

TỐI ƯU HÓA HƯỚNG SỢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ NHẪM NÂNG CAO ĐỘ BỀN UỐN CỦA TẤM HYBRID KIM LOẠI/CFRP/KIM LOẠI

NUMERICAL OPTIMIZATION OF FIBER ORIENTATION FOR IMPROVED FLEXURAL STRENGTH IN METAL/CFRP/METAL HYBRID LAMINATES

ThS. Dương Lê Hùng, ThS. Bùi Chấn Thanh

Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: dlhung@ntt.edu.vn;

bcthanh@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của định hướng sợi trong lớp CFRP đến khả năng chịu uốn bốn điểm của tấm vật liệu hybrid THÉP/CFRP/THÉP được khảo sát bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình số được xây dựng trong phần mềm Abaqus, trong đó lớp CFRP được mô hình hóa theo cấu trúc tấm với các cấu hình định hướng sợi khác nhau bao gồm $[0/0/0/0]$, $[90/90/90/90]$, $[45/45/45/45]$, $[0/90/90/0]$. Tiêu chuẩn phá hủy Hashin được áp dụng để mô phỏng sự hư hỏng tiến triển của vật liệu composite. Các thông số như lực cực đại, độ chuyển vị và cơ chế phá hủy được phân tích và so sánh giữa các cấu hình. Kết quả cho thấy định hướng sợi ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn của tấm hybrid, trong đó các cấu trúc tấm hybrid đa hướng như $[0/90/90/0]$ thể hiện sự phân bố ứng suất đồng đều và khả năng hấp thụ năng lượng tốt hơn. Nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở thiết kế tối ưu cho các kết cấu vật liệu lai ứng dụng trong công nghiệp ô tô và hàng không.

Từ khóa: Tấm hybrid; Hướng sợi; Thử uốn 4 điểm; Mô hình phá hủy Hashin; FEA.

ABSTRACT

This study presents a numerical investigation into the influence of fiber orientation in the CFRP core layer on the four-point bending performance of STEEL/CFRP/STEEL hybrid laminates. A finite element model was developed in Abaqus, in which the CFRP layer was represented as a laminated composite with various stacking sequences, including $[0/0/0/0]$, $[0/90/90/0]$, $[45/45/45/45]$, $[0/90/90/0]$. The progressive failure behavior of the composite was simulated using the Hashin damage criterion. Key mechanical responses such as peak load, mid-span deflection, and failure modes were analyzed and compared across different fiber orientations. The results reveal that fiber orientation has a significant impact on the flexural behavior of the hybrid laminate. Among the investigated configurations, multidirectional layups such as $[0/90/90/0]$ exhibited improved stress distribution and superior energy absorption capacity. These findings provide valuable insights for the optimal design of metal-composite hybrid structures in automotive and aerospace applications.

Keywords: Hybrid laminate; Fiber orientation; Four-point bending; Hashin failure model; Finite element analysis (FEA).

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, các tấm hybrid kết hợp giữa kim loại và vật liệu composite cốt sợi đã thu hút nhiều sự quan tâm nhờ khả năng tận dụng ưu điểm của cả hai vật liệu: độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng cao của kim loại, cùng với độ bền riêng cao và trọng lượng nhẹ của composite [1-3]. Trong đó, cấu trúc tấm hybrid thép/CFRP/thép (Carbon Fiber Reinforced Polymer) được nghiên cứu rộng rãi cho các ứng dụng yêu cầu độ bền cơ học và khả năng chống phá hủy tốt, đặc biệt trong các ngành công nghiệp ô tô và hàng không [4, 5].

Trong thiết kế kết cấu, khả năng chịu uốn – đặc biệt là dưới tải bốn điểm – đóng vai trò quan trọng, phản ánh độ cứng, khả năng phân bố ứng suất và cơ chế phá hủy của vật liệu. Hành vi cơ học của các tấm hybrid dưới tải uốn chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như chiều dày lớp vật liệu, chất lượng bề mặt liên kết, và đáng chú ý nhất là hướng sợi trong lớp CFRP [6]. Cấu hình xếp lớp (stacking sequence) của CFRP quyết định tính chất dị hướng của laminate, từ đó ảnh hưởng đến sự truyền tải nội lực, vị trí khởi phát phá hủy và khả năng phân tán ứng suất [7].

Tuy nhiên, các nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa hướng sợi trong tấm laminate

lai kim loại/CFRP bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) vẫn còn hạn chế, đặc biệt là trong mối liên hệ với tiêu chuẩn phá hủy tiên triền như Hashin. Do đó, nghiên cứu này nhằm khảo sát ảnh hưởng của định hướng sợi đến hành vi chịu uốn bốn điểm của tấm hybrid thép/CFRP/thép bằng phương pháp mô phỏng số trong phần mềm Abaqus. Các cấu hình xếp lớp khác nhau bao gồm [0/0/0/0], [90/90/90/90], [45/45/45/45] và [0/90/90/0] được xây dựng và so sánh. Mô hình phá hủy Hashin được áp dụng để mô phỏng tiến trình hư hỏng trong lớp composite. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở khoa học phục vụ thiết kế tối ưu cho các kết cấu hybrid trong thực tiễn công nghiệp.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng vật liệu CFRP là một vật liệu composite sợi carbon T700 với tính chất được thể hiện ở bảng 1. Tấm CFRP có độ dày 2mm được ép tạo thành từ 4 lớp prepreg có độ dày mỗi lớp là 0.5mm. Trong đó E_1 là mô đun đàn hồi dọc, E_2 là mô đun đàn hồi ngang, ν là hệ số Poisson, và G là mô đun cắt. Kim loại được sử dụng là tấm thép GB/T700 thuộc nhóm cacbon thấp có độ dẻo cao, có độ dày 1 mm đã được lựa chọn, và các tính chất được trình bày ở bảng 2.

Bảng 1. Các tính chất vật liệu của CFRP (T700)

Density (Kg/cm ³)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	μ_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
1560	130	8	0.28	4.5	4.5	3.6

Bảng 2. Các tính chất vật liệu của GB/T700

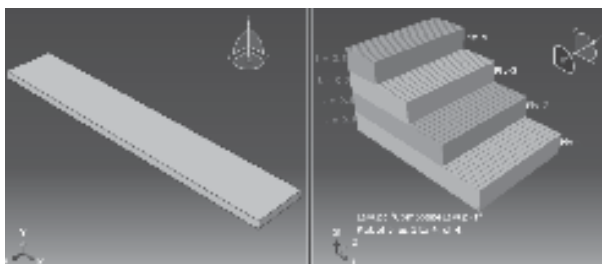
Density (g/cm ³)	Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Poisson's ratio ν
7.85	210	450	235	0.3

2.2. Phương pháp nghiên cứu

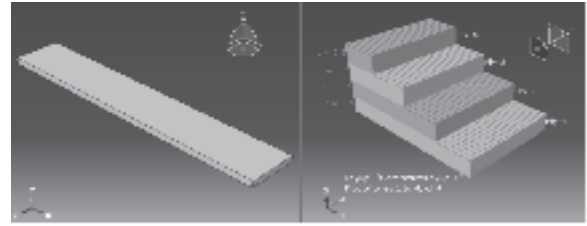
Nghiên cứu này được thực hiện sử dụng phần mềm thương mại Abaqus để mô phỏng bài kiểm tra uốn 4 điểm. Tấm hybrid có chiều dài 78 mm, chiều rộng 13 mm và chiều dày 2 mm. Khoảng cách giữa hai điểm hỗ trợ là $L = 60$ mm như thấy ở Hình 2. Thanh vật liệu được đặt trên hai điểm tựa và chịu tải tại hai điểm (bằng hai mũi tải), mỗi mũi tải cách đều điểm tựa kế cận. Khoảng cách giữa các mũi tải (tức là chiều dài tải) bằng một nửa chiều dài giữa các điểm tựa.

2.2.1. Mô hình phần tử hữu hạn

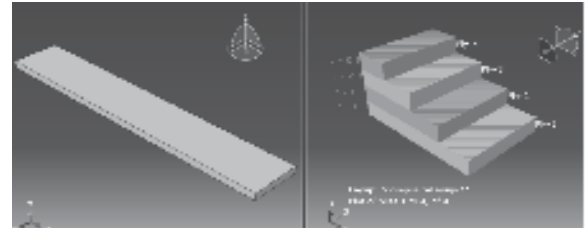
Cấu trúc tấm hybrid bao gồm một lớp CFRP dày 2 mm và một lớp thép GB/T700 dày 1 mm. Lớp CFRP bao gồm bốn lớp prepreg được định hướng sợi theo các trường hợp nghiên cứu tương ứng $[0]_4$, $[90]_4$, $[+45]_4$, và $[0/90/90/0]$ như thấy ở Hình 1. Lưới mạng tinh vi được áp dụng, sử dụng phần tử C3D8R cho thép GB/T700 và phần tử SC8R cho CFRP, phần tử R3D4 cho các điểm hỗ trợ và mũi tải. Mật độ lưới được tối ưu hóa để cân bằng độ chính xác và hiệu quả tính toán, như thể hiện trong Hình 3. Tiếp xúc mặt đối mặt được thiết lập giữa các lớp laminate, đầu tác dụng tải và gối đỡ; trong đó thuộc tính tiếp xúc theo phương pháp pháp tuyến được thiết lập là tiếp xúc cứng, thuộc tính tiếp xúc theo phương tiếp tuyến sử dụng hàm phạt, và hệ số ma sát được đặt là 0.25.



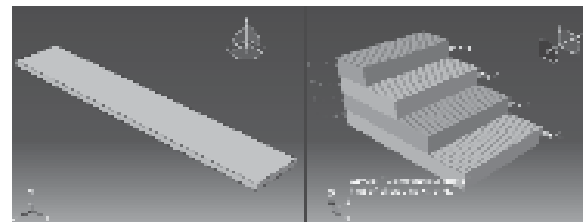
a. Định hướng sợi 90/90/90/90



b. Định hướng sợi 0/0/0/0

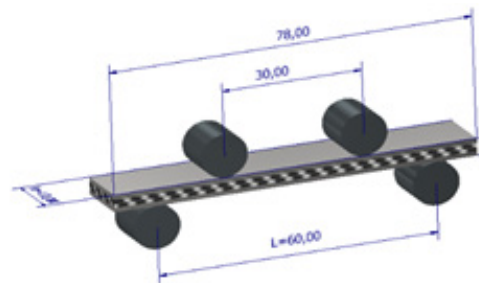


c. Định hướng sợi 45/45/45/45

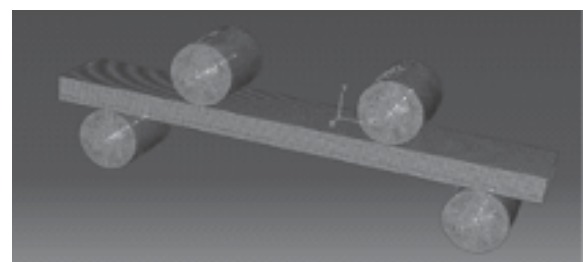


d. Định hướng sợi 0/90/90/0

Hình 1. Mô hình định hướng sợi trong CFRP



Hình 2. Mô hình mô phỏng tấm hybrid



Hình 3. Mô hình chia lưới trong phương pháp thử uốn 4 điểm

2.2.2. Mô hình hư hỏng cho tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

2.2.2.1. Mô hình hư hỏng tấm thép GB/T700

Thép GB/T700 đã áp dụng mô hình đàn hồi dẻo. Pha đàn hồi tuyến tính của thép được mô hình hóa như một điều kiện đẳng hướng, được xác định bởi mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của nó. Hơn nữa, thép GB/T700 dùng tiêu chuẩn hư hỏng dẻo để đánh giá sự hư hỏng ban đầu của nó. Sự hư hỏng được giả định xảy ra khi ε biến dạng dẻo tương đương là một hàm của tốc độ biến dạng và ứng suất 3 trục:

$$\omega_D = \int \frac{d\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_D^{pl}(\eta, \varepsilon^{pl})} = 1 \quad (1)$$

Trong đó $\eta = -p/q$, p là ứng suất nén, q là ứng suất tương đương Von Mises, và ω_D là biến trạng thái tăng đơn điệu theo biến dạng dẻo. Dựa vào lý thuyết cơ học hư hỏng liên tiếp, quá trình phát triển hư hỏng như sau:

$$\sigma = D^{el}/(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (2)$$

$$D^{el} = (1-d) D_0^{el} \quad (3)$$

Trong đó, D_0^{el} là độ cứng đàn hồi ban đầu, D^{el} là độ cứng sau khi hiệu suất suy giảm và ε^{pl} là sự biến dạng dẻo tương đương tại bất kỳ thời điểm nào. Biến hư hỏng độ cứng d thay đổi từ 0 đến 1, tiêu biểu cho bắt đầu hư hỏng đến nứt hoàn toàn.

2.2.2.2. Mô hình hư hỏng tấm CFRP theo tiêu chuẩn Hashin

Tiêu chuẩn Hashin là một mô hình hư hỏng từng bước dựa trên ứng suất. Mô hình này đưa ra giả thiết rằng vật liệu vẫn có một số khả năng chịu lực ngay cả sau khi hư hỏng xảy ra và

xem xét sự tác động cắt vào sự đứt gãy kéo sợi và nền. Tiêu chuẩn Hashin dự đoán 4 phương thức hư hỏng khác nhau: hư hỏng kéo sợi, hư hỏng nén sợi, hư hỏng kéo nền, và hư hỏng nén nền. Do đó, việc đánh giá mức độ hư hỏng sẽ chính xác hơn:

$$F_{ft} = \frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \right)^2 = 1 \quad (\sigma_{11} \geq 0) \quad (4)$$

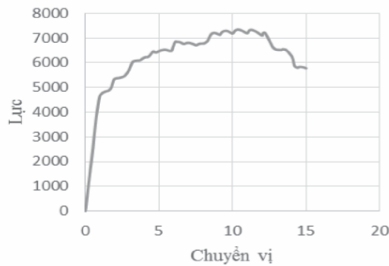
$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 = 1, \quad (\sigma_{11} < 0) \quad (5)$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T^2} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0) \quad (6)$$

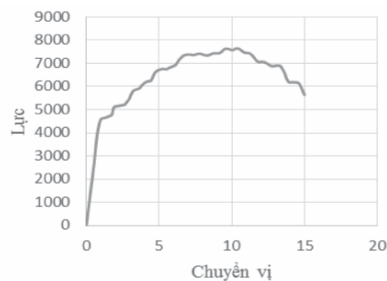
$$F_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0) \quad (7)$$

F_{ft} , F_{fc} , F_{mt} , F_{mc} tiêu biểu cho hư hỏng kéo sợi, hư hỏng nén sợi, hư hỏng kéo nền, và hư hỏng nén nền. σ tiêu biểu cho ứng suất hướng lên của mỗi bên, trong đó chữ số mũ T biểu thị hướng kéo, C biểu thị hướng nén. Y tiêu biểu cho độ bền theo hướng của sợi, X tiêu biểu cho độ bền theo hướng của nền, và S tiêu biểu cho độ bền cắt mỗi bên.

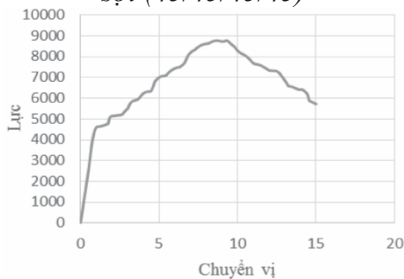
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



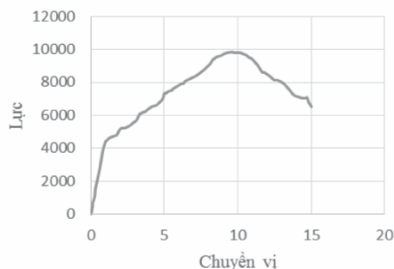
a. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (0/0/0/0)



b. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (45/45/45/45)



c. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (90/90/90/90)



d. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (0/90/90/0)

Hình 4. Biểu đồ Lực – chuyển vị của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Hình 4 trình bày đường cong Lực – chuyển vị của các tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) khi chịu tải uốn bốn điểm với các cấu hình định hướng sợi khác nhau trong lớp lõi CFRP bao gồm [0/0/0/0], [45/45/45/45], [90/90/90/90], và [0/90/90/0]. Cả bốn cấu hình đều thể hiện một giai đoạn đàn hồi tuyến tính ban đầu, tiếp theo là sự phát triển phi tuyến của hư hỏng, dẫn đến tải trọng cực đại và suy giảm tải sau cực đại.

Giai đoạn 1: Đàn hồi tuyến tính (linear elastic) – Cả lớp thép và CFRP chịu tải mà không có hư hỏng đáng kể. Trong giai đoạn này, tấm hybrid vẫn duy trì tính chất đàn hồi của cả lớp thép và lớp CFRP. Mỗi lớp vật liệu trong tấm hybrid sẽ phản ứng theo cách riêng của nó, nhưng tổng thể cấu trúc vẫn ở trạng thái đàn hồi.

Giai đoạn 2: Phát triển hư hỏng phi tuyến – Sau khi vượt qua giai đoạn đàn hồi, tấm hybrid bắt đầu chuyển sang giai đoạn phi tuyến, nơi sự phát triển hư hỏng bắt đầu xuất hiện. Cả lớp CFRP và thép có thể có hư hỏng, nhưng cơ chế hư hỏng giữa các lớp này sẽ khác nhau:

- CFRP: Do tính chất composite của lớp CFRP, hư hỏng ma trận và tách lớp có thể bắt đầu hình thành trong giai đoạn này. Hư hỏng do cắt hoặc nứt ma trận có thể xuất hiện tại các interface giữa các lớp sợi, đặc biệt nếu có sự tương tác của cắt liên lớp.

- Thép: Lớp GB/T700 có thể bắt đầu biến dạng dẻo trong giai đoạn này, với sự xuất hiện của các vết nứt hoặc hư hỏng do trượt. Tuy nhiên, thép thường bền hơn trong giai đoạn này so với CFRP và có thể vẫn giữ được một phần khả năng chịu tải.



Giai đoạn 3: Tải cực đại và suy giảm tải
– Trong giai đoạn này, tấm hybrid sẽ đạt được tải trọng cực đại (peak load) và sau đó suy giảm tải do sự phát triển mạnh mẽ của hư hỏng và phá hủy cấu trúc do hư hỏng cắt.

So sánh giữa các đường cong cho thấy định hướng sợi ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn, đặc biệt là về lực cực đại, khả năng hấp thụ năng lượng và cơ chế phá hủy.

- Cấu hình sợi đơn hướng [0/0/0/0] thể hiện lực cực đại tương đối trung bình (7335.035N), do các sợi được bố trí song song với trục dọc của mẫu thử. Dù cấu trúc này cung cấp độ cứng cao theo phương trục, nó lại thiếu khả năng kháng ứng suất cắt ngang khi uốn, dẫn đến hiện tượng phá hủy sớm và phản ứng giòn như thấy ở Hình 5a.

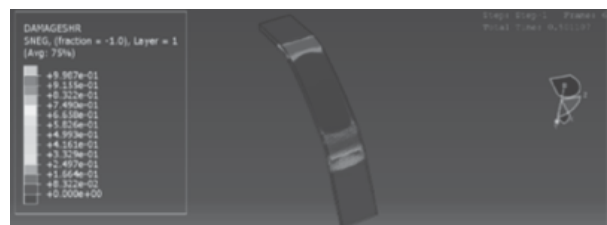
- Cấu hình sợi định hướng [45/45/45/45] cho thấy hiệu suất cải thiện nhẹ so với [0/0/0/0] tương ứng với lực cực đại là 7401.297, với khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn nhờ khả năng biến dạng cắt tốt hơn và ứng suất phân bố đều hơn giữa các lớp như thấy ở Hình 5b. Tuy nhiên, do tất cả các lớp đều nằm ở $\pm 45^\circ$, độ cứng theo phương uốn vẫn còn hạn chế.

- Đáng chú ý, cấu hình [90/90/90/90] cho lực cực đại (8752.8 N) cao hơn so với hai cấu hình trước. Kết quả này được lý giải bởi khả năng truyền ứng suất cắt hiệu quả hơn và sự kìm hãm biến dạng ngang tốt hơn, khi các sợi 90° hoạt động hiệu quả trong việc kháng lại ứng suất lệch mặt phẳng trong cấu trúc hybrid. Hư hỏng do cắt thấy ở Hình 5c.

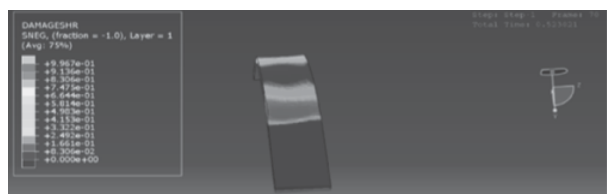
- Cấu hình gần đối xứng [0/90/90/0] cho thấy độ bền uốn cao nhất (9838.16N), cho thấy lợi thế rõ rệt của việc phối hợp nhiều hướng sợi. Cấu trúc này cung cấp độ cứng cân bằng,

khả năng truyền ứng suất cắt tốt và làm chậm sự lan truyền vết nứt nhờ sự tương tác giữa các sợi dọc và ngang. Sự hư hỏng do cắt thấy ở Hình 5d.

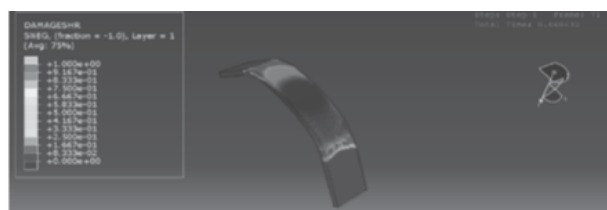
Từ đây, chúng ta thấy rõ tấm thép ngoài đóng vai trò gia cường độ cứng và bảo vệ khỏi phá hủy sớm, nên cơ chế phá hủy phụ thuộc nhiều vào cách lớp CFRP phản ứng bên trong. Hướng sợi CFRP ảnh hưởng lớn đến khả năng truyền và phân phối ứng suất giữa thép và composite, từ đó nó quyết định độ bền uốn tổng thể. Cấu hình định hướng sợi [0/90/90/0] trong CFRP của vật liệu tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) giúp tối ưu hóa sự phối hợp giữa các lớp, đặc biệt là khả năng kháng cắt, lan truyền nứt và hấp thụ năng lượng trong vùng chịu uốn lớn.



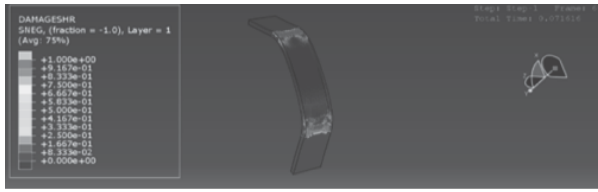
a. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (0/0/0/0)



b. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (45/45/45/45)



c. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (90/90/90/90)



d. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (0/90/90/0)

Hình 5. Sự phá hủy cắt của các tấm CFRP

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khảo sát hành vi uốn của các tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/ (GB/T700) với bốn cấu hình định hướng sợi khác nhau dưới thử nghiệm uốn bốn điểm. Kết quả cho thấy định hướng sợi có ảnh hưởng quan trọng đến khả năng chịu tải, sự phát triển hư hỏng và khả năng hấp thụ năng lượng của vật liệu.

Trong các cấu hình thử nghiệm, tấm hybrid xếp lớp chéo (0°/90°/90°/0°) thể hiện tải trọng cực đại cao nhất 9838.16N, nhờ sự kết hợp giữa sợi 0° chịu tải chính và sợi 90° giúp kháng cắt, ngăn ngừa sự phát triển vết nứt xuyên thấu. Tấm đồng phương (0°/0°/0°/0°), mặc dù có độ cứng ban đầu cao, nhưng lại có tải trọng cực đại thấp và phá hủy giòn, do thiếu khả năng phân tán ứng suất. Cấu hình (45°/45°/45°/45°) mặc dù không có sợi song song trực tiếp với phương uốn, nhưng lại cho khả năng chịu tải cao hơn tấm đồng phương (0°/0°/0°/0°), đồng thời có độ chuyển vị thấp hơn. Điều này là do hướng sợi chéo tăng cường khả năng kháng cắt giữa các lớp, giúp phân tán ứng suất hiệu quả và hạn chế biến dạng uốn lớn, tuy nhiên lại dẫn đến độ cứng tương đối cao sau giai đoạn đàn hồi, làm giảm chuyển vị tối đa. Tấm hybrid định hướng sợi (90°/90°/90°/90°) mặc dù có tải trọng cực đại khá cao, nhưng khả năng chịu lực thấp hơn so với tấm hybrid được định hướng sợi (0°/90°/90°/0°) và bị giới hạn bởi cơ chế phá hủy chủ yếu do ma trận.

Những phát hiện này chỉ ra rằng việc chọn lựa cấu hình định hướng sợi thích hợp trong tấm hybrid có thể tối ưu hóa hiệu suất uốn, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu khả năng chịu tải cao.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**

Ngày phản biện: **20/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Vlot, A. (2001), "Impact loading on fibre metal laminates". International Journal of Impact Engineering, 27(10), 987-1001.
- [2]. Alderliesten, R. C. (2017), "Fatigue and damage tolerance of fibre metal laminates". International Journal of Fatigue, 103, 345-359.
- [3]. Asundi, A., & Choi, A. Y. (1997), "Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft". Journal of Materials Processing Technology, 63(1-3), 384-394.
- [4]. Urdaneta, G., Alfano, M., & Pagnotta, L. (2021), "Experimental and numerical study of flexural behavior in hybrid CFRP-steel laminates". Composite Structures, 262, 113640.
- [5]. Raju, K. R. C., Rao, T. S., & Reddy, Y. R. (2017), "Flexural and tensile behavior of metal-carbon fiber hybrid laminates". Materials Today: Proceedings, 4(2), 3374-3380.
- [6]. Gürkan, H., & Korkmaz, M. E. (2020), "The effect of fiber orientation on the flexural behavior of CFRP laminates". Composites Part B: Engineering, 199, 108217.
- [7]. Maimí, P., Camanho, P. P., Mayugo, J. A., & Dávila, C. G. (2007), "A continuum damage model for composite laminates: Part I – Constitutive model". Mechanics of Materials, 39(10), 897-908.