

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ VÀ KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

LÊ VĂN HÙNG

**PHÁT TRIỂN THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA CƠ CẤU MỀM HỖ TRỢ
RUNG PHÔI TRONG GIA CÔNG ĐÁNH BÓNG BỀ MẶT CHI TIẾT**

Chuyên ngành: KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Mã ngành: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

HO CHI MINH CITY – 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ VÀ KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

LÊ VĂN HÙNG

PHÁT TRIỂN THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA CƠ CẤU MỀM HỖ TRỢ
RUNG PHÔI TRONG GIA CÔNG ĐÁNH BÓNG BỀ MẶT CHI TIẾT

Chuyên ngành: KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Mã ngành: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. Đào Thanh Phong

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Lê Hiếu Giang

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp đơn vị chuyên môn
họp tại Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM vào ngày.....tháng.....năm
2026

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

A. Các công trình đã công bố chính trong luận án

1. **Hung Van Le**, Hieu Giang Le, and Thanh-Phong Dao, “Kinetostatic and dynamic analysis for a new 2-DOF compliant mechanism for potential application in vibration-assisted polishing,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nov. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14644-y (SCIE – Q1).
2. **Hung Van Le**, Hieu Giang Le, and Thanh-Phong Dao, “Review of Vibration-Assisted Polishing: Current Situation and Prospects,” *Arab J Sci Eng*, 2025, doi: 10.1007/s13369-025-10243-5 (SCIE – Q1).
3. **Hung Van Le**, Hieu Giang Le, and Thanh-Phong Dao, “Kinetostatic, dynamic, trajectory modeling for a new grasshopper-inspired 2DOF compliant mechanism for non-resonant vibration-assisted polishing,” *Meccanica*, May 2025, doi: 10.1007/s11012-025-01987-3 (SCIE – Q2).
4. **H. Van Le**, H. G. Le, and T.-P. Dao, “Dynamic and trajectory analysis of an XY compliant mechanism for vibration-assisted polishing,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 47, no. 10, p. 523, Oct. 2025, doi: 10.1007/s40430-025-05860-y (SCIE – Q2).
5. **H. Van Le**, H. G. Le, and T.-P. Dao, “Integration of two-dimensional vibration trajectories and tool path strategies for polishing complex surfaces for SKD11 steel,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Dec. 2025, doi: 10.1007/s00170-025-17174-3 (SCIE – Q1).

B. Các công trình nghiên cứu khác có liên quan luận án

1. Hung Dinh Nguyen, **Hung Van Le**, Ngoc Thoai Tran, Minh Phung Dang, Hong Van Tran, Hieu Giang Le, Thanh-Phong Dao, “A New Ant-Inspired 2-DOF Compliant Mechanism with High Frequency and Large Workspace for Potential Application in Material Testing,” *Arab J Sci Eng*, 2024, doi: 10.1007/s13369-024-09338-2. (SCIE – Q1).
2. Hung Dinh Nguyen, **Hung Van Le**, Minh Phung Dang, Hieu Giang Le, and Thanh-Phong Dao, “Analytical modeling and computational optimization for a 1-DOF compliant mechanism,” *Vietnam Journal of Mechanics*, Oct. 2024, doi: 10.15625/0866-7136/21113. (ACI)

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU

1.1. Bối cảnh và động cơ nghiên cứu

Hiện nay, khoa học và công nghệ đã áp dụng thành công phương pháp đánh bóng hỗ trợ rung (VAP), một kỹ thuật gia công dần thay thế các phương pháp truyền thống, nhờ vào nhiều ưu điểm của nó. Ví dụ, rung động tạo ra cho phép giúp lực cắt nhỏ hơn giữa dụng cụ và phôi, giúp dễ dàng loại bỏ các gờ nhấp nhô nhỏ trên bề mặt, từ đó tạo ra bề mặt có độ bóng tốt hơn. Ngày nay, với sự phát triển nhanh chóng của các sản phẩm công nghệ cao, chất lượng bề mặt được yêu cầu từ độ chính xác dưới micromet. Đặc biệt hơn, đối với các sản phẩm có hình dạng phức tạp (ví dụ: linh kiện y tế, khuôn mẫu, hàng không vũ trụ, sản phẩm y sinh, xương/khớp nhân tạo), kỹ thuật VAP đã được chứng minh có hiệu quả hơn so với phương pháp đánh bóng truyền thống.

1.2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của luận án này là phát triển các thiết kế mới và mô hình hóa tính toán các hệ thống cơ khí nhằm tạo ra rung động phôi trong VAP.

Các mục tiêu cụ thể như sau:

- Phát triển các thiết kế mới cho cơ cấu mềm 2 bậc tự do để tạo ra rung động cho phôi trong VAP.
- Phát triển các mô hình toán học để phân tích ứng xử của các cơ cấu mềm 2 bậc tự do đã phát triển. Ví dụ: biên độ khuếch đại rung động, không gian làm việc, ứng suất, tần số cộng hưởng và quỹ đạo rung động.
- Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả gia công trong quá trình đánh bóng như điều kiện gia công và tốc độ loại bỏ vật liệu (MRR) trên toàn bộ bề mặt phôi của các cơ cấu mềm được thiết kế.
- Tiến hành các thí nghiệm đánh bóng phôi trên các mẫu cơ cấu đàn hồi được thiết kế.

1.3. Đối tượng nghiên cứu

- Các cơ cấu mềm đối xứng 2 bậc tự do được thiết kế để tạo ra các quỹ đạo rung phù hợp cho các chi tiết gia công cần đánh bóng.
- Các mô hình toán học được phát triển để phân tích các ứng xử như tĩnh học, tĩnh động học, động lực học, không gian làm việc và quỹ đạo rung động của các cơ cấu mềm được thiết kế.
- Các thực nghiệm trên cơ cấu mềm được thực hiện để kiểm chứng các tính toán phân tích.
- Hình ảnh và độ nhám bề mặt của các chi tiết gia công được đánh giá trước và sau quá trình VAP.

1.4. Phạm vi nghiên cứu

- Các cơ cấu mềm rung động hoạt động với tần số tự nhiên ban đầu trong khoảng từ 100 Hz đến 1000 Hz và không gian làm việc từ 200 μm tới 2000 μm .

- Quỹ đạo rung động tập trung ở bàn trung tâm cho các chi tiết gia công.
- Độ nhám bề mặt của sản phẩm phải nằm trong khoảng Ra từ 0.08 μm đến 0.32 μm và đạt mức 9-11 theo tiêu chuẩn TCVN 2511: 1995.
- Vật liệu thép SKD11 được sử dụng để đánh bóng.

1.5. Phương pháp nghiên cứu

Dưới đây là các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án này:

- Phương pháp kế thừa.
- Phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn.
- Phương pháp phân tích.
- Phương pháp tối ưu hóa.
- Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.

1.6. Ý nghĩa khoa học

Luận án này có ý nghĩa khoa học vì những lý do sau:

- Đề xuất các thiết kế mới cho cơ cấu mềm 2 bậc tự do dùng cho VAP.
- Phát triển các lý thuyết phân tích và phương pháp tính toán cho các bàn rung được chế tạo cho VAP.

1.7. Ý nghĩa thực tiễn

Dưới đây là một số ứng dụng thực tiễn của luận án:

- Các thiết bị VAP có tiềm năng trong các quy trình gia công tiên tiến nhằm cải thiện chất lượng bề mặt và hiệu quả sản xuất.
- Các thiết bị VAP được phát triển nhằm xây dựng cơ sở hữu ích cho đánh bóng bề mặt.
- Các kỹ thuật thiết kế, phân tích và mô hình hóa có thể được sử dụng cho các thiết bị gia công hỗ trợ rung động khác và các lĩnh vực kỹ thuật liên quan.
- Các thiết bị VAP có thể được coi là phương pháp đánh bóng thay thế phương pháp truyền thống nhằm tiết kiệm chi phí.
- Có thể làm tài liệu tham khảo cho sinh viên, học viên cao học.

1.8. Những đóng góp mới

Những đóng góp chính của luận án như sau:

- Luận án đã đề xuất hai thiết kế mới cho bàn rung động hai phương sử dụng cơ cấu mềm hỗ trợ rung phôi trong gia công đánh bóng. Bên cạnh đó, các thiết kế dựa trên mô phỏng cơ y sinh con châu chấu nhằm nâng cao khả năng tạo rung động hiệu quả. Hơn nữa, đóng góp nổi bật nằm ở việc thiết kế cấu trúc có khả năng khuếch đại biên độ dao động lớn và tần số làm việc cao so với nghiên cứu trước.

- Luận án đã phát triển các cơ sở lý thuyết tính toán cho các cơ cấu được đề xuất như tĩnh học, tĩnh động học và động lực học để tính toán biên độ khuếch đại rung động, không gian làm việc, tần số cộng hưởng, ảnh hưởng của lực tác động đầu vào - đầu ra, quỹ đạo rung động được so sánh với các nghiên cứu trước đây.

- Luận án đã phát triển các cơ sở lý thuyết tính toán quỹ đạo rung kết hợp với chiến lược chạy dao được phân tích và đánh giá trên các bề mặt được đánh bóng. Đặc biệt được sử dụng trên bề mặt cong được so sánh với các nghiên cứu trước. Kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này đã chứng minh hai cơ cấu được đề xuất giúp cải thiện chất lượng bề mặt so với phương pháp đánh bóng thông thường.

1.9. Cấu trúc của luận án

Chương 1: Giới thiệu

Chương 2: Tổng quan và cơ sở lý thuyết

Chương 3: Thiết kế và mô hình hóa các cơ cấu mềm cho rung phối trong quá trình đánh bóng bề mặt

Chương 4: Tiến hành các thí nghiệm và kiểm chứng vật lý về đánh bóng hỗ trợ rung động

Chương 5: Kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai

1.10. Kết luận

Hiện nay, VAP là một công nghệ tiên tiến mang lại kết quả vượt trội so với cả các phương pháp truyền thống và phi truyền thống. Rung động làm giảm lực cắt và phân bố lực đều hơn, tạo ra bề mặt mịn hơn với ít khuyết điểm hơn. Bề mặt sản phẩm có độ bóng cao hơn, giảm khả năng bị trầy xước hoặc hư hỏng.

CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Tổng quan về các phương pháp đánh bóng

Đánh bóng là một quy trình xử lý bề mặt giúp tăng độ mịn, độ bóng và tính thẩm mỹ của vật liệu.

2.1.1. Phương pháp đánh bóng truyền thống

Theo kiểu truyền thống, một số phương pháp đánh bóng cơ học được phân loại như sau: đánh bóng bằng giấy nhám, đánh bóng bằng dụng cụ và đánh bóng bằng máy.

2.1.2. Các phương pháp đánh bóng phi truyền thống

Gần đây, các phương pháp phi truyền thống đã được đề xuất để giải quyết những nhược điểm của các quy trình đánh bóng thông thường đã được mô tả trước đó như: Đánh bóng bằng hóa chất và điện phân, đánh bóng dòng chất lỏng, đánh bóng từ tính, đánh bóng siêu âm và đánh bóng bằng rung động không cộng hưởng.

2.2. Tổng quan về các phương pháp gia công hỗ trợ rung động

Trong điều kiện tần số thấp (thường dưới 10 kHz), các hệ thống không cộng hưởng dễ dàng thực hiện điều khiển vòng kín quỹ đạo rung động và có xu hướng đạt được độ chính xác rung động cao hơn so với các hệ thống cộng hưởng.

2.3. Tổng quan về các nghiên cứu trong nước và quốc tế

Các quỹ đạo theo hai hướng để đánh bóng bề mặt các vật liệu cứng và giòn của VAP trong các nghiên cứu quốc tế. Do đó, các mô hình này đã được áp dụng rộng rãi gần đây và cho thấy sự cải thiện đáng kể về chất lượng bề mặt.

Bên cạnh đó, nhiều nhóm nghiên cứu trong nước đã tập trung vào thiết bị đánh bóng được thiết kế riêng cho các hình dạng phôi khác nhau; tuy nhiên, chưa có nhóm nghiên cứu nào xem xét việc ứng dụng các cơ cấu mềm trong phát triển VAP để đánh bóng bề mặt.

2.4. Các phương pháp mô hình hóa cho thiết kế và tính toán

2.4.1. Mô hình hóa tĩnh học và tĩnh động học

Mô hình vật thể giả cứng được thiết kế nhằm cung cấp một phương pháp đơn giản để phân tích các hệ thống chịu biến dạng phi tuyến.

2.4.2. Mô hình động lực học

Phương trình Lagrange là một công cụ hiệu quả trong cơ học để mô tả động lực học của các hệ thống, bao gồm cả việc tính toán tần số tự nhiên.

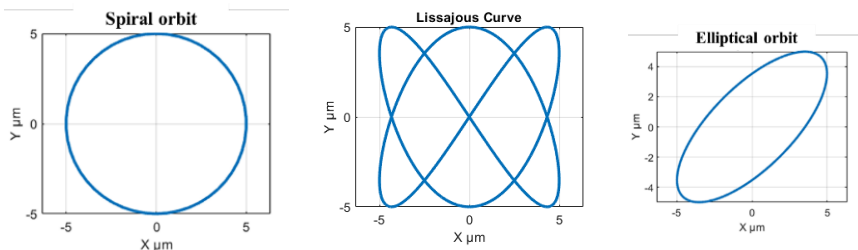
2.4.3. Mô hình hóa quỹ đạo rung động

Như đã đề cập trong phần giới thiệu, các nghiên cứu trước đây về cơ cấu mềm 2 bậc tự do cho VAM đã chứng thực tính hiệu quả của các quỹ đạo hình elip hoặc hình xoắn ốc của cấu trúc này.

2.5. Lý thuyết của quá trình đánh bóng hỗ trợ rung động

2.5.1. Quỹ đạo rung động

Bản định vị đánh bóng phải tuân theo quỹ đạo chuyển động khép kín để nâng cao hiệu quả loại bỏ vật liệu đánh bóng như minh họa trong Hình 2.25.



Hình 2.25. Quỹ đạo chuyển động ở các tần số khác nhau ($F_x = F_y$). (a) $f_x = f_y$, $\theta = 90^\circ$; (b) $f_x \neq f_y$, $\theta = 90^\circ$; (c) $f_x = f_y$, $\theta = 45^\circ$

Quỹ đạo rung động đóng vai trò quan trọng trong gia công cơ khí với sự hỗ trợ rung không cộng hưởng. Các quỹ đạo này thể hiện những ưu điểm như đạt được độ bóng vật liệu, giảm mài mòn dụng cụ và giảm nhiệt khi cắt.

2.5.2. Lực

Lý thuyết tiếp xúc Hertz liên quan đến việc tính toán lực tiếp xúc và áp suất tiếp xúc trong quá trình đánh bóng; các yếu tố quan trọng này được sử dụng để phân tích ứng suất và tốc độ loại bỏ vật liệu.

2.5.3. Bản chất cơ học của quá trình đánh bóng hỗ trợ rung động

Sự tiếp xúc không liên tục giữa phôi và dụng cụ khi có rung động, là cơ sở cơ học của VAM hoặc đánh bóng, được tạo ra bởi quỹ đạo rung động. Sự rung động này biến đổi quá trình gia công từ cắt liên tục sang cắt gián đoạn. Sự tách rời định kỳ này mang lại hai lợi thế cơ học chính: Thứ nhất, nó làm giảm đáng kể ma sát bám dính và ma sát nén, dẫn đến giảm ma sát tiếp xúc và nhiệt độ cắt so với các phương pháp đánh bóng truyền thống. Thứ hai, khi tiếp xúc lại, tác động tối thiểu làm phá vỡ các đỉnh nhấp nhô nhỏ, tạo điều kiện cho việc loại bỏ vật liệu hiệu quả hơn.

2.6. Tổng kết

Các nội dung sau đã được nghiên cứu và tổng hợp trong chương này.

Thứ nhất, các nghiên cứu quốc tế về thiết bị VAP sử dụng cơ cấu mềm đã chứng minh hiệu quả của quy trình VAP trong gia công.

Thứ hai, chiến lược gia công trên toàn bộ bề mặt phôi dựa trên lý thuyết tiếp xúc Hertz và lực nén tiếp xúc theo phương trình Preston kết hợp với quỹ đạo rung để tác động đến khả năng loại bỏ vật liệu sẽ được phân tích ở chương sau.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA CÁC CƠ CẤU MỀM CHO RUNG PHÔI TRONG QUÁ TRÌNH ĐÁNH BÓNG BỀ MẶT

3.1. Giới thiệu

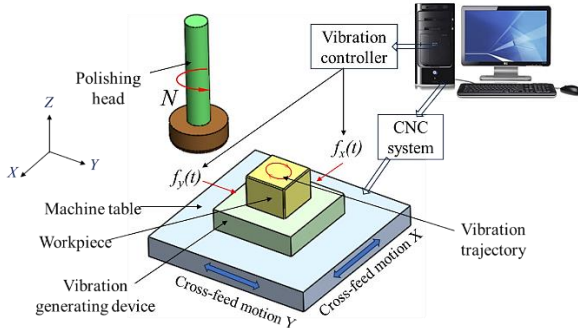
Như đã phân tích trong Chương 2, quá trình VAP không cộng hưởng thường dễ dàng kiểm soát quỹ đạo rung khi cung cấp lực đầu vào và tần số dao động.

3.1.1. Tuyên bố vấn đề nghiên cứu

Nghiên cứu trong chương này nhằm mục đích phát triển hai cơ cấu mới được thiết kế để hoạt động với VAP không cộng hưởng. Thiết kế này tạo ra khả năng khuếch đại biên độ dao động một cách hiệu quả, không gian làm việc rộng và tần số tự nhiên cao. Ngoài ra, khả năng mô tả ứng xử của quỹ đạo rung động cũng được phát triển.

3.1.2. Nguyên lý đánh bóng hỗ trợ rung động không cộng hưởng

Hình 3.1 mô tả nguyên lý của phương pháp VAP không cộng hưởng được thực hiện trong nghiên cứu này. Phôi được siết chặt vào bàn rung, sau đó bàn rung được đặt trên bàn máy gia công. Bộ truyền động PZT làm cho thiết bị rung tạo ra sự rung động trên bàn rung.



Hình 3.1. Nguyên lý VAP

3.1.3. Tiêu chí thiết kế và yêu cầu của cơ cấu mềm 2 bậc tự do

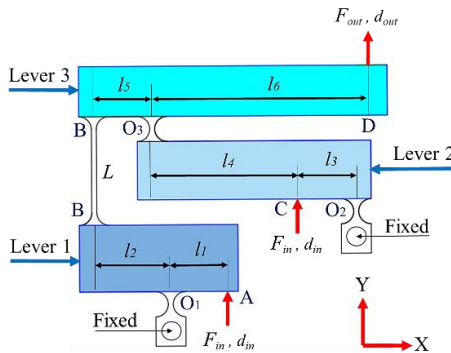
Cần thiết kế và phát triển các cơ cấu mới có khả năng hỗ trợ quá trình đánh bóng rung, được thực hiện theo các bước sau:

- Bước 1: Thiết kế cấu trúc của cơ cấu mềm 2 bậc tự do.
- Bước 2: Phát triển các phương trình toán học để mô hình hóa các đặc tính cơ học của cơ cấu đã được phát triển.
- Bước 3: Mô hình hóa tĩnh học, tĩnh động học, động lực học và quỹ đạo rung động của bàn rung.
- Bước 4: Kiểm chứng kết quả dự đoán bằng mô phỏng và thực nghiệm.
- Bước 5: Thực hiện quy trình đánh bóng thực tế.
- Bước 6: Đánh giá hiệu quả của quá trình đánh bóng.

3.2. Thiết kế đầu tiên cho cơ cấu mềm rung động hai chiều

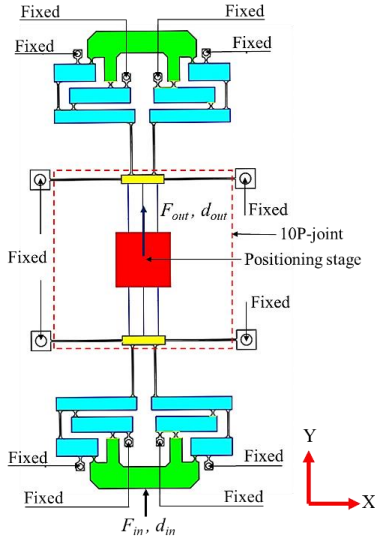
Dựa trên đề xuất thiết kế đã nêu ở trên, phần này trình bày thiết kế đầu tiên của cơ cấu rung.

3.2.1. Mô-dun khuếch đại dịch chuyển ba cần



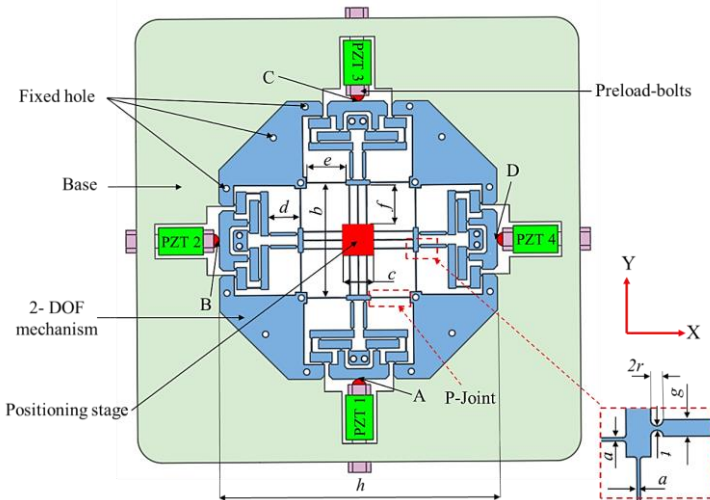
Hình 3.2. Bộ khuếch đại dịch chuyển ba cần

3.2.2. Thiết kế các bộ phận kết cấu cho hệ 1 bậc tự do



Hình 3.5. Sơ đồ cơ cấu đối xứng 1 bậc tự do

3.2.3. Mô tả nguyên lý hoạt động của hệ thống 2 bậc tự do

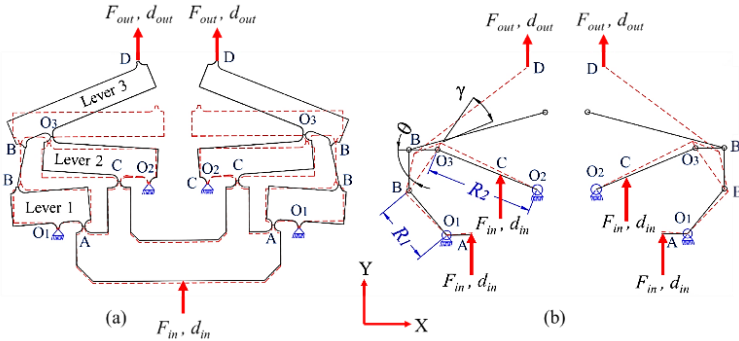


Hình 3.6. Kích thước và sơ đồ 2 bậc tự do được đề xuất

3.2.4. Mô hình hóa tĩnh, tĩnh động học và động lực học

3.2.4.1. Tỷ lệ khuếch đại dịch chuyển

Một phương pháp họa đồ vị trí được sử dụng để tính toán tỷ lệ khuếch đại (AR_S) của cơ cấu này.



Hình 3.8. (a) Một phần tử của bộ khuếch đại, (b) sơ đồ hình học Đòn bẩy số 3 có góc quay φ_3 .

$$\varphi_3 = \theta - \gamma = \arcsin\left(\frac{L}{S}\right) - \arccos\left(\frac{l_s^2 + (S_1 + S + S_2)^2 - L^2}{2l_s(S_1 + S + S_2)}\right). \quad (3.6)$$

Phương trình (3.7) xác định độ dịch chuyển đầu ra của cơ cấu:

$$d_{out} = l_6 \sin \varphi_3. \quad (3.7)$$

Cuối cùng, phương trình (3.8) được sử dụng để xác định AR_S .

$$AR_S = \frac{d_{out}}{d_{in}}. \quad (3.8)$$

3.2.4.2. Phân tích ứng suất và không gian làm việc

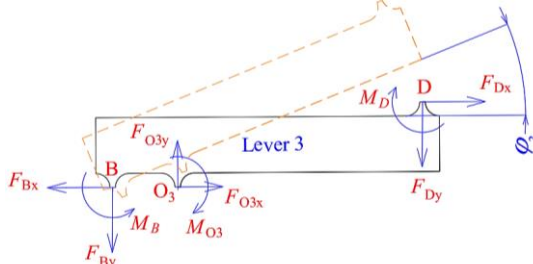
Ứng suất tối đa cho phép tại các khớp nối khi có sự dịch chuyển đầu vào (d_{in}) có thể được sử dụng để tính toán không gian làm việc của cơ cấu.

$$d_{in}^{max} \leq 401.977 \mu\text{m}. \quad (3.17)$$

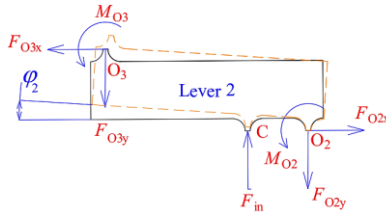
Tóm lại, có thể xác định 401.977 μm là độ dịch chuyển đầu ra của cơ cấu bằng cách tính đến tỷ lệ khuếch đại. Không gian làm việc khả dụng của bàn có thể được xác định là 401.97 $\mu\text{m} \times 401.97 \mu\text{m}$.

3.2.4.3. Phân tích tĩnh động học và động lực học

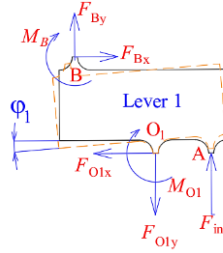
Sơ đồ phân tích lực (đòn bẩy 1, 2 và 3) được thể hiện trong Hình 3.11–3.13.



Hình 3.11. Sơ đồ thể hiện phân tích lực của đòn bẩy số 3



Hình 3.12. Sơ đồ thể hiện phân tích lực của đòn bẩy số 2



Hình 3.13. Sơ đồ thể hiện phân tích lực của đòn bẩy số 1

Công thức tính tỷ lệ khuếch đại đối với đòn bẩy số 3.

$$\lambda_3 = \frac{l_5 l_6 (K_l - K_l') - K_l'' l_6^2 - K_l - K_l'' + K_l' - K_l' l_6^2 + K_l' l_5 l_6}{l_5^2 (K_l - K_l') - K_l'' l_5 l_6 + K_l + K_l'' - K_l' + K_l' l_6^2 - K_l' l_5 l_6} \quad (3.32)$$

Tương tự, bằng cách xem xét mối quan hệ cân bằng lực-mômen trong điều kiện cân bằng của đòn bẩy số 2.

$$\lambda_2 = \frac{(l_3 + l_4)(l_3 K_l + 0.5 K_l) + 2 K_l}{l_3^2 K_l + 0.5 l_3 K_l + 2 K_l + 1.5 l_4 K_l - l_3 l_4 K_l} \quad (3.41)$$

Một phương pháp tương tự được sử dụng để xác định tỷ lệ của bộ khuếch đại cho đòn bẩy số 1.

$$\lambda_1 = \frac{l_1 l_2 (K_l - K_l') + K_l + K_l' - K_l' l_1 l_2}{l_1^2 (K_l - K_l') - K_l' l_1 l_2 - K_l - K_l' - K_l' l_2^2 + K_l' l_1 l_2} \quad (3.52)$$

Do đó, phân tích tĩnh động học của tỷ lệ khuếch đại tổng thể của cơ cấu dịch chuyển đòn bẩy được xác định bởi:

$$AR_K = AR_{K_{13}} + AR_{K_{23}} = \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.55)$$

$$T = \left[\begin{array}{l} \frac{m_0 AR_K^2}{2} + \frac{m_1}{2} + \frac{m_4 \lambda_1^2}{4} + \frac{m_9 AR_K^2}{4} + m_{10} AR_K^2 \\ + \frac{m_{11}}{3} AR_K^2 + \frac{7m_2}{12} + \frac{7m_3 \lambda_1^2}{12} + \frac{7m_5}{12} + \frac{7m_6 \lambda_2^2}{12} \\ + \frac{7m_8 AR_K^2}{12} + \frac{7m_9 AR_K^2}{12} + \frac{7m_{b1} AR_K^2}{3} + 4m_{b2} AR_K^2 \end{array} \right] \left[\dot{\eta}_1^2 \dot{\eta}_2^2 \right] \quad (3.74)$$

$$M = m_0 AR_K^2 + m_1 + \frac{m_4 \lambda_1^2}{2} + \frac{m_9 AR_K^2}{2} + 2m_{10} AR_K^2 + \frac{2m_{11}}{3} AR_K^2 + \frac{7m_2}{6} + \frac{7m_3 \lambda_1^2}{6} + \frac{7m_5}{6} + \frac{7m_6 \lambda_2^2}{6} + \frac{7m_8 AR_K^2}{6} + \frac{7m_9 AR_K^2}{6} + \frac{14m_{b1} AR_K^2}{3} + 8m_{b2} AR_K^2 \quad (3.79)$$

Để xác định tần số tự nhiên của cơ cấu, chúng ta giải phương trình (3.11).

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{M} \right)^{0.5} \quad (3.81)$$

3.2.4.4. Xác minh mô hình phân tích dựa trên FEA

Độ chính xác của các mô hình toán học đã được thiết lập trước đó được chứng minh thông qua phân tích phần tử hữu hạn (FEA) trong ANSYS R2022.

Bảng 3.8. So sánh kết quả mô phỏng và tính toán (AR_S và σ_r^{\max})

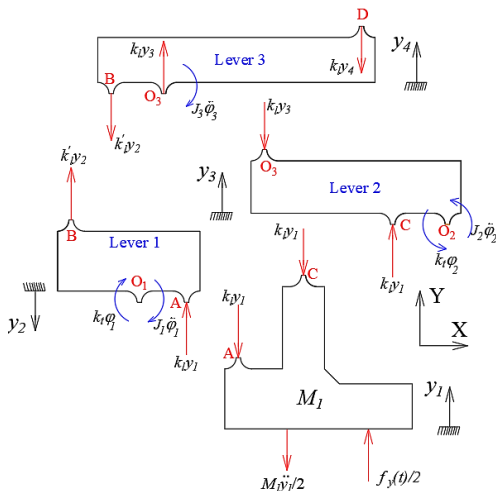
Kí hiệu	Tính toán	FEA	Lỗi
σ_r^{\max}	335.33 MPa	372.25 MPa	9.92 %
AR_S	10	9.127	8.73 %

Bảng 3.9. So sánh tần số cộng hưởng

Tần số	Tính toán	FEA	Lỗi
f	465.74 Hz	426.43 Hz	8.44 %

3.2.5. Mô hình hóa quỹ đạo rung động

Nghiên cứu này kết hợp phương pháp FBD và nguyên lý D'Alembert để phát triển các phép tính động học cho cấu trúc. Hình 3.22 hiển thị sơ đồ động học của cấu trúc theo hướng Y.



Hình 3.22. Sơ đồ vật thể tự do của cơ cấu

Các phương trình (3.86-3.89) là các phương trình biến trạng thái cho y_1 , y_2 , y_3 , và y_4 theo hướng Y.

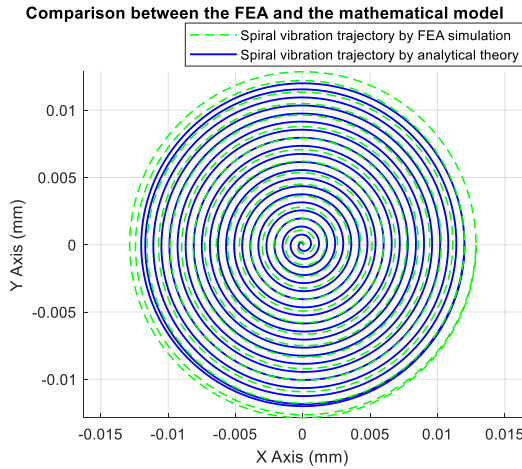
$$\ddot{y}_1 = \frac{1}{M_1} (f_y(t) - 4k_t y_1), \quad (3.86)$$

$$\ddot{y}_2 = \frac{k_t l_1 l_2 y_1 - k_t y_2 - k_t' y_2 l_2^2}{J_1}, \quad (3.87)$$

$$\ddot{y}_3 = \frac{k_t l_3 (l_3 + l_4) y_1 - k_t y_3 - k_t (l_3 + l_4)^2 y_3}{J_2}, \quad (3.88)$$

$$\ddot{y}_4 = \frac{\frac{k_t l_5}{2} \left(\frac{l_5}{2} + l_6 \right) y_3 + \frac{k_t' l_5}{2} \left(\frac{l_5}{2} + l_6 \right) y_2 - k_t \left(\frac{l_5}{2} + l_6 \right)^2 y_4}{J_3}, \quad (3.89)$$

Hình 3.29 thể hiện toàn bộ quỹ đạo dao động của bàn trung tâm.



Hình 3.29. So sánh giữa toán học và FEA

3.2.6. Tối ưu hóa hình học

3.2.6.1. Vấn đề tối ưu hóa

Bảng 3.11. Các thông số tối ưu [Đơn vị: mm]

Thông số	Tên gọi	Giá trị
t	Right-circular hinge thickness	x_1
r	Right-circular hinge radius	x_2
a	Leaf hinge thickness	x_3
L	The leaf hinge joins levers #1 and #3	x_4

$$\text{Tối đa } (f(\mathbf{X})), \quad (3.93)$$

$$f(\mathbf{X}) \geq 465.74 \text{ Hz}, \quad (3.94)$$

Hàm mục tiêu:

$$f = \frac{1}{2\pi M^{0.5}} \sqrt{\frac{(K_t - K_t')(K_t + K_t' + K_t' l_2^2) + K_t'^2 l_2^2}{l_1^2 (K_t - K_t') - 2K_t' l_2 l_1 + K_t + K_t' + K_t' l_2^2}}. \quad (3.96)$$

$$\text{Xác định vector thiết kế: } \mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T. \quad (3.98)$$

Các biến số trong thiết kế (đơn vị: mm):

$$\begin{cases} 0.5 \leq t \leq 0.7 \\ 1 \leq r \leq 2 \\ 0.5 \leq a \leq 0.6 \\ 9 \leq L \leq 11 \end{cases}. \quad (3.99)$$

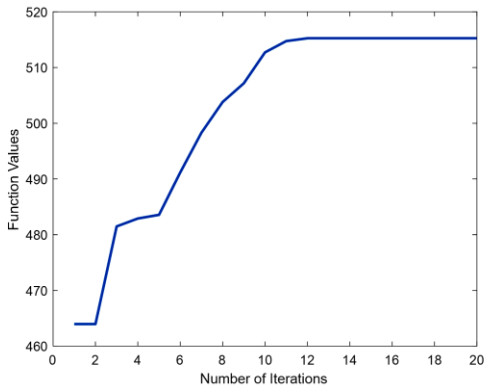
Phương trình ràng buộc dựa trên mối quan hệ hình học của cấu trúc phải tuân theo phương trình này.

$$2t < r. \quad (3.100)$$

3.2.6.2. Kết quả tối ưu

Bảng 3.12. So sánh các kết quả tối ưu

Thông số	Biến	Thiết kế ban đầu	WCA
t	x_1	0.6 mm	0.5 mm
r	x_2	1.5 mm	1 mm
a	x_3	0.55 mm	0.6 mm
L	x_4	10 mm	9 mm
f	$f(X)$	465.74 Hz	515.1 Hz



Hình 3.30. Quy trình hội tụ của WCA

Bảng 3.13. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả tối ưu

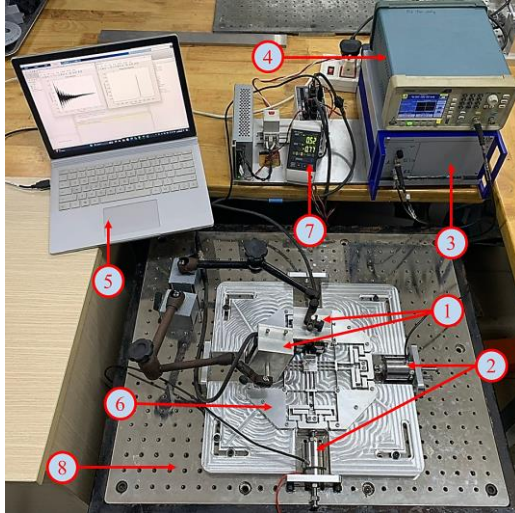
Tần số	WCA	FEA	Sai số
f	515.1 Hz	460.4 Hz	10.6 %

3.2.6.3. Đánh giá kết quả tối ưu

So với thiết kế ban đầu, tần số tự nhiên ban đầu đã được cải thiện lên đến 7.37%. Giá trị tối ưu và giá trị FEA chênh lệch nhau 10.6%, như thể hiện trong Bảng 3.13.

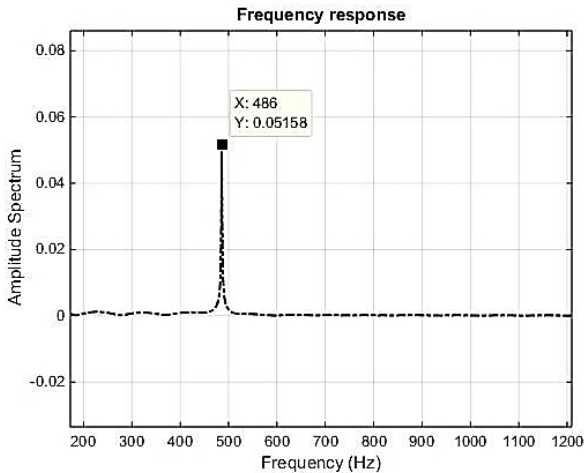
3.2.7. Chế tạo và thí nghiệm

3.2.7.1. Thiết lập thí nghiệm



Hình 3.33. Sơ đồ bố trí thí nghiệm. (1) LK-G30, (2) P-225, (3) PI E-470.20, (4) AFG1022, (5) máy tính, (6) 2-DOF, (7) LK3001P, (8) bàn cách ly rung động

3.2.7.2. Kết quả thí nghiệm

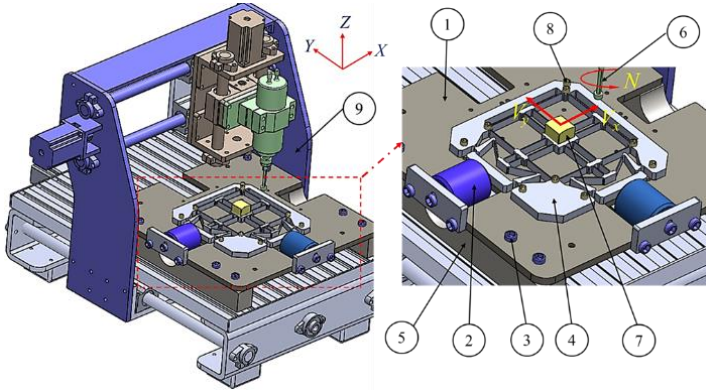


Hình 3.34. Đồ thị đáp ứng tần số tự nhiên ban đầu

3.2.8. Phân tích và bàn luận

Tần số cộng hưởng khoảng 515.1 Hz thu được thông qua WCA khá tương đồng với dữ liệu thực nghiệm là 486 Hz, với độ lệch tương đối khoảng 5.64%.

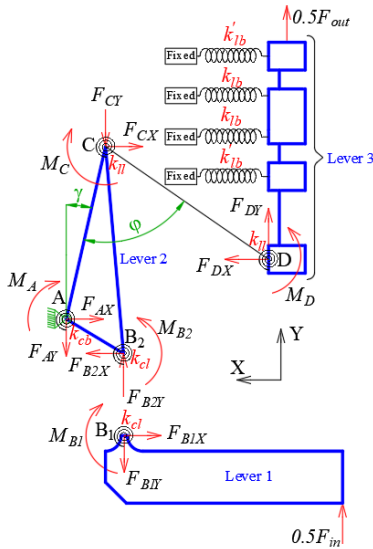
3.3.4. Nguyên lý hoạt động của cơ cấu mềm cho VAP



Hình 3.39. Minh họa cho VAP

3.3.5. Phân tích tĩnh động học và động lực học

3.3.5.1. Ảnh hưởng của các lực đầu vào và đầu ra lên cấu trúc



Hình 3.40. Phân tích lực một nửa của cơ cấu

Đòn bẩy số 1:

$$0.5F_m - F_{B1Y} = 0, M_{B1} = k_{cl} \arcsin\left(\frac{d_m}{l_1}\right), d_m = \frac{0.5F_m}{k_{cl}} \quad (3.113)$$

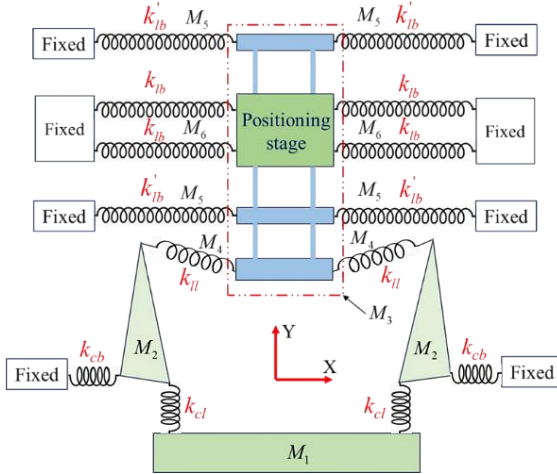
Đòn bẩy số 2:

$$F_{CX} = \frac{(k_{cl} - k_{cb}) \arcsin\left(\frac{0.5F_m}{k_{cl}l_1}\right) \cos \gamma}{l_2} \quad (3.117)$$

Đòn bẩy số 3:

$$F_{out} = 2 \frac{(k_{ll} + 2k_{lb} + 2k'_{lb}) \tan(90^\circ - (\varphi - \gamma))}{l_2 k_{ll}} \times (k_{cl} - k_{cb}) \arcsin\left(\frac{0.5F_{in}}{k_{cl} l_1}\right) \cos \gamma \quad (3.123)$$

3.3.5.2. Tần số tự nhiên của cơ cấu mềm 2 bậc tự do



Hình 3.41. Hệ thống mô tả độ cứng dọc theo trục y

Phương trình (3.142) là phương trình Lagrange cho tọa độ tổng quát theo phương y.

$$M\ddot{y} + Ky = 0. \quad (3.142)$$

Tổng khối lượng tương đương M được tìm thấy trong phương trình (3.143).

$$M = M_1 + \frac{2M_2 l_2^2 (l_1^3 + l_2^3)}{3l_1^3 (l_1 + l_2)} + \frac{M_3 d_{out}^2}{d_{in}^2} + \frac{2M_4 d_{out}^2}{d_{in}^2} + \frac{2}{3} \frac{M_4 d_{out}^2}{d_{in}^2} + \frac{4}{3} \frac{M_5 d_{out}^2}{d_{in}^2} + \frac{4}{3} \frac{M_6 d_{out}^2}{d_{in}^2} \quad (3.143)$$

K_{total} là độ cứng tổng của toàn bộ hệ thống.

$$K_{total} = 2 \left(\frac{\frac{k_{cb} k_{cl}}{k_{cb} + k_{cl}} k_{ll}}{\frac{k_{cb} k_{cl}}{k_{cb} + k_{cl}} + k_{ll}} + 2k_{lb} + 2k'_{lb} \right), \quad (3.144)$$

Phương trình (3.145) tính toán tần số tự nhiên.

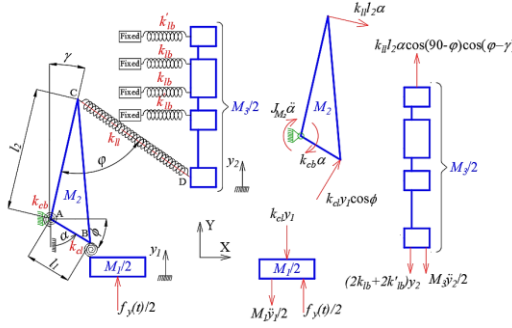
$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{total}}{M} \right)^{0.5}. \quad (3.145)$$

Tần số được tìm thấy là $f = 548$ Hz bằng cách sử dụng phương trình (3.145).

3.3.5.3. Không gian làm việc và ứng suất

Không gian làm việc khả dụng của cơ cấu có thể đạt được kích thước $736.6 \mu\text{m} \times 736.6 \mu\text{m}$ nhờ cơ chế đối xứng.

3.3.6. Mô hình hóa quỹ đạo dao động cho hệ 2 bậc tự do



Hình 3.42. Sơ đồ FBD của hệ thống

Các phương trình (3.155 - 3.157) biểu thị biến trạng thái cho y_1 , α , và y_2 .

$$\ddot{y}_1 = \frac{1}{M_1} (f_y(t) - 2k_{cl}y_1), \quad (3.155)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_{M_2}} \left[k_{cl}y_1l_1 \cos \phi - \alpha (k_{cb} + k_{\parallel}l_2^2) \right], \quad (3.156)$$

$$\ddot{y}_2 = \frac{1}{M_3} \left[2k_{\parallel}l_2\alpha \cos(90 - \phi) \cos(\phi - \gamma) - (4k_{\parallel b} + 4k_{\parallel b}')y_2 \right], \quad (3.157)$$

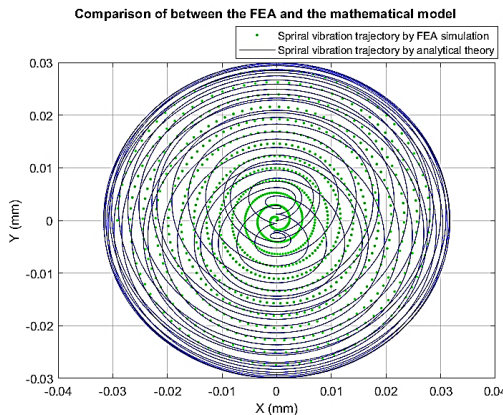
3.3.7. Kiểm chứng các mô hình phân tích bằng FEA

Bảng 3.19. Phân tích so sánh giữa kết quả tính toán và mô phỏng

Tỷ lệ khuếch đại	Tính toán	FEA	Sai số
AR	4.53	4.14	8.6 %

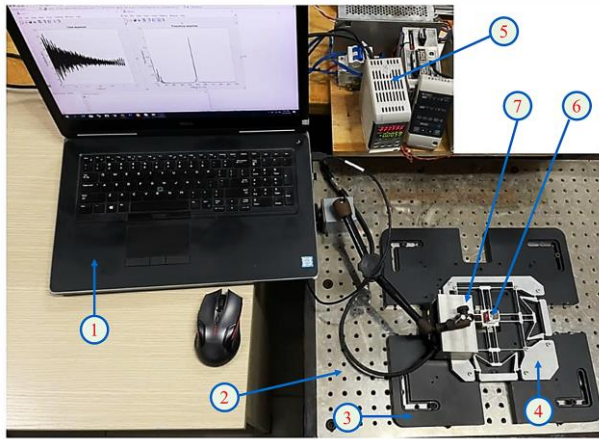
Bảng 3.20. Sự khác biệt giữa mô phỏng và tính toán

	Tính toán	FEA	Sai số
f	548 Hz	510.09 Hz	6.93 %
F_{in}/F_{out}	8.51	8.41	1.17 %



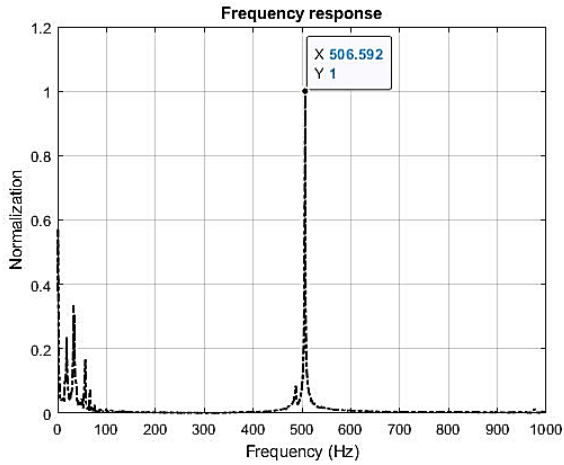
Hình 3.57. So sánh giữa mô hình toán học và phân tích FEA

3.3.8. Chế tạo và thí nghiệm



Hình 3.58. Quá trình vận hành thí nghiệm

3.3.8.1. Kết quả thí nghiệm



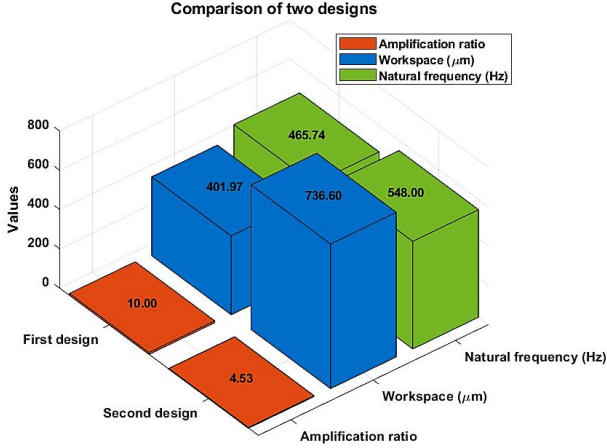
Hình 3.59. Đồ thị đáp ứng tần số

3.3.8.2. Phân tích và thảo luận

Bảng 3.21. Kết quả so sánh các tần số tự nhiên

Tần số	Thí nghiệm		Sai số
f	506.592 Hz	FEA	510.09 Hz 0.68 %
		Tính toán	548 Hz 7.55 %

3.4. So sánh giữa hai cơ cấu



Hình 3.60. So sánh các cơ cấu được đề xuất

3.5. Kết luận

Mô hình toán học tĩnh học và động học để xác định tần số tự nhiên đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm, quỹ đạo rung được dự đoán bằng các mô hình toán học và mô phỏng.

CHƯƠNG 4: TIẾN HÀNH CÁC THÍ NGHIỆM VÀ KIỂM CHỨNG VẬT LÝ VỀ ĐÁNH BÓNG HỖ TRỢ RUNG ĐỘNG

4.1. Giới thiệu

Mục tiêu của chương này là sử dụng hệ thống VAP để cải thiện chất lượng bề mặt cho thép SKD11.

4.2. Nguyên lý đánh bóng bằng rung động

Thiết bị VAP được điều khiển trực tiếp bởi các PZT để tạo ra quỹ đạo chuyển động bằng cách thay đổi tần số và biên độ rung.

4.3. Mô hình hóa ảnh hưởng của sự tiếp xúc bề mặt vật liệu

Lý thuyết tiếp xúc Hertz được sử dụng để tính toán lực tiếp xúc trong quá trình đánh bóng. Phương trình (4.10) biểu thị sự phân bố áp suất.

$$p = \frac{3F_n}{2\pi \left(\frac{3F_n R}{4E^*}\right)^{\frac{1}{3}}} \sqrt{\left[\left(\frac{3F_n R}{4E^*}\right)^{\frac{2}{3}} - (x(t))^2 - (y(t))^2\right]} \quad (4.10)$$

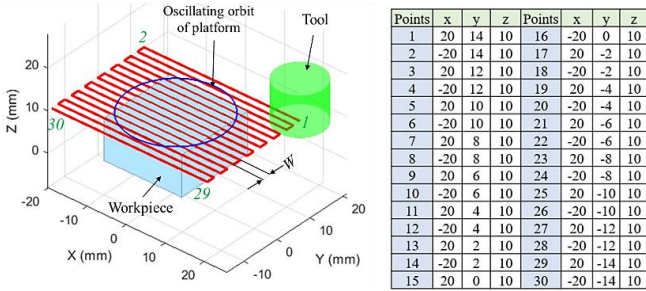
4.4. Mô hình hóa độ sâu loại bỏ vật liệu

Công thức (4.12) là phương trình để ước tính MRD tại một điểm khi có rung động.

$$H(x, y, z) = k \cdot \frac{3F_n}{2\pi \left(\frac{3F_n R}{4E^*}\right)^{\frac{1}{3}}} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{3F_n R}{4E^*}\right)^{\frac{2}{3}} - (x(t))^2 - (y(t))^2\right]} \cdot (v_x^2(t) + v_y^2(t)) \cdot T \quad (4.12)$$

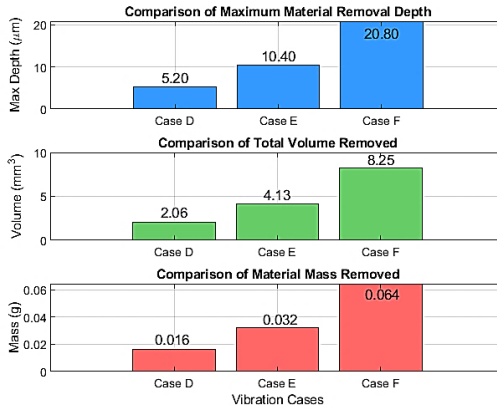
4.5. Đánh bóng hỗ trợ rung với bề mặt phẳng

4.5.1. Chiến lược phân tích đường đi chuyên của dụng cụ



Hình 4.6. Chiến lược chạy 30 điểm cho dụng cụ

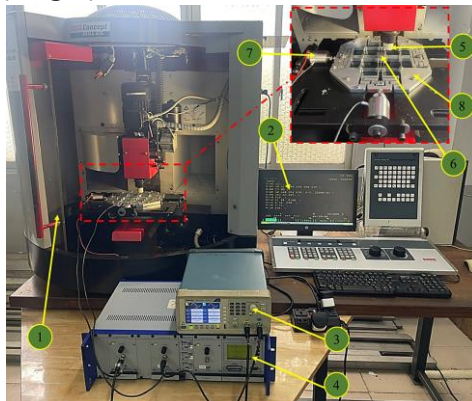
Hình 4.8 minh họa kết quả so sánh của ba trường hợp rung động khác nhau.



Hình 4.8. So sánh ba trường hợp (D, E và F)

4.5.2. Thực nghiệm về quá trình đánh bóng

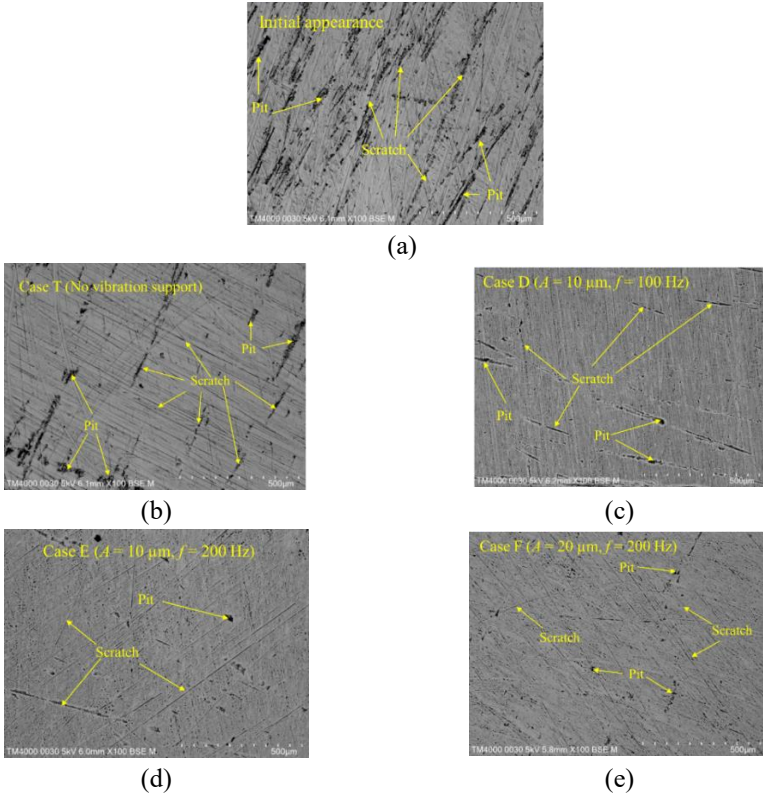
4.5.2.1. Thiết lập thực nghiệm



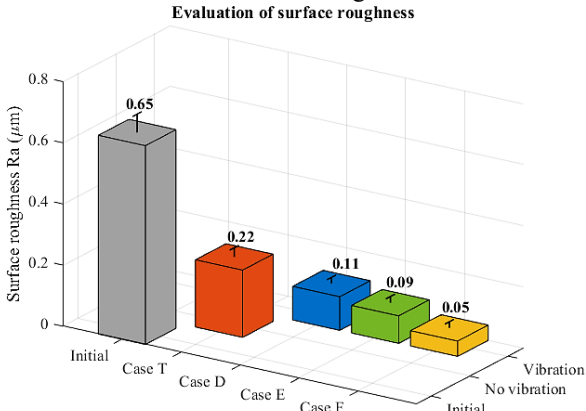
Hình 4.10. Sơ đồ bố trí để thực nghiệm

4.5.2.2. Kết quả và thảo luận

Hình 4.12 hiển thị tất cả các sản phẩm được chụp bằng SEM.



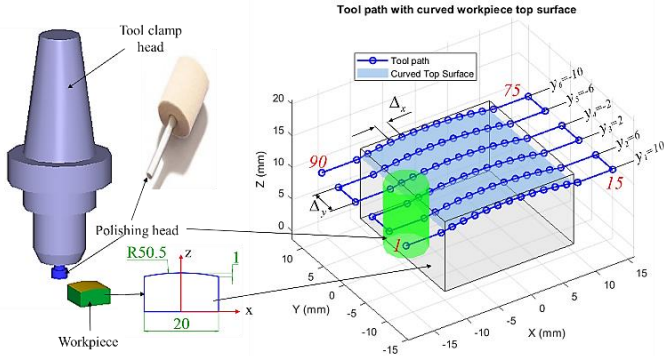
Hình 4.12. Ảnh SEM bề mặt sản phẩm
Dữ liệu về độ nhám bề mặt được tóm tắt trong Hình 4.14.



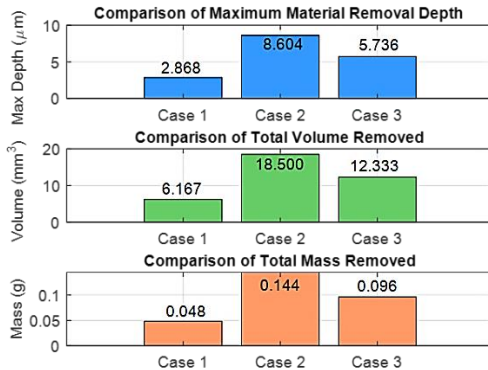
Hình 4.14. Đánh giá độ nhám bề mặt

4.6. Đánh bóng bằng rung động với bề mặt phôi cong

4.6.1. Chiến lược đánh bóng cho bề mặt cong



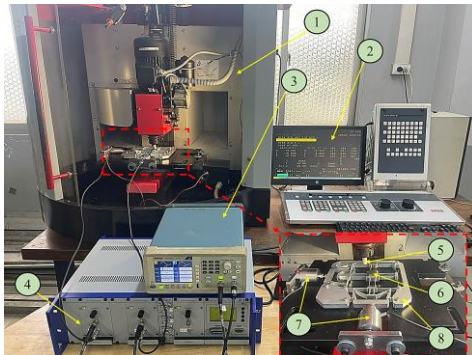
Hình 4.15. Phương pháp di chuyển dụng cụ
Hình 4.18 so sánh ba tình huống đánh bóng.



Hình 4.18. Biểu đồ so sánh ba trường hợp về khối lượng, thể tích và độ sâu

4.6.2. Kết quả từ các thực nghiệm

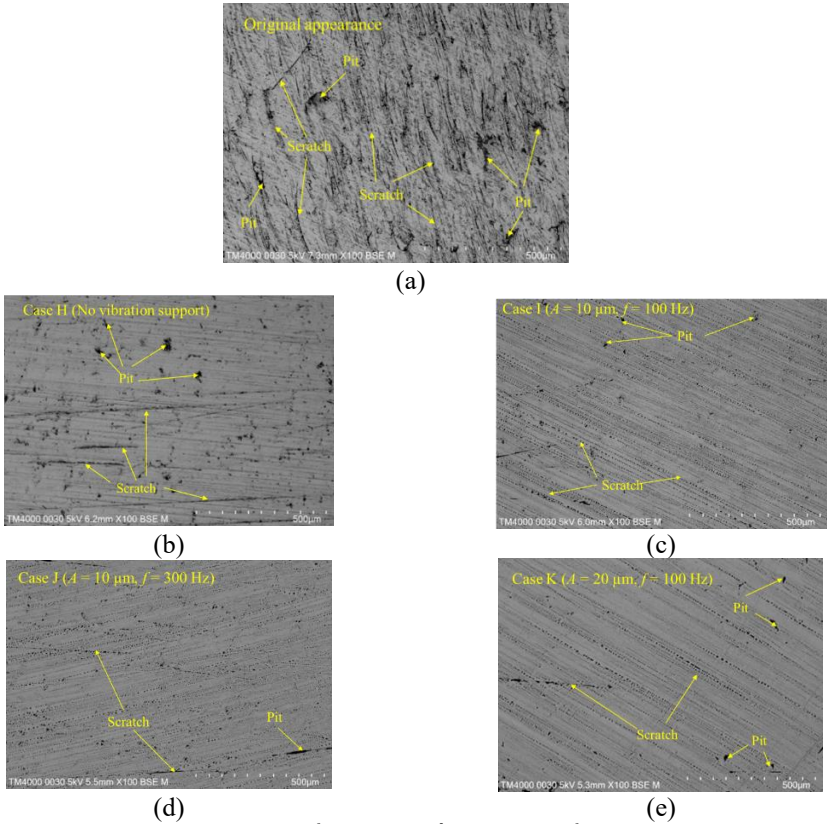
4.6.2.1. Cài đặt thực nghiệm



Hình 4.19. Cấu hình thực nghiệm đánh bóng

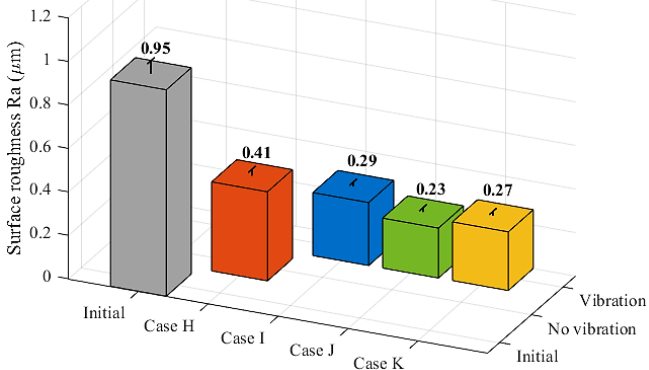
4.6.2.2. Kết quả và thảo luận

Hình ảnh kiểm tra bằng kính hiển vi SEM



Hình 4.21. Ảnh SEM bề mặt sản phẩm

Hình 4.23 thể hiện độ nhám trung bình R_a (μm) thu được từ các mẫu bề mặt.



Hình 4.23. So sánh độ nhám của các bề mặt cong

4.7. Kết luận

Trong nghiên cứu nêu trên, đã chỉ ra rằng hai thiết bị được phân tích bằng mô hình lý thuyết và thực nghiệm hoạt động tốt trong lĩnh vực VAP.

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TRONG TƯƠNG LAI

5.1. Kết luận

Trong đề tài nghiên cứu này, tổng quan về các nghiên cứu trong và ngoài nước được phân tích, và các giải pháp được đề xuất để giải quyết các vấn đề hiện có. Từ nền tảng lý thuyết của các mô hình tĩnh học, tĩnh động học và động lực học để phân tích và dự đoán hiệu suất của kết cấu.

Nghiên cứu này trình bày hai thiết kế cơ cấu mềm 2 bậc tự do mới. Thiết kế ban đầu đạt được hệ số khuếch đại là 10, tạo điều kiện cho không gian làm việc $401.97 \times 401.97 \mu\text{m}$ với tần số tự nhiên là 465.74 Hz. Ngược lại, thiết kế thứ hai thể hiện hệ số khuếch đại giảm xuống còn 4.53, mặc dù làm tăng đáng kể diện tích hoạt động lên $736.6 \times 736.6 \mu\text{m}$, đồng thời đạt được tần số dao động tự nhiên vượt trội là 548 Hz. Hơn nữa, cả hai mô hình đều đạt được quỹ đạo rung phù hợp trong quá trình đánh bóng hỗ trợ rung hai chiều không cộng hưởng.

Trong trường hợp đánh bóng phôi có bề mặt phẳng, với biên độ $20 \mu\text{m}$ và tần số 200 Hz, độ nhám trong Trường hợp F (VAP) được cải thiện đáng kể, đạt $R_a = 0.05 \mu\text{m}$, tương ứng với mức cải thiện 77.27% so với Trường hợp T (đánh bóng truyền thống). Khi đánh bóng các phôi có bề mặt phức tạp, Trường hợp J (VAP) cho thấy sự cải thiện lên đến 43.9% về độ nhám bề mặt ($R_a = 0.23 \mu\text{m}$) so với Trường hợp H (đánh bóng truyền thống) khi tần số được nâng lên 300 Hz và biên độ là $10 \mu\text{m}$. Dựa trên những phát hiện trên, có thể thấy rằng VAP khi áp dụng cho nhiều loại bề mặt giúp cải thiện chất lượng bề mặt tốt hơn so với phương pháp đánh bóng thông thường.

5.2. Hướng nghiên cứu tương lai

Việc kiểm tra độ bền mỏi của khớp nối sẽ được thực hiện trong tương lai. Tính chính xác của thể tích và khối lượng được loại bỏ từ phân tích lý thuyết và thực nghiệm vẫn chưa được đánh giá cũng sẽ được nghiên cứu.

Có thể bổ sung thêm cánh tay robot để tối ưu hóa khả năng di chuyển trên bề mặt đa chiều. Việc thêm nhiều hạt mài hoặc dung dịch mài mòn cũng có thể nâng cao chất lượng bề mặt hoàn thiện.

Nghiên cứu sẽ được mở rộng trên các vật liệu khác nhau như sapphire, kim cương nhân tạo, gốm SiC, v.v. Hơn nữa, việc khảo sát năng suất đánh bóng và cấu trúc vi mô của vật liệu cũng sẽ được thực hiện với thiết bị đầu tư lớn hơn.