

BỘ CÔNG THƯƠNG
ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI



KHUẤT ĐỨC DƯƠNG

**PHÂN TÍCH TĨNH, ĐỘNG KẾT CẤU VỎ KÍCH CỠ
MICRO HAI ĐỘ CONG CÓ CƠ TÍNH BIẾN ĐỔI**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9 52 01 03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

HÀ NỘI – NĂM 2026

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI - BỘ CÔNG THƯƠNG

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS Nguyễn Tuấn Linh

PGS.TS Đào Như Mai

Phản biện 1: GS.TS. Nguyễn Đức Toàn

Phản biện 2: PGS.TS. Dương Mạnh Tường Minh

Phản biện 3: PGS.TS. Phạm Đức Cường

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Trường theo quyết định số /QĐ-ĐHCNHN, ngày tháng năm 2026 của Hiệu trưởng Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội; họp tại: Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội vào hồi: giờ..... ngày.....tháng.....năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Đại học Công nghiệp Hà Nội
- Thư viện Quốc gia

CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Duong Khuat Duc**, Linh Nguyen Tuan, Mai Dao Nhu, Nguyen Thi Hong, Tran Van Ke & Phung Van Minh (2024): A novel isogeometric model for dynamic buckling analysis of doubly curved two-directional functionally graded porous shallow microshells in thermal environments via variable length-scale parameters, *Mechanics Based Design of Structures and Machines (ISI-Q2)*.
2. **Duong, K.D.**, Mai, D.N., Minh, P.V. et al. An isogeometric approach to free vibration analysis of bi-directional functionally graded porous doubly-curved shallow microshells with variable length-scale parameters. *Front. Struct. Civ. Eng.* 17, 1871-1894 (2024) (ISI-Q1)
3. **Duong, K.D.**, Linh, N.T., Thuy, T.T.T., Mai, D.N. (2025). Static Bending Behavior of Two-Directional Functionally Graded Porous Microshell. In: Hoang Tien, D., Solanki, V.K., Mahmud, J., Nguyen, T.D.L. (eds) *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability and Emerging Technologies for Smart Manufacturing. SETSM 2024. Proceedings in Technology Transfer*. Springer, Singapore. (Scopus)
4. Nguyễn Tuấn Linh, Đào Như Mai, và **Khuất Đức Dương**. “Phân tích Dao động Riêng của tấm Micro Cơ tính biến Thiên Theo Hai phương với lỗ rỗng bằng tiếp cận đẳng hình học”. *Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol 21, số p.h 5, Tháng Năm 2023, tr 39-44, <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/8404>.
5. **Khuat Duc Duong**, Nguyen Tuan Linh (2025). Analytical Method for Calculating the Extreme Value of Static Bending Deflection of Two-Curvature Microshells. *Mechanics of Solids (ISI-Q3)*, <https://doi.org/10.1134/S0025654425602824>.
6. **Khuất Đức Dương**, Đào Như Mai, Nguyễn Tuấn Linh, Trần Thị Thu Thủy. “Phân tích ổn định của vỏ micro có lỗ rỗng và cơ tính biến thiên hai phương bằng phương pháp đẳng hình học”. Hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí lần thứ VII - NSCME2023.

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài: Các kết cấu dạng vỏ mỏng có hai độ cong ngày càng được sử dụng phổ biến nhờ các tính năng vượt trội như khả năng chịu lực, tính linh hoạt hình học cao và khối lượng nhẹ [1]. Khi kích thước của kết cấu thu nhỏ đến cấp độ micro, các hiệu ứng kích thước (size-dependent effects) bắt đầu đóng vai trò quan trọng và không thể bỏ qua. Những hiệu ứng này đòi hỏi sự hiệu chỉnh các mô hình cơ học cổ điển bằng các lý thuyết tiên tiến như lý thuyết gradient ứng suất, lý thuyết ứng suất cặp hoặc các mô hình đa trường. Xuất phát từ thực tiễn và nhu cầu khoa học nêu trên, nghiên cứu đề tài “*Phân tích tĩnh, động kết cấu vỏ kích cỡ micro hai độ cong có cơ tính biến đổi*” là cần thiết và mang ý nghĩa khoa học cũng như ứng dụng cao.

Mục tiêu nghiên cứu: Cụ thể với các mục tiêu như sau: Xây dựng mô hình vỏ FGM micro hai độ cong trên cơ sở các lý thuyết bậc nhất và cổ điển, lý thuyết gradient ứng suất hoặc cặp ứng suất.

Đối tượng nghiên cứu: Vỏ hai độ cong (hình chiếu bằng dạng chữ nhật hoặc ellip) kích thước micro.

Phạm vi nghiên cứu:

- Phân tích tuyến tính các bài toán: uốn tĩnh và dao động riêng, ổn định tĩnh, ổn định động và bài toán dao động cưỡng bức.
- Mô hình vật liệu cơ tính biến thiên theo hai phương sử dụng quy luật hàm số lũy thừa và xét đến ảnh hưởng của lỗ rỗng.
- Xét ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước thông qua lý thuyết cặp ứng suất sửa đổi (modified couple stress theory).
- Các lớp vật liệu gắn chặt nhau, không bị bong tách, kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nhỏ, không gây ra các hiện tượng biến dạng.

Phương pháp nghiên cứu:

- Lý thuyết: Xây dựng mô hình toán học dựa trên lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất và lý thuyết biến dạng cắt cổ điển kết hợp với lý thuyết kích thước như lý thuyết cặp ứng suất cải tiến (MCST).

- Phương pháp: Sử dụng phương pháp phân tích đẳng hình học (IGA).

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn:

- **Về khoa học:** Luận án góp phần hoàn thiện lý thuyết phân tích kết cấu micro làm từ vật liệu có cơ tính biến đổi theo hai chiều.

- **Về thực tiễn:** Các kết quả nghiên cứu, tính toán có thể áp dụng trong thiết kế và tối ưu các bộ phận, linh kiện kỹ thuật có kết cấu dạng vỏ micro.

Bố cục của luận án: Luận án được trình bày thành 04 chương, ngoài phần lời mở đầu, kết luận và kiến nghị, danh mục tài liệu tham khảo:

Chương 1: Tổng quan nghiên cứu vỏ kích cỡ micro hai độ cong có cơ tính biến đổi. Chương 2. Xây dựng bài toán ứng xử cơ học của vỏ kích cỡ micro hai độ cong có cơ tính biến đổi bằng phương pháp phân tích đẳng hình học. Chương 3. Đánh giá ảnh hưởng của các tham số đối với đáp ứng tĩnh của vỏ kích cỡ micro hai độ cong có cơ tính biến đổi. Chương 4. Đánh giá ảnh hưởng các tham số đối với đáp ứng động của vỏ kích cỡ micro hai độ cong có cơ tính biến đổi trên nền đàn hồi.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VỎ KÍCH CỠ MICRO HAI ĐỘ CONG CÓ CƠ TÍNH BIẾN ĐỔI

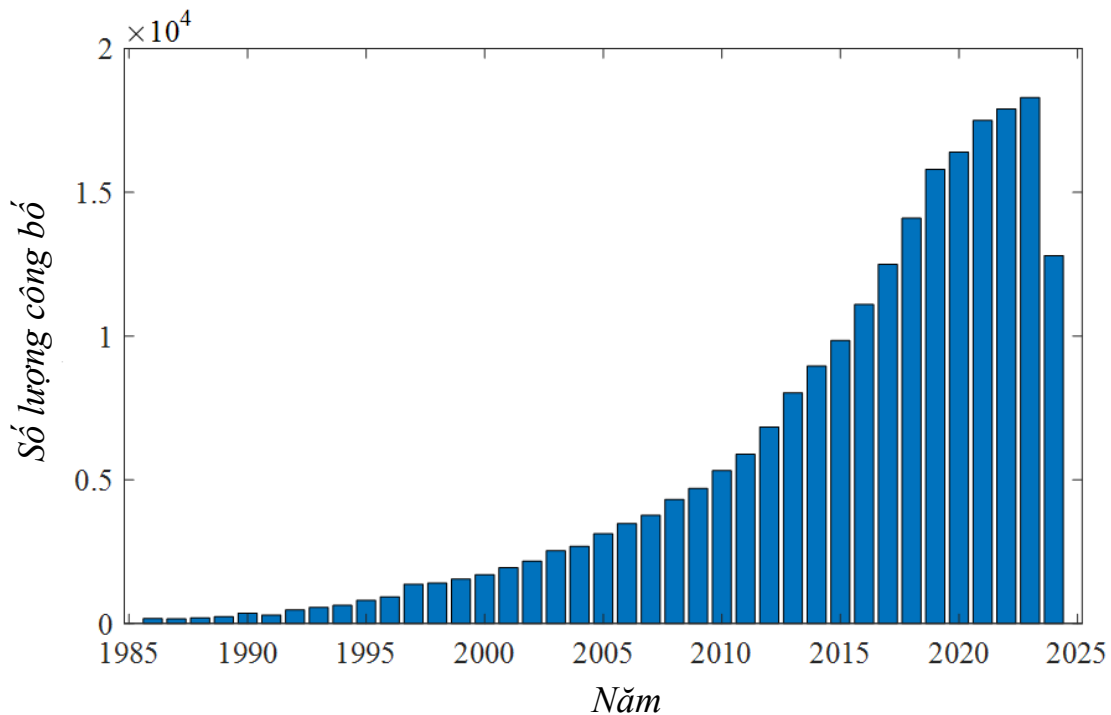
1.1. Tổng quan về nghiên cứu

1.1.1 Nghiên cứu về vỏ kích cỡ micro hai độ cong

Qua các công trình nghiên cứu đã phân tích ở trên có thể nhận thấy phần lớn các nghiên cứu đều tập trung vào: Vỏ đồng nhất hoặc composite nhiều lớp. Không xét hiệu ứng kích thước khi vỏ thu nhỏ đến cấp micro/nano. Chỉ xét vật liệu biến thiên một chiều (1D-FGM).

1.1.2 Nghiên cứu về vật liệu FGM

Hình 1.21 mô tả số lượng các công bố khoa học liên quan đến từ khóa "*FGM material*" trong 39 năm gần đây nhất. Dữ liệu được tổng hợp từ nền tảng học thuật Google Scholar (tính tới tháng 8 năm 2024) [3].



Hình 0.1. Số lượng các công bố khoa học liên quan đến từ khóa "*FGM material*" trong 39 năm gần đây nhất

1.1.3 Nghiên cứu về hiệu ứng kích thước

Đối với các cấu trúc micro/nano, lý thuyết cổ điển không còn đủ chính xác vì bỏ qua các hiệu ứng kích thước, lực tương tác giữa các hạt vật liệu và gradient ứng suất. Một số lý thuyết tiên tiến như: Lý thuyết ứng suất cặp cổ điển (CST); Lý thuyết ứng suất cặp cải biên (MCST); Lý thuyết gradient ứng suất (SGT); Lý thuyết strain gradient theory (SGT) hoặc nonlocal elasticity.

1.1.4 Nghiên cứu tối ưu hóa kết cấu FGM

Qua phân tích ta có thể nhận thấy một số hướng nghiên cứu đã đề cập đến tối ưu hóa phân bố FGM để: Giảm khối lượng cấu trúc; Tăng tần số dao động riêng; Giảm ứng suất tập trung.

1.1.5 Định hướng ứng dụng kết quả nghiên cứu của đề tài

Kết quả nghiên cứu của luận án không chỉ đóng góp vào việc hoàn thiện lý thuyết phân tích kết cấu micro mà còn có khả năng ứng dụng trực tiếp trong các lĩnh vực trọng điểm của kỹ thuật cơ khí.

1.1.6 Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan cơ sở khoa học, tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến kết cấu vỏ hai độ cong, vật liệu có cơ tính biến đổi (FGM), các lý thuyết có xét hiệu ứng kích thước, cũng như các hướng tiếp cận tối ưu hóa kết cấu.

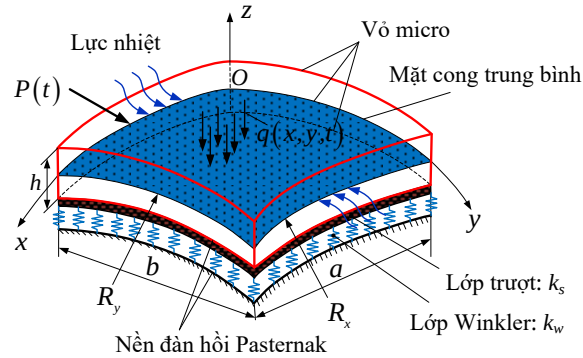
- Về đối tượng nghiên cứu: Phần lớn các nghiên cứu hiện nay tập trung vào dầm, tấm hoặc vỏ đơn giản (vỏ trụ, vỏ cầu) ở kích thước thông thường (macro), chưa có nhiều công trình khảo sát toàn diện vỏ hai độ cong ở kích thước micro.

- Luận án định hướng giải quyết bài toán phân tích tĩnh, động và tối ưu hóa kết cấu vỏ micro hai độ cong làm từ vật liệu có cơ tính biến thiên hai chiều, có xét đến các hiệu ứng kích thước thông qua các lý thuyết tiên tiến, sử dụng phương pháp phân tích đẳng hình học kết hợp với các thuật toán tối ưu hiện đại. Kết quả kỳ vọng sẽ đóng góp vào việc hoàn thiện mô hình lý thuyết, nâng cao độ chính xác dự báo ứng xử cơ học của kết cấu, đồng thời mở rộng khả năng ứng dụng trong thiết kế và chế tạo các hệ thống kỹ thuật vi mô tiên tiến.

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG BÀI TOÁN ỨNG XỬ CƠ HỌC CỦA VỎ KÍCH CỠ MICRO HAI ĐỘ CONG CÓ CƠ TÍNH BIẾN ĐỔI BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐẲNG HÌNH HỌC

2.1. Mô hình bài toán vỏ kích cỡ micro hai độ cong cơ tính biến đổi và các giả thiết

Xem xét một kết cấu vỏ micromet có hai độ cong có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật tựa trên nền đàn hồi Pasternak với các thông số hình học như thể hiện trên Hình 0.1.

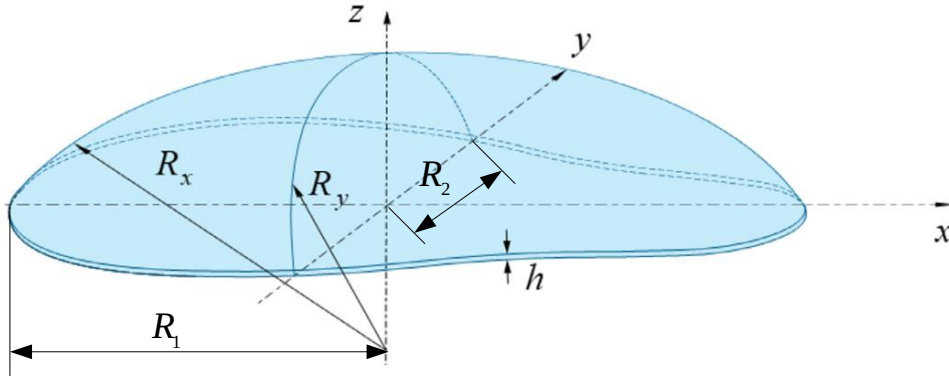


Các quy luật phân bố lỗ rỗng



Hình 0.1. Mô hình vỏ micro hai độ cong tựa trên nền đàn hồi

Đối với vỏ micromet hai độ cong có dạng hình ellip với các bán kính của hình ellip lần lượt là R_1, R_2 nó được mô tả như Hình 0.2 dưới đây:



Hình 0.2. Mô hình vật lý của vỏ kích cỡ micro hai độ cong với hình chiếu dạng hình elip

2.2. Mô hình vật liệu vỏ micro hai độ cong

- Đối với vỏ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật:

$$E(x, z) = E_m + (E_c - E_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{x}{a} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(E_c + E_m) \quad (2.1a)$$

$$\rho(x, z) = \rho_m + (\rho_c - \rho_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{x}{a} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(\rho_c + \rho_m) \quad (2.1b)$$

$$\bar{\alpha}(x, z) = \bar{\alpha}_m + (\bar{\alpha}_c - \bar{\alpha}_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{x}{a} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(\bar{\alpha}_c + \bar{\alpha}_m) \quad (2.1c)$$

$$v(x, z) = v_m + (v_c - v_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{x}{a} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(v_c + v_m) \quad (2.1d)$$

- Đối với vỏ micromet có hình chiếu bằng dạng hình ellip, cơ tính vật liệu sẽ thay đổi từ tâm của hình đi ra ngoài các bán kính theo quy luật:

$$E(x, z) = E_m + (E_c - E_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{|x|}{R_1} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(E_c + E_m) \quad (2.2a)$$

$$\rho(x, z) = \rho_m + (\rho_c - \rho_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{|x|}{R_1} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(\rho_c + \rho_m) \quad (2.1b)$$

$$\bar{\alpha}(x, z) = \bar{\alpha}_m + (\bar{\alpha}_c - \bar{\alpha}_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{|x|}{R_1} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(\bar{\alpha}_c + \bar{\alpha}_m) \quad (2.1c)$$

$$v(x, z) = v_m + (v_c - v_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^{\alpha_z} \left(\frac{|x|}{R_1} \right)^{\alpha_x} - \vartheta(v_c + v_m) \quad (2.1d)$$

Bảng 0.1. Một số thông số thuộc tính của vật liệu [4]

Vật liệu	Thuộc tính vật liệu				
	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν	α (K ⁻¹)	β (%H ₂ O) ⁻¹
<i>Al</i>	70	2707	0.3	23x10 ⁻⁶	0.44
<i>Al₂O₃</i>	380	3800	0.3	7x10 ⁻⁶	0.001

2.3. Trường chuyển vị và biến dạng của vỏ kích cơ micro

Trên cơ sở lý thuyết biến dạng cắt cổ điển của Kirchhoff-Love [5], ta có trường chuyển vị:

$$\begin{cases} u_x = \left(1 + \frac{z}{R_x}\right) u_0(x, y, t) - zw_{0,x}(x, y, t) \\ u_y = \left(1 + \frac{z}{R_y}\right) v_0(x, y, t) - zw_{0,y}(x, y, t) \\ u_z = w_0(x, y, t) \end{cases} \quad (2.3)$$

Trường biên dạng viết lại ở dạng véc tơ như sau:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} &= [1 \quad z \quad z^2] \boldsymbol{\varepsilon}^b; \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} = [1 \quad z] \boldsymbol{\varepsilon}^s; \boldsymbol{\varepsilon}^b = \\ &\begin{Bmatrix} \varepsilon_1^b \\ \varepsilon_2^b \\ \varepsilon_3^b \end{Bmatrix}; \boldsymbol{\varepsilon}^s = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^s \\ \varepsilon_2^s \end{Bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.4. Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

2.4.1. Lý thuyết cặp ứng suất cải tiến.

Dựa trên lý thuyết cặp ứng suất cải tiến, mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của vỏ micromet được mô tả như sau [6]:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\kappa \varepsilon_{ij} - \Delta T \bar{\alpha}(x, z) \delta_{ij} \quad (2.5a)$$

$$\psi_{ij} = 2\kappa l \theta_{ij} \quad (2.5b)$$

2.4.2. Dạng khai triển của mối quan hệ ứng suất và biến dạng

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} - \quad (2.6)$$

$$\Delta T \bar{\alpha}(x, z) \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^b \\ \boldsymbol{\varepsilon}^s \end{Bmatrix} - \Delta T \bar{\alpha}(x, z) \boldsymbol{\varepsilon}^{th};$$

2.5. Các thành phần năng lượng và các dạng yếu

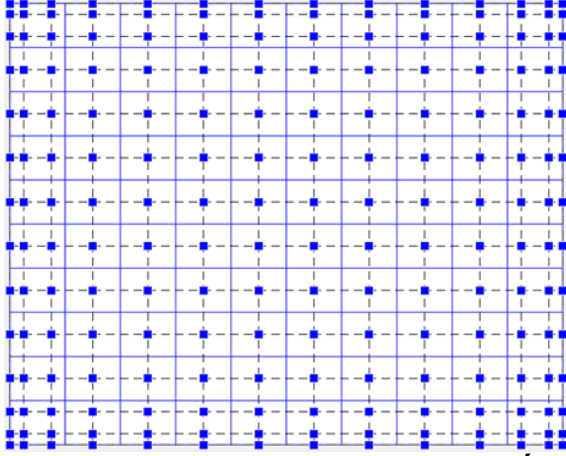
Thế năng biến dạng của vỏ micro cơ tính biến thiên $\delta \mathcal{U}$ được xác định như sau:

$$\begin{aligned}\delta\mathcal{U} &= \int_{S_e} \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma_{ij}\delta\varepsilon_{ij} + \psi_{ij}\delta\theta_{ij}\} dzdxdy \\ &= \int_{S_e} (\hat{\sigma}\delta\hat{\varepsilon} + \hat{\psi}\delta\hat{\theta})dxdy\end{aligned}\quad (2.7)$$

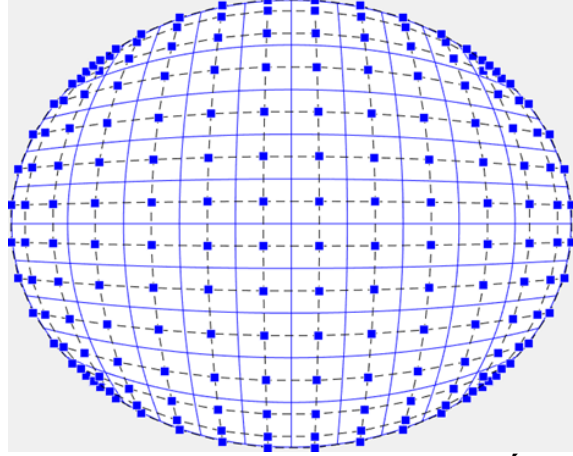
2.6. Phương pháp giải

2.6.1. Phương pháp đẳng hình học

Luận án trình bày tóm tắt nội dung của phương pháp IGA như sau:



a) Mô hình có dạng hình chiếu dạng chữ nhật



b) Mô hình vỏ có hình chiếu dạng hình tròn

Hình 0.3. Mô hình điểm điều khiển của vỏ theo phương pháp đẳng hình học

Phương trình vi phân mô tả trạng thái dao động của vỏ có thể được biểu thị dưới dạng nhỏ gọn như sau [7]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_L\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{t}) \quad (2.8)$$

2.6.2. Điều kiện biên

Các điều kiện biên sử dụng trong luận án: CCCC, SSSS.

2.6.3. Các bài toán cơ bản

a. Bài toán uốn tĩnh

$$\mathbf{K}\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{F} \quad (2.9)$$

b. Bài toán dao động riêng

$$|\mathbf{K} - \omega_{mn}^2\mathbf{M}|\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (2.10)$$

c. Bài toán ổn định động

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + [\mathbf{K} + \mathbf{K}_f + \mathbf{K}_T - P_{cr}(\beta + \psi\cos(\omega t))\mathbf{K}_G]\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

d. Bài toán dao động cưỡng bức

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_L\mathbf{q} = \mathbf{F}(\mathbf{t}) \quad (2.12)$$

2.7. Kết luận chương 2

Trong chương này đã xây dựng được các bài toán ứng xử cơ bản quan trọng của kết cấu bao gồm: bài toán uốn tĩnh, bài toán dao động riêng, bài toán ổn định động và bài toán động lực học.

Một số đóng góp mới đáng chú ý của luận án trong chương 2:

- Mô hình hoá vỏ micromet hai độ cong làm bằng vật liệu cơ tính biến thiên theo hai phương trên cơ sở lý thuyết cặp ứng suất sửa đổi.

- Xem xét hệ số tỷ lệ chiều dài thay đổi như các thuộc tính cơ học khác của vật liệu.

- Phương pháp đẳng hình học được kết hợp với phương pháp Botion và Newmark để đưa ra các công thức xác định các bài toán ổn định động, dao động riêng và cưỡng bức.

- Xây dựng các bài toán cơ bản của kết cấu vỏ micromet cơ tính biến đổi theo hai phương và sơ đồ khối giải các bài toán tương ứng của chúng phục vụ cho việc lập trình tính toán trên phần mềm Matlab 2018a.

CHƯƠNG 3. ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ ĐỐI VỚI ĐÁP ỨNG TĨNH CỦA VỎ KÍCH CỠ MICRO HAI ĐỘ CONG CƠ TÍNH BIẾN ĐỔI

3.1. Thiết lập các tham số đầu vào

3.1.1. Đánh giá độ tin cậy của phương pháp

Bảng 0.2. So sánh tần số dao động riêng Ω_1^* của tấm micromet cơ tính biến thiên theo chiều dày

		$\alpha_z = 0$		$\alpha_z = 1$		$\alpha_z = 10$	
a/h	l/h	[8]	Luận án	[8]	Luận án	[8]	Luận án
20	0.2	6.4027	6.4424	4.9568	4.9834	4.0323	4.0657
	0.4	7.6708	7.7081	6.0756	6.1016	4.7488	4.7755
	0.8	11.4108	11.4478	9.2887	9.3171	6.9013	6.9216
	1	13.5545	13.5934	11.1042	11.1352	8.1494	8.1691
100	0.2	6.4534	6.4551	4.9922	4.9940	4.0725	4.0751
	0.4	7.7217	7.7233	6.1126	6.1146	4.7840	4.7866
	0.8	11.4689	11.4704	9.3344	9.3370	6.9345	6.9375
	1	13.6186	13.6202	11.1560	11.1589	8.1846	8.1880

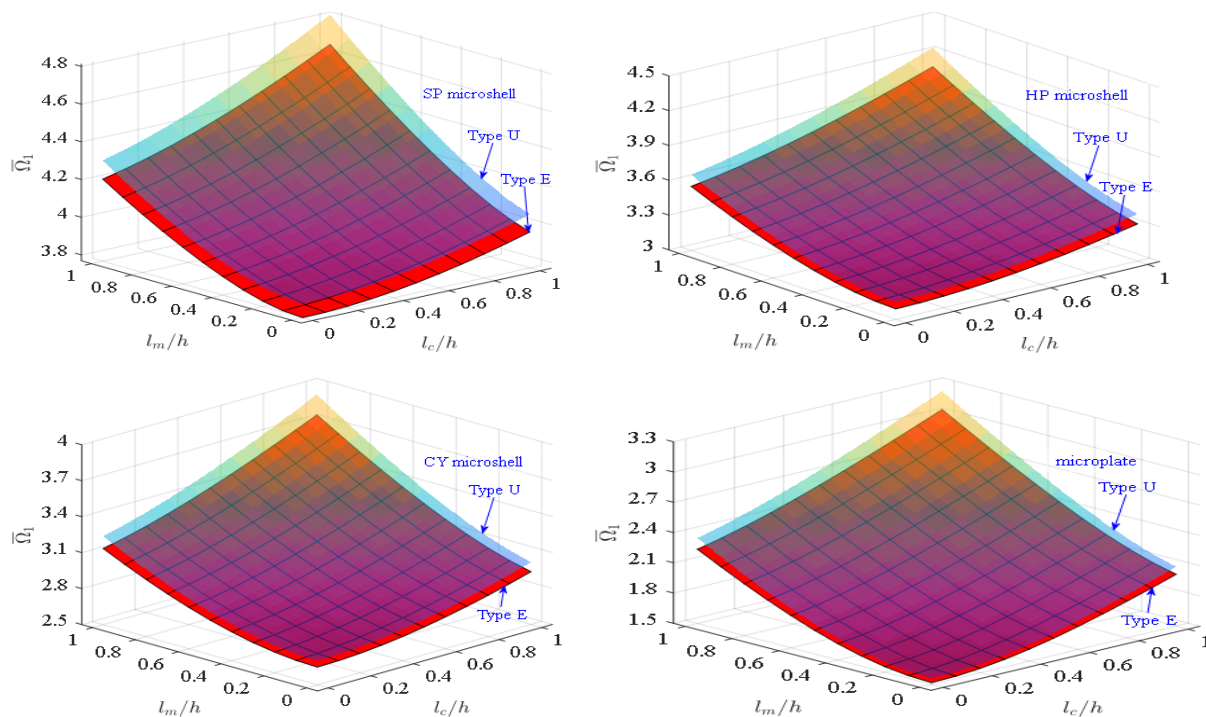
3.2. Đánh giá ảnh hưởng của các tham số đầu vào.

3.2.1. Ảnh hưởng của hệ số thể tích vật liệu

Bảng 0.3. Kết quả tần số thứ nhất không thứ nguyên $\bar{\Omega}_1$ của vỏ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật và phụ thuộc vào hệ số thể tích vật liệu và tỷ lệ chiều dài (CCCC)

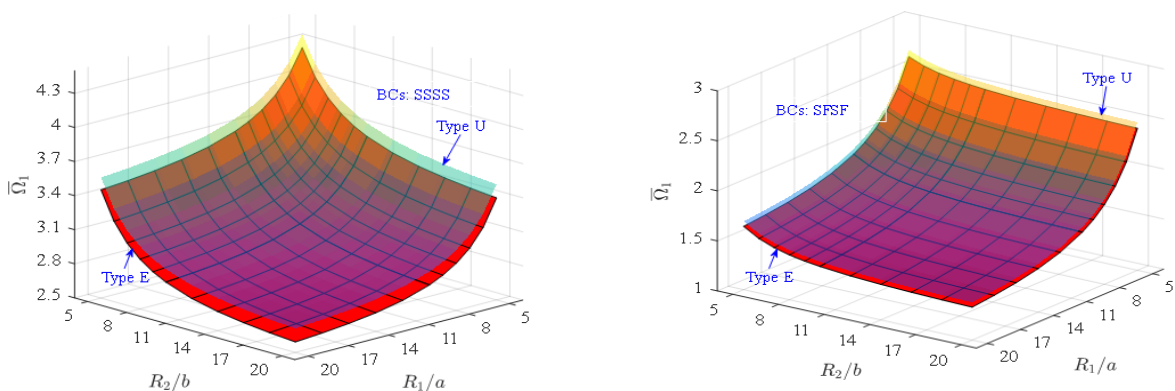
Dạng vỏ	Lỗ rỗng	$\alpha_x = \alpha_z = \alpha$						
		l_c/h	0	0.5	1	2	5	10
Vỏ cầu micro	E	0	4.6354	2.3974	2.0116	1.7929	1.6866	1.6681
		0.5	5.9442	2.7776	2.2593	1.9691	1.8257	1.7987
		1	8.7633	3.6768	2.8673	2.4173	2.1890	2.1420
	U	0	4.4274	2.4030	2.0319	1.8186	1.7137	1.6952
		0.5	5.7732	2.8257	2.3149	2.0256	1.8808	1.8527
		1	8.6273	3.8091	2.9982	2.5428	2.3086	2.2588
Vỏ trụ micro	E	0	4.3139	2.2175	1.8575	1.6535	1.5535	1.5356
		0.5	5.6960	2.6239	2.1233	1.8430	1.7032	1.6762
		1	8.5972	3.5620	2.7615	2.3156	2.0876	2.0398
	U	0	4.1199	2.2231	1.8765	1.6769	1.5778	1.5599
		0.5	5.5398	2.6741	2.1797	1.8993	1.7575	1.7294
		1	8.4732	3.6979	2.8950	2.4432	2.2090	2.1584
Vỏ yên ngựa micro	E	0	4.0688	2.0787	1.7388	1.5468	1.4511	1.4332
		0.5	5.5128	2.5089	2.0209	1.7479	1.6102	1.5827
		1	8.4777	3.4793	2.6843	2.2408	2.0123	1.9636
	U	0	3.8854	2.0838	1.7564	1.5685	1.4736	1.4554
		0.5	5.3678	2.5606	2.0778	1.8043	1.6644	1.6356
		1	8.3625	3.6177	2.8198	2.3702	2.1355	2.0839
Tấm micro	E	0	3.6136	1.8195	1.5156	1.3443	1.2572	1.2398
		0.5	5.1857	2.2995	1.8334	1.5721	1.4380	1.4099
		1	8.2696	3.3322	2.5470	2.1072	1.8775	1.8271
	U	0	3.4499	1.8243	1.5311	1.3625	1.2754	1.2578
		0.5	5.0612	2.3549	1.8920	1.6289	1.4918	1.4624
		1	8.1701	3.4758	2.6866	2.2401	2.0041	1.9508

3.2.2. Ảnh hưởng của hệ số tỷ lệ chiều dài vật liệu



Hình 0.4. Ảnh hưởng của hệ số tỷ lệ chiều dài vật liệu l_c, l_m đến tần số $\bar{\Omega}_1$ của vỏ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật ($SSSS\Delta T = 0$)

3.2.3. Ảnh hưởng của bán kính cong

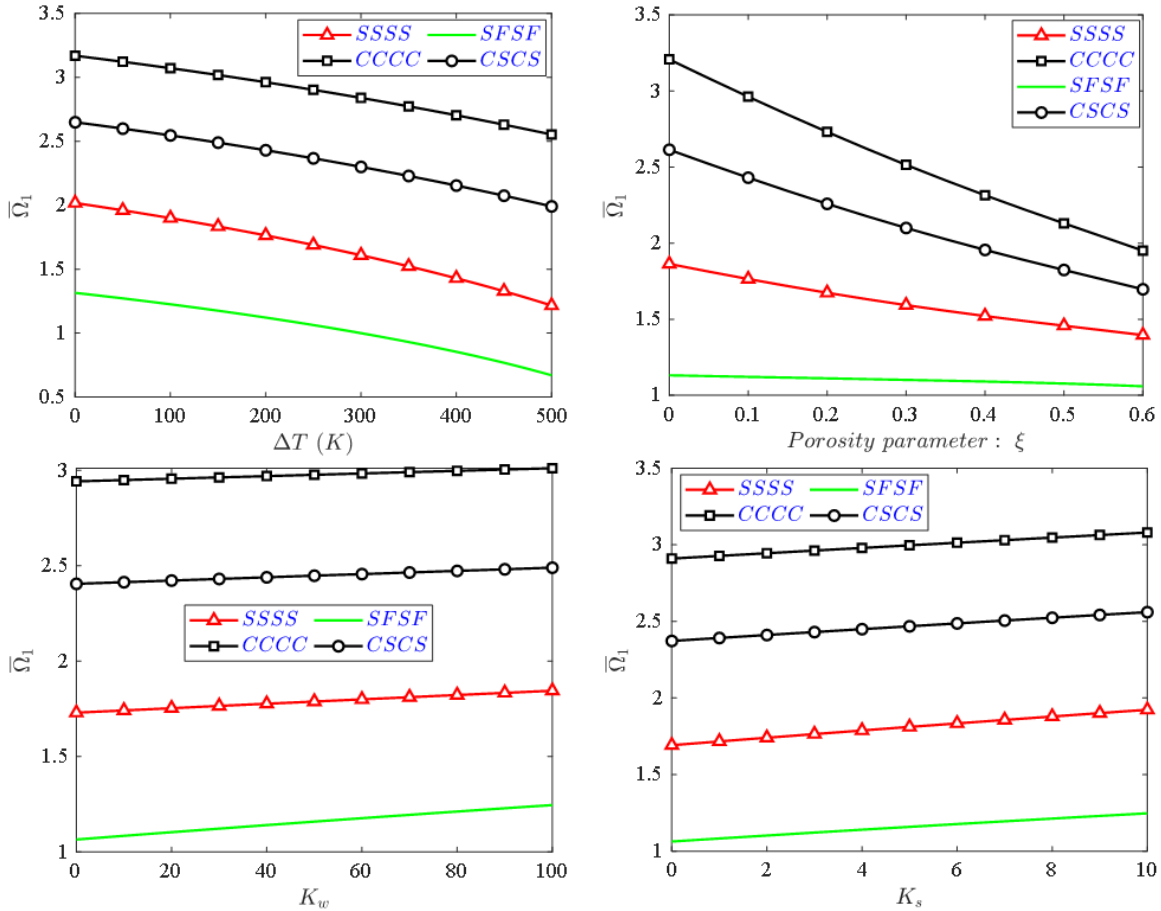


a

b

Hình 0.5. Ảnh hưởng của bán kính cong đến tần số $\bar{\Omega}_1$ của vỏ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật ($\Delta T = 0$)

3.2.4. Ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ, lỗ rỗng và nền đàn hồi



Hình 0.6. Ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ ΔT , hệ số lỗ rỗng, và độ cứng nền đàn hồi đến tần số riêng thứ nhất của vỏ micro hình cầu có dạng hình chữ nhật (Type E)

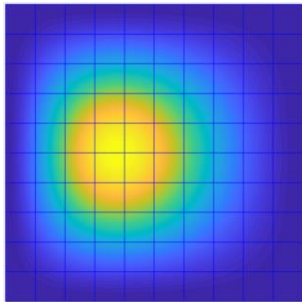
3.2.5. Ảnh hưởng của điều kiện biên khác nhau

Bảng 0.4. Tần số không thứ nguyên đầu tiên $\bar{\Omega}_1$ của vỏ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật với sự thay đổi của điều kiện biên và hệ số lỗ rỗng

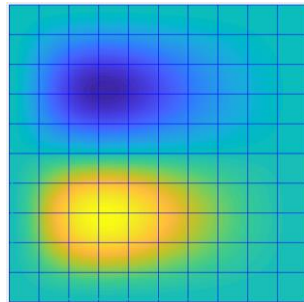
	Lỗ rỗng	ξ	SSSS	CCCC	SFSF	CSCS	SFSS	CFCF
Vỏ cầu	Hoàn hảo	0	4.4458	5.6553	2.7432	5.0717	3.3398	3.5927
micro	E	0.1	4.2412	5.2504	2.6297	4.7607	3.2869	3.3444
		0.2	3.9832	4.7886	2.4618	4.3958	3.2284	3.0455

	Lỗ rỗng	ξ	SSSS	CCCC	SFSF	CSCS	SFSS	CFCF
	U	0.1	4.3601	5.4890	2.6954	4.9440	3.3184	3.4927
		0.2	4.2739	5.3335	2.6414	4.8227	3.2991	3.3961
Vỏ yên ngựa micro	Hoàn hảo	0	3.8243	5.2571	2.5812	4.5802	3.0619	3.5013
	E	0.1	3.6197	4.8512	2.4828	4.2565	2.9778	3.2583
		0.2	3.3830	4.4042	2.3400	3.8913	2.8788	2.9703
	U	0.1	3.7385	5.0914	2.5406	4.4478	3.0271	3.4043
		0.2	3.6560	4.9403	2.4955	4.3250	2.9931	3.3121
Vỏ trụ micro	Hoàn hảo	0	3.4597	5.0181	2.4877	4.2564	2.0436	3.4124
	E	0.1	3.2572	4.6012	2.3862	3.9282	1.9514	3.1668
		0.2	3.0236	4.1416	2.2365	3.5599	1.8529	2.8765
	U	0.1	3.3752	4.8480	2.4457	4.1228	2.0060	3.3144
		0.2	3.2947	4.6929	2.3986	3.9997	1.9716	3.2214
Tấm micro	Hoàn hảo	0	2.6430	4.5554	1.2610	3.6962	1.5662	2.7606
	E	0.1	2.4314	4.1262	1.1824	3.3535	1.4677	2.5040
		0.2	2.2184	3.6687	1.1052	2.9873	1.3761	2.2236
	U	0.1	2.5562	4.3818	1.2322	3.5586	1.5279	2.6613
		0.2	2.4804	4.2280	1.2082	3.4370	1.4964	2.5737

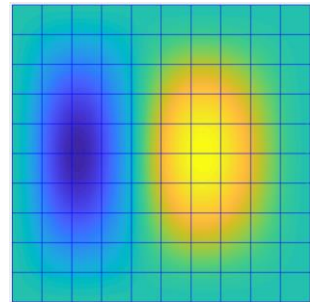
3.2.6. Các dạng dao động của vỏ kích cỡ micro hai độ cong cơ tính biến đổi



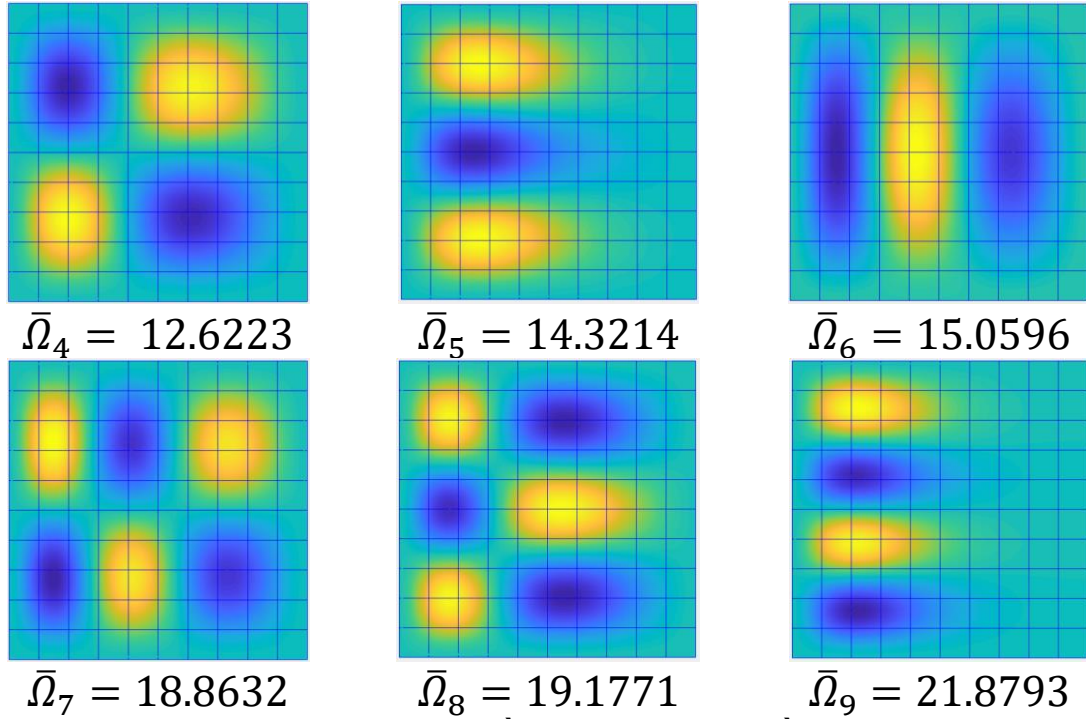
$$\bar{\Omega}_1 = 5.2919$$



$$\bar{\Omega}_2 = 8.5655$$



$$\bar{\Omega}_3 = 8.6814$$



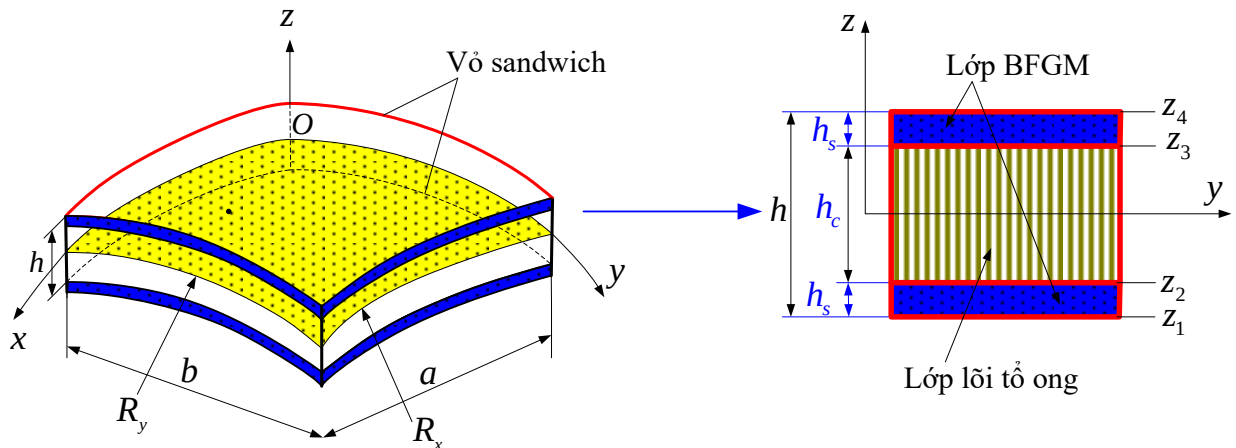
Hình 0.7. Chín dạng dao động đầu tiên của vỏ cầu micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật (CCCC)

3.3. Tối ưu hóa hình học kết cấu vỏ micro chịu tải trọng uốn tĩnh

3.3.1 Mô hình vỏ và vật liệu tương ứng

3.3.1.1 Mô hình vật liệu

Mô hình vỏ micro hai độ cong được chỉ ra như trong Hình 3.11, để thuận tiện cho việc thành lập các công thức tính toán, hệ trục Oxyz được đặt lên vỏ, vỏ có hai bán kính cong là R_x và R_y , với các hình chiếu tương ứng là a và b .



Hình 0.8. Vỏ micro hai độ cong với lớp lõi có cấu trúc tổ ong

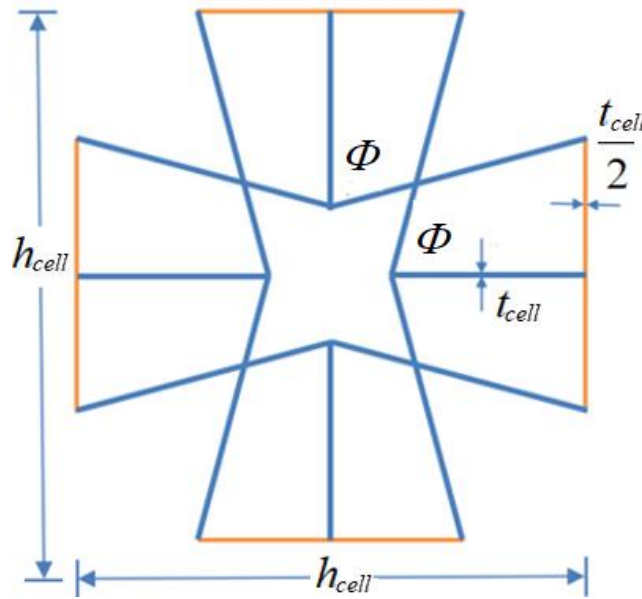
3.3.1.2 Các biến thiết kế, điều kiện biên và ràng buộc

Hai lớp bề mặt làm bằng vật liệu có lỗ rỗng và có chiều dày như nhau $h_s = z_2 - z_1 = z_4 - z_3$, lớp lõi có cấu trúc auxetic và có chiều dày là h_c , vỏ micro có chiều dày tổng cộng là $h = 2h_s + h_c$. Tỷ lệ chiều dày ba lớp của vỏ ký

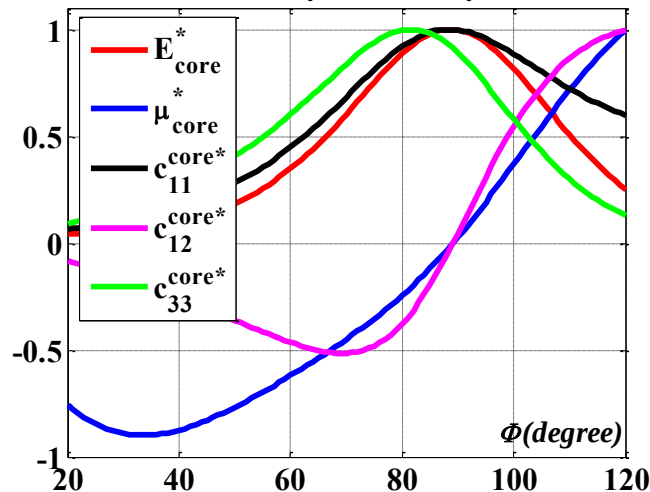
hiệu là $h_s:h_c:h_s$, nếu ký hiệu là 1-1-1 có nghĩa là chiều dày ba lớp như nhau, nếu ký hiệu là 1-2-1 thì có nghĩa là chiều dày lớp giữa gấp hai lần chiều dày lớp vỏ, nếu ký hiệu là 1-8-1 thì có nghĩa là chiều dày lớp giữa gấp 8 lần chiều dày lớp vỏ, các ký hiệu khác được hiểu tương tự.

3.3.1.3 Xây dựng hàm mục tiêu

Cấu trúc của một ô kích thước của lớp lõi được chỉ ra như trên Hình 3.12, kích thước tổng thể của một ô kích thước là h_{cell} , chiều dày của ô kích thước là t_{cell} , góc lệch đặc trưng của mỗi ô kích thước là Φ . Cơ tính của lớp lõi sẽ phụ thuộc vào các kích thước hình học cũng như cơ tính của vật liệu tạo thành các ô kích thước.



a. Kích thước hình học của một ô kích thước



b. Sự biến đổi của các đặc trưng vật liệu phụ thuộc vào góc Φ ,

$$E_{core}^* = \frac{E_{core}}{(E_{core})_{\max}}, \quad \mu_{core}^* = \frac{\mu_{core}}{(\mu_{core})_{\max}}, \quad c_{ij}^{core*} = \frac{c_{ij}^{core}}{(c_{ij}^{core})_{\max}}$$

Hình 0.9. Các đặc trưng hình học và đặc trưng cơ tính của một ô kích thước trong lớp lõi

Hai tham số cơ tính của lõi tổ ong là hệ số Poisson và mô đun đàn hồi được xác định theo công thức sau [88]:

$$\begin{aligned} \mu_{core} &= \frac{w_{cell} d_2}{h_{cell}} \\ E_{core} &= \frac{E_{cell} w_{cell}}{h_{cell}} (c_{41} d_1 + c_{42} d_2 + c_{43} d_3 + c_{44}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

trong đó E_{cell} là mô đun đàn hồi của vật liệu của thành kết cấu trong mỗi ô kích thước, các hệ số d_1 - d_3 và c_{41} - c_{44} được tính theo:

$$\begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} -c_{14} \\ -c_{24} \\ -c_{34} \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$$c_{41} = \frac{s_{EF}}{2} - b_{12} \cos \Phi \sin \Phi; \quad c_{42} = \frac{1}{2} \{ (-s_{CB} + b_{11}) \cos \Phi \sin \Phi + b_{12} \cos \Phi \cos \Phi \}$$

$$c_{43} = (s_{CB} - b_{11}) \cos \Phi \sin \Phi; \quad c_{44} = \frac{1}{2} \{ s_{CB} \sin^2 \Phi + b_{11} \cos^2 \Phi + b_{12} \cos \Phi \sin \Phi \}$$

với các tham số c_{11} - c_{34} được tính theo công thức

$$c_{11} = (s_{CF} - b_{22}) \cos \Phi \sin \Phi; \quad c_{12} = \frac{1}{2} \{ s_{CF} \sin^2 \Phi + b_{22} \cos^2 \Phi + b_{12} \cos \Phi \sin \Phi \}$$

$$c_{13} = \frac{s_{AB}}{2} - b_{12} \cos \Phi \sin \Phi; \quad c_{14} = \frac{1}{2} \{ (-s_{CF} + b_{22}) \cos \Phi \sin \Phi + b_{12} \cos \Phi \cos \Phi \}$$

$$c_{21} = b_{12} \sin \Phi \sin \Phi; \quad c_{22} = \frac{1}{2} \{ s_{CB} \cos^2 \Phi + b_{11} \sin^2 \Phi + b_{12} \cos \Phi \sin \Phi \}$$

$$c_{23} = \frac{s_{AB}}{2} + s_{CB} \cos^2 \Phi + b_{11} \sin^2 \Phi; \quad c_{14} = \frac{1}{2} \{ (s_{CB} - b_{11}) \cos \Phi \sin \Phi - b_{12} \sin \Phi \sin \Phi \}$$

$$c_{31} = \frac{s_{EF}}{2} + s_{CF} \cos^2 \Phi + b_{22} \sin^2 \Phi; \quad c_{32} = \frac{1}{2} \{ (s_{CF} - b_{22}) \cos \Phi \sin \Phi - b_{12} \sin \Phi \sin \Phi \}$$

$$c_{33} = b_{12} \cos \Phi \sin \Phi; \quad c_{34} = \frac{1}{2} \{ s_{CF} \cos^2 \Phi + b_{22} \sin^2 \Phi + b_{12} \cos \Phi \sin \Phi \}$$

còn các tham số s_{AB} , s_{EF} , s_{CB} , s_{CF} được xác định theo công thức

$$s_{AB} = \frac{t_{cell}}{l_{AB}}; \quad s_{EF} = \frac{t_{cell}}{l_{EF}}; \quad s_{CB} = \frac{t_{cell}}{l_{CB}}; \quad s_{CF} = \frac{t_{cell}}{l_{CF}}; \quad (3.8)$$

trong đó

$$\begin{aligned}
l_{AB} = l_{ED} &= \frac{h_{cell} + w_{cell} \cot \Phi}{4}; \quad l_{CD} = l_{CB} = \frac{w_{cell}}{4 \sin \Phi}; \\
l_{EF} = l_{AG} &= \frac{w_{cell} + h_{cell} \cot \Phi}{4}; \quad l_{CF} = l_{CG} = \frac{h_{cell}}{4 \sin \Phi}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

3.4 Khảo sát biến thiết kế và kết quả tính toán tối ưu đạt cực trị về chuyển vị

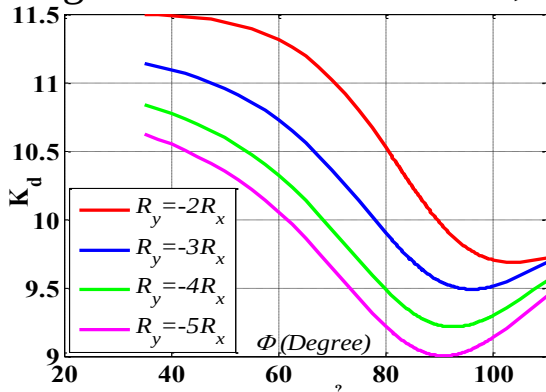
Phần này chỉ ra các số liệu tính toán số đối với bài toán uốn tĩnh của vỏ micro hai độ cong, và đặc biệt là chỉ ra giá trị cực trị của độ võng của vỏ micro, đây chính là tài liệu tham khảo giá trị để phục vụ hữu ích cho việc lựa chọn các tham số hình học của vỏ để vỏ có khả năng chịu tải lớn nhất. Vỏ micro có các thông số hình học $a = 10 \mu m$, $a/b=1$, R_x , R_y , và chiều dày của vỏ h có thể thay đổi tùy thuộc vào từng trường hợp tính toán cụ thể. Hai lớp skin làm từ hai loại vật liệu gốm và kim loại có các thông số vật liệu $E_c = 380 \text{ GP}$, $E_m = 70 \text{ GPa}$, $\mu_c = \mu_m = 0.3$, tỷ lệ thể tích lỗ rỗng của vật liệu là β và chỉ số mũ thể tích vật liệu k có giá trị khác nhau ở từng trường hợp tính toán. Lớp lõi có cấu trúc tổ ong làm từ vật liệu có có cơ tính giống kim loại của hai lớp skin, $h_{cell} = h$, chiều dày của ô kích thước là $t_{cell} = 0.1h_{cell}$. Độ võng lớn nhất tại giữa vỏ micro được tính theo công thức:

$$K_d = 10^3 \frac{E_m h^3}{F_{0s} a^4} w_0 \left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2} \right); \tag{3.10}$$

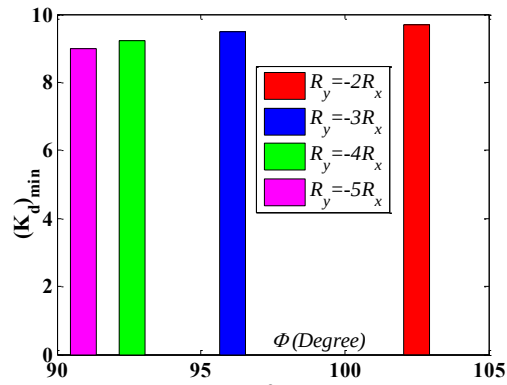
với F_{0s} là biên độ của tải trọng phân bố đều.

Trên các Hình 3.13-Hình 3.14 thể hiện độ võng của điểm giữa vỏ phụ thuộc vào góc Φ với các giá trị khác nhau của tỷ lệ bán kính R_y/R_x . Đối với trường hợp vỏ yên ngựa micro, khi tăng tỷ lệ R_y/R_x thì giá trị cực tiểu của độ võng giảm xuống, nhưng đối với trường hợp vỏ cầu micro thì giá trị cực tiểu của độ võng lại tăng lên khi tăng giá trị của tỷ lệ R_y/R_x . Đồng thời, độ võng cực tiểu của vỏ yên ngựa micro đạt được khi góc Φ lớn hơn 90° , nhưng đối với vỏ cầu micro thì giá trị cực tiểu của độ võng đạt được khi góc Φ nhỏ hơn 84.5° . Thêm vào đó, độ võng của vỏ cầu micro luôn lớn hơn độ võng của vỏ cầu micro, đáng điều đường cong phụ thuộc vào góc Φ đối với ba trường hợp vỏ micro cũng khác nhau. Điều này được giải thích như sau: khi góc Φ tăng lên thì giá trị của các tham số cơ tính của lớp giữa của vỏ micro cũng thay đổi (như mô tả trên Hình 3.13), và tồn tại giá trị góc Φ để các thông số E_{core} , c_{11}^{core} , c_{33}^{core} đạt giá trị cực đại. Ngoài ra năng lượng của vỏ micro còn phụ thuộc và giá trị của các bán kính R_x ,

R_y , do vậy độ cứng của vỏ micro cũng đạt cực đại với mỗi bộ thông số của góc Φ và các bán kính R_x, R_y .

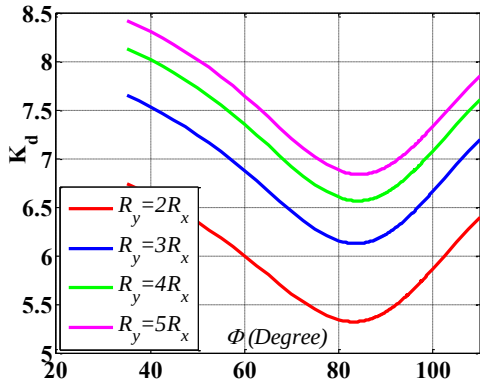


a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ R_y/R_x

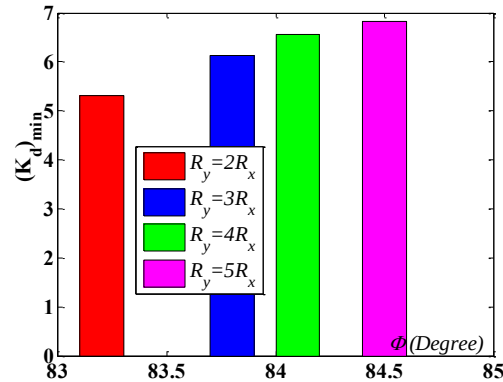


b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ R_y/R_x

Hình 0.10. Độ võng của điểm giữa của vỏ yên ngựa micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ R_y/R_x , $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, $k=2$, 1-8-1.



a. Độ võng tại điểm giữa vỏ micro phụ thuộc vào tỷ lệ R_y/R_x



b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ micro phụ thuộc vào tỷ lệ R_y/R_x

Hình 0.11. Độ võng của điểm giữa của vỏ cầu micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ R_y/R_x , $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, $k=2$, 1-8-1.

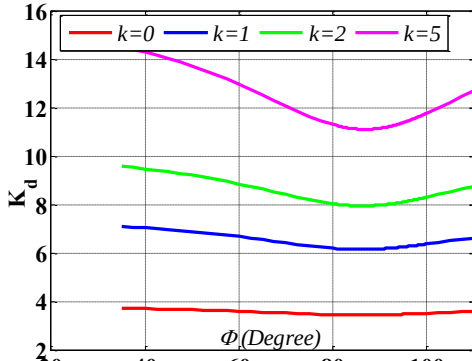
Sự phụ thuộc của độ võng của vỏ micro đối với số mũ thể tích k được thể hiện như trên các Hình 3.15-Hình 3.18, một số kết luận được chỉ ra như sau:

+ Khi chỉ số mũ thể tích k tăng lên thì độ võng của vỏ micro cũng tăng lên, điều này là do tỷ lệ kim loại trong vỏ tăng lên, do đó vỏ mềm hơn.

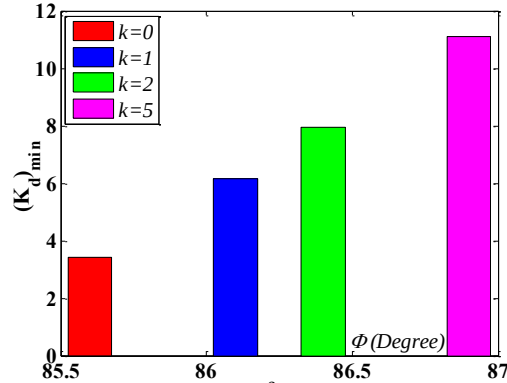
+ Chỉ số mũ thể tích k tăng lên thì giá trị của góc Φ cũng tăng lên để độ võng của vỏ đạt giá trị cực tiểu.

+ Trong ba trường hợp vỏ có lỗ rỗng phân bố đều, giá trị cực tiểu của độ võng đối với SP microshell là nhỏ nhất, và giá trị cực tiểu của độ võng đối với vỏ yên ngựa là lớn nhất.

+ Trường hợp lỗ rỗng phân bố đều và phân bố đều thì độ võng nhỏ nhất của vỏ có khác nhau, nhưng sự sai khác giữa hai trường hợp là không nhiều.

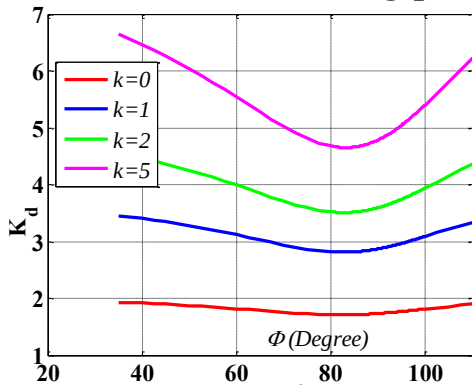


a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

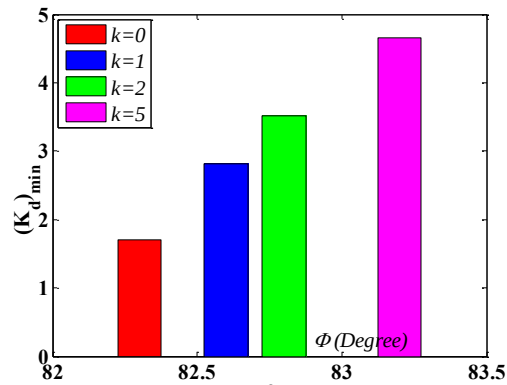


b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

Hình 0.12. Độ võng của điểm giữa của vỏ trụ micro với các giá trị khác nhau của số mũ thể tích k , $R_y = \infty$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, 1-8-1.

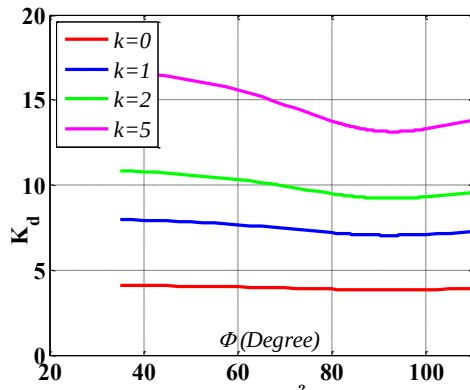


a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

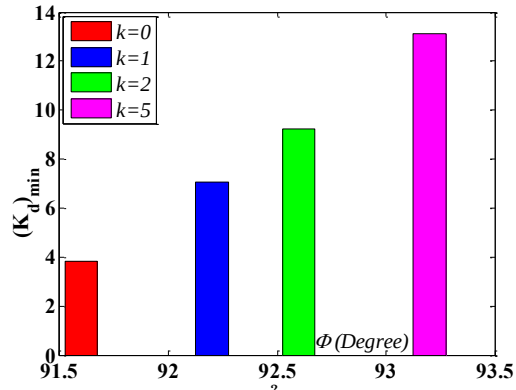


b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

Hình 0.13. Độ võng của điểm giữa vỏ cầu micro với các giá trị khác nhau của số mũ thể tích k , $R_y = R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, 1-8-1.

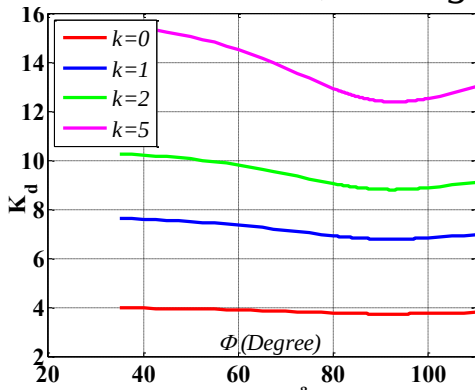


a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

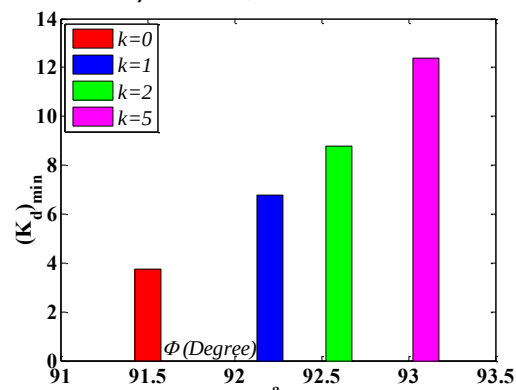


b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

Hình 0.14. Độ võng của điểm giữa của vỏ yên ngựa micro với các giá trị khác nhau của số mũ thể tích k , $R_y = -4R_x$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, 1-8-1.



a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k



b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào số mũ thể tích k

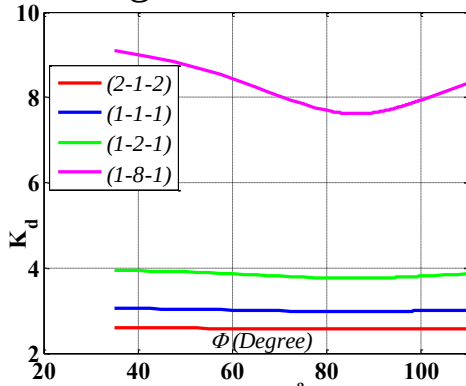
Hình 0.15. Độ võng của điểm giữa của vỏ yên ngựa micro với các giá trị khác nhau của số mũ thể tích k , $R_y = -4R_x$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, 1-8-1.

Trên các Hình 3.19-Hình 3.21 thể hiện sự biến đổi của độ võng tại giữa vỏ phụ thuộc vào góc ϕ và tỷ lệ chiều dày các lớp vật liệu, luận án thấy rằng

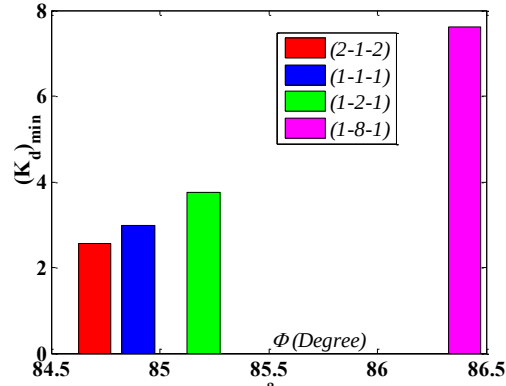
+ Khi tăng chiều dày lớp lõi, ảnh hưởng của lớp lõi càng thể hiện rõ rệt hơn, do vậy đường cong độ võng phụ thuộc vào góc ϕ càng thể hiện rõ rệt.

+ Trong ba trường hợp vỏ, khi chiều dày lớp lõi thay đổi, giá trị của góc ϕ để độ võng đạt cực tiểu đối với vỏ yên ngựa micro là lớn nhất, và đối với vỏ cầu micro thì góc ϕ là nhỏ nhất. Như vậy, người ta có thể thấy rằng tùy thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp và các thông số hình học của

vỏ, người ta cần lựa chọn góc Φ phù hợp để độ cứng của vỏ là lớn nhất, và độ võng của vỏ là nhỏ nhất.

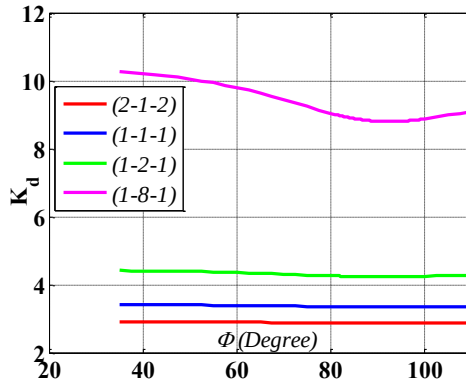


a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

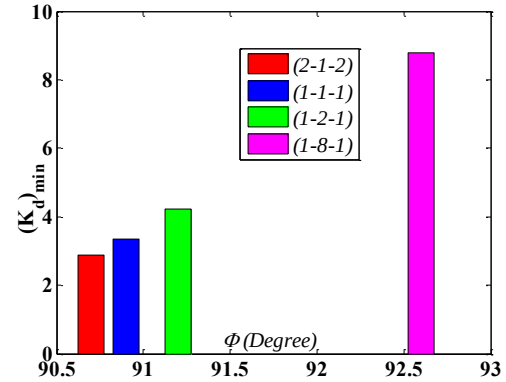


b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

Hình 0.16. Độ võng của điểm giữa của vỏ trụ micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ chiều dày các lớp, $R_y = \infty$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, $k=2$.



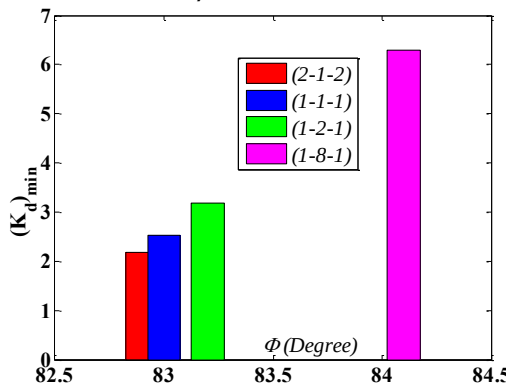
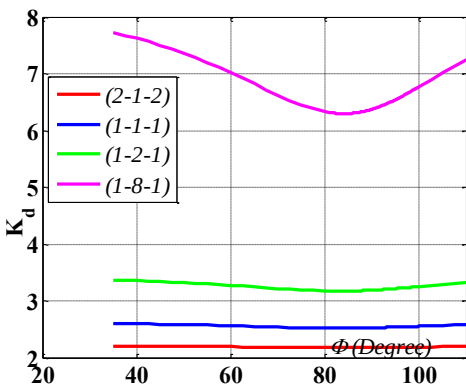
a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp



b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

Hình 0.17. Độ võng của điểm giữa của vỏ yên ngựa micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ chiều dày các lớp, $R_y = -4R_x$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$,

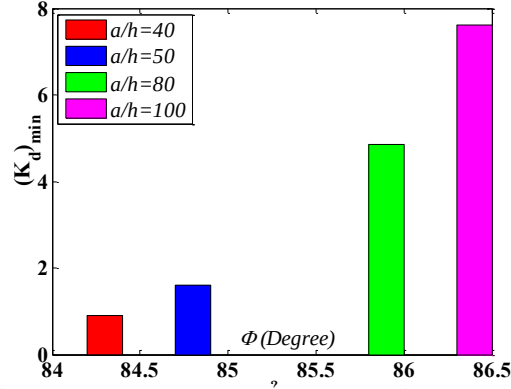
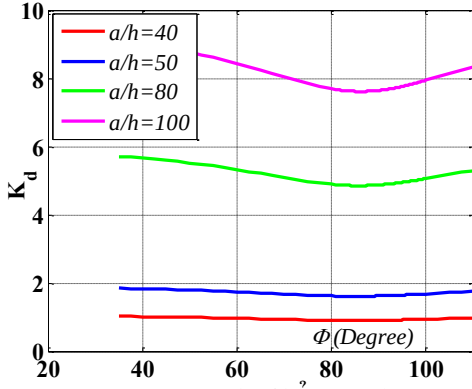
$l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, $k=2$.



a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

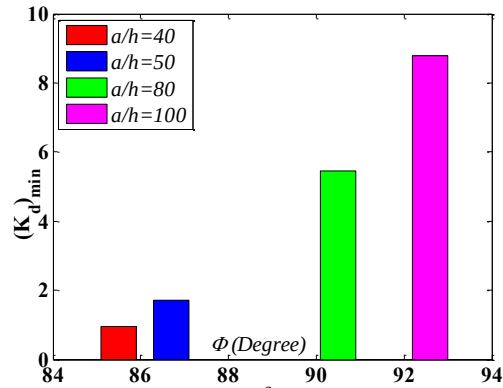
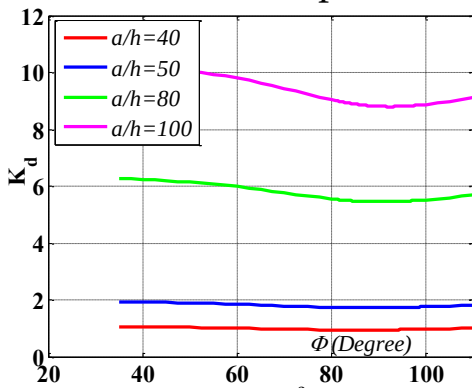
Hình 0.18. Độ võng của điểm giữa của vỏ cầu micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ chiều dày các lớp, $R_y = 4R_x$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, $k=2$.



a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

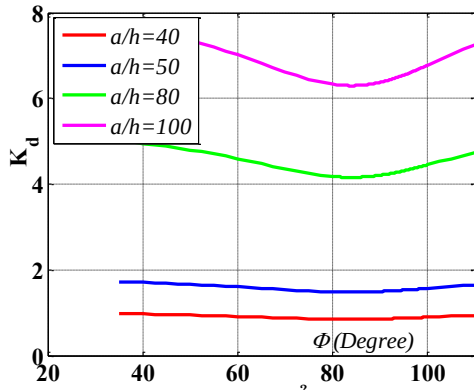
Hình 0.19. Độ võng của điểm giữa của vỏ trụ micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ a/h , $R_y = \infty$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, 1-8-1, $k=2$.



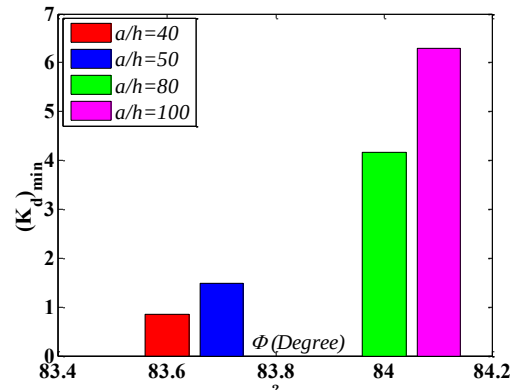
a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

Hình 0.20. Độ võng của điểm giữa của vỏ yên ngựa micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ a/h , $R_y = -4R_x$, $R_x = 4a$, $a/h=100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta=0.1$, 1-8-1, $k=2$.



a. Độ võng tại điểm giữa vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp



b. Giá trị cực tiểu của độ võng của vỏ phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dày các lớp

Hình 0.21. Độ võng của điểm giữa của vỏ yên ngựa micro với các giá trị khác nhau của tỷ lệ a/h , $R_y = 4R_x$, $R_x = 4a$, $a/h = 100$, $l_c = h$, $l_m = h/2$, lỗ rỗng phân bố đều $\beta = 0.1$, 1-8-1, $k = 2$.

Sự biến đổi của độ võng tại điểm giữa vỏ micro đối với chiều dày vỏ được thể hiện trên các Hình 3.22-Hình 3.24, một số nhận xét từ các kết quả tính toán như sau:

+ Khi giảm chiều dày của vỏ micro, vỏ trở nên mềm hơn, do đó độ võng của vỏ micro tăng lên.

+ Trong ba trường hợp của vỏ, khi chiều dày của vỏ thay đổi thì giá trị của góc ϕ để độ võng đạt cực tiểu đối với vỏ yên ngựa micro là lớn nhất, và đối với vỏ cầu micro thì góc ϕ là nhỏ nhất. Như vậy, người ta có thể thấy rằng tùy thuộc vào chiều dày của vỏ và các thông số bán kính của vỏ micro, giá trị của góc ϕ cần được lựa chọn phù hợp để khả năng chịu tải uốn của vỏ micro là lớn nhất, tức là độ võng của vỏ là nhỏ nhất.

3.5 Kết luận chương 3

Trong Chương 3, luận án đã trình bày sơ đồ thuật toán và sử dụng phần mềm Matlab 2020b để xây dựng bộ chương trình tính toán uốn tĩnh, dao động riêng và ổn định tĩnh của vỏ micro hai độ cong tựa trên nền đàn hồi Pasternak.

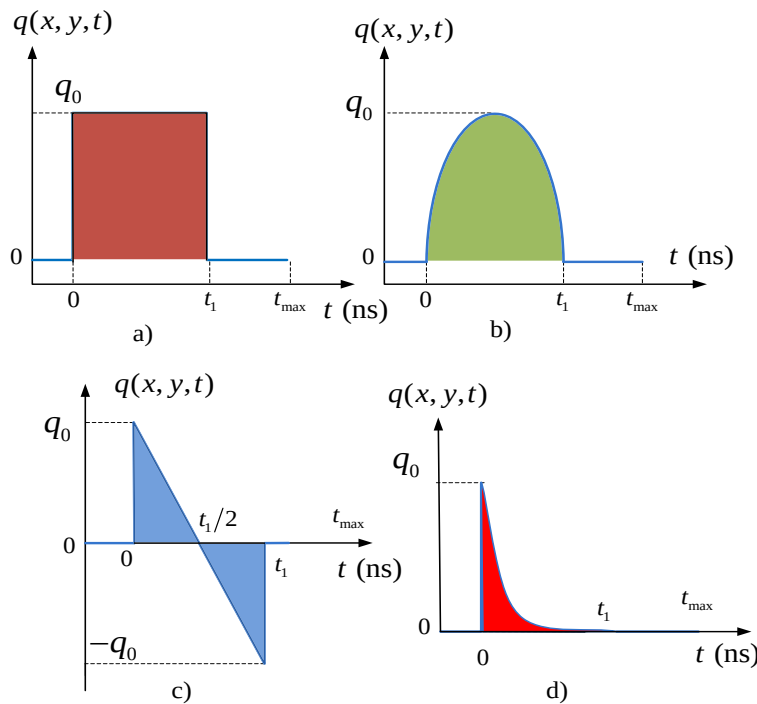
- Khi hệ số thể tích vật liệu α_x, α_z tăng lên sẽ làm cho thành phần kim loại có cơ tính mềm hơn trong kết cấu vỏ tăng lên, do đó độ cứng kết cấu vỏ sẽ giảm xuống và từ đó làm giảm giá trị tần số dao động riêng và lực ổn định tĩnh của vỏ micro.

- Đối với kết cấu micro, hệ số tỷ lệ chiều dài có vai trò tăng cứng cho kết cấu vì nó làm tăng năng lượng biến dạng, do đó các giá trị tần số dao động riêng và lực ổn định sẽ tăng lên.

- Nền đàn hồi có tác dụng tương hỗ và làm tăng độ cứng của kết cấu, trong khi đó sự xuất hiện của lỗ rỗng sẽ làm giảm cơ tính và khối lượng vật liệu của kết cấu, tuy nhiên do sự tương tác của độ cứng và khối lượng có thể làm cho tần số dao động riêng tăng lên hoặc giảm đi, nhưng giá trị độ võng và lực ổn định chắc chắn giảm xuống.
- Trong môi trường nhiệt độ, sự chênh lệch nhiệt độ giữa lớp trên cùng và dưới cùng sẽ gây ra ma trận độ cứng nhiệt và làm giảm độ cứng của kết cấu micro, từ đó nó làm giảm các giá trị đầu ra của kết cấu.

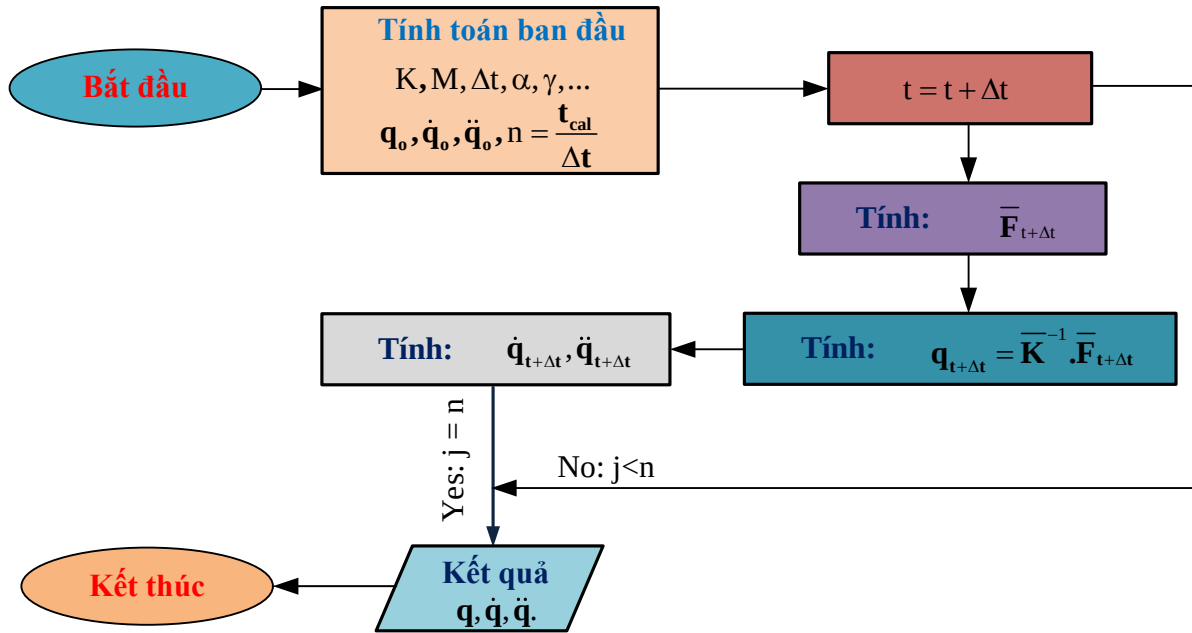
CHƯƠNG 4. ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CÁC THAM SỐ ĐỐI VỚI ĐÁP ỨNG ĐỘNG CỦA VỎ KÍCH CỠ MICRO HAI ĐỘ CÔNG CƠ TÍNH BIẾN ĐỔI TRÊN NỀN ĐÀN HỒI

4.1. Mô hình tải trọng động



Hình 0.1. Mô hình tải trọng động a) tải xung hình chữ nhật (b) tải xung hình sine (c) tải xung hình tam giác và (d) tải xung nổ (sóng xung kích)

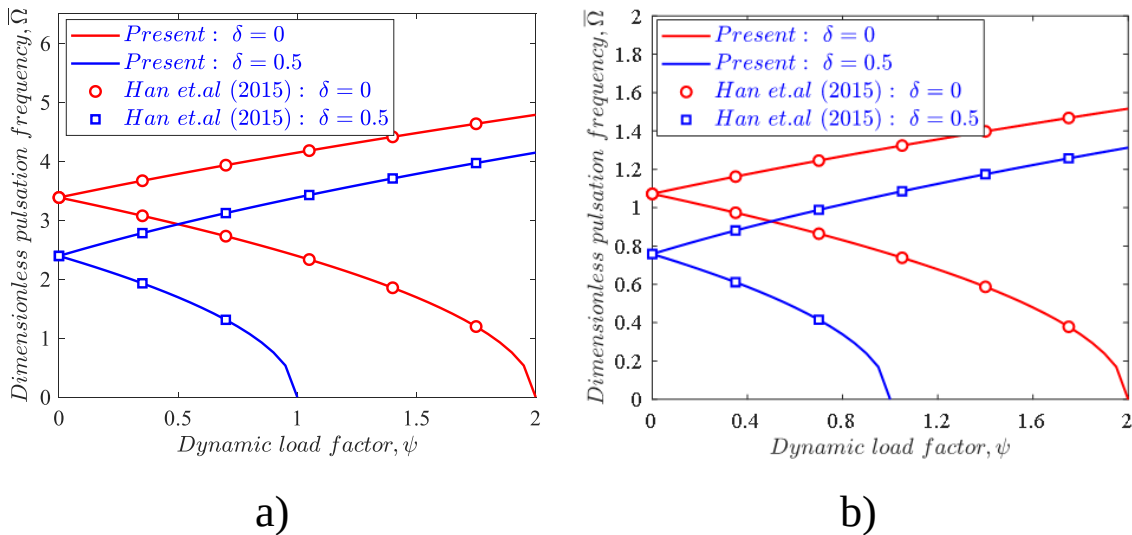
4.2. Sơ đồ thuật toán và thiết lập các tham số đầu vào



Hình 0.2. Sơ đồ thuật toán giải bài toán dao động cưỡng bức

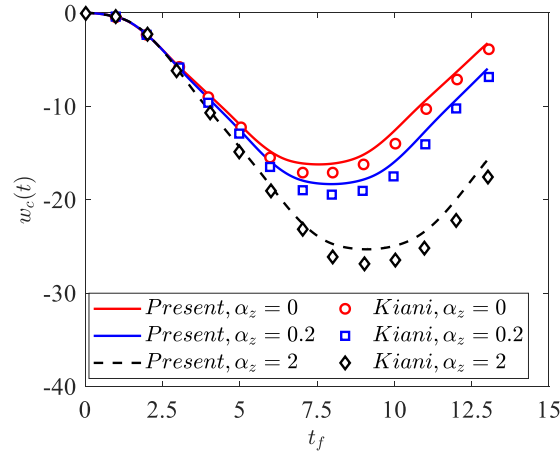
4.3. Bài toán đánh giá tính chính xác của phương pháp

4.3.1. Bài toán về bài toán ổn định động



Hình 0.3. Ảnh hưởng của hệ số lực tĩnh β đến vùng mất ổn định của tấm S-FGM

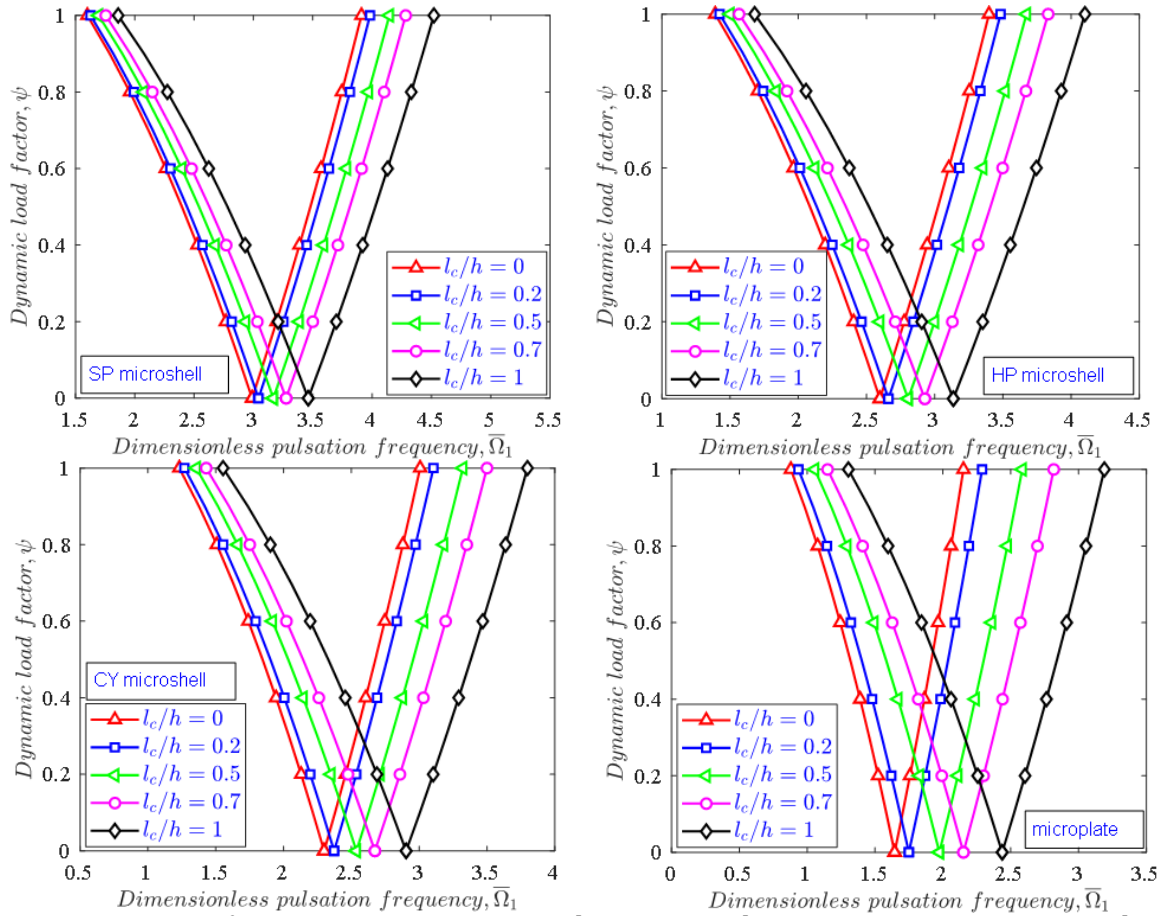
4.3.2. Bài toán kiểm chứng cho bài toán động lực học



Hình 0.4. Đáp ứng độ lệch của tấm hình vuông dưới tác dụng của tải hình chữ nhật theo thời gian

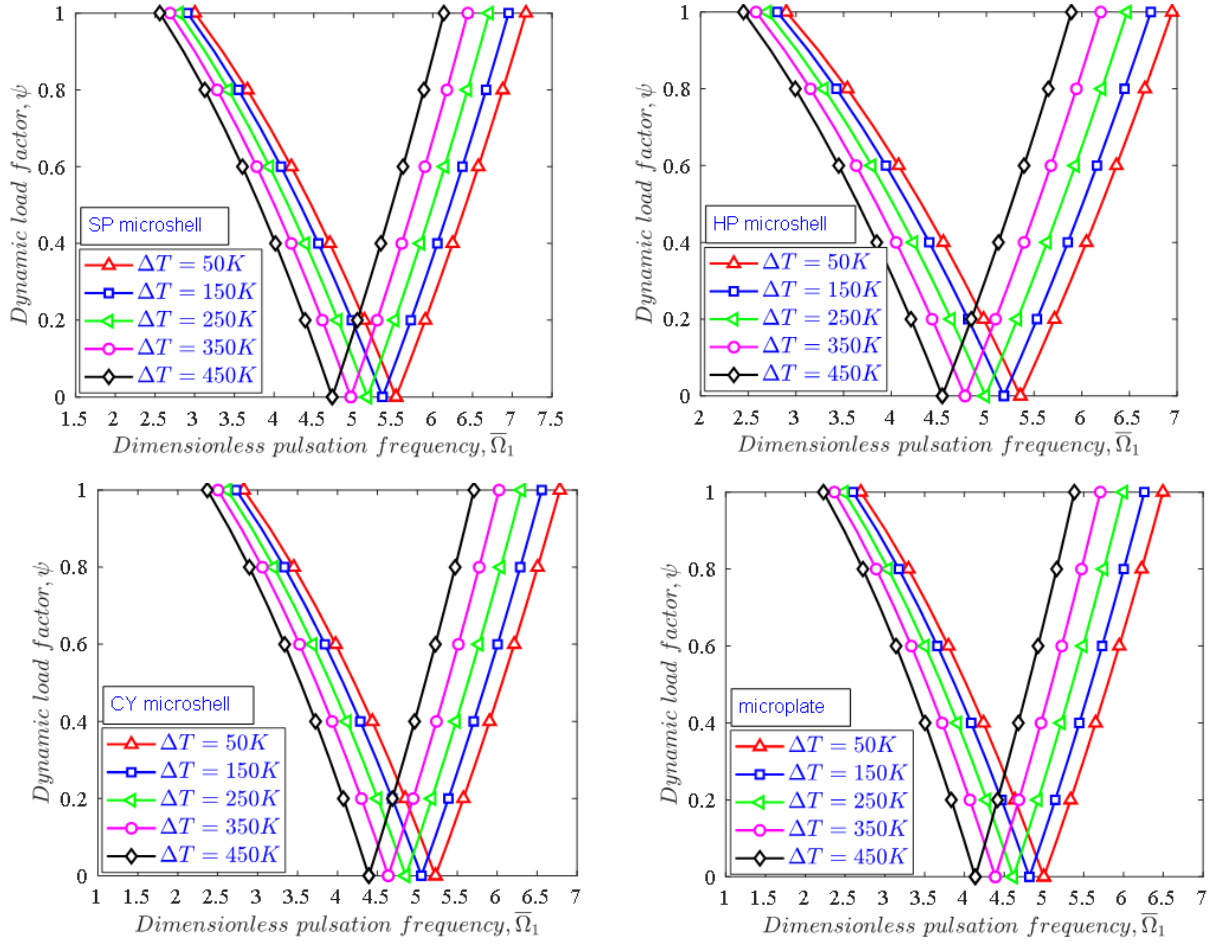
4.4. Các kết quả của bài toán ổn định động

4.4.1. Ảnh hưởng của hệ số tỷ lệ chiều dài vật liệu



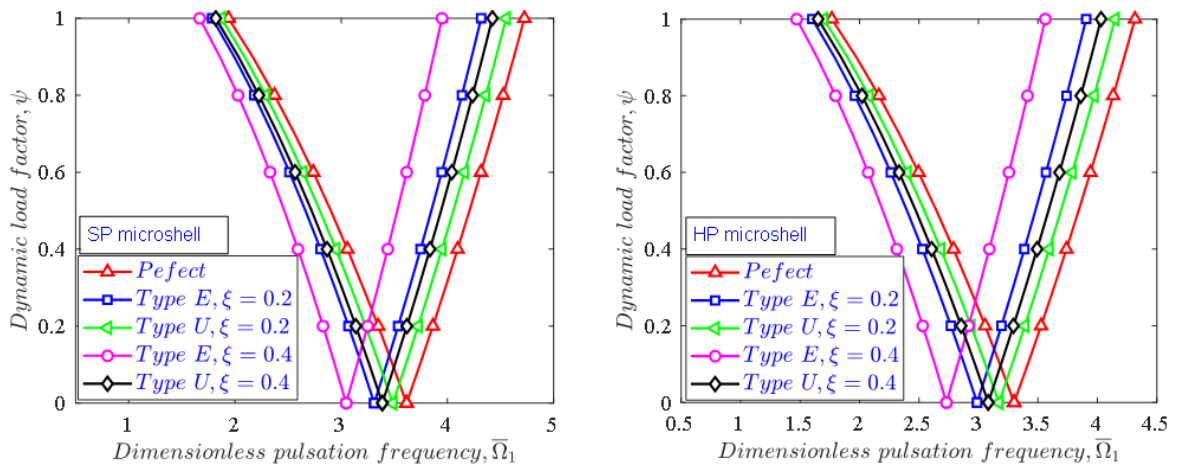
Hình 0.5. Ảnh hưởng của hệ số tỷ lệ chiều dài vật liệu l_c/h đến vùng mất ổn định của vỏ trụ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật (SSSS, Type E)

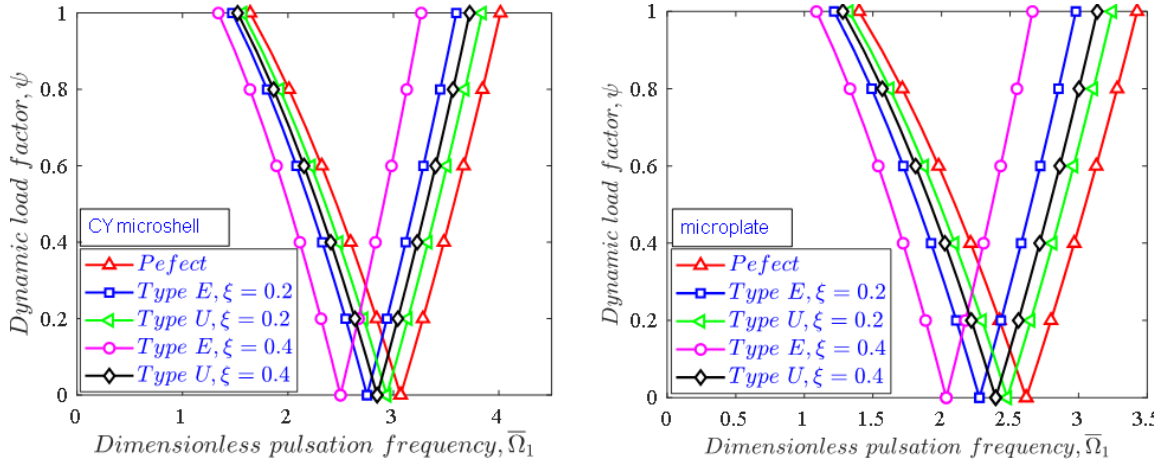
4.4.2. Ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ



Hình 0.6. Ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ ΔT (K) đến vùng mất ổn định của vỏ trụ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật (CCCC, Type E)

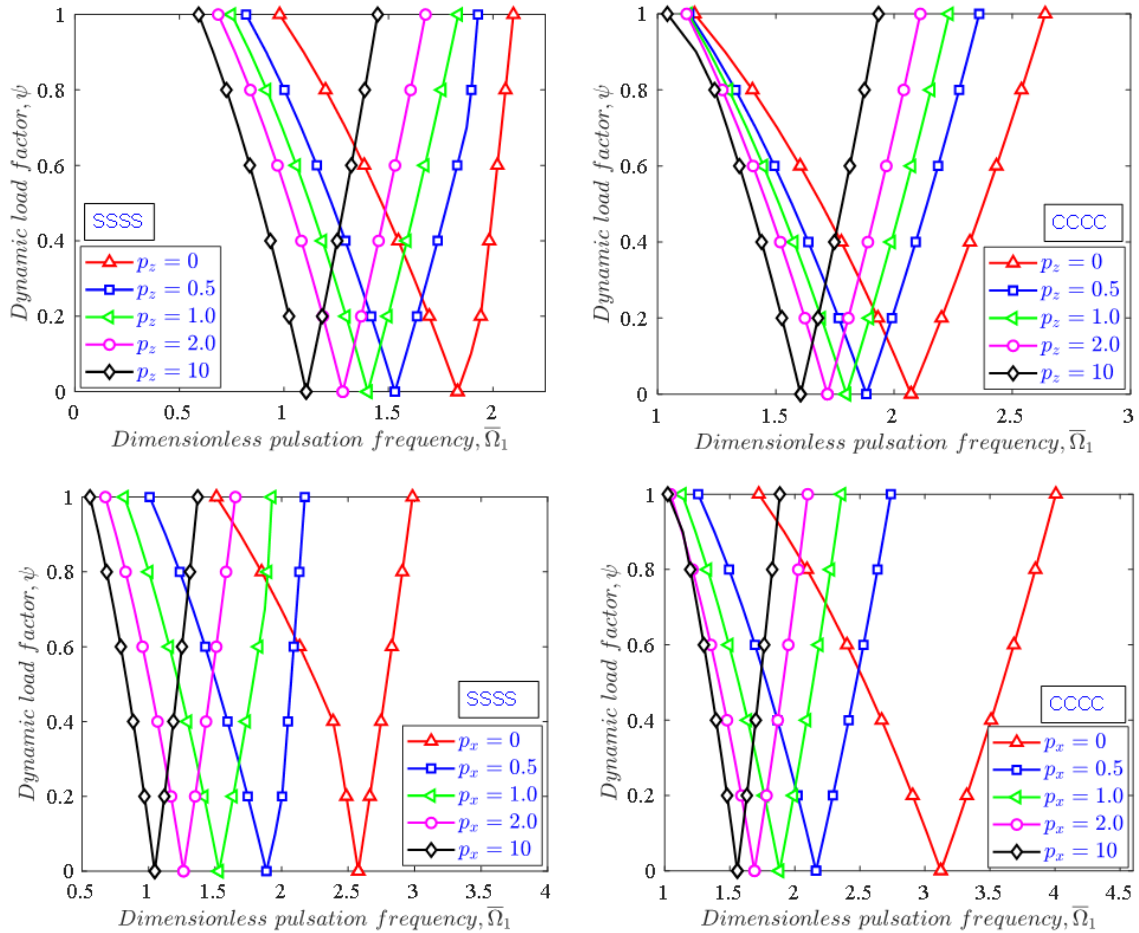
4.4.3. Ảnh hưởng của hệ số lỗ rỗng và hệ số ổn định tĩnh β





Hình 0.7. Ảnh hưởng của hệ số lỗ rỗng ξ đến vùng mất ổn định của vỏ trụ micro có hình chiếu bằng dạng hình chữ nhật (SSSS)

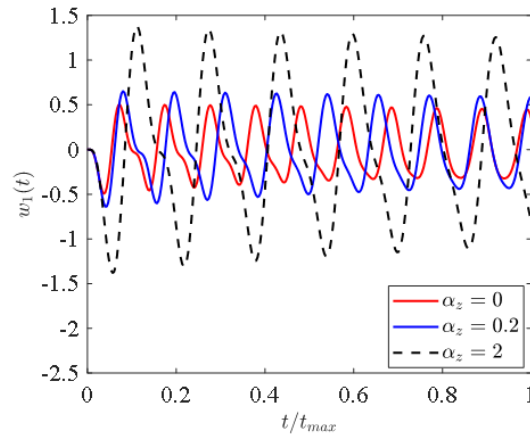
4.4.4. Ảnh hưởng của hệ số thể tích vật liệu



Hình 0.8. Ảnh hưởng của hệ số thể tích vật liệu (p_x, p_z) đến vùng mất ổn định của vỏ cầu micro có hình chiếu bằng dạng hình tròn

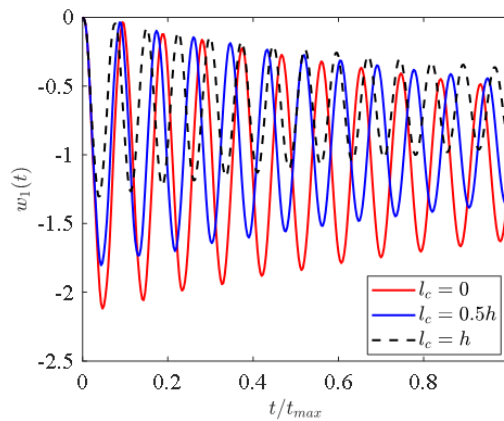
4.5. Kết quả đáp ứng dao động cưỡng bức

4.5.1. Ảnh hưởng của hệ số điều khiển thể tích vật liệu



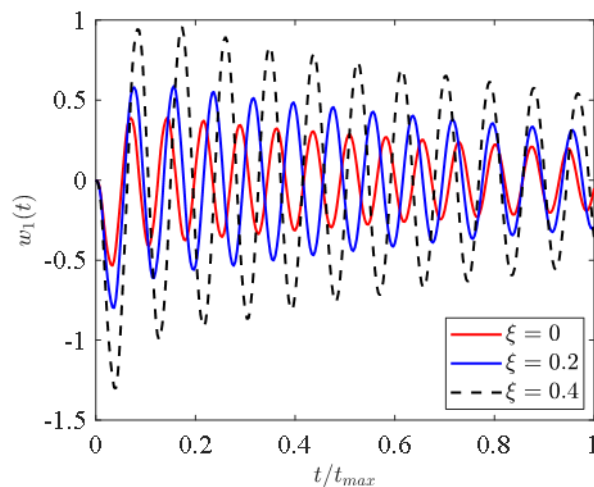
Hình 0.9. Ảnh hưởng của hệ số mũ thể tích theo phương z đến đáp ứng độ lệch của vỏ cầu dưới tác dụng của tải hình sin (SSSS)

4.5.2. Ảnh hưởng của hệ số tỷ lệ chiều dài



Hình 0.10. Ảnh hưởng của hệ số tỷ lệ chiều dài của vật liệu gôm đến đáp ứng độ lệch của vỏ trụ dưới tác dụng của tải hình chữ nhật (SSSS)

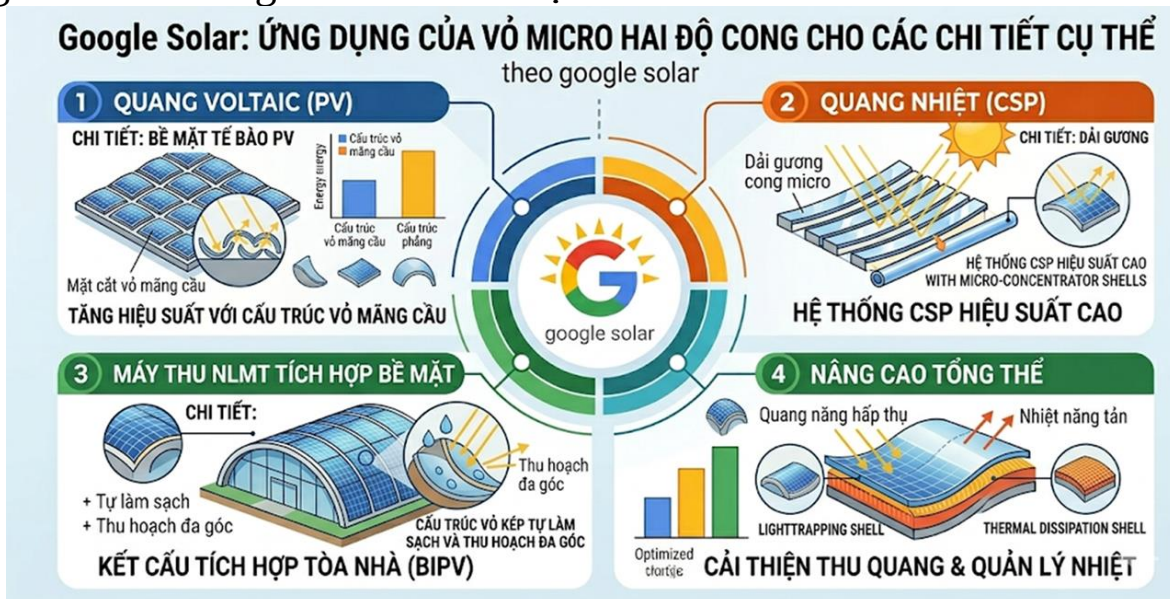
4.5.3. Ảnh hưởng của hệ số lỗ rỗng



Hình 0.11. Ảnh hưởng của hệ số lỗ rỗng đến đáp ứng độ lệch của vỏ yên ngựa dưới tác dụng của tải nô (SSSS)

4.6 Định hướng ứng dụng kết quả nghiên cứu của đề tài

Kết quả nghiên cứu của luận án được ứng dụng rộng rãi trong nhiều hướng của kỹ thuật cơ khí hiện đại, đặc biệt trong bối cảnh các hệ thống và linh kiện cơ khí ngày càng được thu nhỏ về kích thước, yêu cầu độ chính xác cao và phải làm việc trong môi trường có tải trọng phức tạp. Trước hết, các mô hình dao động riêng, ổn định động và đáp ứng cưỡng bức được phát triển trong luận án có thể ứng dụng trực tiếp trong thiết kế cảm biến và bộ truyền động của các hệ thống vi cơ điện tử (MEMS/NEMS). Bằng việc mô tả chính xác ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước theo lý thuyết cặp ứng suất sửa đổi, mô hình của luận án cho phép dự đoán ứng xử dao động của màng cảm biến, đĩa cộng hưởng và các phần tử vi cấu trúc vốn rất nhạy với sai lệch mô hình ở thang micro. Điều này đặc biệt quan trọng trong tối ưu hóa tần số riêng, nâng cao độ nhạy và giảm nhiễu rung cho các linh kiện vi cơ



Hình 4.18 Định hướng ứng dụng vỏ micro hai độ cong có cơ tính biến đổi

Hiện nay, bài toán cung cấp năng lượng để duy trì hoạt động các thiết bị khám phá không gian đang là một thách thức rất lớn đối với các nhà khoa học. Các thiết bị bay không người lái khám phá không gian đang ngày càng hiện đại nhưng chúng sẽ không hoạt động được nếu không có năng lượng để duy trì. Trong luận án nghiên cứu sinh đã xây dựng mô hình vỏ micro hai độ cong, phân tích ảnh hưởng của hệ số lỗ rỗng vật liệu, hiệu ứng kích thước của vỏ kích thước micro hai độ cong, tính toán tối ưu hóa hình học để đạt được cực trị về chuyển bị trong bài toán uốn

tĩnh. Kết quả nghiên cứu của luận án được ứng dụng trực tiếp trong các bài toán về thiết kế các bề mặt tế bào Quang Vôn ta ích nhằm tăng hiệu suất cấu trúc vỏ măng cầu; Hay thiết bị quang nhiệt nhằm tăng tỷ lệ hấp thụ nhiệt; Thiết bị thu năng lượng mặt trời tích hợp cấu trúc vòm; Thiết bị nhằm cải thiện thu quang và quản lý nhiệt được thể hiện trong hình 4.18 nhằm hiệu xuất và khả năng thu năng lượng quang nhiệt được tốt nhất cho các hệ thống Micro cell trong tương lai.

4.7 Kết luận chương 4

Trong chương này trình bày kết quả bài toán ổn định động và dao động cưỡng bức của vỏ micro hai độ cong khi chịu tác dụng của các dạng tải trọng động khác nhau đặt trên nền đàn hồi có xét đến hiệu ứng kích thước nhỏ.

Dạng dao động bậc thấp thể hiện sự tham gia chủ yếu của khối lượng và độ cứng tổng thể, quyết định phản ứng cơ bản của kết cấu dưới tải trọng động.

Dạng dao động bậc cao phản ánh sự biến dạng cục bộ, làm tăng ứng suất tập trung tại các vị trí thay đổi độ cong.

Hai độ cong ngược chiều tạo ra hiệu ứng xoắn và cắt ngang, làm giảm đáng kể tần số riêng so với dự đoán lý thuyết đơn giản.

Độ cong cùng chiều tăng cường độ cứng uốn, giúp kết cấu phân phối lại nội lực và hạn chế biên độ dao động cộng hưởng.

Sự kết hợp hình học làm thay đổi phân bố khối lượng và độ cứng theo không gian, ảnh hưởng trực tiếp đến miền tần số cộng hưởng và hệ số cản của toàn hệ.

So sánh kết quả tĩnh - động: Trong khi phân tích tĩnh chỉ phản ánh sự phân bố độ võng, nội lực theo trạng thái cân bằng, phân tích động đã chỉ ra rằng các tham số hình học (bán kính cong, tỷ lệ chiều dày) ảnh hưởng mạnh đến miền cộng hưởng và dạng thức phá hủy tiềm ẩn - điều mà kết quả tĩnh không thể dự báo được.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã tiến hành mô hình hoá và phân tích các đáp ứng uốn tĩnh, dao động riêng, ổn định tĩnh và ổn định động và dao động cưỡng bức của vỏ micro hai độ cong làm bằng vật liệu cơ tính biến thiên theo hai phương tựa trên nền đàn hồi. Sau đây là một số đóng góp chính của luận án:

- Mô hình vỏ micro hai độ cong được xây dựng từ vật liệu cơ tính biến thiên theo cả chiều dài và chiều dày vỏ, đồng thời kể đến ảnh hưởng của hiệu ứng phụ thuộc kích thước nhỏ.

- Hệ số hệ số tỷ lệ chiều dài thay đổi như các thuộc tính cơ học khác của vật liệu

- Luận án đã trình bày lý thuyết biến dạng cắt cổ điển, lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất kết hợp lý thuyết cặp ứng suất cải tiến để phân tích đầy đủ các ứng xử cơ học của kết cấu vỏ micro như các bài toán uốn tĩnh, dao động riêng, ổn định và dao động cưỡng bức.

- Xây dựng các bài toán cơ bản của kết cấu vỏ micro và sơ đồ khối tương ứng của chúng phục vụ cho việc lập trình tính toán trên phần mềm Matlab.

- Bước đầu sử dụng các kiến thức tối ưu để tìm được những bộ giá trị phù hợp, giúp rút gọn thời gian tính toán trong các nghiên cứu thực tế.

- Kết quả nghiên cứu là tài liệu tham khảo trong tính toán, thiết kế kết cấu nano chịu tải trọng tĩnh và động thường gặp trong các thiết bị điện tử như cảm biến, chip điện tử.

2. Nhận xét và kiến nghị

Trên cơ sở kết quả đạt được của luận án, một số hướng nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển như sau:

- Nghiên cứu các đáp ứng tĩnh và động của kết cấu vỏ micro có kể đến ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến hình học, phi tuyến vật liệu, tải trọng phức tạp.

- Xem xét đến các yếu tố đàn nhớt của vật liệu và môi trường trong tính toán các kết cấu micromet

- Phát triển các phương pháp số như phần tử hữu hạn, đẳng hình học, phương pháp không lưới để phân tích các kết cấu vỏ micro .

- Tính toán bài toán tối ưu hình dạng và bài toán tối ưu vật liệu cho vỏ micro.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Zhu et al., “Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS,” *Micromachines*, vol. 11, no. 1, 2020, doi: 10.3390/mi11010007.
- [2] D. C. C. Lam, F. Yang, A. C. M. Chong, J. Wang, and P. Tong, “Experiments and theory in strain gradient elasticity,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 51, no. 8, pp. 1477–1508, 2003, doi: 10.1016/S0022-5096(03)00053-X.
- [3] D. Van Doan, P. Van Minh, T. Van Ke, N. T. C. Nhung, and D. Van Thom, “An Overview of Functionally Graded Materials: From Civil Applications to Defense and Aerospace Industries,” *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s42417-024-01691-8.
- [4] Q.-H. Pham, H. T. Nhan, V. K. Tran, and A. M. Zenkour, “Hygro-thermo-mechanical vibration analysis of functionally graded porous curved nanobeams resting on elastic foundations,” *Waves in Random and Complex Media*, pp. 1–32, 2023, doi: 10.1080/17455030.2023.2177500.
- [5] A. M. Dehrouyeh-Semnani and H. Mostafaei, “Vibration analysis of scale-dependent thin shallow microshells with arbitrary planform and boundary conditions,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 158, 2021, doi: 10.1016/j.ijengsci.2020.103413.
- [6] H. Farokhi and M. H. Ghayesh, “Nonlinear mechanical behaviour of microshells,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 127, pp. 127–144, 2018, doi: 10.1016/j.ijengsci.2018.02.009.
- [7] P. H. Tu, T. Van Ke, V. K. Trai, and L. Hoai, “An isogeometric analysis approach for dynamic response of doubly-curved magneto electro elastic composite shallow shell subjected to blast loading,” *Def. Technol.*, vol. 41, pp. 159–180, 2024, doi: 10.1016/j.dt.2024.06.005.
- [8] H. X. Nguyen, E. Atroshchenko, H. Nguyen-Xuan, and T. P. Vo, “Geometrically nonlinear isogeometric analysis of functionally graded microplates with the modified couple stress theory,” *Comput. Struct.*, vol. 193, pp. 110–127, 2017, doi: 10.1016/j.compstruc.2017.07.017.
- [9] Y. Kiani, M. Shakeri, M. R. Eslami, “Thermoelastic free vibration and dynamic behaviour of an FGM doubly curved panel via the analytical hybrid Laplace-Fourier transformation,” *Acta. Mech.* 223, pp. 1199–1218 (2012), doi: 10.1007/s00707-012-0629-9.
- [10] Hoang X. Nguyen, Tuan N. Nguyen, M. Abdel-Wahab, S.P.A. Bordas, H. Nguyen-Xuan, Thuc P. Vo, “Isogeometric analysis for functionally graded microplates based on modified couple stress theory, .
- [11] H.-T. Thai, S.-E. Kim, “A size-dependent functionally graded reddy plate model based on a modified couple stress theory,” *Composites Part B: Engineering* 45 (1) (2013) 1636 - 1645. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.065

- [12] D. M. Tien, D. V. Thom, P. V. Minh, N. C. Tho, T. N. Doan, D. N. Mai, “The application of the nonlocal theory and various shear strain theories for bending and free vibration analysis of organic nanoplates,” *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, vol. 52, no. 1, pp. 588-610, 2024, doi: 10.1080/15397734.2023.2186893
- [13] R. Aghababaei and J. N. Reddy, “Nonlocal third-order shear deformation plate theory with application to bending and vibration of plates,” *J. Sound Vib.*, vol. 326, no. 1-2, pp. 277-289, 2009, doi: 10.1016/j.jsv.2009.04.044.
- [14] T. V. Do, T. Q. Bui, T. T. Yu, D. T. Pham, and C. T. Nguyen, “Role of material combination and new results of mechanical behavior for FG sandwich plates in thermal environment,” *J. Comput. Sci.*, vol. 21, pp. 164-181, 2017, doi: 10.1016/j.jocs.2017.06.015.
- [15] B.L. Liu, S. Li, Y.S. Li, “Bending of FGM sandwich plates with tunable auxetic core using DQM,” *Eur. J. Mechanics / A Solids*, vol. 97, 104838, 2023, doi: 10.1016/j.euromechsol.2022.104838.