

THIẾT KẾ CƠ CẤU XOAY ỐNG CHO QUÁ TRÌNH TẠO ỐNG

DESIGN OF A TUBE ROTATION MECHANISM FOR THE TUBE FORMING PROCESS

Hoàng Trung Kiên, Dương Đăng Danh, Đỗ Văn Hiến, Đỗ Văn Đại*

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

Email: 21144085@student.hcmute.edu.vn;

danhdd@hcmute.edu.vn;

hiendv@hcmute.edu.vn;

*daidv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Quá trình tạo ống giữ vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp như cơ khí, đóng tàu, dầu khí và sản xuất ô tô. Một trong những thành phần then chốt trong quy trình này là cơ cấu xoay ống, có chức năng đảm bảo độ chính xác về hình học, chất lượng bề mặt sản phẩm và nâng cao hiệu quả sản xuất. Bài nghiên cứu tập trung vào việc thiết kế cơ cấu xoay ống sao cho phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật cụ thể của quá trình tạo ống. Mục tiêu là phát triển một cơ cấu có khả năng truyền động tối ưu, đảm bảo độ ổn định cao trong vận hành và dễ dàng điều chỉnh khi cần thay đổi thông số trong sản xuất. Việc tối ưu hóa thiết kế không chỉ giúp cải thiện chất lượng sản phẩm đầu ra mà còn góp phần giảm chi phí và thời gian gia công. Kết quả nghiên cứu có thể làm cơ sở cho việc ứng dụng vào các dây chuyền sản xuất ống hiện đại, đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và hiệu quả trong ngành công nghiệp chế tạo.

Từ khóa: Tạo ống; Thiết kế cơ cấu xoay; Quá trình tạo ống công nghiệp.

ABSTRACT

The tube forming process plays a crucial role in various industrial sectors such as mechanical engineering, shipbuilding, oil and gas, and automotive manufacturing. One of the key components in this process is the tube rotation mechanism, which ensures geometric accuracy, surface quality, and production efficiency. This study focuses on designing a tube rotation mechanism that meets the specific technical requirements of the tube forming process. The goal is to develop a mechanism with optimized power transmission, high operational stability, and flexible adjustability to accommodate changes in production parameters. Optimizing the design not only improves the quality of the final product but also contributes to reducing manufacturing costs and processing time. The research findings can serve as a foundation for implementing advanced tube production lines that meet the growing demands for precision and efficiency in the manufacturing industry.

Keywords: Tube forming; Rotation mechanism design; Industrial tube forming process. 

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh công nghiệp hiện đại, ngành gia công kim loại tấm và chế tạo ống đang chứng kiến sự chuyển đổi mạnh mẽ nhằm đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao về năng suất, độ chính xác và tính linh hoạt trong sản xuất. Quá trình tạo ống, một trong những công đoạn cốt lõi của ngành, đòi hỏi sự phối hợp phức tạp giữa các hoạt động như uốn, hàn, kéo giãn và xoay ống. Trong đó, cơ cấu xoay ống đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát vị trí, tốc độ quay và mô-men, từ đó đảm bảo sự đồng đều về hình dạng, chất lượng đường hàn và bề mặt sản phẩm [1]. Tuy nhiên, các hệ thống tạo ống truyền thống thường sử dụng các cơ cấu cơ khí đơn giản, thiếu linh hoạt và khó điều chỉnh khi thay đổi kích thước ống hoặc điều kiện sản xuất [2]. Do đó, việc nghiên cứu và thiết kế một cơ cấu xoay ống hiện đại, tích hợp khả năng tự động hóa và tương thích với nhiều loại vật liệu, đang trở thành một yêu cầu cấp thiết trong các dây chuyền sản xuất [3].

(*) Vai trò của cơ cấu xoay ống trong quá trình tạo ống

Quá trình tạo ống thường bao gồm các bước như cắt, uốn, định hình và hàn, trong đó việc xoay ống là yếu tố then chốt để đảm bảo tính liên tục và độ chính xác của sản phẩm. Cơ cấu xoay ống chịu trách nhiệm truyền chuyển động quay đến phôi ống, giúp định vị chính xác vị trí hàn, duy trì sự đồng đều của lực kéo giãn và đảm bảo chất lượng bề mặt [4]. Theo nghiên cứu, tốc độ quay và mô-men xoắn của cơ cấu xoay ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định của quá trình hàn và độ bền cơ học của ống [5]. Ví dụ, trong quá trình hàn ống thép không gỉ, việc kiểm soát tốc độ xoay không đồng đều có thể dẫn đến các khuyết tật như nứt hoặc biến dạng nhiệt [6].

Hiện nay, các cơ cấu xoay ống được sử dụng phổ biến bao gồm hệ thống truyền động bằng bánh răng, dây đai hoặc động cơ servo. Tuy nhiên, những hệ thống này thường gặp phải các hạn chế như độ chính xác thấp, hao mòn cơ học cao và khó tích hợp với các hệ thống tự động hóa hiện đại [7]. Để giải quyết vấn đề này, các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc phát triển các cơ cấu xoay sử dụng động cơ bước hoặc động cơ servo kết hợp với bộ điều khiển số (CNC), cho phép điều chỉnh linh hoạt tốc độ và mô-men xoắn theo thời gian thực [8].

(*) Thách thức trong thiết kế cơ cấu xoay ống

Thiết kế cơ cấu xoay ống đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật, bao gồm:

- **Tính tương thích với nhiều kích thước và vật liệu:** Các dây chuyền sản xuất hiện đại thường yêu cầu cơ cấu xoay có khả năng xử lý các loại ống có đường kính, độ dày và vật liệu khác nhau, từ thép carbon đến hợp kim nhôm hoặc thép không gỉ [9]. Điều này đòi hỏi cơ cấu phải có khả năng điều chỉnh linh hoạt và duy trì độ chính xác cao trong các điều kiện làm việc đa dạng.

- **Kiểm soát tốc độ và mô-men xoắn:** Để đảm bảo chất lượng sản phẩm, cơ cấu xoay cần duy trì tốc độ quay ổn định và cung cấp mô-men xoắn phù hợp với từng giai đoạn của quá trình tạo ống. Các hệ thống truyền thống thường không đáp ứng được yêu cầu này, đặc biệt khi xử lý các ống có kích thước lớn hoặc vật liệu có độ cứng cao [10].

- **Tích hợp tự động hóa:** Trong bối cảnh công nghiệp 4.0, việc tích hợp cơ cấu xoay ống với các hệ thống điều khiển tự động, cảm biến và phần mềm quản lý sản xuất là một yêu cầu tất yếu. Tuy nhiên, việc này đòi hỏi thiết kế

các giao diện điều khiển phức tạp và khả năng tương thích với các giao thức công nghiệp như Modbus hoặc OPC-UA [11].

- Độ bền và bảo trì: Các cơ cấu xoay ống hoạt động trong môi trường khắc nghiệt, chịu tác động của lực ma sát, nhiệt độ cao và rung động. Do đó, việc lựa chọn vật liệu và thiết kế cấu trúc chịu lực là yếu tố quan trọng để đảm bảo độ bền và giảm thiểu chi phí bảo trì [12].

(*) Xu hướng phát triển cơ cấu xoay ống

Để đáp ứng các yêu cầu ngày càng khắt khe của ngành công nghiệp, các nghiên cứu gần đây đã đề xuất nhiều hướng tiếp cận mới trong thiết kế cơ cấu xoay ống:

- Ứng dụng công nghệ điều khiển số: Các hệ thống điều khiển số (CNC) và điều khiển logic khả trình (PLC) đã được áp dụng để cải thiện độ chính xác và tính linh hoạt của cơ cấu xoay. Các hệ thống này cho phép điều chỉnh tốc độ quay và mô-men xoắn theo thời gian thực, dựa trên phản hồi từ cảm biến lực và vị trí [13].

- Sử dụng động cơ tiên tiến: Động cơ servo và động cơ bước đang dần thay thế các hệ thống truyền động cơ khí truyền thống nhờ khả năng cung cấp mô-men xoắn cao, hoạt động ổn định và dễ dàng tích hợp với các hệ thống điều khiển [8]. Ngoài ra, các động cơ không chổi than (BLDC) cũng được nghiên cứu để giảm hao mòn và tăng tuổi thọ của cơ cấu.

- Ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI): Một số nghiên cứu đã đề xuất sử dụng AI để tối ưu hóa quá trình điều khiển cơ cấu xoay, chẳng hạn như dự đoán các thông số tối ưu dựa trên loại vật liệu và kích thước ống. Các thuật toán

học máy có thể phân tích dữ liệu từ cảm biến để điều chỉnh tốc độ quay và mô-men xoắn, từ đó giảm thiểu khuyết tật sản phẩm [14].

- Thiết kế mô-đun: Để tăng tính linh hoạt, các cơ cấu xoay ống hiện đại được thiết kế theo dạng mô-đun, cho phép dễ dàng thay đổi hoặc nâng cấp các bộ phận như trục xoay, bộ truyền động hoặc hệ thống kẹp ống. Thiết kế này không chỉ giảm chi phí bảo trì mà còn tăng khả năng thích ứng với các yêu cầu sản xuất khác nhau [9].

(*) Mục tiêu của nghiên cứu

Nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế một cơ cấu xoay ống cải tiến, đáp ứng các yêu cầu về độ chính xác, tính linh hoạt và khả năng tự động hóa trong quá trình tạo ống. Cụ thể, mục tiêu bao gồm:

- Phát triển một cơ cấu xoay có khả năng điều chỉnh tốc độ và mô-men xoắn theo thời gian thực, phù hợp với nhiều loại vật liệu và kích thước ống.

- Tích hợp các công nghệ điều khiển hiện đại, như CNC và cảm biến, để đảm bảo sự ổn định và chính xác trong quá trình vận hành.

- Đề xuất một thiết kế mô-đun, giảm chi phí bảo trì và tăng khả năng thích ứng với các dây chuyền sản xuất khác nhau.

- Đánh giá hiệu quả của cơ cấu thông qua mô phỏng và thử nghiệm thực tế, từ đó đưa ra các khuyến nghị cho việc ứng dụng trong công nghiệp.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Các hệ thống tạo ống hiện tại đang đối 

mặt với những yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác hình học, độ bền cơ học và khả năng thích ứng với các kích thước và vật liệu ống khác nhau. Trong đó, cơ cấu xoay ống đóng vai trò then chốt nhằm đảm bảo sự đồng đều trong chuyển động quay, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm. Thiết kế hợp lý cơ cấu xoay là chiến lược hữu hiệu để cải thiện hiệu suất và độ ổn định trong quá trình tạo ống. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm phát triển các cơ cấu truyền động có khả năng đáp ứng đồng thời yêu cầu về độ chính xác cao, tải trọng lớn và khả năng điều chỉnh linh hoạt. Các dạng truyền động như bánh răng, trục vít, dây đai, và đặc biệt là truyền động bằng động cơ servo đã được đề xuất để nâng cao độ ổn định và giảm thiểu sai số trong chuyển động quay. Mỗi phương pháp đều có ưu, nhược điểm riêng: truyền động bánh răng mang lại độ cứng vững cao nhưng tạo tiếng ồn lớn; truyền động đai êm nhưng dễ trượt; trong khi đó, truyền động bằng động cơ servo cho phép điều khiển chính xác nhưng đòi hỏi chi phí đầu tư và bảo trì cao.

Về kết cấu tổng thể, hệ thống gồm:

- Khung chịu lực làm bằng thép hợp kim.
- Bộ gá giữ phôi có khả năng kẹp chắc chắn và điều chỉnh theo đường kính ống.
- Động cơ điện điều khiển bằng biến tần hoặc servo, truyền chuyển động quay cho bánh răng.
- Cảm biến đo tốc độ và góc quay giúp hệ thống điều khiển phản hồi nhanh.

3. MÔ PHỎNG

Mô hình 3D được dựng và thử nghiệm số với các thông số đầu vào tiêu chuẩn cho các loại ống nhôm và thép không gỉ. Kết quả cho thấy:

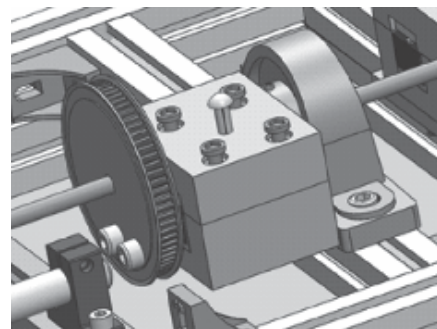
Khi cơ cấu hoạt động ở tốc độ xoay tối

ưu 20 vòng/phút, độ sai lệch hình tròn giảm xuống dưới 0.3 mm.

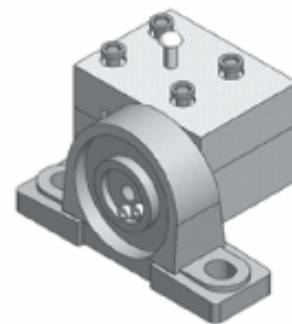
Phân bố ứng suất quanh chu vi ống trở nên đều hơn, hạn chế tập trung ứng suất tại các vị trí dễ biến dạng.

Hệ thống truyền động hoạt động ổn định trong thời gian dài, không phát sinh rung động gây ảnh hưởng đến biên dạng sản phẩm. Những kết quả này cho thấy tính khả thi và hiệu quả của cơ cấu được thiết kế trong môi trường tạo hình kim loại thực tế.

Ngoài ra, một số điều kiện biên như lực kẹp, ma sát giữa ống và cơ cấu kẹp, cũng được đưa vào mô phỏng để phản ánh đúng điều kiện làm việc trong thực tế. Kết quả thu được từ mô phỏng là cơ sở để điều chỉnh lại các thông số thiết kế như đường kính rãnh, độ dày thành phần, hoặc công suất động cơ.



Hình 3.1. Thiết kế cơ cấu xoay bằng bánh răng



Hình 3.2. Thiết kế bộ đỡ cơ cấu xoay

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Để kiểm chứng hiệu quả thiết kế, mô hình cơ cấu xoay được dựng trên phần mềm Solidworks, sau đó chuyển sang ANSYS để phân tích phần tử hữu hạn (FEA). Quá trình mô phỏng tập trung vào ba nhóm yếu tố chính:

✓ Phân tích ứng suất: Kiểm tra mức độ tập trung ứng suất tại các vị trí tiếp xúc giữa phôi ống và cơ cấu gá đỡ, nhằm đảm bảo không gây biến dạng không mong muốn khi xoay.

✓ Phân bố biến dạng: Theo dõi sự thay đổi độ dày thành ống trong quá trình xoay, đặc biệt khi tích hợp với quá trình tạo hình quay ép. Điều này giúp xác định tốc độ quay và lực ép phù hợp để duy trì độ dày đồng đều.

✓ Hiệu ứng dao động và rung động: Mô phỏng điều kiện hoạt động ở các tốc độ quay khác nhau để đánh giá nguy cơ phát sinh rung hoặc mất ổn định khi vận hành thực tế.

Ngoài ra, một số điều kiện biên như lực kẹp, ma sát giữa ống và con lăn đỡ, cũng được đưa vào mô phỏng để phản ánh đúng điều kiện làm việc trong thực tế. Kết quả thu được từ mô phỏng là cơ sở để điều chỉnh lại các thông số thiết kế như đường kính trục, độ dày thành phần, hoặc công suất động cơ.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau quá trình thiết kế, mô phỏng và đánh giá, cơ cấu xoay ống được đề xuất đã cho thấy những kết quả đáng khích lệ, thể hiện tính khả thi trong ứng dụng thực tiễn cũng như tiềm năng mở rộng trong sản xuất công nghiệp. Phần thảo luận dưới đây sẽ phân tích sâu hơn các khía cạnh kỹ thuật, hiệu suất và ảnh hưởng của thiết kế đến chất lượng sản phẩm.

5.1. Độ chính xác hình học và chất lượng bề mặt

Một trong những mục tiêu chính của thiết kế cơ cấu xoay ống là đảm bảo độ chính xác hình học, cụ thể là độ tròn, độ đồng tâm và độ dày thành ống sau quá trình tạo hình. Qua mô phỏng, kết quả cho thấy khi cơ cấu hoạt động ở tốc độ tối ưu 20 vòng/phút, độ lệch hình tròn được kiểm soát ở mức dưới 0.3 mm – một cải thiện rõ rệt so với các hệ thống xoay cơ khí truyền thống.

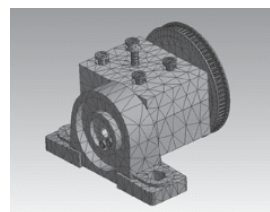
Đây là kết quả của ba yếu tố chính:

- Truyền động bằng động cơ servo: Giúp điều chỉnh tốc độ quay một cách chính xác, duy trì chuyển động ổn định và giảm thiểu dao động tốc độ trong quá trình xoay.

- Cảm biến hồi tiếp: Cảm biến đo tốc độ và góc quay cung cấp dữ liệu liên tục, cho phép hệ thống điều chỉnh thời gian thực nhằm giữ cho chuyển động trơn tru và chính xác.

- Kết cấu cơ khí tối ưu hóa: Bộ gá giữ phôi được thiết kế điều chỉnh linh hoạt theo đường kính ống, đảm bảo lực kẹp đều quanh chu vi, từ đó giảm biến dạng không mong muốn.

Chất lượng bề mặt ống sau khi gia công cũng được cải thiện, do dao động rung thấp hơn và lực tiếp xúc đồng đều hơn giữa ống và cơ cấu gá đỡ.



Hình 5.1 Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS 

5.2. Phân bố ứng suất và biến dạng

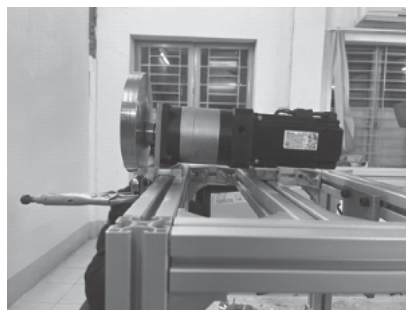
Một điểm nổi bật trong kết quả mô phỏng là khả năng phân bố đều ứng suất quanh chu vi ống. Ứng suất tập trung là nguyên nhân chính gây ra biến dạng không đồng đều, nứt, hoặc mất ổn định hình học trong quá trình tạo hình. Khi sử dụng cơ cấu xoay này, mô phỏng phần tử hữu hạn (FEA) trên ANSYS cho thấy các vùng có ứng suất lớn tập trung chủ yếu tại vị trí tiếp xúc ban đầu giữa ống và con lăn đỡ, nhưng được phân tán nhanh chóng sau một vài chu kỳ quay.

Mô phỏng biến dạng cũng cho thấy độ dày thành ống được duy trì ổn định hơn so với trường hợp không có điều khiển servo. Đây là kết quả trực tiếp của tốc độ quay ổn định và lực kẹp tối ưu, tránh tình trạng trượt hay nén cục bộ.

5.3. Hiệu ứng rung động và độ ổn định hệ thống

Rung động trong quá trình quay là một yếu tố gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ chính xác và độ bền thiết bị. Mô phỏng ở các tốc độ quay khác nhau cho thấy cơ cấu đề xuất vận hành ổn định nhất ở khoảng 15-25 vòng/phút. Ở dải tốc độ này, rung động cơ học gần như triệt tiêu, và các thành phần truyền động hoạt động hài hòa mà không phát sinh cộng hưởng.

Đặc biệt, khi tích hợp hệ thống điều khiển phản hồi nhanh, cơ cấu có khả năng tự điều chỉnh và duy trì trạng thái ổn định trong cả quá trình dài vận hành. So với hệ thống sử dụng đai truyền, vốn dễ bị trượt và tạo dao động, cơ cấu này cho độ cứng vững và độ tin cậy cao hơn rõ rệt.



Hình 5.2. Động cơ chính tạo hình ống

5.4. Khả năng tương thích và linh hoạt trong sản xuất

Thiết kế cho phép dễ dàng thay đổi kích thước ống mà không cần điều chỉnh phức tạp. Bộ gá con lăn tự điều chỉnh có thể tương thích với nhiều đường kính và chiều dài ống khác nhau, từ đó giúp mở rộng phạm vi ứng dụng của thiết bị. Đây là một ưu điểm lớn trong các dây chuyền sản xuất đa dạng hóa sản phẩm, nơi việc thay đổi mẫu mã, kích thước là điều thường xuyên.

Hơn nữa, việc sử dụng khung đỡ bằng thép hợp kim và các con lăn chịu lực cao giúp nâng cao độ bền cơ học của toàn bộ hệ thống, sẵn sàng làm việc trong môi trường có tải trọng lớn hoặc thời gian vận hành liên tục.

5.5. Đề xuất cải tiến và hướng phát triển

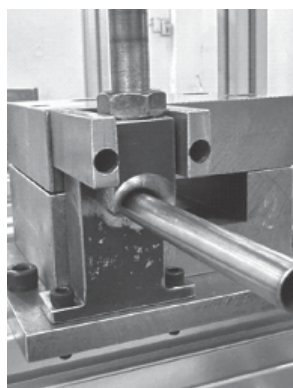
Mặc dù hệ thống đã cho kết quả tích cực trong giai đoạn thử nghiệm, một số điểm có thể được xem xét để cải tiến thêm:

- Tích hợp hệ thống làm mát cục bộ: Giúp giảm nhiệt phát sinh do ma sát trong quá trình quay, đặc biệt với vật liệu có độ cứng cao như inox.

- Tự động hóa quá trình gá kẹp: Sử dụng hệ thống điều khiển thủy lực hoặc khí nén

để tự động điều chỉnh lực kẹp theo từng loại ống, giảm thời gian setup và nâng cao độ chính xác.

- Tối ưu hóa thuật toán điều khiển servo: Áp dụng thuật toán điều khiển thích nghi (adaptive control) giúp hệ thống phản ứng nhanh hơn với các thay đổi tải trọng hoặc độ ma sát trong quá trình vận hành thực tế.



Hình 5.3. Cơ cấu tạo biến dạng ống

6. KẾT LUẬN

Qua quá trình nghiên cứu và thiết kế, cơ cấu xoay ống đề xuất cho thấy những cải tiến đáng kể so với các hệ thống truyền thống cả về mặt hiệu suất lẫn độ tin cậy. So với các giải pháp xoay ống trước đây chủ yếu sử dụng truyền động bánh răng hoặc đai đơn thuần, hệ thống sử dụng động cơ servo kết hợp điều khiển tự động mang lại độ chính xác cao hơn trong điều khiển tốc độ, giảm sai số đồng tâm và cải thiện rõ rệt độ ổn định quay.

Mô hình thiết kế cũng chứng minh được khả năng tương thích tốt với các loại ống có đường kính và khối lượng khác nhau, nhờ kết cấu con lăn tự điều chỉnh và khung đỡ cứng vững. Sự kết hợp giữa mô phỏng động học và phân tích tải trọng trong quá trình thiết kế giúp hệ thống tối ưu về mặt cấu trúc và hiệu năng.

So với các giải pháp có chi phí thấp hơn nhưng độ chính xác kém, mô hình này tuy đầu tư ban đầu cao hơn nhưng có lợi thế vượt trội về tuổi thọ, khả năng bảo trì, và hiệu quả vận hành trong môi trường công nghiệp khắc khe. Khi áp dụng vào thực tế, hệ thống này có thể giảm thời gian chu kỳ sản xuất, giảm lỗi hình học, và nâng cao chất lượng bề mặt sản phẩm ống.

Từ những đánh giá trên, có thể khẳng định rằng thiết kế cơ cấu xoay ống này là giải pháp phù hợp và hiệu quả cho các dây chuyền tạo hình ống hiện đại, góp phần thúc đẩy xu hướng tự động hóa và nâng cao chất lượng trong sản xuất cơ khí chính xác.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Thái Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Hoàng Trung Kiên, Dương Đăng Danh, Đỗ Văn Hiến, Đỗ Văn Đại.

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: SV2025-349.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ambrogio, G., Filice, L., & Gagliardi, F. (2012), “*Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming*”. *Materials & Design*, 34, 501-508.
- [2]. Allwood, J. M., Music, O., Raithathna, A., & Duncan, S. R. (2009), “*Closed-loop feedback control of product properties in flexible metal forming processes with mobile tools*”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 287-290.
- [3]. Awiszus, B., & Härtel, S. (2010), “*Es läuft rund*”. *Das Unrunddrücken*. UTFscience, 1. <http://www.utfscience.de>
- [4]. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufflou, J., & Allwood, J. (2005), “*Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*”. *CIRP Annals*, 54(2), 623-650.
- [5]. Awiszus, B., & Meyer, F. (2005), “*Metal spinning of non-circular hollow parts*”. In *Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity* (pp. 353-355). Verona, Italy.
- [6]. Ambrogio, G., Costantino, I., De Napoli, L., Filice, L., Fratini, L., & Muzzupappa, M. (2004), “*Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: A numerical and experimental investigation*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 501-507.
- [7]. Micari, F., Ambrogio, G., & Filice, L. (2007), “*Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: State of the art and future trends*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 390-395.
- [8]. Arai, H. (2006), “*Force-controlled metal spinning machine using linear motors*”. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4031-4036). Orlando, Florida.
- [9]. Araghi, B. T., Manco, G. L., Bambach, M., & Hirt, G. (2009), “*Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming*”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 225-228.
- [10]. Allwood, J. M., & Utsunomiya, H. (2006), “*A survey of flexible forming processes in Japan*”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1939-1960.
- [11]. Härtel, S., & Awiszus, B. (2010), “*Numerical and experimental investigations of production of non-rotationally symmetric hollow parts using sheet metal spinning*”. *Steel Research International*, 81(9), 998-1002.
- [12]. Beyer, U., & Awiszus, B. (2010), “*Flat-clinching – a new possibility for joining different kinds of components in a flexible and effective way to a planar material compound*”. *Steel Research International*, 81(9), 1124-1127.
- [13]. Allwood, J., Kopp, R., Michels, D., Music, O., Öztöp, M., Stanistreet, T., Tekkaya, A., & Tiedemann, I. (2005), “*The technical and commercial potential of an incremental ring rolling process*”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, 233-236.
- [14]. Hirt, G., Ames, J., Bambach, M., & Kopp, R. (2004), “*Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming*”. *CIRP Annals*, 52(1), 203-206.