

Đánh giá hiệu quả kết cấu của đay vỏ trụ composite đơn hướng nhận được bằng phương pháp quấn

Trần Ngọc Thanh*

Viện Tên lửa/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

*Email: tntvtl@gmail.com

Nhận bài: 10/6/2023; Hoàn thiện: 15/8/2023; Chấp nhận đăng: 10/10/2023; Xuất bản: 25/10/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.90.2023.156-162>

TÓM TẮT

Theo xu thế, bình áp lực composite ngày càng được dùng rộng rãi để thay thế các bình áp lực kim loại. Một tiêu chí đánh giá bình áp lực composite là chỉ số hiệu quả kết cấu (F_p), $F_p = p_b \cdot V / W = p_b \cdot V / (\rho \cdot V_s)$, ở đó, p_b , V , W , ρ và V_s lần lượt là áp suất phá hủy, thể tích bên trong, khối lượng bình, khối lượng riêng và thể tích vỏ composite. Như vậy, hiệu quả của bình áp lực phụ thuộc vào các tham số vật liệu, chiều dày và phân bố chiều dày trên vỏ, cũng như các tham số liên quan đến hình dạng vỏ và tọa độ lỗ cục. Trong khi, chiều dày và phân bố chiều dày vỏ lại phụ thuộc vào cơ tính vật liệu và các tham số kết cấu-công nghệ quấn (trắc địa, phi trắc địa hoặc phẳng). Nhằm tối ưu thiết kế, bài báo trọng tâm xác định ảnh hưởng của một số tham số kết cấu và vật liệu đến hiệu quả kết cấu của đay vỏ bình áp lực composite đơn hướng dạng trụ.

Từ khóa: Hiệu quả kết cấu; Vỏ trụ composite; Bình áp lực composite; Quấn sợi.

1. MỞ ĐẦU

Phát triển các kết cấu composite chịu áp lực trong nhận được bằng phương pháp quấn là một xu thế, trong đó, có kết cấu dạng trụ có đay như các bình áp lực chứa khí nén, chất lỏng áp suất cao hoặc vỏ động cơ tên lửa,... Về mặt thiết kế, một hướng tiếp cận đơn giản nhưng khá hiệu quả là giả thiết vật liệu composite đơn hướng, khi chịu áp, nên chỉ đóng vai trò liên kết, sợi đóng vai trò hấp thụ tải hoàn toàn giống như dạng dây mềm để cân bằng lực của toàn kết cấu. Cách tiếp cận này gọi là lý thuyết lưới. Theo kỹ thuật rải sợi, có 3 kiểu quấn cơ bản:

- Quấn trắc địa là kiểu rải sợi lên bề mặt vỏ mà dưới tác dụng của lực căng sợi, không có thành phần lực ngang tác động lên sợi, tức là sợi không có xu hướng trượt;
- Quấn phi trắc địa là trường hợp tổng quát chung của các kỹ thuật quấn, ở đó, sợi luôn có xu hướng trượt khi quấn dưới tác động của lực căng sợi;
- Quấn phẳng là trường hợp đặc biệt của quấn phi trắc địa, ở đó, sợi được rải theo quỹ đạo nằm trong mặt phẳng. Do quỹ đạo sợi bị ràng buộc, nên sợi luôn nằm ở trạng thái không cân bằng, tức là, luôn có xu hướng trượt.

Trên thế giới, việc nghiên cứu phát triển các vỏ trụ có đay dựa trên lý thuyết lưới đã được phát triển qua nhiều năm và đã được tổng kết tương đối đa dạng trong tài liệu [1]. Ở Việt Nam, cũng đã có một số nghiên cứu về thiết kế và chế tạo bình áp lực dạng trụ có đay, điển hình như các công trình [2-5], đã đạt được một số thành tựu về lý thuyết như xây dựng được mô hình toán xác định biên dạng vỏ, chiều dày lớp composite,... và xác định các thông số công nghệ quấn.

Để đánh giá một bình áp lực, có nhiều tiêu chí khác nhau, song một tiêu chí phổ dụng là chỉ số hiệu quả kết cấu:

$$F_p = \frac{p_b \cdot V}{W} \quad (1)$$

ở đó, p_b , V và W là áp suất phá hủy, thể tích bên trong và khối lượng của vỏ.

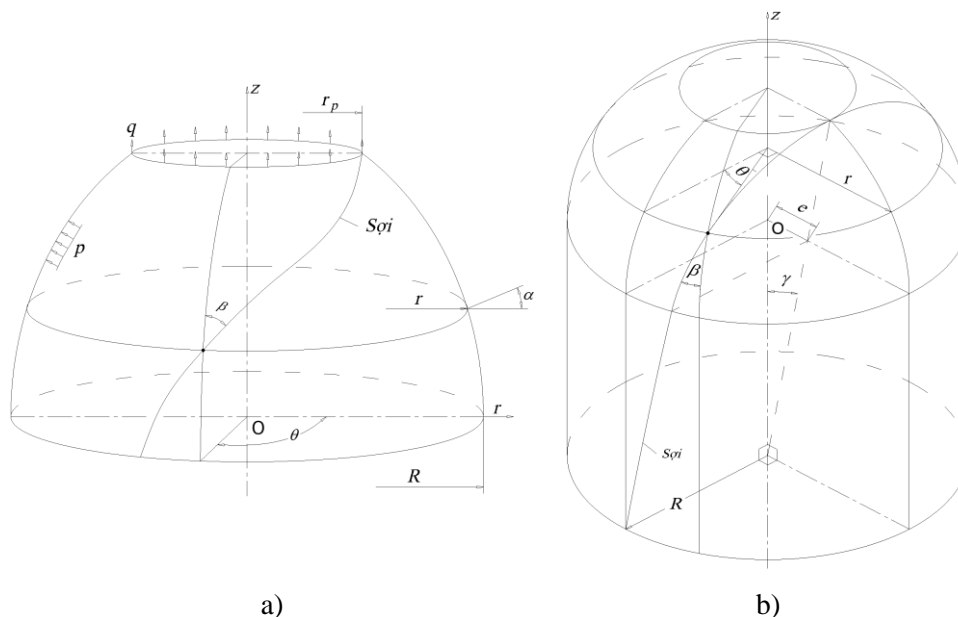
Như vậy, một bình áp lực được tối ưu theo chỉ số hiệu quả kết cấu là bình có khả năng chịu áp tốt nhất, thể tích chứa lớn nhất, nhưng khối lượng là nhỏ nhất. Tuy nhiên, các nghiên cứu mang

tính phổ quát để phân tích và đánh giá mức độ hiệu quả kết cấu của bình áp lực được quấn sợi theo các kỹ thuật nêu trên còn chưa đầy đủ, nhất là ở Việt Nam còn chưa được nghiên cứu.

Kế thừa các thành tựu trước đó, trong khuôn khổ bài báo, nhóm tác giả trọng tâm phân tích và đánh giá chỉ số hiệu quả kết cấu của đáy vỏ trụ composite đơn hướng theo 3 kỹ thuật quấn đã nêu để làm cơ sở tối ưu thiết kế bình áp lực.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Các tham số đặc trưng liên quan của đáy vỏ trụ composite



Hình 1. Đặc trưng hình học của đáy vỏ trụ composite:
a) Quấn xoắn; b) Quấn phẳng.

Xét một đáy vỏ trụ composite (đáy bình áp lực) được quấn xoắn (trắc địa và phi trắc địa) và quấn phẳng nằm trong hệ tọa độ cực (r, z, θ) như hình 1. Một số tham số đặc trưng chính gồm:

- R và r_p là bán kính xích đạo và bán kính lỗ cực của vỏ;
- β là góc quấn (góc tạo bởi tiếp tuyến của sợi và kinh tuyến của đáy vỏ);
- \bar{e} và γ là khoảng cách lệch tâm và góc quấn ban đầu trên phần trụ (hình 1b);
- p và q là áp lực bên trong vỏ và lực phân bố đường tại lỗ cực, $q = p.r_p/2$ với vỏ có lỗ cực đóng kín bằng nắp và $q = 0$ cho vỏ có lỗ cực hở.

2.2. Phương trình biên dạng đáy vỏ trụ composite

Biên dạng đáy vỏ trụ composite được thiết kế dựa trên điều kiện hình dạng cân bằng và điều kiện không trượt của sợi. Cho 3 trường hợp của kỹ thuật rải sợi, phương trình mô tả biên dạng đáy vỏ được xây dựng theo lý thuyết lưới như sau:

- Quấn trắc địa [6]:

$$\bar{r}'' = \left(\frac{\bar{r}_p^2}{\bar{r}^2 - \bar{r}_p^2} - \frac{2.\bar{r}^2}{\bar{r}^2 - C_p.\bar{r}_p^2} \right) \cdot \frac{(1 + \bar{r}^2)}{\bar{r}} \quad (2)$$

Góc quấn, β , đối với quấn trắc địa cần thỏa mãn điều kiện Clairaut sau:

$$\bar{r} \cdot \sin \beta = \bar{r}_p \quad (3)$$

- Quán phi trắc địa [3, 5]:

$$\begin{cases} \bar{r}'' = \left(\tan^2 \beta - \frac{2\bar{r}^2}{\bar{r}^2 - C_p \cdot \bar{r}_p^2} \right) \cdot \frac{1 + \bar{r}'^2}{\bar{r}} \\ \beta' = \lambda \cdot \left(\frac{\sin \beta \cdot \tan \beta}{\bar{r}} - \frac{\bar{r}'' \cdot \cos \beta}{1 + \bar{r}'^2} \right) - \frac{\bar{r}' \cdot \tan \beta}{\bar{r}} \end{cases} \quad (4)$$

ở đó, λ là hệ số phản ánh khuynh hướng trượt của sợi (gọi tắt là hệ số trượt), nó cần phải thỏa mãn điều kiện:

$$|\lambda| \leq [\lambda] \quad (5)$$

- Quán phẳng [4, 5]:

$$\bar{r}'' = \left(\left[\frac{\bar{r} \cdot \text{tg} \gamma - \bar{r}' \cdot (\bar{z} \cdot \text{tg} \gamma + \bar{e})}{\sqrt{1 + \bar{r}'^2} \cdot \sqrt{\bar{r}^2 - (\bar{z} \cdot \text{tg} \gamma + \bar{e})^2}} \right]^2 - \frac{2\bar{r}^2}{\bar{r}^2 - C_p \cdot \bar{r}_p^2} \right) \cdot \frac{1 + \bar{r}'^2}{\bar{r}} \quad (6)$$

Trong các phương trình (2) – (6), \bar{r} , \bar{r}_p và \bar{z} là bán kính hướng tâm, lỗ cực và tọa độ trục không thứ nguyên, $\bar{r} = r / R$, $\bar{r}_p = r_p / R$, $\bar{z} = z / R$; C_p bằng 0 hoặc 1 ứng với vỏ có lỗ cực đóng kín và hở; $|\lambda|$ và $[\lambda]$ là giá trị tuyệt đối của hệ số trượt và hệ số trượt cho phép, đối với quán ướt, $[\lambda] \approx 0,2$, còn đối với quán khô $[\lambda] \approx 0,4$ [7];

Ngoài sử dụng các phương trình (2), (4) và (6) để xác định biên dạng đáy vỏ trụ composite, cần sử dụng thêm phương trình hiệu chỉnh (7) để nhận được đường cong biên dạng đầy đủ do hiện tượng chệch của đường kính tuyến đáy [5].

$$\begin{cases} (\bar{z} + \bar{R}_{1f} \cdot \sin \alpha_f - \bar{z}_f)^2 + (\bar{r} + \bar{R}_{1f} \cdot \cos \alpha_f - \bar{r}_f)^2 = \bar{R}_{1f}^2 \\ \alpha_f = \arccos \left((1 + \bar{r}^2)^{-1/2} \right) \Big|_{\bar{z} = \bar{z}_f} \end{cases} \quad (7)$$

ở đó, chỉ số f chú thích cho các tham số tại điểm hiệu chỉnh; \bar{R}_{1f} là bán kính kinh tuyến không thứ nguyên; α là góc giữa bán kính hướng tâm và bán kính cung vĩ tuyến.

Để giải các phương trình (2), (4) và (6), cần một số điều kiện sau:

- Điều kiện liên tục: Tại xích đạo ($\bar{z} = 0$), $\bar{r} = 1$ và $\bar{r}' = 0$; Tại điểm cực ($\bar{z} = \bar{z}_p$), $\bar{r} = \bar{r}_p$;

- Điều kiện lồi: Với $0 \leq \bar{z} \leq \bar{z}_p$, $\bar{r}'' \leq 0$;

- Điều kiện biên: $0 \leq \bar{r} \leq 1$.

2.3. Chiều dày lớp vật liệu trên đáy

Chiều dày vật liệu tại xích đạo của đáy vỏ composite đơn hướng và phân bố chiều dày vật liệu trên đáy vỏ được xác định như phương trình (8) và (9).

- Chiều dày tại xích đạo [5]:

$$\bar{h}_{eq} = \frac{p_b \cdot (1 - C_p \cdot \bar{r}_p^2)}{2 \cdot [\sigma_c] \cdot \cos^2 \beta_{eq}} \quad (8)$$

- Phân bố chiều dày trên đáy [5]:

$$\bar{h} = \bar{h}_{eq} \cdot \frac{\cos \beta_{eq}}{\bar{r} \cdot \cos \beta} \quad (9)$$

2.4. Hiệu quả kết cấu của đáy bình áp lực

Như đã trình bày, chỉ số hiệu quả kết cấu của kết cấu composite tròn xoay chịu áp lực được xác định theo công thức (1). Đối với đáy vỏ trụ composite, chỉ số hiệu quả kết cấu được diễn đạt chi tiết như sau:

$$F_p = \frac{p_b \cdot \int_0^{z_p} \pi \cdot r^2 dz}{\rho \cdot \int_0^{z_p} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \sqrt{1+r^2} dz} \quad (10)$$

Trong đó: z_p là chiều cao đáy; ρ là khối lượng riêng của vật liệu composite; h là chiều dày của vỏ composite.

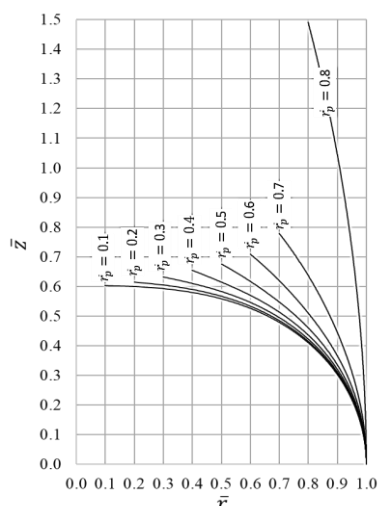
Để thuận tiện cho việc khảo sát, chỉ số hiệu quả kết cấu không thứ nguyên (\bar{F}_p) được sử dụng bằng việc thiết lập quan hệ sau:

$$\bar{F}_p = F_p \cdot \frac{\rho}{p_b} = \frac{\int_0^{\bar{z}_p} \bar{r}^2 d\bar{z}}{2 \int_0^{\bar{z}_p} \bar{h} \cdot \sqrt{1+\bar{r}^2} d\bar{z}} \quad (11)$$

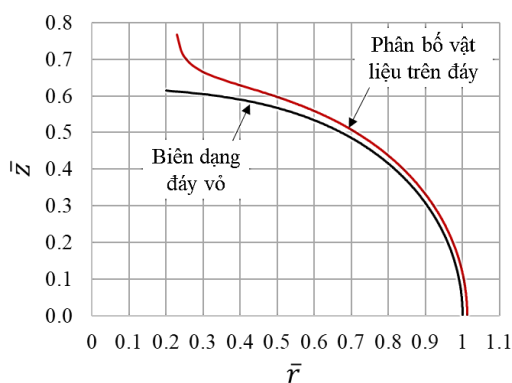
trong đó, \bar{z}_p và \bar{h} tương ứng là các giá trị không thứ nguyên của z_p và h , $\bar{z}_p = z_p / R$ và $\bar{h} = h / R$.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Đầu tiên, để trực quan, chúng ta sẽ sử dụng các phương trình (2), (7), (8) và (9) để xác định biên dạng đáy và phân bố chiều dày trên đáy vỏ trụ composite được quân trắc địa (hình 2 và hình 3).



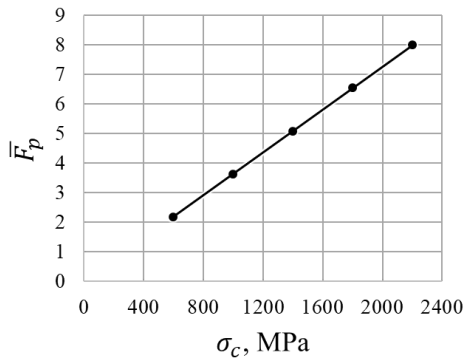
Hình 2. Biên dạng đáy vỏ trụ composite được quân trắc địa với bán kính cực khác nhau.



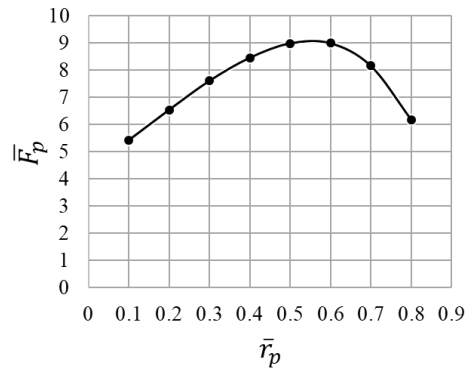
Hình 3. Biên dạng đáy và phân bố vật liệu trên đáy cho trường hợp, $\bar{r}_p = 0,2$ và vật liệu composite sợi thủy tinh/epoxy.

Từ hình 2 cho thấy, khi thay đổi bán kính cực \bar{r}_p làm thay đổi đáng kể hình dạng của đường cong biên dạng đáy. Do sự thay đổi này, thể tích chứa bên trong và chiều dày lớp vật liệu trên

đáy sẽ thay đổi, tức là sẽ dẫn đến sự thay đổi về chỉ số hiệu quả kết cấu. Hình 3 chỉ ra biên dạng đáy và phân bố chiều dày vật liệu trên đáy cho trường hợp bán kính cực, $\bar{r}_p = 0,2$ và vật liệu composite cốt sợi thủy tinh/nền epoxy có độ bền kéo dọc trục sợi, $\sigma_c = 1800$ MPa [8], áp suất phá hủy yêu cầu, $p_b = 45$ MPa. Rõ ràng, chiều dày vật liệu composite tăng dần theo chiều giảm của bán kính hướng tâm \bar{r} theo quy luật được chỉ ra ở công thức (9). Từ quy luật này, có thể tìm thể tích (khối lượng) của vật liệu trên đáy bằng phương pháp tích phân để xác định chỉ số hiệu quả kết cấu. Lưu ý: Ở phần tiếp theo, các tính toán chỉ số hiệu quả kết cấu sẽ mặc định cho trường hợp vật liệu composite là cốt sợi thủy tinh/nền epoxy có cơ tính như trên và áp suất phá hủy yêu cầu $p_b = 45$ MPa.



Hình 4. Ảnh hưởng của độ bền vật liệu σ_c đến chỉ số \bar{F}_p .



Hình 5. Ảnh hưởng của bán kính \bar{r}_p đến chỉ số \bar{F}_p .

Tiếp theo, chúng ta sẽ khảo sát ảnh hưởng của độ bền vật liệu composite đến chỉ số hiệu quả kết cấu cho trường hợp đáy vỏ trụ có lỗ cực đóng kín được quán trắc địa (trường hợp của bình áp lực), $\bar{r}_p = 0,2$ - hình 4. Quy luật phụ thuộc của chỉ số hiệu quả kết cấu (\bar{F}_p) vào độ bền kéo của vật liệu composite (σ_c) là mang tính hiển nhiên đối với đáy vỏ được thiết kế theo lý thuyết lưới, tức là, khi vật liệu có độ bền kéo cao hơn, cần sử dụng ít vật liệu hơn để chịu cùng một áp lực bên trong, hay khối lượng vỏ giảm, tức là hiệu quả kết cấu tăng lên.

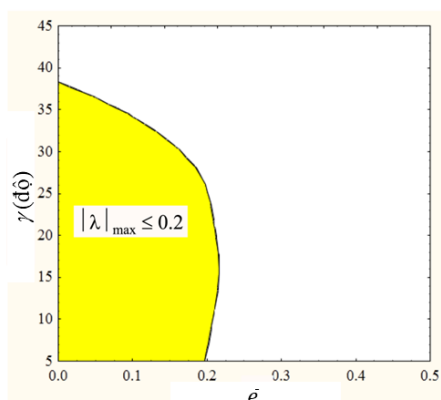
Hình 5 trình bày sự phụ thuộc của chỉ số \bar{F}_p vào bán kính cực \bar{r}_p của đáy vỏ được rải sợi theo quỹ đạo trắc địa. Có thể thấy, chỉ số \bar{F}_p phụ thuộc vào bán kính \bar{r}_p theo quy luật parabol lồi, ở đó, giá trị chỉ số hiệu quả kết cấu tối ưu đạt được ứng với bán kính \bar{r}_p từ 0,5 - 0,6. Kết quả tính toán đối với đáy vỏ quán phi trắc địa trình bày ở bảng 1 cho thấy, giá trị hệ số trượt (λ) hầu như không ảnh hưởng đến chỉ số \bar{F}_p , trong khi, bán kính cực \bar{r}_p ảnh hưởng đến chỉ số \bar{F}_p là tương tự với đáy vỏ được rải sợi theo quỹ đạo trắc địa.

Bảng 1. Chỉ số \bar{F}_p của đáy vỏ quán phi trắc địa.

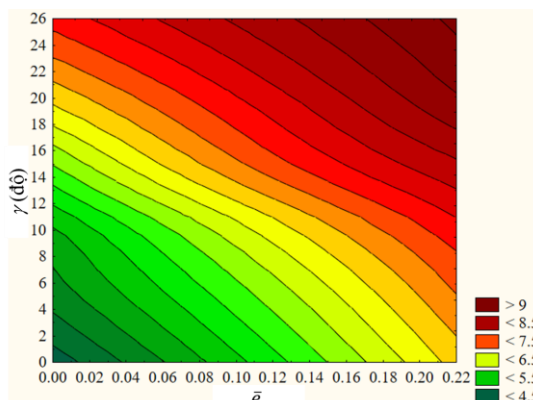
Hệ số trượt, λ	Bán kính cực, \bar{r}_p							
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
0.1	5.428	6.545	7.611	8.457	8.987	8.988	8.151	6.184
0.2	5.428	6.545	7.611	8.458	8.987	8.991	8.152	6.182

Sau cùng, chúng ta sẽ xem xét ảnh hưởng của các tham số kết cấu (\bar{e} , γ) đến hiệu quả kết cấu của đáy vỏ trụ được quán phẳng. Do quán phẳng là một trường hợp đặc biệt của quán phi trắc địa, nên các cặp tham số đầu vào (\bar{e} , γ) phải đảm bảo cho biên dạng đáy vỏ thỏa mãn điều kiện

không trượt của sợi (5). Đối với trường hợp quán ướt, $[\lambda] \approx 0,2$, vùng lựa chọn các tham số (\bar{e}, γ) được tham khảo trong công trình [5] trình bày ở hình 6. Do giới hạn của các tham số (\bar{e}, γ) , nên ở đây, chỉ khảo sát \bar{e} từ 0 đến 0,2 và γ từ 0 đến 25^0 , tức là ứng với trường hợp các cặp tham số (\bar{e}, γ) hợp lý với kỹ thuật quán ướt. Kết quả xác định chỉ số \bar{F}_p theo các tham số (\bar{e}, γ) được biểu diễn dưới dạng biểu đồ đồng mức chỉ ra ở hình 7. Có thể thấy, hiệu quả kết cấu của đáy vỏ quán phẳng tăng khi các giá trị \bar{e} và γ tăng. Tức là, để đạt hiệu quả kết cấu tốt, các tham số \bar{e} và γ nên chọn giá trị lớn, tuy nhiên, theo [5], giá trị \bar{e} và γ lớn lại làm tăng khuynh hướng trượt sợi, tức là làm giảm tính ổn định của công nghệ quán. Vì vậy, việc lựa chọn hài hòa giá trị của cặp tham số (\bar{e}, γ) để vừa đảm bảo độ ổn định công nghệ, vừa nâng cao hiệu quả kết cấu của bình áp lực là cần thiết đặt ra.



Hình 6. Vùng tham số (\bar{e}, γ) cho thiết kế biên dạng đáy vỏ quán phẳng [5].



Hình 7. Sự phụ thuộc của chỉ số \bar{F}_p vào các tham số (\bar{e}, γ) của đáy vỏ quán phẳng.

4. KẾT LUẬN

Đã tổng kết lý thuyết và chi tiết hóa công thức xác định chỉ số hiệu quả kết cấu, từ đó, đã xác định ảnh hưởng của các tham số khác nhau đến chỉ số hiệu quả kết cấu của đáy vỏ trụ composite. Một số điểm cốt lõi rút ra:

- Đối với đáy vỏ trụ được quán trắc địa và phi trắc địa: quan hệ giữa chỉ số hiệu quả kết cấu \bar{F}_p và bán kính cực \bar{r}_p theo quy luật parabol lùi, ở đó, giá trị hiệu quả kết cấu tối ưu đạt được ứng với giá trị bán kính \bar{r}_p từ 0,5-0,6; hệ số trượt λ hầu như không ảnh hưởng đến chỉ số hiệu quả kết cấu \bar{F}_p của đáy vỏ được quán phi trắc địa;

- Đối với đáy vỏ trụ được quán phẳng: Chỉ số hiệu quả kết cấu \bar{F}_p là hàm đồng biến của các tham số \bar{e} và γ với phạm vi tham số \bar{e} từ 0 đến 0,2, γ từ 0 đến 25^0 (vùng tham số đảm bảo cho biên dạng đáy khi quán ướt không trượt), tức là, để đạt hiệu quả kết cấu tốt, cần lựa chọn các tham số \bar{e}, γ lớn trong miền khảo sát.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. V. Vasiliev, “Composite pressure vessels- analysis, design, and manufacturing”, Virginia, USA: Bull Ridge Publishing, Blacksburg (2009).
- [2]. T. N. Thanh và cộng sự, “Tính toán các thông số công nghệ quán bình cao áp hình trụ từ vật liệu composit”, Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự (2011).
- [3]. T. T. Thanh Vân và cộng sự, “Xây dựng mô hình tính toán cho thiết kế biên dạng bình composite được quán theo đường phi trắc địa”, Tạp chí khoa học và công nghệ Hàng Hải, 8, (2020).

- [4]. 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).
- [5]. D. V. Hien, T.N. Thanh and et al., “*Design of planar wound composite vessel based on preventing slippage tendency of fibers*”, Composite Structures, 254, (2020).
- [6]. Đ. V. Hiến và T. N. Thanh, “*Biên dạng đáy vỏ trụ composite dị hướng nhận được bằng phương pháp quấn trục địa*”, Hội nghị KH toàn quốc về CHVR lần thứ XV, (2021).
- [7]. R. Wang et al., “*Slippage coefficient measurement for nongeodesic filament-winding process*,” Composites: Part A, Vol 42, (2011).
- [8]. V. V. Vasiliev, E. V. Morozov, “*Advanced mechanics of composite materials*”, UK: Elsevier, (2007).

ABSTRACT

Evaluation of structural performance of filament wound monotropic composite domes of cylindrical vessels

Following the trend, composite pressure vessels are increasingly being used to replace metal pressure vessels. One criterion for evaluating composite pressure vessels is structural performance (F_p), $F_p = p_b.V/W = p_b.V/(\rho.V_s)$, where p_b , V , W , ρ and V_s are failure pressure, internal volume, shell mass, density and shell volume, respectively. Thus, the efficiency of the pressure vessel depends on the composite material parameters, the thickness and thickness distribution on the shell, as well as structural parameters related to the shell profile and coordinates of the polar hole. In turn, the shell thickness and thickness distribution depend on the material's mechanical properties and the winding processing- structural parameters (geodesic, non-geodesic or planar). In order to optimize the design, the paper focuses on determining the influence of some structural and material parameters on the structural performance of filament wound monotropic composite domes of cylindrical vessels.

Keywords: Structural performance; Cylindrical composite shells; Composite pressure vessels; Filament winding.