

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU KẾT CẤU MÁY KHẮC LASER CO₂ SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ CNC

RESEARCH ON OPTIMIZING THE STRUCTURE OF A CO₂ LASER ENGRAVING MACHINE USING CNC TECHNOLOGY

Trần Công Thức^{1,*}, Trần Danh Vũ²

¹Trường Đại học Thái Bình

²Trường Cao đẳng Công thương Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: trancongthuc1980@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu thiết kế và tối ưu kết cấu máy khắc laser CO₂ sử dụng công nghệ CNC nhằm nâng cao độ chính xác, tốc độ gia công và độ ổn định vận hành. Trên cơ sở khảo sát các máy laser CO₂ công suất nhỏ hiện có, hệ thống được thiết kế gồm bốn phần chính: hệ cơ khí, hệ quang học, hệ điều khiển CNC và hệ thống làm mát. Kết cấu khung máy được tối ưu bằng mô phỏng số nhằm tăng độ cứng vững, giảm rung động và ổn định nhiệt.

Máy có kích thước tổng thể 1000×1000×500 mm, vùng làm việc 600×600×200 mm, sử dụng ống laser CO₂ công suất 40W, bước sóng 10,6 μm. Kết quả mô phỏng và thử nghiệm cho thấy kết cấu sau tối ưu đảm bảo điều kiện bền, giảm khối lượng khoảng 12%, độ chính xác gia công đạt 0,01 mm, tốc độ khắc tối đa 500 mm/s và vận hành ổn định trong dải nhiệt độ 25÷30°C. Kết quả khẳng định tính khả thi và hiệu quả của giải pháp ứng dụng cho đào tạo và sản xuất quy mô vừa và nhỏ.

Từ khóa: Tối ưu kết cấu; Laser CO₂; Độ chính xác gia công; Công nghệ CNC.

ABSTRACT

This paper presents a study on the design and optimization of a CO₂ laser engraving machine using CNC technology to improve accuracy, processing speed, and operational stability. Based on a survey of existing small-power CO₂ laser machines, the system is designed with four main parts: mechanical system, optical system, CNC control system, and cooling system. The machine frame structure is optimized using numerical simulation to increase rigidity, reduce vibration, and improve thermal stability.

The machine has overall dimensions of 1000×1000×500 mm, a working area of 600×600×200 mm, and uses a 40W CO₂ laser tube with a wavelength of 10.6 μm. Simulation and testing results show that the optimized structure ensures durability, reduces weight by approximately 12%, achieves machining accuracy of 0,01 mm, a maximum engraving speed of 500 mm/s, and stable operation within a temperature range of 25÷30°C. The results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed solution for training and small-scale production.

Keywords: Structural optimization; CO₂ laser; Machining precision; CNC technology.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ laser CO₂ là một trong những phương pháp gia công tiên tiến, cho phép khắc và cắt chính xác trên nhiều loại vật liệu khác nhau như gỗ, mica, nhựa, da và kim loại mỏng [1-3]. Tuy nhiên, các máy khắc laser cỡ nhỏ hiện nay thường gặp hạn chế về độ cứng vững kết cấu, độ ổn định nhiệt và hiệu suất năng lượng [4-6].

Kết cấu cơ khí của máy là yếu tố then chốt quyết định độ chính xác, tốc độ và tuổi thọ vận hành. Khi kết cấu không được tối ưu, rung động và sai số động học tăng cao, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng khắc [7]. Bên cạnh đó, việc bố trí đường dẫn quang không tối ưu và hệ thống làm mát chưa hiệu quả khiến chất lượng chùm tia không ổn định gây giảm hiệu suất phát laser [8, 9].

Các nghiên cứu gần đây [10-13] cho thấy việc tối ưu hóa kết cấu khung và cơ cấu truyền động bằng phương pháp mô phỏng số (CAE, FEM) giúp nâng cao độ cứng, giảm khối lượng và cải thiện khả năng chống rung. Đồng thời, việc sử dụng tinh thể khí trong hệ thống làm mát góp phần ổn định nhiệt, giảm tiêu hao năng lượng và tăng độ tin cậy của nguồn laser.

Với mục tiêu nâng cao hiệu suất, giảm sai số và tăng độ bền tổng thể, nhóm nghiên cứu tiến hành thiết kế và tối ưu kết cấu, cơ cấu truyền động, hệ quang học và hệ làm mát máy khắc laser CO₂ sử dụng công nghệ CNC, phục vụ giảng dạy và nghiên cứu trong lĩnh vực cơ điện tử.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khảo sát các mẫu máy laser CO₂ hiện hành về cấu trúc cơ khí, đường dẫn quang, phương pháp điều khiển và cơ chế tản nhiệt.

Thiết kế mô hình 3D bằng Inventor để phân tích kết cấu tổng thể và phân bố tải trọng.

Phân tích phần tử hữu hạn để mô phỏng ứng suất, biến dạng khung máy, từ đó điều chỉnh độ dày và tiết diện vật liệu.

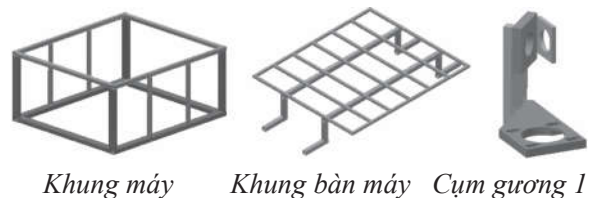
Tiến hành thử nghiệm độ chính xác, tốc độ khắc, độ ổn định nhiệt và khả năng khắc vật liệu. Đánh giá và tối ưu thông số thiết kế dựa trên kết quả thử nghiệm.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

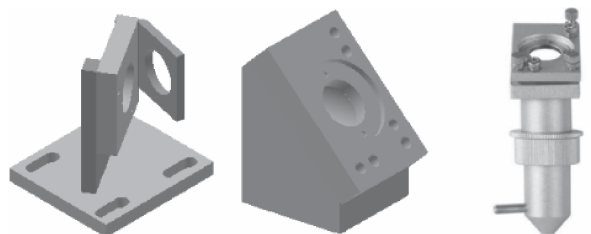
3.1. Kết quả thiết kế

Hệ thống cơ khí: Khung máy sử dụng thép hộp 30×60mm. Cơ cấu truyền động XY sử dụng thanh trượt tuyến tính và đai răng GT2 độ chính xác cao. Vùng làm việc đạt 600×600×200mm, phù hợp cho các mô hình đào tạo.

Hệ thống quang học: Ống laser CO₂ công suất 40W, bước sóng 10,6μm. Hệ gương phản xạ 3 điểm phối hợp thấu kính hội tụ f = 50,8mm. Phân bố đường dẫn quang tối ưu, giảm tổn hao dưới 5%.



Khung máy Khung bàn máy Cụm gương 1



Cụm gương 2 Cụm gương 3 Cụm đầu khắc laser

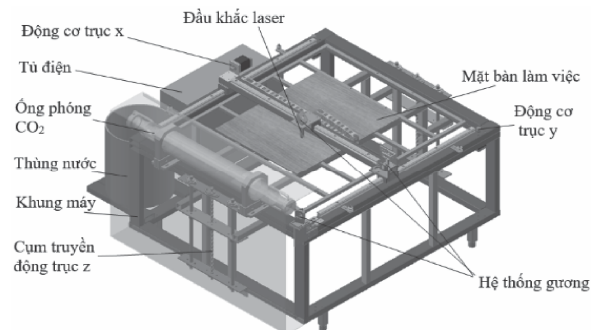


Cụm căng đai Cụm trục xy Cụm trục z
Hình 4. Các cụm thiết kế chính của máy khắc laser CO_2

Hệ thống điều khiển: Bộ điều khiển dựa trên Arduino Uno R3 - CNC Shield V3 - Driver 8825 tương thích G-code. Động cơ bước NEMA17 – 40 cho trục X-Y-Z, góc bước $1,8^\circ$; dòng điện định mức 1.2A.

Hệ thống làm mát: Làm mát cưỡng bức bằng nước tuần hoàn và sử dụng tinh thể khí trong hệ thống làm mát.

Kích thước tổng thể máy: $1000 \times 1000 \times 500$ mm. Độ chính xác đạt được: 0,01mm. Tốc độ khắc tối đa: 500mm/s. Dải nhiệt độ vận hành ổn định: $25-30^\circ C$. Vật liệu thử nghiệm: gỗ, acrylic, kim loại mỏng, da.



Hình 3. Mô hình máy cắt Plasma CNC

Máy khắc laser CO_2 được thiết kế với kết cấu khung thép hộp, đảm bảo độ cứng vững và khả năng chịu tải. Kích thước tổng thể của máy là $1000 \times 1000 \times 500$ mm, vùng làm việc đạt $600 \times 600 \times 200$ mm. Hệ truyền động trục X–Y sử dụng thanh trượt tuyến tính kết hợp đai răng GT2, đáp ứng yêu cầu chuyển động chính xác và tốc độ cao.

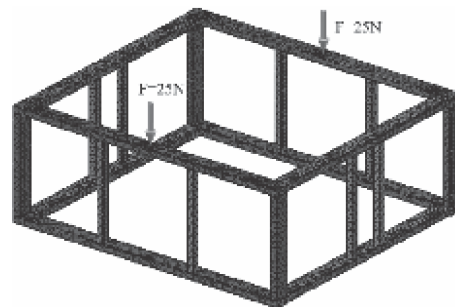
Hệ quang học sử dụng ống laser CO_2 công suất 40 W, bước sóng $10,6\mu m$, kết hợp hệ gương phản xạ và thấu kính hội tụ cho phép tập trung năng lượng ổn định lên bề mặt gia công. Hệ điều khiển CNC được xây dựng trên nền Arduino Uno R3 và CNC Shield, tương thích với mã G-code. Hệ thống làm mát bằng nước tuần hoàn giúp máy hoạt động ổn định trong dải nhiệt độ $25-30^\circ C$.

3.2. Kết quả tối ưu kết cấu

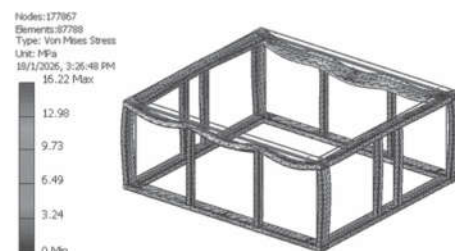
Thông số vật liệu khung máy: Thép C35; Khối lượng riêng: $7,850 \text{ g/cm}^3$; Giới hạn bền: 500-650 MPa; Giới hạn chảy: 300 đến 400 MPa; Module đàn hồi: 200 MPa; Hệ số Poisson: 0,3.

a) Kiểm bền khung máy

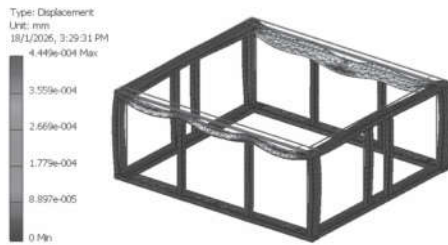
Trong điều kiện tĩnh, khung máy chịu tác dụng của trọng lượng toàn bộ các khâu và trọng lượng của bản thân. Với lực tập trung $F = 25N$ tại một số vị trí đặc trưng.



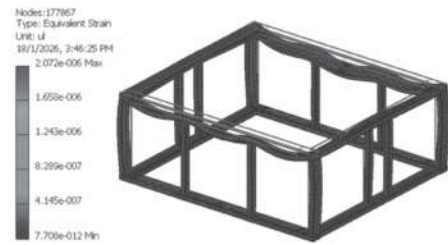
Điều kiện biên cho mô hình



Kết quả ứng suất



Kết quả chuyển vị tĩnh



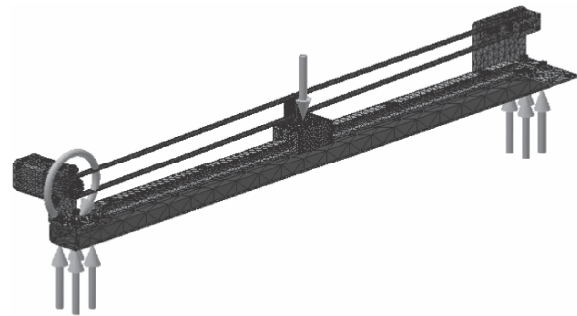
Kết quả biến dạng

Hình 4. Kiểm bền khung máy

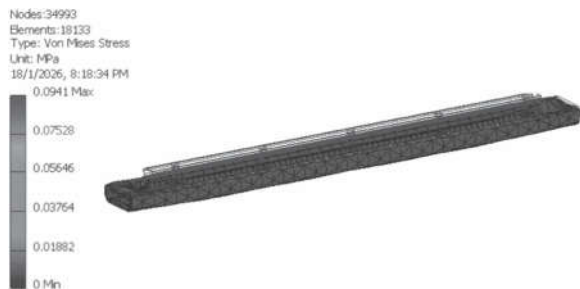
Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất phân bố chủ yếu tại các vị trí liên kết giữa các dầm ngang và dầm đứng, đặc biệt là các góc khung và vùng chịu tải trực tiếp. Ứng suất lớn nhất là 12,98 (MPa), thấp hơn rất nhiều so với giới hạn chảy của thép C35 (300-400 MPa). Điều này chứng tỏ khung làm việc hoàn toàn trong miền đàn hồi, không xuất hiện nguy cơ chảy dẻo hay phá hủy do ứng suất. Kết quả chuyển vị cho thấy độ võng lớn nhất của khung là rất nhỏ, phân bố đều và tập trung chủ yếu ở các dầm phía trên nơi chịu tải trực tiếp. Biến dạng tổng thể của khung không đáng kể, hình dạng kết cấu được giữ ổn định, không xảy ra biến dạng cục bộ bất lợi. Điều này phản ánh độ cứng vững của khung đáp ứng tốt yêu cầu làm việc.

b) Kiểm bền trục X

Trong điều kiện tĩnh, lực tác dụng lên trục X như sau bao gồm: Moment của động cơ và Trọng lực P của trục X.



Điều kiện biên cho mô hình



Kết quả ứng suất



Kết quả chuyển vị tĩnh

Hình 5. Kiểm bền trục X

Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất phân bố chủ yếu dọc theo thân khung, các khu vực liên kết, gối đỡ và vị trí chịu tác động trực tiếp của moment động cơ với giá trị lớn nhất 0,09 Mpa. So sánh với giới hạn chảy của thép C35, ứng suất lớn nhất trong mô hình nhỏ hơn rất nhiều, do đó kết cấu làm việc hoàn toàn trong miền đàn hồi; Kết quả chuyển vị cho thấy chuyển vị lớn nhất vào khoảng $1,0 \times 10^{-5}$ m ($\approx 0,01$ mm). Giá trị chuyển vị này là rất nhỏ, không gây ảnh hưởng đến độ chính xác làm việc của trục X.

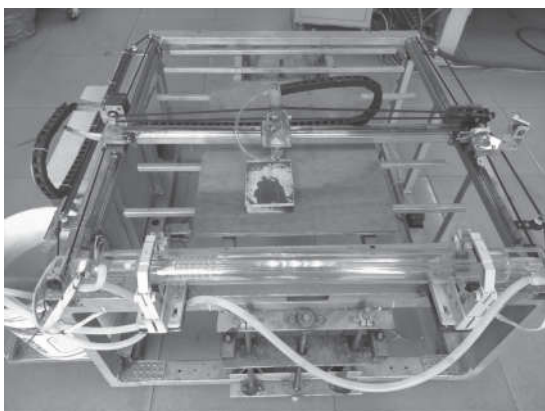
3.3. Bàn luận

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy việc tối ưu kết cấu khung máy do đó khối lượng khung máy giảm khoảng 12% nhờ tối ưu tiết diện vật liệu mà vẫn đảm bảo độ cứng vững. Việc điều chỉnh bố trí hệ truyền động và căng đai hợp lý giúp giảm rung động khi máy làm việc ở tốc độ cao. Hiệu suất hệ quang học được cải thiện, tổn hao năng lượng giảm, góp phần nâng cao chất lượng và độ đồng đều của đường khắc.

Tối ưu hệ quang học: Điều chỉnh góc đặt gương giảm lệch chùm tia khi chuyển động trục X. Hiệu suất năng lượng tăng 10% do tản nhiệt hiệu quả và giảm ma sát cơ học.

Đánh giá thực nghiệm: Độ chính xác khắc đạt 0,01 mm, tốc độ khắc tối đa 500 mm/s, bề mặt khắc mịn, không cháy cạnh. Độ sâu khắc ổn định với sai số dưới 5%. Chất lượng đường khắc duy trì ổn định ở tốc độ cao.

Việc tích hợp hệ điều khiển CNC giúp mở rộng khả năng ứng dụng, tương thích nhiều loại phần mềm thiết kế và mã nguồn mở. Đây là hướng phát triển bền vững cho các mô hình đào tạo tại trường đại học cũng như các cơ sở sản xuất nhỏ.



Hình 6. Máy khắc laser CO₂



Hình 7. Một số sản phẩm khắc trên máy laser CO₂ CNC

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện thành công việc thiết kế và tối ưu kết cấu máy khắc laser CO₂ sử dụng công nghệ CNC nhằm nâng cao độ chính xác, độ cứng vững và độ ổn định vận hành. Trên cơ sở mô phỏng số và thử nghiệm thực tế, kết cấu khung máy được tối ưu giúp giảm khối lượng nhưng vẫn đảm bảo điều kiện bền và khả năng chống rung. Hệ truyền động, hệ quang học và hệ thống làm mát được thiết kế hợp lý, góp phần giảm tổn hao năng lượng và ổn định chất lượng chùm tia laser.

Kết quả thực nghiệm cho thấy máy đạt độ chính xác gia công 0,01 mm, tốc độ khắc tối đa 500 mm/s và vận hành ổn định trong dải nhiệt độ 25-30°C trên nhiều loại vật liệu khác nhau. Những kết quả này khẳng định tính khả thi và hiệu quả của giải pháp đề xuất, đồng thời tạo cơ sở cho việc phát triển các máy khắc laser CO₂ công suất nhỏ phục vụ đào tạo và sản xuất quy mô vừa và nhỏ. Là kết quả của đề tài cấp cơ sở. ❖

Ngày nhận bài: **12/01/2026**

Ngày phân biên: **22/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. John Smith (2020), "*Laser Technology in Modern Industry*". Springer.
- [2]. Hongwei Zhang, et al. (2021), "*Advances in CO₂ Laser Applications*". Elsevier.
- [3]. Rajesh Patel (2019), "*Precision Machining with Laser Systems*". CRC Press.
- [4]. Sungwoo Kim & Jaewon Lee (2018), "*Heat Dissipation Techniques for Laser Systems*". IEEE Transactions.
- [5]. Thomas Brown (2020), "*Energy Efficiency in Laser Cutting Machines*". Journal of Manufacturing Science.
- [6]. Phuong Nguyen (2017), "*Laser Cooling Methods in High-Power Applications*". Applied Optics.
- [7]. Xiaoming Wang (2019), "*Gas-Crystal Cooling in CO₂ Lasers: A Review*". Optics Express.
- [8]. Luis Garcia & Manuel Torres (2021), "*Enhancing Laser Engraving Precision Using Advanced Optics*". Journal of Laser Engineering.
- [9]. Kwangsoo Choi & Youngmin Park (2018), "*Optimization of Laser Cutting for Industrial Applications*". Materials Science Reports.
- [10]. Benjamin Anderson (2019), "*Automated Systems in Laser Machining*". Robotics and Automation Letters.
- [11]. Carlos Lopez (2020), "*Impact of Cooling Techniques on Laser Longevity*". Journal of Thermal Engineering.
- [12]. Yiming Sun & Haoran Zhao (2021), "*New Trends in Laser Material Processing*". International Journal of Engineering Science.
- [13]. Michael Roberts (2018), "*Future Directions in Laser Machining Technology*". Advances in Manufacturing Engineering.