

BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

TRẦN VĂN HÙNG

**NGHIÊN CỨU TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT-BIẾN DẠNG CỦA
VỎ TRỤ COMPOSITE CÓ CƠ TÍNH BIẾN THIÊN CHỊU TẢI
TRỌNG CƠ, NHIỆT TRÊN CƠ SỞ LÝ THUYẾT BIẾN DẠNG
TRƯỢT BẬC CAO QUASI-3D**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SỸ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2021

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG**

Người hướng dẫn khoa học:

**TS Trần Ngọc Đoàn
PGS.TS Vũ Quốc Trụ**

Phản biện 1: GS.TS Nguyễn Văn Lê

Phản biện 2: GS.TS Trần Minh Tú

Phản biện 3: GS.TS Nguyễn Thái Chung

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số/....., ngày tháng năm 2021 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại: Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi:giờ..... ngày.....tháng..... năm 2021

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Trần Văn Hùng**, Trần Ngọc Đoàn và Nguyễn Trường Thanh (2018), "Khảo sát trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ composite có cơ tính biến thiên chịu tải trọng tĩnh trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao quasi-3D", *Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học vật rắn lần thứ XIV*, tr 315-322.
2. **Trần Văn Hùng**, Trần Ngọc Đoàn và Nguyễn Trường Thanh (2019), "Phân tích trạng thái ứng suất của vỏ trụ FGM với các điều kiện biên khác nhau trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu quasi-3D", *Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, Kỷ niệm 40 năm thành lập Viện Cơ học*, tr 167-174.
3. Trần Ngọc Đoàn, Vũ Quốc Trụ và **Trần Văn Hùng** (2019), "Khảo sát trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ FGM trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu Quasi-3D", *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật/Học Viện Kỹ thuật Quân sự*, số 201, tr 24-33.
4. **Tran Van Hung**, Tran Ngoc Doan, Nguyen Truong Thanh & Nguyen Ngoc Hoa (2019), "Analytical solutions for bending of FGM cylindrical shells using higher-order shear and normal deformation theory", *The 5th International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA 5)*, pp. 192-198.
5. **Trần Văn Hùng**, Trần Ngọc Đoàn và Vũ Quốc Trụ (2020), "Phân tích tĩnh vỏ trụ FGM chịu tác dụng của tải cơ và nhiệt độ", *Hội nghị Khoa học các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ XV*, tr 191-199.
6. **Tran Van Hung**, Tran Ngoc Doan, Vu Quoc Tru, Nguyen Anh Tuan & Vu Xuan Duc (2020), "Static Analysis of FGM Cylindrical Shells under Local Load using Quasi-3D Higher-Order Shear Deformation Theory ", *Journal of Science and Technology - Military University of Science and Technology*. N.209, pp 96-107.
7. Tran Ngoc Doan, Anh Tuan Nguyen, Van Binh Phung, **Tran Van Hung**, Vu Quoc Tru & Doan Trac Luat (2020), "Static analysis of FGM cylindrical shells and the effect of stress concentration using quasi-3D type higher-order shear deformation theory", *Composite Structures*, pp. 113357. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113357>.
8. Tran Ngoc Doan, **Tran Van Hung** & Duong Van Quang (2020), "Thermal bending analysis of FGM cylindrical shells using a quasi-3D type higher-order shear deformation theory", *Modern Mechanics and Applications. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-16-3239-6_24. (Indexed by SCOPUS).

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài luận án

Vật liệu composite lớp thông thường có nhược điểm chính là sự không tương thích về cơ tính của vật liệu cốt và nền. Do đó, thường xảy ra tập trung ứng suất tại bề mặt liên kết, nhất là khi làm việc ở môi trường có nhiệt độ cao. Điều này có thể dẫn đến phá hủy kết cấu dưới dạng tách lớp, nứt, v.v. Vật liệu có cơ tính biến thiên (FGM) là vật liệu composite tiên tiến, được chế tạo từ hai hay nhiều pha thành phần với sự biến đổi liên tục của cơ tính từ bề mặt này đến bề mặt khác. Vì vậy, trong vật liệu FGM không xảy ra hiện tượng tập trung ứng suất như đối với vật liệu composite lớp thông thường. Do có nhiều ưu điểm nổi trội và được ứng dụng trong nhiều ngành kỹ thuật, nên vật liệu FGM thu hút được sự quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học.

Trong lĩnh vực hàng không vũ trụ hay trong động cơ tên lửa, kết cấu của thiết bị thường phải đảm bảo yêu cầu khắt khe về khối lượng, nhưng phải có độ bền cao do luôn chịu tác dụng của tải cơ-nhiệt phức tạp. Việc đánh giá chính xác trạng thái ứng suất-biến dạng của kết cấu, cho phép đề ra được những biện pháp hiệu quả để tăng cường độ bền, đồng thời giảm khối lượng kết cấu.

Trong tính toán trạng thái ứng suất của vỏ FGM, thường sử dụng lý thuyết vỏ cổ điển hoặc các lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất. Khi sử dụng các lý thuyết này trong tính toán vỏ, thường bỏ qua ảnh hưởng của biến dạng trượt bậc cao, đặc biệt là biến dạng theo phương pháp tuyến, dẫn đến kết quả tính toán tại những vùng nguy hiểm của kết cấu có độ chính xác chưa cao. Vì vậy, để đảm bảo an toàn cho kết cấu tại những vùng nguy hiểm, ta thường phải áp dụng các biện pháp gia cố, như làm dày lớp vật liệu tại vị trí liên kết, gia cố bằng các đai gia cường, v.v. Để khắc phục các hạn chế này, cần sử dụng các lý thuyết khác như lý thuyết biến dạng trượt bậc cao có tính đến ảnh hưởng của biến dạng pháp tuyến (Quasi-3D). Việc nghiên cứu trạng thái ứng suất của vỏ trụ FGM bằng lý thuyết này còn chưa được quan tâm nghiên cứu nhiều, bởi tính phức tạp của mô hình toán và khối lượng tính toán lớn.

Từ những phân tích ở trên, có thể kết luận rằng, đề tài “*Nghiên cứu trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ composite có cơ tính biến thiên chịu tải trọng cơ, nhiệt trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao quasi-3D*” là vấn đề mang tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Mục đích nghiên cứu của luận án

- Xây dựng mô hình toán học trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu Quasi-3D và chương trình tính toán số phức vụ phân tích vỏ trụ FGM chịu tác dụng của tải trọng cơ, nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời.

- Khảo sát ảnh hưởng của một số tham số về kết cấu, vật liệu, tải trọng đến trạng thái ứng suất, biến dạng của vỏ trụ FGM, từ đó, đề xuất các khuyến cáo trong tính toán thiết kế vỏ trụ làm từ vật liệu FGM.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu: Vỏ trụ composite có cơ tính biến thiên, chịu tác dụng của tải trọng cơ, nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời.

Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu trạng thái ứng suất, biến dạng tựa không gian (Quasi-3D) của vỏ trụ FGM chịu tác dụng độc lập tải cơ, nhiệt hoặc chịu tải cơ-nhiệt đồng thời trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao (HOSNT) kiểu quasi-3D.

4. Nội dung và cấu trúc luận án

Luận án gồm có phần mở đầu, 04 chương chính và phần kết luận, danh mục các công trình nghiên cứu của tác giả, các tài liệu tham khảo và phụ lục.

Chương 1. Tổng quan về tính toán vỏ FGM

Chương 2. Xây dựng mô hình tính toán vỏ trụ FGM theo lý thuyết biến dạng trượt bậc cao Quasi-3D

Chương 3. Nghiên cứu trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ FGM bằng phương pháp giải tích

Chương 4 Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu, vật liệu và tải trọng cơ, nhiệt đến trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ FGM

5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng các công cụ giải tích kết hợp với tính toán số. Thực hiện nghiên cứu cơ sở lý thuyết, xây dựng thuật toán và chương trình tính toán số để khảo sát các bài toán. So sánh kết quả nghiên cứu của luận án với các kết quả nghiên cứu bằng các phương pháp khác đã được công bố để khẳng định tính đúng đắn của mô hình toán học và chương trình tính toán. Chương trình tính toán, khảo sát số được lập trình trên nền Maple.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Việc đánh giá chính xác ứng xử cơ học của các kết cấu dạng vỏ có tính dị hướng cao như vỏ composite FGM, composite lớp, v.v. nhất là vỏ dày cần sử dụng các lý thuyết bậc cao. Luận án đã tiếp cận phương pháp giải tích, thực hiện phân tích trường chuyển vị, các thành phần ứng suất, biến dạng theo chuỗi lượng giác đơn và phép biến đổi Laplace để giải bài toán biên đối với vỏ trụ FGM. Do đó, việc sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao Quasi-3D và phương pháp giải tích trong nghiên cứu, tính toán vỏ trụ FGM chịu tác dụng của tải trọng cơ, nhiệt mang ý nghĩa khoa học.

Trong các ngành kỹ thuật, kết cấu vỏ trụ được sử dụng khá rộng rãi như thân vỏ tàu, máy bay, tên lửa, động cơ, v.v. Do vậy, nghiên cứu phân tích ứng xử cơ học của kết cấu vỏ trụ FGM chịu tác dụng của các dạng tải trọng phức tạp cơ, nhiệt có nhiều ý nghĩa thực tiễn. Việc phân tích ảnh hưởng của các tham số kết cấu, hình học, tải trọng, điều kiện liên kết, v.v. đến ứng suất, biến dạng của kết cấu cho phép đưa ra những khuyến cáo quan trọng trong quá trình tính toán, thiết kế cũng như khai thác, sử dụng kết cấu. Mặt khác, việc sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao Quasi-3D cho phép đánh giá chính xác hơn ứng suất, biến dạng của kết cấu tại những vùng nguy hiểm, như tại khu vực có sự tập trung ứng suất, hiệu ứng biên mạnh, v.v. Từ đây cho thấy luận án chứa đựng cả tính khoa học lẫn thực tiễn.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ TÍNH TOÁN VỎ FGM

Chương 1 nêu tổng quan các lý thuyết đã được sử dụng để phân tích vỏ, trên cơ sở đó luận án tập trung phân tích tình hình nghiên cứu về vỏ FGM trong nước và trên thế giới. Từ đó rút ra các vấn đề đã được nghiên cứu về vỏ FGM và đề xuất hướng nghiên cứu trọng tâm của luận án.

1.1. Tổng quan lý thuyết phân tích vỏ

Lý thuyết vỏ là lĩnh vực nghiên cứu hấp dẫn đã được phát triển từ cuối thế kỷ 19. Việc giải bài toán đàn hồi 3D với kết quả chính xác, hoặc có độ chính xác cao là rất phức tạp, do đó ít được quan tâm nghiên cứu, phát triển. Để khắc phục những khó khăn trong tính toán, bài toán nghiên cứu vỏ được đơn giản hóa như bài toán 2D bằng cách xem xét nó như một kết cấu đặc trưng có chiều dày nhỏ so với các kích thước khác.

Lý thuyết vỏ được xây dựng trên cơ sở ứng suất tương đương có thể chia thành ba kiểu lý thuyết dưới đây:

- 1) Lý thuyết vỏ cổ điển (CST) hay lý thuyết vỏ Love.
- 2) Lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất (FSDT).
- 3) Các lý thuyết biến dạng trượt bậc cao (HSDTs), Các lý thuyết biến dạng trượt-pháp bậc cao (HOSNTs).

1.1.1. Lý thuyết vỏ cổ điển

Lý thuyết cổ điển Love áp dụng cho vỏ mỏng được sử dụng phổ biến nhất. Lý thuyết CST sử dụng trường chuyển vị [85] có dạng sau:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}, \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}, \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t). \end{aligned} \quad (1.1)$$

ở đây, z là tọa độ theo pháp tuyến tính từ mặt Oxy , u_0, v_0 và w_0 là chuyển vị của mặt trung hòa theo các phương x, y, z .

1.1.2. Lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất

Lý thuyết FSDT được biết đến và sử dụng rộng rãi là của Mindlin [71]. Lý thuyết FSDT cho phép xem xét vỏ có chiều dày tốt hơn so với CST. Tuy nhiên để đánh giá ứng suất tiếp theo chiều dày cần đưa thêm hệ số hiệu chỉnh cắt vào trong lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất. Trường chuyển vị [85] trong lý thuyết FSDT như sau:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t), \quad \phi_x = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \phi_y = \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.2)$$

ở đây, u_0, v_0 và w_0 là chuyển vị của mặt trung hòa, ϕ_x và ϕ_y là góc xoay của pháp tuyến so với mặt trung hòa lân cận tiếp tuyến của các đường tọa độ x và y tương ứng.

1.1.3. Lý thuyết biến dạng trượt bậc cao

Lý thuyết HSDT đã khắc phục nhược điểm của lý thuyết CST, FSDT và được nhiều nhà nghiên cứu đề xuất nhiều dạng bậc cao khác nhau. Điển hình của các tác giả được liệt kê trong các công trình: [53], [76], [59], [57], [48], [49], [84], [79], [83], [80], [28], [71]. Trường chuyển vị [85] trong lý thuyết HSDT như sau:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) + 2z^2\theta_x(x, y, t) + 6z^3\lambda_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) + 2z^2\theta_y(x, y, t) + 6z^3\lambda_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

ở đây, u_0, v_0, w_0 là chuyển vị của mặt trung hòa, ϕ_x và ϕ_y góc quay của pháp tuyến so với mặt trung hòa lân cận tiếp tuyến của các đường tọa độ x và y tương ứng, $\theta_x, \theta_y, \lambda_x$ và λ_y là thành phần chuyển vị bậc cao.

1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu vỏ FGM

1.2.1. Tổng quan nghiên cứu vỏ FGM trên thế giới

Với mô hình lý vỏ cổ điển được nhiều tác giả quan tâm và nghiên cứu với nhiều dạng bài toán khác nhau khi nghiên cứu vỏ FGM như: bài toán phân tích ứng suất, bài toán phân tích dao động, bài toán phân tích ổn định, v.v. dưới tác dụng của tải cơ, nhiệt trên nền đàn hồi hay không có nền đàn hồi. Điển hình của các tác giả trong các công trình: [120], [32], [69], [18], [82], [75], [10], [35], [36], [45], [110], [97], [99], [105], [121], [55], [112].

Sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất trong đánh giá ứng suất, dao động, nhiệt đàn hồi và ổn định cũng có nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Điển hình như các tác giả trong các công trình: [127], [20], [61], [109], [15], [64], [115], [67], [21], [106], [89], [29], [107].

Lý thuyết biến dạng trượt bậc cao ngày càng được quan tâm nhiều đặc biệt với mô hình lý thuyết bậc ba của Reddy [86]: [96], [77], [66], [98], [104], [18], [98], [96], [99], [97]. Với mô hình lý thuyết bậc cao kiểu Quasi-3D cũng có sự quan tâm dần, tuy nhiên vẫn chỉ tập trung vào dạng bài toán phân tích ứng suất và bài toán phân tích dao động, điển hình như: [30], [70], [83], [80], [11], [79], [46], [28].

Cũng như lý thuyết bậc cao kiểu Quasi-3D, lý thuyết đàn hồi 3D chủ yếu tập trung vào dạng bài toán phân tích ứng suất và bài toán phân tích dao động, điển hình như: [122], [92], [81], [91], [68], [27], [118], [123], [124], [8].

1.2.2. Tổng quan các nghiên cứu vỏ FGM trong nước

Ở trong nước, nghiên cứu về kết cấu FGM đã có nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Nghiên cứu được trình bày ở hội nghị, tạp chí trong và ngoài nước, cũng như trong luận án. Điển hình của các tác giả như của Đào Huy Bích, Nguyễn Đình Đức, Đào Văn Dũng, v.v. Thể hiện ở các nghiên cứu như: [22], [23], [40], [41], [42], [38], [13], [39], [24], [44], [116], [54], [117], [37], [31], [114], [125], [62], [78], [2], [4], [5], [3], [1].

1.3. Kết quả nghiên cứu đạt được từ các công trình đã công bố và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Kết quả đạt được từ các công trình đã công bố:

- Tính toán kết cấu làm từ vật liệu FGM được rất nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, số lượng các công trình nghiên cứu theo hướng này lớn. Trong đó, phần lớn các tác giả sử dụng mô hình CST, FSDT do tính đơn giản của mô hình toán học và kết quả tính toán có độ chính xác đảm bảo đối với kết cấu thành mỏng. Đã nghiên cứu, phân tích nhiều bài toán tĩnh, dao động tự do, dao động cưỡng bức cho các bài toán tuyến tính, phi tuyến, các bài toán ổn định tĩnh và ổn định động khác nhau cho vỏ như: vỏ trụ, vỏ nón, vỏ nón cụt, vỏ cầu, vỏ hyperbol, vỏ có lỗ giảm yếu, vỏ có gân gia cường, v.v. Vỏ chịu tác dụng của các dạng tải trọng khác nhau như tải trọng phân bố đều, tải áp lực, tải trọng tập trung, tải trọng dạng điều hòa, tải trọng xung, tải trọng nhiệt, v.v.

- Việc sử dụng lý thuyết HSDT kiểu Quasi-3D, lý thuyết đàn hồi 3D vẫn còn khiêm tốn và dừng lại ở các bài toán có điều kiện biên tựa đơn. Trong phân tích ứng xử của vỏ FGM áp dụng lý thuyết HSDT kiểu Quasi-3D thường sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp cầu phương sai phân, phương pháp biến phân (Ritz, Galerkin), phương pháp Navier cho biên tựa đơn, v.v. Việc tính toán vỏ theo hướng tiếp cận giải tích đối với các trường hợp điều kiện biên khác còn chưa được tập trung nghiên cứu.

- Số lượng các nghiên cứu về tối ưu hóa kết cấu FGM có tính đến các vấn đề về điều khiển dao động kết cấu, kết cấu thông minh, đáp ứng ổn định, v.v. nghiên cứu kết cấu FGM được gia cường bởi vật liệu nano, đặc biệt là nano cacbon, v.v. vẫn còn khá hạn chế.

- Phần lớn các nghiên cứu được thực hiện dựa trên các phương pháp giải tích, bán giải tích, phương pháp số (phần tử hữu hạn, cầu phương sai phân, v.v.)

hay nghiên cứu thực nghiệm kết cấu FGM hầu như chưa được thực hiện.

Từ các nhận xét nêu trên tác giả đề xuất một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu sau:

- Nghiên cứu trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ FGM chịu tác dụng của tải trọng cơ học, nhiệt độ, v.v. bằng phương pháp giải tích với các điều kiện biên khác nhau trên cơ sở sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao HSDT/HOSNT kiểu Quasi-3D.

- Nghiên cứu ổn định, dao động kết cấu tấm vỏ FGM theo lý thuyết HSDT kiểu Quasi-3D theo lý thuyết tuyến tính và phi tuyến.

- Nghiên cứu về tối ưu hóa kết cấu FGM có tính đến các vấn đề về điều khiển dao động kết cấu, kết cấu thông minh, đáp ứng ổn định, v.v. nghiên cứu kết cấu FGM được gia cường bởi vật liệu nano.

- Nghiên cứu thực nghiệm kết cấu FGM.

Qua quá trình tìm hiểu, nghiên cứu của bản thân, tác giả thấy rằng việc sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao HSDT/HOSNT kiểu Quasi-3D, phương pháp giải tích trong nghiên cứu đánh giá ứng xử vỏ FGM dưới tác dụng tải trọng cơ-nhiệt, với các điều kiện biên khác nhau là vấn đề có tính thời sự và có ý nghĩa khoa học. Mặt khác, các công bố theo hướng này còn khá khiêm tốn.

1.4. Những nội dung nghiên cứu trong luận án

- Xây dựng mô hình toán học và chương trình tính toán số trong nghiên cứu vỏ trụ FGM dưới tác dụng của tải trọng cơ, nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời dựa trên cơ sở lý thuyết HSDT kiểu Quasi-3D.

- Sử dụng phương pháp giải tích giải bài toán biên đối với vỏ trụ FGM với các điều kiện biên khác nhau để nghiên cứu trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ. Ở đây chuỗi lượng giác đơn được sử dụng để chuyển hệ phương trình đạo hàm riêng về các hệ phương trình vi phân thường, còn phép biến đổi Laplace được sử dụng để giải các phương trình vi phân thường với các điều kiện biên khác nhau.

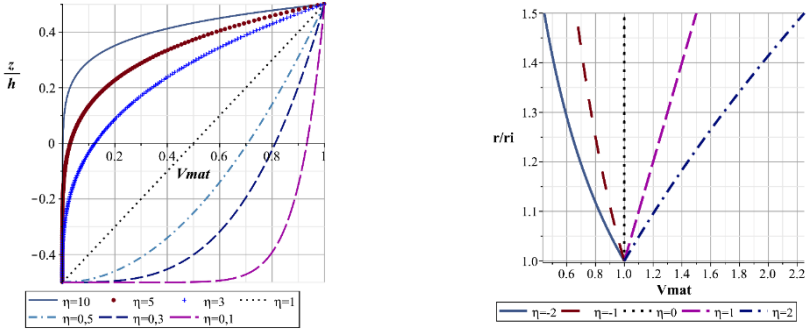
- Thực hiện đánh giá hiện tượng tập trung ứng suất, nghiên cứu ảnh hưởng các điều kiện biên, nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày và chiều dài vỏ, ảnh hưởng của chỉ số tỷ lệ thể tích, ảnh hưởng đặc trưng của các dạng tải trọng, ảnh hưởng của tham số nhiệt độ đến trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ. Từ đó, đề xuất các khuyến cáo trong tính toán thiết kế vỏ trụ làm từ vật liệu FGM.

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN VỎ TRỤ FGM THEO LÝ THUYẾT HSDT QUASI-3D

2.1. Tính chất cơ học của vỏ trụ FGM

2.1.1. Đặc tính vật liệu FGM theo phân bố thể tích

Xét phân bố tỷ lệ thể tích theo chiều dày z , quy luật phân bố theo lũy thừa Voigt.



$$a) V_{mat} = \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^\eta$$

$$b) V_{mat} = \left(\frac{r_z}{r_{in}} \right)^\eta$$

Hình 2.1. Biến thiên tỷ lệ thể tích V_{mat} theo chiều dày vỏ trụ FGM

2.1.2. Đặc tính vật liệu FGM theo nhiệt độ

Trong trường hợp tổng quát, sự biến đổi của tham số P_i [90] theo nhiệt độ $T(K)$ được xác định theo công thức sau:

$$P_i = C_0 \left(C_{-1} T^{-1} + 1 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 \right) \quad (2.8)$$

trong đó, P_i là đặc tính của vật liệu như Module đàn hồi (E), mật độ (ρ), hệ số Poisson (ν), hệ số giãn nở nhiệt (α), hệ số truyền nhiệt (κ), nhiệt dung riêng (C_v) và $T = T_0 + \Delta T$ với $T_0 = 300$ K (nhiệt độ phòng), ΔT là biến thiên nhiệt độ, C_0 , C_{-1} , C_1 , C_2 và C_3 là các hệ số duy nhất đối với mỗi vật liệu cụ thể.

2.1.3. Xác định phân bố nhiệt độ theo chiều dày vỏ trụ FGM

Trong luận án với giả thiết tải nhiệt đối xứng trục phân bố toàn bề mặt và chỉ biến đổi theo hướng chiều dày (hướng kính). Xét quá trình truyền nhiệt trong

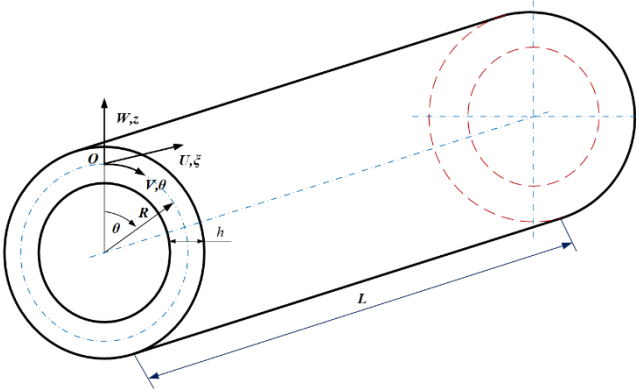
vỏ trụ FGM ở trạng thái ổn định, khi đó khi đó trường nhiệt độ có được khi giải phương trình sau:

$$-\frac{d}{dz} \left[\kappa_{eff} \frac{dT}{dz} \right] = 0 \quad (2.17)$$

ở đây, κ_{eff} là hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng.

2.2. Quan hệ ứng xử cơ học của vỏ trụ FGM

Trong mục này, áp dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu Quasi-3D cho việc thiết lập các quan hệ ứng xử cơ học của vỏ trụ FGM và xây dựng hệ phương trình cân bằng. Chọn hệ trục tọa độ cong $O\xi\theta z$ (Hình 2.2), với gốc tọa độ đặt ở mặt giữa vỏ trụ. Ở đây, ξ là tọa độ theo đường sinh vỏ trụ FGM, θ là tọa độ theo hướng vòng cung và z là tọa độ theo phương pháp tuyến với vỏ trụ, tương ứng với các chuyển vị U , V và W . Vỏ trụ FGM có chiều dày h với các tham số hình học như trên Hình 2.2.



Hình 2.2. Mô hình, tham số hình học, hệ trục tọa độ của vỏ trụ FGM

2.2.1. Trường chuyển vị

Trường chuyển vị [47] của vỏ trụ được phân tích dưới dạng chuỗi theo chiều dày như sau:

$$\begin{aligned} u(\xi, \theta, z) &= \sum_{i=0}^{N_0} u_i(\xi, \theta) \frac{z^i}{i!}, \quad v(\xi, \theta, z) = \sum_{i=0}^{N_0} v_i(\xi, \theta) \frac{z^i}{i!}, \\ w(\xi, \theta, z) &= \sum_{i=0}^{N_0-1} w_i(\xi, \theta) \frac{z^i}{i!}, \quad \xi = \frac{x}{R}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Trong luận án tập trung nghiên cứu mô hình $N_0 = 3$. Ta có, u - chuyển vị theo phương dọc trục ξ ($\xi = x/R$), v - chuyển vị theo phương vòng cung θ , w - chuyển vị theo chiều dày (phương z). Cụ thể, u_0, v_0, w_0 tương ứng là chuyển vị thẳng tại một điểm trong mặt trung hòa; u_1, v_1, w_1 - các thành chuyển vị bậc một; u_2, v_2, w_2 - các thành chuyển vị bậc hai; u_3, v_3 - các thành phần chuyển vị bậc cao.

2.2.2. Quan hệ biến dạng và chuyển vị

Quan hệ biến dạng-chuyển vị [82] tuyến tính trong hệ tọa độ cong trục giao $O\xi\theta z$ được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\xi &= \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \xi}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{R+z} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right), \quad \gamma_{\xi\theta} = \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{1}{R+z} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \\ \gamma_{\theta z} &= \frac{1}{R+z} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{v}{R+z}, \quad \gamma_{\xi z} = \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.2.3. Quan hệ ứng suất và biến dạng

Phương trình định luật Hooke [82] liên hệ giữa biến dạng và ứng suất trong trường hợp vỏ làm từ vật liệu trục hướng khi có tải nhiệt có dạng sau :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\xi \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{\xi\theta} \\ \tau_{\xi z} \\ \tau_{\theta z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_\xi - \alpha_\xi(z) \cdot \Delta T \\ \varepsilon_\theta - \alpha_\theta(z) \cdot \Delta T \\ \varepsilon_z - \alpha_z(z) \cdot \Delta T \\ \gamma_{\xi\theta} \\ \gamma_{\xi z} \\ \gamma_{\theta z} \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

ở đây, $\sigma_\xi, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{\xi\theta}, \tau_{\xi z}, \tau_{\theta z}$ là các thành phần ứng suất pháp và ứng suất tiếp tương ứng, A_{ij} ($i=1,2,3, j=1,2,3$), A_{44}, A_{55}, A_{66} là các hằng số đàn hồi quy đổi [32, 86] của vật liệu làm vỏ, $\alpha_\xi(z)$ và $\alpha_\theta(z)$ là hệ số nở nhiệt trong mặt phẳng theo phương ξ và θ , $\alpha_z(z)$ là hệ số nở nhiệt theo phương z . Tại các điểm có cùng tọa độ z ta có $\alpha_\xi(z) = \alpha_\theta(z) = \alpha_z(z) = \alpha_{FGM}(z)$. $\alpha_{FGM}(z)$ là hệ số nở nhiệt hiệu dụng được xác định theo.

2.3. Xây dựng các phương trình cơ bản tính toán võ trụ FGM

2.3.1. Nguyên lý dịch chuyển khả dĩ

Phương trình cân bằng và các điều kiện biên tương ứng nhận được từ nguyên lý dịch chuyển khả dĩ, theo đó:

$$\delta U - \delta A_s - \delta A_{e1} - \delta A_{e2} = 0 \quad (2.28)$$

trong đó, δU là biến phân thế năng đàn hồi của kết cấu, δA_s - biến phân công của lực mặt, δA_{e1} - biến phân công của ngoại lực trên biên $\xi = const$, δA_{e2} - biến phân công của ngoại lực trên biên $\theta = const$.

2.3.2. Hệ phương trình cân bằng và các điều kiện biên

Từ nguyên lý chuyển dịch khả dĩ ta có hệ pT cân bằng sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial N_{\theta\xi}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial N_{\xi\theta}}{\partial \xi} + Q_\theta = 0, \quad \frac{\partial Q_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} - N_\theta - Rp_0 = 0, \\ \frac{\partial M_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial M_{\theta\xi}}{\partial \theta} - RQ_\xi = 0, \quad \frac{\partial M_{\xi\theta}}{\partial \xi} + \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - RQ_\theta = 0, \\ \frac{\partial S_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial S_\theta}{\partial \theta} - M_\theta - RQ_z - Rp_1 = 0, \quad \frac{\partial N_\xi^*}{\partial \xi} + \frac{\partial N_{\theta\xi}^*}{\partial \theta} - RS_\xi = 0, \\ \frac{\partial N_{\xi\theta}^*}{\partial \xi} + \frac{\partial N_\theta^*}{\partial \theta} - RS_\theta - Q_\theta^* = 0, \quad \frac{\partial Q_\xi^*}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_\theta^*}{\partial \theta} - N_\theta^* - RS_z - Rp_2 = 0, \\ \frac{\partial M_\xi^*}{\partial \xi} + \frac{\partial M_{\theta\xi}^*}{\partial \theta} - RQ_\xi^* = 0, \quad \frac{\partial M_{\xi\theta}^*}{\partial \xi} + \frac{\partial M_\theta^*}{\partial \theta} - RQ_\theta^* - 2S_\theta^* = 0 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Các điều kiện biên tương ứng với hệ phương trình cân bằng (2.41) bao gồm:

- Tại $\xi = \xi_1, \xi_2$:

$$\begin{aligned} N_\xi = \bar{N}_\xi \cup u_0 = \bar{u}_0; \quad N_\xi^* = \bar{N}_\xi^* \cup u_2 = \bar{u}_2; \\ M_\xi = \bar{M}_\xi \cup u_1 = \bar{u}_1; \quad M_\xi^* = \bar{M}_\xi^* \cup u_3 = \bar{u}_3; \\ N_{\xi\theta} = \bar{N}_{\xi\theta} \cup v_0 = \bar{v}_0; \quad N_{\xi\theta}^* = \bar{N}_{\xi\theta}^* \cup v_2 = \bar{v}_2; \\ M_{\xi\theta} = \bar{M}_{\xi\theta} \cup v_1 = \bar{v}_1; \quad M_{\xi\theta}^* = \bar{M}_{\xi\theta}^* \cup v_3 = \bar{v}_3; \\ Q_\xi = \bar{Q}_\xi \cup w_0 = \bar{w}_0; \quad Q_\xi^* = \bar{Q}_\xi^* \cup w_2 = \bar{w}_2; \quad S_\xi = \bar{S}_\xi \cup w_1 = \bar{w}_1. \end{aligned} \quad (2.43)$$

- Tại $\theta = \theta_1, \theta_2$:

$$\begin{aligned}
N_{\theta\xi} &= \bar{N}_{\theta\xi} \cup u_0 = \bar{u}_0; N_{\theta\xi}^* = \bar{N}_{\theta\xi}^* \cup u_2 = \bar{u}_2; \\
M_{\theta\xi} &= \bar{M}_{\theta\xi} \cup u_1 = \bar{u}_1; M_{\theta\xi}^* = \bar{M}_{\theta\xi}^* \cup u_3 = \bar{u}_3; \\
N_\theta &= \bar{N}_\theta \cup v_0 = \bar{v}_0; N_\theta^* = \bar{N}_\theta^* \cup v_2 = \bar{v}_2; \\
M_\theta &= \bar{M}_\theta \cup v_1 = \bar{v}_1; M_\theta^* = \bar{M}_\theta^* \cup v_3 = \bar{v}_3; \\
Q_\theta &= \bar{Q}_\theta \cup w_0 = \bar{w}_0; Q_\theta^* = \bar{Q}_\theta^* \cup w_2 = \bar{w}_2; S_\theta = \bar{S}_\theta \cup w_1 = \bar{w}_1.
\end{aligned} \tag{2.44}$$

2.3.3. Hệ phương trình cân bằng theo chuyển vị

Chuyển hệ phương trình (2.44) theo chuyển vị ta có:

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=0}^{N_0} \left(H_{1n}^l u_n + H_{1n,11}^l \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} u_n + H_{1n,22}^l \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} u_n \right) + \\
& + \sum_{n=0}^{N_0} H_{2n,12}^l \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} v_n + \sum_{n=0}^{N_0-1} H_{3n,1}^l \frac{\partial}{\partial \xi} w_n = 0, \\
& \sum_{n=0}^{N_0} \left(H_{2n}^i v_n + H_{2n,11}^i \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} v_n + H_{2n,22}^i \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} v_n \right) + \\
& + \sum_{n=0}^{N_0} H_{1n,12}^i \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} u_n + \sum_{n=0}^{N_0-1} H_{3n,2}^i \frac{\partial}{\partial \theta} w_n = 0, \\
& \sum_{n=0}^{N_0-1} \left(H_{3n}^j w_n + H_{3n,11}^j \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} w_n + H_{3n,22}^j \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} w_n \right) + \sum_{n=0}^{N_0} H_{1n,1}^j \frac{\partial}{\partial \xi} u_n + \\
& + \sum_{n=0}^{N_0} H_{2n,2}^j \frac{\partial}{\partial \theta} v_n = H_4^j q^+ + H_5^j q^- + H_{T_o}^j \Delta T_o + H_{T_i}^j \Delta T_i.
\end{aligned} \tag{2.45}$$

Điều kiện biên thường gặp trong thực tế:

- Đối với điều kiện biên tự do, ta có:

$$\text{Tại } \xi = 0, \frac{L}{R}: N_\xi = N_{\xi\theta} = Q_\xi = M_\xi = M_{\xi\theta} = S_\xi = 0,$$

$$N_\xi^* = N_{\xi\theta}^* = Q_\xi^* = M_\xi^* = M_{\xi\theta}^* = 0.$$

$$\text{Tại } \theta = \theta_1, \theta_2: N_\theta = N_{\theta\xi} = Q_\theta = M_\theta = M_{\theta\xi} = S_\theta = 0,$$

$$N_\theta^* = N_{\theta\xi}^* = Q_\theta^* = M_\theta^* = M_{\theta\xi}^* = 0.$$

- Đối với điều kiện biên gối tựa, ta có:

$$\xi = 0, \frac{L}{R}: N_\xi = M_\xi = N_\xi^* = M_\xi^* = 0, v_i = 0, w_j = 0, (i = 0, 1, 2, 3, j = 0, 1, 2),$$

$$\theta = \theta_1, \theta_2 : N_\theta = M_\theta = N_\theta^* = M_\theta^* = 0, u_i = 0, w_j = 0 \quad (i = 0, 1, 2, 3, \quad j = 0, 1, 2).$$

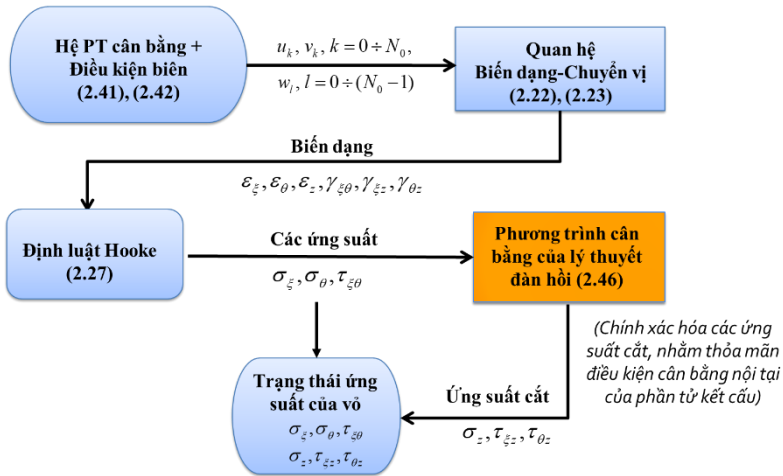
- Đối với điều kiện biên ngàm chặt, ta có:

$$\xi = 0, \frac{L}{R} : u_i = 0, v_i = 0, w_j = 0, \quad (i = 0, 1, 2, 3, \quad j = 0, 1, 2).$$

$$\theta = \theta_1, \theta_2 : u_i = 0, v_i = 0, w_j = 0 \quad (i = 0, 1, 2, 3, \quad j = 0, 1, 2).$$

2.4. Trình tự giải bài toán xác định ứng suất, biến dạng của vỏ

Các bước giải bài toán biên trong nghiên cứu trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ FGM chịu tác dụng của tải trọng cơ, nhiệt trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu Quasi-3D minh họa như Hình 2.3.



Hình 2.3. Trình tự giải bài toán xác định ứng suất, biến dạng vỏ trụ FGM

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT-BIẾN DẠNG CỦA VỎ TRỤ FGM BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH

Chương 3 trình bày tổng quát phương pháp giải tích cho vỏ trụ FGM, với việc áp dụng chuỗi lượng giác kép cho bài toán vỏ trụ FGM và panel trụ FGM tựa đơn; áp dụng chuỗi lượng giác đơn cho bài toán vỏ trụ FGM và Panel trụ FGM với điều kiện biên khác nhau. Cách xác định nghiệm thuần nhất, cũng như nghiệm riêng ứng với các dạng tải trọng. Bài toán kiểm chứng tính đúng đắn và độ tin cậy của phương pháp giải.

3.1 Chuyển hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng về hệ phương trình vi phân thường

3.1.1. Trường hợp vỏ trụ FGM kín

Để chuyển việc nghiên cứu hệ phương trình đạo hàm riêng (2.45) về nghiên cứu hệ phương trình vi phân thường ta sử dụng khai triển chuỗi lượng giác đơn theo hướng vòng cung. Đối với vỏ trụ, các điều kiện biên theo hướng vòng cung được thay thế bằng điều kiện tuần hoàn của chuyển vị và ứng suất. Để thỏa mãn điều kiện biên tuần hoàn theo hướng vòng cung ta phân tích chuyển vị u_k , v_k , w_k , tải trọng cơ $q^\pm(\xi, \theta)$ và nhiệt độ ΔT_o , ΔT_{in} dưới dạng chuỗi lượng giác đơn [51] như sau:

$$\begin{aligned} u_k(\xi, \theta) &= U_{k0}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[U_{km}^{(1)}(\xi) \cos m\theta + U_{km}^{(2)}(\xi) \sin m\theta \right], \\ v_k(\xi, \theta) &= V_{k0}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[V_{km}^{(1)}(\xi) \sin m\theta - V_{km}^{(2)}(\xi) \cos m\theta \right], \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} w_l(\xi, \theta) &= W_{l0}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[W_{lm}^{(1)}(\xi) \cos m\theta + W_{lm}^{(2)}(\xi) \sin m\theta \right], \\ k &= 0 \div N_0, \quad l = 0 \div (N_0 - 1). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q^\pm &= Q_0^\pm(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[Q_m^{(1)\pm}(\xi) \cos m\theta + Q_m^{(2)\pm}(\xi) \sin m\theta \right], \\ \Delta T_o &= \Delta T_{o0}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\Delta T_{om}^{(1)}(\xi) \cos m\theta + \Delta T_{om}^{(2)}(\xi) \sin m\theta \right], \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{in0}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\Delta T_{inm}^{(1)}(\xi) \cos m\theta + \Delta T_{inm}^{(2)}(\xi) \sin m\theta \right].$$

3.1.2. Trường hợp Panel trụ

Xét Panel trụ với điều kiện biên tựa đơn trên hai cạnh $\theta = 0$ và $\theta = \theta_0$, để giải hệ phương trình đạo hàm riêng (2.45) ta sử dụng phương pháp tách biến và áp dụng khai triển chuỗi lượng giác đơn cho chuyển vị và tải trọng cơ, nhiệt theo (3.7).

$$u_k(\xi, \theta) = \sum_{m=1}^{\infty} U_{km}(\xi) \sin \beta_m \theta, \quad k = 0 \div N_0,$$

$$\begin{aligned}
v_k(\xi, \theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} V_{km}(\xi) \cos \beta_m \theta, \quad k = 0 \div N_0, \\
w_l(\xi, \theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} W_{lm}(\xi) \sin \beta_m \theta, \quad l = 0 \div (N_0 - 1) \\
q^\pm &= \sum_{m=1}^{\infty} Q_m^\pm(\xi) \sin \beta_m \theta, \quad \Delta T_o = \sum_{m=1}^{\infty} \Delta T_{om}(\xi) \sin \beta_m \theta, \\
\Delta T_{in} &= \sum_{m=1}^{\infty} \Delta T_{inm}(\xi) \sin \beta_m \theta, \quad \beta_m = m\pi / \theta_0
\end{aligned} \tag{3.7}$$

ở đây, β_m là hằng số phụ thuộc m . Đại lượng m trong công thức nêu trên còn được gọi là số nửa bước sóng theo θ , $\theta_0 = b / R$ là góc mở của vỏ trụ, b là chiều rộng của Panel trụ. Cách xác định nghiệm với Panel trụ tương tự như vỏ trụ.

3.2. Phương pháp Navier cho giải bài toán vỏ trụ FGM tựa đơn

3.2.1. Trường hợp panel trụ FGM tựa đơn trên bốn cạnh

Phân tích tải trọng, chuyển vị theo chuỗi lượng giác kép:

$$\begin{aligned}
u_i &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} U_{rs}^i \sin \beta_s \theta \cos \lambda_r \xi, \quad v_i = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} V_{rs}^i \cos \beta_s \theta \sin \lambda_r \xi, \\
w_j &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} W_{rs}^j \sin \beta_s \theta \sin \lambda_r \xi, \quad q^\pm = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} Q_{rs}^\pm \sin \beta_s \theta \sin \lambda_r \xi, \\
\Delta T_o &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \Delta T_o^{rs} \sin \beta_s \theta \sin \lambda_r \xi, \quad \Delta T_{in} = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \Delta T_{in}^{rs} \sin \beta_s \theta \sin \lambda_r \xi, \\
\lambda_r &= \frac{r\pi}{L/R}, \quad \beta_s = \frac{s\pi}{b/R}, \quad \{r, s\} = 1, 2, \dots
\end{aligned} \tag{3.10}$$

trong đó, b là chiều rộng (chiều dài theo phương θ) của panel trụ.

Thế (3.10) vào (2.45) và thực hiện một số phép biến đổi cơ bản ta được hệ phương trình đại số, tiến hành giải ta được các chuyển vị, từ đây tiếp tục xác định được biến dạng và các thành phần ứng suất.

3.2.2. Trường hợp vỏ trụ FGM hai đầu tựa đơn

Phân tích tải trọng, chuyển vị theo chuỗi lượng giác kép:

$$\begin{aligned}
u_k &= \sum_{m=1}^{\infty} U_{km} \sin m\theta \cos \lambda_r \xi, \quad v_k = \sum_{m=1}^{\infty} V_{km} \cos m\theta \sin \lambda_r \xi, \\
w_j &= \sum_{m=1}^{\infty} W_{jm} \sin m\theta \sin \lambda_r \xi, \quad q^{\pm} = \sum_{m=1}^{\infty} Q^{\pm} \sin m\theta \sin \lambda_r \xi, \\
\Delta T_o &= \sum_{m=1}^{\infty} \Delta T_o \sin m\theta \sin \lambda_r \xi, \quad \Delta T_{in} = \sum_{m=1}^{\infty} \Delta T_{in} \sin m\theta \sin \lambda_r \xi, \\
\lambda_r &= \frac{r\pi}{L/R}, \quad r=1,2,3,\dots
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Thực hiện trình tự giải như các bước trong trường hợp panel trụ FGM tựa đơn trên bốn cạnh.

3.3. Phương pháp tính toán vỏ trụ chịu tác dụng của tải trọng hướng kính đối xứng trục với các điều kiện biên khác nhau

Phần này xem xét vỏ trụ FGM chịu tải đối xứng trục. Chuyển vị và tải trọng có được như khai triển ở (3.1), (3.2) với $m=0$. Do đó, hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng (2.45) trở thành hệ các phương trình vi phân thường (3.4) và (3.5). Trường hợp này $v_i=0$, các đại lượng không phụ thuộc vào θ , do kết cấu, lực đối xứng trục.

Nghiệm các phương trình vi phân tổng quát (3.4) và (3.5) có thể được biểu diễn dưới dạng tổng của nghiệm các phương trình vi phân thuần nhất và nghiệm riêng của các phương trình khi có tải trọng cụ thể.

3.4. Bài toán kiểm chứng

Mục này luận án thực hiện bốn bài toán kiểm chứng, bằng cách so sánh kết quả nghiên cứu đã công bố trên các tạp chí uy tín của các tác giả như Santos, Reddy, Brischetto, Gharooni. Với kết quả so sánh đưa đến khẳng định tính đúng đắn phương pháp tính của luận án, cũng như khẳng định thêm việc ứng dụng hiệu quả lý thuyết HDST kiểu Quasi-3D trong tính toán vỏ trụ dày. Các bài toán kiểm chứng gồm: So sánh với phương pháp phần tử hữu hạn bán giải tích, So sánh với phương pháp đàn hồi 3D cho panel trụ FGM, So sánh với phương pháp đàn hồi 3D cho vỏ trụ FGM, so sánh với phương pháp phần tử hữu hạn cho bài toán chịu tải nhiệt.

Bảng 3.1 biểu thị số liệu chuyển vị không thứ nguyên (khai triển $N_0 = 2, N_0 = 3$) khi so sánh với nghiên cứu của Santos và Reddy [86] trong trường hợp vỏ mỏng. Kết quả một phần cho thấy phương pháp nghiên cứu đúng đắn của luận án.

Bảng 3.1. Chuyển vị $\bar{w} = w \times 10^7$ của vỏ trụ FGM ở vị trí giữa vỏ

η	60 Elements [86]	90 Elements [86]	120 Elements [86]	$N_0 = 2$	$N_0 = 3$
10	-3.864	-3.859	-3.857	-3.857	-3.856
5	-3.794	-3.789	-3.787	-3.787	-3.786
1	-3.511	-3.506	-3.504	-3.504	-3.504
1/4	-3.289	-3.284	-3.282	-3.282	-3.282
1/6	-3.249	-3.244	-3.243	-3.243	-3.243
1/8	-3.228	-3.223	-3.221	-3.221	-3.221

CHƯƠNG 4

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THAM SỐ KẾT CẤU, VẬT LIỆU VÀ TẢI TRỌNG CƠ, NHIỆT ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT-BIẾN DẠNG CỦA VỎ TRỤ FGM

Chương 4 luận án tập trung khảo sát, nghiên cứu ứng xử đối với vỏ trụ FGM với các nội dung chủ yếu sau:

- Vỏ trụ FGM chịu tải cơ: Nghiên cứu hiện tượng tập trung ứng suất, ảnh hưởng điều kiện biên, ảnh hưởng của chiều dài, chiều dày của vỏ trụ, ảnh hưởng của chỉ số tỷ lệ thể tích, vỏ trụ chịu các dạng tải trọng.

- Vỏ trụ FGM chịu tải nhiệt: Nghiên cứu ảnh hưởng sự chênh lệch nhiệt độ, ảnh hưởng chỉ số tỷ lệ thể tích, ảnh hưởng của chiều dày và ảnh hưởng của điều kiện biên.

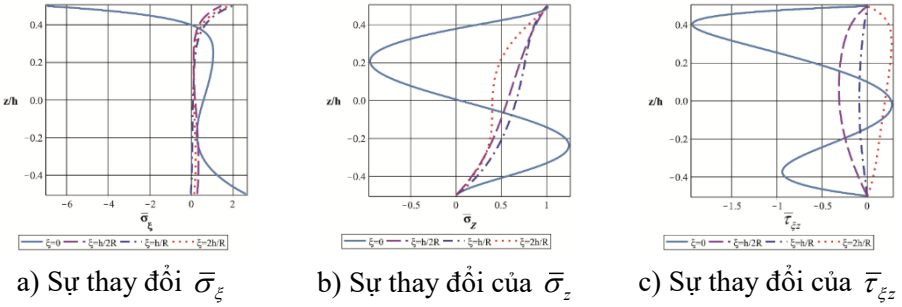
- Vỏ trụ FGM chịu tải cơ-nhiệt: Nghiên cứu ảnh hưởng chênh lệch nhiệt độ, ảnh hưởng chiều dày và chỉ số tỷ lệ thể tích.

Một số kết quả nghiên cứu của luận án

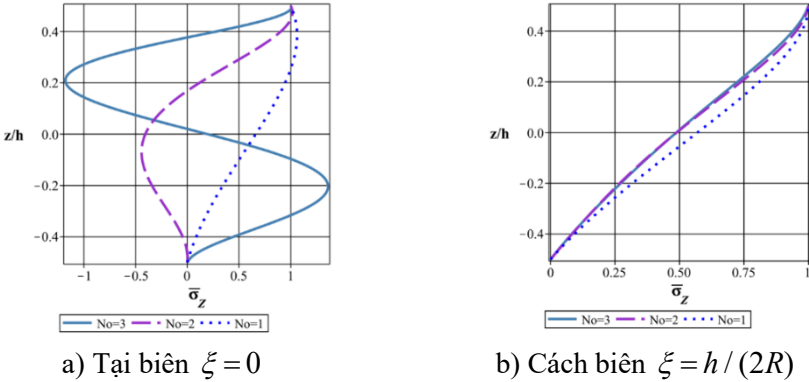
❖ *Đánh giá hiện tượng tập trung ứng suất*

Đánh giá hiện tượng tập trung ứng suất tại vị trí biên ngàm theo các mô hình

lý thuyết cấp hai $N_0 = 2$, cấp ba $N_0 = 3$ và FSĐT.



Hình 4.2. Sự thay đổi của ứng suất không thứ nguyên theo chiều dày z/h tại vùng biên với $L = 4R$, $R/h = 10$, $\eta = 10$.



Hình 4.6. Sự thay đổi của ứng suất tại vùng biên theo các lý thuyết với $L = 4R$, $R/h = 30$, $\eta = 1$

*** Nhận xét:**

- Tại vị trí biên ngầm các giá trị ứng suất có sự tăng đột biến, hiện tượng tập trung ứng suất tồn tại cả đối với vỏ mỏng và vỏ dày.

- Ứng suất pháp $\bar{\sigma}_z$ bỏ qua dẫn đến sai số lớn trong xác định trạng thái ứng suất của vỏ trong tính toán kết cấu tại vùng biên ngầm (khu vực xuất hiện hiện tượng tập trung ứng suất).

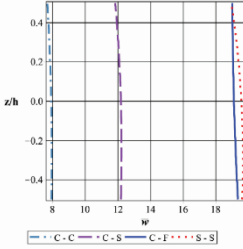
- Kích thước khu vực xảy ra hiện tượng tập trung ứng suất rất nhỏ, có độ rộng xấp xỉ bằng một nửa chiều dày vỏ.

- Mô hình lý thuyết Quasi-3D với $N_0 = 3$ sẽ cho kết quả đánh giá tốt hơn

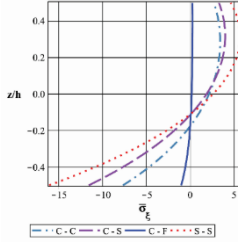
so với so với hai mô hình $N_0 = 2$ và $N_0 = 1$.

❖ Nghiên cứu ảnh hưởng của các điều kiện biên

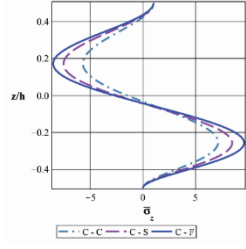
Các điều kiện biên được xét đến ở đây bao gồm: ngàm-ngàm (C-C), ngàm-tự do (C-F), ngàm-tựa đơn (C-S) và tựa đơn-tựa đơn (S-S).



a) Sự thay đổi của \bar{w}



b) $\bar{\sigma}_x$ tại biên



c) $\bar{\sigma}_z$ tại biên

Hình 4.8. Sự thay đổi của chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên theo chiều dày vỏ với $L = 0.5R$, $R/h = 10$, $\eta = 1$.

* Nhận xét:

- Đối với vỏ có chiều dài trung bình trở lên, ở những vị trí giữa vỏ (xa biên), điều kiện biên không ảnh hưởng nhiều đến chuyển vị và ứng suất vỏ.

- Tại vị trí biên, ứng suất cực đại của vỏ thay đổi tùy thuộc vào điều kiện biên. Tại vị trí biên ngàm xuất hiện hiện tượng tập trung ứng suất, trong đó ứng suất pháp ngang $\bar{\sigma}_z$ tăng mạnh và đạt giá trị xấp xỉ bằng 30% so với ứng suất pháp $\bar{\sigma}_x$ cực đại.

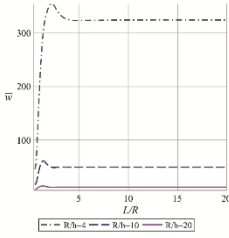
- Trong trường hợp vỏ ngắn, các ĐKB có ảnh hưởng lớn tới chuyển vị và các ứng suất trên toàn vỏ.

❖ Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày và chiều dài vỏ

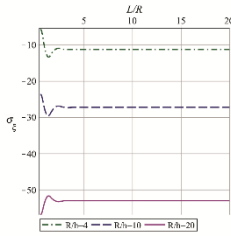
* Nhận xét:

Đối với vỏ ngắn, chiều dày và chiều dài có ảnh hưởng lớn đến trường chuyển vị và ứng suất vỏ. Đối với vỏ dài ($L/R \geq 4$), chỉ có sự biến đổi của chiều dày gây ảnh hưởng lớn đến trường chuyển vị và ứng suất vỏ, còn sự thay đổi về chiều dài hầu như không ảnh hưởng đến các đại lượng nêu trên.

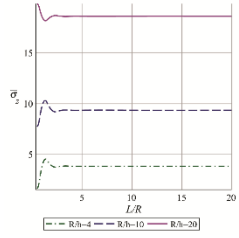
Điều kiện biên tương ứng với trường hợp ngàm-tựa đơn (C-S).



a) \bar{w} ở giữa vỏ
 $\xi = \xi_0 / 2, z = 0$



b) $\bar{\sigma}_\xi$ tại biên
 $\xi = 0, z = -h / 2$

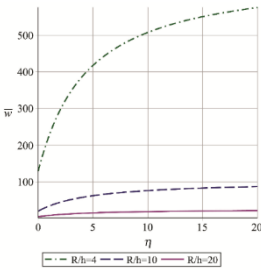


c) $\bar{\sigma}_z$ tại biên
 $\xi = 0, z = -h / 4$

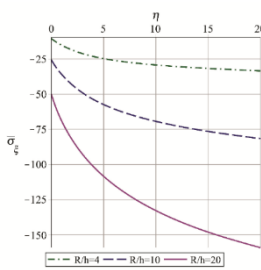
Hình 4.10. Sự thay đổi chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên theo chiều dài tương đối L/R với chiều dày tương đối thay đổi.

❖ **Nghiên cứu ảnh hưởng của chỉ số tỷ lệ thể tích**

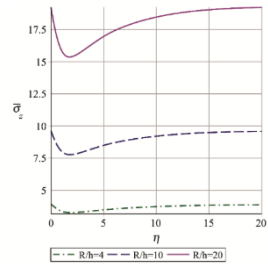
Điều kiện biên tương ứng với trường hợp biên ngầm-tự do (C-F).



a) \bar{w} ở giữa vỏ



b) Sự thay đổi $\bar{\sigma}_\xi$



c) Sự thay đổi $\bar{\sigma}_z$

Hình 4.11. Sự thay đổi của chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên theo chỉ số tỷ lệ thể tích η với chiều dày tương đối R/h khác nhau

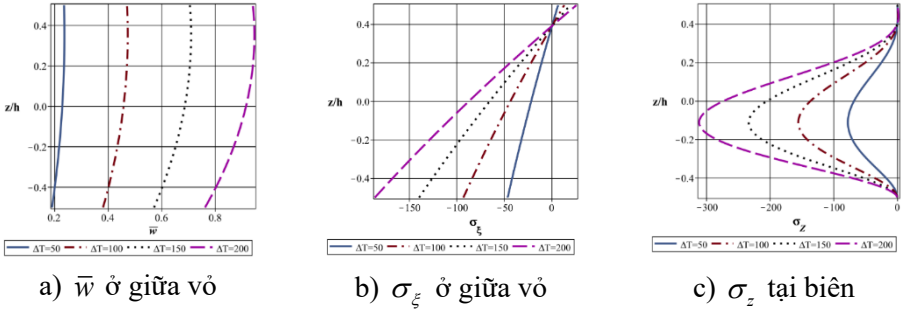
* **Nhận xét:**

- Giá trị tuyệt đối của chuyển vị \bar{w} và ứng suất không thứ nguyên $\bar{\sigma}_\xi, \bar{\sigma}_\theta$ tăng khi hệ số η tăng lên.

- Ứng suất không thứ nguyên $\bar{\sigma}_z$ trong các trường hợp đều đạt giá trị cực tiểu khi có chỉ số tỷ lệ thể tích $\eta = 1.8$. Đây là kết quả quan trọng, thể hiện ảnh hưởng của tính không đồng nhất đối với kết cấu vật liệu FGM.

❖ **Nghiên cứu ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ**

Xét vỏ trụ FGM ngầm chặt hai đầu



Hình 4.14. Ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ tới biến dạng và ứng suất của vỏ trụ FGM.

*** Nhận xét:**

- Sự chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt trong và bề mặt ngoài có ảnh hưởng lớn tới chuyển vị và trạng thái ứng suất của vỏ trụ FGM.

- Tương tự như đối với trường hợp vỏ chịu tác dụng của tải trọng cơ thuần túy, khi chịu tải trọng nhiệt ở vùng biên ngàm cũng xuất hiện hiện tượng tập trung ứng suất, ứng suất σ_z có giá trị cực đại xấp xỉ bằng 75% so với giá trị cực đại của ứng suất pháp σ_ξ , ứng suất $\tau_{\xi z}$ cũng có giá trị tương đối lớn ở vùng biên.

KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu lý thuyết và tính toán số trong luận án, rút ra các kết luận:

1. Kết quả đạt được của luận án

- Luận án đã nghiên cứu tổng quan về vật liệu FGM, các ứng dụng của nó và các mô hình tính toán thường được sử dụng trong nghiên cứu kết cấu FGM.

- Xây dựng được mô hình toán học trong nghiên cứu vỏ trụ FGM chịu tải trọng cơ, nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời với các điều kiện biên khác nhau trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao Quasi-3D, có sử dụng phương trình cân bằng của lý thuyết đàn hồi 3D để xác định các thành phần ứng suất cắt.

- Xây dựng phương pháp nghiên cứu theo hướng tiếp cận giải tích trong nghiên cứu vỏ trụ FGM với các điều kiện biên khác nhau chịu tác dụng của các dạng tải trọng cơ, nhiệt, cơ-nhiệt đồng thời, trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt

bậc cao kiểu Quasi-3D. Độ tin cậy của mô hình toán học, phương pháp nghiên cứu và chương trình tính toán được kiểm chứng thông qua kết quả so sánh với các công bố trên tạp chí quốc tế uy tín trong các bài toán khác nhau về phân tích panel trụ, vỏ trụ chịu tác dụng của tải trọng cơ, tải trọng nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời.

- Trên cơ sở chương trình tính toán đã xây dựng, luận án thực hiện nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các tham số hình học (chiều dày, chiều dài), các điều kiện biên khác nhau, chỉ số tỷ lệ thể tích vật liệu, quy luật phân bố tải trọng, độ chênh lệch nhiệt độ, v.v. lên trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ trụ FGM chịu tác dụng của tải trọng cơ, tải trọng nhiệt độ và tải trọng cơ-nhiệt đồng thời. Trên cơ sở nghiên cứu, luận án đã đưa ra các đánh giá cụ thể và khuyến cáo đối với hiện tượng tập trung ứng suất, ảnh hưởng của các tham số kết cấu, hình học, điều kiện biên, đặc tính vật liệu lên trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong ứng dụng các vật liệu FGM trong các thiết kế kết cấu dạng vỏ trụ.

2. Những đóng góp mới của luận án

- Xây dựng mô hình, các biểu thức và phương trình vi phân cân bằng cho kết cấu vỏ trụ composite FGM khi sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu Quasi-3D chịu tải cơ, nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời. Đề xuất việc sử dụng chuỗi lượng giác đơn kết hợp với phương pháp phân ly biến số và phép biến đổi Laplace để giải quyết bài toán biên đối với vỏ trụ FGM chịu tác dụng của các dạng tải trọng cơ, nhiệt và điều kiện biên khác nhau.

- Nghiên cứu đánh giá hiện tượng tập trung ứng suất tại các vị trí có trạng thái ứng suất-biến dạng bị suy biến (khu vực biên). Phân tích chỉ ra phạm vi áp dụng của lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu Quasi-3D trong tính toán vỏ trụ composite FGM chịu tải trọng cơ, nhiệt.

- Khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố về hình học và vật liệu vỏ trụ composite FGM, các dạng tải trọng cơ, nhiệt, điều kiện biên đến trạng thái ứng suất-biến dạng của vỏ và sự tập trung ứng suất tại biên của vỏ trụ FGM.

3. Hướng phát triển tiếp theo của luận án

Trên cơ sở áp dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao Quasi-3D:

- Nghiên cứu bài toán đáp ứng động lực học vỏ FGM có biện pháp gia cường chịu các dạng tải trọng khác nhau gồm cả cơ và nhiệt.

- Nghiên cứu bài toán ổn định của vỏ FGM cho các kết cấu vỏ khác nhau dưới tác dụng cơ, nhiệt và cơ-nhiệt đồng thời.

- Nghiên cứu các bài toán đáp ứng phi tuyến khác nhau cho vỏ FGM dưới tác dụng của các dạng tải trọng cơ, nhiệt hướng kính và dọc trục.

- Nghiên cứu bài toán tối ưu hóa vật liệu và tối ưu hóa kết cấu với các dạng vỏ FGM nhằm đưa ra và khắc phục hiện tượng tập trung ứng suất trong kết cấu.