tang, D., & Gao, B. (2007), "*Feature-based metal stamping part and process design. Part II: Stamping process planning*". International Journal of Production Research, 45(13), 2997-3015. https://doi.org/10.1080/00207540600693556

[11]. Chu, C. Y., Tor, S. B., & Britton, G. A. (2008), "*Graph theoretic algorithm for automatic*

operation sequencing for progressive die design. International Journal of Production Research, 46(11), 2965-2988. https://doi.org/10.1080/00207540500521295

[12]. Kim, J. H., Kim, C., & Chang, Y. J. (2006), "*Development of a process sequence determination technique by fuzzy set theory for an electric product with piercing and bending operation*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31(5-6), 450-464. https://doi.org/10.1007/s00170-005-0227-2

[13]. Chang, H. C., Tsai, Y. T., & Chiu, K. T. (2007), "*A novel optimal working process in the design of parametric progressive dies*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 915-928. https://doi.org/10.1007/s00170-006-0527-1

[14]. Kannan, T. R., & Shunmugam, M. S. (2009), "*Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part II: Feature reasoning system*". International Journal of Production Research, 47(5), 1287-1308. https://doi.org/10.1080/00207540701510063

[15]. Kannan, T. R., & Shunmugam, M. S. (2008), "*Planner for sheet metal components to obtain optimal bend sequence using a genetic algorithm*". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 21(7), 790-802. https://doi.org/10.1080/09511920701678833

[16]. de Vin, L. J., de Vries, J., Streppel, A. H., & et al. (1994), "*The generation of bending sequences in a CAPP system for sheet-metal components*". Journal of Materials Processing Technology, 41(3-4), 331-339. https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90169-4

[17]. Faraz, Z., Haq, S. W., Ali, L., & et al. (2017), "*Sheet-metal bend sequence planning subjected to process and material variations*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(1-4), 815-826. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8823-x