

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

DƯƠNG VĂN QUANG

**PHÂN TÍCH TÍNH KẾT CẤU VỎ TRỤ COMPOSITE CƠ TÍNH BIẾN
THIÊN ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG CÁC ỐNG NANO CARBON CHỊU
TẢI TRỌNG CƠ VÀ NHIỆT ĐỘ**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2023

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

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS Trần Ngọc Đoàn

PGS.TS Đoàn Trắc Luật

Phản biện 1: GS.TSKH Nguyễn Tiến Khiêm

Phản biện 2: GS.TS Nguyễn Văn Lê

Phản biện 3: PGS.TS Trần Ngọc Thanh

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số 6163/QĐ-HV, ngày 13 tháng 11 năm 2023 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại: Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi: giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Vật liệu composite cơ tính biến thiên được gia cường bởi ống nano carbon (Functionally graded carbon nanotube reinforced composites FG-CNTRC) là vật liệu mới, có nhiều ưu điểm vượt trội, có tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực.

Vỏ trụ chịu tải trọng cơ nhiệt là dạng kết cấu thường gặp trong thực tế như tên lửa, đường ống, vỏ động cơ... Nhiều nghiên cứu về kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC đã giả thiết các tính chất của vật liệu không phụ thuộc vào nhiệt độ (temperature-independent properties) [14-18]. Một số ít các nghiên cứu đã xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến các tính chất của vật liệu (temperature-dependent properties) nhưng chưa đánh giá các ảnh hưởng của điều kiện biên [19, 20]. Thực tế các trường hợp phá hủy kết cấu thường xảy ra tại vùng biên, vùng chuyển tiếp, vùng chịu tải trọng tập trung... Việc nghiên cứu kết cấu vỏ trụ bằng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có tính đến ảnh hưởng của ứng suất pháp tuyến ngang (transverse normal stresses) cho phép đánh giá đầy đủ hơn trạng thái ứng suất của vỏ, đặc biệt tại các khu vực biên [21-24].

Do đó, phân tích tĩnh vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt theo lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang và tính chất vật liệu thay đổi theo nhiệt độ cho phép đánh giá chính xác hơn ứng suất của vỏ trụ, đặc biệt là tại các vùng biên, vùng chuyển tiếp, vùng chịu tải cục bộ... nhằm phục vụ quá trình tính toán thiết kế, chế tạo, khai thác các kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Xây dựng mô hình, phương pháp giải và chương trình tính toán tin cậy để phân tích tĩnh vỏ trụ bằng vật liệu FG-CNTRC chịu tác dụng của tải trọng cơ và nhiệt độ. Góp phần bổ sung và hoàn thiện mô hình và phương pháp tính toán phục vụ nghiên cứu ứng xử cơ học của kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC.

- Khảo sát, đánh giá đáp ứng tĩnh của vỏ trụ FG-CNTRC trong các điều kiện làm việc khác nhau. Từ đó, đưa ra các khuyến cáo và đề xuất khoa học phục vụ nghiên cứu khai thác, thiết kế chế tạo kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC.

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

Đối tượng nghiên cứu: Đối tượng nghiên cứu là vỏ trụ bằng vật liệu FG-CNTRC, chịu tác dụng của tải trọng cơ và nhiệt độ.

Phạm vi nghiên cứu: Vỏ trụ bằng vật liệu FG-CNTRC có điều kiện biên và

thông số hình học khác nhau chịu tác dụng của tải trọng cơ và nhiệt độ. Vật liệu cốt gia cường là các ống nano carbon (Carbon nanotube - CNT) thẳng, đồng phương theo trục dọc vỏ, có tỷ lệ thể tích biến thiên theo chiều dày vỏ. Vật liệu kết cấu làm việc trong giới hạn đàn hồi. Sử dụng mô hình lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang kiểu quasi-3D và tính chất vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết dựa trên cách tiếp cận giải tích, trong đó sử dụng chuỗi lượng giác kết hợp với phép biến đổi Laplace để giải hệ phương trình cân bằng của vỏ trụ có điều kiện biên khác nhau. Thực hiện so sánh với kết quả đã được công bố để khẳng định tính đúng đắn của mô hình tính, phương pháp giải và chương trình tính toán.

5. Nội dung và cấu trúc luận án

Luận án gồm: phần mở đầu, 04 chương chính và phần kết luận, danh mục công trình đã công bố, danh mục 130 tài liệu tham khảo và phụ lục.

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Chương 2. Xây dựng mô hình tính toán và phương pháp giải

Chương 3. Nghiên cứu khảo sát vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ

Chương 4. Nghiên cứu khảo sát vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt

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

Vật liệu FG-CNTRC là loại vật liệu mới có nhiều ứng dụng. Vỏ trụ chịu tải trọng cơ nhiệt là bài toán kỹ thuật điển hình. Do vậy nghiên cứu vỏ trụ FG-CNTRC chịu tác dụng cơ nhiệt là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn.

Đa số các nghiên cứu đều bỏ qua ảnh hưởng của nhiệt độ đến các tính chất vật liệu. Trong khi thực tế đã cho thấy các tính chất cơ lý của vật liệu chịu ảnh hưởng lớn bởi nhiệt độ. Mặt khác, hầu hết các nghiên cứu đều giả sử nhiệt độ phân bố trong vỏ là dạng hàm cho trước (hằng số, tuyến tính, dạng sin...) Trong luận án thực hiện tính toán với tính chất vật liệu có xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ và hàm phân bố nhiệt độ xác định từ phương trình truyền nhiệt, đây là một trong những đóng góp mang tính khoa học và thực tiễn của đề tài.

Bên cạnh đó, sử dụng phương pháp giải tích để nghiên cứu các kết cấu có điều kiện biên khác nhau là một thử thách thú vị. Đa số các nghiên cứu bằng phương pháp giải tích về kết cấu FG-CNTRC chỉ xét đến điều kiện biên gối tựa đơn. Hướng

tiếp cận theo phương pháp giải tích của luận án bằng cách sử dụng chuỗi lượng giác để xấp xỉ cho hàm chuyển vị, tải trọng và sử dụng phép biến đổi Laplace để tìm biểu thức nghiệm của chuyển vị cho phép giải quyết đối với các loại biên khác nhau. Ngoài ra, phương pháp giải tích được áp dụng còn có khả năng tính toán đối với các tải trọng phân bố không đều, tải trọng tác dụng trên một phần của vỏ.

Khi tính toán đối với vỏ dày cho thấy sự cần thiết sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang. Lý thuyết này cũng cho phép khảo sát đầy đủ hơn trạng thái ứng suất tại vùng biên là nơi thường xảy ra sự phá hủy của kết cấu trong thực tế. Do đó, nghiên cứu vỏ trụ bằng vật liệu FG-CNTRC bằng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang mang ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Vật liệu FG-CNTRC

Vật liệu FG-CNTRC là loại vật liệu composite có vật liệu cốt gia cường là CNT được phân bố theo các qui luật định trước nhằm tạo ra cơ tính biến thiên theo hướng ưu tiên. Có năm mô hình vật liệu FG-CNTRC được đề xuất và sử dụng nghiên cứu, bao gồm: UD, FG- Λ , FG-V, FG-O, FG-X.

1.2. Tổng quan các nghiên cứu kết cấu tấm vỏ bằng vật liệu FG-CNTRC

1.2.1. Về tải trọng nhiệt và ảnh hưởng của tải trọng nhiệt đến các tính chất vật liệu trong các nghiên cứu về tấm vỏ bằng vật liệu FG-CNTRC

Nhiều nghiên cứu khảo sát không xét đến gradient nhiệt độ (Thermal gradient loads) trong trường hợp nhiệt độ của toàn bộ kết cấu là đồng nhất [1-4], [7], [17], [42-43], [46-67], [69-79].

Một số nghiên cứu về tấm vỏ FG-CNTRC có xét đến gradient nhiệt nhưng giả thiết các tính chất vật liệu không phụ thuộc vào nhiệt độ [14-15], [18], [80].

Có rất ít nghiên cứu đồng thời xét đến ảnh hưởng của gradient nhiệt và ảnh hưởng của nhiệt độ đến tính chất vật liệu [19], [41], [81-84]. Các nghiên cứu này chỉ khảo sát với điều kiện biên tựa đơn, chưa đánh giá ảnh hưởng của điều kiện biên khác. Hàm phân bố nhiệt độ giả thiết là các hàm số cho trước.

1.2.2. Về lý thuyết tấm vỏ được sử dụng trong các nghiên cứu về kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC

Đối với tấm vỏ FG-CNTRC có độ dày mỏng, lý thuyết tấm vỏ cổ điển (Classical shell theory - CST) thường được sử dụng để tính toán [51], [66-67], [72], [74-76], [83-87].

Đối với tấm vỏ dày, các nghiên cứu chủ yếu sử dụng các lý thuyết có kể đến biến dạng cắt. Dựa trên lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất (First-order shear deformation theory-FSDT), nhiều nghiên cứu về đáp ứng cơ học của kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC đã được thực hiện [47], [62-65], [71], [78, 79], [89-101].

Để nâng cao độ chính xác khi khảo sát tấm vỏ FG-CNTRC dày, nhiều nghiên cứu đã sử dụng các lý thuyết biến dạng cắt bậc cao (The higher-order shear deformation theories-HSDTs) [7], [49], [68-70], [73], [103-114].

Lý thuyết đàn hồi 3 chiều cũng đã được sử dụng để khảo sát đối với tấm vỏ bằng vật liệu FG-CNTRC [18], [115-119].

Sử dụng lý thuyết đàn hồi 3 chiều cho kết quả chính xác nhất nhưng phức tạp khi tính toán. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của ứng suất pháp tuyến ngang bị bỏ qua trong nhiều dạng HSDT khi giả thiết rằng chuyển vị pháp tuyến ngang là hằng số. Sử dụng HSDT kiểu quasi-3D có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang để nghiên cứu vỏ trụ composite lớp [22, 23] và vỏ trụ FGM [24] đã cho thấy sự hiệu quả đối với vỏ dày đồng thời đã chỉ ra được hiện tượng tập trung ứng suất tại khu vực biên.

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:

- Lý thuyết được sử dụng có thể là CST, FSDT, HSDT hoặc LT đàn hồi 3 chiều. Sử dụng LT đàn hồi 3 chiều cho kết quả chính xác nhất nhưng phức tạp khi tính toán. Ảnh hưởng của ứng suất pháp ngang được bỏ qua trong nhiều dạng HSDT.

- Các nghiên cứu về tấm vỏ FG-CNTRC theo phương pháp giải tích thường khảo sát đối với điều kiện biên gối tựa. Việc khảo sát các điều kiện biên khác bằng phương pháp giải tích chưa được thực hiện nhiều do khó khăn trong tính toán.

- Nghiên cứu về tấm vỏ FG-CNTRC có xét đến gradient nhiệt độ và ảnh hưởng của nhiệt độ đến tính chất vật liệu có rất ít công bố. Chưa có nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của điều kiện biên đến đàn hồi nhiệt của tấm vỏ FG-CNTRC.

- Chưa có các nghiên cứu phân tích chi tiết trạng thái ứng suất tại vùng biên kết cấu FG-CNTRC trong cả hai trường hợp chịu tải trọng cơ và tải trọng nhiệt độ. Trong thực tế, các trường hợp kết cấu bị phá hủy được ghi nhận xảy ra ở vùng biên.

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

- Nghiên cứu tấm vỏ FG-CNTRC bằng phương pháp giải tích với các điều kiện biên khác nhau sử dụng HSDT có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang.
- Nghiên cứu tấm vỏ FG-CNTRC có điều kiện biên khác nhau chịu tải trọng nhiệt có xét đến gradient nhiệt độ và ảnh hưởng của nhiệt độ đến tính chất vật liệu.
- Nghiên cứu ổn định, dao động của kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC theo lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang.
- Nghiên cứu về tối ưu hóa kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC.

1.4. Những nội dung nghiên cứu trong luận án

- Xây dựng mô hình toán học phân tích tĩnh vỏ trụ FG-CNTRC chịu tác dụng của tải trọng cơ nhiệt sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang kiểu quasi-3D, đồng thời xét đến ảnh hưởng của gradient nhiệt độ và ảnh hưởng của nhiệt độ đến các tính chất vật liệu. Ngoài ra, sử dụng PT cân bằng của lý thuyết đàn hồi 3D để chính xác hóa các thành phần ứng suất cắt nhằm đảm bảo điều kiện cân bằng nội tại và điều kiện biên ở mặt trong và ngoài của vỏ.

- Sử dụng phương pháp giải tích để giải bài toán vỏ trụ FG-CNTRC có điều kiện biên khác nhau. Trong đó sử dụng chuỗi lượng giác đơn để chuyển hệ PT đạo hàm riêng về hệ PT vi phân thường, còn phép biến đổi Laplace để giải hệ PT vi phân thường. Thực hiện xây dựng chương trình tính toán số phục vụ phân tích tĩnh kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ và nhiệt độ.

- Thực hiện khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố: điều kiện biên, hình học, vật liệu, tải trọng đến chuyển vị, ứng suất của vỏ. Tập trung phân tích chi tiết ứng suất ở vùng biên dưới tác dụng của hiệu ứng biên. Từ đó, đề xuất các khuyến cáo khoa học phục vụ quá trình thiết kế kết cấu tấm vỏ bằng vật liệu FG-CNTRC.

Kết luận chương 1

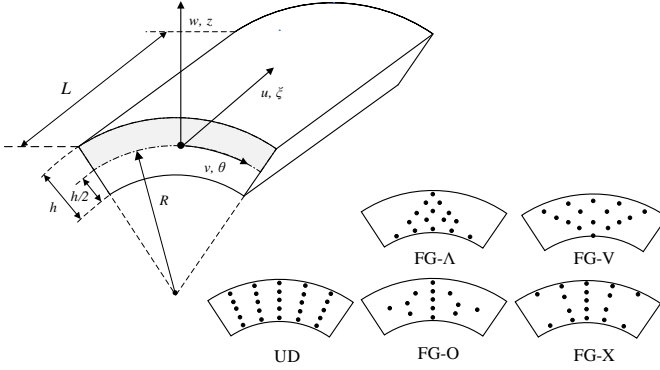
Chương 1 đã trình bày về cấu tạo và tính chất vật liệu FG-CNTRC, tổng quan các nghiên cứu về kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt. Từ các phân tích tổng quan, luận án khái quát kết quả đã đạt được và các vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu về tính toán kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC, từ đó lựa chọn hướng nghiên cứu của luận án.

Thông qua đó đã cho thấy rằng phân tích tĩnh kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ và nhiệt độ theo lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang và tính chất vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ là vấn đề cấp thiết có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP GIẢI

2.1. Bài toán tổng quát

Hệ tọa độ $O\xi\theta z$, với, $\xi = x / R$ là tọa độ tương đối theo đường sinh, tải trọng $q^+(\xi, \theta)$ ở mặt ngoài, $q^-(\xi, \theta)$ ở mặt trong, nhiệt độ trong vỏ $T(\xi, \theta, z)$.



Hình 2.1. Thông số hình học của vỏ trụ và năm trường hợp phân bố CNT

Giả định các CNT thẳng, đồng phương theo trục dọc vỏ và được phân bố theo chiều dày theo năm trường hợp bao gồm: UD, FG- Λ , FG-V, FG-X và FG-O.

2.2. Thông số vật liệu FG-CNTRC khi xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ

- Theo Quy luật hỗn hợp mở rộng [16, 18, 19, 65, 68]:

$$E_{11}(T, z) = \eta_1 V_{CNT} E_{11}^{CNT}(T) + V_m E_m(T), \quad \frac{\eta_2}{E_{22}(T, z)} = \frac{V_{CNT}}{E_{22}^{CNT}(T)} + \frac{V_m}{E_m(T)},$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}(T, z)} = \frac{V_{CNT}}{G_{12}^{CNT}(T)} + \frac{V_m}{G_m(T)}, \quad \nu_{12}(z) = V_{CNT}^* \nu_{12}^{CNT} + V_m \nu_m,$$

$$\alpha_{11}(T, z) = \frac{V_{CNT} E_{11}^{CNT}(T) \alpha_{11}^{CNT}(T) + V_m E_m(T) \alpha_m(T)}{V_{CNT} E_{11}^{CNT}(T) + V_m E_m(T)}, \quad (2.1)$$

$$\alpha_{22}(T, z) = (1 + \nu_{12}^{CNT}) V_{CNT} \alpha_{22}^{CNT}(T) + (1 + \nu_m) V_m \alpha_m(T) - \nu_{12} \alpha_{11}(T),$$

$$\frac{1}{k_{22}(z)} = \frac{V_{CNT}}{k_{22}^{CNT}} + \frac{V_m}{k_m}, \quad k_{11}(z) = V_{CNT} k_{11}^{CNT} + V_m k_m,$$

- Tỷ lệ thể tích CNT được tính như sau:

$$\text{Trường hợp UD:} \quad V_{CNT} = V_{CNT}^* \quad (2.3.a)$$

$$\text{Trường hợp FG-}\Lambda: \quad V_{CNT} = 2(1/2 - z/h)V_{CNT}^* \quad (2.3.b)$$

$$\text{Trường hợp FG-V:} \quad V_{CNT} = 2(1/2 + z/h)V_{CNT}^* \quad (2.3.c)$$

$$\text{Trường hợp FG-O:} \quad V_{CNT} = 2(1 - 2|z|/h)V_{CNT}^* \quad (2.3.d)$$

$$\text{Trường hợp FG-X:} \quad V_{CNT} = (4|z|/h)V_{CNT}^* \quad (2.3.e)$$

Các thông số đàn hồi khác của vật liệu:

$$\begin{aligned} E_{22} = E_{33}, G_{12} = G_{13} = G_{23}, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{31} = \nu_{21} = \nu_{32} = \nu_{23}, \\ \nu_{21} = E_{22}/E_{11} \nu_{12}, \alpha_{33} = \alpha_{22}, k_{33} = k_{22} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.3. Các phương trình cơ bản

2.3.1. Trường chuyển vị

Sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang kiểu quasi-3D [124], trường chuyển vị được phân tích dưới dạng như sau:

$$\begin{aligned} u(\xi, \theta, z) &= u_0(\xi, \theta) + u_1(\xi, \theta)z + u_2(\xi, \theta)\frac{z^2}{2} + u_3(\xi, \theta)\frac{z^3}{6} \\ v(\xi, \theta, z) &= v_0(\xi, \theta) + v_1(\xi, \theta)z + v_2(\xi, \theta)\frac{z^2}{2} + v_3(\xi, \theta)\frac{z^3}{6} \\ w(\xi, \theta, z) &= w_0(\xi, \theta) + w_1(\xi, \theta)z + w_2(\xi, \theta)\frac{z^2}{2} \end{aligned} \quad (2.6.a)$$

Theo đó, chuyển vị w không phải là hằng số mà là hàm bậc hai của z .

2.2.2. Quan hệ biến dạng và chuyển vị

$$\begin{aligned} \varepsilon_\xi = \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \xi}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{R+z} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right), \quad \gamma_{\xi\theta} = \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{1}{R+z} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \\ \gamma_{\theta z} = \frac{1}{R+z} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{v}{R+z}, \quad \gamma_{\xi z} = \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2.3. Quan hệ ứng suất và biến dạng

Khi tính chất vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ [125]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\xi \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{z\theta} \\ \tau_{\xi z} \\ \tau_{\xi\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}(T, z) & C_{12}(T, z) & C_{13}(T, z) & 0 & 0 & 0 \\ C_{21}(T, z) & C_{22}(T, z) & C_{23}(T, z) & 0 & 0 & 0 \\ C_{31}(T, z) & C_{32}(T, z) & C_{33}(T, z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}(T, z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}(T, z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}(T, z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_\xi \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{z\theta} \\ \gamma_{\xi z} \\ \gamma_{\xi\theta} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \beta_\xi \\ \beta_\theta \\ \beta_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T, \quad (2.9)$$

$\Delta T = T - T_{ref}$ với T_{ref} là nhiệt độ tham chiếu ở đó không xuất hiện biến dạng nhiệt.

Các thông số độ cứng C_{ij} là hàm số theo nhiệt độ T của điểm đang xét:

$$\begin{aligned} C_{11}(T, z) &= E_{11}(T, z)(1 - \nu_{23}\nu_{32})/\Delta; & C_{22}(T, z) &= E_{22}(T, z)(1 - \nu_{31}\nu_{13})/\Delta, \\ C_{33}(T, z) &= E_{33}(T, z)(1 - \nu_{21}\nu_{12})/\Delta; & C_{12}(T, z) &= E_{11}(T, z)(\nu_{21} + \nu_{23}\nu_{31})/\Delta, \\ C_{13}(T, z) &= E_{11}(T, z)(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})/\Delta; & C_{23}(T, z) &= E_{22}(T, z)(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})/\Delta, \\ C_{44}(T, z) &= G_{23}(T, z); & C_{55}(T, z) &= G_{13}(T, z); & C_{66}(T, z) &= G_{12}(T, z), \\ \Delta &= 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{32} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$\beta_\xi, \beta_\theta, \beta_z$ là các mô-đun ứng suất liên quan đến hệ số giãn nở nhiệt α_{ii} :

$$\begin{Bmatrix} \beta_\xi \\ \beta_\theta \\ \beta_z \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}(T, z)\alpha_{11} + C_{12}(T, z)\alpha_{22} + C_{13}(T, z)\alpha_{33} \\ C_{21}(T, z)\alpha_{11} + C_{22}(T, z)\alpha_{22} + C_{23}(T, z)\alpha_{33} \\ C_{31}(T, z)\alpha_{11} + C_{32}(T, z)\alpha_{22} + C_{33}(T, z)\alpha_{33} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

2.4. Thiết lập hệ phương trình cân bằng của vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt

2.4.1. Nguyên lý công ảo

$$\delta U - \delta A_\xi - \delta A_{e_1} - \delta A_{e_2} = 0 \quad (2.12)$$

trong đó, δU là biến phân năng lượng biến dạng đàn hồi của kết cấu, δA_ξ là biến phân công của lực mặt, δA_{e_1} là biến phân công của ngoại lực trên biên $\xi = (\xi_1, \xi_2)$

δA_{e_2} là biến phân công của ngoại lực trên biên $\theta = (\theta_1, \theta_2)$.

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

Từ nguyên lý công ảo ta thiết lập được hệ phương trình cân bằng như sau:

$$\frac{\partial N_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial N_{\theta\xi}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial N_{\xi\theta}}{\partial \xi} + Q_\theta = 0, \quad \frac{\partial Q_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} - N_\theta - Rp_0 = 0,$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial M_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial M_{\theta\xi}}{\partial \theta} - RQ_\xi = 0, \quad \frac{\partial M_{\xi\theta}}{\partial \xi} + \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - RQ_\theta = 0, \\
& \frac{\partial S_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial S_\theta}{\partial \theta} - M_\theta - RQ_z - Rp_1 = 0, \quad \frac{\partial N_\xi^*}{\partial \xi} + \frac{\partial N_{\theta\xi}^*}{\partial \theta} - RS_\xi = 0, \quad (2.31) \\
& \frac{\partial N_{\xi\theta}^*}{\partial \xi} + \frac{\partial N_\theta^*}{\partial \theta} - RS_\theta - Q_\theta^* = 0, \quad \frac{\partial Q_\xi^*}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_\theta^*}{\partial \theta} - N_\theta^* - RS_z - Rp_2 = 0, \\
& \frac{\partial M_\xi^*}{\partial \xi} + \frac{\partial M_{\theta\xi}^*}{\partial \theta} - RQ_\xi^* = 0, \quad \frac{\partial M_{\xi\theta}^*}{\partial \xi} + \frac{\partial M_\theta^*}{\partial \theta} - RQ_\theta^* - 2S_\theta^* = 0
\end{aligned}$$

Các điều kiện biên tương ứng với hệ phương trình cân bằng (2.31) bao gồm:

- Tại $\xi = \xi_1, \xi_2$:

$$\begin{aligned}
N_\xi &= \bar{N}_\xi \cup u_0 = \bar{u}_0; N_\xi^* = \bar{N}_\xi^* \cup u_2 = \bar{u}_2; M_\xi = \bar{M}_\xi \cup u_1 = \bar{u}_1; \\
M_\xi^* &= \bar{M}_\xi^* \cup u_3 = \bar{u}_3; N_{\xi\theta} = \bar{N}_{\xi\theta} \cup v_0 = \bar{v}_0; N_{\xi\theta}^* = \bar{N}_{\xi\theta}^* \cup v_2 = \bar{v}_2; \\
M_{\xi\theta} &= \bar{M}_{\xi\theta} \cup v_1 = \bar{v}_1; M_{\xi\theta}^* = \bar{M}_{\xi\theta}^* \cup v_3 = \bar{v}_3;
\end{aligned} \quad (2.32)$$

$$Q_\xi = \bar{Q}_\xi \cup w_0 = \bar{w}_0; Q_\xi^* = \bar{Q}_\xi^* \cup w_2 = \bar{w}_2; S_\xi = \bar{S}_\xi \cup w_1 = \bar{w}_1$$

- Tại $\theta = \theta_1, \theta_2$:

$$\begin{aligned}
N_{\theta\xi} &= \bar{N}_{\theta\xi} \cup u_0 = \bar{u}_0; N_{\theta\xi}^* = \bar{N}_{\theta\xi}^* \cup u_2 = \bar{u}_2; M_{\theta\xi} = \bar{M}_{\theta\xi} \cup u_1 = \bar{u}_1; \\
M_{\theta\xi}^* &= \bar{M}_{\theta\xi}^* \cup u_3 = \bar{u}_3; N_\theta = \bar{N}_\theta \cup v_0 = \bar{v}_0; N_\theta^* = \bar{N}_\theta^* \cup v_2 = \bar{v}_2; \\
M_\theta &= \bar{M}_\theta \cup v_1 = \bar{v}_1; M_\theta^* = \bar{M}_\theta^* \cup v_3 = \bar{v}_3; \\
Q_\theta &= \bar{Q}_\theta \cup w_0 = \bar{w}_0; Q_\theta^* = \bar{Q}_\theta^* \cup w_2 = \bar{w}_2; S_\theta = \bar{S}_\theta \cup w_1 = \bar{w}_1.
\end{aligned} \quad (2.33)$$

2.4.3. Hệ phương trình cân bằng theo chuyển vị

Khi nhiệt độ phân bố theo độ dày $\Delta T = \Delta T(z)$, hệ (2.31) viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=0}^3 \left(H_{1n}^l u_n + H_{1n,11}^l \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} u_n + H_{1n,22}^l \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} u_n \right) + \\
& + \sum_{n=0}^3 H_{2n,12}^l \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} v_n + \sum_{n=0}^2 H_{3n,1}^l \frac{\partial}{\partial \xi} w_n = 0, \quad l = 1 \div 4 \quad (2.36.a)
\end{aligned}$$

$$\sum_{n=0}^3 \left(H_{2n}^k v_n + H_{2n,11}^k \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} v_n + H_{2n,22}^k \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} v_n \right) + \sum_{n=0}^3 H_{1n,12}^k \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} u_n + \sum_{n=0}^3 H_{3n,2}^k \frac{\partial}{\partial \theta} w_n = 0, \quad k = 5 \div 8 \quad (2.36.b)$$

$$\sum_{n=0}^2 \left(H_{3n}^t w_n + H_{3n,11}^t \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} w_n + H_{3n,22}^t \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} w_n \right) + \sum_{n=0}^3 H_{1n,1}^t \frac{\partial}{\partial \xi} u_n + \sum_{n=0}^3 H_{2n,2}^t \frac{\partial}{\partial \theta} v_n = H_4^t q^+ + H_5^t q^- + H_7^t \Delta T, \quad t = 9 \div 11 \quad (2.36.c)$$

Điều kiện biên thường gặp trong thực tế:

- Điều kiện biên tự do:

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

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

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

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

- Điều kiện biên gối tựa:

$$\text{Tại } \xi = 0, \quad L/R: \quad N_\xi = M_\xi = N_\xi^* = M_\xi^* = 0, v_i = 0, w_j = 0,$$

$$\text{Tại } \theta = \theta_1, \theta_2: \quad N_\theta = M_\theta = N_\theta^* = M_\theta^* = 0, u_i = 0, w_j = 0$$

- Điều kiện biên ngàm chặt:

$$\text{Tại } \xi = 0, \quad L/R: \quad u_i = 0, v_i = 0, w_j = 0,$$

$$\text{Tại } \theta = \theta_1, \theta_2: \quad u_i = 0, v_i = 0, w_j = 0.$$

- Điều kiện biên nhiệt độ:

$$\text{Tại } z = -h/2: \quad T = T_{in}; \quad \text{Tại } z = h/2: \quad T = T_{out}$$

2.5. Trình tự giải bài toán xác định ứng suất của vỏ

Thực hiện giải hệ PT (2.31) với điều kiện biên tương ứng, ta nhận được chuyển vị u_i , v_i , w_j . Từ quan hệ biến dạng và chuyển vị (2.7) ta tìm được các biến dạng ε_ξ , ε_θ , ε_z , $\gamma_{\xi\theta}$, $\gamma_{\xi z}$, $\gamma_{\theta z}$. Sử dụng quan hệ biến dạng và ứng suất (2.9) xác định các ứng suất σ_ξ , σ_θ , $\tau_{\xi\theta}$. Ba thành phần ứng suất còn lại được

chính xác hoá theo PT cân bằng của LT đàn hồi 3D [124] nhằm đảm bảo điều kiện cân bằng và điều kiện biên tại mặt trên và mặt dưới của vỏ:

$$\begin{aligned}\tau_{\xi z} &= -\frac{1}{R+z} \int_{-h/2}^z \left[\left(1 + \frac{z}{R}\right) \frac{\partial \sigma_{\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau_{\xi \theta}}{\partial \theta} \right] dz, \\ \tau_{\theta z} &= -\frac{R}{(R+z)^2} \int_{-h/2}^z \left[\left(1 + \frac{z}{R}\right) \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} + \left(1 + \frac{z}{R}\right)^2 \frac{\partial \tau_{z \theta}}{\partial \xi} \right] dz, \\ \sigma_z &= -\frac{1}{R+z} \int_{-h/2}^z \left[\left(1 + \frac{z}{R}\right) \frac{\partial \tau_{\xi z}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} - \sigma_{\theta} \right] dz + \frac{R-h/2}{R+h/2} q^-. \end{aligned} \quad (2.37)$$

2.6. Phương pháp giải tích trong nghiên cứu vỏ trụ FG-CNTRC với các điều kiện biên khác nhau chịu tải hướng kính

Thông thường, với kết cấu có biên tựa đơn sẽ được giải quyết trọn vẹn bằng phương pháp Galerkin. Còn với kết cấu có biên không phải tựa đơn (non-simply supported) thì việc giải bằng phương pháp giải tích là vấn đề tương đối phức tạp. Trong luận án, đề xuất phương pháp giải tích sử dụng chuỗi lượng giác đơn và phép biến đổi Laplace để giải bài toán vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cục bộ hướng kính tuần hoàn có điều kiện biên khác nhau. Trình tự giải bao gồm:

- Sử dụng chuỗi lượng giác đơn để xấp xỉ cho chuyển vị, tải trọng nhằm chuyển hệ PT cân bằng dạng vi phân đạo hàm riêng thành hệ PT vi phân thường.
- Xác định nghiệm của phương trình vi phân thuần nhất.
- Xác định nghiệm riêng theo tải trọng bằng cách sử dụng phép biến đổi Laplace.
- Xác định các hệ số tích phân theo điều kiện biên, từ đó xác định được biểu thức của chuyển vị.

2.6.1. Chuyển hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng về hệ phương trình vi phân thường bằng chuỗi lượng giác

Để chuyển hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng (2.36) thành phương trình vi phân thường, sử dụng chuỗi lượng giác đơn khai triển theo toạ độ vòng θ . Khi đó các điều kiện biên tuần hoàn theo biến θ sẽ tự động thoả mãn [126]:

$$u_i(\xi, \theta) = U_{i0}(\xi) + \sum_m U_{im}(\xi) \sin \varphi_m \theta, \quad v_i(\xi, \theta) = V_{i0}(\xi) - \sum_m V_{im}(\xi) \cos \varphi_m \theta,$$

$$w_j(\xi, \theta) = W_{j0}(\xi) + \sum_m W_{jm}(\xi) \sin \varphi_m \theta, \quad q^{\pm}(\xi, \theta) = Q_0^{\pm}(\xi) + \sum_m Q_m^{\pm}(\xi) \sin \varphi_m \theta,$$

$$\Delta T = T_0(\xi) + \sum_m T_m(\xi) \sin \varphi_m \theta, \varphi_m = \frac{m\pi}{\theta_0}, i = 0, 1, 2, 3; j = 0, 1, 2. \quad (2.38)$$

Đối với vỏ trụ kín, để thoả mãn điều kiện tuần hoàn ta đặt $\theta_0 = \pi$.

2.6.2. Giải bài toán vỏ trụ chịu tải trọng cục bộ hướng kính bằng phép biến đổi Laplace

Để xác định nghiệm của hệ PT vi phân thường nhận được ta sử dụng phép biến đổi Laplace. Hàm ảnh tương ứng với chuyển vị và tải trọng như sau:

$$U_{im}(\xi) \Leftrightarrow \tilde{U}_{im}(p), V_{im}(\xi) \Leftrightarrow \tilde{V}_{im}(p), W_{jm}(\xi) \Leftrightarrow \tilde{W}_{jm}(p), \\ Q_m^\pm(\xi) \Leftrightarrow \tilde{Q}_m^\pm(p), T_m(\xi) \Leftrightarrow \tilde{T}_m(p). \quad (2.43)$$

Từ điều kiện biên của hàm nguồn, ta phân tích được điều kiện biên tương ứng của hàm ảnh tại $\xi = 0$ thông qua các hằng số tích phân $C_{im}^{10}, C_{im}^{20}, C_{jm}^{30}, C_{im}^{11}, C_{im}^{21}, C_{jm}^{31}$. Ta coi các giá trị $C_{im}^{10}, C_{im}^{20}, C_{jm}^{30}$ được cho trước, khi đó hệ phương trình hàm ảnh trở thành hệ phương trình đại số tuyến tính với các biến $C_{im}^{11}, C_{im}^{21}, C_{jm}^{31}$.

Giải hệ phương trình đại số nhận được với điều kiện biên tại $\xi = 0$ đối với hàm ảnh $U_{im}(p), V_{im}(p), W_{jm}(p)$ ta xác định được biểu thức nghiệm hàm ảnh dưới dạng một phân thức đại số của p . Áp dụng phép biến đổi Laplace ngược đối với biểu thức này xác định được biểu thức $U_{im}(\xi), V_{im}(\xi), W_{jm}(\xi)$. Một nửa các hằng số tích phân còn lại được xác định từ điều kiện biên còn lại tại $\xi = L/R$.

Phương pháp này rất hiệu quả đối với trường hợp vỏ chịu tải trọng phân bố cục bộ trên một phần vỏ. Trong trường hợp này, nếu sử dụng cách tiếp cận thông thường, ta phải sử dụng chuỗi xấp xỉ với số lượng phần tử lớn mới đạt được độ chính xác cần thiết. Cách tiếp cận đã trình bày ở trên đây có thể mở rộng cho trường hợp vỏ chịu tác dụng của tải trọng có dạng hàm phân bố khác nhau, với điều kiện có thể xác định được biểu thức tường minh của biểu thức nghiệm trong phép biến đổi Laplace ngược.

Dựa trên mô hình tính toán và phương pháp trên, tiến hành xây dựng chương trình tính bằng phần mềm Maple trong hai trường hợp: Vỏ chịu tải trọng cơ; Vỏ chịu tải trọng cơ nhiệt đồng thời.

Kết luận chương 2

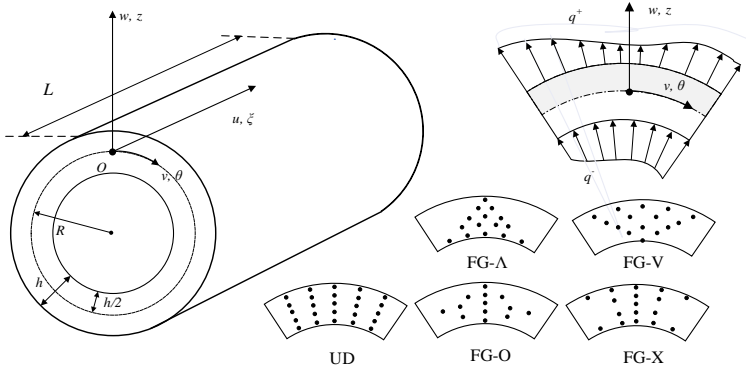
Chương 2 đã xây dựng mô hình phân tích tĩnh vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ và nhiệt độ theo lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang kiểu quasi-3D và tính chất vật liệu thay đổi theo nhiệt độ; xây dựng

phương pháp giải tích sử dụng chuỗi lượng giác đơn và phép biến đổi Laplace cho bài toán vỏ trụ chịu tải hướng kính tuần hoàn có các điều kiện biên khác nhau. Phương pháp này không chỉ cho phép giải quyết với các điều kiện biên khác nhau mà còn rất hiệu quả cho trường hợp chịu tải trọng cục bộ, tải trọng phân bố trên một phần vỏ, tải trọng phân bố theo các dạng hàm khác nhau.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT VỎ TRỤ FG-CNTRC CHỊU TẢI TRỌNG CƠ

3.1. Mô hình bài toán vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ

Vỏ chỉ chịu tải trọng cơ, nhiệt độ của vỏ bằng nhiệt độ tham chiếu $T=300K$.



Hình 3.1 Mô hình vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ

3.2. Các ví dụ kiểm chứng

Thực hiện hai ví dụ so sánh với kết quả của Brischetto, Moradi-Dastjerdi. Kết quả cho thấy độ tin cậy của mô hình tính toán, phương pháp giải và chương trình tính trong luận án, cũng như khẳng định thêm sự cần thiết phải kể đến ảnh hưởng của ứng suất pháp tuyến ngang khi tính toán vỏ trụ dày.

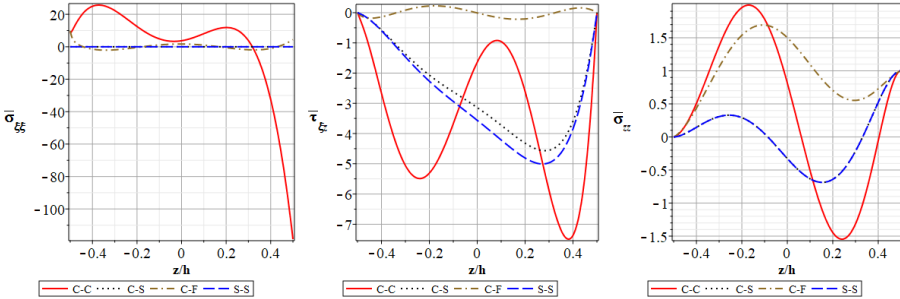
3.3. Khảo sát ảnh hưởng của điều kiện biên

Khảo sát các điều kiện biên: ngàm-ngàm (C-C), ngàm-tự do (C-F), ngàm-tựa đơn (C-S) và tựa đơn-tựa đơn (S-S).

Nhận xét:

- Điều kiện biên ảnh hưởng lớn đến chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ FG-CNTRC, đặc biệt khi vỏ dày và ngắn thì mức độ ảnh hưởng tăng lên. Cụ thể ảnh

hường của điều kiện biên tăng dần theo các trường hợp sau: vỏ dài trung bình $L/R=4$ và dày $R/h=10$; vỏ ngắn $L/R=1$ và mỏng $R/h=50$; vỏ ngắn $L/R=1$ và dày $R/h=10$.



Hình 3.5 Ảnh hưởng của điều kiện biên đến ứng suất của vỏ trụ FG-V có $V_{CNT}^* = 0.17$,
 $L/R = 1$, $R/h = 10$

Tại vị trí biên ($\xi = L/R$): do ảnh hưởng của hiệu ứng biên, giá trị ứng suất tăng đột ngột khi so sánh với giá trị ứng suất ở vị trí giữa. Giá trị ứng suất của biên ngàm là lớn nhất. Ví dụ đối với vỏ FG-V có $L/R=1$ và $R/h=10$, thì giá trị lớn nhất của $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại vị trí biên $\xi = L/R$ của vỏ có biên C-C, C-S, C-F, S-S lần lượt là -118.7, 3.6, -0.4, -0.4. Tương tự với $\bar{\tau}_{\xi z}$ lần lượt là -7.50, -4.60, -0.20, -5.12, với $\bar{\sigma}_{zz}$ lần lượt là 1.98, 1.00, 1.68, 1.00.

3.4. Khảo sát ảnh hưởng của hiệu ứng biên

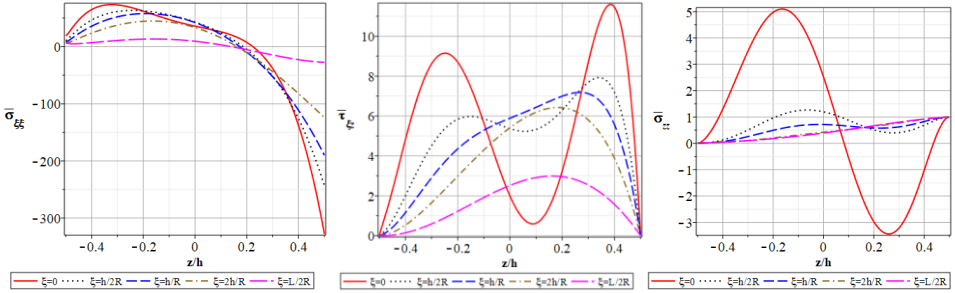
Khảo sát ứng suất tại biên ngàm của vỏ trụ FG-CNTRC có ba kiểu điều kiện biên C-C, C-S và C-F với các thông số hình học khác nhau.

Nhận xét:

- Với vỏ trụ ngắn ($L/R=0.5$), điều kiện biên tại đầu biên này ảnh hưởng lớn đến ứng suất ở đầu biên còn lại. Ứng suất ở khu vực biên trái ($\xi = 0$) của vỏ trụ biên C-C và C-S có giá trị tương đương nhau. Trong khi đó, giá trị của ứng suất ở khu vực biên trái ($\xi = 0$) của vỏ trụ biên C-F là lớn nhất. Cụ thể: khi $R/h=10, 20$ thì giá trị lớn nhất của ứng suất tại biên trái ($\xi = 0$) của vỏ trụ biên C-F lớn hơn 200% so với các giá trị ứng suất của vỏ trụ biên C-C và C-S. Và khi $R/h=50$, ứng suất này xấp xỉ 120% ứng suất của trường hợp biên C-C và C-S.

- Do ảnh hưởng của các hiệu ứng biên, tại khu vực biên ngàm xảy ra hiện tượng gia tăng đột ngột giá trị của các thành phần ứng suất. Kích thước khu vực tác

dụng của hiệu ứng biên là nhỏ và xấp xỉ khoảng 2 lần độ dày của vỏ. Hiện tượng này giảm nhanh chóng khi cách xa cạnh biên khoảng $2h$.



Hình 3.6 Ứng suất không thứ nguyên tại vùng biên ngầm của vỏ trụ FG-V với $V_{CNT}^* = 0.17$, $L/R = 0.5$, $R/h = 20$ và điều kiện biên C-F

3.5. Khảo sát ảnh hưởng của thông số vật liệu đến hiệu ứng biên

Trong mục này thực hiện khảo sát ảnh hưởng của kiểu phân bố CNT và tỷ lệ thể tích CNT đến ứng suất của vỏ tại vùng biên ngầm.

Nhận xét: Thông số vật liệu có mức độ ảnh hưởng đến các thành phần ứng suất khác nhau. Ảnh hưởng rõ nét nhất là tại các vị trí mà tỷ lệ thể tích CNT đạt giá trị cực đại (lớn nhất hoặc nhỏ nhất) gồm: mặt trong, mặt ngoài, mặt giữa vỏ. Ứng suất dọc trục đạt giá trị lớn nhất ở mặt trong với kiểu phân bố FG- Λ , và ở mặt ngoài với kiểu phân bố FG-V. Ngược lại, ứng suất vòng đạt giá trị lớn nhất ở mặt ngoài với kiểu phân bố FG- Λ , và ở mặt trong với kiểu phân bố FG-V.

3.6. Khảo sát ảnh hưởng của tải trọng

Ưu điểm nổi bật của phương pháp trong luận án là cho phép giải quyết hiệu quả đối với tải trọng phân bố cục bộ trên một đoạn vỏ, tải biến đổi đột ngột dạng bậc thang, phân bố theo các dạng hàm khác nhau. Do đó trong mục này thực hiện khảo sát ảnh hưởng của tải trọng theo ba bài toán:

- Ảnh hưởng của mức độ tập trung tải trọng
- Ảnh hưởng của vị trí đặt tải trọng phân bố
- Ảnh hưởng của dạng hàm phân bố tải trọng.

Nhận xét: Để giảm ứng suất, chuyển vị thì cần giảm mức độ tập trung tải trọng. Khi cần ưu tiên chuyển vị nhỏ thì nên đặt tải gần với liên kết, ngược lại để phát huy hiệu quả làm việc đồng đều của vật liệu thì tải trọng nên đặt cách đều các biên. Ứng suất đối với tải trọng dạng hằng số, dạng hàm sin biến thiên ít hơn do ứng suất của dạng tải trọng bậc nhất, bậc hai

Kết luận chương 3

Chương 3 đã khảo sát vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ theo LT biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang kiểu quasi-3D. Từ kết quả khảo sát cho thấy sự hiệu quả của LT biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang kiểu quasi-3D. Sử dụng LT này, luận án đã phân tích ảnh hưởng của hiệu ứng biên ở vùng biên của kết cấu là vùng thường xảy ra sự phá huỷ trong thực tế. Bên cạnh đó, đã khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện biên, hình học, thông số vật liệu, đặc điểm của tải trọng. Từ các kết quả đã rút ra được các nhận xét có ý nghĩa khoa học phục vụ tính toán thiết kế vỏ trụ FG-CNTRC.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT VỎ TRỤ FG-CNTRC CHỊU TẢI TRỌNG CƠ NHIỆT

4.1. Mô hình bài toán vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt

Vỏ trụ FG-CNTRC có nhiệt độ phân bố theo chiều dày, nhiệt độ mặt trong T_{in} , nhiệt độ mặt ngoài T_{out} , xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến tính chất vật liệu.

4.2. Xác định phân bố nhiệt độ theo chiều dày vỏ trụ FG-CNTRC

Như đã nêu ở phần tổng quan, trong hầu hết các nghiên cứu, phân bố nhiệt độ thường được giả thiết là một hàm cho trước dạng hằng số, hàm sin hoặc tuyến tính nhằm đơn giản hoá khi tính toán. Tuy nhiên trong thực tế thì hàm phân bố nhiệt độ trong vỏ chịu ảnh hưởng bởi môi trường, dạng kết cấu, tính chất vật liệu. Để sát hơn với thực tế, trong luận án sử dụng hàm phân bố nhiệt độ theo độ dày được xác định từ phương trình truyền nhiệt.

Kết quả:

$$\text{Kiểu UD:} \quad T(z) = \frac{A_1}{k_{33U}} \ln(R+z) + A_2 \quad (4.11)$$

$$\text{Kiểu FG-}\Lambda\text{:} \quad T(z) = A_3 \cdot G_{1\Lambda} \cdot \ln(R+z) + A_3 \cdot G_{2\Lambda} \cdot z + A_4 \quad (4.13)$$

$$\text{Kiểu FG-V:} \quad T(z) = A_5 \cdot G_{1V} \cdot \ln(R+z) + A_5 \cdot G_{2V} \cdot z + A_6 \quad (4.15)$$

Kiểu FG-O:

$$T(z) = \begin{cases} A_7 \cdot G_{1O} \cdot \ln(R+z) + A_7 \cdot G_{2O} \cdot z + A_8 & (-h/2 \leq z < 0) \\ A_7 \cdot G_{3O} \cdot \ln(R+z) + A_7 \cdot G_{4O} \cdot z + A_9 & (0 \leq z \leq h/2) \end{cases} \quad (4.17)$$

Kiểu FG-X:

$$T(z) = \begin{cases} A_{10} \cdot G_{1X} \cdot \ln(R+z) + A_{10} \cdot G_{2X} \cdot z + A_{11} & (-h/2 \leq z < 0) \\ A_{10} \cdot G_{3X} \cdot \ln(R+z) + A_{10} \cdot G_{4X} \cdot z + A_{12} & (0 \leq z \leq h/2) \end{cases} \quad (4.19)$$

4.3. Các ví dụ kiểm chứng cho bài toán vỏ chịu tải trọng cơ nhiệt

Thực hiện ba ví dụ để kiểm chứng mô hình tính toán, phương pháp giải, chương trình tính bằng cách so sánh với kết quả đã được công bố của Gharooni, Moradi-Dastjerdi, Poursaghar bao gồm: So sánh ứng suất và chuyển vị của vỏ trụ FGM biên ngàm hai đầu trong môi trường nhiệt theo phương pháp phần tử hữu hạn; So sánh kết quả phân bố nhiệt độ của vỏ trụ FG-CNTRC; So sánh kết quả phân bố nhiệt độ, chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ FG-CNTRC theo hai mô hình tính chất vật liệu phụ thuộc nhiệt độ và mô hình tính chất vật liệu không phụ thuộc nhiệt độ.

Nhận xét: Kết quả kiểm chứng cho thấy mô hình tính toán, phương pháp giải và chương trình tính đảm bảo độ tin cậy. Cần phải xét đến tính chất vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ khi nghiên cứu bài toán vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng nhiệt.

4.4. Khảo sát ảnh hưởng của điều kiện biên

Khảo sát vỏ trụ FG-CNTRC có các điều kiện biên: C-C, C-S, C-F, S-S, chịu tải trọng cơ nhiệt với hai trường hợp vỏ dài trung bình $L/R=4$ và vỏ ngắn $L/R=1$.

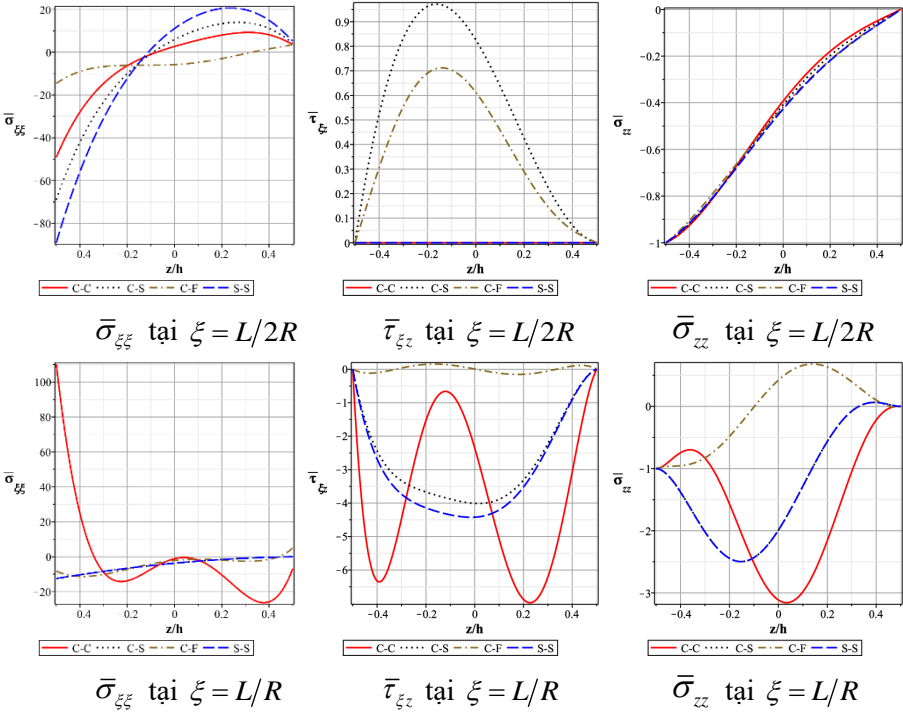
Nhận xét:

- Điều kiện biên ảnh hưởng lớn đến ứng suất tại điểm giữa ($\xi = L/2R$) khi vỏ ngắn ($L/R=1$) nhưng ảnh hưởng nhỏ khi vỏ dài trung bình ($L/R=4$).

- Điều kiện biên ảnh hưởng lớn đến ứng suất tại biên ($\xi = L/R$) trong cả hai trường hợp vỏ ngắn và vỏ trung bình. Trong đó, ứng suất của vỏ C-C biến thiên mạnh nhất so với các điều kiện biên khác. Ví dụ, trong trường hợp $L/R=4$ giá trị lớn nhất của $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại vị trí biên $\xi = L/R$ của vỏ có biên C-C, C-S, C-F, S-S lần lượt là 150.5, -12.5, -11.3, -12.6, tương tự với $\bar{\tau}_{\xi z}$ lần lượt là -7.3, -3.5, -0.17, -3.5, với $\bar{\sigma}_{zz}$ lần lượt là -3.5, -2.5, -1, -2.5.

- Giá trị ứng suất tại biên ($\xi = L/R$) có sự biến thiên đột ngột so với giá trị ứng suất tại điểm giữa ($\xi = L/2R$). Trong đó trường hợp biên ngàm thì sự biến thiên thể hiện rõ nét nhất. Ví dụ ở đối với vỏ C-C FG- Λ có $L/R=4$, giá trị lớn nhất

của $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại vị trí biên $\xi = L/R$ là 150.5 so với giá trị lớn nhất tại điểm giữa là $\xi = L/2R$ là 5.0, tương tự với $\bar{\tau}_{\xi z}$ là -7.3 so với 0; với $\bar{\sigma}_{zz}$ là -3.5 so với -1.0.



Hình 4.7 Ảnh hưởng của điều kiện biên đối với ứng suất của vỏ trụ FG- Λ có

$$V_{CNT}^* = 0.17, \quad L/R = 1, \quad R/h = 10, \quad T_{in} = 400K, \quad T_{out} = 300K$$

4.5. Khảo sát ảnh hưởng của các thông số vật liệu

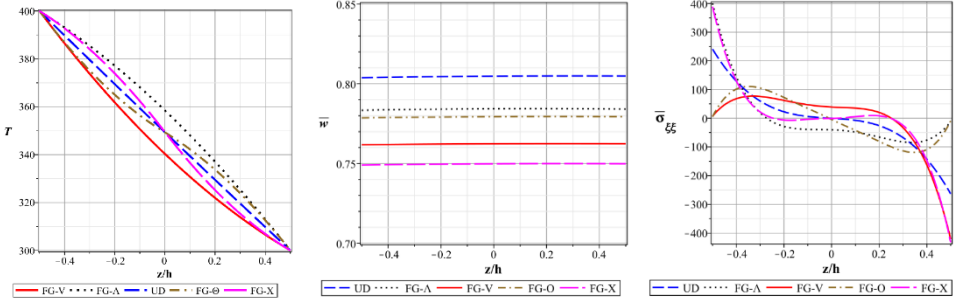
4.5.1. Ảnh hưởng của kiểu phân bố CNT

Khảo sát với 5 cấu hình phân bố CNT: FG- Λ , FG-V, UD, FG-O, FG-V, trong hai trường hợp: Vỏ chịu nhiệt độ bên trong và áp suất bên trong; Vỏ chịu nhiệt độ bên ngoài và áp suất bên trong.

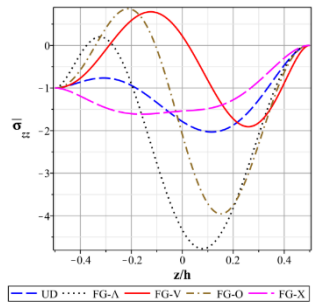
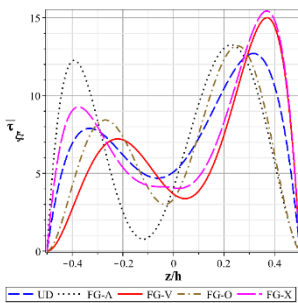
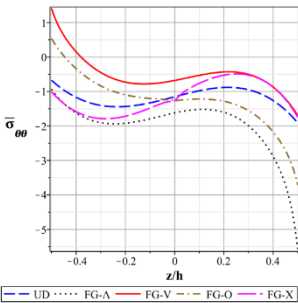
Nhận xét:

- Cấu hình phân bố CNT ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ trong vỏ. Đồ thị nhiệt độ FG-V và FG- Λ , FG-X và FG-O từng cặp một biến thiên ngược nhau, đồ thị phân bố nhiệt độ UD nằm giữa các trường hợp khác và biến thiên gần như tuyến tính. Khi tải nhiệt ở mặt trong, nhiệt độ của cấu hình FG-V có giá trị thấp nhất, FG- Λ có giá trị cao nhất. Ngược lại, khi tải nhiệt ở mặt ngoài, nhiệt độ của cấu hình

FG-V có giá trị cao nhất, FG- Λ có giá trị thấp nhất. Điều này có thể giải thích do hệ số dẫn nhiệt của CNT rất lớn so với vật liệu nền. Khi tải nhiệt bên trong, FG-V có phần lớn CNT tập trung ở mặt ngoài vỏ, nơi có nhiệt độ thấp hơn, ngược lại FG- Λ có phần lớn CNT tập trung ở mặt trong vỏ, nơi có nhiệt độ cao hơn.



Phân bố nhiệt độ

Độ võng tại $\xi = L/2R$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại $\xi = 0$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ tại $\xi = 0$ Ứng suất $\bar{\tau}_{\xi z}$ tại $\xi = 0$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{zz}$ tại $\xi = 0$

Hình 4.8 Ảnh hưởng của kiểu phân bố CNT đến nhiệt độ, chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ biên C-F với $L/R = 2$, $R/h = 20$, $T_{in} = 400K$, $T_{out} = 300K$

- Độ võng ở điểm giữa của vỏ phụ thuộc nhiều vào cấu hình phân bố CNT. Đối với vỏ chịu áp suất trong và nhiệt độ ở mặt trong thì độ võng trong trường hợp FG-X và FG-V có giá trị nhỏ nhất, tương ứng với giá trị tỷ lệ CNT ở mặt ngoài là lớn nhất. Đối với vỏ chịu áp suất trong và nhiệt độ ngoài, độ võng trong trường hợp phân bố kiểu FG- Λ là nhỏ nhất.

- Cấu hình phân bố CNT ảnh hưởng lớn đến ứng suất của vỏ tại điểm biên ($\xi = 0$) và điểm giữa của vỏ ($\xi = L/2R$). Các vị trí thể hiện sự ảnh hưởng lớn nhất của cấu hình phân bố CNT là tại các vị trí mặt trong, mặt ngoài hoặc mặt trung bình của vỏ. Điều này có thể giải thích là tại các vị trí này thì tỷ lệ thể tích CNT đạt

giá trị lớn nhất hoặc nhỏ nhất. Về xu hướng biến thiên, các giá trị ứng suất FG-V và FG- Λ , FG-O và FG-X có xu hướng biến thiên ngược nhau xung quanh giá trị ứng suất của trường hợp UD.

Đối với trường hợp 1 (áp suất trong và tải nhiệt ở mặt trong), giá trị lớn nhất của ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ trong trường hợp FG- Λ , FG-X là lớn nhất, còn giá trị lớn nhất của $\bar{\sigma}_{\theta\theta}, \bar{\tau}_{\xi z}$ trong trường hợp FG-V, FG-X là lớn nhất.

Đối với trường hợp 2 (áp suất trong và tải nhiệt ở mặt ngoài), giá trị lớn nhất của ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ của trường hợp phân bố FG-V, FG-X là lớn nhất, còn giá trị lớn nhất của $\bar{\sigma}_{\theta\theta}, \bar{\tau}_{\xi z}$ trong trường hợp FG- Λ , FG-X là lớn nhất.

Từ kết quả trên cho thấy cần lựa chọn cấu hình phân bố CNT phù hợp với các trường hợp chịu tải. Nguyên nhân là có sự chênh lệch rất lớn của giá trị hệ số truyền nhiệt và các mô-đun đàn hồi giữa vật liệu CNT và nền. Ví dụ các dạng tải trọng nhiệt tác động từ bên trong vỏ thì ưu tiên lựa chọn kiểu phân bố FG- Λ , FG-X; ngược lại tải trọng nhiệt tác động từ bên ngoài thì ưu tiên kiểu phân bố FG-V, FG-X, khi đó sẽ phát huy hiệu quả làm việc của vật liệu CNT.

4.5.2. Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích CNT

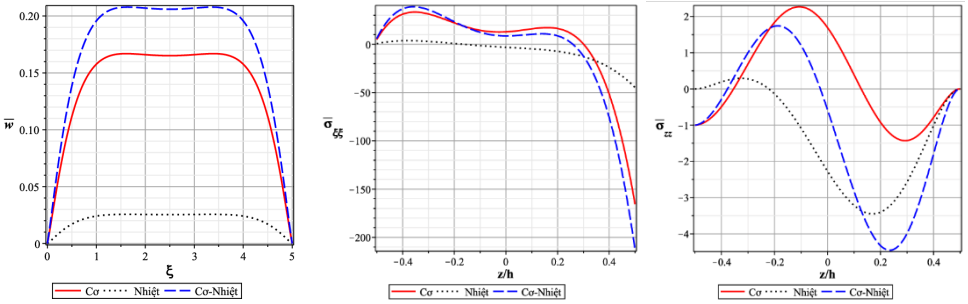
Khảo sát vỏ trụ FG- Λ chịu tải cơ nhiệt có tỷ lệ thể tích CNT khác nhau.

Nhận xét: Đối với vỏ FG- Λ , chịu tải trọng nhiệt ở mặt trong thì tại một vị trí toạ độ z, trường hợp có tỷ lệ thể tích CNT cao hơn sẽ có nhiệt độ cao hơn so với trường hợp có tỷ lệ thể tích CNT thấp hơn. Điều này có thể được giải thích là do vật liệu gia cường CNT có khả năng dẫn nhiệt cao hơn nhiều so với vật liệu nền. Độ võng tại vị trí điểm giữa vỏ giảm khi tỷ lệ thể tích CNT tăng lên. Tại vị trí giữa $\xi = L/2R$, khi tỷ lệ thể tích tăng lên thì giá trị lớn nhất của ứng suất tăng lên. Tại vị trí biên ngàm ($\xi = 0$), giá trị lớn nhất của các ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}, \bar{\tau}_{\xi z}$ khi $V_{CNT}^* = 0.28$ lớn hơn các trường hợp, giá trị lớn nhất của ứng suất $\bar{\sigma}_{\theta\theta}, \bar{\sigma}_{zz}$ khi $V_{CNT}^* = 0.17$ lớn hơn các trường hợp khác.

4.6. Khảo sát ảnh hưởng của tải trọng

4.6.1. Ảnh hưởng của loại tải trọng

Khảo sát vỏ trụ FG-CNTRC với các trường hợp: Vỏ chỉ chịu tải trọng cơ; Vỏ chỉ chịu tải trọng nhiệt; Vỏ chịu tải trọng cơ-nhiệt đồng thời.



Độ võng tại lớp giữa $z=0$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại $\xi=0$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{zz}$ tại $\xi=0$

Hình 4.11 Ảnh hưởng của loại tải đến chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên của vỏ trụ C-C FG-V với $V_{CNT}^* = 0.28$, $L/R = 5$, $R/h = 10$

Nhận xét:

- Khi chỉ có tải nhiệt vẫn xuất hiện độ võng do sự giãn nở nhiệt. Khi có thêm tải trọng áp suất bên trong kết hợp với nguồn nhiệt bên ngoài độ võng của vỏ tăng lên. Tương tự ứng suất của trường hợp tải trọng cơ nhiệt đồng thời tăng lên khi so sánh với các trường hợp chỉ chịu tải trọng cơ hoặc tải trọng nhiệt.

- Chuyển vị và ứng suất trong trường hợp chịu tải trọng cơ nhiệt đồng thời không phải là giá trị tổng đơn thuần của trường hợp chỉ chịu tải trọng nhiệt hoặc cơ. Sự khác biệt này thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ đến tính chất vật liệu.

4.6.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và tải trọng áp suất

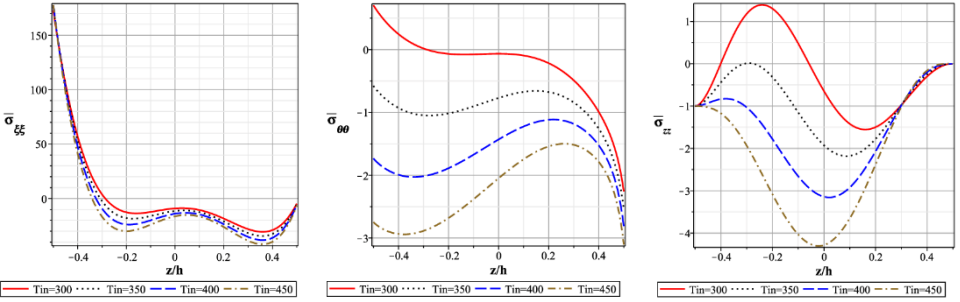
Trong phần này thực hiện khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ và tải trọng áp suất đến chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên của vỏ.

Trường hợp 1: Vỏ chịu tải áp suất trong, tải nhiệt độ ở mặt trong.

Nhận xét:

- Khi nhiệt độ tăng giá trị lớn nhất của ứng suất tăng lên, độ võng tại vị trí giữa của vỏ tăng lên do biến dạng nhiệt của vỏ tăng và thông số độ cứng vỏ giảm.

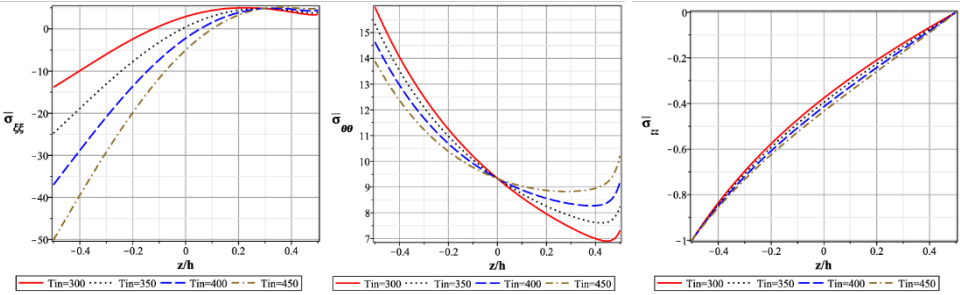
- Tại vị trí giữa vỏ $\xi = L/(2R)$, nhiệt độ ảnh hưởng rõ nét nhất đến các ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}, \bar{\sigma}_{\theta\theta}$ ở bề mặt trong. Điều này có thể được giải thích là do tác dụng đồng thời của độ chênh lệch nhiệt độ ở mặt trong kết hợp với giá trị tỷ lệ thể tích CNT đạt giá trị cực đại (nhỏ nhất, lớn nhất) ở mặt trong. Ứng suất cắt $\bar{\tau}_{\xi z}$ đạt giá trị lớn nhất tại vị trí $z \approx -0.17; 0; 0.17$ đối với trường hợp có phân bố FG- Λ .



Ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại $\xi = 0$

Ứng suất $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ tại $\xi = 0$

Ứng suất $\bar{\sigma}_{zz}$ tại $\xi = 0$



Ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$ tại $\xi = L/2R$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ tại $\xi = L/2R$ Ứng suất $\bar{\sigma}_{zz}$ tại $\xi = L/2R$

Hình 4.12 Ảnh hưởng của nhiệt độ bên trong đối với chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ C-S FG- Λ với $V_{CNT}^* = 0.28$, $T_{out} = 300K$, $L/R = 3$, $R/h = 10$

- Tại vị trí biên ngàm $\xi = 0$, nhiệt độ ảnh hưởng rõ nét nhất đến ứng suất $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ ở bề mặt trong, nhưng ảnh hưởng không nhiều đến ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}$. Giá trị ứng suất cắt $\bar{\tau}_{\xi z}$ tại biên ngàm cũng có giá trị lớn hơn nhiều so với giá trị tại điểm giữa và đạt cực đại tại vị trí $z \approx 0.3$.

Trường hợp 2: Vỏ chịu tải áp suất trong, tải nhiệt độ ở mặt ngoài.

Nhận xét:

- Tải trọng nhiệt ảnh hưởng lớn đến phân bố nhiệt độ, chuyển vị và ứng suất của vỏ. Khi nhiệt độ bề mặt ngoài tăng thì chuyển vị tăng. Giá trị độ võng ở vị trí giữa khi $T_{out}=450; 400; 350K$ tương ứng xấp xỉ bằng 138%; 125%; 112% so với trường hợp $T_{out}=300K$.

- Tải trọng nhiệt ảnh hưởng đến ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}, \bar{\sigma}_{\theta\theta}$ nhiều hơn đối với $\bar{\sigma}_{zz}$. Sự ảnh hưởng của tải trọng nhiệt đến ứng suất $\bar{\sigma}_{\xi\xi}, \bar{\sigma}_{\theta\theta}$ tăng dần từ mặt trong ra mặt ngoài tương ứng với giá trị tỷ lệ thể tích V_{CNT} tăng từ 0 đến giá trị lớn nhất. Giá trị $\bar{\sigma}_{zz}$ ở vị trí giữa biến thiên gần như tuyến tính từ giá trị áp suất ở mặt trong đến giá trị áp suất ở mặt ngoài. Còn tại vị trí biên, giá trị $\bar{\sigma}_{zz}$ có sự khác biệt lớn giữa các trường hợp, khi nhiệt độ càng tăng thì giá trị $\bar{\sigma}_{zz}$ càng lớn.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Chương 4 đã thực hiện nghiên cứu vỏ trụ FG-CNTRC chịu tác dụng của tải trọng cơ nhiệt theo lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang và tính chất vật liệu phụ thuộc nhiệt độ. Thông qua các ví dụ kiểm chứng và kết quả khảo sát cho thấy sự cần thiết phải kể đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến tính chất vật liệu. Phân bố nhiệt độ trong vỏ xác định dựa trên phương trình truyền nhiệt và điều kiện biên nhiệt của vỏ. Khảo sát ảnh hưởng của điều kiện biên, thông số vật liệu, tải trọng nhiệt đến chuyển vị và ứng suất của vỏ trong các trường hợp khác nhau từ đó rút ra các nhận xét có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

KẾT LUẬN

1. Kết quả đạt được và những đóng góp mới của luận án

Với mong muốn thu được những kết quả có ý nghĩa thực tiễn, đồng thời góp phần bổ sung và hoàn thiện mô hình, phương pháp tính đối với các kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC, luận án đã thực hiện phân tích tĩnh vỏ trụ FG-CNTRC chịu tác dụng của tải trọng cơ và nhiệt độ. Các kết quả đã đạt được của luận án như sau:

- Sử dụng LT biến dạng cắt bậc cao kiểu quasi-3D có kể đến ứng suất pháp tuyến ngang để thiết lập hệ phương trình cân bằng và các điều kiện biên tương ứng của vỏ trụ FG-CNTRC chịu đồng thời tải trọng cơ và nhiệt. Các kết quả khảo sát cho thấy sự cần thiết phải kể đến ảnh hưởng của ứng suất pháp tuyến khi tính toán đối với vỏ dày, bên cạnh đó khi khảo sát ứng suất ở khu vực biên thì khuyến cáo cần xét đến ảnh hưởng ứng suất pháp tuyến ngang với cả vỏ mỏng.

- Mô hình tính trong luận án đã xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến các tính chất vật liệu. Giả thiết này hoàn toàn phù hợp với thực tế là các tính chất cơ lý của vật liệu chịu ảnh hưởng lớn bởi nhiệt độ. Mặt khác, trong khi đa số các nghiên cứu khác thường giả sử hàm phân bố nhiệt độ trong vỏ là dạng hàm cho trước (hằng số,

tuyến tính, dạng sin..) để phù hợp với phương pháp giải thì luận án sử dụng hàm phân bố nhiệt độ xác định từ phương trình truyền nhiệt. Phương trình truyền nhiệt đã bao hàm được ảnh hưởng của kết cấu, vật liệu, môi trường đến sự phân bố nhiệt độ trong vỏ.

- Tiếp cận theo hướng giải tích bằng cách sử dụng chuỗi lượng giác để xấp xỉ cho hàm chuyển vị, tải trọng và phép biến đổi Laplace để tìm biểu thức nghiệm chuyển vị của hệ phương trình cân bằng. Phương pháp sử dụng trong luận án cho phép xử lý hiệu quả các trường hợp: vỏ có điều kiện khác nhau, tải trọng phân bố không đều, tải trọng tác dụng lên một phần vỏ... mà các phương pháp giải tích khác thường gặp khó khăn.

- Xây dựng chương trình tính toán và thực hiện các khảo sát nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố (điều kiện biên, vật liệu, hình học, tải trọng) đến ứng xử cơ học của vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ và nhiệt độ, trong đó luận án cũng đã tập trung phân tích trạng thái ứng suất tại vùng biên. Từ các kết quả khảo sát đã đưa ra những khuyến cáo quan trọng phục vụ quá trình tính toán thiết kế, khai thác sử dụng kết cấu bằng vật liệu FG-CNTRC.

Từ kết quả đã đạt được có thể rút ra một số đóng góp mới của luận án như sau:

- Xây dựng được hệ phương trình cân bằng và phương pháp giải để phân tích ứng xử tuyến tính của vỏ trụ composite cơ tính biến thiên được gia cường bởi các ống nano cacbon chịu tải trọng cơ nhiệt bằng cách tiếp cận giải tích, sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao Quasi-3D. Phương pháp tính đã được so sánh, đối chiếu với kết quả đã công bố cho thấy có cơ sở tin cậy.

- Các số liệu, kết quả khảo sát số trên nhiều lớp bài toán xem xét ảnh hưởng của các yếu tố: điều kiện biên, cách bố trí các ống nano cacbon gia cường, tải trọng, nhiệt độ, ... đến ứng xử tĩnh của vỏ. Các số liệu, nhận xét và kết luận có ý nghĩa khoa học, thực tiễn và định hướng ứng dụng.

2. Hướng phát triển tiếp theo của luận án

- Phân tích ổn định, phân tích dao động tự do, phân tích đáp ứng động lực học của vỏ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt.

- Phân tích đáp ứng tĩnh đối với vỏ FG-CNTRC có kết cấu phức tạp (có lỗ rỗng, gân gia cường, trên nền đàn hồi, biên mềm, vỏ đa lớp...)

- Phân tích đáp ứng tĩnh đối với vỏ FG-CNTRC chịu tác động hỗn hợp của các loại tải trọng khác nhau (cơ, nhiệt, âm, khí động, tải trọng nổ,...)

- Nghiên cứu tối ưu hoá vật liệu và tối ưu hoá kết cấu vỏ FG-CNTRC.

CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Dương Văn Quang**, Trần Ngọc Đoàn, Đoàn Trắc Luật, Vũ Xuân Đức, (2021). Tính toán tĩnh vỏ trụ nanocomposite có cơ tính biến thiên theo lý thuyết biến dạng cắt bậc cao có kể đến ứng suất pháp tuyến, *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học toàn quốc Cơ học vật rắn lần thứ XV*, pp. 779-788.
2. **Van Quang Duong**, Ngọc Doan Tran, Doan Trac Luat, Do Van Thom, (2022), Static analysis and boundary effect of FG-CNTRC cylindrical shells with various boundary conditions using quasi-3D shear and normal deformations theory, *Structures*, 44, pp. 828-850. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.039> (ISI, Q1)
3. **Van Quang Duong**, Lac Hong Nguyen, Ngọc Doan Tran, Trac Luat Doan, The Hung Tran (2022). Bending Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotubes Reinforced Composite Cylindrical Shell Using Higher-Order Shear Deformation Theory. *Proceedings of the International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation, and Sustainable Development 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99666-6_90 (SCOPUS)
4. **Van Quang Duong**, Ngọc Doan Tran, Trac Luat Doan (2022). Static investigation of a functionally graded carbon nanotubes reinforced composite cylindrical shell, double-ended clamped subjected to external pressure loads. *Journal of Science and Technique*, 17(05), pp. 28-46. <https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v17.n05.528>
5. **Dương Văn Quang**, Trần Ngọc Đoàn, Đoàn Trắc Luật, (2022), Tính toán vỏ trụ FG-CNTRC chịu tác dụng của tải trọng cơ nhiệt bằng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao và thông số vật liệu phụ thuộc nhiệt độ, *Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI*, Hà Nội, 02-03/12/2022, Tập 1, pp. 118-128.
6. **Duong Van Quang**, Tran Ngoc Doan, Doan Trac Luat, (2022). Investigation of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite cylindrical shell subjected to external pressure, *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ 17*, Hà Nội, 3/2022, pp. 612-624.
7. **Dương Văn Quang**, Trần Ngọc Đoàn, Đoàn Trắc Luật, Nguyễn Lê Hùng, (2023). Nghiên cứu vỏ trụ FG-CNTRC chịu tải trọng cơ nhiệt có xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến thông số vật liệu bằng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao, *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ 18*, Hà Nội, 3/2023.