

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI

Lê Kim Ngọc

TÍNH TOÁN TĨNH VÀ DAO ĐỘNG
CỦA KẾT CẤU TẤM COMPOSITE ÁP ĐIỆN

Chuyên ngành: Cơ học vật thể rắn
Mã số: 62.44.21.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2010

Công trình được hoàn thành tại:
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI

Người hướng dẫn khoa học: **GS.TS. Trần Ích Thịnh**
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Phản biện 1: **GS. TS. Nguyễn Văn Phó**
Trường Đại học Xây dựng

Phản biện 2: **GS.TSKH. Đào Huy Bích**
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQG HN

Phản biện 3: **GS. TS. Hoàng Xuân Lượng**
Học viện Kỹ thuật Quân sự

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Trường
hợp tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
vào hồi 14 giờ ngày 24 tháng 7 năm 2010

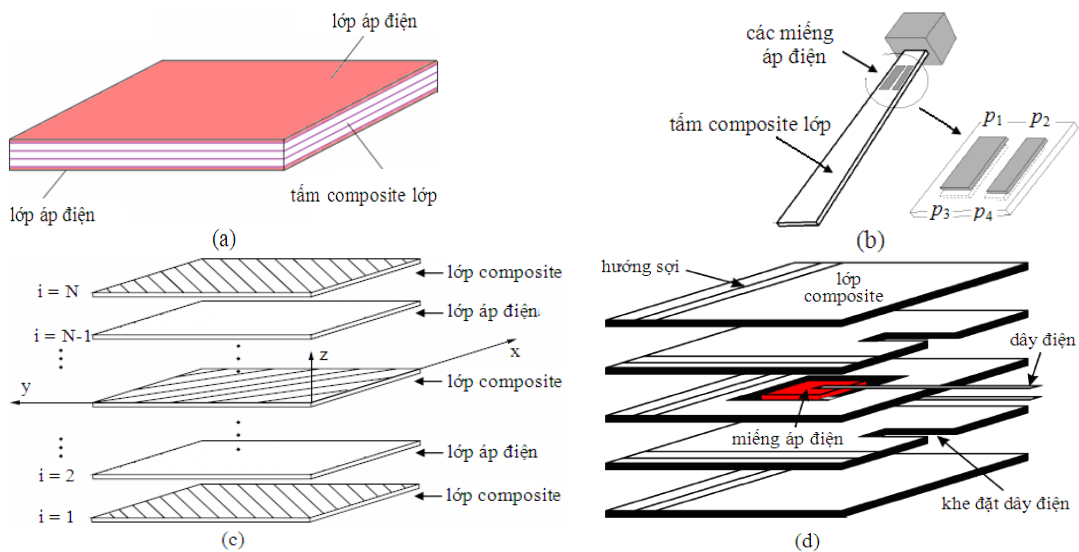
Có thể tìm hiểu luận án tại: Thư viện Quốc gia
Thư viện Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

A. GIỚI THIỆU LUẬN ÁN

1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Vật liệu composite được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp hiện đại bởi chúng có nhiều tính chất ưu việt. Vật liệu áp điện (VLAD) là vật liệu có tính chất khi chịu lực cơ học tác động vào nó thì nó tạo ra dòng điện và ngược lại khi áp vào nó một trường điện thì nó bị biến dạng.

Tấm composite áp điện là tấm composite (thường là nhiều lớp) có chứa những lớp hay những miếng VLAD. Hình 1.2 minh họa tấm composite áp điện.



Hình 1.2. (a) - Tấm composite lớp có lớp áp điện phủ mặt trên và mặt dưới, (b) - Tấm conxon composite lớp có gắn các cặp miếng áp điện, (c) - Tấm composite lớp có chứa lớp áp điện, (d) - Tấm composite lớp có chứa miếng áp điện.

Trong những năm gần đây, vật liệu composite và kết cấu composite áp điện được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu cả về mặt công nghệ và cơ học. Những thành tựu đã được ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp mũi nhọn khác nhau như cảm rung, điều khiển hình dáng, giảm ồn, điều khiển chính xác,...

Ở Việt Nam, hướng nghiên cứu về ứng xử cơ học (mô phỏng số cũng như thực nghiệm) của kết cấu composite áp điện còn mới mẻ và còn rất ít kết quả công bố. Xuất phát từ thực tế đó, đề tài luận án: "**Tính toán tĩnh và dao động của kết cấu tấm composite áp điện**" được đặt ra và thực hiện.

2. MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về VLAD, về tấm composite lớp để từ đó xây dựng thuật toán và chương trình tính cho phép mô phỏng ứng xử tĩnh và dao động của tấm composite áp điện. Trên cơ sở thuật toán và chương trình tính thiết lập tác giả nghiên cứu những ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau đến

ứng xử tĩnh và dao động của kết cấu tấm composite áp điện; tính toán điều khiển chuyển vị tĩnh kết cấu tấm composite có gắn những lớp hoặc những miếng áp điện; ứng dụng thuật toán di truyền để giải bài toán tối ưu liên quan đến kết cấu tấm composite áp điện; thực nghiệm để nghiên cứu ứng xử tĩnh và động kết cấu composite áp điện và kiểm nghiệm mô hình tính bằng PP PTHH.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

- Phương pháp số: Tính toán bằng PP PTHH xây dựng dựa trên lý thuyết tấm của Mindlin, ứng dụng thuật toán di truyền, thuật toán tích phân Newmark cho một số bài toán cụ thể.

- Phương pháp thực nghiệm: xây dựng và tiến hành một số thí nghiệm đo và điều khiển chuyển vị tĩnh, tần số dao động riêng của tấm composite sợi thủy tinh/nhựa polyester (chế tạo tại Việt Nam) có gắn cặp miếng áp điện.

4. NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

- Dựa vào lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất cho tấm composite lớp, luận án xây dựng được thuật toán phần tử hữu hạn (PTHH) và ba bộ chương trình tính viết bằng ngôn ngữ Matlab để giải bài toán tĩnh, bài toán dao động tự do và bài toán tối ưu đối với kết cấu tấm composite áp điện.

- Về bài toán uốn tĩnh, luận án: khảo sát sự tác động qua lại giữa hai trường điện và cơ qua những tính toán đối với dầm lưỡng cấu - dầm chỉ gồm hai lớp làm bằng vật liệu áp điện Poly Vinyl Dene Fluoride; tính toán điều khiển chủ động (active control) độ võng của tấm composite tựa bản lề 4 cạnh bằng cách gắn lên mặt trên và dưới của tấm những lớp áp điện và sử dụng mạch hồi tiếp - hệ thống thiết bị có thể thu điện tích từ lớp áp điện này (lớp áp điện đóng vai trò cảm biến) chuyển thành điện thế rồi khuếch đại để đưa vào tác động lớp áp điện khác (lớp áp điện đóng vai trò kích thích); tính toán điều khiển thụ động (passive control) độ võng của tấm composite bị ngàm một cạnh, ba cạnh kia tự do bằng cách gắn những lớp hay những miếng áp điện lên mặt tấm và áp đặt điện thế lên các lớp hay miếng áp điện; tính toán ảnh hưởng của góc sợi các lớp composite, của vị trí các lớp hay các miếng áp điện, của kích thước các miếng áp điện đến độ võng của kết cấu tấm composite áp điện.

- Về bài toán dao động tự do, luận án tính toán ảnh hưởng: của hiệu ứng áp điện đến tần số dao động riêng của kết cấu tấm composite áp điện $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$ bị ngàm bốn cạnh; của góc sợi đến tần số dao động riêng của tấm composite áp điện có cấu hình đối xứng $[p/-\theta^0/\theta^0/\theta^0/-\theta^0/p]$ và bất đối xứng $[p/-\theta^0/\theta^0/-\theta^0/\theta^0/p]$ đều bị ngàm 4 cạnh; của vị trí các miếng áp điện đến tần số dao

động riêng, đến khả năng triệt dao động tự do của tấm composite hình vuông có cấu hình $[-30^0/30^0]_s$ tựa bản lề 4 cạnh; của hệ số điều khiển hồi tiếp đến khả năng triệt dao động tự do của kết cấu tấm conxon composite cấu hình $[0^0/90^0]$ có gắn một cặp áp điện sát cạnh bị ngàm.

- Giải bài toán tối ưu, ứng dụng thuật toán di truyền luận án chỉ ra được vị trí hợp lý cần dán những miếng áp điện, điện thế hợp lý cần áp đặt và góc sợi hợp lý của tấm conxon composite có cấu hình đối xứng $[\theta/(90^0+\theta)/(90^0+\theta)/\theta]$ và bất đối xứng $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ nhằm đạt được độ võng mong muốn.

- Thí nghiệm đo độ võng và đo tần số dao động tự do của hai loại tấm bằng nhôm và bằng vật liệu composite gồm hai lớp, đúng trục $[0^0/90^0]$ và lệch trục $[45^0/-45^0]$ chế tạo tại Việt Nam từ sợi thủy tinh (40%) nền polyester không no (60%) được tiến hành. Tấm bị ngàm một cạnh, ba cạnh kia tự do, có gắn một cặp miếng áp điện PZT (Lead Zirconate Titanates) ở sát cạnh bị ngàm và điều khiển hai loại này bằng cách áp đặt điện thế tính toán trước. Kiểm nghiệm mô hình tính bằng phương pháp PTHH qua so sánh giữa kết quả thực nghiệm và kết quả tính PTHH.

5. CẤU TRÚC CỦA LUẬN ÁN

Luận án gồm: mở đầu, 5 chương, kết luận chung, danh mục các bài báo đã công bố liên quan đến đề tài luận án, tài liệu tham khảo và phụ lục.

B. NỘI DUNG CHÍNH CỦA LUẬN ÁN

Chương 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Chương 1 giới thiệu tổng quan về tình hình nghiên cứu vật liệu composite, về VLAD, về các phương pháp tính toán và kết quả nghiên cứu chung về cơ học các kết cấu bằng vật liệu composite có kết hợp VLAD của các nhà khoa học trong và ngoài nước. Từ đó rút ra những vấn đề cần nghiên cứu và phát triển. Trên cơ sở đó xác định phạm vi nghiên cứu cho đề tài.

Chương 2: MỘT SỐ HỆ THỨC CƠ HỌC TRONG TÍNH TOÁN TẤM COMPOSITE ÁP ĐIỆN

2.1. Đặt vấn đề

Chương 2 trình bày một số khái niệm cơ bản về VLAD và các hệ thức mô tả tương tác cơ - điện trong VLAD; trình bày một số hệ thức cơ học trong tính toán tấm composite lớp và xây dựng một số hệ thức cơ học cho tính toán tấm composite áp điện.

2.2. Vật liệu áp điện và tương tác cơ - điện

Trong mục 2.2.1 trình bày về nguồn gốc hiện tượng áp điện; về sự phân cực trong VLAD; về hệ số biến dạng áp điện, hệ số ứng suất áp điện và một số đại lượng liên quan.

Trong mục 2.2.2 dẫn ra các hệ thức biểu diễn sự tương tác cơ - điện trong VLAD, đặc trưng là cặp hệ thức sau đây:

$$\{\sigma\} = [c]\{\epsilon\} - [e]\{E\} \quad (2.2.15)$$

$$\{D\} = [e]^T \{\epsilon\} + [p]\{E\} \quad (2.2.16)$$

Trong (2.2.15), ứng suất cơ $\{\sigma\}$ liên hệ với điện trường $\{E\}$ qua hệ số ứng suất áp điện $[e]$ khi không có biến dạng cơ, ở đây $[c]$ là độ cứng khi điện trường là hằng số. Trong (2.2.16), điện tích cảm ứng $\{D\}$ liên hệ với biến dạng $\{\epsilon\}$ qua hệ số áp điện $[e]^T$ khi điện trường bằng 0, ở đây $[p]$ là hằng số điện môi ứng với biến dạng là hằng số.

Mục 2.2.3 trình bày về hai dạng được sử dụng của VLAD: dạng thứ nhất là các lớp hoặc các miếng *Kích thích áp điện* (Piezoelectric Actuator), lợi dụng tính chất biến dạng của VLAD khi áp cho nó một điện trường; dạng thứ hai là các lớp hoặc các miếng *Cảm biến áp điện* (Piezoelectric Sensor), lợi dụng tính chất sinh điện tích của VLAD khi tác động cơ học lên nó.

2.3. Các hệ thức cơ bản trong tính toán tấm composite lớp theo lý thuyết tấm của Mindlin - Reissner

Trường chuyển vị theo lý thuyết tấm của Mindlin, được biểu diễn dưới dạng:

$$(u, v, w) = (u_0, v_0, w_0) + z(\theta_x, \theta_y, 0) \quad (2.3.1)$$

Ở đây, u_0 , v_0 và w_0 là các thành phần chuyển vị của điểm trên mặt trung bình ($z = 0$) theo các hướng x , y và z ; θ_x và θ_y là góc xoay của pháp tuyến mặt trung bình quanh các trục y và x .

Từ (2.3.1), ta tính được biến dạng, ứng suất. Lực màng, mômen uốn, mômen xoắn và các thành phần lực cắt được xác định bằng cách tích phân các thành phần ứng suất theo chiều dày của tấm. Phương trình ứng xử cơ học của tấm nhiều lớp được viết dưới dạng:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] \\ [B] & [D] & [0] \\ [0] & [0] & [F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\epsilon^0\} \\ \{\kappa\} \\ \{\gamma^0\} \end{Bmatrix} \quad (2.3.19)$$

Trong đó, $(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q_{ij}]_k (1, z, z^2) dz \quad i, j = 1, 2, 6$

$$[F_{ij}] = \sum_{k=1}^n f (h_k - h_{k-1}) [C'_{ij}]_k \quad f = 5/6; i, j = 4, 5$$

n : số lớp composite. $[Q'_{ij}]$, $[C'_{ij}]$ được cho cụ thể trong luận án.

2.4. Phương trình ứng xử cơ học của tấm composite áp điện

Khi những lớp hay những miếng áp điện được giả thiết gắn lý tưởng với các lớp của tấm composite thì những lớp hay những miếng áp điện có vai trò như các lớp trong tấm composite lớp. Ứng xử cơ học tấm composite áp điện được biểu diễn bởi hệ thức (2.2.15) và (2.2.16).

Điểm khác biệt trong quá trình thiết lập phương trình ứng xử cơ học của tấm composite áp điện so với khi thiết lập phương trình ứng xử cơ học của tấm nhiều lớp đó là:

Cần tính ứng suất ($\{\sigma^E\}$) gây ra bởi điện trường áp đặt (E) (trong 2.2.15):

$$\{\sigma^E\}_{(5 \times 1)} = \{\sigma_{xx}^E \ \sigma_{yy}^E \ \sigma_{xy}^E \ \sigma_{yz}^E \ \sigma_{zx}^E\}^T = [e]_k \{E_k\} = [C'_{ij}]_k [d]_k \{E_k\} \quad (2.3.23)$$

(5×3) (3×1) (5×5) (5×3) (3×1)

Cần tính điện tích cảm ứng theo 3 phương ($\{D_k^p\}_{3 \times 1} = \{(D_{11}^p)_k \ (D_{22}^p)_k \ (D_{33}^p)_k\}^T$) (trong 2.2.16) ứng với mỗi lớp áp điện k bằng cách tích phân biểu thức (2.2.16) theo chiều dày lớp áp điện.

Kết thúc mục 2.4, phương trình ứng xử cơ học của tấm composite nhiều lớp có những lớp áp điện được thiết lập và biểu diễn như sau:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \\ \{D_k^p\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] & [\bar{e}]_k \\ [B] & [D] & [0] & [\bar{e}]_k \\ [0] & [0] & [F] & [\tilde{e}]_k \\ [\bar{e}]_k^T & [\bar{e}]_k^T & [\tilde{e}]_k^T & [\bar{p}]_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\kappa\} \\ \{\gamma^0\} \\ \{-E\}_k \end{Bmatrix} \quad (2.3.25)$$

Trong đó, $\{N\}$, $\{M\}$, $\{Q\}$ gồm các thành phần nội lực tương ứng với ứng suất cơ của các lớp composite, lớp áp điện và thành phần nội lực tương ứng với ứng suất gây ra bởi điện trường áp đặt. (P): piezo - áp điện.

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q'_{ij}]_k (1, z, z^2) dz + \sum_{k=1}^m \int_{h_{k-1}}^{h_k} [C_{ij}]_k (1, z, z^2) dz \quad i, j = 1, 2, 6$$

$$[F_{ij}] = \sum_{k=1}^n f(h_k - h_{k-1}) [C'_{ij}]_k + \sum_{k=1}^m f(h_k - h_{k-1}) [C_{ij}]_k \quad f=5/6; i, j = 4, 5$$

$$[\bar{p}]_k = \sum_{k=1}^m (h_k - h_{k-1}) [p_{(3 \times 3)}]_k \text{ với ma trận hằng số điện môi } [p]_k = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} \end{bmatrix}$$

$$[\bar{e}]_k = \sum_{k=1}^m (h_k - h_{k-1}) [e_{(3 \times 3)}]_k; [\bar{e}]_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (h_k^2 - h_{k-1}^2) [e_{(3 \times 3)}]_k; [\tilde{e}]_k = \sum_{k=1}^m (h_k - h_{k-1}) [e_{(2 \times 2)}]_k$$

n : số lớp composite; m : số lớp áp điện.

Từ (2.3.25) ta thấy rõ các tương tác cơ - điện trong tấm vật liệu composite áp điện. Cụ thể, tải trọng cơ học (N, M, Q) không chỉ gây ra biến dạng cơ học

(ε^0 , κ , γ^0) mà còn gây ra điện trường (E) và ngược lại, điện tích (D^p) không chỉ gây ra điện trường (E) mà còn gây ra các biến dạng cơ học (ε^0 , κ , γ^0).

2.5. Kết luận chương 2

Với giả thiết VLAD và VL composite là đàn hồi tuyến tính và biến dạng bé; các hệ số đàn hồi, hệ số ứng suất hay hệ số biến dạng áp điện, hệ số điện môi là hằng số khi điện trường hay điện tích cảm ứng thay đổi; điện thế luôn là hằng số trên mặt lớp áp điện và biến thiên tuyến tính theo chiều dày của lớp áp điện; trên cơ sở lý thuyết tấm của Mindlin-Reissner, luận án đã dẫn ra: Các hệ thức mô tả tương tác giữa trường điện và trường cơ trong VLAD (cặp hệ thức 2.2.15 và 2.2.16 cùng một số hệ thức khác); phương trình mô tả ứng xử cơ học cho VL composite nhiều lớp (2.3.19); phương trình ứng xử cơ học cho VL composite nhiều lớp có chứa các lớp bằng VLAD (2.3.25).

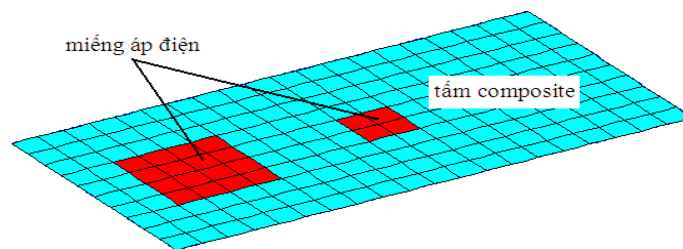
Chương 3: THUẬT TOÁN PTHH TÍNH TOÁN TẤM COMPOSITE ÁP ĐIỆN

3.1. Đặt vấn đề

Dựa vào các phương trình mô tả ứng xử cơ học của VL composite áp điện đã thiết lập trong chương 2, chương 3 của luận án tập trung vào xây dựng thuật toán tính tấm composite áp điện chịu uốn và tính dao động tự do của kết cấu tấm composite áp điện bằng PP PTHH.

3.2. Thiết lập thuật toán

Trường chuyển vị được biểu diễn như (2.3.1). Phần tử tứ giác đẳng tham số 9 nút, mỗi nút có 5 bậc tự do (degree of freedom - DOF) cơ và 1 DOF điện thế được sử dụng. Tấm được rời rạc hoá bằng lưới PTHH (Hình 3.3).



Hình 3.3. Tấm composite áp điện với lưới PTHH.

Véc tơ chuyển vị nút phần tử nơi tấm không có lớp hay miếng áp điện được biểu diễn bởi:

$$\{q_e^u\}_{(45 \times 1)} = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \theta_{x1} \ \theta_{y1} \ u_2 \ v_2 \ \dots \ \theta_{x9} \ \theta_{y9}\}^T \quad (3.3)$$

Véc tơ chuyển vị nút phần tử nơi tấm có lớp hay miếng áp điện được biểu diễn bởi:

$$\{q_e\} = \left\{ \begin{matrix} \{q_e^u\}_{45 \times 1} \\ \{q_e^{\phi_k}\}_{9 \times 1} \end{matrix} \right\} = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \theta_{x1} \ \theta_{y1} \ u_2 \ v_2 \ \dots \ \theta_{x9} \ \theta_{y9} \ \phi_{k1} \ \phi_{k2} \ \dots \ \phi_{k9}\}^T \quad (3.4)$$

Ở đây, (e) ký hiệu phần tử; (u) để chỉ những giá trị thuộc về chuyển vị cơ; (ϕ) để chỉ những giá trị thuộc về điện thế; (k) để chỉ lớp áp điện thứ k ; (q_e^u) là

chuyển vị nút phần tử; $(q_e^{\phi_k})$ là điện thế nút phần tử ứng với lớp áp điện k ; $k = \overline{1, m}$; m là số lớp áp điện.

Bốn mục 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 và 3.2.4 trình bày cách biểu diễn trường chuyển vị, biến dạng, ứng suất theo ẩn là chuyển vị nút phần tử; biểu diễn điện thế, điện trường, điện tích cảm ứng theo ẩn là điện thế nút phần tử và xây dựng phương trình phần tử bằng cách áp dụng nguyên lý Hamilton. Tính: động năng, thế năng biến dạng đàn hồi, công của lực điện trường, công gây ra bởi ngoại lực và điện tích ngoài, rồi biến đổi, rút gọn biểu thức, ta thu được (3.28) và (3.29) như sau:

$$[M_{uu}] \{\ddot{q}_e^u\} + [K_{uu}] \{q_e^u\} + [K_{u\phi}] \{q_e^{\phi_k}\} = \{F^M\} \quad (3.28)$$

$$\text{và} \quad [K_{\phi u}] \{q_e^u\} - [K_{\phi\phi}] \{q_e^{\phi_k}\} = \{Q_c\} \quad (3.29)$$

Ở đây,

Ma trận khối lượng phần tử được tính bởi:

$$[M_{uu}]_{45 \times 45} = \int_{V_e} \rho [N_i^u]^T [m]_{5 \times 5} [N_i^u] dV_e \quad (3.30)$$

K_{uu} là ma trận độ cứng cơ của phần tử và được tính bởi:

$$[K_{uu}]_{45 \times 45} = \int_{V_e} ([B_u]^T)_{45 \times 8} [H]_{8 \times 8} [B_u]_{8 \times 45} dV_e \quad (3.31)$$

$K_{u\phi}$ là ma trận độ cứng tương tác cơ-điện của phần tử và được tính bởi:

$$[K_{u\phi}]_{45 \times 9} = \int_{V_e} ([B_u]^T)_{45 \times 8} [e]_{8 \times 3} [B_\phi]_{3 \times 9} dV_e \quad (3.32)$$

$K_{\phi u}$ là ma trận độ cứng tương tác điện-cơ của phần tử và được tính bởi:

$$[K_{\phi u}]_{9 \times 45} = [K_{u\phi}]^T \quad (3.33)$$

$K_{\phi\phi}$ là ma trận độ cứng điện môi (của VLAD) của phần tử và được tính bởi:

$$[K_{\phi\phi}]_{9 \times 9} = - \int_{S_e} ([B_\phi]^T)_{9 \times 3} [\bar{P}]_{3 \times 3} [B_\phi]_{3 \times 9} dS_e \quad (3.34)$$

F^M là ngoại tải cơ, được tính bởi: $\{F_m\}_{45 \times 1} = \int_{V_e} \{f_b\} dV_e + \int_{S_e} \{f_s\} dS_e + \{f_c\}$ (3.35)

Q_c là ngoại tải điện tác dụng, được tính bởi: $\{Q_c\}_{9 \times 1} = \int_{S_e} \{q\} dS_e$ (3.36)

Kết thúc mục 3.2.4, các phương trình (PTr) chủ đạo được thiết lập, đó là:

- PTr PTHH tính toán dao động tự do không có cản:

$$[M_{uu}^g] \{\ddot{q}_g^u\} + ([K_{uu}^g] + [K_{u\phi}^g] [K_{\phi\phi}^g]^{-1} [K_{\phi u}^g]) \{q_g^u\} = 0 \quad (3.56)$$

- PTr PTHH tính toán dao động tự do không có cản khi dùng mạch hồi tiếp:

$$[M_{uu}^g] \{\ddot{q}_g^u\} + ([K_{uu}^g] + G_d [K_{u\phi}^g] [K_{\phi\phi}^g]^{-1} [K_{\phi u}^g]) \{q_g^u\} = 0 \quad (3.57)$$

- PTr PTHH tính toán dao động tự do có cản khi dùng mạch hồi tiếp:

$$[M_{uu}^g]\{\ddot{q}_g^u\} + (C_A + C_R)\{\dot{q}_g^u\} + [K_g^{**}]\{q_g^u\} = 0 \quad (3.58)$$

ở đây, $C_A = G_v \left([K_{u\phi}^g][K_{\phi\phi}^g]^{-1}[K_{\phi u}^g] \right) = G_v [K]_{AD}$; $C_R = \alpha_R [M_{uu}^g] + \beta_R [K_{uu}^g]$;

$$[K^{**}] = [K_{uu}^g] + G_d \left([K_{u\phi}^g][K_{\phi\phi}^g]^{-1}[K_{\phi u}^g] \right) = [K_{uu}^g] + G_d [K]_{AD}$$

- PTr PTHH tính toán chuyển vị tĩnh:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}^g] & [K_{u\phi}^g] \\ [K_{\phi u}^g] & [K_{\phi\phi}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_g^u\} \\ \{q_g^{\phi_k}\} \end{Bmatrix} = [K_g] \{q_g\} = \{F_g\} = \begin{Bmatrix} \{F_M^g\} \\ \{Q_c^g\} \end{Bmatrix} \quad (3.59)$$

- PTr PTHH tính toán điều khiển chuyển vị tĩnh dùng mạch hồi tiếp:

$$[K_g^{**}]\{q_g^u\} = \left([K_{uu}^g] + G_d [K_{u\phi}^g][K_{\phi\phi}^g]^{-1}[K_{\phi u}^g] \right) \{q_g^u\} = \{F_M^g\} \quad (3.60)$$

Sơ đồ thuật toán giải bài toán tĩnh và sơ đồ thuật toán giải bài toán động đã được xây dựng. Mục 3.2.5 trình bày bài toán tối ưu và sơ đồ thuật toán di truyền. Mục 3.2.6 trình bày về thuật toán tích phân Newmark. Mục 3.2.7 trình bày về ba chương trình tính đã xây dựng.

3.3. Kết luận chương 3

Sử dụng phần tử tứ giác đẳng tham số chín nút gồm 45 DOF cơ và 9 DOF điện thế, dựa vào lý thuyết tấm của Mindlin-Reissner, tác giả thiết lập được thuật toán PTHH để giải bài toán tĩnh, bài toán dao động tự do khi có và không có cản và giải bài toán tối ưu cho kết cấu tấm composite áp điện.

- Các phương trình chủ đạo được thiết lập là: phương trình PTHH tính toán dao động tự do không có cản (3.56); Phương trình PTHH tính toán dao động tự do không có cản khi dùng mạch hồi tiếp (3.57); Phương trình PTHH tính toán dao động tự do có cản khi dùng mạch hồi tiếp (3.58); Phương trình PTHH tính toán chuyển vị tĩnh (3.59); Phương trình PTHH tính toán điều khiển chuyển vị tĩnh dùng mạch hồi tiếp (3.60).
- Ba sơ đồ thuật toán được xây dựng là: sơ đồ thuật toán giải bài toán tĩnh; sơ đồ thuật toán giải bài toán động và sơ đồ thuật toán thuật toán di truyền để giải bài toán tối ưu.
- Ba bộ chương trình tính viết bằng ngôn ngữ Matlab được xây dựng là: chương trình tính toán để giải bài toán tĩnh, chương trình tính toán để giải bài toán động và chương trình tính toán để giải bài toán tối ưu.

Chương 4: KẾT QUẢ TÍNH TOÁN SỐ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PTHH

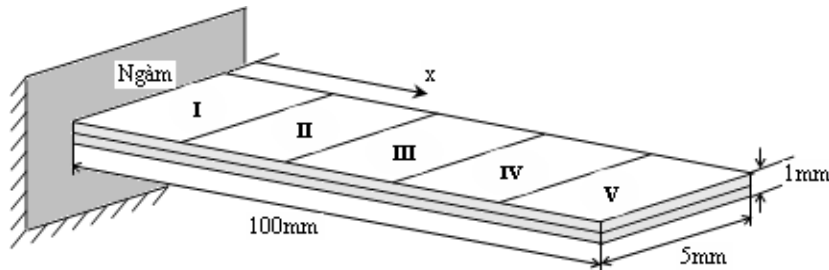
Trong mục 4.1. giới thiệu những kết quả tính toán số trình bày trong chương 4 được xếp thành ba nhóm: kết quả nghiên cứu bài toán uốn tĩnh, kết quả nghiên cứu bài toán dao động tự do và bài toán tối ưu.

- Về bài toán uốn tĩnh: Khảo sát sự tác động qua lại giữa của hai trường điện và cơ đối với dầm lưỡng cấu. Điều khiển độ võng của tấm composite lớp bằng những lớp hay những miếng áp điện. Xét ảnh hưởng của góc sợi, của vị trí, của kích thước các lớp hay các miếng áp điện đến độ võng của kết cấu tấm composite áp điện.
- Về bài toán dao động tự do: Nghiên cứu ảnh hưởng của HUAĐ, của góc sợi đến tần số dao động riêng của tấm composite áp điện, ảnh hưởng của vị trí các miếng áp điện, ảnh hưởng của hệ số điện khiển hồi tiếp đến khả năng tự khử dao động tự do của kết cấu tấm composite áp điện.
- Về bài toán tối ưu: Tìm vị trí hợp lý cần dán những miếng áp điện, điện thế hợp lý cần áp đặt và góc sợi hợp lý của composite lớp nhằm đạt được độ võng mong muốn của tấm composite.

4.2. Kết quả nghiên cứu bài toán uốn tĩnh

4.2.1. Sự tác động qua lại giữa hai trường điện và cơ

Để thấy khi dùng điện thế tác động vào kết cấu áp điện, ta thu được kết quả về cơ học và ngược lại khi tác động cơ học, ta thu được kết quả về điện thế, tác giả khảo sát dầm áp điện lưỡng cấu (bimorph) làm bằng vật liệu PVDF (Hình 4.2.2) - dầm chỉ gồm hai lớp làm bằng VLAĐ.



Hình 4.2.2. Dầm lưỡng cấu PVDF.

Trường hợp 1: Mặt trên và mặt dưới của dầm chịu điện thế 1Vôn.

Bảng 4.2.1. Độ võng của dầm khi mặt trên và mặt dưới của dầm chịu điện thế 1Vôn.

Mặt cắt theo phương x (mm)	Độ võng ($\times 10^{-4}$ mm)				
	20	40	60	80	100
José Moita, (CPT) [42]	0,14	0,552	1,24	2,21	3,45
Fukunaga, (HOPT) [29]	0,139	0,553	1,24	2,21	3,45
Suleman, (giải tích) [78]	0,138	0,552	1,24	2,21	3,45
Suleman, (thực nghiệm) [78]	-	-	-	-	3,45
Luận án, (FSDT)	0,138	0,550	1,268	2,198	3,434

Trường hợp 2: Áp đặt độ võng đầu dầm là 10 mm (Hình 4.2.3).

Bảng 4.2.2. Điện thế được sinh ra phân bố trên các vùng bề mặt dầm khi kéo đầu dầm võng 10 mm.

Các vùng bề mặt dầm	Điện thế (Vôn)				
	I	II	III	IV	V
José Moita, (CPT) [42]	295	229	163	98	32
Fukunaga, (HOPT) [29]	290	226	161	97	32
Luận án, (FSDT)	291	226	161	97	33

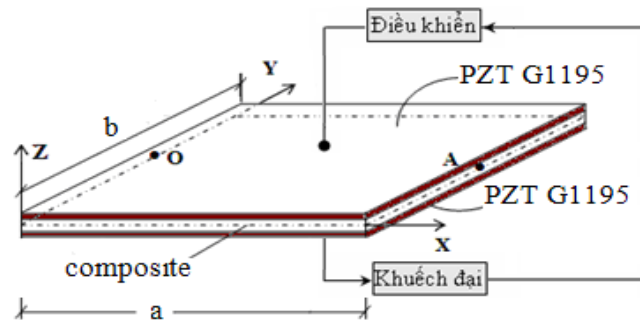
(Ký hiệu I, II, III, IV, V chỉ các vùng trên bề mặt dầm).

Nhận xét: Khảo sát trên cho ta thấy sự tác động qua lại giữa hai trường điện và cơ. Tác động bằng điện thế khiến dầm bị uốn cong đi. Tác động cơ học làm xuất hiện điện thế trên dầm. Chương trình tính đã cho kết quả tin cậy khi so sánh với kết quả của các tác giả khác. Trong trường hợp 1, kết quả về độ võng sai lệch lớn nhất là 0,5% và nhỏ nhất là 0,2% so với kết quả giải tích của Suleman [78]. Trong trường hợp 2, kết quả về điện thế sai lệch lớn nhất là 3% và nhỏ nhất là 0,1% so với kết quả tính theo "CPT" của José Moita [42].

4.2.2. Điều khiển chuyển vị tĩnh kết cấu tấm composite có gắn những lớp hay những miếng áp điện

Trường hợp 1: Tác động lên những lớp áp điện thông qua mạch hồi tiếp

Tác giả khảo sát một tấm composite áp điện (Hình 4.2.4) chịu điều kiện biên bản lề ($v_0 = w_0 = \theta_y = 0$ tại $x = 0, x = a$; $u_0 = w_0 = \theta_x = 0$ tại $y = 0, y = b$) và chịu tải trọng uốn phân bố đều là 100 N/m^2 .



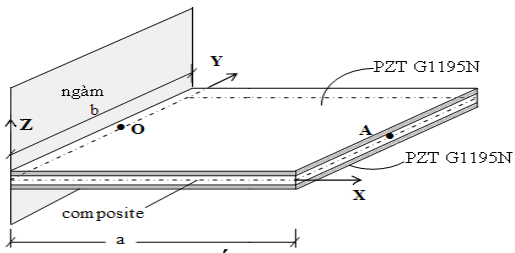
Hình 4.2.4. Tấm composite áp điện cấu hình $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$.

Sử dụng hệ số điều khiển hồi tiếp $G_d = 0, 20, 28$ và 50 để điều khiển độ võng. Với $G_d = 28$, tấm gần trở lại vị trí phẳng ban đầu.

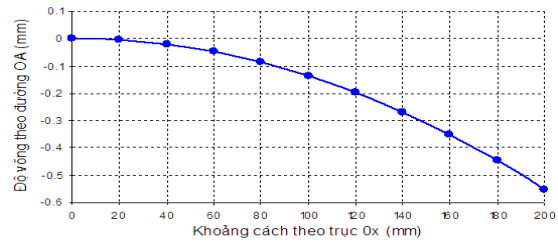
Như vậy, bằng việc "điều chỉnh" hệ số G_d trong phương trình (3.60), ta có được chuyển vị của tấm gần như mong muốn. Cách điều khiển như vậy được gọi với tên là *điều khiển chủ động* (active control).

Trường hợp 2: Áp đặt điện thế lên những lớp hay những miếng áp điện

Khảo sát một tấm composite áp điện giống như tấm được khảo sát trong trường hợp 1. Trong khảo sát này, tấm bị ngâm dọc cạnh b (Hình 4.2.6). Áp đặt 10 V lên hai lớp áp điện. Kết quả tính độ võng của tấm thể hiện trên hình 4.2.7.

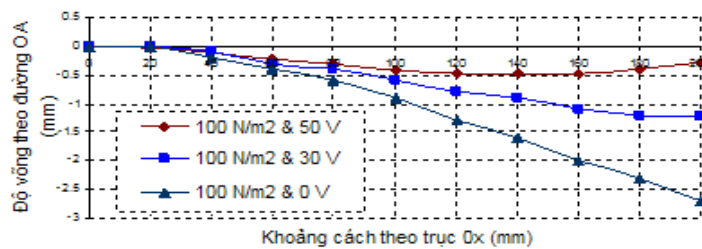


Hình 4.2.6. Tấm composite áp điện $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$ bị ngàm dọc cạnh b.



Hình 4.2.7. Độ võng theo đường OA của tấm $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$ khi chỉ áp đặt 10 V.

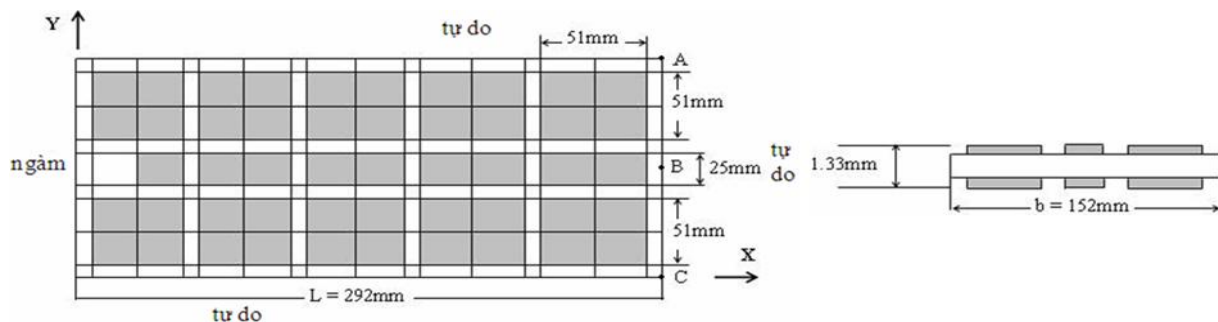
Để thấy việc dùng điện thế tác động trực tiếp lên lớp áp điện nhằm điều khiển chuyển vị của tấm ra sao, ta cho tấm chịu tải uốn phân bố đều, tấm sẽ bị võng. Để làm tấm trở lại vị trí gần như ban đầu, ta tăng hay giảm mức điện thế áp đặt. Kết quả tính độ võng của tấm thể hiện trên Hình 4.2.8.



Hình 4.2.8. Độ võng theo đường OA của tấm $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$ khi chịu tải phân bố đều 100 N/m^2 và áp đặt ở các mức điện thế khác nhau.

Như vậy, điện thế đã làm thay đổi độ võng của tấm. Bằng việc "điều chỉnh" điện thế áp đặt ($q_g^{\phi_k}$) trong phương trình (3.59), ta có được chuyển vị của tấm gần như mong muốn. Cách điều khiển như vậy được gọi với tên là *điều khiển thụ động* (passive control).

Vì giá thành của VLAD cao và khó chế tạo nên trong kỹ thuật người ta nghiên cứu thay thế các lớp áp điện bằng những miếng áp điện để điều khiển cơ học một kết cấu nào đó. *Điều khiển thụ động* chuyển vị của tấm composite bằng cách gắn những miếng áp điện trên bề mặt tấm được nghiên cứu. Hình 4.2.9 minh họa một tấm composite được gắn những miếng áp điện.



Hình 4.2.9. Tấm $[0^0/45^0/-45^0/45^0/0^0]$ gắn các miếng áp điện PZT G1195.

Ký hiệu W_1 , W_2 và W_3 lần lượt là ba thành phần chuyển vị không thứ nguyên ($W_1 = WB/b$, $W_2 = [(WC-W_A)/b]$, $W_3 = [W_B-(W_C+W_A)]/b$, trong đó W_A , W_B , W_C là độ võng của tấm tại các điểm B, A và C).

Bảng 4.2.4. Giá trị các thành phần chuyển vị (W1, W2, W3) của tấm khi các miếng áp điện chịu 315 V/mm.

	Thực nghiệm của Crawley và đ/n [24]	Ritz (giải tích) [24]	Luận án
W1	0,0340	0,0280	0,0351
W2	0,0038	0,0036	0,0041
W3	0,0028	0,0032	0,0036

Như vậy, gắn lên tấm những miếng áp điện và dùng điện thế tác động trực tiếp đã điều khiển được chuyển vị tĩnh của tấm composite. Sự sai khác hầu như không đáng kể giữa kết quả tính toán của luận án với kết quả giải tích của Ritz và kết quả thực nghiệm của Crawley khẳng định sự phù hợp của mô hình tác giả lựa chọn, thuật toán và chương trình tính thiết lập.

4.2.3. Ảnh hưởng của góc sợi các lớp composite, của vị trí những lớp áp điện đến độ võng kết cấu tấm composite áp điện

Xét một tấm composite áp điện giống như tấm đã khảo sát ở trường hợp 1 trong mục 4.2.2. Ở khảo sát này, hai trường hợp có cấu hình: đối xứng $[p/\theta^0/\theta^0/-\theta^0/p]$ và bất đối xứng $[p/-\theta^0/\theta^0/-\theta^0/p]$ được xem xét.

Bảng 4.2.5. Độ võng ($\times 10^{-5}$ m) tại tâm tấm khi tựa bản lề, chịu tải phân bố đều và các mức điện thế áp đặt.

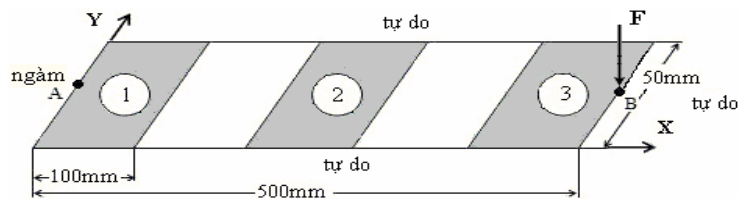
TH	Tấm	Điện thế áp đặt								
		0 V			5 V			10 V		
		[57]	Luận án	Sai lệch	[57]	Luận án	Sai lệch	[57]	Luận án	Sai lệch
1	$[p/-45^0/45^0]_s$	-6.038	-5.724	5.2%	-2.717	-2.766	1.77%	0.604	0.585	3.15%
2	$[-45^0/p/45^0]_s$	-6.380	-6.388	0.13%	-4.570	-4.59	0.44%	-2.760	-2.79	1.08%
3	$[p/-45^0/45^0]_{as}$	-6.217	-6.220	0.05%	-2.73	-2.76	1.09%	0.757	0.739	2.38%
4	$[-45^0/p/45^0]_{as}$	-6.424	-6.430	0.09%	-4.480	-4.51	0.67%	-2.536	-2.58	1.71%
5	$[p/-30^0/30^0]_{as}$	-6.542	-6.570	0.43%	-2.862	-2.876	0.49%	0.819	0.819	0.01%
6	$[p/-15^0/15^0]_{as}$	-7.222	-7.276	0.74%	-3.134	-3.135	0.03%	0.954	0.961	0.69%

$[-45^0/p/45^0/45^0/p/-45^0]$ ký hiệu là $[-45^0/p/45^0]_s$, $[-45^0/p/45^0/-45^0/p/45^0]$ ký hiệu là $[-45^0/p/45^0]_{as}$.

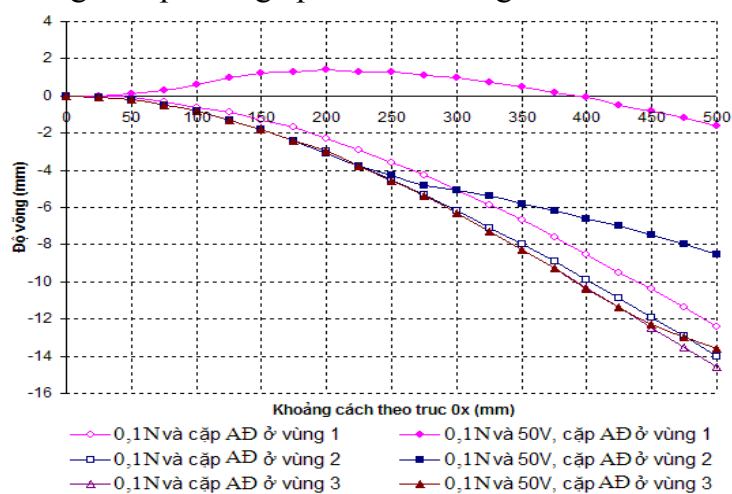
Nhận xét: Độ võng trong trường hợp 2 lớn hơn so với độ võng trong trường hợp 1 và 3 cho ta thấy khi lớp áp điện đặt vào gần mặt trung bình của tấm thì điện thế áp đặt làm thay đổi độ võng của tấm không bằng như khi lớp áp điện đặt xa mặt trung bình. Mô men uốn do lớp áp điện gây ra trong trường hợp 1 và 3 lớn hơn so với trường hợp 2. Trong bảng 4.2.5, kết quả tính trong luận án bằng PP PTHH được so sánh với kết quả của Liu [57] tính bằng PP không lưới (meshless method). Sự sai lệch không đáng kể khi so sánh một lần nữa khẳng định chương trình tính của luận án xây dựng đã cho kết quả tin cậy.

4.2.4. Ảnh hưởng của vị trí những miếng áp điện đến độ võng kết cấu tấm composite áp điện

Khảo sát một tấm composite lần lượt trong ba trường hợp gắn cặp miếng áp điện ở ba vùng: 1, 2 và 3 (Hình 4.2.12). Trong các trường hợp xem xét, tấm chịu một lực tập trung F như nhau tại điểm giữa đầu tấm và các miếng áp điện chịu cùng mức điện thế áp đặt. Độ võng của tấm tương ứng với mỗi trường hợp gắn ở những vùng khác nhau được biểu diễn bằng đồ thị trên Hình 4.2.13.



Hình 4.2.12. Tấm composite $[-30^0/30^0]_s$ với 3 trường hợp gắn cặp miếng áp điện ở 3 vùng khác nhau.

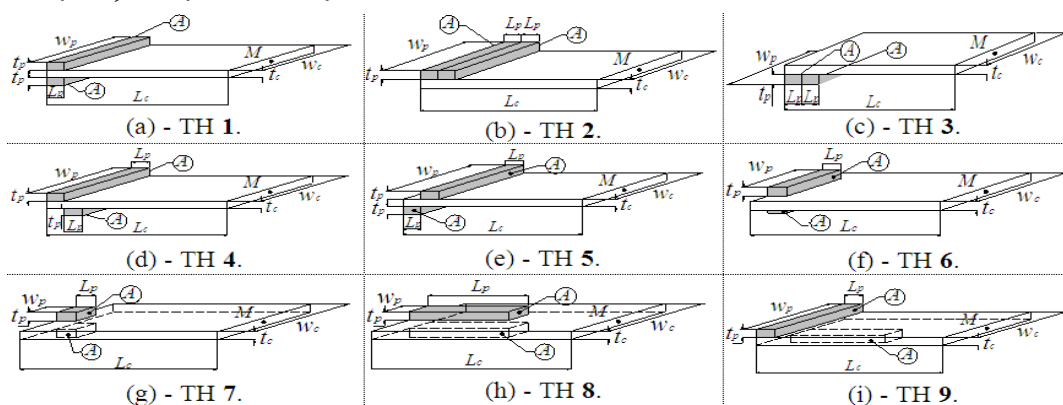


Hình 4.2.13. Độ võng theo đường AB tương ứng với mỗi trường hợp.

Nhận xét: Để ý độ võng điểm giữa đầu tấm thể hiện trên hình 4.2.13, ta thấy khi áp đặt cùng mức điện thế thì gắn cặp miếng áp điện ở vùng 1 - vùng sát ngàm cho ta điều khiển độ võng đầu tấm conxon composite được nhiều nhất.

4.2.5. Ảnh hưởng của kích thước, vị trí những miếng áp điện đến độ võng kết cấu tấm composite áp điện

Trong mục 4.2.5, tác giả xem xét và tính toán độ võng của chín trường hợp gắn những miếng áp điện ở vùng sát cạnh bị ngàm của một tấm composite bị ngàm 1 cạnh, 3 cạnh kia tự do.



Hình 4.2.15. Chín trường hợp (TH) gắn những miếng áp điện.

Tác giả rút ra nhận xét là: trường hợp 2, 3, 4, 5 cho hiệu quả tốt nhất đối với điều khiển chuyển vị tĩnh. Thể tích (hay tổng khối lượng) của cặp miếng áp điện trong ba trường hợp 1, 6 và 7 đều như nhau nhưng hiệu quả điều khiển chuyển vị tĩnh (độ lớn của độ võng thu được) trong trường hợp 1 tốt hơn (lớn hơn) trong trường hợp 6, trong trường hợp 6 tốt hơn trong trường hợp 7.

Tác giả xem xét thêm trường hợp 1, tính toán độ võng đầu tấm khi thay đổi chiều dài miếng áp điện và rút ra nhận xét là: độ võng đầu tấm tăng khi chiều dài L_p của miếng áp điện tăng.

Tính độ võng đầu tấm cho trường hợp 1 và 8 khi thay đổi độ dày t_p miếng áp điện, tác giả đều nhận thấy và rút ra nhận xét rằng: khi độ dày của những miếng áp điện tăng thì độ võng đầu tấm giảm, khi độ dày của những miếng áp điện giảm thì độ võng đầu tấm tăng (độ võng đầu tấm tỉ lệ nghịch với độ dày những miếng áp điện).

4.3. Kết quả nghiên cứu bài toán dao động tự do

4.3.1. Ảnh hưởng của hiệu ứng áp điện (HUAĐ) đến tần số dao động riêng của kết cấu tấm composite áp điện

Tác giả xét 1 tấm composite áp điện bị ngàm 4 cạnh có lớp trên và lớp dưới là VLAĐ loại PZT G1195. Tính toán và so sánh tần số dao động riêng của tấm khi kể đến và không kể đến HUAĐ, tác giả rút ra rằng: trong khảo sát này, HUAĐ đã làm giảm tần số riêng của kết cấu tấm (lớn nhất là 23,56% ứng với tần số riêng thứ 2 và nhỏ nhất là 8,88% ứng với tần số riêng thứ 6) và đưa ra lời giải thích là: ma trận độ cứng áp điện đã làm ma trận độ cứng tổng thể trong (3.56) "giảm" đi, dẫn đến tần số riêng của tấm giảm đi. Ma trận độ cứng áp điện phụ thuộc vào các thông số "điện" của VLAĐ như hệ số ứng suất áp điện, hệ số biến dạng áp điện. Nếu các hệ số này làm cho ma trận độ cứng tổng thể "tăng" thêm, sẽ làm cho tần số dao động riêng của tấm tăng, tấm thêm cứng hơn. Có thể nói rằng chính sự tương tác điện-cơ đã gây nên điều này.

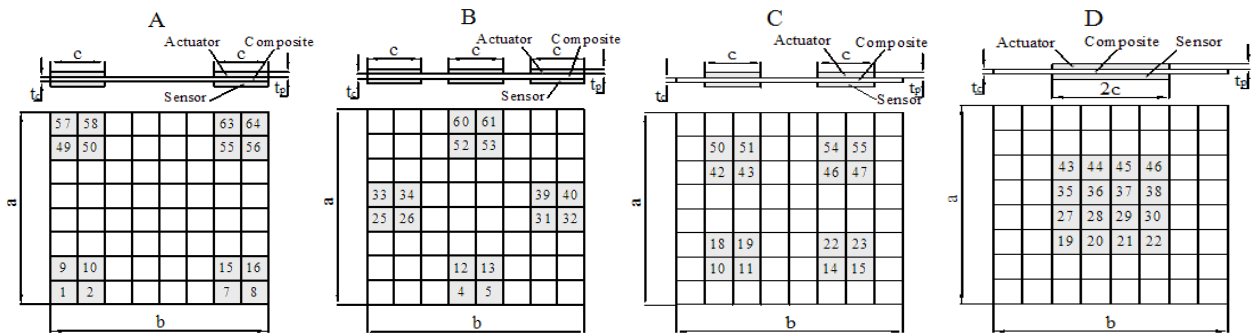
4.3.2. Ảnh hưởng của góc sợi những lớp composite đến tần số dao động riêng của kết cấu tấm composite áp điện

Để xem xét ảnh hưởng này, tác giả đã khảo sát một tấm composite áp điện bị ngàm 4 cạnh, tính toán tần số riêng cho mỗi trường hợp khi thay đổi góc sợi ($\theta = 0^0, 15^0, 30^0, 45^0, 60^0, 75^0$ và 90^0) tương ứng với 2 kiểu cấu hình đối xứng: $[p/-\theta^0/\theta^0/\theta^0/-\theta^0/p]$ và bất đối xứng: $[p/-\theta^0/\theta^0/-\theta^0/\theta^0/p]$. Tác giả rút ra rằng trong khảo đang xem xét: Khi θ tăng từ 0^0 đến 45^0 thì tần số riêng thứ 2, 4 và 5 tăng lên, tần số riêng thứ 3 giảm đi. Khi θ tăng từ 45^0 đến 90^0 thì tần số riêng thứ 2, 4 và 5 lại giảm đi, tần số riêng thứ 3 tăng lên. Khi $\theta = 0^0$ và 90^0 , giá trị các tần

số riêng thứ nhất hầu như không thay đổi. Khi $\theta = 45^0$, tần số riêng thứ nhất có giá trị nhỏ nhất so với các góc cốt khác.

4.3.3. Ảnh hưởng của vị trí những miếng áp điện đến tần số riêng, đến khả năng triệt dao động tự do của kết cấu tấm composite áp điện

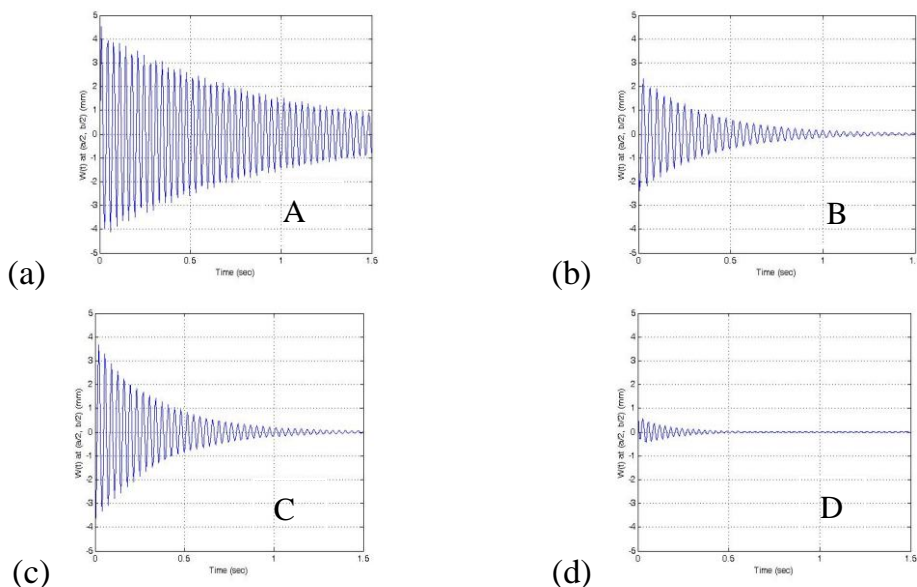
Để xem xét ảnh hưởng này, tác giả đã chọn một tấm composite có cấu hình: $[-30^0/30^0]_s$, gắn 4 cặp miếng áp điện theo 4 trường hợp A, B, C, D như minh hoạ trên Hình 4.3.4. Tính và so sánh tần số riêng (Bảng 4.3.4). Mạch hồi tiếp được sử dụng với hệ số điều khiển hồi tiếp $G_v = 0,25$ và $G_d = 15$, tính và so sánh chuyển vị theo thời gian của điểm giữa tấm tương ứng với mỗi trường hợp (Hình 4.3.5a, b, c và d).



Hình 4.3.4. Tấm composite tựa bản lề 4 cạnh gắn các cặp miếng áp điện (4 trường hợp gắn khác nhau).

Bảng 4.3.4. Tần số dao động riêng (Hz) của tấm.

Trường hợp gắn	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
A	31,356	57,236	84,334	94,319	120,660
B	26,802	55,958	79,732	103,712	119,754
C	27,92	54,480	76,668	94,735	114,139
D	25,089	52,561	76,155	99,479	116,422

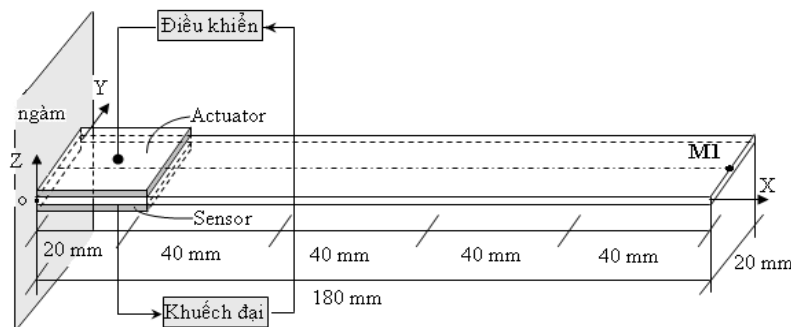


Hình 4.3.5. Chuyển vị theo thời gian của điểm giữa tấm composite $[-30^0/30^0]_s$, tựa bản lề 4 cạnh gắn 4 cặp miếng áp điện ở các vị trí khác nhau, $G_v = 0,25$ và $G_d = 15$.

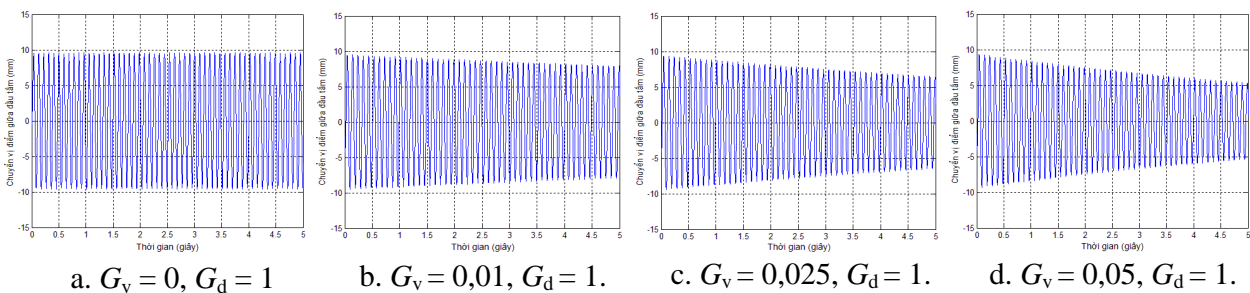
Tác giả rút ra rằng: Với tấm đang xem xét, tần số riêng thứ nhất, thứ hai, thứ ba trong trường hợp (D) gần ở vùng trọng tâm của tấm nhỏ hơn so với tần số riêng thứ nhất, thứ hai, thứ ba trong ba trường hợp A, B và C. Ta có thể nói rằng việc gắn những miếng áp điện như trường hợp D đã làm độ cứng tổng thể trong trường hợp này "giảm", tấm "mềm" đi. So sánh về chuyển vị theo thời gian của điểm giữa tấm tương ứng với mỗi trường hợp (A, B, C, D), cho thấy: việc gắn cặp miếng áp điện ở vùng trọng tâm của tấm (trường hợp D) có ảnh hưởng tốt nhất đến khả năng triệt dao động tự do của tấm.

4.3.4. Ảnh hưởng của hệ số điều khiển hồi tiếp đến khả năng triệt dao động tự do của kết cấu tấm conxon composite áp điện

Để xem xét ảnh hưởng này, tác giả gắn lên kết cấu tấm conxon composite một cặp miếng áp điện sắt ngà (Hình 4.3.7), chọn hệ số điều khiển hồi tiếp G_v khác nhau (G_v bằng 0; 0,01; 0,025; 0,05 và G_d bằng 1), tính toán chuyển vị theo thời gian của điểm giữa đầu tự do của tấm tương ứng trong mỗi trường hợp rồi xem xét, đánh giá kết quả thu được (Hình 4.3.8a, b, c, d).



Hình 4.3.7. Tấm conxon composite $[0^0/90^0]$ gắn cặp miếng áp điện.



Hình 4.3.8. Chuyển vị theo thời gian của điểm giữa đầu tự do của tấm $[0^0/90^0]$ có gắn cặp miếng áp điện.

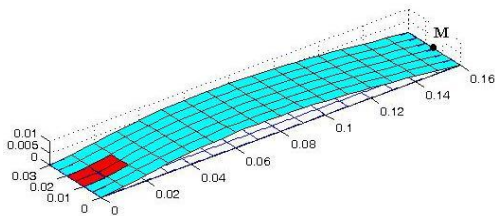
Nhận xét: Khi $G_v = 0$ và không kể đến cản kết cấu, tấm dao động tự do (Hình 4.3.8a). Trong một giới hạn nào đó, tăng hệ số điều khiển hồi tiếp G_v , dao động tự do của tấm bị triệt tiêu (biên độ dao động giảm, Hình 4.3.8b,c,d).

4.4. BÀI TOÁN TỐI ƯU

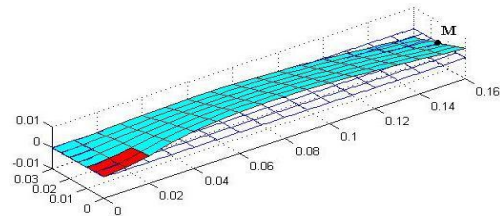
Cho trước một kết cấu tấm conxon composite và một cặp miếng áp điện, các thông số hình học và vật liệu được biết. Cho tấm chịu một lực tập trung

theo phương thẳng đứng tại điểm M giữa đầu tự do của tấm, tấm bị võng. Để làm đầu tấm trở lại vị trí gần như ban đầu, ta gắn cặp miếng áp điện và thay đổi mức điện thế áp đặt. Tìm vị trí hợp lý để dán cặp miếng áp điện, mức điện thế hợp lý cần áp đặt và góc sợi hợp lý của composite lớp để đạt được mục tiêu là cực tiểu độ lệch đầu tự do (điểm M) của tấm.

Xem xét trường hợp một ràng buộc là điện thế, ứng dụng thuật toán di truyền (GA), kết quả thu được giống như kết quả thu được bằng cách chọn kết quả tốt nhất sau khi tính tất cả các trường hợp có thể - tạm gọi là "Tìm trên tập hợp giải pháp khả thi". Xem xét bài toán đa ràng buộc: điện thế, các tọa độ x , y của tâm miếng áp điện và chọn cấu hình tấm đối xứng: $[\theta/(90^0+\theta)/(90^0+\theta)/\theta]$ (kiểu I) và bất đối xứng: $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ (kiểu II) với θ^{\min} và θ^{\max} bằng 0^0 và 90^0 . Chuyển vị của tấm tương ứng với kết quả tối ưu thu được tương ứng với kiểu I và II được minh họa trên Hình 4.4.3 và 4.4.6.



Hình 4.4.3. Chuyển vị của tấm (ứng với kiểu I).



Hình 4.4.6. Chuyển vị của tấm (ứng với kiểu II).

Nhận xét: Với bài toán trình bày trong Phần 4.4, có 4 ràng buộc (điện thế, tọa độ x , y và góc sợi lớp composite - những biến thiết kế) thì kết quả tối ưu thu được phụ thuộc vào cấu hình tấm, do đó, có thể xem như cấu hình tấm đóng vai trò là một biến thiết kế. Việc tìm kiếm trên tập hợp các giải pháp khả thi đối với bài toán một ràng buộc đã cho kết quả mong muốn. Tuy nhiên, với bài toán đa ràng buộc thì cách tìm kiếm kiểu "Tìm trên tập hợp giải pháp khả thi" là không thực hiện được, với bài toán này, ứng dụng thuật toán di truyền đã cho kết quả tin cậy.

4.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Tác giả rút ra một số kết luận sau:

- Kết quả tính PTHH cho bài toán tĩnh và bài toán dao động tự do trong luận án là tin cậy khi so sánh với kết quả tính bằng các PP khác như PP giải tích, PP không lưới, PP PTHH trên cơ sở lý thuyết tấm cổ điển, lý thuyết tấm bậc cao hay với thực nghiệm.
- Về bài toán uốn tĩnh:

- Sự tác động qua lại giữa hai trường điện và cơ được nghiên cứu qua khảo sát số đối với dầm áp điện lưỡng cấu. Áp đặt điện thế vào mặt trên và mặt dưới của dầm lưỡng cấu (mục 4.1.2) đã khiến dầm bị uốn cong đi. Áp đặt độ võng đầu dầm đã làm xuất hiện điện thế trên dầm.
- Bằng việc gắn các lớp áp điện vào mặt trên và mặt dưới của tấm composite tựa bản lề bốn cạnh chịu tải uốn phân bố đều và sử dụng mạch hồi tiếp *điều khiển chủ động* (active control) với hệ số điều khiển hồi tiếp $G_d=28$ đã khiến tấm trở lại vị trí gần phẳng ban đầu.
- Một cách khác để điều khiển độ võng của tấm composite - *điều khiển thụ động* (passive control) là bằng cách áp đặt trực tiếp điện thế vào các lớp hay các miếng áp điện gắn trên tấm composite.
- Việc tăng độ dày miếng áp điện cho hiệu quả không bằng chọn vị trí hợp lý để gắn cặp miếng áp điện (phân tích trong mục 4.2.4 về tấm conxon composite với 3 trường hợp gắn cặp miếng áp điện ở 3 vùng khác nhau cho thấy: gắn cặp miếng áp điện ở vùng sát ngàm, nơi có giá trị biến dạng lớn nhất cho ta độ võng có thể thay đổi được nhiều nhất khi ta tác động bởi cùng một mức điện thế - "hiệu quả" tốt nhất). Việc tăng độ dày miếng áp điện cũng cho hiệu quả không bằng tăng diện tích gắn miếng áp điện (như phân tích trong khảo sát ở mục 4.2.5 có xét tới 9 trường hợp gắn cặp miếng áp điện cho ta thấy: với TH1 và TH8 thì độ võng đầu tấm tỉ lệ nghịch với độ dày những miếng áp điện).
- Khi lớp áp điện đặt vào gần mặt trung bình của tấm composite nhiều lớp có chứa những lớp áp điện thì điện thế áp đặt làm thay đổi độ võng của tấm không bằng như khi lớp áp điện đặt xa mặt trung bình của tấm. Ở cùng mức điện thế áp đặt, cặp lớp áp điện đặt xa mặt trung bình của tấm đã gây ra mô men uốn tổng cộng lớn hơn so với trường hợp khi đặt cặp lớp áp điện gần mặt trung bình.
- Góc sợi các lớp composite ảnh hưởng đến độ võng của kết cấu tấm composite áp điện.
- Về bài toán dao động tự do:
 - Hiệu ứng áp điện đã làm giảm tần số riêng của tấm composite áp điện có cấu hình: $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$, bị ngàm bốn cạnh (mục 4.3.1) (tần số riêng thứ hai của tấm bị giảm nhiều nhất, xấp xỉ 23,56%, và tần số riêng thứ sáu bị giảm ít nhất, xấp xỉ 8,88%).

- Vị trí gắn miếng áp điện ảnh hưởng đến khả năng triệt dao động tự do của tấm. Tính toán ở mục 4.3.3 cho thấy với tấm composite hình vuông, tựa bản lề bốn cạnh thì khi gắn những cặp miếng áp điện ở vùng trọng tâm tấm sẽ triệt được tốt nhất dao động tự do của tấm.
- Góc sợi trong các lớp composite có ảnh hưởng đáng kể đến tần số dao động riêng của tấm composite áp điện.
- Hệ số điều khiển hồi tiếp G_v có tác dụng triệt dao động tự do. Chẳng hạn, với tấm composite một cạnh bị ngàm, ba cạnh kia tự do, có gắn một cặp miếng áp điện sát ngàm (như trong mục 4.3.4) thì khi tăng hệ số G_v đã làm giảm biên độ dao động tự do của tấm.
- Về bài toán tối ưu: Chương trình tính xây dựng đã cho kết quả tin cậy. Với tấm composite bị ngàm một cạnh, ba cạnh kia tự do, cấu hình đối xứng $[\theta/(90^0+\theta)/(90^0+\theta)/\theta]$ hay bất đối xứng $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ thì kết quả tối ưu thu được đều cho thấy: vị trí tốt nhất cần gắn cặp miếng áp điện là vùng sát ngàm. Điều này cũng được chỉ ra từ kết quả tính toán số trong mục 4.2.4 khi gắn cặp miếng áp điện ở 3 vùng khác nhau trên mặt tấm. Khi ứng dụng thuật toán GA để tìm kiếm đồng thời nhiều biến thiết kế nhằm thỏa mãn mục tiêu mong muốn, tác giả thấy rằng GA có thể làm việc với bài toán tối ưu mà biến số là rời rạc (góc sợi trong tính toán ở mục 4.4) hoặc liên tục (điện thế hay tọa độ). GA sử dụng luật xác suất (tính ngẫu nhiên), không yêu cầu hướng gradient trong thế hệ di truyền tiếp theo. Nhược điểm lớn nhất của GA là thời gian tính toán lâu.

Chương 5: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

5.1. Đặt vấn đề

Để nghiên cứu ứng xử tĩnh và động kết cấu tấm composite áp điện và để kiểm nghiệm mô hình tính bằng PP PTHH, tác giả đã tiến hành thực nghiệm tĩnh và động trên tấm kim loại (nhôm) và tấm composite (sợi thủy tinh nền polyester không no cấu hình đúng trục $[0^0/90^0]$ và lệch trục $[45^0/-45^0]$) có gắn những miếng áp điện. Cụ thể là:

- Đo tần số dao động riêng của các tấm mẫu; đo độ võng các tấm mẫu cho mỗi trường hợp: chỉ có điện thế áp đặt, chỉ có tải cơ áp đặt, đồng thời áp đặt điện thế và tải cơ; điều khiển độ võng bằng cách áp đặt điện thế tính toán trước.
- Áp dụng chương trình PTHH đã xây dựng để tính tần số dao động riêng và chuyển vị uốn của các mẫu composite áp điện.
- So sánh kết quả thực nghiệm và kết quả tính toán mô phỏng bằng PP PTHH.

Mục 5.2 trình bày về việc xây dựng thí nghiệm. Mục 5.2.1 trình bày về mẫu thí nghiệm. Mục 5.2.2 trình bày về thiết bị và hệ thống kích thích các miếng áp điện. Mục 5.2.3 trình bày về thiết bị và hệ thống ghi số liệu và đo chuyển vị, tần số dao động riêng. Mục 5.3 trình bày về cách đo, ghi và xử lý số liệu. Mục 5.4 so sánh kết quả thực nghiệm với kết quả tính PTHH và trình bày việc điều khiển độ võng mong muốn của các tấm composite này bằng việc gắn những miếng áp điện và áp đặt điện thế tính toán trước.

Một số kết quả đo thực nghiệm được so sánh với kết quả tính như sau:

Bảng 5.4.1. Tần số dao động riêng (Hz) thực nghiệm và tính toán.

	Tấm nhôm			Tấm composite $[0^0/90^0]$			Tấm $[45^0/-45^0]$		
	Đo	Tính	Sai lệch	Đo	Tính	Sai lệch	Đo	Tính	Sai lệch
f_1	14,18	14,949	5,14%	9,94	10,856	8,44%	8,02	8,762	8,51%
f_2	88,36	92,908	4,90%	61,52	67,913	9,41%	49,59	54,868	9,62%
f_3	-	238,872	-	-	130,188	-	-	154,500	-
f_4	-	258,624	-	-	190,058	-	-	173,700	-
f_5	-	502,917	-	-	237,096	-	-	185,100	-
f_6	-	535,457	-	-	372,428	-	-	305,700	-

Bảng 5.4.2. Độ võng (mm) của điểm giữa (M1) đầu tấm nhôm.

	Độ võng điểm giữa đầu tấm nhôm (mm)		
	Đo	Tính	Sai lệch
30V	0,39	0,362	7,42%
50V	0,64	0,604	5,92%
75V	0,98	0,907	7,26%
100V	1,31	1,210	7,84%

Bảng 5.4.3. Độ võng (mm) của điểm giữa (M1) đầu tấm $[0^0/90^0]$.

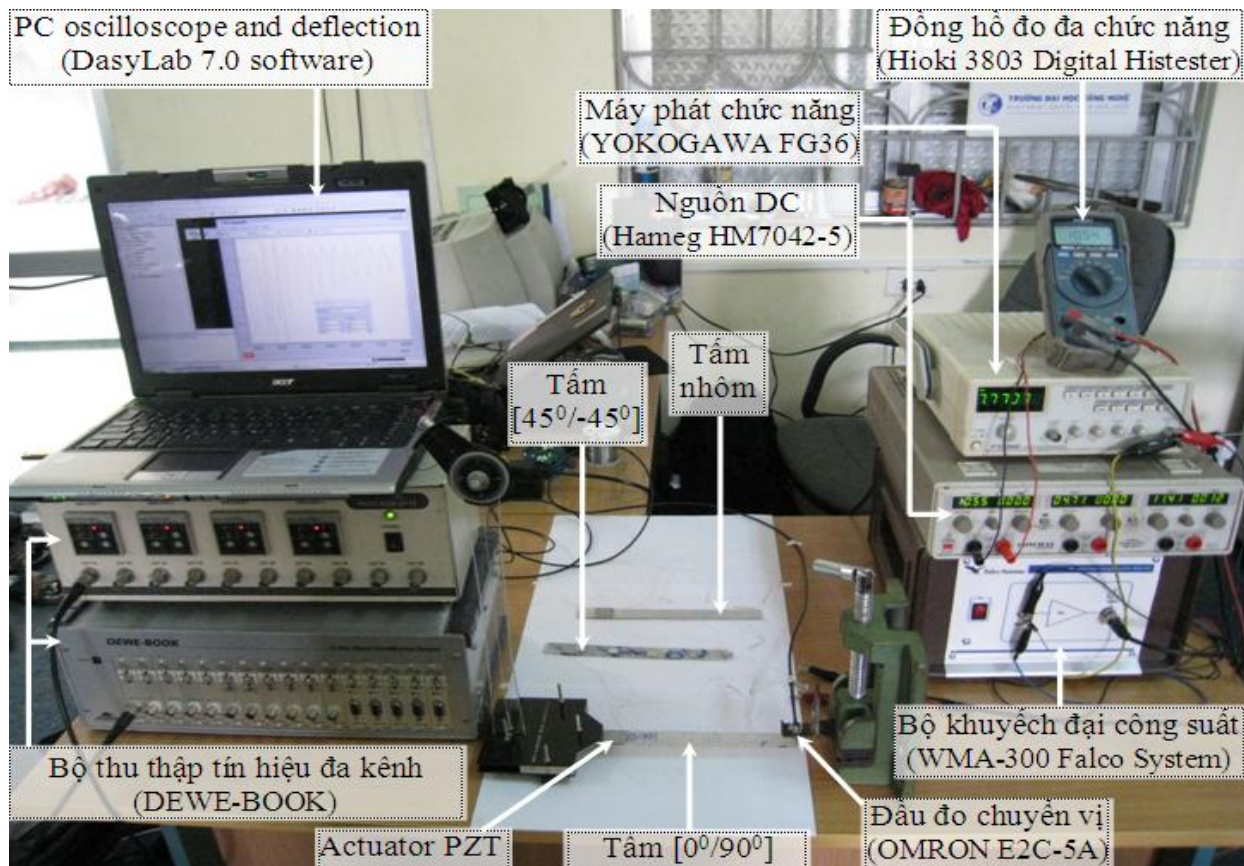
	Độ võng điểm giữa đầu tấm $[0^0/90^0]$ (mm)		
	Đo	Tính	Sai lệch
30V	0,28	0,252	10,00%
50V	0,46	0,420	8,70%
75V	0,69	0,629	8,84%
100V	0,92	0,839	8,80%

Bảng 5.4.5. Độ võng (mm) của điểm giữa (M1) đầu tấm $[45^0/-45^0]$.

	Độ võng điểm giữa đầu tấm $[45^0/-45^0]$ (mm)		
	Đo	Tính	Sai lệch
30V	0,25	0,224	12,00%
50V	0,41	0,374	9,76%
75V	0,61	0,561	8,20%
100V	0,82	0,748	8,54%

Bảng 5.4.7. Áp đặt điện thế để đưa điểm M1 về xấp xỉ 0, các giá trị tính toán và thực nghiệm.

	Tấm $[0^0/90^0]$			Tấm $[45^0/-45^0]$		
	Tính toán	Thực nghiệm	Thực nghiệm	Tính toán	Thực nghiệm	Thực nghiệm
Điện thế áp đặt (V)	81,766	81	82	142,581	142	143
Độ võng của điểm M1 (μm)	$0,8 \times 10^{-3}$	-6	2	$2,6 \times 10^{-3}$	-4	3



Hình 5.2.5. Thí nghiệm đo tần số dao động, đo độ võng và điều khiển độ võng của các mẫu tấm kim loại và mẫu tấm composite có gắn những miếng áp điện.

5.5. Kết luận chương 5

Từ nghiên cứu thực nghiệm đo độ võng, đo tần số riêng của các mẫu tấm bằng nhôm, bằng composite sợi thủy tinh nền polyester không no cấu hình đúng trục $[0^0/90^0]$, lệch trục $[45^0/-45^0]$ có gắn một cặp miếng áp điện và điều khiển độ võng các tấm composite này bằng cách áp đặt điện thế được trình bày trong chương 5, tác giả rút ra một số kết luận sau:

- Góc sợi đã ảnh hưởng đến độ võng của tấm. Khi đo độ võng của các mẫu tấm composite trong các trường hợp: chỉ có điện thế áp đặt, chỉ có tải cơ áp đặt, đồng thời áp đặt điện thế và tải cơ, tác giả thấy rằng với tấm composite ngàm một cạnh, ba cạnh kia tự do thì tấm composite lệch trục: $[45^0/-45^0]$ võng hơn các tấm composite đúng trục: $[0^0/90^0]$.

- Điều khiển được độ võng mong muốn của các tấm composite trên bằng cách áp đặt mức điện thế phù hợp vào các miếng áp điện. Cụ thể: với tấm composite $[0^0/90^0]$ bị võng xuống khi chịu một lực tập trung $F = 0,004 \text{ N}$ theo phương thẳng đứng tại điểm giữa đầu tự do của tấm. Áp đặt 82 V vào cặp áp điện thì độ võng đầu tự do của tấm đo được là 2 μm (xấp xỉ 0). Với tấm composite $[45^0/-45^0]$ bị võng xuống khi chịu một lực tập trung F như trên. Áp đặt 143 V vào cặp áp điện thì độ võng đầu tự do của tấm đo được là 3 μm (xấp xỉ 0).
- Các kết quả thực nghiệm so với các kết quả tính toán PTHH, sai lệch là không lớn. Cụ thể:
 - Về uốn tĩnh: Với mẫu tấm nhôm, sai lệch khoảng 8%. Với mẫu tấm composite, sai lệch khoảng 10%.
 - Về tần số dao động riêng: Với mẫu tấm nhôm, sai lệch khoảng 5%. Với mẫu tấm composite, sai lệch khoảng 9,6%.

KẾT LUẬN CHUNG

Từ các nội dung đã trình bày trong các chương của luận án, một số kết luận được rút ra như sau:

1. Thuật toán PTHH giải bài toán tĩnh, giải bài toán dao động tự do khi có cản và không có cản (cản kết cấu, cản điện) và giải bài toán tối ưu đối với kết cấu tấm composite áp điện được xây dựng từ mô hình PTHH với phần tử tứ giác đẳng tham số chín nút gồm 45 bậc tự do (DOF) cơ và 9 DOF điện thế xây dựng trên cơ sở lý thuyết tấm có kể đến biến dạng cắt bậc nhất.
2. Ba chương trình tính viết bằng ngôn ngữ Matlab tự xây dựng nên (chương trình tính để giải bài toán tĩnh, để giải bài toán động và để giải bài toán tối ưu) cho những kết quả tin cậy, cho phép nghiên cứu ứng xử tĩnh và dao động tự do của các kết cấu tấm composite áp điện.
3. Về bài toán uốn tĩnh:
 - Vị trí gắn cặp miếng áp điện ở sát cạnh bị ngàm sẽ cho "hiệu quả" tốt nhất đối với tấm composite một cạnh bị ngàm, ba cạnh kia tự do.
 - Tăng diện tích gắn miếng áp điện làm thay đổi nhiều hơn độ võng của tấm composite so với việc tăng độ dày các miếng áp điện có cùng thể tích.
 - Vị trí gắn cặp lớp áp điện ở xa mặt trung bình của tấm gây ra mô men uốn tổng cộng lớn hơn so với vị trí gắn ở gần mặt trung bình khi cùng mức

điện thế áp đặt. Tấm có cấu hình $[-45^0/p/45^0/45^0/p/-45^0]$ võng hơn so với tấm có cấu hình $[p/-45^0/45^0/45^0/-45^0/p]$ và $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$ khi áp đặt cùng mức điện thế.

- Góc sợi các lớp composite ảnh hưởng đến độ võng của kết cấu tấm composite áp điện. Kết quả tính toán số đối với tấm composite áp điện có cấu hình $[p/-\theta/\theta/-\theta/\theta/p]$, tựa bản lề bốn cạnh, chịu tải uốn phân bố đều và chịu điện thế áp đặt ở các mức cho ta thấy: tương ứng với góc sợi $\theta = 15^0$, tấm "mềm" hơn (võng hơn) so với khi góc sợi $\theta = 30^0$.

4. Về bài toán dao động tự do:

- HUAD có thể làm giảm hay làm tăng tần số riêng của kết cấu tấm, tùy thuộc vào các thông số "điện" của VLAD như hệ số ứng suất áp điện, hệ số biến dạng áp điện. Chẳng hạn, HUAD gây bởi vật liệu áp điện PZT G1195 làm giảm tần số dao động riêng của tấm composite áp điện $[p/-45^0/45^0/-45^0/45^0/p]$ bị ngàm bốn cạnh.
 - Gắn những miếng áp điện ở vùng trọng tâm của tấm - nơi có giá trị biến dạng lớn nhất sẽ triệt được tốt nhất dao động tự do của tấm composite hình vuông có cấu hình $[-30^0/30^0]_s$, tựa bản lề 4 cạnh.
 - Hệ số điều khiển hồi tiếp ảnh hưởng đến khả năng triệt dao động tự do của kết cấu tấm composite áp điện. Tăng hệ số điều khiển hồi tiếp G_v của mạch hồi tiếp, ta làm giảm biên độ dao động của kết cấu tấm composite.
 - Góc sợi trong các lớp composite ảnh hưởng lớn đến tần số dao động riêng của kết cấu tấm composite áp điện. Với tấm có cấu hình đối xứng $[p/-\theta^0/\theta^0/\theta^0/-\theta^0/p]$ và tấm có cấu hình bất đối xứng $[p/-\theta^0/\theta^0/-\theta^0/\theta^0/p]$ đều bị ngàm 4 cạnh thì khi θ tăng từ 0^0 đến 45^0 , tần số riêng thứ 2, 4 và 5 tăng lên, tần số riêng thứ 3 giảm đi; khi θ tăng từ 45^0 đến 90^0 , tần số riêng thứ 2, 4 và 5 giảm đi, tần số riêng thứ 3 tăng lên; khi $\theta = 0^0$ và 90^0 , giá trị các tần số riêng thứ nhất hầu như không thay đổi và khi $\theta = 45^0$, tần số riêng thứ nhất có giá trị nhỏ nhất so với các trường hợp góc cốt khác.
5. Về bài toán tối ưu đặt ra, ứng dụng thuật toán di truyền, luận án chỉ ra được vị trí hợp lý cần dán những miếng áp điện, điện thế hợp lý cần áp đặt và góc sợi hợp lý của tấm conxon composite có cấu hình đối xứng $[\theta/(90^0+\theta)/(90^0+\theta)/\theta]$ và bất đối xứng $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ nhằm đạt được độ võng tại đầu tự do của tấm như mong muốn. Kết quả tối ưu chỉ ra rằng: vị trí tốt nhất cần gắn cặp miếng áp điện là vùng sát ngàm - vùng có giá trị biến

dạng lớn nhất. Điều này cũng được chỉ ra qua khảo sát về gắn cặp miếng áp điện ở 3 vùng khác nhau trên mặt tấm.

6. Về nghiên cứu thực nghiệm:

- Hai loại thí nghiệm mới được xây dựng cho hai loại tấm bằng nhôm và bằng vật liệu composite gồm hai lớp, đúng trục $[0^0/90^0]$ và lệch trục $[45^0/-45^0]$ chế tạo tại Việt Nam từ sợi thủy tinh (40%) nền polyester không no (60%). Tấm bị ngâm một cạnh, ba cạnh kia tự do, có gắn một cặp miếng áp điện ở sát cạnh bị ngâm.
 - + Loại thí nghiệm thứ nhất là đo độ võng của các loại mẫu tấm trong các trường hợp: các mẫu chỉ chịu tác dụng của các mức điện thế áp đặt; các mẫu chỉ chịu tác dụng của lực tập trung theo phương thẳng đứng; các mẫu chịu tác dụng đồng thời của lực tập theo phương thẳng đứng và các mức điện thế áp đặt.
 - + Loại thí nghiệm thứ hai là đo được tần số dao động riêng của các loại mẫu tấm composite.
- Điều khiển được độ võng mong muốn của các tấm composite bằng cách áp đặt mức điện thế phù hợp vào các miếng áp điện gắn lên tấm.
- Các kết quả thực nghiệm khẳng định độ tin cậy của thuật toán PTHH và chương trình tính viết bằng ngôn ngữ Matlab trong luận án.

Một số kiến nghị về những nghiên cứu tiếp theo

- Sử dụng lý thuyết tấm bậc cao hay lý thuyết lớp liên tiếp trong tính toán tĩnh và động các kết cấu tấm/vỏ composite dày có chứa hay gắn những lớp hay những miếng áp điện.
- Nghiên cứu ứng xử cơ học của các kết cấu tấm/vỏ composite áp điện có tính đến các tương tác cơ - điện - từ trường - nhiệt độ v.v.
- Tính toán tối ưu điều khiển hình dáng, dao động, triệt tiêu dao động của tấm/vỏ composite có gắn những miếng áp điện.
- Nghiên cứu thực nghiệm quy mô hơn về tĩnh, về động, về điều khiển kết cấu tấm composite có gắn những miếng áp điện v.v.

CÁC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN

1. Trần Ích Thịnh, Lê Kim Ngọc (2006), "Phân tích cơ học vật liệu composite áp điện", *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học toàn quốc-Cơ học vật rắn biến dạng lần thứ 8*, tr. 814-822.
2. Trần Ích Thịnh, Lê Kim Ngọc (2007). "Dao động của kết cấu tấm composite áp điện", *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học Toàn quốc lần thứ VIII*, tr. 596-607.
3. Tran Ich Thinh, Le Kim Ngoc (2008), "Static and dynamic analysis of laminated composite plates with integrated piezoelectrics", *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, Vol. 30, No. 1, pp. 55-66.
4. Tran Ich Thinh, Le Kim Ngoc (2008), "The Static Shape and Free Vibration Control of Composite plates with Piezoelectric Patches", *Proceedings of the International Conference on Computational Solid Mechanics*, CSM-2008, pp. 446-457.
5. Le Kim Ngoc, Tran Ich Thinh (2009), "The influence of the position and thickness of the piezoelectric patches on the static shape and vibration suppression control of the cantilever composite plates ", *Proceedings of the national conference on mechanics celebrating 30th anniversary of Institute of Mechanics and Vietnam Journal of Mechanics*, pp. 178-187.
6. Le Kim Ngoc, Tran Ich Thinh (2009), "Optimum problem of piezoelectric laminated composite plate using genetic algorithm", *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, Vol. 31, No. 1, pp. 87-96.
7. Tran Ich Thinh, Le Kim Ngoc (2010), "Static Behavior and Vibration Control of Piezoelectric Cantilever Composite Plates and Comparison With Experiments", *Computational Materials Science*, Vol. xxx, pp. xxx-xxx (doi: 10.106/j.commatsci.2010.03.016. Accepted 9 March 2010. Available online 13 April 2010).
8. Tran Ich Thinh, Le Kim Ngoc (2010), "Finite Element Modelling and Experimental Study on Static deflection and Vibration of Piezoelectric Composite Plates", *Vietnam Journal of Mechanics*, VAST, Vol. 32, No. 2, pp. 121-133.