BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ XÂY DỰNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ GIAO THÔNG VẬN TẢI

BÙI TIẾN TÚ

PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH CƠ NHIỆT CỦA TẤM TRÒN VÀ VỎ CHỎM THOẢI FGM VÀ FG-GPLRC TRONG KẾT CÂU CÔNG TRÌNH CÓ XÉT ĐẾN BIẾN DẠNG TRƯỢT NGANG

Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình đặc biệt Mã số: 9580206

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Nguyễn Thị Phương

2. TS. Lê Ngọc Lý

Phản biện:

Phản biện:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng cấp Trường chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải vào hồi ... giờ ... ngày ... tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam

- Thư viện Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Kết cấu công trình dạng chỏm thoải và tấm tròn đã được ứng dụng và phát triển qua nhiều thế kỷ tiếp tục khẳng định vị thế quan trọng trong ngành xây dựng hiện đại. Vật liệu composite cơ tính biến thiên có tên quốc tế là Fuctionally Graded Material (viết tắt là FGM), và vật liệu nanocomposite gia cường các "mảnh" graphene cơ tính biến thiên có tên quốc tế là Functionally graded graphene platelets reinforced composite (viết tắt là FG-GPLRC) có độ bền cao, tuổi thọ dài có tiềm năng ứng dụng lớn trong ngành xây dựng và kiến trúc. Các vật liệu FGM và FG-GPLRC có thể tạo ra các cấu trúc nhẹ hơn, vững chắc và ấn tượng hơn. Bài toán ổn định và sau mất ổn định phi tuyến là hướng nghiên cứu quan trọng trong phân tích ứng xử của kết cấu chỏm thoải và tấm tròn bằng FGM và FG-GPLRC làm cơ sở để đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu phục vụ trong công tác thiết kế, duy tu, bảo trì và bảo dưỡng công trình. Xuất phát từ những lý do trên đây, đề tài luận án này nghiên cứu Phân tích ổn định cơ nhiệt của tấm tròn và vỏ chỏm thoải FGM và FG-GPLRC trong kết cấu công trình có xét đến biến dạng trượt ngang.

2. Mục tiêu của luận án

i. Phân tích ổn định cơ nhiệt phi tuyến của kết cấu chỏm thoải gồm chỏm cầu, chỏm parabol, chỏm sin, chỏm elip và tấm tròn làm bằng vật liệu FGM và FG-GPLRC theo các lý thuyết (biến dạng trượt bậc nhất (FSDT) và biến dạng trượt bậc ba của Reddy (R3SDT)), các cách tiếp cận (theo chuyển vị và theo hàm ứng suất), các phương pháp (Galerkin và Ritz) và các dạng nghiệm (lượng giác và đa thức) khác nhau.

ii. Phân tích ảnh hưởng của các tính chất vật liệu dị hướng của FGM và FG-GPLRC đến ứng xử cơ nhiệt của kết cấu chỏm thoải và tấm tròn để cung cấp cơ sở khoa học đề xuất các giải pháp thiết kế dạng kết cấu và chế tạo vật liệu FGM và FG-GPLRC phù hợp với ứng dụng thực tế trong xây dựng công trình.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Các kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp gồm chỏm cầu, chỏm parabol, chỏm sin, chỏm elip và kết cấu tấm tròn. Các loại vật liệu tiên

tiến gồm FGM rỗng, sandwich FGM lõi rỗng, FG-GPLRC, FG-GPLRC rỗng, và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng.

Phạm vi nghiên cứu: bài toán ổn định và sau mất ổn định đàn hồi phi tuyến.

4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết dựa trên tiếp cận giải tích.

5. Cấu trúc của luận án: gồm mở đầu, 4 chương, kết luận, danh mục công trình khoa học của tác giả và tài liệu tham khảo.

Chương 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU 1.1. Giới thiệu kết cấu chỏm thoải và tấm tròn, vật liệu FGM và FG-GPLRC

1.1.3. Tiềm năng ứng dụng của kết cấu công trình chỏm thoải và tấm tròn bằng FGM và FG-GPLRC

Các kết cấu chỏm thoải và tấm tròn bằng FGM và FG-GPLRC có tiềm năng sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng gồm:

- Công trình có yêu cầu kiến trúc phức tạp: nhà hát, bảo tàng, trung tâm hội nghị, khách sạn ...

- Công trình trong điều kiện khắc nghiệt: nhà máy, lò phản ứng hạt nhân, cơ sở nghiên cứu, nhà thử nghiệm ...

1.2. Tình hình nghiên cứu trong nước và quốc tế về ứng xử cơ nhiệt của kết cấu tấm vỏ bằng FGM và FG-GPLRC

1.2.3. Kết cấu vỏ chỏm thoải và tấm tròn FGM

Chỏm cầu thoải và tấm tròn FGM là những kết cấu có ứng xử cơ nhiệt phức tạp, thu hút sự quan tâm nghiên cứu sâu rộng trong những năm gần đây. Đối với tấm tròn FGM [102, 46, 49, 62, 42, 99, 78], và đối với chỏm cầu thoải FGM [30-32, 81, 103, 94, 37, 28, 125, 126, 17, 24-26, 91, 79]. *1.2.4. Kết cấu vỏ chỏm thoải và tấm tròn FG-GPLRC*

Số lượng các nghiên cứu của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPRC là ít hơn hẳn so với FGM. Đối với các tấm tròn FG-GPLRC: Huo và cộng sự [61], Javani và cộng sự [66], Sobhy [115], Javani và cộng sự [65], Safarpour và cộng sự [101]. Đối với kết cấu chỏm cầu FG-GPLRC: Heydarpour và cộng sự [51], Liu và cộng sự [76], Vũ Thị Thùy Anh và cộng sự [18].

1.3. Tính chất hiệu dụng của các loại FGM và FG-GPLRC được nghiên cứu trong luận án 1.3.1. FGM rỗng

Trong nghiên cứu của luận án, FGM rỗng được cấu tạo từ gốm và kim loại có tỷ phần thể tích rỗng phân bố theo hai loại [133]:

- Loại FG-UD: tỷ phần thể tích rỗng phân bố đều:

$$E(z) = \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^{k} \left[E_{c} - E_{m}\right] + E_{m} - \frac{e}{2}\left[E_{m} + E_{c}\right], \qquad (1.1)$$

$$\alpha(z) = \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^{\kappa} \left[\alpha_c - \alpha_m\right] + \alpha_m - \frac{e}{2} \left[\alpha_m + \alpha_c\right], \qquad (1.2)$$

- Loại FG-O: tỷ phần thể tích rỗng phân bố không đều:

$$E(z) = \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^{k} \left[E_{c} - E_{m}\right] + E_{m} + \left(1 - \frac{2|z|}{h}\right) \frac{e}{2} \left[E_{m} + E_{c}\right], \quad (1.3)$$

$$\alpha(z) = \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^{k} \left[\alpha_{c} - \alpha_{m}\right] + \alpha_{m} + \left(1 - \frac{2|z|}{h}\right) \frac{e}{2} \left[\alpha_{m} + \alpha_{c}\right], \quad (1.4)$$

với e là độ rỗng $0 \le e < 1$, c và m là các chỉ số dưới để chỉ thành phần gốm và kim loại tương ứng.

Hệ số Poisson của FGM rỗng được coi là không thay đổi v = 0.34. 1.3.2. Sandwich FGM lõi rỗng



Hình 1.6. Cấu trúc sandwich FGM lõi rỗng Tỷ phần thể tích rỗng của lớp lõi tại tọa độ z:

$$V_p(z) = e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h_{pc}}\right), \quad -\frac{h_{pc}}{2} < z < \frac{h_{pc}}{2}$$
 (1.6)

1.3.3. FG-GPLRC

FG-GPLRC được cấu tạo gồm GPL gia cố trong nền kim loại Đồng với năm quy luật khác nhau: UD-GPLRC, X-GPLRC, O-GPLRC, V-GPLRC, A-GPLRC.

Mô đun đàn hồi xác định theo mô hình Halpin-Tsai mở rộng:

$$E(z) = \left[\frac{3 + 3\zeta_1 \delta_1 V_{GPL}(z)}{8 - 8\delta_1 V_{GPL}(z)} + \frac{5 + 5\zeta_2 \delta_2 V_{GPL}(z)}{8 - 8\delta_2 V_{GPL}(z)}\right] E_{m,}$$
(1.8)

Hệ số Poisson và hệ số giãn nở nhiệt được xác định theo quy tắc hỗn hợp:

$$\nu(z) = \nu_m \left[1 - V_{GPL}(z) \right] + \nu_{GPL} V_{GPL}(z),$$

$$\alpha(z) = \alpha_m \left[1 - V_{GPL}(z) \right] + \alpha_{GPL} V_{GPL}(z).$$
(1.13)

1.3.4. FG-GPLRC rống

FG-GPLRC rỗng, ký hiệu là GF3D, có tỷ phần thể tích rỗng thay đổi theo ba loại: GF3D-U, GF3D-O và GF3D-X.

Mô đun Young E(z), hệ số Poisson v(z) và hệ số giãn nở nhiệt $\alpha(z)$ của FG-GPLRC rỗng được xác định:

$$E(z) = \begin{cases} E^* \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right], & \text{GF3D-O} \\ E^* \left\{ 1 - e_x \left[1 - \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right] \right\}, & \text{GF3D-X} \\ E^* e_U, & \text{GF3D-U} \end{cases}$$

$$\begin{cases} v(z) = v^*, \\ \alpha(z) = \alpha^*, \end{cases}$$

$$(1.16)$$

Phương trình đại diện cho các tính chất cơ học của FG-GPLRC rỗng [87, 95, 130] là:

$$\frac{E(z)}{E^*} = \left[\frac{\rho(z)}{\rho^*}\right]^{2.73}$$
(1.17)

1.3.5. Sandwich FG-GPLRC lõi rõng

Sandwich FG-GPLRC lõi rỗng được cấu tạo bởi lớp phủ trên và dưới bằng FG-GPLRC kết hợp với lớp lõi rỗng tạo ra năm loại cấu trúc là: X-PC-X, O-PC-O, UD-PC-UD, V-PC-A, A-PC-V. Đối với lớp lõi rỗng, tỷ phần thể tích rỗng được xác định theo công thức (1.6), mô đun đàn hồi và hệ số giãn nở nhiệt xác định theo công thức (1.7). Đối với các lớp phủ FG-GPLRC, mô đun đàn hồi được xác định theo công thức (1.8).

1.4. Những kết quả đã đạt được trong nước và quốc tế và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

1.4.1. Những kết quả đã đạt được trong nước và quốc tế

1. Các kết cấu tấm, panel trụ, vỏ thoải hai độ cong, vỏ trụ, vỏ trống bằng FGM và FG-GPLRC đã được nghiên cứu tương đối toàn diện về ổn định tĩnh tuyến tính và phi tuyến.

2. Đã có nhiều nghiên cứu về bài toán ổn định tĩnh của chỏm cầu thoải bằng các loại FGM biến dạng đối xứng trục theo lý thuyết vỏ cổ điển và FSDT. Tuy nhiên, số lượng nghiên cứu về FG-GPLRC vẫn còn hạn chế.

3. Việc nghiên cứu kết cấu chỏm cầu thoải sử dụng FGM và FG-GPLRC theo HSDT vẫn chưa được quan tâm đầy đủ.

4. Đặc biệt, chưa có nghiên cứu nào về kết cấu chỏm parabol, chỏm sin và chỏm ellip làm bằng các loại FGM và FG-GPLRC.

1.4.2. Xác định mục tiêu cần tiếp tục nghiên cứu

1. Tiếp cận theo chuyển vị phân tích ổn định cơ nhiệt phi tuyến của kết cấu vỏ chỏm thoải có độ cong phức tạp (chỏm cầu, chỏm parabol, chỏm sin và chỏm elip) và tấm tròn bằng vật liệu FG-GPLRC rỗng và sandwich FG-GPLPC lõi rỗng theo FSDT. Sử dụng phương pháp Galerkin với dạng nghiệm lượng giác.

2. Tiếp cận theo chuyển vị phân tích ổn định cơ nhiệt phi tuyến của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn bằng vật liệu FGM rỗng, sandwich FGM lõi rỗng, FG-GPLRC và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng theo R3SDT. Sử dụng phương pháp Ritz.

3. Tiếp cận theo hàm ứng suất phân tích ổn định cơ nhiệt phi tuyến của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC rỗng theo FSDT. Sử dụng phương pháp Ritz.

Chương 2. ÔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA KẾT CẦU CHỎM THOẢI CÓ ĐỘ CONG PHỨC TẠP VÀ TẦM TRÒN BẰNG FG-GPLRC RÕNG VÀ SANDWICH FG-GPLRC LÕI RÕNG THEO FSDT VÀ PHƯƠNG PHÁP GALERKIN – TIẾP CẬN THEO CHUYỀN VỊ

2.1. Thiết lập các phương trình chủ đạo theo FSDT cho kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn

2.1.1. Mô hình kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn



Hình 2.1. Mô hình kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn *2.1.2. Thiết lập các phương trình chủ đạo theo FSDT*

- Phương trình quan hệ biến dạng – chuyển vị

$$\overline{u}(r,z) = u(r) + z\psi(r), \ \overline{v}(r,z) = 0, \ \overline{w}(r,z) = w(r) + w^*(r), \qquad (2.5)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{r} \\ \varepsilon_{\theta} \\ \varepsilon_{rz} \end{cases} = \begin{cases} \varepsilon_{r}^{0} + z\chi_{r} \\ \varepsilon_{\theta}^{0} + z\chi_{\theta} \\ \psi + w_{,r} \end{cases}, \qquad (2.6)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{r}^{0} \\ \varepsilon_{r}^{0} \\ \varepsilon_{\theta}^{0} \\ \chi_{r} \\ \chi_{\theta} \end{cases} = \begin{cases} u_{,r} + \frac{1}{2}w_{,r}^{2} + w_{,r}w_{,r}^{*} - \frac{w}{R} \\ \frac{u}{r} - \frac{w}{R} \\ \frac{\psi}{r} \\ \frac{\psi}{r} \end{cases} \end{cases}. \qquad (2.7)$$

- Phương trình quan hệ ứng suất – biến dạng

$$\begin{cases} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{cases} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{12} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{cases} - \begin{cases} \alpha(z)\Delta T \\ \alpha(z)\Delta T \end{cases} \}, \quad \sigma_{rz} = Q_{44}\varepsilon_{rz.}$$
(2.8)

- Phương trình lực giãn, mô men và lực cắt

$$(N_{r}, M_{r}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z) \sigma_{r} dz,$$

$$(N_{\theta}, M_{\theta}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z,) \sigma_{\theta} dz, \quad Q_{r} = K_{s} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{rz} dz.$$

$$(2.10)$$

Thể phương trình (2.6) vào phương trình (2.8), sau đó thể các phương trình kết quả vào phương trình (2.10) thu được:

$$\begin{cases} N_{r} \\ N_{\theta} \\ M_{r} \\ M_{\theta} \\ Q_{r} \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & B_{12} & B_{22} & 0 \\ B_{11} & B_{12} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{s}H_{44} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_{\theta}^{0} \\ \chi_{r} \\ \chi_{\theta} \\ \psi + w_{,r} \end{cases} = \begin{bmatrix} \Phi_{1} \\ \Phi_{1} \\ \Phi_{2} \\ \Phi_{2} \\ \Phi_{2} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T \quad (2.11)$$
- Các phương trình cân bằng của kết cấu:
$$(rN_{r})_{,r} - N_{\theta} = 0, \qquad (rM_{r})_{,r} - M_{\theta} - Q_{r}r = 0,$$

$$(rQ_{r})_{,r} + \left[N_{r} \left(w_{,r} + w_{,r}^{*} \right) r \right]_{,r} + \left(N_{\theta} + N_{r} \right) \frac{r}{R} \qquad (2.14)$$

$$+ \left[q - K_1 w + K_2 \left(w_{,rr} + \frac{1}{r} w_{,r} \right) - K_3 w^3 \right] r = 0,$$

Các phương trình cân bằng (2.14) được viết lại thông qua ba ẩn số hàm số u, ψ, w bằng cách kết hợp với các phương trình (2.7) và (2.11).

2.2. Dạng nghiệm lượng giác và phương pháp Galerkin

Điều kiện biên ngàm cố định xung quanh chu tuyến và điều kiện biến dạng đối xứng trục áp dụng tại đỉnh là:

$$\begin{array}{l} r = 0: \quad \psi = 0, \ u = 0, \\ r = a: \quad w = 0, \ \psi = 0, \ u = 0. \end{array}$$
 (2.18)

Dạng nghiệm lượng giác thỏa mãn các điều kiện biên (2.18):

$$u = U \sin\left(\frac{m\pi r}{a}\right), \quad \psi = \Psi \sin\left(\frac{m\pi r}{a}\right),$$

$$w = W \left[\cos\left(\frac{m\pi r}{2a}\right)\right]^{2}, \quad w^{*} = W^{*} \left[\cos\left(\frac{m\pi r}{2a}\right)\right]^{2}.$$
(2.19)

trong đó m là số lẻ biểu thị mode mất ổn định của kết cấu cấu theo phương kinh tuyến.

Thế dạng nghiệm (2.19) vào các phương trình cân bằng rồi áp dụng phương pháp Galerkin như sau:

$$\int_{0}^{a} \int_{0}^{2\pi} L_1 \sin\left(\frac{m\pi r}{a}\right) d\theta dr = 0, \qquad (2.20)$$

$$\int_{0}^{a} \int_{0}^{2\pi} L_2 \sin\left(\frac{m\pi r}{a}\right) d\theta dr = 0,$$
(2.21)

$$\int_{0}^{a} \int_{0}^{2\pi} L_3 \left[\cos\left(\frac{m\pi r}{2a}\right) \right]^2 d\theta dr = 0.$$
(2.22)

Tích phân (2.20), (2.21) và (2.22) thu được hệ ba phương trình đại số theo ba thành phần biên độ U,W,Ψ . Giải hệ hai phương trình (2.23) và (2.24) thu được các biểu thức của U và Ψ là:

$$U = -\frac{1}{X_{14}X_{25} - X_{15}X_{24}} \Big[(X_{11}X_{25} - X_{15}X_{21})W^{2} \\ + (X_{13}X_{25} - X_{15}X_{23})W^{*}W + (X_{12}X_{25} - X_{15}X_{22})W \Big],$$
(2.26)
$$\Psi = \frac{1}{X_{14}X_{25} - X_{15}X_{24}} \Big[(X_{11}X_{24} - X_{14}X_{21})W^{2} \\ + (X_{13}X_{24} - X_{14}X_{23})W^{*}W + (X_{12}X_{24} - X_{14}X_{22})W \Big].$$

Tiếp theo, thể biểu thức U và Ψ trong (2.26) vào phương trình (2.25) nhận được phương trình kết quả như sau:

$$Y_{1}W^{3} + Y_{2}W^{2} + Y_{3}W^{2}W^{*} + Y_{4}W + Y_{5}W(W^{*})^{2} + Y_{6}WW^{*}$$

$$+Y_{7}W\Phi_{1}\Delta T + Y_{8}\Phi_{1}\Delta TW^{*} + Y_{9}\Phi_{1}\Delta T + Y_{10}q = 0,$$
Biểu thức của tải áp lực ngoài q và tải nhiệt ΔT thu được:
(2.27)

$$q = -\frac{1}{Y_{10}} \left[Y_1 W^3 + Y_2 W^2 + Y_3 W^2 W^* + Y_4 W + Y_5 W (W^*)^2 + Y_6 W W^* + Y_7 W \Phi_1 \Delta T + Y_8 \Phi_1 \Delta T W^* + Y_9 \Phi_1 \Delta T \right]$$

$$\Delta T = -\frac{1}{\Phi_1 (W Y_7 + W^* Y_8 + Y_9)} \left[Y_1 W^3 + Y_2 W^2 + Y_3 W^2 W^* + Y_4 W + Y_5 W (W^*)^2 + Y_6 W W^* + Y_{10} q \right]$$
(2.28)
$$+ Y_3 W^2 W^* + Y_4 W + Y_5 W (W^*)^2 + Y_6 W W^* + Y_{10} q \right]$$

Biểu thức quan hệ (2.28) và (2.29) được sử dụng để nghiên cứu ứng xử ổn định tĩnh của các kết cấu chỏm thoải. Các phương trình quan hệ tương ứng cho kết cấu tấm tròn thu được bằng cách cho $R \to \infty$. Theo dạng mất ổn định phân nhánh, tải nhiệt tới hạn $\Delta T_{cr}(K)$ của kết cấu tấm tròn hoàn hảo $(W^* = 0)$ thu được từ biểu thức (2.29) khi $W \to 0$ là:

$$\Delta T_{cr} = \frac{-Y_4}{Y_7 \Phi_1}.$$
(2.30)

Mất ổn định phân nhánh không xảy ra đối với các kết cấu chỏm thoải.

2.4. Khảo sát số phân tích ổn định phi tuyến kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn bằng FG-GPLRC rỗng và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng

2.4.1. Kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn FG-GPLRC rỗng



Hình 2.4. Khảo sát các mode *m* mất ổn định cơ và nhiệt của tấm tròn GF3D-X



Hình 2.9. Ảnh hưởng của độ rỗng đến ứng xử cơ của chỏm parabol và nhiệt của chỏm sin GF3D-O sau mất ổn định

2.4.2. Kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn sandwich FG-GPLRC lõi rỗng



Hình 2.16. So sánh ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của chỏm cầu, chỏm parabol, chỏm sin và chỏm elip sandwich FG-GPLRC lõi rỗng



Hình 2.17. So sánh năm loại cấu trúc sandwich FG-GPLRC lõi rỗng về ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn

2.5. Kết luận chương 2

- Thiết lập hệ phương trình chủ đạo cho bài toán ổn định tĩnh phi tuyến của kết cấu vỏ chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn chịu tải áp lực ngoài phân bố đều và tải nhiệt tăng đều theo chiều dày dựa trên FSDT, có xét đến tính phi tuyến hình học theo nghĩa von Kármán.

- Theo tiếp cận chuyển vị các biểu thức dạng hiển thể hiện mối quan hệ phi tuyến giữa tải áp lực ngoài và tải nhiệt với độ võng sau mất ổn định của các kết cấu tấm tròn và vỏ chỏm cầu, chỏm parabol, chỏm sin và chỏm elip thu được bằng phương pháp Galerkin với dạng nghiệm lượng giác.

- Những kết quả khảo sát số làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về ứng xử sau mất ổn định của kết cấu chỏm thoải bằng vật liệu FG-GPLRC rỗng và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng.

Chương 3. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA KẾT CẦU CHỎM CẦU THOẢI VÀ TẦM TRÒN BẰNG FGM RÕNG, SANDWICH FGM LÕI RÕNG, FG-GPLRC VÀ SANDWICH FG-GPLRC LÕI RÕNG THEO R3SDT VÀ PHƯƠNG PHÁP RITZ – TIẾP CẬN THEO CHUYỂN VỊ

3.1. Các phương trình chủ đạo theo R3SDT và phương trình năng lượng của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn 3.1.1. Mô hình kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn



Hình 3.1. Mô hình kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn theo R3SDT *3.1.2. Thiết lập các phương trình chủ đạo theo R3SDT*

- Phương trình quan hệ biến dạng – chuyển vị

$$\overline{u}(r,z) = u(r) + z\psi(r) - \frac{4z^{3}}{3h^{2}} \left[\psi(r) + w(r)_{,r} \right], \qquad (3.1)$$

$$\overline{v}(r,z) = 0, \qquad (3.1)$$

$$\overline{w}(r,z) = w(r) + w^{*}(r), \qquad (3.1)$$

$$\begin{cases}
\varepsilon_{r} \\
\varepsilon_{\theta} \\
\varepsilon_{rz}
\end{cases} = \begin{cases}
\varepsilon_{r}^{0} + z\psi_{,r} - \frac{4}{3h^{2}}z^{3}(\psi_{,r} + w_{,rr}) \\
\varepsilon_{\theta}^{0} + z\frac{\psi}{r} - \frac{4}{3h^{2}}z^{3}(\frac{\psi}{r} + \frac{w_{,r}}{r}) \\
\varepsilon_{rz}^{0} - \frac{4}{h^{2}}z^{2}(\psi + w_{,r})
\end{cases}, \qquad (3.2)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{r}^{0} \\ \varepsilon_{\theta}^{0} \\ \varepsilon_{rz}^{0} \end{cases} = \begin{cases} u_{,r} - \frac{w}{R} + \frac{1}{2}w_{,r}^{2} + w_{,r}w_{,r}^{*} \\ \frac{u}{R} - \frac{w}{R} \\ \frac{w}{r} - \frac{w}{R} \\ \psi + w_{,r} \end{cases}$$
(3.3)

- Phương trình lực giãn, mô men và lực cắt

$$(N_{r}, M_{r}, P_{r}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^{3}) \sigma_{r} dz,$$

$$(N_{\theta}, M_{\theta}, P_{\theta}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^{3}) \sigma_{\theta} dz, (Q_{r}, R_{r}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z^{2}) \sigma_{rz} dz.$$

$$(3.4)$$

3.1.3. Thiết lập các phương trình năng lượng

Thế năng biến dạng nhiệt đàn hồi của kết cấu chỏm cầu thoải:

$$U_{\text{int}} = \pi \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{0}^{a} \left[\sigma_r \left(\varepsilon_r - \alpha \Delta T \right) + \sigma_{\theta} \left(\varepsilon_{\theta} - \alpha \Delta T \right) + \sigma_{rz} \varepsilon_{rz} \right] r dr dz, \qquad (3.9)$$

Công do ngoại lực thực hiện:

h

$$U_{ext} = 2\pi \int_{0}^{a} qwr dr$$

$$-\pi \int_{0}^{a} \left\{ \left[K_{1}w - K_{2} \left(w_{,rr} + \frac{1}{r} w_{,r} \right) + \frac{1}{2} K_{3} w^{3} \right] w \right\} r dr,$$
(3.11)
Năng lượng toàn phần là:

Nang lượng toan phan la:

$$U_{Total} = U_{int} - U_{ext} \tag{3.12}$$

3.2. Điều kiện biên, dạng nghiệm và phương pháp năng lượng Ritz

Kết cấu chỏm cầu thoải biến dạng đối xứng trục có điều kiện biên ngàm cố định xung quanh chu tuyến được thể hiện như sau:

$$r = 0: \quad u = 0, \quad \psi = 0, \quad w_{,r} = 0,$$

$$r = a: \quad w = 0, \quad w_{,r} = 0, \quad \psi = 0, \quad u = 0,$$
(3.13)

Nghiệm gần đúng cho các thành phần chuyển vị và thành phần góc quay được lựa chọn dựa vào điều kiện biên (3.13) là:

$$u = U \frac{r(a-r)}{a^2}, \quad \psi = \Psi \frac{r(a^2 - r^2)}{a^3}, \quad w = W \frac{(a^2 - r^2)^2}{a^4}, \quad (3.14)$$

Hàm độ võng không hoàn hảo:

$$w^* = \xi h \frac{\left(a^2 - r^2\right)^2}{a^4},\tag{3.15}$$

Áp dụng phương pháp năng lượng Ritz như sau:

$$\frac{\partial U_{Total}}{\partial U} = \frac{\partial U_{Total}}{\partial \Psi} = \frac{\partial U_{Total}}{\partial W} = 0, \qquad (3.16)$$

Giải các quan hệ trong phương trình (3.16) thu được hệ ba phương trình đại số theo ba ẩn U, Ψ và W. Giải hệ hai phương trình (3.17) và (3.18) thu được các biểu thức của U và Ψ . Thế các biểu thức của U và Ψ vào phương trình (3.19) thu được:

$$(c_{1} + K_{3}c_{2})W^{3} + c_{3}W^{2} + (c_{4} + K_{1}c_{5} + K_{2}c_{6} + c_{7}\xi h + c_{8}\xi h^{2} + c_{9}\xi^{2}h^{2} + c_{10}\Delta T)W + (c_{11}\xi h + c_{12})\Delta T - \frac{qa^{2}}{3} = 0,$$
(3.22)

Biểu thức của tải áp lực ngoài q và tải nhiệt ΔT thu được:

$$q = (c_{1} + K_{3}c_{2})W^{3} + c_{3}W^{2} + c_{8}\xi hW^{2} + (c_{4} + K_{1}c_{5} + K_{2}c_{6})W$$

+ $c_{7}\xi hW + c_{9}\xi^{2}h^{2}W + c_{10}\Delta TW + c_{11}\xi h\Delta T + c_{12}\Delta T,$ (3.23)

$$\Delta T = -\frac{1}{\left(c_{10}W + c_{11}\xi h + c_{12}\right)} \left[\left(c_{1} + K_{3}c_{2}\right)W^{3} + c_{3}W^{2} + c_{8}\xi hW^{2} + \left(c_{4} + K_{1}c_{5} + K_{2}c_{6}\right)W + c_{7}\xi hW + c_{9}\xi^{2}h^{2}W - q \right].$$
(3.24)

Đối với kết cấu tấm tròn hoàn hảo $(\xi = 0, R \rightarrow \infty)$, giá trị tải nhiệt tới hạn theo tiêu chuẩn mất ổn định phân nhánh được xác định khi cho $W \rightarrow 0$ ở phương trình (3.24), thu được là:

$$\Delta T_{cr} = -\frac{K_1 c_5 + K_2 c_6 + c_4}{c_{10}}.$$
(3.25)

3.4. Khảo sát số phân tích ổn định phi tuyến kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn bằng FGM rỗng, sandwich FGM lõi rỗng, FG-GPLRC và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng

3.4.1. Kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FGM rỗng



Hình 3.7. Ảnh hưởng của độ rỗng đến ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của chỏm cầu thoải FG-O

3.4.2. Kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn sandwich FGM lõi rỗng



Hình 3.16. Ảnh hưởng của tỷ số h_{fs}/h đến ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của tấm tròn và chỏm cầu thoải sandwich FGM lõi rỗng



3.4.3. Kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC

Hình 3.19. Ảnh hưởng của quy luật phân bố GPL đến ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC
3.4.4. Kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn sandwich FG-GPLRC lõi rỗng



Hình 3.27. Ảnh hưởng của độ rỗng lõi đến ứng xử cơ của kết chỏm cầu thoải A-PC-V và nhiệt của tấm tròn A-PC-V sau mất ổn định

3.5. Kết luận chương 3

- Hệ phương trình chủ đạo cho bài toán ổn định tĩnh phi tuyến của kết cấu vỏ chỏm cầu thoải và tấm tròn đã được thiết lập dựa trên R3SDT, kết hợp với tính phi tuyến hình học theo nghĩa von Kármán.

- Bằng cách áp dụng phương pháp Ritz, các biểu thức dạng hiển của tải nhiệt tới hạn gây mất ổn định cho kết cấu tấm tròn, cũng như mối quan hệ tải - độ võng trong giai đoạn sau mất ổn định phi tuyến của kết cấu vỏ chỏm cầu thoải và tấm tròn, đã được xác định.

- Kết quả khảo sát số cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa kết cấu chỏm cầu thoải và bốn loại vật liệu trong điều kiện làm việc thực tế.

Chương 4. ÔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA KẾT CẦU CHỎM CẦU THOẢI VÀ TẤM TRÒN FG-GPLRC RÕNG THEO FSDT VÀ PHƯƠNG PHÁP RITZ – TIẾP CẬN HÀM ỨNG SUẤT

4.1. Mô hình và các phương trình chủ đạo theo FSDT của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC rỗng



Hình 4.1. Mô hình kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC rỗng

Phương trình quan hệ biến dạng – chuyển vị: được thiết lập giống như các phương trình (2.5), (2.6), (2.7) trong mục 2.1.2 thuộc Chương 2 của luận án.

- Phương trình quan hệ ứng suất – biên dạng:

$$\begin{cases}
\sigma_{r} \\
\sigma_{\theta}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
Q_{11} & Q_{12} \\
Q_{21} & Q_{22}
\end{bmatrix}
\begin{cases}
\varepsilon_{r} \\
\varepsilon_{\theta}
\end{cases} - \begin{cases}
\alpha(z)\Delta T \\
\alpha(z)\Delta T
\end{cases}, \sigma_{rz} = Q_{44}\varepsilon_{rz.}$$
(4.1)

- Phương trình lực giãn, mô men và lực cắt:

$$\begin{cases} N_{r} \\ N_{\theta} \\ N_{\theta} \\ M_{r} \\ M_{\theta} \\ Q_{r} \end{cases} = \begin{cases} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & B_{21} & B_{22} & 0 \\ B_{11} & B_{12} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{s}H_{44} \end{cases} \begin{cases} \varepsilon_{r}^{0} \\ \varepsilon_{\theta}^{0} \\ \chi_{r} \\ \chi_{\theta} \\ \psi + w_{r} \end{cases} = \begin{cases} \Phi_{1r} \\ \Phi_{1\theta} \\ \Phi_{2r} \\ \Phi_{2\theta} \\ 0 \end{cases} \Delta T, \quad (4.3)$$

trong đó hệ số hiệu chỉnh trượt theo FSDT được chọn $K_s = 5/6$,

Từ phương trình (4.3) thực hiện biến đổi để thu được biểu thức của các thành phần biến dạng theo các thành phần lực giãn như sau:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{r}^{0} \\ \varepsilon_{\theta}^{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^{*} N_{r} + B_{11}^{*} \chi_{r} + B_{12}^{*} \chi_{\theta} + A_{12}^{*} N_{\theta} - \Delta T \Phi_{1r}^{*} \\ A_{21}^{*} N_{r} + B_{21}^{*} \chi_{r} + B_{22}^{*} \chi_{\theta} + A_{22}^{*} N_{\theta} - \Delta T \Phi_{1\theta}^{*} \end{bmatrix}$$
(4.6)

Tiếp theo thay biểu thức (4.6) và phương trình (4.3) và thực hiện biến đổi để nhận được biểu thức của mô men theo lực giãn như sau:

$$\begin{bmatrix} M_{r} \\ M_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{*} N_{r} + D_{11}^{*} \chi_{r} + D_{12}^{*} \chi_{\theta} + C_{12}^{*} N_{\theta} - \Delta T \Phi_{2r}^{*} \\ C_{21}^{*} N_{r} + D_{21}^{*} \chi_{r} + D_{22}^{*} \chi_{\theta} + C_{22}^{*} N_{\theta} - \Delta T \Phi_{2\theta}^{*} \end{bmatrix}$$
(4.7)

- Phương trình tương thích biến dạng:

$$\frac{1}{r}\varepsilon_{r,r}^{0} - \frac{2}{r}\varepsilon_{\theta,r}^{0} - \varepsilon_{\theta,rr}^{0} = \frac{w_{,rr}}{R} + \frac{1}{r}\left(\frac{w_{,r}}{R} + w_{,r}w_{,rr} + w_{,r}w_{,rr}^{*} + w_{,rr}w_{,r}^{*}\right)$$
(4.8)

Hàm ứng suất f(r) được xác định thỏa mãn điều kiện sau:

$$N_r = \frac{f_{,r}}{r}, \quad N_\theta = f_{,rr} \tag{4.9}$$

Thay biểu thức (4.9) vào (4.6) sau đó thay kết quả vào phương trình tương thích biến dạng (4.8) trở thành:

$$-A_{22}^{*}f_{,rrrr} + \left(A_{12}^{*} - A_{21}^{*} - 2A_{22}^{*}\right)\frac{f_{,rrr}}{r} + A_{11}^{*}\frac{f_{,rr}}{r^{2}} - A_{11}^{*}\frac{f_{,r}}{r^{3}}$$

$$= \frac{w_{,rr}}{R} + \frac{1}{r}\left(\frac{w_{,r}}{R} + w_{,r}w_{,rr} + w_{,r}w_{,rr}^{*} + w_{,rr}w_{,r}^{*}\right)$$
(4.10)

4.2. Điều kiện biên và xác định hàm ứng suất

Kết cấu chỏm cầu thoải FG-GPLRC rỗng biến dạng đối xứng trục có điều kiện biên ngàm cố định xung quanh chu tuyến được thể hiện bằng phương trình như sau:

$$r = 0: \ \psi = 0, \quad f_{,r} = N_r r = 0,$$
(4.12)

$$r = a: w = 0, \psi = 0, N_r = Q_0,$$

trong đó Q_0 là phản lực nén tại cạnh biên kết cấu do bị ngàm cố định.

Dựa vào điều kiện biên (4.12), dạng nghiệm gần đúng cho độ võng và góc quay được đưa ra là:

$$w = W \frac{(a^2 - r^2)^2}{a^4}, \quad \psi = \Psi \frac{r(a^2 - r^2)}{a^3}$$
 (4.13)

Hàm độ không hoàn hảo:

$$w^* = W^* \frac{\left(a^2 - r^2\right)^2}{a^4},\tag{4.14}$$

Thay thế w và w^* trong phương trình (4.13) và (4.14) vào phương trình tương thích biến dạng (4.10) thu được:

$$-A_{22}^{*}f_{,rrrr} + \left(A_{12}^{*} - A_{21}^{*} - 2A_{22}^{*}\right)\frac{f_{,rrr}}{r} + A_{11}^{*}\frac{f_{,rr}}{r^{2}} - A_{11}^{*}\frac{f_{,r}}{r^{3}} = \frac{\left(48W^{2} + 96WW^{*}\right)}{a^{8}}r^{4} - \left(\frac{64W^{2} + 128WW^{*}}{a^{6}} - \frac{16W}{a^{4}R}\right)r^{2} \qquad (4.15)$$
$$+ \left(\frac{16W^{2} + 32WW^{*}}{a^{4}} - \frac{8W}{a^{2}R}\right)$$

Dựa vào mối tương quan toán học giữa vế trái và vế phải của phương trình (4.15), hàm ứng suất được xác định như sau:

$$f_{,r} = Y_1 r^7 + Y_2 r^5 + Y_3 r^3 + Y_4 r^2 + Y_5 r + C$$
(4.16)

4.3. Phương pháp năng lượng Ritz

Thế năng biến dạng nhiệt đàn hồi của kết cấu chỏm cầu thoải biến dạng đối xứng trục được tính bằng công thức (3.9) trong mục 3.1.3 thuộc Chương 3 của luận án.

Công do ngoại lực thực hiện xét đến sự tương tác với nền đàn hồi phi tuyến ba hệ số được tính bằng công thức (3.11) trong mục 3.1.3 thuộc Chương 3 của luận án.

Năng lượng toàn phần thu được là:

$$U_{Total} = U_{int} - U_{ext} \tag{4.24}$$

Thay các phương trình (4.6), (4.7), (4.9), (4.13), (4.16) và (4.22) vào phương trình (4.24) rồi áp dụng phương pháp Ritz:

$$\frac{\partial U_{Total}}{\partial \Psi} = 0, \, \mathrm{v}\dot{\mathrm{a}}$$
(4.25)

$$\frac{\partial U_{Total}}{\partial W} = 0 \tag{4.26}$$

Giải phương trình (4.25) thu được biểu thức của Ψ :

$$\Psi = -M_1 W^2 + M_2 W W^* + M_3 W + M_4 \Delta T$$
(4.27)

Thay phương trình (4.27) vào (4.26) thu được:

$$(C_{1} - N_{1}K_{3})W^{3} + (C_{2}W^{*} + C_{3})W^{2} + [C_{4}(W^{*})^{2} + C_{5}W^{*} + C_{6}\Delta T + C_{7} - N_{2}K_{1} - N_{3}K_{2}]W$$

$$+ C_{8}\Delta TW^{*} + C_{9}\Delta T - N_{4}q = 0.$$
(4.28)

Phương trình (4.28) được sử dụng để phân tích ứng xử ổn định cơ nhiệt phi tuyến của kết cấu chỏm cầu thoải và kết cấu tấm tròn (khi $R \rightarrow \infty$) FG-GPLRC rỗng. Từ phương trình này các biểu thức quan hệ sau mất ổn định của tải cơ và tải nhiệt với biên độ độ võng của kết cấu thu được là:

$$q = \frac{1}{N_4} \Big[(C_1 - K_3 N_1) W^3 + (C_2 W^* + C_3) W^2 + (C_4 (W^*)^2 + (C_5 W^* + C_6 \Delta T + C_7 - K_1 N_2 - K_2 N_3) W + C_8 \Delta T W^* + C_9 \Delta T \Big],$$
(4.29)

$$\Delta T = -\frac{1}{C_6 W + C_8 W^* + C_9} \Big[(C_1 - K_3 N_1) W^3 + (C_2 W^* + C_3) W^2 \\ + \Big(C_4 (W^*)^2 + C_5 W^* + C_7 - K_1 N_2 - K_2 N_3 W - N_4 q \Big].$$
(4.30)

Đối với tấm tròn hoàn hảo $(W^* = 0, R \rightarrow \infty)$, tải nhiệt tới hạn theo tiêu chuẩn mất ổn định phân nhánh được xác định khi cho $W \rightarrow 0$ ở phương trình (4.30) thu được:

$$\Delta T_{cr} = -\frac{C_7 - K_1 N_2 - K_2 N_3}{C_6}.$$
(4.31)

4.4. Ứng dụng kết quả tính toán lý thuyết phân tích ổn định phi tuyến kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC rỗng

4.4.2. Phân tích tải nhiệt tới hạn của tấm tròn FG-GPLRC rỗng

Bảng 4.2. Ảnh hưởng của độ rỗng, loại phân bố rỗng, tỷ phần khối lượng GPL đến tải nhiệt tới hạn $\Delta T_{cr}(K)$ của tấm tròn hoàn hảo FG-GPLRC rỗng (h = 0.015m, a = 35h, q = 0MPa, $R = \infty$, $W^* = 0$, $K_1 = 0MN / m^3$, $K_2 = 0MN / m$, $K_3 = 0MN / m^5$)

e _o	$W^*_{GPL}(\%)$	GF3D-U	GF3D-X	GF3D-O
0.1	2	25.43818927	24.14717231	26.18305686
	4	28.09727090	26.67116372	28.92014047
	6	30.61747114	29.06350250	31.51399238
0.3	2	25.43820709	21.10673482	28.02415919
	4	28.09733677	23.31263916	30.95361612
	6	30.61754302	25.40359851	33.73020175
0.5	2	25.43807384	17.40913970	30.55177877
	4	28.09729979	19.22865662	33.74587558
	6	30.61741646	20.95280862	36.77294942

Bảng 4.2 trình bày sự thay đổi của tải nhiệt tới hạn đối với các tấm tròn GF3D-O, GF3D-X và GF3D-U khi độ rỗng và tỷ phần khối lượng của GPL tăng lên. Kết quả cho thấy tải nhiệt tới hạn tấm tròn GF3D-O tăng đáng kể khi độ rỗng tăng, tải nhiệt tới hạn tấm tròn GF3D-X giảm đáng kể khi độ rỗng tăng, tải nhiệt tới hạn tấm tròn GF3D-U không thay đổi theo độ rỗng. Khi độ rỗng không đổi, tải nhiệt tới hạn của cả ba loại tấm tròn đều tăng rõ rệt theo tỷ phần khối lượng GPL. Ngoài ra, với cùng độ rỗng và tỷ phần khối lượng GPL, tấm tròn GF3D-O có tải nhiệt tới hạn cao nhất, trong khi tấm tròn GF3D-X có giá trị thấp nhất.

4.4.3. Ứng sử sau mất ổn định của chỏm cầu thoải FG-GPLRC rỗng



Hình 4.2. Ảnh hưởng của loại phân bố thể tích rỗng đến ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của chỏm cầu thoải FG-GPLRC rỗng



Hình 4.8. Ảnh hưởng của hệ số nền K_3 đến ứng xử cơ và nhiệt sau mất ổn định của chỏm cầu thoải GF3D-O

4.5. Kết luận chương 4

- Các biểu thức tải nhiệt tới hạn của tấm tròn và biểu thức quan hệ giữa tải - độ võng trong giai đoạn sau mất ổn định phi tuyến của chỏm cầu thoải và tấm tròn được xác định dưới dạng hiển thông qua việc áp dụng phương pháp Ritz với cách tiếp cận theo hàm ứng suất.

- Kết quả khảo sát số cung cấp cái nhìn sâu sắc về ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến ổn định và ứng xử sau mất ổn định của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn FG-GPLRC rỗng.

KÊT LUÂN

1. Theo tiếp cận theo chuyển vị, dựa trên FSDT và tính phi tuyến hình học của von Kármán, các phương trình chủ đạo của bài toán ổn định phi tuyến của kết cấu vỏ chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn đã được thiết lập. Trong đó, mô hình nền đàn hồi phi tuyến ba hệ số được được áp dụng để mô tả tương tác giữa nền và kết cấu, đồng thời xét đến tác động của tải áp lực ngoài và tải nhiệt tăng đều. Dạng nghiệm lượng giác được lựa chọn để xem xét được đồng thời nhiều mode mất ổn định khác nhau. Sử dụng phương pháp Galerkin để nhận được các biểu thức tải tới hạn và liên hệ tải - độ võng sau mất ổn định cho bài toán ổn định của kết cấu vỏ chỏm thoải có độ cong phức tạp và tấm tròn làm từ vật liệu FG-GPLRC rỗng và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng.

2. Theo tiếp cận theo chuyển vị, dựa trên R3SDT, tính phi tuyến hình học của von Kármán, luận án đã thiết lập các phương trình chủ đạo của bài toán ổn định phi tuyến của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn trên nền đàn hồi phi tuyến, chịu tải áp lực ngoài và tải nhiệt tăng đều. Lựa chọn dạng nghiệm đa thức và áp dụng phương pháp Ritz để nhận được các biểu thức tải tới hạn và liên hệ tải - độ võng sau mất ổn định cho bài toán chỏm cầu thoải và tấm tròn làm từ vật liệu FGM rỗng, sandwich FGM lõi rỗng, FG-GPLRC và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng.

3. Theo tiếp cận hàm ứng suất, dựa trên FSDT, tính phi tuyến hình học của von Kármán, luận án đã thiết lập các phương trình chủ đạo của bài toán ổn định phi tuyến của kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn làm từ vật liệu FG-GPLRC rỗng. Kết cấu được xem xét trong tương tác với nền thông qua mô hình nền đàn hồi phi tuyến ba hệ số, đồng thời chịu tác động

của tải áp lực ngoài và tải nhiệt tăng đều. Lựa chọn dạng nghiệm đa thức và áp dụng phương pháp Ritz để nhận được các biểu thức tải tới hạn và liên hệ tải - độ võng sau mất ổn định cho bài toán chỏm cầu thoải và tấm tròn làm từ vật liệu FG-GPLRC rỗng.

4. Dựa trên các kết quả lý thuyết, nghiên cứu đã tiến hành phân tích chi tiết ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau đến ứng xử ổn định và sau mất ổn định của kết cấu. Về mặt kết cấu, đã xem xét tác động của kích thước hình học kết cấu, nền đàn hồi tuyến tính và phi tuyến, cũng như sự không hoàn hảo về hình dạng ban đầu. Về mặt vật liệu, nghiên cứu đã phân tích chi tiết ảnh hưởng của các thông số đặc trưng của từng loại vật liệu, bao gồm:

- FG-GPLRC rỗng và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng với các kết cấu: chỏm cầu, chỏm parabol, chỏm sin, chỏm elip và tấm tròn theo FSDT.

- FGM rỗng, sandwich FGM lõi rỗng, FG-GPLRC và sandwich FG-GPLRC lõi rỗng với kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn theo R3SDT.

- FG-GPLRC rỗng với kết cấu chỏm cầu thoải và tấm tròn theo FSDT.

Từ các kết quả thu được, những thảo luận và nhận xét quan trọng đã được đưa ra, có tiềm năng ứng dụng trong thực tế thiết kế kỹ thuật công trình. Đồng thời, nghiên cứu cũng đặt nền móng cho việc xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu dạng tấm tròn và chỏm thoải sử dụng vật liệu FGM và FG-GPLRC trong tương lai.

KIẾN NGHỊ VỀ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Nghiên cứu phi tuyến ổn định tĩnh và động cho các kết cấu chỏm thoải có độ cong phức tạp khác sử dụng đa dạng các thiết kế vật liệu FGM và FG-GPLRC khác chịu các tải cơ, nhiệt và cơ - nhiệt kết hợp.

2. Nghiên cứu phi tuyến ổn định và động lực các loại vỏ chỏm thoải có độ cong phức tạp với điều kiện biên khác.

3. Nghiên cứu phi tuyến ổn định và động lực của các kết cấu chỏm thoải và tấm tròn có độ cong phức tạp làm bằng các thiết kế vật liệu FGM và FG-GPLRC có thêm các biện pháp tăng cứng.

4. Nghiên cứu xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu dạng tấm tròn và vỏ chỏm thoải có độ cong phức tạp FGM và FG-GPLRC loại đặc, rỗng và sandwich lõi rỗng.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **B.T. Tu**, N.T. Phuong, L.N. Ly, V.T. Hung, V.H. Nam, (2024). A New Analytical Approach to the Nonlinear Thermo-Mechanical Buckling Behavior of Three-Dimensional Graphene Foams-Reinforced Complexly Curved Caps and Circular Plates. Int. J. Struct. Stab. Dyn. 2550169.

2. V.H. Nam, **B.T. Tu,** V.T. Hung, C.V. Doan, N.T. Phuong, (2024). Nonlinear thermomechanical buckling and postbuckling analysis of sandwich FG-GPLRC complexly curved caps and circular plates with porous core. Acta Mech. 236, 421–438.

3. **B.T. Tu**, L.N. Ly, N.T. Phuong, (2022). A New Analytical Approach of Nonlinear Thermal Buckling of FG-GPLRC Circular Plates and Shallow Spherical Caps Using the FSDT and Galerkin Method. Vietnam J. Mech. 44(4), 418–30.

4. **B.T. Tu**, D.T. Dong, V.M. Duc, V.H. Nam, (2024). Nonlinear Buckling and Postbuckling Response of Porous FGM Shallow Spherical Caps and Circular Plates with Nonlinear Elastic Foundation Effects Using the Ritz Energy Method. Mech. Compos. Mater. 60(3), 417–432.

5. L.N. Ly, D.T.N. Thu, D.T. Dong, V.M. Duc, **B.T. Tu**, N.T. Phuong, V.H. Nam, (2023). A Novel Analytical Approach for Nonlinear Thermo-Mechanical Buckling of Higher-Order Shear Deformable Porous Circular Plates and Spherical Caps with FGM Face Sheets. Int. J. Appl. Mech. 15(05), 2350035.

6. N.T. Phuong, D.T. Dong, **B.T. Tu**, V.M. Duc, L-N. Khuong, P.T. Hieu, V.H. Nam, (2024). Nonlinear thermo-mechanical axisymmetric stability of FG-GPLRC spherical shells and circular plates resting on nonlinear elastic medium. Ships Offshore Struct. 19(6), 820–830.

7. L.N. Ly, **B.T. Tu**, D.T.N. Thu, D.T. Dong, V.M. Duc, N.T. Phuong, (2023). Nonlinear thermo-mechanical buckling and postbuckling of sandwich FG-GPLRC spherical caps and circular plates with porous core by using higher-order shear deformation theory. J. Thermoplast. Compos. Mater. 36(10), 4083–4105.

8. N.T. Phuong, V.H. Nam, **B.T. Tu**, (2025). An Analytical Approach for Nonlinear Thermo-Mechanical Buckling Behavior of Porous FG-GPLRC Circular Plates and Spherical Caps. J. Sci. Transp. Technol., 40–60.