

# NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN THAM SỐ KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO BÌNH COMPOZIT SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ QUẤN

RESEARCH ON CALCULATION OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR MANUFACTURING PRESSURE VESSELS FROM COMPOSITE MATERIALS USING WINDING TECHNOLOGY

BÙI VĂN ẨM\*, ĐINH VĂN HIỂN, TRẦN NGỌC THANH

Viện Tên lửa, Khoa học và Công nghệ Quân sự

\*Email liên hệ: kimam1994offich@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.945>

## Tóm tắt

Bài toán xác định tham số kết cấu - công nghệ đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết kế, chế tạo các kết cấu trong kỹ thuật nói chung cũng như bình compozit nói riêng. Để xác định tham số kết cấu bình compozit cần giải quyết hai bài toán nhỏ sau: 1- xác định biên dạng đáy bình đảm bảo điều kiện không trượt sợi và cân bằng nội lực bên trong bình theo lý thuyết liên tục, 2 - là xác định bề dày lớp quấn xoắn sử dụng tiêu chuẩn Tsai-Wu cho vật liệu dị hướng. Trên cơ sở hình dạng biên dạng của bình, cần xác định tham số công nghệ như quỹ đạo sợi, bề rộng băng sợi,... phục vụ cho quá trình chế tạo bình. Kết quả bài báo là cơ sở cho việc thiết kế chế tạo bình compozit.

**Từ khóa:** Tham số kết cấu - công nghệ, bình compozit, công nghệ quấn.

## Abstract

Determining structural and technological parameters is essential in the design and fabrication of engineering structures, particularly composite pressure vessels. To define the structural parameters of a composite cylindrical vessel, two sub-problems must be addressed: (1)-determining the dome profile of the cylinder to satisfy the conditions of no fiber slippage and internal force equilibrium within the vessel, and (2) - determining the thicknesses of the hoop winding layer and the helical winding layer based on the Tsai-Wu failure criterion for anisotropic materials. Based on the geometry of the dome profile, the technological parameters—such as fiber trajectories and fiber band width—are determined to ensure uniform fiber distribution over the mold surface. The results of this study provide a theoretical foundation for the design and fabrication of composite pressure vessels.

**Keywords:** Structural-technological parameters, composite tanks, winding technology.

## 1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, bình compozit chịu lực hình trụ đã trở thành sản phẩm chủ đạo trong các ngành công nghiệp đòi hỏi thiết bị nhẹ, bền và an toàn, đặc biệt là trong các hệ thống lưu trữ khí nén cho các thiết bị lặn trên biển trong dân dụng và trong quân sự là thân vỏ động cơ tên lửa nhiên liệu rắn,... Bình compozit dạng trụ có đáy thường được sản xuất bằng công nghệ quấn và được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu. Trên thế giới cũng như tại Việt Nam, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào bài toán thiết kế và tối ưu hóa hình dạng đáy bình compozit, tiêu biểu là các công trình dựa trên lý thuyết lưới của Vasiliev (2009) [1], Đinh Văn Hiến (2020) [2], cùng các nghiên cứu theo lý thuyết đàn hồi của Vasiliev (2003) [3], Zu và cộng sự (2010) [4]. Để đánh giá khả năng chịu lực của bình compozit, nghiên cứu [5], [6] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích quá trình tiến triển phá hủy của bình compozit, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của các khuyết tật trong vật liệu đến cơ chế và mức độ phá hủy của kết cấu.

Việc thiết kế và chế tạo bình compozite không chỉ dừng lại ở việc xác định biên dạng đáy mà đòi hỏi phải giải quyết tổng hợp nhiều bài toán liên quan đến xác định các tham số kết cấu - công nghệ. Với mục tiêu xác định tham số kết cấu, bài báo tiến hành tổng hợp cơ sở lý thuyết để xây dựng mô hình toán mô tả biên dạng đáy bình compozit dựa trên lý thuyết lưới và lý thuyết liên tục. Trên cơ sở biên dạng đáy, chiều dày bình và góc quấn sợi được xác định bảo đảm khả năng chịu lực của bình. Sử dụng kết quả tham số kết cấu, xây dựng phương pháp xác định quỹ đạo sợi để bảo đảm sợi phân bố đều trên khuôn, xác định bề rộng băng sợi tránh hiện tượng trượt sợi trong quá trình quấn và xác định số lớp quấn, số vòng quấn thực tế. Kết quả nghiên cứu được áp dụng để thiết kế, chế tạo

và thử nghiệm bình composit sợi cacbon T700/nền epoxy. Bình thử nghiệm đặt áp suất phá hủy  $p_{ph} = 36\text{MPa}$ , qua đó bước đầu đánh giá và khẳng định tính tin cậy của phương pháp xác định các tham số kết cấu - công nghệ được đề xuất.

## 2. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Đặc trưng hình học - vật lý đáy bình composit

Xét một đáy bình composit được mô tả trong hệ tọa độ cực  $(z, r, \theta)$  chịu áp lực trong  $p$  được đặt một bằng sợi quấn như Hình 1. Một số đặc trưng hình học và vật lý của đáy bình áp lực liên quan đến nghiên cứu này như sau:

-  $R, r_p$  là bán kính phân trụ và bán kính lỗ cực của đáy.

-  $\beta$  là góc quấn, là góc tạo bởi tiếp tuyến của quỹ đạo sợi với tiếp tuyến của kinh tuyến của vỏ bình;

-  $p, q$  là áp suất bình và lực dọc trục tại lỗ cực;

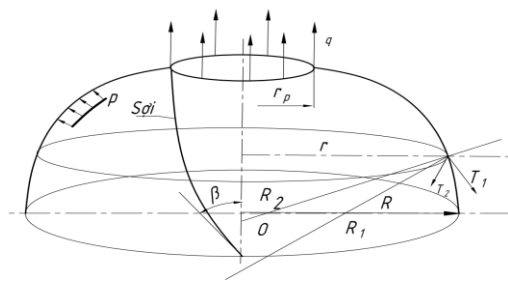
-  $T_1, T_2$  là nội lực theo phương kinh tuyến và vĩ tuyến;

-  $R_1, R_2$  - bán kính cung kinh tuyến và vĩ tuyến [2]:

$$R_1 = -\frac{\sqrt{(1+r'^2)^3}}{r''} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{r}{\cos \alpha} = r \cdot \sqrt{1+r'^2} \quad (2)$$

Trong đó,  $r', r''$  - là đạo hàm bậc nhất và bậc hai của  $r$  theo  $z$ .



Hình 1. Mô hình hình học đáy bình composit

### 2.2. Xác định tham số kết cấu bình composit

#### 2.2.1. Bài toán xác định biên dạng đáy bình composit

Để giải quyết bài toán xác định biên dạng đáy bình composit, ta cần giải quyết hai bài toán nhỏ:

- Bài toán quấn sợi đảm bảo sợi không bị trượt trên bề mặt khuôn quấn.

- Các bài toán cân bằng các nội lực trong vỏ bình composit.

#### a, Điều kiện sợi không trượt trên khuôn

Để đảm bảo sợi không trượt, hệ số trượt  $\lambda$  giữa sợi và khuôn phải nằm trong giới hạn cho phép [2]:

$$\lambda \leq [\lambda] \quad (3)$$

ở đó,  $[\lambda]$  là hệ số trượt cho phép.

Hệ số trượt cho phép giữa sợi và khuôn theo sơ đồ quấn phi trắc địa được mô tả như sau [2]:

$$\lambda = \frac{\sqrt{1+r'^2} \cdot (r' \cdot \sin \beta + r \cdot \beta' \cdot \cos \beta)}{\sqrt{1+r'^2} \cdot \sin^2 \beta - r \cdot r'' \cdot \cos^2 \beta} \quad (4)$$

Đối với đáy composit quấn theo sơ đồ trắc địa, sợi không có xu hướng trượt, tức  $\lambda = 0$  phương trình quỹ đạo sợi trắc địa trở thành như sau [2]:

$$r \cdot \cos \beta = \text{const} \quad (5)$$

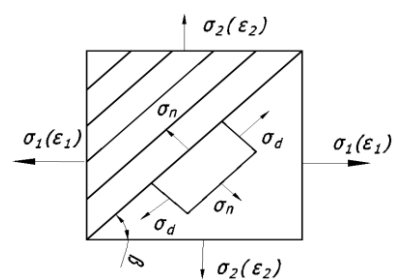
#### b, Điều kiện cân bằng nội lực trong bình composit

Dưới tác dụng áp suất trong  $p$  trong bình xuất hiện các thành phần nội lực  $T_1$  và  $T_2$  [2]:

$$T_1 = \frac{pR_2}{2} \left( 1 - \frac{2qr_p - pr_p^2}{pr^2} \right) \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{pR_2}{2} \left( 2 - \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{2qr_p - pr_p^2}{pr^2} \right) \right) \quad (7)$$

Dưới tác động của áp lực  $p$  trong vỏ bình composit xuất hiện các thành phần ứng suất như Hình 2.



Hình 2. Mô tả ứng suất trên phân tử vỏ bình composit

Vì bình composit có dạng vỏ tròn xoay đối xứng qua trục và trục của bình trùng với hướng chính của vật liệu composit dị hướng nên các thành phần ứng suất và biến dạng trượt trên vỏ đều bằng không [1]. Theo lý thuyết cơ học của vật liệu composit [1], mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trên vỏ bình composit có dạng như sau:

$$\sigma_1 = \frac{T_1}{h} = \sigma_d \cdot \cos^2 \beta + \sigma_n \cdot \sin^2 \beta \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{h} = \sigma_d \cdot \sin^2 \beta + \sigma_n \cdot \cos^2 \beta \quad (9)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_n \cdot \sin^2 \beta - \varepsilon_d \cdot \cos^2 \beta}{\sin^4 \beta - \cos^4 \beta} \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_d \cdot \sin^2 \beta - \varepsilon_n \cdot \cos^2 \beta}{\sin^4 \beta - \cos^4 \beta} \quad (11)$$

$$\varepsilon_d = \frac{\sigma_d}{E_d} - \frac{\nu_{dn}}{E_n} \cdot \sigma_n \quad (12)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{E_n} - \frac{\nu_{nd}}{E_d} \cdot \sigma_d \quad (13)$$

$$E_d \cdot \nu_{dn} = E_n \cdot \nu_{nd} \quad (14)$$

Ở đó,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_n$ ,  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_n$  là ứng suất và biến dạng theo phương dọc và vuông góc với trục sợi;  $E_d$ ,  $E_n$ ,  $\nu_{dn}$ ,  $\nu_{nd}$  là mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của vật liệu compozit theo phương dọc và vuông góc trục sợi,  $h$  - chiều dày bình compozit.

Từ (1), (2), và (6) - (14) ta có tỷ số  $\sigma_2/\sigma_1$ :

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\tan^2 \beta + n}{1 + n \cdot \tan^2 \beta} = \left( \frac{2}{1 - \frac{\nu_p}{r^2}} + \frac{r \cdot r'}{1 + r'^2} \right) \quad (15)$$

Trong đó, tỷ số  $n = \sigma_n/\sigma_d$  tỷ số ứng suất đặc trưng cho tính dị hướng của vật liệu compozit.

Theo [3], vật liệu bắt đầu chuyển từ trạng thái đàn hồi sang trạng thái dẻo khi thế năng biến dạng đạt đến một giá trị nhất định. Do đó, khi năng lượng biến dạng đạt đến giá trị cực tiểu, kết cấu đó sẽ có khả năng chịu lực cao nhất. Vì vậy, sử dụng nguyên lý năng lượng biến dạng cực tiểu để áp dụng để thiết kế hình dạng đáy vỏ bình compozit tối ưu. Theo [3], để đáy vỏ đạt tối ưu giá trị biến dạng của vỏ theo phương kính tuyến và phương vĩ tuyến phải bằng nhau:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (16)$$

Kết hợp (16) với (10), (11), (12), (13) ta được:

$$n = \frac{\sigma_n}{\sigma_d} = \frac{E_n(1 + \nu_{nd})}{E_d(1 + \nu_{dn})} = const \quad (17)$$

Từ (15), (17) ta nhận được phương trình mô tả biên dạng đáy:

$$r'' = \left( \frac{\tan^2 \beta + n}{1 + n \tan^2 \beta} - \frac{2 \cdot r^2}{r^2 - C_p \cdot r_p^2} \right) \frac{1 + r'^2}{r} \quad (18)$$

Trong đó hệ số bán kính lõ cực  $C_p = 1 - \frac{2q}{p \cdot r_p}$ .

Kết hợp (18) và (4) ta nhận được hệ phương trình xác định biên dạng đáy bình compozit quán phi trục địa theo lý thuyết liên tục, kết hợp (18) và (5) ta nhận được hệ phương trình xác định biên dạng đáy bình compozit quán trục địa theo lý thuyết liên tục. Khi giá trị hệ số dị hướng bằng 0 hay  $n = 0$  ta nhận phương trình biên dạng đáy theo lý thuyết lưới. Để giải hệ phương trình xác định góc quán và biên dạng đáy bình compozit ta dùng điều kiện biên  $z(0) = 0, r(0) = R, r'(0) = 0, \beta(0) = \beta_{xd}$ , trong đó  $\beta_{xd}$  - góc quán tại vị trí xích đạo.

### 2.2.2. Xác định chiều dày bình compozit

Do vật liệu compozit là vật liệu dị hướng nên để xác định chiều dày đáy bình compozit cần sử dụng các tiêu chuẩn phá hủy chuyên dụng cho vật liệu compozit, điển hình như tiêu chuẩn Tsai-Wu [3]. Tiêu chuẩn Tsai-Wu đối với đáy bình compozit được xác định như sau [1]:

$$X_d \cdot \sigma_d + X_n \cdot \sigma_n + 2 \cdot X_{dn} \cdot \sigma_d \cdot \sigma_n + X_{dd} \cdot \sigma_d^2 + X_{nn} \cdot \sigma_n^2 = 1 \quad (19)$$

Ở đó,  $\sigma_d$  và  $\sigma_n$  nhận được từ phương trình (8), (9),  $X_d$ ,  $X_n$ ,  $X_{dn}$ ,  $X_{dd}$ ,  $X_{nn}$  - là các tham số bền của vật liệu compozit được xác định theo [1].

Thay (8), (9) vào phương trình (19) ta được phương trình xác định chiều dày đáy bình compozit:

$$h^2 - xh - y = 0 \quad (20)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} x &= X_d(mT_2 - nT_1) + X_n(mT_1 - nT_2), \\ y &= 2X_{dn}(mT_2 - nT_1)(mT_1 - nT_2) - X_{dd}(mT_2 - nT_1)^2 \\ &\quad - X_{nn}(mT_1 - nT_2)^2, m = (\sin^2 \beta) / (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta), \\ n &= (\cos^2 \beta) / (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta) \end{aligned}$$

Giải phương trình (20) sẽ tìm được giá trị chiều dày đáy bình compozit  $h$ . Do nội lực  $T_1$ ,  $T_2$  và góc quán  $\beta$  là hàm phụ thuộc vào  $z$  nên phân bố chiều dày trên đáy vỏ được xác định theo quan hệ sau :

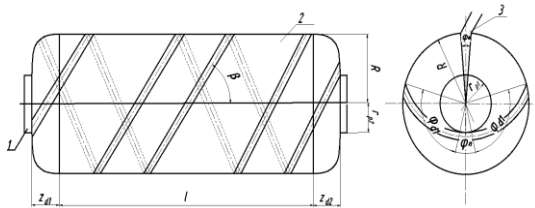
$$h = h(z) = h_{xd} \cdot \frac{\cos \beta_{xd}}{r(z) \cdot \cos \beta(z)} \quad (21)$$

Ở đó,  $h_{xd}$  là chiều dày tại xích đạo.

### 2.3. Xác định tham số công nghệ quấn bình composit

#### 2.3.1. Xác định quỹ đạo sợi quấn

Xét một băng sợi có bề rộng  $t$  quấn lên vỏ bình composit như Hình 3. Mỗi vòng quấn băng sợi quấn thực hiện quấn từ đáy thứ nhất quấn sang đáy thứ hai và quay trở lại đáy thứ nhất. Để đảm bảo việc rải sợi đều, điểm đầu và điểm cuối phải quấn trùng nhau sau mỗi vòng quấn hay khuôn quấn quay một số nguyên lần  $360^\circ$ . Tuy nhiên trên thực tế, điểm đầu và điểm cuối của băng sợi sau mỗi vòng quấn luôn lệch nhau một góc bằng bước góc  $\Delta\phi$ . Để đảm bảo việc rải đều băng sợi lên khuôn quấn bước góc  $\Delta\phi$  cần là ước của  $2\pi$  (hay  $360^\circ$ ), tức là sau một số vòng quấn điểm đầu và điểm cuối trùng nhau. Do bước góc  $\Delta\phi$  trên thực tế thường không phải ước  $2\pi$ , nên tại hai đầu lỗ cực băng sợi sẽ được ngàm lại tại phần bích với các góc  $\phi_{n1}, \phi_{n2}$  để nhận được bước góc hiệu chỉnh  $\Delta\phi^* = \Delta\phi + \phi_{n1} + \phi_{n2}$  là ước của  $2\pi$ , trong đó  $\phi_{n1}, \phi_{n2}$  - lần lượt là góc ngàm lại tại lỗ cực 1 và lỗ cực 2. Ngoài chức năng điều chỉnh bước góc, việc ngàm sợi tại lỗ cực còn để giữ băng sợi tránh hiện tượng trượt sợi trong quá trình quấn. Để xác định rõ quỹ đạo sợi, trước hết cần xác định góc quay của khuôn quấn sau mỗi vòng quấn.



Hình 3. Sơ đồ công nghệ quấn băng sợi trên khuôn

1- Bích, 2- Khuôn quấn, 3- Sợi quấn

Góc quay của khuôn quấn sau một vòng quấn được biểu thị như sau:

$$\phi = \phi_{d1} + \phi_{d2} + \phi_t \quad (22)$$

Trong đó  $\phi_{d1}, \phi_{d2}, \phi_t$  - lần lượt góc quay của khuôn quấn khi quấn đáy thứ 1, góc quay của khuôn quấn của đáy thứ 2, góc quay của khuôn quấn phần trụ sau một vòng quấn.

Góc quay khuôn quấn khi quấn phần trụ:

$$\phi_t = 2 \frac{l}{R} \tan(\beta_{sd}) \quad (23)$$

Góc quay của khuôn quấn khi phần đáy [7]:

$$\phi_{d1} = 2 \int_0^{z_{d1}} \tan(\beta_{d1}(z)) \cdot \frac{\sqrt{1+r'^2}}{r} dz \quad (24)$$

$$\phi_{d2} = 2 \int_0^{z_{d2}} \tan(\beta_{d2}(z)) \cdot \frac{\sqrt{1+r'^2}}{r} dz \quad (25)$$

Trong đó,  $l, z_{d1}, z_{d2}, \beta_{d1}(z), \beta_{d2}(z)$ , - lần lượt là chiều dài phần trụ, chiều cao đáy 1, đáy 2, góc quấn đáy 1 và đáy 2 theo  $z$ .

Góc lệch điểm đầu và điểm cuối sau khi quay được một vòng được tính theo công thức:

$$\Delta\phi = \phi - \left[ \frac{\phi}{2\pi} \right] \cdot 2\pi \quad (26)$$

Trong đó,  $[\phi/2\pi] = 1, 2, 3, \dots$  là số nguyên vòng quay của khuôn quấn trong một vòng quấn.

Xác định góc ngàm băng sợi tại mặt bích là:

$$\phi_{n1} = \phi_{n2} = \frac{\Delta\phi^* - \Delta\phi}{2} \quad (27)$$

Góc  $\Delta\phi^*$  - là bước góc thực tế, được lựa chọn với các giá trị gần bằng các góc quấn được lựa chọn sau:  $360^\circ, 240^\circ, 180^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 72^\circ, 60^\circ, \dots$

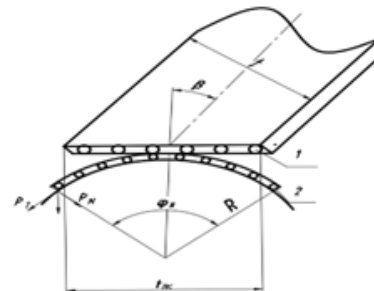
Góc quay thực tế của khuôn quấn sau một vòng:

$$\phi_{th} = \phi + \phi_s \quad (28)$$

Ở đó,  $\phi_s$  - là góc quay của khuôn do độ rộng băng sợi,  $\phi_{th}$  - là góc quay của khuôn thực tế.

#### 2.3.2. Xác định bề rộng băng sợi

Trong lý thuyết quấn, băng sợi được coi như một sợi độ dày bằng không, trên thực tế bề rộng của sợi luôn khác không, vì vậy trong quá trình quấn một phần băng sợi có khả năng bị trượt kéo theo cả băng bị trượt nên cần lựa chọn độ rộng phù hợp. Xét sơ đồ rải sợi trên mặt cắt thiết diện khuôn quấn như Hình 4. Xét băng sợi có bề rộng  $t$  được quấn dưới góc quấn  $\beta$ , dưới tác dụng lực kéo băng sợi được áp sát vào bề mặt khuôn quấn tạo áp lực  $P_N$ . Tại vị trí mép ngoài băng sợi lực tiếp tuyến  $P_T$  gây ra do độ cong của khuôn.



Hình 4. Sơ đồ đặt sợi lên mặt cắt thiết diện khuôn quấn với lực căng sợi (2) và không có lực căng sợi (1)

Để đảm bảo điều kiện chống trượt băng sợi:

$$P_T = P_N \cdot \tan\left(\frac{\phi_s}{2}\right) \leq P_N \cdot [\lambda] \quad (29)$$

Bề rộng của băng sợi tính theo thiết diện khuôn quẩn là:

$$t_{mc} = \frac{t}{\cos \beta} \quad (30)$$

Trong đó,  $t$ - bề rộng băng sợi,  $t_{mc}$ - bề rộng băng sợi theo mặt cắt thiết diện khuôn quẩn.

Góc quay của khuôn quẩn do ảnh hưởng độ rộng băng sợi:

$$\phi_s = \frac{t_{mc}}{R} = \frac{t}{R \cdot \cos \beta} \quad (31)$$

Kết hợp công thức (30) và (31), bề rộng của băng sợi cần thỏa mãn điều kiện sau:

$$t \leq 2R \cdot \cos \beta \cdot \tan \lambda \quad (32)$$

Để đảm bảo năng suất quẩn đạt cực đại nên lựa chọn băng quẩn có bề rộng cực đại  $t_{max} = 2R \cdot \cos \beta \cdot \tan \lambda$ . Tuy nhiên bề rộng băng sợi được lựa chọn thực tế  $t_i$  theo thông số của nhà sản xuất, vì vậy băng sợi được lựa chọn cần thỏa mãn  $t_i \leq t_{max}$ .

### 2.3.3. Xác định vòng quẩn, lớp quẩn, chiều dày thực tế.

Góc quay thực tế của khuôn quẩn sau một vòng:

$$\phi_{th} = \phi + \phi_{st} = \phi + \frac{t_i}{R \cos \beta} \quad (33)$$

Số vòng quẩn xoắn để tạo thành một lớp kín trên bề mặt khuôn quẩn là:

$$N_x = \text{ROUNUP} \left( \frac{2\pi}{\phi_{st}} \right) \quad (34)$$

Ở đó hàm ROUNUP - là hàm làm tròn lên.

Xác định số lớp quẩn xoắn:

$$n_x = \text{ROUNUP} \left( \frac{h_{xd}}{2h_b^t} \right) \quad (35)$$

Trong đó,  $h_b^t$  - dày của một lớp băng quẩn thực tế sau tẩm nhựa  $h_{xd}$  - chiều dày lớp quẩn xoắn.

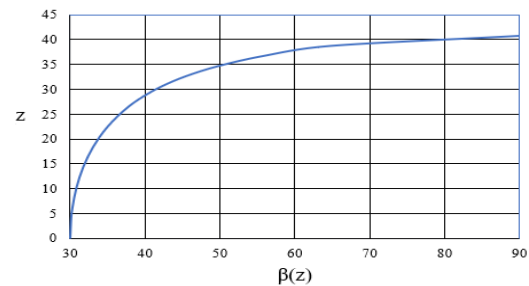
Chiều dày lớp quẩn thực tế:

$$h_{xd}^t = 2n_x \cdot h_b^t \quad (36)$$

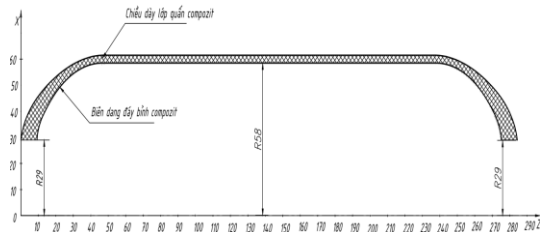
## 3. Kết quả và bàn luận

### 3.1. Kết quả tính toán tham số kết cấu - công nghệ chế tạo bình composít

Trên cơ sở lý thuyết đã trình bày trên, nhóm tác giả tính toán xác định tham số kết cấu - công nghệ chế tạo bình composít từ sợi cacbon T700/ epoxy chịu áp lực phá hủy  $p_{ph}=36\text{MPa}$ . Sử dụng hàm Odesolve trong Mathcad để giải hệ phương trình mô tả biên dạng đáy với bán kính lỗ cực hai đáy  $r_{p1}=r_{p2}=29\text{mm}$ ,  $R=58\text{mm}$  ta nhận góc quẩn ở cả hai đáy theo chiều cao đáy như Hình 5 với góc quẩn trên phần trụ  $\beta_{xd}=30^\circ$ . Với các tham số bên của vật liệu composít từ sợi cacbon T700/ epoxy [9], nhóm tác giả xác định chiều dày lớp quẩn và biên dạng đáy của bình composít như Hình 6. Các tham số công nghệ được trình bày Bảng 1.



Hình 5. Sự phụ thuộc của góc quẩn vào chiều cao đáy



Hình 6. Biên dạng và chiều dày bình composít

Bảng 1. Các tham số công nghệ chế tạo bình composít

Bước góc ( $\Delta\phi^*$ )	240°
Góc bù tại mặt bích ( $\phi_{n1} = \phi_{n2}$ )	33°
Bề rộng băng sợi ( $t$ ):	4mm
Số vòng quẩn xoắn ( $N_x$ ):	79
Số lớp quẩn xoắn ( $n_x$ ):	3

### 3.2. Chế tạo và thử nghiệm bình composít

Quá trình chế tạo bình composít bằng công nghệ quẩn được bắt đầu bằng việc chuẩn bị lớp làm kín và



Hình 7. Quấn bình composit sợi cacbon T700/ nền epoxy

lắp đặt lên máy quấn. Nhựa nền epoxy được pha với chất đóng rắn m-phenylenediamine theo tỷ lệ 1:0,15 và đổ vào thùng tấm nhựa. Dựa trên các tham số kết cấu đã được xác định, thiết lập chương trình quấn bình composit trên máy quấn 4VFW-600 tại Viện Tên lửa. Sợi cacbon sau khi được sấy khô ở nhiệt độ 60°C trong 4 giờ được dẫn qua thùng tấm nhựa và quấn đều trên bề mặt khuôn theo góc quấn đã tính toán, với tốc độ quay của khuôn là 30 vòng/phút. Sau khi hoàn thành quá trình quấn, bình composit được đóng rắn trực tiếp trên máy quấn và tiếp tục sấy ở nhiệt độ 50°C trong thời gian 8 giờ.

Sau khi chế tạo, bình composit được tiến hành thử nghiệm bền với môi trường thử là dầu thủy lực AW68 theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7388:2004. Trong quá trình thử nghiệm, dầu thủy lực được bơm vào bình với tốc độ tăng áp suất đều 5MPa/phút. Khi áp suất đạt 38MPa, áp suất trong bình giảm đột ngột, đồng thời xuất hiện vết nứt và hiện tượng rò rỉ dầu tại khu vực gần cổ bình và vùng xích đạo. Kết quả thử nghiệm cho thấy áp suất phá hủy thực tế lớn hơn áp suất phá hủy tính toán, với sai số khoảng 5,56%. Điều này cho thấy phương pháp xác định các tham số kết cấu - công nghệ được đề xuất trong nghiên cứu có độ tin cậy và phù hợp với thực tế.

#### 4. Kết luận

Dựa trên mô hình hình học và đặc trưng chịu lực của bình composit, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình toán mô tả biên dạng đáy vỏ bình composit theo lý thuyết liên tục. Trên cơ sở đó, xác định chiều dày bình theo tiêu chuẩn phá hủy tiêu chuẩn Tsai-Wu. Đồng thời, xây dựng được phương pháp xác định quỹ đạo sợi, bề rộng băng sợi quấn, số lớp quấn xoắn phục vụ cho quá trình chế tạo bình composit.

Trên cơ sở lý thuyết đã thiết lập, sử dụng hàm Odesolve trong phần mềm Mathcad để giải phương trình mô tả biên dạng đáy và xác định chiều dày bình composit có tham số  $R=58\text{mm}$ ,  $r_{p1}=r_{p2}=29\text{mm}$  và áp suất phá hủy  $p=36\text{Mpa}$ . Từ kết quả tính toán, đã chế tạo bình composit sợi cacbon T700/ nền nhựa epoxy



Hình 8. Thử nghiệm phá hủy bình composit

và thử nghiệm thành công với áp suất phá hủy thực tế  $p_{ph}=38\text{MPa}$ . Kết quả chứng minh, các phương pháp tính toán tham số kết cấu - công nghệ để thiết kế, chế tạo bình composit đáng tin cậy và phù hợp với thực tế. Các kết quả của nghiên cứu là cơ sở cho việc tính toán, thiết kế và chế tạo bình composit phục vụ các ứng dụng trong lĩnh vực lặn biển.

#### Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin bày tỏ lời cảm ơn chân thành tới Viện Tên lửa - Viện Khoa học Công nghệ Quân sự đã đưa ra các yêu cầu và hỗ trợ để thực hiện công trình nghiên cứu này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V.V. Vasiliev (2009), *Composite pressure vessels - analysis, design, and manufacturing*, Virginia, USA: Bull Ridge Publishing, Blacksburg.
- [2] D.V. Hien, T.N. Thanh and et al. (2020), *Design of planar wound composite vessel based on preventing slippage tendency of fibers*, Composite Structures, Vol.254.
- [3] V.V. Vasiliev and A.A. Krikanov (2003), *New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications*, Composite Structures, Vol.62(3), pp.449-459.
- [4] L. Zu and et al. (2010), *Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories*, Composites: Part A, Vol.41, pp.1312-1320.
- [5] Y. Zhang, H. Liu, and X. Wang (2024), *Failure prediction and optimization for composite pressure vessel combining FEM simulation and machine learning approach*, Composite Structures.
- [6] Y. Zhang, H. Liu, X. Wang, and J. Chen (2024), *A three-dimensional progressive failure analysis of filament-wound composite pressure vessels with void defects*, Thin-Walled Structures, Vol.195.

- [7] И.М. Буланов, В.И. Смыслов, М.А. Комков, В.И. Кузнецов. (1985), *Сосуды давления из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов*. Москва: информации.
- [8] Буланов И М, Воробей В.В (1988), *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*. Москва: МГТУ им Баумана.
- [9] Li, Z., Liu, Y., Qi, L., Mei, Z., Gao, R., Yu, M., Sun, Z., & Wang, M. (2022). *Optimization of the laminate structure of a composite cylinder based on the combination of response surface methodology (RSM) and finite element analysis (FEA)*. *Materials*, Vol.15(21).

Ngày nhận bài:	26/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	13/02/2026
Ngày duyệt đăng:	25/03/2026