PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG CƠ-NHIỆT CỦA VỎ TRỤ COMPOSITE LỚP SỬ DỤNG LÝ THUYẾT BIẾN DẠNG TRƯỢT BẬC CAO KIỂU QUASI 3D

Nguyễn Trường Thanh[1*], Trần Ngọc Đoàn[2], Phan Văn Chương[1]

Tóm tắt: *Bài báo trình bày vấn đề phân tích đáp ứng chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ composite lớp dưới tác dụng của cơ-nhiệt trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu quasi 3D. Trên cơ sở lý thuyết nhiệt đàn, bài báo thiết lập các phương trình tính toán ứng suất vỏ trụ composite lớp bằng cách sử dụng phương pháp biến phân và phân tích trường chuyển vị thành chuỗi hàm đa thức theo chiều dày vỏ. Từ các phương trình nhận được, thiết lập chương trình tính toán, so sánh kiểm chứng với các kết quả đã công bố. Áp dụng khảo sát phân tích đáp ứng cơ-nhiệt của vỏ trụ composite lớp. Điều này có ý nghĩa cao trong việc tính toán thiết kế tối ưu thân vỏ tên lửa cũng như khí cụ bay.*

Từ khóa: Vỏ trụ composite lớp; Trạng thái ứng suất; Biến dạng trượt bậc cao; Tác dụng nhiệt độ,.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

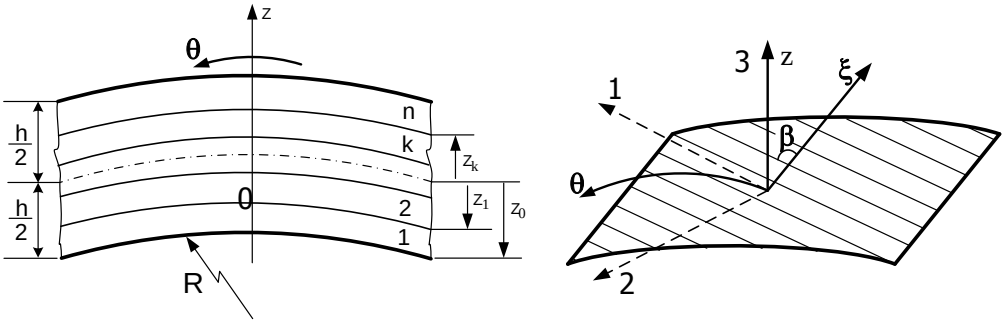
Đã có nhiều tính toán được công bố về đáp ứng cơ nhiệt của vỏ trụ composite lớp sử dụng lý thuyết tấm-vỏ cổ điển và lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất vì tính đơn giản trong thiết lập và tính toán. Như trong các công trình Reddy [1], Khdeir và Reddy [2], Zenkour và Fares [3] xây dựng mô hình đàn nhiệt đơn lớp tương đường của vỏ trụ composite lớn sử dụng lý thuyết bậc nhất cải tiến. Ở đây, phân bố nhiệt độ theo chiều dày tuân theo quy luật tuyến tính. Tornabene cùng cộng sự [4] sử dụng lý thuyết bậc nhất trong nghiên cứu tấm composite vuông và tròn với điều kiện biên tổng quát.

Nghiên cứu của Rohwer cùng cộng sự [5] chỉ ra rằng: việc sử dụng xấp xỉ bậc ba hoặc bậc năm đối với chuyển vị theo chiều dày tấm cho kết quả có độ chính xác cao trong tính toán ứng suất pháp ngang của tấm dưới tác dụng của nhiệt độ phân bố theo hàm sin. Ootao cùng cộng sự [6] nghiên cứu đáp ứng cơ nhiệt của vỏ composite lớp cross-ply sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc cao nhưng chỉ hạn chế với điều kiện biên tựa đơn. Reddy và Khdeir cùng cộng sự [9] đã sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc ba để phân tích tấm, vỏ composite lớp dưới tác dụng của nhiệt độ. Các tác giả sử dụng phương pháp trạng thái không gian theo cách tiếp cận lời giải Levy để giải hệ phương trình vi phân nhận được.

Tuy nhiên, các công trình nghiên cứu đã nêu ở trên, phần lớn các tác giả chỉ tập trung nghiên cứu chuyển vị và ứng suất của tấm, vỏ tại vị trí giữa. Trạng thái ứng suất tại khu vực biên chưa được quan tâm nghiên cứu nhiều. Trong công trình này, tác giả sử dụng mô hình lý thuyết biến dạng trượt bậc cao kiểu quasi 3D trình bày trong [7, 9, 10] để nghiên cứu đáp ứng cơ-nhiệt có kể đến ảnh hưởng của điều kiện biên khác nhau. Ưu điểm cơ bản của lý thuyết biến dạng trượt bậc cao dạng Quasi 3D được sử dụng trong bài báo là đưa mô hình tính toán gần giống mô hình thật, và cách tiếp cận của bài báo có thể giải quyết đối với các điều kiện biên, có thể tính được ứng suất pháp nên có thể tìm ra các đáp ứng ứng suất pháp tại vị trí biên, đây là điểm khác biệt cơ bản của bài báo với các công trình nghiên cứu trước đây.

2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH VÀ XÂY DỰNG HỆ PHƯƠNG TRÌNH TÍNH

2.1. Thiết lập các phương trình cơ bản



Hình 1. *Sơ đồ lớp vật liệu composite và các hệ trục tọa độ.*

Xét vỏ trụ tròn trong hệ tọa độ cong trực giao $0\xi\theta z$, tham khảo mô hình vỏ trụ composite lớp theo tài liêu [7]. Kết cấu vỏ trụ composite có *n* lớp, mỗi lớp là vật liệu composite cốt sợi đồng phương, phương chính của mỗi lớp trùng với phương đặt cốt của lớp tương ứng theo hình 1. Vỏ trụ tròn có bán kính R, chiều dài L và bề dày h. Chuyển vị của vỏ thành dạng tổng, theo [13].

$$u(\xi,\theta,z)=\sum_{k=0}^{K}u_k(\xi,\theta)\frac{z^k}{k!},\ v(\xi,\theta,z)=\sum_{k=0}^{K}v_k(\xi,\theta)\frac{z^k}{k!},\ w(\xi,\theta,z)=\sum_{k=0}^{K_w}w_k(\xi,\theta)\frac{z^k}{k!}. \quad (1)$$

trong đó: *K* là chỉ bậc của lý thuyết vỏ; $u(\xi,\theta,z), v(\xi,\theta,z), w(\xi,\theta,z)$ là các thành phần chuyển vị *3D* của điểm $P(\xi,\theta,z)$ từ khoảng cách z tới mặt trung hòa (ở đây giả thiết mặt trung hòa trùng với mặt trung bình, *z = 0*) theo các trục tọa độ;

u_0, v_0, w_0 là các thành phần chuyển vị 2D của điểm *P* theo các trục tọa độ; u_1, v_1: Góc xoay của mặt cắt ngang thành phần vỏ quanh trục θ,ξ; Các thành phần khác trong phương trình trường chuyển vị (1) như: $w_1, u_2, v_2, w_2, u_3, v_3, ...$ là các chuyển vị bậc cao trong chuỗi phân tích Taylor.

** Biến dạng và ứng suất vỏ composite lớp dưới tác dụng của tải trọng nhiệt*

Mối quan hệ tuyến tính giữa các thành phần của trường biến dạng và trường chuyển vị của vỏ trụ trong hệ tọa độ trụ $O\xi\theta Z$ theo [1], được xác định theo công thức sau:

$$\{\varepsilon\}_k=\{\varepsilon_0\}_k+\{\varepsilon_T\}_k \quad (2)$$

Ở đây, $\{\varepsilon_0\}_k$ và $\{\varepsilon_T\}_k$ lần lượt là biến dạng do tải trọng cơ và nhiệt của vỏ, với: $\{\varepsilon_0\}_k=\{\varepsilon_\xi,\varepsilon_\theta,\varepsilon_z,\gamma_{\xi\theta},\gamma_{\theta z},\gamma_{\xi z}\}_k^T$ trong đó:

$$\begin{aligned}&\varepsilon_\xi=\frac{1}{R}\frac{\partial u}{\partial\xi},\ \varepsilon_\theta=\frac{1}{R+z}\left(\frac{\partial v}{\partial\theta}+w\right),\ \gamma_{\xi\theta}=\frac{1}{R}\frac{\partial v}{\partial\xi}+\frac{1}{R+z}\frac{\partial u}{\partial\theta},\\&\gamma_{\theta z}=\frac{1}{R+z}\frac{\partial w}{\partial\theta}+\frac{\partial v}{\partial z}-\frac{v}{R+z},\ \gamma_{\xi z}=\frac{1}{R}\frac{\partial w}{\partial\xi}+\frac{\partial u}{\partial z},\ \varepsilon_z=\frac{1}{R}\frac{\partial w}{\partial z}.\end{aligned} \quad (3)$$

Khi vỏ trụ làm việc trong giới hạn đàn hồi thì mối liên hệ giữa biến dạng và ứng suất tuân theo định luật Hooke đối với lớp vật liệu thứ *k* trong hệ tọa độ địa phương gắn với từng lớp có dạng:

$$\begin{aligned}&\left\{\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3,\tau_{12},\tau_{13},\tau_{23}\right\}_{(k)}^{T}=\\&\quad=\left[C^{(k)}\right]\left\{\varepsilon_1-\alpha_1\Delta T,\varepsilon_2-\alpha_2\Delta T,\varepsilon_3-\alpha_3\Delta T,\gamma_{12},\gamma_{13},\gamma_{23}\right\}_{(k)}^{T}\end{aligned}\tag{4}$$

Phương trình liên hệ giữa ứng suất và chuyển vị của lớp thứ k trong hệ tọa độ chung được xác định theo [10]:

Ở đây, ΔT là nhiệt độ biến dạng của vật liệu; Mối liên hệ giữa modul đàn hồi và hệ số poát xông theo [10].

Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong hệ tọa độ tổng thể dạng:

$$\begin{aligned}&\left\{\sigma_\xi,\sigma_\theta,\sigma_z,\tau_{\xi\theta},\tau_{\xi z},\tau_{\theta z}\right\}^{T}=\\&\quad=\left[Q^{(k)}\right]\left\{\varepsilon_\xi-\alpha_\xi\Delta T,\varepsilon_\theta-\alpha_\theta\Delta T,\varepsilon_z-\alpha_z\Delta T,\gamma_{\xi\theta}-\alpha_{\xi\theta}\Delta T,\gamma_{\xi z},\gamma_{\theta z}\right\}^{T}\end{aligned}\tag{5}$$

ở đây, ma trận độ cứng chung $\left[Q^{(k)}\right]$ được cho bởi: $\left[Q^{(k)}\right]=\left[T^{(k)}\right]^t\left[C^{(k)}\right]\left[T^{(k)}\right]$,

ma trận độ cứng $\left[C^{(k)}\right]$ và ma trận chuyển hệ tọa độ $\left[T^{(k)}\right]$, xác định theo [10].

ở đây,
$$\begin{aligned}&\alpha_\xi=\alpha_1\cos^2(\beta)+\alpha_2\sin^2(\beta),\alpha_\theta=\alpha_1\sin^2(\beta)+\alpha_2\cos^2(\beta),\\&\alpha_z=\alpha_3,\alpha_{\xi\theta}=2(\alpha_1-\alpha_2)\sin(\beta)\cos(\beta).\end{aligned}\tag{6}$$

** Phương trình cân bằng và các điều kiện biên*

Sử dụng nguyên lý biến phân Lagrange để xây dựng phương trình cân bằng, phương trình biến phân năng lượng như sau:

$$\delta\Pi=\delta(U-A)=0.\tag{7}$$

Trong đó, $\delta\Pi$, δU và δA lần lượt là biến phân tổng năng lượng, biến phân thế năng và biến phân công ngoại lực.

Biến phân thế năng biến dạng đàn hồi được xác định:

$$\begin{aligned}\delta U&=\int_V\left(\sigma_\xi\delta\varepsilon_\xi+\sigma_\theta\delta\varepsilon_\theta+\sigma_z\delta\varepsilon_z+\tau_{\xi\theta}\delta\varepsilon_{\xi\theta}+\tau_{\xi z}\delta\varepsilon_{\xi z}+\tau_{\theta z}\delta\varepsilon_{\theta z}\right)dV=\\&=\int_S\left(\sum_{i=1}^{N}\int_{h_{(i-1)}}^{h_{(i)}}\begin{pmatrix}\sigma_\xi\delta\varepsilon_\xi+\sigma_\theta\delta\varepsilon_\theta+\sigma_z\delta\varepsilon_z+\\+\tau_{\xi\theta}\delta\varepsilon_{\xi\theta}+\tau_{\xi z}\delta\varepsilon_{\xi z}+\tau_{\theta z}\delta\varepsilon_{\theta z}\end{pmatrix}\left(1+\frac{z}{R}\right)R^2dz\right)d\xi d\theta.\end{aligned}\tag{8}$$

Giả thiết vỏ chịu tác dụng của tải trọng hướng tâm phân bố q^+ ở mặt ngoài và q^- ở mặt trong. Khi đó, biến phân thế năng của công ngoại lực tác dụng lên vỏ trụ composite được xác định theo công thức:

$$\delta A=\int_\xi\int_\theta\left[q^+\delta w^+\left(1+\frac{h}{2R}\right)+q^-\delta w^-\left(1-\frac{h}{2R}\right)\right]R^2d\xi d\theta\tag{9}$$

Ở đây, $w^+=w_0+\frac{h}{2}w_1+\frac{h^2}{8}w_2$, $w^-=w_0-\frac{h}{2}w_1+\frac{h^2}{8}w_2$.

Thay thế (11), (10) và (9) và thực hiện biến đổi để xây dựng phương trình cân bằng ta sử dụng nguyên lý biến phân Lagrange [9], ta nhận hệ phương trình cân bằng theo chuyển vị khi *K=3* như sau:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial N_{\xi}^{(0)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta\xi}^{(0)}}{\partial \theta}=0, \quad \frac{\partial N_{\xi\theta}^{(0)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\xi}^{(0)}}{\partial \theta}+\partial N_{\theta z}^{(0)}=0,\\
&\frac{\partial N_{\xi}^{(1)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta\xi}^{(1)}}{\partial \theta}-RN_{\xi z}^{(0)}=0, \quad \frac{\partial N_{\xi\theta}^{(1)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta}^{(1)}}{\partial \theta}-RN_{\theta z}^{(0)}=0,\\
&\frac{\partial N_{\xi}^{(2)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta\xi}^{(2)}}{\partial \theta}-RN_{\xi z}^{(1)}=0, \quad \frac{\partial N_{\xi\theta}^{(2)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta}^{(2)}}{\partial \theta}-RN_{\theta z}^{(1)}-\partial N_{\theta z}^{(2)}=0,\\
&\frac{\partial N_{\xi}^{(3)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta\xi}^{(3)}}{\partial \theta}-RN_{\xi z}^{(2)}=0, \quad \frac{\partial N_{\xi\theta}^{(3)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta}^{(3)}}{\partial \theta}-RN_{\theta z}^{(2)}-2N_{\theta z}^{(3)}=0,\\
&\frac{\partial N_{\xi z}^{(0)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta z}^{(0)}}{\partial \theta}-N_{\theta}^{(0)}+N_{T\theta}^{(0)}-Rp_0=0,\\
&\frac{\partial N_{\xi z}^{(1)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta z}^{(1)}}{\partial \theta}-N_{\theta}^{(1)}-RN_{z}^{(0)}+N_{T\theta}^{(1)}+RN_{Tz}^{(0)}-Rp_1=0,\\
&\frac{\partial N_{\xi z}^{(2)}}{\partial \xi}+\frac{\partial N_{\theta z}^{(2)}}{\partial \theta}-N_{\theta}^{(2)}-RN_{z}^{(1)}+N_{T\theta}^{(2)}+RN_{Tz}^{(1)}-Rp_2=0.
\end{aligned}
\tag{10}
$$

Trong hệ phương trình (10), sử dụng các ký hiệu nội lực suy rộng như sau:

$$
\begin{aligned}
&\left[N_{\xi}^{(0)}\ \ N_{\xi}^{(1)}\ \ N_{\xi}^{(2)}\ \ N_{\xi}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\sigma_{\xi}^{(k)}\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,\\
&\left[N_{\theta}^{(0)}\ N_{\theta}^{(1)}\ \ N_{\theta}^{(2)}\ \ N_{\theta}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\sigma_{\theta}^{(k)}\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,\\
&\left[N_{z}^{(0)}\ \ N_{z}^{(1)}\ \ N_{z}^{(2)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\sigma_{z}^{(k)}\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\right]dz,\\
&\left[N_{\theta\xi}^{(0)}\ N_{\theta\xi}^{(1)}\ N_{\theta\xi}^{(2)}\ N_{\theta\xi}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\tau_{\theta\xi}^{(k)}\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,\\
&\left[N_{\xi\theta}^{(0)}\ \ N_{\xi\theta}^{(1)}\ N_{\xi\theta}^{(2)}\ N_{\xi\theta}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\tau_{\xi\theta}^{(k)}\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,\\
&\left[N_{\xi z}^{(0)}\ \ N_{\xi z}^{(1)}\ N_{\xi z}^{(2)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\tau_{\xi z}^{(k)}\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\right]dz,\\
&\left[N_{\theta z}^{(0)}\ \ N_{\theta z}^{(1)}\ \ N_{\theta z}^{(2)}\ \ N_{\theta z}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\tau_{\theta z}^{(k)}\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,
\end{aligned}
\tag{11}
$$

$$\left[N_{T\xi}^{(0)} N_{T\xi}^{(1)} N_{T\xi}^{(2)} N_{T\xi}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\Delta T\left(Q_{11}\alpha_{\xi}+Q_{12}\alpha_{\theta}+Q_{13}\alpha_{z}+Q_{14}\alpha_{\xi\theta}\right)\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,$$

$$\left[N_{T\theta}^{(0)}\ N_{T\theta}^{(1)} N_{T\theta}^{(2)} N_{T\theta}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\Delta T\left(Q_{21}\alpha_{\xi}+Q_{22}\alpha_{\theta}+Q_{23}\alpha_{z}+Q_{24}\alpha_{\xi\theta}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,$$

$$\left[N_{Tz}^{(0)} N_{Tz}^{(1)} N_{Tz}^{(2)} N_{Tz}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\Delta T\left(Q_{31}\alpha_{\xi}+Q_{32}\alpha_{\theta}+Q_{33}\alpha_{z}+Q_{34}\alpha_{\xi\theta}\right)\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,$$

$$\left[N_{T\xi\theta}^{(0)} N_{T\xi\theta}^{(1)} N_{T\xi\theta}^{(2)} N_{T\xi\theta}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\Delta T\left(Q_{41}\alpha_{\xi}+Q_{42}\alpha_{\theta}+Q_{43}\alpha_{z}+Q_{44}\alpha_{\xi\theta}\right)\left(1+\frac{z}{R}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,$$

$$\left[N_{T\theta\xi}^{(0)} N_{T\theta\xi}^{(1)} N_{T\theta\xi}^{(2)} N_{T\theta\xi}^{(3)}\right]=\sum_{k=1}^{NL}\int_{h_{(k-1)}}^{h_{(k)}}\Delta T\left(Q_{41}\alpha_{\xi}+Q_{42}\alpha_{\theta}+Q_{43}\alpha_{z}+Q_{44}\alpha_{\xi\theta}\right)\left[1\ z\ z^2\ z^3\right]dz,$$

$$p_i=q^{+}\left(1+\frac{h}{2R}\right)\frac{h^i}{2^i i!}+q^{-}\left(1-\frac{h}{2R}\right)\frac{(-h)^i}{2^i i!},\ i=0,1,2.$$

Điều kiện biên trong các trường hợp:

Ngàm	$u_0=0,\ u_1=0,\ u_2=0,\ u_3=0, v_0=0,\ v_1=0,$ $v_2=0,\ v_3=0, w_0=0,\ w_1=0,\ w_2=0,$	(12)
Tựa đơn	$N_{\xi}^{(0)}=0,\ N_{\xi}^{(1)}=0,\ N_{\xi}^{(2)}=0,\ N_{\xi}^{(3)}=0$ $v_0=0,\ v_1=0,\ v_2=0,\ v_3=0, w_0=0,\ w_1=0,\ w_2=0,$	
Tự do	$N_{\xi}^{(0)}=0,\ N_{\xi}^{(1)}=0,\ N_{\xi}^{(2)}=0,\ N_{\xi}^{(3)}=0, N_{\theta}^{(0)}=0,\ N_{\theta}^{(1)}=0,$ $N_{\theta}^{(2)}=0,\ N_{\theta}^{(3)}=0,\ N_{z}^{(0)}=0,\ N_{z}^{(1)}=0,\ N_{z}^{(2)}=0.$	

2.2. Phương pháp giải tích

Đặt chuyển vị và tải trọng dưới dạng khai triển chuỗi Fourie [10]. Khi đó, hệ phương trình cân bằng (10) cho ta hệ 11 phương trình vi phân đạo hàm riêng đối với 11 chuyển vị u_k, v_k, w_k và có bậc bằng 22. Giải hệ phương trình trên, ta nhận được nghiệm tổng quát có chứa các hằng số tích phân, các hằng số này tìm được từ các điều kiện biên (12). Để tìm các ứng suất σ_{ξ}, σ_{θ}, $\tau_{\xi\theta}$, ta sử dụng công thức định luật Hooke, các ứng suất cắt tìm được bằng cách tích phân phương trình cân bằng của lý thuyết đàn hồi 3D, theo [10].

2.3. Kiểm tra so sánh kết quả tính toán của mô hình

Theo bài toán Khdeir [2] và Khare-Kant [11]): Xét vỏ trụ composite lớp với tựa đơn hai đầu chịu tác dụng của tải trọng nhiệt độ phân bố theo quy luật hình sin. Vỏ trụ có thông số: Thông số hình học (tỉ số chiều dài và chiều rộng $b/a=1$, với $a=L$; tỉ số bán kính và chiều dày $S=R/h$, tỉ số bán kính và chiều dài nhận các giá trị khác nhau); Vật liệu: $E_1/E_2=25,\ E_3/E_2=1,\ G_{13}/E_2=G_{12}/E_2=0.5,\ G_{23}/E_2=0.2,$ $\nu_{12}=\nu_{23}=\nu_{13}=0.25,\ \alpha_2/\alpha_1=\alpha_3/\alpha_1=3;$ Hàm thay đổi nhiệt độ theo chiều dày vỏ

ΔT, được xác định theo quy luật sau:

$$\Delta T = \left(T_0 + \frac{z}{h}T_1\right)\cos\frac{\pi\xi}{\xi_0}\sin\frac{\pi\theta}{\theta_0}, \text{ ở đây: } T_1=1 \text{ và } T_0=0. \quad (13)$$

Kết quả tính toán độ võng không thứ nguyên $\bar{w}$ với các tỉ lệ *R/a* khác nhau nhận được trong công trình này và so sánh với các kết quả của tài liệu [11], được trình bày trong bảng 1. Trong đó, độ võng không thứ nguyên $\bar{w}$ được xác định thông qua độ võng của vỏ theo công thức:

$$\bar{w} = \frac{w(\xi/2, \theta/2, 0)}{\alpha_1 T_1 L^2}. \quad (14)$$

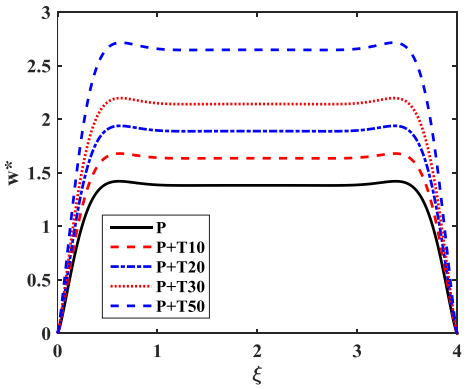
Bảng 1. *Độ võng $\bar{w}$ không thứ nguyên theo tại vị trí giữa của vỏ composite lớp chịu tải trọng hình sin bên trong ($L/R=4; S=R/h; m=1; n=4$).*

	R/a		Khdeir [2]		Khare [10] HOST 12	Bài báo
		CST	FSDT	HSDT		
[0/90°]	5	1.1280	1.1248	1.1235	1.1261	1.1263
	10	1.1447	1.1439	1.1421	1.1434	1.1443
	50	1.1501	1.1501	1.1482	1.1493	1.1502
$[0/90°]_5$	5	1.0247	1.0215	1.0216	1.0224	1.0151
	10	1.0310	1.0302	1.0303	1.0299	1.0225
	50	1.0331	1.0330	1.0332	1.0325	1.0250

Nhận xét: Các kết quả tính toán cho kết quả phù hợp với các kết quả tính toán của Khdeir [2] và Khare -Kant [11]. Vì vậy, mô hình lý thuyết và phương pháp tính toán sử dụng trong nghiên cứu này có độ tin cậy cao.

3. PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG CƠ NHIỆT CỦA VỎ COMPOSITE LỚP

Xét vỏ trụ composite chịu tác dụng tải trọng áp suất trong môi trường nhiệt: R=1, L/R=4, S=10; vật liệu Gr.Ep_AS (E_1=*137.9* GPa, E_2=E_3=*9.0* GPa, G_{12} = G_{13} = 7.1 GPa, G_{23} = 6.2 GPa, ν_{12}=ν_{13}= 0.30, ν_{23}=0.49, ρ_c=1500 kg/m^3, α_1=10^{-6} K^{-1}, α_2=30.10^{-6} K^{-1}, α_3=30.10^{-6} K^{-1}); vỏ trụ composite lớp chịu liên kết ngàm 2 đầu (CC); kết cấu chịu tác dụng của tải trọng áp suất phân bố đều q=10^6 Pa có cường độ ổn định theo thời gian và phương trùng với pháp tuyến bề mặt của vỏ, đồng thời nhiệt độ phát sinh biến dạng với: $\Delta T = [0 \div 50]$ *K*.



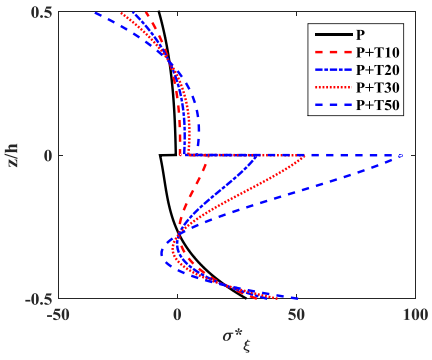
Hình 2. *Ảnh hưởng tải nhiệt độ tới chuyển vị vỏ trụ composite lớp.*

Kết quả tính toán chuyển vị ở hình 2 và ứng suất của vỏ composite [90^0/0], được thể hiện ở hình 3 và trong bảng 2, theo công thức sau:

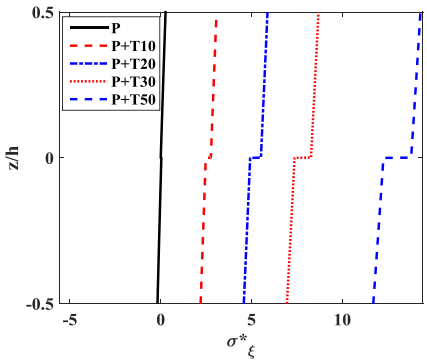
$$w^* = w^* \times 10^4;\ \left(\sigma_\xi^*, \sigma_\theta^*, \tau_{\xi z}^*, \sigma_z^*\right) = \frac{\left(\sigma_\xi, \sigma_\theta, \tau_{\xi z}, \sigma_z\right)}{10^6} \tag{15}$$

Bảng 2. *Chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ composite lớp, [0/90^0].*

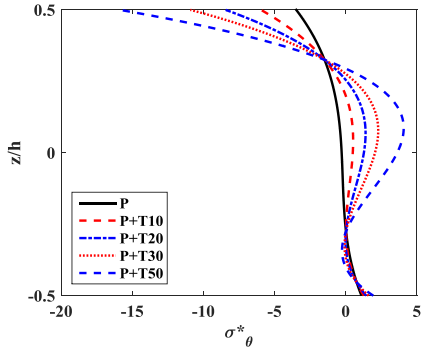
ΔT	$w^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ (0)	$\sigma_\xi^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\sigma_\theta^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\sigma_z^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/4)$	$\sigma_\xi^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\sigma_\theta^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\tau_{\xi z}^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/3)$	$\sigma_z^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/4)$
0	1.38257	0.26564 -0.17800	17.5553 0.77883	0.57633 0.93369	-7.7199 29.086	-3.4712 1.1167	-13.709 -4.1765	0.68835 4.3.667
10	1.63579	3.07354 2.19898	26.1798 3.49880	0.68896 1.02279	-13.238 33.409	-5.95224 1.28262	-41.151 -14.763	-11.412 3.658
20	1.88900	5.88144 4.57595	34.8043 6.21877	0.80159 1.11189	-18.756 37.732	-8.43329 1.44859	-68.594 -25.348	-23.512 2.9498
30	2.14222	8.68934 6.95293	43.4287 8.93874	0.91422 1.20099	-24.273 42.055	-10.9143 1.61456	-96.038 -35.934	-35.612 2.2414
50	2.64865	14.30514 11.70688	60.6777 14.37868	1.13947 1.37918	-35.309 50.702	-15.8764 1.94649	-150.92 -57.107	-59.812 0.82451



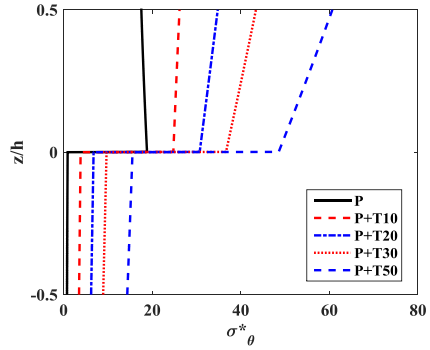
a1) Ứng suất σ_ξ^* tại vị trí biên



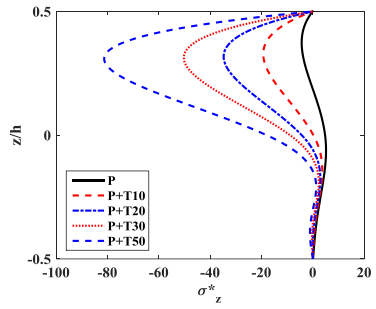
a2) Ứng suất σ_ξ^* tại $\xi = \xi_0/2$



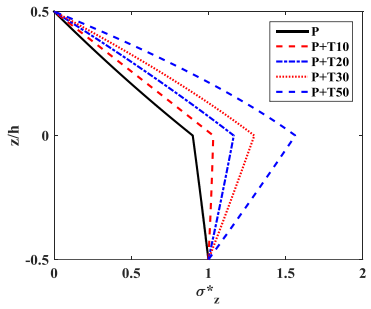
b1) Ứng suất σ_θ^* tại vị trí biên



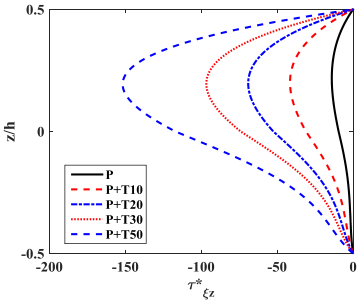
b2) Ứng suất σ_θ^* tại $\xi = \xi_0/2$



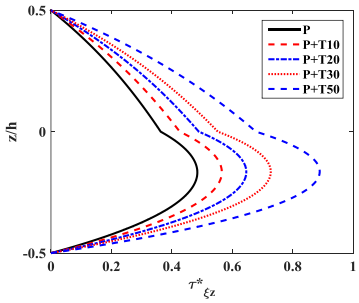
c1) Ứng suất σ_z^* tại vị trí biên



c2) Ứng suất σ_z^* tại $\xi = \xi_0 / 2$



d1) Ứng suất $\tau_{\xi z}^*$ tại vị trí biên



d2) Ứng suất $\tau_{\xi z}^*$ tại vị trí cách biên 5h

Hình 3. *Sự thay đổi ứng suất theo chiều dày vỏ với các nhiệt độ khác nhau.*

Kết quả tính toán chuyển vị và ứng suất của vỏ composite [90^0/0/90^0], được thể hiện ở trong bảng 3, theo công thức (15).

Bảng 3. *Chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ composite lớp, [90^0/0/90^0].*

ΔT	$w^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ (0)	$\sigma_\xi^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\sigma_\theta^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\sigma_z^*\left(\frac{\xi}{2},\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/4)$	$\sigma_\xi^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\sigma_\theta^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/2)$	$\tau_{\xi z}^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/3)$	$\sigma_z^*\left(\xi,\frac{\theta}{2}\right)$ $(\pm h/4)$
0	1.01092	0.21105 -0.13749	12.8767 15.1263	0.31774 0.59145	-6.2274 7.3456	-2.25116 2.57728	-2.2478 0.0593	-1.7900 0.47818
10	1.26892	3.01820 2.58223	21.5696 18.0944	0.40644 0.63766	-11.402 5.4545	-2.98248 -2.15545	-3.1393 0.3946	-10.998 -1.8604
20	1.52692	5.82534 5.30196	30.2624 21.0625	0.49513 0.68386	-16.577 3.5635	-3.71380 1.73361	-4.0308 0.7298	-20.206 -4.1990
30	1.78493	8.63249 8.02168	38.9553 24.0306	0.58383 0.73006	-21.752 1.6725	-4.44512 1.31178	-4.9223 1.0650	-29.414 -6.537
50	2.30093	14.2468 13.4611	56.3410 29.9668	0.76122 0.82247	-32.102 -2.1095	-5.90776 0.46812	-67.053 17.355	-47.831 -11.214

Nhận xét:

- Nhiệt độ làm tăng ứng suất của kết cấu vỏ, với mỗi tăng 10 độ làm tăng độ võng lên tới 20% trong khi tải trọng cơ không đổi.

- Nhiệt độ càng tăng hiệu ứng tập trung ứng suất tại biên. Trong đó, ứng pháp σ_z^* và suất tiếp $\tau_{\xi z}^*$ tại lớp giáp lớp vỏ thành ngoài (trong khoảng từ *h*/3 đến *h*/2) tăng mạnh hơn vùng lớp thành trong vỏ.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở tính toán lý thuyết và phân tích số trình bày trong công trình này, có thể rút ra những kết luận chủ yếu sau:

1. Thiết lập được các phương trình tính toán vỏ trụ theo lý thuyết biến dạng trượt bậc cao quasi-3D.

2. Thực hiện phân tích ảnh hưởng tải trọng cơ và nhiệt độ lên chuyển vị và ứng suất của vỏ trụ composite lớp.

3. Có hiện tượng tập trung ứng suất tại biên và các thiết diện có bước nhảy về tải tác dụng là đáng kể. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế tối ưu các kết cấu chịu tải trọng trong thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Reddy JN (2004), *"Mechanics of laminated composite plate and shell theory and analysis"*, second edition, CRC Press.

[2]. Khdeir AA, Reddy JN (1991), *"Thermal stresses and deflections of cross-ply laminated plates using refined plate theories"*, J Therm Stresses,14:419–38.

[3]. Zenkour AM, Fares ME (2000), *"Thermal bending analysis of composite laminated cylindrical shells using a refined first-order theory"*, J Therm Stresses, 23:505–26.

[4]. Tornabene, Liverani & Caligiana, (2012), *"Laminated composite rectangular and annular plates: A GDQ solution for static analysis with a posteriori shear and normal stress recovery"*, Composites Part B, Engineering, 43(4), 1847–1872.

[5]. Rohwer K, Rolfes R, Sparr H, (2001), *"Higher-order theories for thermal stresses in layered plates"*. Int J Solids Struct,38:3673–87.

[6]. Ootao Y, Tanigawa Y, Miyatake K, (2009), *"Transient Thermal Stresses of a Cross-Ply Laminated Cylindrical Shell Using a Higher-Order Shear Deformation Theory"*, Journal of Thermal Stresses.

[7]. N.T.Thanh NT, P.V.Chương và các cộng sư (2020), *"Tính toán vỏ trụ composite lớp trên cơ sở lý thuyết biến dạng trượt bậc cao Quasi 3D theo hướng tiếp cận giải tích"*, Số 65 -Tạp chí NC KHCN quân sự, Số 65, tr 186 -195.

[8]. Khdeir AA, Rajab MD and Reddy JN, (1992), *"Thermal Effects On the Response of Cross-Ply Laminated Shallow Shells"*, Int. J. Solids Structure, vol 29, pp. 653–667.

[9]. Firsanov VV, Doan TN, *"Investigation of the statics and free vibrations of cylindrical shells on the basis of a nonclassical theory"*. Composites Mechanics Computations Applications: An International Journal.

[10]. Doan TN, et al, (2020), *"Analysis of stress concentration phenomenon of cylinder laminated shells using higher-order shear deformation Quasi-3D theory"*. Composite Structures, 232:111526.

[11]. Khare, T.Kant, and A.K.Garg, (2003), *"Closed-Form Thermo-Mechanical Solutions of Higher-Order Theories of CrossPly Laminated Shallow Shells"*, Compos Struct, vol 59, pp 313–340.

ABSTRACT

THERMOMECHANICAL RESPONSE ANALYSIS
OF LAYERED COMPOSITE CYLINDER SHELLS
USING HIGH-ORDER SHEAR STRAIN THEORY BASED ON THE QUASI 3D

The paper presents the problem of analyzing the stress state of the composite cylinder shell under the effect of thermomechanical action on the basis of the theory of high-order sliding strain of 3D type. In this paper, the three-dimensional equations in the theory of nonlinear elasticity of the shell under the effect of thermo-mechanical loads are established into two-dimensional nonlinear equations for the cylindrical shell by using the decomposition method. and analyze the displacement field into a series of polynomial functions according to the shell thickness. On the basis of the obtained equations, set up a calculation program, compare and verify with the published results. From there, the survey and analysis of the thermomechanical response of the composite cylinder shell is applied.

Keywords: Composite layer cylinder shell; Strain stress state; Variational method; High-order shear deformation theory; Displacement; Equilibrium equation system.

Nhận bài ngày 29 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 15 tháng 9 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 24 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: [1] Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;
[2] Học viện Kỹ thuật quân sự.
[*] Email : thanhvtv2010@gmail.com.