

## Xác định biên dạng và chiều dày đáy bình áp lực composite trực hướng được quấn phi trắc địa

Đình Văn Hiến, Trần Ngọc Thanh, Vũ Tùng Lâm\*

Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

\*Tác giả liên hệ: lamnhungsaupop@gmail.com

Nhận bài: 03/9/2024; Hoàn thiện: 08/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.177-183>

### TÓM TẮT

Trong kỹ thuật quấn bình áp lực composite, quấn phi trắc địa là kỹ thuật rải sợi theo quỹ đạo chệch với đường trắc địa (đường ngắn nhất nối hai điểm trên bề mặt vỏ) một khoảng cách nhất định, nhưng vẫn đảm bảo sợi không trượt trên bề mặt vỏ. Kỹ thuật này được áp dụng trong quấn bình áp lực có bán kính lõm cực của hai đáy khác nhau. Đối với vỏ trụ composite có đáy, hai bài toán quan trọng là: 1- xác định biên dạng đáy; 2- xác định chiều dày lớp vỏ composite. Bài báo này trọng tâm xây dựng mô hình toán để xác định hai bài toán trên dựa trên giả thiết vật liệu composite là trực hướng, trong đó, bài toán xác định biên dạng đáy dựa trên ba điều kiện: 1- hình dạng cân bằng, 2- không trượt sợi, 3- năng lượng biến dạng cực tiểu; còn bài toán xác định chiều dày được thực hiện nhờ sử dụng tiêu chuẩn bên Tsai-Wu. Kết quả là cơ sở cho tính toán kết cấu-công nghệ quấn phi trắc địa bình áp lực composite.

**Từ khóa:** Bình áp lực; Composite; Biên dạng đáy; Chiều dày vỏ; Quấn phi trắc địa.

### 1. MỞ ĐẦU

Thiết kế, chế tạo vỏ composite tròn xoay đã và đang là chủ đề thời sự, thu hút nhiều nhà khoa học quan tâm. Đối với vỏ trụ composite có đáy, bài toán thiết kế kết cấu xoay quanh hai vấn đề chính là xác định biên dạng đáy vỏ và chiều dày lớp vật liệu composite. Theo mô tả toán học của quỹ đạo sợi, có hai kiểu quấn là quấn trắc địa và quấn phi trắc địa. Trong đó, quấn trắc địa là kỹ thuật rải sợi lên vỏ mà dưới tác động của lực căng sợi, thành phần lực ngang tác dụng lên sợi bằng không, tức là, sợi không có xu hướng trượt, ngược lại, trong quấn phi trắc địa, sợi không hoàn toàn nằm ở trạng thái cân bằng và luôn có xu hướng trượt.

Thông thường, để xác định hình dạng đáy vỏ composite tròn xoay, người ta giả thiết vật liệu composite là đơn hướng, khi chịu tải, vật liệu chỉ chịu ứng suất kéo phân bố đều theo chiều dọc trục sợi và như nhau trong mọi sợi. Cách tiếp cận này gọi là lý thuyết lưới. Việc thiết kế vỏ composite tròn xoay dựa trên lý thuyết lưới đã được tổng kết trong nhiều tài liệu, điển hình như cuốn sách của Vasiliev (2009) [1]. Với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, vật liệu composite cốt sợi/nền polyme ngày càng đa dạng, nhiều loại vật liệu composite thể hiện tính trực hướng hơn là tính đơn hướng. Vì vậy, về lý thuyết thiết kế vỏ composite cũng đòi hỏi phải có cách tiếp cận mới. Gần đây, lý thuyết liên tục (lý thuyết vật liệu composite trực hướng) đã được phát triển, điển hình như các công bố của Liang và cộng sự (2002) [2] cho bình áp lực composite được quấn trắc địa; Vasiliev (2003) [3], Zu và cộng sự (2010) [4] cho bình áp lực composite được quấn phi trắc địa.

Ở trong nước, việc nghiên cứu thiết kế vỏ composite tròn xoay nhận được bằng phương pháp quấn cũng đã được quan tâm gần đây, điển hình như các công trình [5-8] đã áp dụng lý thuyết lưới để xác định các tham số kết cấu và công nghệ quấn. Gần đây, các công trình [9, 10] đã phát triển lý thuyết liên tục để tính toán biên dạng và chiều dày lớp vật liệu composite của đáy vỏ bình áp lực được quấn trắc địa và quấn phẳng (một trường hợp riêng của quấn phi trắc địa).

Đối với bài toán xác định biên dạng đáy: Khi sử dụng lý thuyết lưới, do giả thiết vật liệu đơn hướng nên chỉ cần sử dụng hai điều kiện là: 1- không trượt sợi, 2- hình dạng cân bằng. Tuy nhiên, với lý thuyết liên tục, vật liệu được giả thiết là vật liệu trực hướng, nên để xác định biên dạng đáy

vỏ cần thêm điều kiện ràng buộc bổ sung. Vì vậy, việc thiết lập mô hình toán và hiện thực mô hình để xác định biên dạng đáy vỏ trở nên phức tạp hơn.

Đối với bài toán xác định chiều dày vỏ: Do vật liệu composite là trục hướng, nên cần sử dụng các tiêu chuẩn phá hủy chuyên cho vật liệu composite như tiêu chuẩn Tsai-Hill và Tsai-Wu.

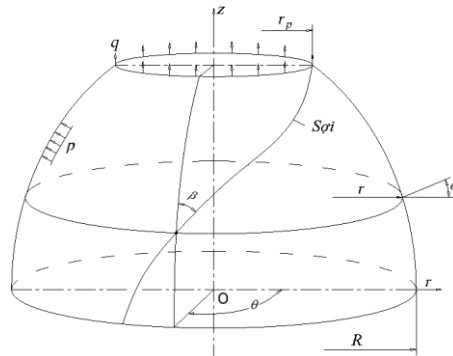
Từ phân tích trên, cùng với mục tiêu vận dụng các lý thuyết mới vào thiết kế vỏ composite tròn xoay, trong khuôn khổ bài báo, nhóm tác giả trọng tâm phát triển mô hình toán tổng quát để xác định biên dạng và chiều dày đáy vỏ trụ composite được quán phi trắc địa.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Bài toán xác định biên dạng đáy vỏ

#### 2.1.1. Đặc trưng hình học và vật lý của đáy bình áp lực composite

Xét một đáy bình áp lực composite dạng trụ với một sợi đặt trên bề mặt được mô tả trong hệ tọa độ cực  $(z, r, \theta)$  như hình 1. Mô số đặc trưng hình học và vật lý liên quan như sau:  $R, r_p$  là bán kính trụ và bán kính lỗ cực;  $\beta$  là góc quán, là góc tạo bởi tiếp tuyến của quỹ đạo sợi và kinh tuyến vỏ;  $p$  là áp suất trong và  $q$  là lực phân bố tại lỗ cực,  $q = p \cdot r_p / 2$  cho trường hợp bình áp lực.



Hình 1. Hình học đáy vỏ trụ composite.

#### 2.1.2. Quỹ đạo phi trắc địa và điều kiện ổn định sợi

Đối với đáy vỏ trụ composite, theo [8], phương trình quỹ đạo sợi quán phi trắc địa như sau:

$$\beta' = \frac{d\beta}{dz} = \lambda \cdot \left( \frac{\sin \beta \cdot \tan \beta}{r} - \frac{r'' \cdot \cos \beta}{1 + r'^2} \right) - \frac{r' \cdot \tan \beta}{r} \quad (1)$$

Trong đó:  $\beta'$  là đạo hàm bậc nhất của  $\beta$  theo  $z$ ;  $\lambda$  là hệ số trượt, được chọn trong giới hạn  $\lambda \leq [\lambda]$ , với  $[\lambda]$  là hệ số trượt cho phép.

#### 2.1.3. Điều kiện hình dạng cân bằng

- Các thành phần ứng suất trên phương kinh tuyến và vĩ tuyến trong đáy vỏ theo lý thuyết vỏ mỏng phi mô men [8-10]:

$$\sigma_\varphi = \frac{\bar{N}_\varphi}{\bar{h}} = \frac{p \cdot \bar{r} \cdot \sqrt{1 + \bar{r}'^2}}{2 \cdot \bar{h}} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\bar{N}_\theta}{\bar{h}} = \frac{p \cdot \bar{r} \cdot \sqrt{1 + \bar{r}'^2}}{2 \cdot \bar{h}} \left[ 2 + \frac{\bar{r} \cdot \bar{r}''}{1 + \bar{r}'^2} \right] \quad (3)$$

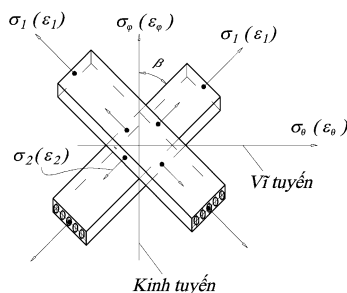
Trong đó: Chỉ số  $\varphi$  và  $\theta$  chú thích cho phương kinh tuyến và vĩ tuyến của vỏ;  $\bar{N}$  là giá trị nội lực không thứ nguyên;  $\bar{h}$  là chiều dày vỏ;  $\bar{r}, \bar{r}_p, \bar{z}, \bar{h}$  là các tham số không thứ nguyên  $\bar{r} = r / R, \bar{r}_p = r_p / R, \bar{z} = z / R, \bar{h} = h / R$ ;  $\bar{r}'$  và  $\bar{r}''$  là đạo hàm cấp một và cấp hai của  $\bar{r}$  theo  $\bar{z}$ .

- Các thành phần ứng suất theo lý thuyết lớp: Mô tả các thành phần ứng suất trong phân tổ composite như hình 2. Do vỏ tròn xoay và tải áp suất đối xứng, nên các thành phần ứng suất trượt theo phương kính tuyến phải bằng không. Vì vậy, theo [12] ta có:

$$\sigma_\phi = \sigma_1 \cdot \cos^2 \beta + \sigma_2 \cdot \sin^2 \beta - \tau_{12} \cdot \sin 2\beta \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_1 \cdot \sin^2 \beta + \sigma_2 \cdot \cos^2 \beta + \tau_{12} \cdot \sin 2\beta \quad (5)$$

ở đó, chỉ số 1 và 2 chú thích phương dọc và ngang sợi;  $\sigma$  và  $\tau$  là ứng suất pháp và ứng suất trượt.



**Hình 2.** Các thành phần ứng suất-biến dạng trong phân tổ vỏ.

Để hình dạng vỏ cân bằng, các thành phần ứng suất  $\sigma_\phi$  và  $\sigma_\theta$  phải thỏa mãn đồng thời cặp phương trình (2)-(4) và (3)-(5).

Xét tỷ số  $\eta = \sigma_\theta / \sigma_\phi$ , từ (2) và (4), (3) và (5) ta có:

$$\eta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_\phi} = 2 + \frac{\bar{r} \cdot \bar{r}''}{1 + \bar{r}'^2} = \frac{\tan^2 \beta + k + 2.l \cdot \tan \beta}{1 + k \cdot \tan^2 \beta - 2.l \cdot \tan \beta} \quad (6)$$

Trong đó:  $k = \sigma_2 / \sigma_1$ ;  $l = \tau_{12} / \sigma_1$ .

Rõ ràng, biên dạng đáy vỏ trụ composite có thể được xác định bằng việc kết hợp phương trình (6) và (1) nếu các tham số  $k$  và  $l$  được định trước.

#### 2.1.4. Điều kiện tối ưu hình dạng

Để định trước các tham số  $k$  và  $l$ , chúng ta cần một điều kiện bổ sung, được gọi là điều kiện tối ưu hình dạng. Hình dạng vỏ tối ưu khi năng lượng biến dạng trong vỏ là nhỏ nhất [4, 9]. Để đáp ứng điều này, các thành phần biến dạng pháp tuyến theo các phương phải bằng nhau [9]:

$$\epsilon_\phi = \epsilon_\theta = \epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (7)$$

Từ điều kiện (7), kết hợp với lý thuyết đàn hồi và lý thuyết lớp, có thể tìm ràng buộc cho các tham số  $k$  và  $l$  như sau:

- Các phương trình liên quan theo lý thuyết đàn hồi [12]:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\nu_{12}}{E_2} \cdot \sigma_2 \quad (8)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\nu_{21}}{E_1} \cdot \sigma_1 \quad (9)$$

ở đó,  $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}$  là mô đun đàn hồi và hệ số Poisson tương ứng của vật liệu.

- Các phương trình liên quan theo lý thuyết lớp [12]:

$$\gamma_{12} = (\epsilon_\theta - \epsilon_\phi) \cdot \sin 2\beta \quad (10)$$

- Từ điều kiện (7) và lưu ý,  $E_1 \cdot \nu_{12} = E_2 \cdot \nu_{21}$ , cân bằng (8), (9) và biến đổi, nhận được:

$$k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{E_2(1 + \nu_{21})}{E_1(1 + \nu_{12})} = \text{const} \quad (11)$$

Rõ ràng,  $k$  chỉ phụ thuộc vào các tham số hằng của vật liệu.

- Do điều kiện (7), nên từ (10), chúng ta phải có,  $\gamma_{12} = 0$ . Vì biến dạng góc trên phương 1-2,  $\gamma_{12} = 0$ , nên vật liệu không chịu ứng suất trượt, tức là,  $\tau_{12} = 0$ , hay,  $l = 0$ .

### 2.1.5. Phương trình mô tả biên dạng đáy vỏ

- Phương trình biên dạng đáy cơ sở:

Do  $k = \text{const}$  và  $l = 0$ , kết hợp phương trình (6) và (1), sau đó biến đổi, nhận được phương trình mô tả biên dạng đáy vỏ được quân phi trắc địa như sau:

$$\begin{cases} \bar{r}'' = \left( \frac{\tan^2 \beta + k}{1 + k \cdot \tan^2 \beta} - 2 \right) \frac{1 + \bar{r}'^2}{\bar{r}} \\ \beta' = \lambda \cdot \left( \frac{\sin \beta \cdot \tan \beta}{r} - \frac{r'' \cdot \cos \beta}{1 + r'^2} \right) - \frac{r' \cdot \tan \beta}{r} \end{cases} \quad (12)$$

- Phương trình hiệu chỉnh: Đường cong biên dạng đáy nhận được từ phương trình (12) hầu hết không hoàn chỉnh và xuất hiện điểm uốn trước khi tiến về lỗ cực. Để khắc phục điều này, theo [8], một phương trình hiệu chỉnh cần được sử dụng có dạng như phương trình (13).

$$\begin{cases} \left( \bar{z} + \bar{R}_{1f} \cdot \sin \alpha_f - \bar{z}_f \right)^2 + \left( \bar{r} + \bar{R}_{1f} \cdot \cos \alpha_f - \bar{r}_f \right)^2 = \bar{R}_{1f}^2 \\ \alpha_f = \arccos \left( (1 + \bar{r}'^2)^{-1/2} \right) \Big|_{\bar{z} = \bar{z}_f} \end{cases} \quad (13)$$

ở đó, chỉ số  $f$  chú thích cho điểm hiệu chỉnh;  $R_1$  là của cung kính tuyến tại điểm hiệu chỉnh.

## 2.2. Bài toán xác định chiều dày đáy vỏ

### 2.2.1. Tiêu chuẩn bền Tsai-Wu

Trong nghiên cứu này, tiêu chuẩn bền Tsai-Wu được sử dụng để dự báo chiều dày vật liệu composite. Dạng mở rộng của tiêu chuẩn Tsai-Wu cho trạng thái ứng suất hai chiều như sau [13]:

$$F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_6 \cdot \tau_{12} + F_{66} \cdot \tau_{12}^2 \leq 1 \quad (14)$$

Trong đó:  $\sigma_1$  và  $\sigma_2$  được suy ra từ phương trình (4) và (5), được biểu diễn ở dạng khác như phương trình (15) và (16);  $\tau_{12} = 0$  dựa theo điều kiện tối ưu hình dạng ở trên;  $F_i$  và  $F_{ij}$  là các tham số bền của vật liệu composite được chỉ ra trong tài liệu [13].

$$\sigma_1 = \frac{m \cdot \bar{N}_\theta - n \cdot \bar{N}_\varphi}{\bar{h}} \quad (15)$$

$$\sigma_2 = \frac{m \cdot \bar{N}_\varphi - n \cdot \bar{N}_\theta}{\bar{h}} \quad (16)$$

ở đó,  $m = \sin^2 \beta / (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta)$  và  $n = \cos^2 \beta / (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta)$ .

### 2.2.2. Hàm xác định chiều dày xích đạo của đáy vỏ

Thay (15), (16) vào (14) và lấy dấu bằng, nhận được quan hệ sau:

$$f(\bar{h}) = a_1 \bar{h}^2 - b_1 \bar{h} - c_1 = 0 \quad (17)$$

ở đó,  $a_1 = 1$ ,  $b_1$  và  $c_1$  là các hệ số được xác định như (18), (19).

$$b_1 = F_1 \cdot (m \cdot \bar{N}_\theta - n \cdot \bar{N}_\varphi) + F_2 \cdot (m \cdot \bar{N}_\varphi - n \cdot \bar{N}_\theta) \quad (18)$$

$$c_1 = 2.F_{12} \cdot (m \cdot \bar{N}_\theta - n \cdot \bar{N}_\varphi) (m \cdot \bar{N}_\varphi - n \cdot \bar{N}_\theta) + F_{11} \cdot (m \cdot \bar{N}_\theta - n \cdot \bar{N}_\varphi)^2 + F_{22} \cdot (m \cdot \bar{N}_\varphi - n \cdot \bar{N}_\theta)^2 \quad (19)$$

Giải phương trình (17) sẽ tìm được giá trị chiều dày vật liệu không thứ nguyên  $\bar{h}$ .

Chiều dày  $\bar{h}$  phụ thuộc vào các tham số  $\bar{r}$  và  $\bar{z}$ , tức là phụ thuộc vào tọa độ của điểm xác định chiều dày. Theo [10], phân bố chiều dày trên đáy vỏ được xác định theo quan hệ (20).

$$\bar{h} = \bar{h}(\bar{z}) = \bar{h}_{eq} \cdot \frac{\cos \beta_{eq}}{\bar{r}(\bar{z}) \cdot \cos \beta(\bar{z})} \quad (20)$$

ở đó,  $\bar{h}_{eq}$  là chiều dày không thứ nguyên tại xích đạo.

Từ (20) nhận thấy, với mỗi  $\bar{h}(\bar{z})$  tìm được từ (17) sẽ tìm được một giá trị  $\bar{h}_{eq}$  tại xích đạo. Do vậy, chiều dày xích đạo cuối cùng sẽ được xác định như quan hệ (21).

$$\bar{h}_{eq \max} = \max_{0 \leq \bar{z} \leq \bar{z}_p} \left[ \bar{h}(\bar{z}) \cdot \frac{\bar{r}(\bar{z}) \cdot \cos \beta(\bar{z})}{\cos \beta_{eq}} \right] \quad (21)$$

### 2.2.3. Hàm mô tả chiều dày biến đổi trên đáy vỏ

Chiều dày vật liệu tính toán theo phương trình (20) có thể tương hợp tốt với chiều dày thực của vật liệu trên đáy vỏ ở khoảng cách  $\bar{r}_{2\bar{w}} = \bar{r}_p + 2\bar{w} \leq \bar{r} \leq 1$ , ở đó,  $\bar{w}$  là bề rộng băng quán không thứ nguyên,  $\bar{w} = w/R$  ( $w$ - bề rộng băng quán). Ở khu vực gần lỗ cực,  $\bar{r}_p \leq \bar{r} \leq \bar{r}_{2\bar{w}}$ , chúng ta có thể sử dụng một hàm bậc ba để mô tả sự phân bố của vật liệu [10, 14]:

$$\bar{h}_a(\bar{z}) = a_2 \bar{z}^3 + b_2 \bar{z}^2 + c_2 \bar{z} + d_2 \quad (22)$$

ở đó,  $a_2, b_2, c_2$  và  $d_2$  là các hệ số được trình bày chi tiết trong công trình [10, 14].

## 3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

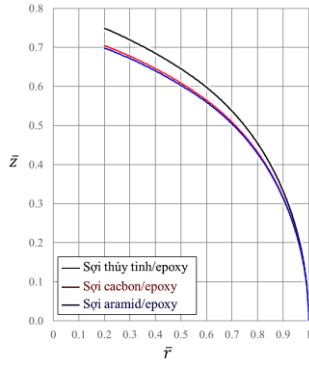
Trong phần này, một số kết quả tính toán cụ thể dựa trên cơ sở lý thuyết đã thiết lập cho 3 loại vật liệu composite có tính chất cơ học trình bày trong bảng 1.

**Bảng 1. Tính chất của ba loại vật liệu composite phổ dụng [11].**

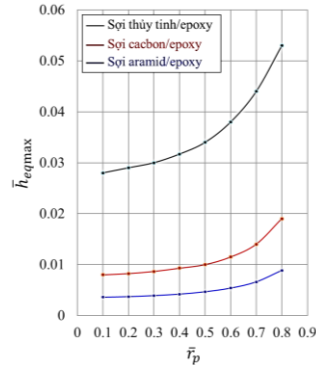
Tính chất	Sợi thủy tinh/ epoxy	Sợi cacbon/ epoxy	Sợi aramid/ epoxy
Mô đun đàn hồi dọc theo phương dọc sợi, $E_1$ (GPa)	60	140	95
Mô đun đàn hồi theo phương vuông góc với sợi, $E_2$ (GPa)	13	11	5,1
Hệ số Poisson trên phương 2-1, $\nu_{21}$	0,3	0,27	0,34
Độ bền kéo theo phương dọc sợi, $X_1^T$ (MPa)	1800	2000	2500
Độ bền nén theo phương dọc sợi, $X_1^C$ (MPa)	650	1200	300
Độ bền kéo theo phương vuông góc với sợi, $X_2^T$ (MPa)	40	50	30
Độ bền nén theo phương vuông góc với sợi, $X_2^C$ (MPa)	90	170	130
Độ bền cắt, $X_{12}$ (MPa)	50	70	30
$k$	0,265	0,098	0,071

Hình 3 trình bày biên dạng đáy được tính toán cho ba loại vật liệu composite ở bảng 1. Có thể thấy, khi  $k$  càng lớn hay vật liệu thể hiện tính dị hướng càng lớn thì chiều cao đáy càng cao. Điều này có ý nghĩa rằng, với vật liệu composite thể hiện tính dị hướng càng cao, biên dạng đáy tính toán theo lý thuyết lưới trình bày trong các công trình [5-8] là không phù hợp.

Hình 4 trình bày ảnh hưởng của bán kính cực  $\bar{r}_p$  lên chiều dày xích đạo của vỏ,  $\bar{h}_{eq\max}$ . Rõ ràng, khi tăng bán kính cực  $\bar{r}_p$  làm cho chiều dày vật liệu tại xích đạo tăng lên, ý rằng, để cùng chịu một áp lực, bán kính  $\bar{r}_p$  càng lớn, cần phải gia cố vật liệu nhiều hơn, hay số lớp quấn tăng lên. Từ hình 4 cũng cho thấy, do ảnh hưởng của tham số bền, vật liệu sợi aramid/epoxy cho chiều dày nhỏ nhất, tiếp đến là vật liệu sợi cacbon/epoxy và cuối cùng là sợi thủy tinh/epoxy.

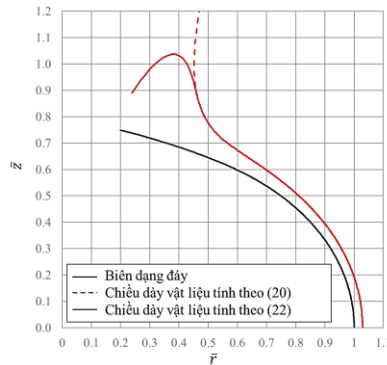


**Hình 3.** Biên dạng đáy tính toán cho 3 loại vật liệu composite với các tham số ban đầu  $\bar{r}_p = 0,2$ ,  $\beta_{eq} = 0,2$  và  $\lambda = 0,1$ .



**Hình 4.** Ảnh hưởng của  $\bar{r}_p$  lên  $\bar{h}_{eq\max}$  với  $p = 10 \text{ MPa}$  và  $\bar{w} = 0,1$ .

Phân bố chiều dày trên đáy vỏ được tính toán từ các phương trình (20) và (22) cho vật liệu sợi thủy tinh/epoxy được trình bày trên hình 5. Có thể thấy, phân bố chiều dày vật liệu trên đáy được tính toán từ phương trình (20) là không thực tế. Chiều dày vật liệu dự báo từ phương trình (22) thực tế hơn đối với kết cấu thực. Điều này có ý nghĩa quan trọng khi dùng kết quả dự báo chiều dày từ nghiên cứu này kết hợp với phân tích ứng xử cơ học của vật liệu bằng các phương pháp khác như phương pháp phần tử hữu hạn.



**Hình 5.** Phân bố chiều dày vật liệu trên đáy (vật liệu: sợi thủy tinh/epoxy,  $\bar{r}_p = 0,2$ ,  $\beta_{eq} = 0,2$ ,  $\lambda = 0,1$  và  $\bar{h}_p = 5\bar{h}_{eq}$ ).

#### 4. KẾT LUẬN

Dựa trên lý thuyết liên tục, phân tích hình học và đặc trưng chịu lực của vỏ trụ composite, đã xây dựng được các mô hình toán xác định biên dạng đáy vỏ trụ composite trục hướng, quấn phi trục địa; xác định chiều dày vật liệu composite tại xích đạo của đáy vỏ trụ dựa theo tiêu chuẩn bền Tsai-Wu và phân bố chiều dày trên đáy. Từ mô hình toán, đã tính toán xác định hình dạng đáy vỏ và chiều dày vật liệu composite cho ba loại vật liệu composite gồm sợi aramid/epoxy, cacbon/epoxy và thủy tinh/epoxy. Một số điểm chính rút ra là:

- Vật liệu composite với độ bền kéo theo phương dọc trục càng lớn, chiều dày lớp vỏ composite càng nhỏ.

- Bán kính lỗ cực ảnh hưởng đáng kể đến chiều dày vật liệu trên đáy, khi bình áp lực có bán kính cực càng lớn, chiều dày vật liệu trên đáy càng lớn.

### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. V. V. Vasiliev, “*Composite pressure vessels- analysis, design, and manufacturing*”, Virginia, USA: Bull Ridge Publishing, Blacksburg, (2009).
- [2]. C. C. Liang et al., “*Optimum design of dome contour for filament-wound composite pressure vessels based on a shape factor*”, *Composite Structures*, 58(4), pp.469-482, (2002).
- [3]. V. V. Vasiliev and A. A. Krikanov, “*New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications*”, *Composite Structures*, 62(3), pp.449-459, (2003).
- [4]. L. Zu et al., “*Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories*”, *Composites: Part A*, 41, pp.1312–1320, (2010).
- [5]. T. N. Thanh và cộng sự, “*Tính toán các thông số công nghệ quấn bình cao áp hình trụ từ vật liệu compozit*”, *Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự*, (2011).
- [6]. T. T. Thanh Vân và cộng sự, “*Xây dựng mô hình tính toán cho thiết kế biên dạng bình composite được quấn theo đường phi trắc địa*”, *Tạp chí khoa học và công nghệ Hàng Hải*, 8, pp.9-11, (2020).
- [7]. Đ. V. Hiến và cộng sự, “*Biên dạng đáy vỏ compozit dạng trụ lỗ cực hở nhận được bằng phương pháp quấn phẳng*”, *Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự*, (2020).
- [8]. D. V. Hien, T. N. Thanh et al., “*Design of planar wound composite vessel based on preventing slippage tendency of fibers*”, *Composite Structures*, 254, (2020).
- [9]. Đ. V. Hiến và T. N. Thanh, “*Biên dạng đáy vỏ trụ composite dị hướng nhận được bằng phương pháp quấn trắc địa*”, *Hội nghị KH toàn quốc về CHVR lần thứ XV*, (2021).
- [10]. D. V. Hien and T. N. Thanh, “*Prediction of material thickness on dome of geodesic wound orthotropic composite vessel*”, *Journal of Military science and technology*, 83, pp.95-102, (2022).
- [11]. R. M. Jones, “*Mechanics of composite materials*”, McGRAW-Hill Co, (1975).
- [12]. V. V. Vasiliev, E.V. Morozov, “*Mechanics and analysis of composite materials*”, UK: Elsevier, (2001).
- [13]. S. W. Tsai and E. M. Wu, “*A general theory of strength for anisotropic materials*”, *J Compos Mater* 5(1), (1971).
- [14]. A. A. Krikanov, “*Refined thickness of filament wound shells*”, *Science and Engineering of Composite Materials* 10 (4), (2002).

### **ABSTRACT**

#### **Determination of shape and material thickness on dome of non-geodesic wound orthotropic composite pressure vessel**

*In the composite pressure vessel winding technique, non-geodesic winding is a technique of spreading the yarn along a trajectory that deviates from the geodesic path (the shortest path connecting two points on the shell surface) a certain distance, but still ensures that the yarn does not slip on the shell surface. This technique is applied in winding pressure vessels with polar hole radii of two different domes. For cylindrically composite shell with domes, two important problems are: 1- determining the dome profile; 2- determining the composite shell thickness. This paper focuses on building a mathematical model to determine the above two problems based on the assumption that composite materials are orthogonal, in which, the problem of determining the dome profile is based on three conditions: 1- balanced shape, 2- no fiber slip, 3- minimum strain energy; while the thickness determination problem is performed using Tsai-Wu failure criterion. The results are the basis for calculation of structural and winding processing parameters of non-geodesic wound composite pressure vessels.*

**Keywords:** Pressure vessel; Composite; Dome shape; Thickness of shell; Non-geodesic winding.