

THIẾT KẾ MÔ HÌNH TẠO HÌNH MẶT CONG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CHẤN

DESIGN OF A CURVED SURFACE FORMING MODEL USING THE BENDING METHOD

Phan Hữu Hoàng Ninh, Nguyễn Trọng Hiếu, Trần Quốc Hùng, Nguyễn Trà Kim Quyên*

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

Email: 21144240@student.hcmute.edu.vn; hieunt@hcmute.edu.vn;

hungtq@hcmute.edu.vn; *quyenntk@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu về thiết kế mô hình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn trong gia công kim loại tấm, một giải pháp kinh tế và hiệu quả để sản xuất các chi tiết có bề mặt cong mà không yêu cầu độ cong liên tục phức tạp như dập sâu. Phương pháp chấn dựa trên biến dạng dẻo, sử dụng lực tập trung từ chày và cối để tạo đường gấp chính xác, đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ các thông số như góc uốn, bán kính uốn, và tính chất vật liệu. Các yếu tố ảnh hưởng bao gồm tính chất vật liệu, thông số hình học, thiết kế dụng cụ chấn, và điều kiện quá trình. Bài báo đề xuất các phương pháp thiết kế hiện đại như phân tích phần tử hữu hạn (FEA), thiết kế dựa trên hình học, và ứng dụng trí tuệ nhân tạo để tối ưu hóa quy trình. Tuy nhiên, thách thức như đàn hồi ngược và độ chính xác của bề mặt cong phức tạp vẫn cần giải quyết. Tích hợp với công nghệ sản xuất thông minh được xem là hướng phát triển tiềm năng, nâng cao hiệu quả và khả năng ứng dụng của phương pháp chấn trong công nghiệp hiện đại.

Từ khóa: Máy chấn; Kim loại; Thiết kế máy; Uốn ống; Ứng suất; Mô hình dạng khung.

ABSTRACT

The paper presents a study on the design of a model for forming curved surfaces using the bending method in sheet metal processing, offering an economical and effective solution for producing components with curved surfaces that do not require complex continuous curvature, as seen in deep drawing. The bending method relies on plastic deformation, utilizing concentrated force from the punch and die to create precise fold lines, necessitating strict control of parameters such as bending angle, bending radius, and material properties. Influencing factors include material characteristics, geometric parameters, bending tool design, and process conditions. The paper proposes modern design approaches, such as finite element analysis (FEA), geometry-based design, and the application of artificial intelligence to optimize the process. However, challenges such as springback and the accuracy of complex curved surfaces still require solutions. Integration with smart manufacturing technologies is considered a promising development direction, enhancing the efficiency and applicability of the bending method in modern industry.

Keywords: Press brake; Metal; Machine design; Pipe forming; Stress; Wireframe.



1. TỔNG QUAN

Trong lĩnh vực gia công kim loại tấm, việc tạo hình các bề mặt cong luôn là một thách thức kỹ thuật đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa thiết kế hình học chính xác, lựa chọn vật liệu phù hợp và kiểm soát quá trình biến dạng một cách hiệu quả [1]. Phương pháp chấn, với nguyên lý sử dụng lực cơ học tập trung để tạo ra biến dạng uốn tại các vị trí cụ thể trên tấm kim loại, đã nổi lên như một giải pháp kinh tế và khả thi để sản xuất các chi tiết có bề mặt cong. Đặc biệt, phương pháp này tỏ ra hiệu quả trong các trường hợp không yêu cầu độ cong liên tục phức tạp như trong quy trình dập sâu, giúp giảm thiểu chi phí sản xuất và tăng tính linh hoạt trong thiết kế [2]. Tổng quan này sẽ trình bày một cách chi tiết các khía cạnh liên quan đến thiết kế mô hình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn, bao gồm cơ sở lý thuyết, các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình, các phương pháp thiết kế hiện đại, và những thách thức kỹ thuật mà các nhà nghiên cứu và kỹ sư phải đối mặt trong việc ứng dụng công nghệ này.

(*) Cơ sở lý thuyết của phương pháp chấn

Phương pháp chấn là một kỹ thuật gia công kim loại tấm phổ biến, trong đó lực cơ học được áp dụng thông qua hệ thống chày và cối để tạo ra các đường gấp hoặc biến dạng uốn tại các vị trí được xác định trước trên bề mặt tấm kim loại [3]. Quá trình này dựa trên cơ chế biến dạng dẻo, trong đó vật liệu kim loại vượt qua giới hạn chảy dưới tác động của lực tập trung, dẫn đến sự thay đổi hình dạng vĩnh viễn mà không gây tổn hại đến tính toàn vẹn cấu trúc của vật liệu [4]. Các thông số quan trọng trong quá trình chấn bao gồm góc uốn, bán kính uốn, lực chấn cần thiết, và các đặc tính cơ học của vật liệu như độ bền kéo, độ dẫn dài, và mô

đun đàn hồi. Những yếu tố này cần được tính toán và kiểm soát cẩn thận để đảm bảo rằng sản phẩm cuối cùng đạt được độ chính xác hình học và chất lượng bề mặt mong muốn [5]. So với các phương pháp gia công khác như dập sâu hay ép thủy tĩnh, phương pháp chấn có ưu điểm vượt trội về chi phí vận hành và thiết bị thấp, đồng thời cho phép tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao. Tuy nhiên, để đạt được các bề mặt cong phức tạp, quá trình chấn đòi hỏi thiết kế các chuỗi gấp liên tiếp với sự kiểm soát chặt chẽ về góc uốn và vị trí gấp, điều này đặt ra yêu cầu cao về mô hình hóa hình học và phân tích cơ học chính xác [6].

(*) Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tạo hình mặt cong

Quá trình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn chịu ảnh hưởng từ nhiều yếu tố, mỗi yếu tố đều đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng và hiệu quả của sản phẩm cuối cùng.

(*) Tính chất vật liệu

Tính chất cơ học của vật liệu, bao gồm độ bền, độ cứng, tính đẳng hướng, và khả năng chịu biến dạng, là yếu tố quyết định khả năng tạo hình và chất lượng của bề mặt cong [7]. Ví dụ, các hợp kim nhôm thường có đặc tính dễ uốn hơn so với thép không gỉ, giúp chúng phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu biến dạng lớn. Tuy nhiên, nhôm cũng có xu hướng xuất hiện các khuyết tật như nứt gãy nếu bán kính uốn quá nhỏ hoặc lực chấn không được kiểm soát chính xác [8]. Do đó, việc lựa chọn vật liệu phù hợp với yêu cầu hình học cụ thể và ứng dụng cuối cùng của sản phẩm là một bước quan trọng trong quá trình thiết kế, đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về các đặc tính vật liệu và hành vi của chúng dưới tác động của lực chấn.

(*) Thông số hình học

Các thông số hình học, bao gồm độ dày của tấm kim loại, bán kính uốn, và góc uốn, có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và chất lượng của bề mặt cong [9]. Những tấm kim loại có độ dày lớn thường yêu cầu lực chần mạnh hơn, đồng thời có nguy cơ gặp phải hiện tượng đàn hồi ngược (springback), làm giảm độ chính xác hình học của chi tiết sau khi chần [10]. Để khắc phục vấn đề này, các nhà thiết kế thường sử dụng các công cụ mô phỏng số để tối ưu hóa các thông số hình học, đảm bảo rằng sản phẩm cuối cùng đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật nghiêm ngặt.

(*) Thiết kế dụng cụ chần

Hình dạng và kích thước của chày và cối trong hệ thống chần ảnh hưởng lớn đến cách lực được phân bố trên tấm kim loại và chất lượng bề mặt sau quá trình gia công [11]. Các dụng cụ chần được thiết kế đặc biệt, chẳng hạn như cối có rãnh hình chữ V hoặc chữ U, có thể cải thiện khả năng kiểm soát biến dạng, giảm thiểu các khuyết tật như nứt hoặc biến dạng không mong muốn, đồng thời nâng cao độ chính xác của chi tiết [12]. Việc thiết kế dụng cụ chần đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng về loại vật liệu, độ dày tấm, và các yêu cầu cụ thể của sản phẩm.

(*) Điều kiện quá trình

Các điều kiện vận hành trong quá trình chần, như tốc độ chần, nhiệt độ môi trường, và việc sử dụng chất bôi trơn, cũng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định chất lượng của bề mặt cong [13]. Chất bôi trơn phù hợp có thể giảm ma sát giữa tấm kim loại và dụng cụ chần, từ đó cải thiện chất lượng bề mặt, giảm hao mòn dụng cụ, và tăng tuổi thọ của hệ thống chần [14]. Ngoài ra, việc kiểm soát tốc độ chần

và nhiệt độ giúp đảm bảo rằng vật liệu không bị biến dạng quá mức hoặc xuất hiện các khuyết tật không mong muốn.

(*) Các phương pháp thiết kế mô hình tạo hình mặt cong

Để đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và phức tạp của các bề mặt cong, nhiều phương pháp thiết kế hiện đại đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực này.

(*) Phân tích phần tử hữu hạn (FEA)

Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) là một công cụ mạnh mẽ được sử dụng để mô phỏng quá trình chần và dự đoán các đặc trưng của bề mặt cong, bao gồm phân bố ứng suất, biến dạng, và hiện tượng đàn hồi ngược [1]. Các phần mềm như ABAQUS, ANSYS, hoặc LS-DYNA cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa các thông số chần trước khi tiến hành sản xuất thực tế, từ đó giảm thiểu chi phí và thời gian liên quan đến các thử nghiệm vật lý [2]. FEA không chỉ giúp dự đoán hành vi của vật liệu mà còn hỗ trợ trong việc thiết kế dụng cụ chần và xác định các chuỗi gấp tối ưu để đạt được hình dạng mong muốn.

(*) Thiết kế dựa trên hình học

Các phương pháp thiết kế dựa trên hình học tập trung vào việc xác định các đường gấp và góc uốn cần thiết để tái tạo chính xác bề mặt cong mục tiêu [3]. Các thuật toán tối ưu hóa, như thuật toán di truyền hoặc lập trình tuyến tính, được sử dụng để tìm ra chuỗi gấp tối ưu, đảm bảo độ chính xác về hình học và hiệu quả trong quá trình sản xuất [4]. Phương pháp này đặc biệt hữu ích khi cần tạo ra các bề mặt cong phức tạp với nhiều đường gấp liên tiếp, đòi hỏi

sự phối hợp chặt chẽ giữa thiết kế và sản xuất.

(*) Ứng dụng trí tuệ nhân tạo

Trong những năm gần đây, trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy đã được tích hợp vào quá trình thiết kế mô hình chân để dự đoán và tối ưu hóa các thông số gia công [5]. Các mô hình AI có khả năng phân tích dữ liệu từ các thí nghiệm trước đó, từ đó đề xuất các thông số chân tối ưu, giảm thời gian thiết kế và nâng cao chất lượng sản phẩm. Sự kết hợp giữa AI và các công cụ mô phỏng số đang mở ra những cơ hội mới để cải thiện hiệu quả và độ chính xác của phương pháp chân.

(*) Thách thức kỹ thuật và hướng phát triển

Mặc dù phương pháp chân mang lại nhiều lợi ích về chi phí và tính linh hoạt, nhưng vẫn tồn tại một số thách thức kỹ thuật cần được giải quyết để nâng cao hiệu quả ứng dụng.

(*) Hiện tượng đàn hồi ngược

Hiện tượng đàn hồi ngược, trong đó tấm kim loại có xu hướng trở lại hình dạng ban đầu sau khi lực chân được loại bỏ, là một vấn đề phổ biến, đặc biệt khi gia công các vật liệu có độ bền cao hoặc tấm kim loại dày [6]. Để khắc phục, các kỹ thuật như chân quá mức (overbending) hoặc sử dụng các mô hình dự đoán đàn hồi ngược dựa trên phân tích phần tử hữu hạn đã được đề xuất và áp dụng [7]. Những giải pháp này giúp cải thiện độ chính xác hình học và giảm thiểu sai lệch trong sản phẩm cuối cùng.

(*) Độ chính xác của bề mặt cong phức tạp

Việc tạo ra các bề mặt cong phức tạp đòi hỏi sự phối hợp chính xác giữa nhiều bước gấp

liên tiếp, điều này làm tăng độ phức tạp của cả thiết kế và sản xuất [8]. Các phương pháp thiết kế thích nghi (adaptive design) và tự động hóa quy trình đang được nghiên cứu để giải quyết vấn đề này, cho phép điều chỉnh linh hoạt các thông số chân dựa trên phản hồi từ quá trình sản xuất [9]. Những tiến bộ trong lĩnh vực này hứa hẹn sẽ nâng cao khả năng tạo hình các chi tiết có độ phức tạp cao.

(*) Tích hợp với công nghệ sản xuất thông minh

Trong bối cảnh cách mạng công nghiệp 4.0, việc tích hợp phương pháp chân với các hệ thống sản xuất thông minh, chẳng hạn như Internet vạn vật (IoT) và phân tích dữ liệu lớn, đang trở thành một hướng phát triển đầy tiềm năng [10]. Các hệ thống này cho phép giám sát thời gian thực các thông số chân, từ đó điều chỉnh nhanh chóng để đạt được hiệu quả tối ưu và giảm thiểu lỗi trong quá trình sản xuất. Sự phát triển của các công nghệ này không chỉ cải thiện hiệu suất mà còn mở rộng phạm vi ứng dụng của phương pháp chân trong các ngành công nghiệp hiện đại.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phương pháp chân (bending) là một kỹ thuật gia công kim loại tấm phổ biến, sử dụng lực tác động (thường bởi máy chân) để làm biến dạng dẻo tấm kim loại, tạo thành các biên dạng theo yêu cầu. Phương pháp này không loại bỏ vật liệu mà thay đổi hình dạng thông qua uốn cong. Khi chân nhiều lần liên tiếp với các góc nhỏ, ta có thể tạo ra một chuỗi các đoạn cong nhỏ ghép lại, gần tiệm cận với mặt cong thực tế. Phương pháp này được gọi là “chân đa điểm” hoặc “chân liên tiếp để tạo mặt cong”.

3. QUY TRÌNH THIẾT KẾ MÁY CHẤN

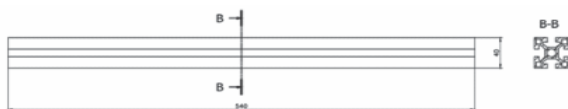
3.1. Phân tích yêu cầu kỹ thuật

Máy chấn được thiết kế với chiều dài chấn tối đa là 22 mm, phù hợp cho các ứng dụng tạo hình chi tiết nhỏ, yêu cầu độ chính xác cao. Kích thước này cho phép xử lý các sản phẩm có biên dạng cong hoặc gấp khúc trong phạm vi nhỏ, thường được sử dụng trong các ngành như điện tử, cơ khí chính xác hoặc sản phẩm tiêu dùng mini. Vật liệu sử dụng để chấn bao gồm nhôm và thép, với độ dày từ 0.5 mm đến 1 mm. Nhôm là vật liệu nhẹ, dễ gia công và có khả năng chống ăn mòn tốt, thích hợp cho các chi tiết yêu cầu trọng lượng nhẹ. Trong khi đó, thép với độ cứng cao hơn sẽ phù hợp với các chi tiết cần độ bền cơ học cao hơn. Do phạm vi độ dày vật liệu tương đối mỏng, máy cần đảm bảo lực chấn phù hợp để không làm biến dạng hoặc gây hư hỏng bề mặt vật liệu trong quá trình gia công. Điều này đặt ra yêu cầu về tính toán lực chấn chính xác và thiết kế dao chấn phù hợp.

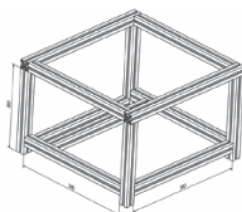
3.2. Thiết kế phần cơ khí

a. Thiết kế khung máy

Lựa chọn vật liệu: Nhôm định hình.



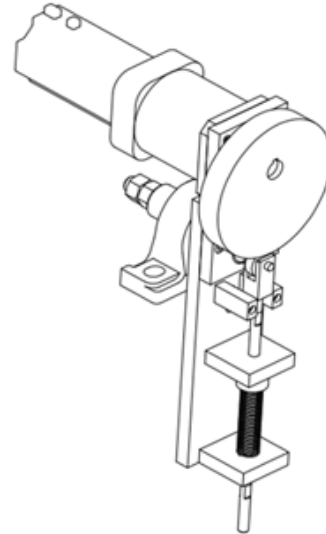
Hình 1. Hình dạng của nhôm định hình



Hình 2. Khung máy

b. Cơ cấu truyền động

Ở đây, ta sẽ dùng cơ cấu tay quay – thanh truyền.



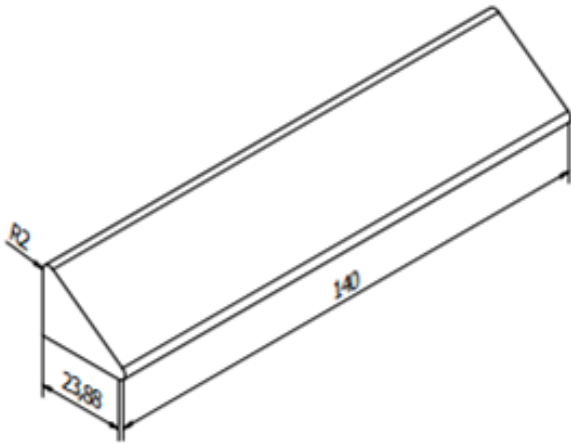
Hình 3. Cơ cấu quay

c. Thiết kế dao chấn

Dao chấn là một trong những bộ phận quan trọng nhất trong hệ thống máy chấn, trực tiếp quyết định đến hình dạng, độ chính xác và chất lượng của sản phẩm sau khi gia công. Trong thiết kế này, dao chấn được lựa chọn là dạng chữ V – một loại dao phổ biến và hiệu quả cao trong các quá trình chấn kim loại tấm, đặc biệt là khi cần tạo ra các góc gấp đều và chính xác.

Dao chấn dạng chữ V có ưu điểm là khả năng phân bố lực đồng đều lên vật liệu, giúp giảm nguy cơ biến dạng không mong muốn và đảm bảo bề mặt sản phẩm sau khi chấn đạt được độ mịn và độ chính xác cao. Với biên dạng này, góc V sẽ quyết định đến góc chấn của sản phẩm, do đó cần được thiết kế phù hợp với yêu cầu kỹ thuật cụ thể của chi tiết cần tạo hình.





Hình 4. Dao chân

Chiều dài dao được lựa chọn là 140 mm, lớn hơn nhiều so với chiều dài chân tối đa là 22 mm. Việc sử dụng dao có chiều dài lớn hơn không chỉ giúp đảm bảo tính ổn định và độ cứng vững trong suốt quá trình chấn mà còn tạo điều kiện thuận lợi nếu có nhu cầu mở rộng phạm vi làm việc của máy trong tương lai.

Dao chân sẽ được chế tạo từ vật liệu có độ cứng cao, chẳng hạn như thép công cụ (tool steel) đã qua xử lý nhiệt, nhằm đảm bảo khả năng chịu lực tốt và tuổi thọ sử dụng lâu dài. Bề mặt dao cũng cần được gia công chính xác và có thể được phủ lớp chống mài mòn để tăng khả năng làm việc với các vật liệu có độ cứng cao hơn, đồng thời hạn chế hiện tượng dính vật liệu khi làm việc với nhôm.

Tóm lại, việc lựa chọn và thiết kế dao chân dạng chữ V với chiều dài 140 mm là phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của máy, đảm bảo khả năng tạo hình ổn định, chính xác và đáp ứng tốt các tiêu chí về độ bền và hiệu suất làm việc.



Hình 5. Chỉnh dao chân

3.3. Thiết kế hệ thống điều khiển

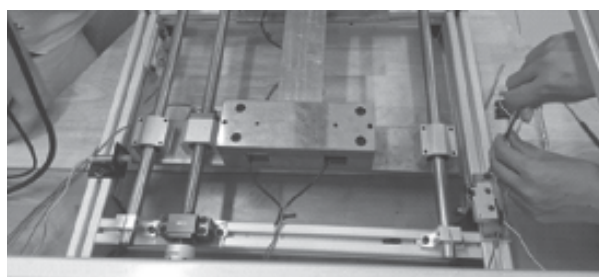
Hệ thống điều khiển của máy chấn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ chính xác, an toàn và hiệu quả trong quá trình vận hành. Để đạt được điều này, hệ thống được thiết kế tích hợp các cảm biến hiện đại, bao gồm cảm biến hành trình và cảm biến lực.

Cảm biến hành trình được sử dụng để theo dõi vị trí tức thời của bàn chấn hoặc dao chấn trong suốt chu kỳ hoạt động. Thông qua tín hiệu từ cảm biến này, bộ điều khiển có thể xác định chính xác điểm bắt đầu, điểm dừng và hành trình di chuyển của cơ cấu chấn, từ đó giúp đảm bảo độ chính xác cao về kích thước và hình dạng sản phẩm sau khi chấn. Ngoài ra, cảm biến hành trình còn hỗ trợ trong việc thiết lập các giới hạn an toàn và điều chỉnh tốc độ chuyển động trong các giai đoạn khác nhau của quá trình chấn.

Cảm biến lực được sử dụng để đo lực tác động thực tế trong quá trình chấn. Việc giám

sát liên tục lực chấn giúp đảm bảo rằng lực tác dụng không vượt quá giới hạn cho phép, tránh gây hư hại cho vật liệu hoặc dao chấn. Đồng thời, dữ liệu từ cảm biến lực cũng cho phép hệ thống điều khiển phản hồi nhanh chóng trong trường hợp có sự bất thường xảy ra, từ đó nâng cao độ an toàn và độ tin cậy trong quá trình vận hành.

Sự kết hợp giữa hai loại cảm biến này giúp hệ thống điều khiển có khả năng tự động hóa cao, dễ dàng hiệu chỉnh, giám sát và đảm bảo chất lượng sản phẩm sau mỗi chu kỳ chấn. Hơn nữa, hệ thống có thể được kết nối với màn hình điều khiển hoặc phần mềm giao diện để người vận hành có thể theo dõi và điều chỉnh các thông số kỹ thuật một cách trực quan và chính xác.



Hình 6. Lắp hệ thống điều khiển

4. KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành thiết kế, mô hình hóa và mô phỏng thành công một hệ thống máy chấn có khả năng tạo hình mặt cong kim loại tấm sử dụng cơ cấu tay quay – thanh truyền, với sự hỗ trợ từ phần mềm Autodesk Inventor. Các kết quả thu được từ mô phỏng động học đã chứng minh rằng cơ cấu đơn giản này có thể thực hiện quá trình chấn theo từng bước, tạo ra mặt cong với độ chính xác chấp nhận được, phù hợp với yêu cầu trong sản xuất quy mô nhỏ và vừa.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Trọng Hiếu;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Phan Hữu Hoàng Ninh, Nguyễn Trọng Hiếu, Trần Quốc Hùng, Nguyễn Trà Kim Quyên.

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: SV2025-344. ♦

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Altmeyer, G., Abed-Meraim, F., & Balan, T. (2009), “*Formability prediction of thin metal sheets using various localization criteria*”. International Journal of Material Forming, 2, 423-426. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0450-5>
- [2]. Bagherzadeh, S., Mirnia, M. J., & Mollaei Dariani, B. (2015), “*Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets*”. Journal of Manufacturing Processes, 18, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.03.001>
- [3]. Björklund, O., Govik, A., & Nilsson, L. (2014), “*Prediction of fracture in a dual-phase steel subjected to non-linear straining*”. Journal of Materials Processing Technology, 214, 2748-2758. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.011>
- [4]. Chu, X., Leotoing, L., Guines, D., & Ragneau, 

- E. (2014), “*Temperature and strain rate influence on AA5086 forming limit curves: Experimental results and discussion on the validity of the M-K model*”. International Journal of Mechanical Sciences, 78, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.11.015>
- [5]. Djavanroodi, F., & Derogar, A. (2010), “*Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets*”. Materials & Design, 31, 4866-4875. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.033>
- [6]. Hashemi, R., & Karajibani, E. (2016), “*Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniak and Kuczynski theory*”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. <https://doi.org/10.1177/0954405416654419>
- [7]. Hussein, T., Umar, M., Qayyum, F., Guk, S., & Pahl, U. (2022), “*Micromechanical effect of martensite attributes on forming limits of dual-phase steels investigated by crystal plasticity-based numerical simulations*”. Crystals, 12(2), 155. <https://doi.org/10.3390/cryst12020155>
- [8]. Hu, Q., Zhang, F., Li, X., & Chen, J. (2018), “*Overview on the prediction models for sheet metal forming failure: Necking and ductile fracture*”. Acta Mechanica Solida Sinica, 31, 259-289. <https://doi.org/10.1007/s10338-018-0095-3>
- [9]. ISO 12004-2:2008. (2008), “*Metallic materials – Sheet and strip – Determination of forming-limit curves – Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory*”. <https://www.iso.org/standard/43621.html>
- [10]. Karajibani, E., Hashemi, R., & Sedighi, M. (2016), “*Experimental determination of forming limit diagram in aluminum-copper two-layer metallic sheets (in Persian)*”. Journal of Science and Technology of Composites, 2(4), 45-50.
- [11]. Min, J., Lin, J., & Carter, J. T. (2013), “*Analytical method for forming limit diagram prediction with application to a magnesium ZEK100-O alloy*”. Journal of Materials Engineering and Performance, 22, 3324-3336. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0700-4>
- [12]. Peixinho, N., Jones, N., & Pinho, A. (2005), “*Application of dual-phase and TRIP steels on the improvement of crashworthy structures*”. Materials Science Forum, 502, 181-188.
- [13]. Sattarpanah Karganroudi, S., Shojaei, S., Hashemi, R., Rahmatabadi, D., Jamalian, S., Aminzadeh, A., & Ibrahim, H. (2021), “*Insight into the influence of punch velocity and thickness on forming limit diagrams of AA 6061 sheets – Numerical and experimental analyses*”. Metals, 11, 2010. <https://doi.org/10.3390/met11122010>
- [14]. Tekkaya, A. E., Bouchard, P.-O., Bruschi, S., & Tasan, C. C. (2020), “*Damage in metal forming*”. CIRP Annals, 69, 600-623. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.009>