

THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG

DESIGN THE BENDING MACHINE

Bùi Minh Luân, Nguyễn Văn Tú, Huỳnh Đỗ Song Toàn, Vũ Quang Huy*

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

Email: 21144091@student.hcmute.edu.vn;

tunv@hcmute.edu.vn;

toanhds@hcmute.edu.vn;

*huyvq@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Máy uốn ống là một thiết bị quan trọng trong ngành cơ khí, đảm nhiệm chức năng tạo hình các ống kim loại với độ chính xác cao mà không gây biến dạng tiết diện. Với sự phát triển của công nghệ mô hình hóa 3D, việc thiết kế máy uốn ống ngày càng được tối ưu hóa thông qua các phần mềm CAD hiện đại ngay từ giai đoạn lên ý tưởng cho thiết kế. Nghiên cứu này tổng hợp và phân tích các bước thiết kế chung cho máy uốn ống bằng phần mềm CAD 3D, bao gồm các bước từ phân tích yêu cầu sử dụng, lựa chọn nguyên lý uốn, thiết kế cấu trúc cơ khí, mô hình hóa 3D, phân tích cơ động học, và kiểm tra kỹ thuật. Việc ứng dụng CAD 3D giúp nâng cao hiệu suất, giảm chi phí, rút ngắn thời gian phát triển và tăng độ chính xác sản phẩm.

Từ khóa: *Thiết kế máy uốn ống; CAD 3D; Mô hình máy uốn ống 3D; Thiết kế cơ khí.*

ABSTRACT

The pipe bending machine is a vital device in the mechanical engineering industry, responsible for shaping metal pipes with high precision while maintaining cross-sectional integrity. With the advancement of 3D modeling technology, the design process for pipe bending machines has been increasingly optimized through modern CAD software, starting from the conceptual design phase. This study compiles and analyzes the general design procedures of pipe bending machines using 3D CAD software, including requirement analysis, selection of bending principles, mechanical structure design, 3D modeling, kinematic analysis, and technical verification. The application of 3D CAD significantly improves efficiency, reduces costs, shortens development time, and enhances product accuracy.

Keywords: *Pipe bending machine design; 3D CAD; 3D pipe bending machine model; Mechanical design.*

1. TỔNG QUAN

Máy uốn ống là một thiết bị cơ khí đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp như sản xuất ô tô, xây dựng, chế tạo nội thất và hệ thống nhiệt. Với yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và tính linh hoạt, các máy uốn ống hiện đại phải có khả năng gia công những hình dạng phức tạp và bán kính cong nhỏ, đáp ứng nhu cầu đa dạng của thị trường. Quá trình thiết kế và chế tạo máy uốn ống không chỉ đòi hỏi sự hiểu biết sâu rộng về cơ khí và vật liệu mà còn cần sự hỗ trợ của các công nghệ tiên tiến để đảm bảo hiệu quả và chất lượng sản phẩm. Bài viết này trình bày tổng quan về vai trò, vật liệu, công nghệ hỗ trợ và những thách thức trong thiết kế máy uốn ống, đồng thời đề cập đến các xu hướng phát triển trong tương lai [1].

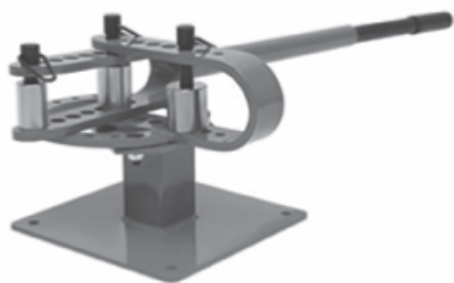
Máy uốn ống được thiết kế để tạo hình các ống kim loại mà không gây ảnh hưởng đến cấu trúc vật liệu, đảm bảo sản phẩm đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật nghiêm ngặt như ASME hoặc ISO. Trong ngành ô tô, máy uốn ống được sử dụng để sản xuất các bộ phận như ống xả, khung ghế hoặc hệ thống làm mát. Trong lĩnh vực xây dựng, thiết bị này hỗ trợ chế tạo các cấu trúc thép và hệ thống đường ống dẫn nước hoặc khí. Ngành nội thất tận dụng máy uốn ống để tạo ra các khung ghế hoặc chi tiết trang trí có hình dạng cong tinh tế, trong khi các hệ thống nhiệt và điều hòa không khí yêu cầu các ống dẫn khí và ống trao đổi nhiệt với độ chính xác cao. Sự đa dạng trong ứng dụng đòi hỏi máy uốn ống phải có khả năng xử lý nhiều loại vật liệu, từ thép carbon thông thường đến các hợp kim tiên tiến như titan hoặc inconel, đồng thời đáp ứng các kích thước và hình dạng ống khác nhau [2-5].

Vật liệu được sử dụng trong quá trình uốn ống thường bao gồm thép carbon, thép

không gỉ, nhôm, đồng và các hợp kim có độ bền cao. Mỗi loại vật liệu có đặc tính cơ học riêng, đòi hỏi các thông số uốn được điều chỉnh cẩn thận. Chẳng hạn, thép không gỉ có độ bền cao nhưng dễ bị biến dạng nếu lực uốn không đồng đều, trong khi nhôm yêu cầu lực uốn thấp hơn nhưng dễ nứt nếu bán kính cong quá nhỏ. Để đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật, máy uốn ống cần đạt độ chính xác cao với sai số chỉ từ ± 0.1 mm đến ± 0.5 mm, tùy thuộc vào ứng dụng. Ngoài ra, thiết bị phải đủ linh hoạt để gia công các ống có đường kính từ vài milimet đến hàng chục centimet, đồng thời tối ưu hóa hiệu suất bằng cách tăng tốc độ uốn và giảm thời gian chết trong sản xuất. Kết cấu máy cũng cần đảm bảo độ bền để chịu được tải trọng lớn và duy trì an toàn cho người vận hành trong quá trình sử dụng [6-9].

Sự phát triển của công nghệ thiết kế hỗ trợ máy tính (CAD) và mô phỏng kỹ thuật (CAE) đã mang lại những thay đổi lớn trong thiết kế máy uốn ống. Các phần mềm như Autodesk Inventor, Solidworks, CATIA và Creo cho phép kỹ sư mô phỏng chi tiết các cơ cấu truyền động, phân tích ứng suất và đánh giá hiệu suất của máy trước khi chế tạo. Những công cụ này giúp đảm bảo tính đồng bộ trong chuyển động của các bộ phận như khuôn uốn, trục truyền động hoặc hệ thống thủy lực, đồng thời phát hiện sớm các vấn đề như ứng suất tập trung hoặc ma sát quá mức. Nhờ các thuật toán tối ưu hóa tích hợp, kỹ sư có thể giảm trọng lượng máy, tiết kiệm vật liệu và tăng hiệu suất vận hành. Hơn nữa, việc tích hợp hệ thống điều khiển số (CNC) và tự động hóa vào máy uốn ống hiện đại cho phép lập trình chính xác các thông số uốn, giảm thiểu sai sót do con người và nâng cao hiệu quả trong sản xuất hàng loạt [10-12].





Hình 1. Máy uốn tay quay



Hình 2. Máy uốn con lăn

Dù có nhiều tiến bộ, thiết kế máy uốn ống vẫn đối mặt với những thách thức đáng kể. Việc gia công các hình dạng phức tạp với nhiều góc cong liên tiếp hoặc bán kính thay đổi đòi hỏi hệ thống khuôn và cơ cấu truyền động phải có độ linh hoạt cao. Quá trình uốn cũng có thể gây ra các vấn đề như nứt, gãy hoặc giảm độ dày thành ống, đặc biệt với các vật liệu có độ dẻo thấp. Ngoài ra, việc sử dụng công nghệ tiên tiến và vật liệu cao cấp làm tăng chi phí chế tạo, trong khi thị trường yêu cầu các giải pháp kinh tế hơn. Tích hợp các hệ thống điều khiển tự động và cảm biến thông minh cũng đặt ra thách thức trong việc phối hợp giữa cơ khí, điện tử và phần mềm. Để vượt qua những khó khăn này, các nhà thiết kế đang áp dụng các phương pháp đa ngành, kết hợp với các kỹ thuật chế tạo tiên

tiến như in 3D để tạo mẫu nhanh hoặc gia công CNC để sản xuất các chi tiết phức tạp [13].

Trong bối cảnh cách mạng công nghiệp 4.0, máy uốn ống đang được phát triển theo hướng thông minh hóa và tích hợp với các hệ thống sản xuất linh hoạt. Các công nghệ như trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) được ứng dụng để giám sát thời gian thực, dự đoán bảo trì và tối ưu hóa quy trình sản xuất. Việc sử dụng vật liệu composite và hợp kim tiên tiến cũng mở ra cơ hội thiết kế các máy uốn ống nhẹ hơn, hiệu suất cao hơn và có khả năng xử lý các vật liệu mới. Xu hướng tự động hóa linh hoạt tiếp tục định hình tương lai của ngành, giúp máy uốn ống đáp ứng tốt hơn nhu cầu của các ngành công nghiệp hiện đại [14].

Thiết kế máy uốn ống là một lĩnh vực kỹ thuật phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp giữa kiến thức cơ khí, vật liệu và công nghệ tiên tiến. Với vai trò quan trọng trong nhiều ngành công nghiệp, máy uốn ống cần đáp ứng các yêu cầu khắt khe về độ chính xác, hiệu suất và khả năng thích nghi với những thay đổi của thị trường. Dù đối mặt với các thách thức về gia công hình dạng phức tạp, kiểm soát biến dạng vật liệu và tối ưu hóa chi phí, các công nghệ như CAD/CAE, CNC và tự động hóa đã góp phần nâng cao hiệu quả thiết kế và sản xuất. Trong tương lai, sự tích hợp của AI, IoT và vật liệu mới sẽ tiếp tục thúc đẩy sự phát triển của máy uốn ống, mang lại những giải pháp hiệu quả và bền vững hơn cho các ngành công nghiệp.

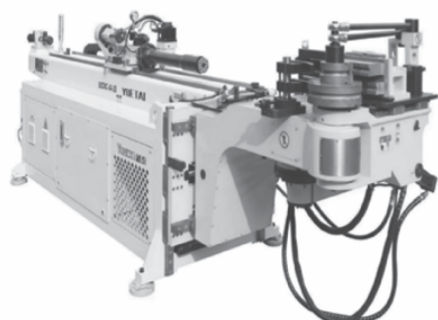
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Thiết kế máy uốn ống dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo, trong đó mô men uốn vượt qua giới hạn đàn hồi của vật liệu, cho phép ống thay đổi hình dạng mà không gây biến dạng tiết diện. Các yếu tố lý thuyết quan trọng bao gồm

lý thuyết uốn dẻo, mô tả quá trình chuyển từ đàn hồi sang dẻo dưới tác dụng của mô men uốn; bán kính uốn tối thiểu, xác định giới hạn uốn mà không gây hư hỏng hoặc xẹp ống; biến dạng thành ống, khi thành ống giãn nở phía ngoài và nén phía trong cần được kiểm soát để tránh phá vỡ tiết diện; và tỷ số D/t , quyết định khả năng uốn và nguy cơ biến dạng ống. Bên cạnh đó, các yếu tố như ma sát, lực uốn và cơ cấu truyền động cũng ảnh hưởng đến hiệu quả và độ chính xác của máy trong quá trình uốn.

3. CÁC LOẠI MÁY UỐN ỐNG

Việc lựa chọn loại máy uốn ống phù hợp là yếu tố quan trọng trong thiết kế, phụ thuộc vào kiểu uốn, vật liệu, độ chính xác và mục đích sử dụng. Các loại máy uốn phổ biến: Máy uốn tay quay là loại đơn giản, dễ sử dụng, chi phí thấp, phù hợp với công việc nhỏ, không yêu cầu độ chính xác cao. Máy uốn con lăn sử dụng hệ thống con lăn đồng bộ để giảm ma sát, thích hợp với ống bán kính lớn và vật liệu đa dạng, tuy nhiên cần điều chỉnh cẩn thận để đảm bảo độ chính xác. Máy uốn thủy lực tạo ra lực uốn mạnh, chính xác và có khả năng uốn các hình dạng phức tạp, nhưng giá thành cao và yêu cầu bảo trì thường xuyên. Máy uốn CNC là loại hiện đại nhất, sử dụng điều khiển số để uốn ống với nhiều góc và bán kính khác nhau mà không cần thay khuôn, rất phù hợp với các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác và năng suất cao.



Hình 3. Máy uốn thủy lực CNC

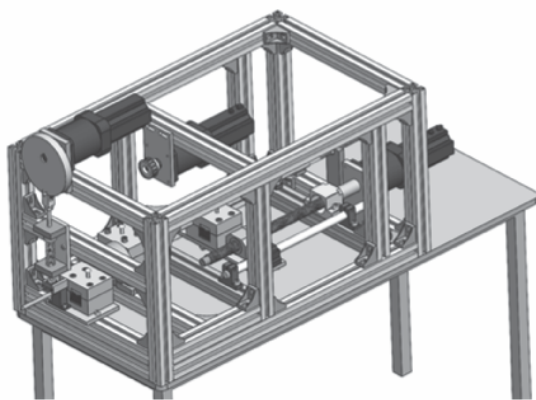
4. QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG BẰNG CAD 3D

Thiết kế máy uốn ống là một quá trình kỹ thuật phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp giữa cơ học, nguyên lý truyền động và công nghệ mô phỏng tiên tiến. Quá trình này không chỉ tập trung vào việc tạo ra một thiết bị hoạt động ổn định mà còn phải đảm bảo độ chính xác cao, hiệu quả sản xuất và khả năng thích nghi với các yêu cầu đa dạng từ thực tế. Việc ứng dụng phần mềm thiết kế hỗ trợ máy tính (CAD) 3D đã trở thành công cụ không thể thiếu, cho phép mô hình hóa, kiểm tra và tối ưu hóa thiết kế trước khi tiến hành chế tạo. Nhờ đó, các sai sót tiềm ẩn được giảm thiểu, thời gian phát triển được rút ngắn và hiệu quả sản xuất được nâng cao đáng kể.

Giai đoạn đầu tiên trong thiết kế máy uốn ống là khảo sát và phân tích yêu cầu kỹ thuật. Các yếu tố cần xem xét bao gồm loại ống, chẳng hạn như ống tròn, vuông hay phi tròn, vì hình dạng ảnh hưởng trực tiếp đến phương pháp uốn và thiết kế khuôn. Đường kính ống quyết định lực uốn cần thiết và kích thước của hệ thống truyền động. Bán kính uốn là một yếu tố quan trọng, bởi bán kính càng nhỏ thì lực uốn càng lớn và yêu cầu kiểm soát biến dạng càng khắt khe. Góc uốn xác định cách bố trí các bộ phận truyền lực và chuyển động của máy. Ngoài ra, vật liệu ống, như thép, nhôm hay đồng, tác động đến độ cứng, khả năng biến dạng và lực cần thiết trong quá trình uốn. Những thông tin này là nền tảng để lựa chọn nguyên lý uốn, hệ truyền động và các tiêu chí đánh giá hiệu quả của máy.

Việc lựa chọn nguyên lý hoạt động của máy uốn ống phụ thuộc vào yêu cầu sản phẩm và công suất mong muốn. Truyền động bàn xoay là một giải pháp đơn giản, phù hợp

cho các ống lớn và ứng dụng không đòi hỏi độ chính xác cao. Trong khi đó, truyền động con lăn mang lại sự linh hoạt và độ chính xác, cho phép dễ dàng điều chỉnh bán kính uốn. Đối với các vật liệu cứng hoặc hình dạng phức tạp, hệ thống thủy lực được ưu tiên nhờ khả năng tạo lực lớn và vận hành hiệu quả. Với sản xuất hàng loạt, công nghệ điều khiển số (CNC) là lựa chọn tối ưu, cung cấp khả năng lập trình đa dạng và độ chính xác cao. Việc chọn nguyên lý phù hợp không chỉ ảnh hưởng đến cấu trúc cơ khí mà còn tác động đến khả năng điều chỉnh và chi phí chế tạo của máy.

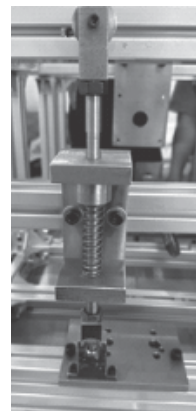


Hình 4. Mô hình hóa 3D trên phần mềm Solidworks

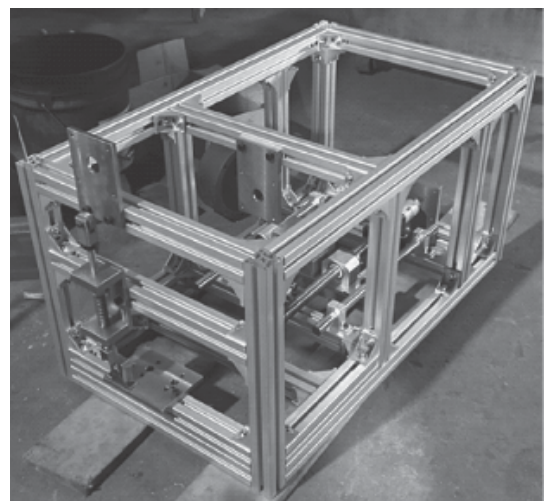
Cấu trúc cơ khí của máy uốn ống được thiết kế để đảm bảo vận hành ổn định, chính xác và bền bỉ. Khung máy đóng vai trò chịu toàn bộ lực tác động, cần được chế tạo từ vật liệu có độ cứng cao để chống biến dạng. Các trục quay và bộ phận dẫn hướng được bố trí để điều khiển chuyển động trơn tru, trong khi con lăn uốn cần được thiết kế tối ưu để giảm ma sát, tăng độ bền và linh hoạt theo các bán kính uốn khác nhau. Mỗi chi tiết phải được tính toán cẩn thận để đảm bảo sự tương thích và hoạt động đồng bộ, từ đó duy trì hiệu suất của máy trong điều kiện vận hành thực tế.

Công nghệ CAD 3D, với các phần mềm

như Autodesk Inventor, Solidworks, CATIA hay Creo, đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết kế. Các phần mềm này cho phép dựng mô hình 3D chính xác về kích thước, vị trí lắp ghép và chuyển động của các bộ phận. Thông qua mô phỏng chuyển động, kỹ sư có thể kiểm tra nguy cơ va chạm, đánh giá hành trình của các bộ phận và đảm bảo sự phối hợp nhịp nhàng. Phân tích lực cũng được thực hiện để xác định các vị trí chịu tải lớn, từ đó điều chỉnh kết cấu cho phù hợp. Nhờ các công cụ này, việc thử nghiệm thực tế được giảm thiểu, giúp tiết kiệm đáng kể thời gian và chi phí chế tạo.



Hình 5. Cơ cấu chân sau khi được gia công và lắp vào thân máy



Hình 6. Máy sau khi được lắp ráp hoàn chỉnh

Sau khi hoàn thiện mô hình 3D, phân tích cơ động học và ứng suất được tiến hành bằng các công cụ phân tích kỹ thuật (CAE) và phân tích phần tử hữu hạn (FEA). Phân tích chuyển động giúp đánh giá tính ổn định và tránh xung đột cơ khí giữa các bộ phận. Mô phỏng lực, ứng suất và biến dạng cho phép xác định các vùng yếu hoặc điểm có nguy cơ nứt gãy, từ đó gia cường hoặc thay đổi vật liệu để tăng độ bền. Những bước này đảm bảo máy hoạt động ổn định và có tuổi thọ cao trong điều kiện thực tế.

Cuối cùng, bản thiết kế được chế tạo thử nghiệm và kiểm tra kỹ thuật. Các bài kiểm tra bao gồm đo độ chính xác của bán kính và góc uốn, đánh giá biến dạng tiết diện sau uốn, đồng thời thử nghiệm lặp lại nhiều lần để kiểm tra độ ổn định và khả năng vận hành lâu dài. Kết quả từ các bài kiểm tra thực tế là cơ sở để điều chỉnh thiết kế, hoàn thiện sản phẩm và chuẩn bị cho quá trình sản xuất hàng loạt. Quá trình này đảm bảo máy uốn ống không chỉ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật mà còn đạt hiệu suất tối ưu trong thực tế.

5. ƯU ĐIỂM KHI ỨNG DỤNG CAD 3D TRONG THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG

Việc ứng dụng phần mềm CAD 3D trong thiết kế máy uốn ống mang lại nhiều ưu điểm nổi bật. CAD 3D giúp tăng độ chính xác trong mô hình hóa chi tiết, đảm bảo các bộ phận cơ khí như trục, con lăn hay bộ truyền động khớp nhau hoàn hảo, tránh lỗi lắp ráp. Khả năng hiệu chỉnh nhanh và tự động cập nhật bản vẽ giúp tiết kiệm thời gian và giảm sai sót. Ngoài ra, CAD 3D còn cho phép mô phỏng hoạt động thực tế của máy, từ đó phát hiện sớm các lỗi thiết kế, giảm chi phí thử nghiệm. Mô hình 3D cũng dễ dàng chia sẻ giữa các bộ phận kỹ thuật, thúc đẩy sự phối hợp hiệu quả. Cuối cùng, dữ liệu từ CAD 3D có thể

được sử dụng trực tiếp cho gia công CNC hoặc in 3D, rút ngắn thời gian sản xuất.

6. MỘT SỐ LƯU Ý KỸ THUẬT KHI THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG

Khi thiết kế máy uốn ống, cần xem xét kỹ các yếu tố kỹ thuật nhằm đảm bảo độ bền, hiệu suất và an toàn vận hành. Trước hết, vật liệu chế tạo các bộ phận như trục quay, con lăn và khung máy nên là thép hợp kim tôi cứng để chịu lực và chống mài mòn tốt. Các chi tiết chịu ma sát lớn cần được xử lý bề mặt như mạ crom hoặc thấm nitơ để tăng tuổi thọ. Hệ thống truyền động phải được tính toán chính xác về mô-men xoắn và lực uốn, đồng thời chọn đúng loại động cơ (điện, thủy lực, khí nén) để đảm bảo máy hoạt động ổn định. Cơ cấu truyền động như bánh răng, đai hoặc xích cần lắp đặt hợp lý, có che chắn bảo vệ. Đối với máy bán tự động hoặc CNC, nên tích hợp cảm biến vị trí, lực và góc quay để kiểm soát quá trình uốn, nâng cao độ chính xác và đảm bảo an toàn cho người vận hành.

7. KẾT LUẬN

Thiết kế máy uốn ống là một quá trình phức tạp đòi hỏi sự kết hợp giữa kiến thức cơ khí, vật liệu, tự động hóa và công nghệ mô phỏng. Việc ứng dụng phần mềm CAD 3D không chỉ giúp nâng cao độ chính xác mà còn tạo điều kiện để cải tiến liên tục, tiết kiệm chi phí và thời gian phát triển. Với sự phát triển không ngừng của công nghệ, máy uốn ống ngày càng được cải tiến để đáp ứng yêu cầu cao về độ chính xác, tốc độ và khả năng tùy biến trong sản xuất công nghiệp hiện đại.

(*) 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: Bùi Minh Luân, Nguyễn Văn Tú, Huỳnh Đỗ Song Toàn, 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: SV2025-360.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Abd El-Aty, A., Guo, X. Z., Lee, M. G., Tao, J., Hou, Y., & Hu, S. (2023), “A review on flexibility of free bending forming technology for manufacturing thin-walled complex-shaped metallic tubes”. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 6(2), 165-188. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.11.001>
- [2]. Yang, H. (2014), “Local loading control of uneven deformation and precise plastic forming – Principle and technology”. Science Press.
- [3]. He, S., Zeng, W., Xu, J., Yu, H., & Li, S. (2022), “The texture evolution related to the interactions between α and β phases in dual-phase region annealing of a near α titanium alloy pipe after Pilger cold rolling”. *Journal of Alloys and Compounds*, 890, 161807. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161807>
- [4]. Lee, H. W., Bae, J. H., Kim, M. S., & Kang, S. H. (2011), “Optimum design of pipe bending based on high-frequency induction heating using dynamic reverse moment”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1051-1058. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0140-7>
- [5]. Allwood, J. M., Duncan, S. R., Cao, J., Groche, P., Hirt, G., Kinsey, B., Kuboki, T., Liewald, M., Sterzing, A., & Tekkaya, A. E. (2016), “Closed-loop control of product properties in metal forming”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(2), 573-596. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.002>
- [6]. Heller, B., & Kleiner, M. (2006), “Semi-analytical process modelling and simulation of air bending”. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 41(1), 57-80. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA124>
- [7]. Zhao, B., Yang, Y. L., Zhao, H. Z., & Wu, J. P. (2009), “Research on thermal pushing bending process of high strength titanium alloy annular pipe”. *Journal of Materials Engineering*, (S1), 167-171.
- [8]. Osadchii, V. Y., Gaas, E. A., Zvonarev, D. Y., & Kolikov, A. P. (2014), “Shaping of thick sheet in the production of welded large-diameter pipe”. *Steel in Translation*, 44(5), 63-66. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050098>
- [9]. Wang, G., Zhang, K. F., Wu, D. Z., Wang, J. Z., & Yu, Y. D. (2006), “Superplastic forming of bellows expansion joints made of titanium alloys”. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.012>
- [10]. Zhan, M., Wang, Y., Yang, H., & Huang, T. (2016), “An analytic model for pipe bending spring back considering different parameter variations of Ti-alloy pipes”. *Journal of Materials Processing Technology*, 236, 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.008>
- [11]. Genser, B., & Kleinjans, B. (2008), “L-SAW large-diameter pipe production. Top quality is what counts – Where are the trends leading? What are the benefits of UOE and JCOE?”. In *Baosteel BAC 2008* (pp. E89-E93). Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House.
- [12]. Liu, C. M., Abd El-Aty, A., Lee, M. G., Wang, S. Q., & Shi, T. (2023), “Predicting the forming limits in the tube hydroforming process by coupling the cyclic plasticity model with ductile fracture criteria”. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.103>
- [13]. Thome, M., & Vochsen, J. (2011), “High-speed calculation tool for design of the JCO® pipe forming process”. *Steel Research International*, Special Edition, 331-336.
- [14]. Abd El-Aty, A., Zhang, S. H., Xu, Y., Hou, Y., & Ha, S. (2019), “Deformation behavior and anisotropic response of 2060 Al-Cu-Li alloy: Experimental investigation and computational homogenization-based crystal plasticity modeling”. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1235-1249. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.08.006>