

NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH BIẾN DẠNG TẠO LỖ TRÊN THÂN ỐNG HÌNH TRỤ PHỤC VỤ LIÊN KẾT HÀN ỐNG RỄ NHÁNH

STUDY ON THE DEFORMATION PROCESS OF HOLE FORMATION ON CYLINDRICAL PIPE BODIES FOR BRANCH PIPE WELDING CONNECTIONS

Nguyễn Văn Quang, Phạm Sơn Minh, Quách Văn Thiêm, Nguyễn Văn Mang*

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

Email: 2390413@student.hcmute.edu.vn; minhps@hcmute.edu.vn;

thiemqv@hcmute.edu.vn; *mangnv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về quá trình biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ, một công đoạn quan trọng trong việc chuẩn bị bề mặt cho liên kết hàn ống rẽ nhánh. Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến hình dạng và chất lượng lỗ được tạo ra, bao gồm thông số hình học của dụng cụ khoan, lực tác dụng và đặc tính cơ học của mỗi loại vật liệu ống và chiều dày. Phương pháp thực nghiệm được sử dụng để thu thập dữ liệu và theo dõi quá trình biến dạng đối với từng thông số, từ đó có thể tối ưu hóa các thông số công nghệ nhằm đạt được lỗ móc có hình dạng và kích thước mong muốn, đồng thời giảm thiểu các khuyết tật tiềm ẩn.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và lựa chọn quy trình công nghệ tạo lỗ hiệu quả, góp phần nâng cao chất lượng và độ tin cậy của mối hàn ống rẽ nhánh, phục vụ thực tiễn sản xuất và tăng hiệu quả sản xuất.

Từ khóa: Ống hình trụ; Móc lỗ ống; Hàn ống nối.

ABSTRACT

The paper presents the results of a study on the hole-making deformation process on a cylindrical pipe body, an important step in surface preparation for branch pipe welding. The study focuses on analyzing the factors affecting the shape and quality of the created hole, including the geometric parameters of the drilling tool, the applied force, and the mechanical properties of each pipe material and thickness. Experimental methods are used to collect data and monitor the deformation process for each parameter, thereby optimizing the technological parameters to achieve the desired shape and size of the hook hole, while minimizing potential defects.

The research results provide a scientific basis for the design and selection of an effective hole-making technological process, contributing to improving the quality and reliability of branch pipe welding, serving production practices and increasing production efficiency.

Keywords: Cylindrical tube; Tube hole hook; Tube joint welding.

1. TỔNG QUAN

Quá trình gia công biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ là một trong những công đoạn quan trọng trong ngành cơ khí chế tạo, đặc biệt trong việc sản xuất các hệ thống ống dẫn phục vụ các lĩnh vực như dầu khí, năng lượng, và xây dựng. Liên kết hàn ống rẽ nhánh, nơi một ống nhánh được nối vào ống chính thông qua một lỗ được tạo sẵn, đòi hỏi độ chính xác cao và chất lượng bề mặt tốt để đảm bảo độ bền cơ học và khả năng chịu áp suất của mối hàn. Quá trình tạo lỗ không chỉ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của ống mà còn tác động trực tiếp đến hiệu quả của quá trình hàn sau đó. Trong bối cảnh công nghiệp hiện đại, việc tối ưu hóa quá trình biến dạng tạo lỗ nhằm nâng cao hiệu suất sản xuất, giảm thiểu khuyết tật và chi phí là một yêu cầu cấp thiết [1].

Biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ là một quá trình gia công kim loại sử dụng lực cơ học để làm biến dạng vật liệu tại vùng xác định, tạo ra một lỗ có kích thước và hình dạng mong muốn mà không làm mất đi tính liên tục của vật liệu. Quá trình này thường được thực hiện thông qua các phương pháp như dập, đột, hoặc kéo dẫn, tùy thuộc vào yêu cầu kỹ thuật và đặc tính vật liệu [2].

Theo lý thuyết biến dạng dẻo, khi lực tác dụng vượt quá giới hạn chảy của vật liệu, ống sẽ trải qua biến dạng dẻo, dẫn đến sự thay đổi hình dạng vĩnh viễn. Trong trường hợp ống hình trụ, ứng suất và biến dạng phân bố không đồng đều do hình dạng cong của bề mặt, gây ra hiện tượng tập trung ứng suất tại vùng tiếp xúc giữa dụng cụ gia công và vật liệu [3]. Các nghiên cứu của Smith và cộng sự [4] đã chỉ ra rằng sự phân bố ứng suất này phụ thuộc vào các yếu tố như tỷ lệ đường kính lỗ so với đường kính ống, độ dày thành ống và loại vật liệu.

Một số mô hình lý thuyết, chẳng hạn như mô hình biến dạng dẻo dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM), đã được phát triển để mô phỏng quá trình tạo lỗ. Các mô hình này cho phép dự đoán sự phân bố ứng suất, biến dạng, và khả năng xuất hiện khuyết tật như nứt hoặc biến dạng không mong muốn [5]. Tuy nhiên, các mô hình lý thuyết thường cần được hiệu chỉnh thông qua thực nghiệm để đảm bảo tính chính xác trong các điều kiện thực tế.

Hiện nay, có nhiều phương pháp được sử dụng để tạo lỗ trên thân ống hình trụ, mỗi phương pháp có ưu và nhược điểm riêng, phụ thuộc vào mục đích sử dụng và đặc tính vật liệu. Dưới đây là một số phương pháp phổ biến:

- **Dập lỗ (Punching):** Phương pháp này sử dụng một chày dập để xuyên qua thành ống, tạo ra lỗ bằng cách loại bỏ vật liệu. Phương pháp dập lỗ có ưu điểm là tốc độ gia công nhanh và chi phí thấp, nhưng dễ gây ra các khuyết tật như rách vật liệu hoặc biến dạng vùng lân cận lỗ, đặc biệt khi gia công trên ống có thành mỏng [6].

- **Đột lỗ (Piercing):** Tương tự như dập lỗ, nhưng đột lỗ thường sử dụng một dụng cụ có hình dạng phức tạp hơn để tạo ra lỗ có độ chính xác cao hơn. Phương pháp này phù hợp với các ống có độ dày trung bình và yêu cầu chất lượng bề mặt tốt [7].

- **Kéo dẫn tạo lỗ (Extrusion):** Trong phương pháp này, một lực kéo được áp dụng để làm biến dạng vật liệu xung quanh vùng tạo lỗ, tạo ra một cổ lỗ nhô lên (collar). Phương pháp kéo dẫn đặc biệt hữu ích trong việc chuẩn bị bề mặt cho liên kết hàn ống rẽ nhánh, vì cổ lỗ giúp tăng diện tích tiếp xúc và cải thiện độ bền mối hàn [8].



- Gia công bằng laser hoặc plasma: Mặc dù không phải là phương pháp biến dạng, gia công cắt laser hoặc plasma đôi khi được sử dụng để tạo lỗ trên ống trước khi thực hiện các bước biến dạng bổ sung. Các phương pháp này mang lại độ chính xác cao nhưng chi phí vận hành lớn, không phù hợp với sản xuất hàng loạt [9].

Mỗi phương pháp đều có những hạn chế nhất định, chẳng hạn như sự phụ thuộc vào độ bền vật liệu, khả năng kiểm soát biến dạng, và chi phí thiết bị. Do đó, việc lựa chọn phương pháp phù hợp đòi hỏi phải cân nhắc kỹ lưỡng dựa trên yêu cầu kỹ thuật và điều kiện sản xuất. Chất lượng của lỗ được tạo ra trên thân ống hình trụ phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm:

- Đặc tính vật liệu: Độ bền, độ dẻo, và tính đồng nhất của vật liệu ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng biến dạng và nguy cơ xuất hiện khuyết tật. Ví dụ, các hợp kim thép không gỉ có độ bền cao thường khó gia công hơn thép carbon thông thường [10].

- Thông số hình học: Tỷ lệ giữa đường kính lỗ và đường kính ống, cũng như độ dày thành ống, đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát ứng suất và biến dạng. Các nghiên cứu chỉ ra rằng khi đường kính lỗ vượt quá 50% đường kính ống, nguy cơ nứt tăng đáng kể [4].

- Thông số gia công: Lực tác dụng, tốc độ gia công, và loại dụng cụ gia công đều ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt và độ chính xác của lỗ. Lực gia công quá lớn có thể gây ra biến dạng không mong muốn, trong khi lực quá nhỏ có thể dẫn đến lỗ không đạt kích thước yêu cầu [6].

- Điều kiện bôi trơn: Việc sử dụng chất bôi trơn phù hợp giúp giảm ma sát giữa dụng cụ và vật liệu, từ đó cải thiện chất lượng bề mặt và giảm nguy cơ rách vật liệu [7].

Các yếu tố này cần được tối ưu hóa đồng bộ để đảm bảo lỗ đạt yêu cầu về kích thước, hình dạng, và chất lượng bề mặt, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hàn ống rẽ nhánh.

Liên kết hàn ống rẽ nhánh là một kỹ thuật phổ biến trong các hệ thống ống dẫn, nơi chất lượng của lỗ trên ống chính quyết định độ bền và độ kín của mối hàn. Lỗ được tạo ra không chỉ cần có kích thước và hình dạng chính xác mà còn phải có bề mặt nhẵn, không có khuyết tật như rách, nứt, hoặc biến dạng quá mức. Các nghiên cứu của Johnson và cộng sự [8] đã chỉ ra rằng việc sử dụng phương pháp kéo dẫn tạo lỗ có thể cải thiện đáng kể chất lượng mối hàn nhờ vào sự hình thành cổ lỗ, giúp tăng cường độ bám dính giữa ống chính và ống nhánh.

Ngoài ra, việc kiểm soát các thông số gia công trong quá trình tạo lỗ cũng ảnh hưởng đến tính chất cơ học của vùng xung quanh lỗ, từ đó tác động đến khả năng chịu áp suất và độ bền mỏi của mối hàn. Các khuyết tật như vết nứt vi mô hoặc biến dạng không đồng đều có thể trở thành điểm khởi đầu cho sự phá hủy trong quá trình vận hành [9].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc cải tiến quá trình tạo lỗ thông qua việc ứng dụng công nghệ số hóa và tự động hóa. Ví dụ, các hệ thống gia công sử dụng điều khiển số (CNC) kết hợp với mô phỏng FEM đã được sử dụng để tối ưu hóa thông số gia công và dự đoán khuyết tật trước khi thực hiện [5]. Ngoài ra, các vật liệu mới, chẳng hạn như hợp kim titan hoặc thép cường độ cao, đang đặt ra thách thức mới cho quá trình tạo lỗ, đòi hỏi sự phát triển của các dụng cụ và kỹ thuật gia công tiên tiến [10].

Một số hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai bao gồm:

- Phát triển các phương pháp gia công

lai (hybrid) kết hợp biến dạng cơ học và gia công nhiệt để cải thiện chất lượng lỗ.

- Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong việc tối ưu hóa thông số gia công.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Đề tài “Nghiên cứu quá trình biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ phục vụ liên kết hàn ống rẽ nhánh” xuất phát từ nhu cầu cấp thiết trong các ngành công nghiệp như dầu khí, xây dựng và chế tạo cơ khí. Việc tạo lỗ chính xác trên ống ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng mối hàn và độ bền hệ thống.

Tại Việt Nam, chưa có giải pháp công nghệ tối ưu cho quá trình này, trong khi nhu cầu ứng dụng hệ thống đường ống rất lớn. Đề tài hướng đến xây dựng phương pháp tối ưu nhằm nâng cao chất lượng mối hàn, giảm chi phí và tăng tính cạnh tranh sản phẩm.

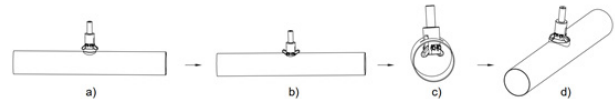
3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp thực nghiệm: Thu thập dữ

liệu, số liệu từ quá trình thực nghiệm để đưa ra những kết quả phù hợp với tiêu chí ban đầu đề ra (số liệu đầu ra).

Đánh giá kết quả: Sau mỗi lần tạo lỗ, mẫu ống được kiểm tra bằng mắt thường, thước cặp, và các thiết bị đo không phá hủy.

Các tiêu chí đánh giá bao gồm: hình dạng và kích thước lỗ tạo ra, mức độ biến dạng và rạn nứt tại mép lỗ, độ phù hợp của lỗ với yêu cầu liên kết hàn nhánh, các mẫu lỗi hoặc biến dạng quá mức sẽ được ghi nhận để đối chiếu



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý móc lỗ

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Các trường hợp thực nghiệm

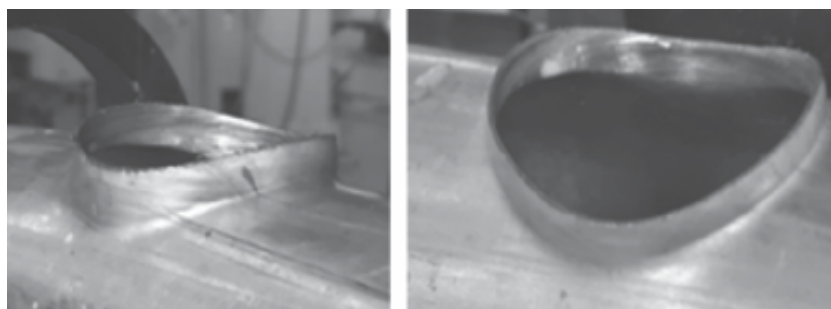
Trường hợp 1: Thay đổi tốc độ.

Đối với vật liệu thép:

Bảng 1. Số liệu khi thay đổi tốc độ của vật liệu thép

Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều dày của ống (mm)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
55	1.2	34	7.6	51.2
90			7.8	51.3
110			7.82	51.35
Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều dày của ống (mm)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
55	1.4	34	8.18	51.45
90			8.55	51.5
110			8.73	51.7
Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều dày của ống (mm)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
55	1.6	34	8.33	51.6
90			8.55	51.65
110			8.73	51.73





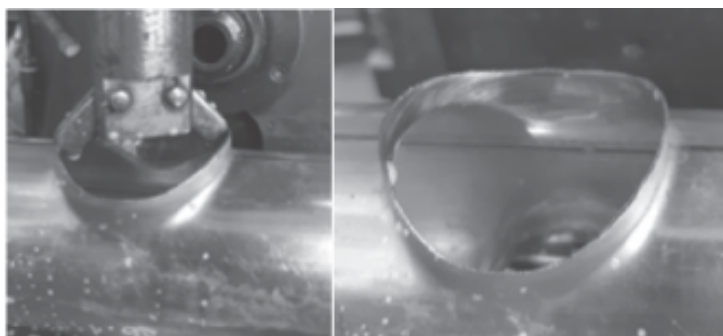
Hình 2. Kết quả khi thay đổi tốc độ với vật liệu thép.

Trường hợp 2: Thay đổi đường kính lỗ khoan.

Đối với vật liệu thép:

Bảng 2. Số liệu khi thay đổi đường kính lỗ khoan của vật liệu thép.

Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
34	1.2	55	7.6	51.35
36			7	51.43
38			6.2	51.5
Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
34	1.4	55	8.18	51.45
36			7.1	51.57
38			6.4	51.66
Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
34	1.6	55	8.33	51.6
36			7.33	51.75
38			6.6	51.83



Hình 3. Kết quả khi thay đổi đường kính lỗ khoan của vật liệu thép.

Trường hợp 3: Thay đổi chiều dày.

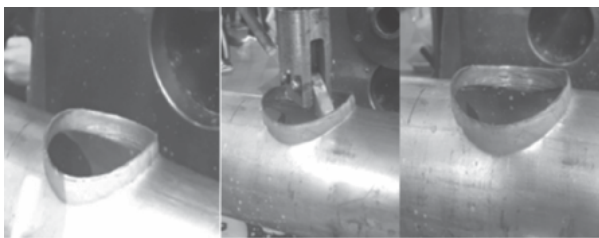
Đối với vật liệu thép:

Bảng 3. Số liệu khi thay đổi chiều dày của vật liệu thép.

Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
1.2	90	36	6.55	51.55
1.4			7.05	51.60
1.6			7.56	51.79

Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
1.2	90	38	6.2	51.70
1.4			6.85	51.78
1.6			6.73	51.85

Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
1.2	110	38	6.3	51.85
1.4			6.55	51.90
1.6			6.85	51.88



Hình 4. Kết quả khi thay đổi chiều dày của vật liệu thép.

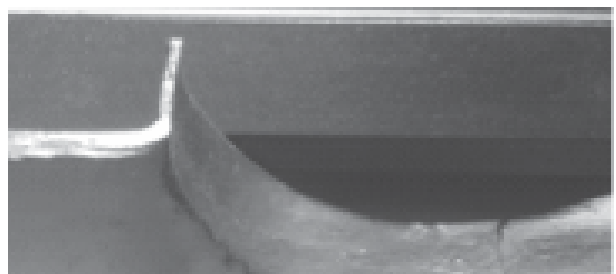
***Cách tiến hành đo độ biến mỏng.**

Trong quá trình tạo thành vành lỗ thường xảy ra hiện tượng vật liệu bị hóa bền và chiều dày của phôi tại vùng biến dạng bị giảm được gọi là độ biến mỏng thành.

Những sản phẩm lỗ sau khi được móc lên thành công sẽ được cắt dọc bằng máy cưa

cầm tay để thấy rõ độ biến mỏng của vật liệu.

Sau khi cắt, để thấy rõ độ biến mỏng của từng loại vật liệu, ta sử dụng thước kẹp để đo 5 điểm bất kỳ trên vành lỗ và ghi lại số liệu đã đo.



Hình 5. Độ biến mỏng từ ống thép



4.2. Phân tích kết quả thực nghiệm

Đối với trường hợp 1: Thay đổi tốc độ.

Vật liệu thép: Cùng chiều dày ống, cùng đường kính lỗ khoan ban đầu thì chiều cao móc lên và đường kính của lỗ sau khi móc tỉ lệ thuận với tốc độ quay.

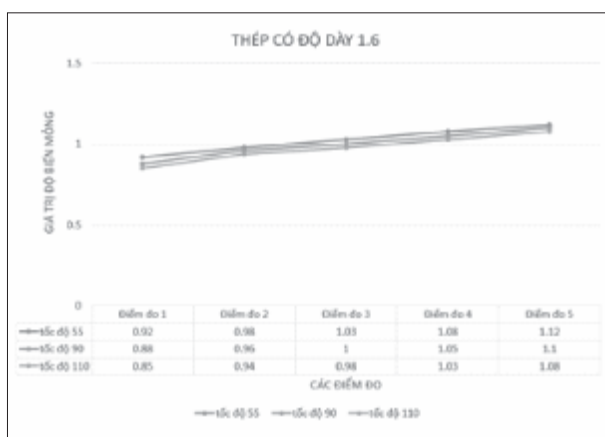
Đối với trường hợp 2: Thay đổi đường kính lỗ khoan ban đầu.

Cùng chiều dày ống, cùng tốc độ thì chiều cao móc lên tỉ lệ nghịch với đường kính lỗ khoan ban đầu còn đường kính lỗ sau khi móc tỉ lệ thuận với đường kính lỗ khoan ban đầu.

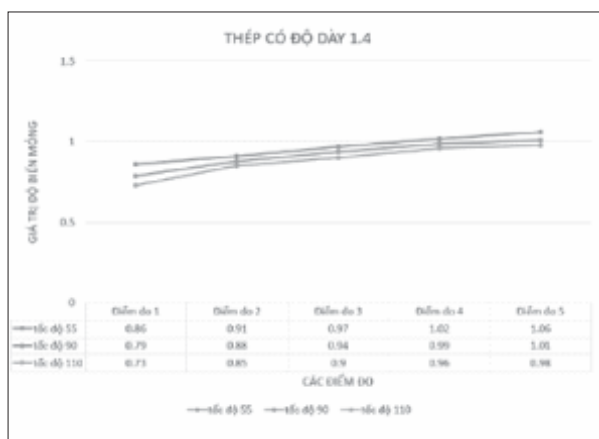
Đối với trường hợp 3: Thay đổi chiều dày của ống.

Cùng đường kính lỗ khoan ban đầu, cùng tốc độ thì chiều cao móc lên và đường kính lỗ sau khi móc tỉ lệ thuận với chiều dày của ống.

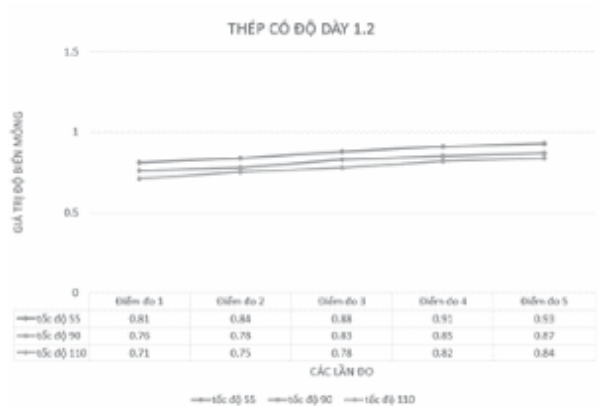
***Phân tích kết quả độ biến mỏng của vật liệu:**



Biểu đồ 6. Độ biến mỏng của vật liệu thép dày 1,6mm



Biểu đồ 7. Độ biến mỏng của vật liệu thép dày 1,4mm



Biểu đồ 8. Độ biến mỏng của vật liệu thép dày 1,2mm.

5. KẾT LUẬN

- Đối với cùng một vật liệu thì tốc độ tỉ lệ nghịch với độ biến mỏng. Tốc độ càng cao thì độ biến mỏng càng thấp.

- Giải quyết vấn đề gia công lỗ trên ống thép, ống đồng và ống inox.

- Cơ cấu đồ gá và dao dễ dàng tháo lắp, dễ dàng thay đổi cánh dao phù hợp với đường kính lỗ khoan, dễ dàng thay đổi các chi tiết nếu trong quá trình thực nghiệm có xảy ra hư hỏng.

- Giảm chi phí gia công và nguyên liệu để sản xuất cơ cấu.

- Cơ cấu dao và đồ gá hoàn toàn cứng vững khi tiến hành thực nghiệm.

- Dễ dàng sử dụng và tiện lợi khi gắn trực tiếp trên máy phay vạn năng.

Những điểm hạn chế khi thực hiện thí nghiệm:

- Lỗ móc lên còn nhiều bavia quanh miệng lỗ nên phải phay sơ lại.

- Cánh dao nhanh mòn sau khi thực nghiệm nhiều lần.

- Quá trình thực nghiệm vẫn còn sai sót khi chưa chọn đúng tâm lỗ khoan và trục dao nên quá trình móc lỗ sẽ nghiêng về một bên. Cũng chưa xác định được khoảng cách lỗ khoan ban đầu.

- Còn hạn chế bởi vật liệu có độ cứng cao như inox.

(*) 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 Văn Quang, Phạm Sơn Minh, Quách Văn Thiêm, Nguyễn Văn Mang.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 22/4/2025

Tài liệu tham khảo:

[1]. Zhuang, C., Xiong, Z., & Ding, H. (2022), “Bézier extraction based isogeometric topology optimization with a locally-adaptive smoothed density model”.

Journal of Computational Physics, 467, 111469. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111469>

[2]. Bazilevs, Y., Calo, V., Cottrell, J., Evans, J., Hughes, T., Lipton, S., Scott, M., & Sederberg, T. (2010), “Isogeometric analysis using T-splines”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199, 229-263. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.02.036>

[3]. Liu, Z., Cheng, J., Yang, M., Yuan, P., Qiu, C., Gao, W., & Tan, J. (2019), “Isogeometric analysis of large thin shell structures based on weak coupling of substructures with unstructured T-splines patches”. Advances in Engineering Software, 135, 102692. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.102692>

[4]. Cottrell, J. A., Hughes, T. J. R., & Bazilevs, Y. (2009), “Isogeometric analysis: Toward integration of CAD and FEA (1st ed.)”. Wiley.

[5]. Oesterle, B., Geiger, F., Forster, D., Fröhlich, M., & Bischoff, M. (2022), “A study on the approximation power of NURBS and the significance of exact geometry in isogeometric pre-buckling analyses of shells”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 397, 115144. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115144>

[6]. Evans, E., Scott, M., Li, X., & Thomas, D. (2015), “Hierarchical T-splines: Analysis-suitability, Bézier extraction, and application as an adaptive basis for isogeometric analysis”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 284, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.09.020>

[7]. Koubaiti, O., Elkhalfi, A., & El-Mekkaoui, J. (2020), “WEB-spline finite elements for the approximation of Navier-Lamé system with CA, B boundary condition”. Abstract and Applied Analysis, 2020, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/8892169>

[8]. Koubaiti, O., El Fakkoussi, S., El-Mekkaoui, J., Moustachir, H., Elkhalfi, A., & Pruncu, C. I. (2021), “The treatment of constraints due to standard boundary conditions in the context of the mixed Web-spline finite element method”. Engineering Computations, 38, 2937-2968. <https://doi.org/10.1108/EC-05-2020-0314>

[9]. Farahat, A., Verhelst, H. M., Kiendl, J., & Kapl, M. (2023), “Isogeometric analysis for multi-patch structured Kirchhoff-Love shells”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 411, 116060. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116060>

[10]. Hattori, G., Trevelyan, J., & Gourgoutis, P. (2023), “An isogeometric boundary element formulation for stress concentration problems in couple stress elasticity”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 407, 115932. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115932>