

MÔ HÌNH HÓA HƯ HỎNG THEO TIÊU CHUẨN HASHIN CỦA VẬT LIỆU TẦM HYBRID METAL/CFRP/METAL CHỊU TẢI UỐN 3 ĐIỂM TRONG MÔI TRƯỜNG PHẦN TỬ HỮU HẠN

HASHIN-BASED DAMAGE MODELING OF METAL/CFRP/METAL HYBRID LAMINATES UNDER THREE-POINT BENDING LOAD IN A FINITE ELEMENT ENVIRONMENT

TS. Lê Văn An, TS. Trương Công Tiễn

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

Email: lvan@ntt.edu.vn; tctien@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Vật liệu tấm hybrid là vật liệu lai kết hợp giữa kim loại và composite gia cường sợi, điển hình là cấu trúc (GB/T700)/CFRP/(GB/T700), có tính chất cơ học vượt trội. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) trong phần mềm Abaqus để mô phỏng trạng thái uốn ba điểm của tấm hybrid. Một mô hình số chi tiết được xây dựng, trong đó lớp CFRP được áp dụng tiêu chí hư hỏng Hashin, còn thép sử dụng mô hình phá hủy dẻo. Phân tích xem xét tính phi tuyến vật liệu và sự tiến triển hư hỏng để mô phỏng chính xác hành vi uốn. Kết quả cho thấy tấm lai có độ bền uốn cao, với hư hỏng chủ yếu bắt đầu từ lớp CFRP do đứt sợi và nứt ma trận. Lớp thép chịu biến dạng dẻo, giúp tăng cường khả năng chống chịu của toàn bộ kết cấu. Mô phỏng cung cấp cái nhìn sâu sắc về phân bố ứng suất và cơ chế hư hỏng của tấm hybrid. Nghiên cứu khẳng định FEA là một công cụ hiệu quả dự đoán đặc tính cơ.

Từ khóa: Tấm hybrid; (GB/T700)/CFRP/(GB/T700); Uốn ba điểm; Abaqus; Tiêu chuẩn Hashin; FEA.

ABSTRACT

Hybrid laminate materials are composite structures combining metal and fiber-reinforced composites, typically in a (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) configuration, offering superior mechanical properties. This study employs the finite element analysis (FEA) method using Abaqus software to simulate the three-point bending behavior of the hybrid laminate. A detailed numerical model is developed, where the CFRP layer is modeled using the Hashin damage criteria, and the steel layers adopt a ductile damage model. The analysis accounts for material nonlinearity and damage evolution to accurately capture the bending behavior. Results show that the hybrid laminate exhibits high flexural strength, with damage initiating primarily in the CFRP layer due to fiber breakage and matrix cracking. The steel layers undergo plastic deformation, contributing to the overall structural resistance. The simulation provides valuable insights into stress distribution and failure mechanisms of the hybrid laminate. The study confirms that FEA is an effective tool for predicting mechanical properties.

Keywords: Hybrid laminate; (GB/T700)/CFRP/(GB/T700); Three-point bending; Abaqus; Hashin criterion; Finite element analysis.

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, nhu cầu về vật liệu hiệu suất cao trong công nghiệp ngày càng gia tăng, đòi hỏi vật liệu phải có tính cơ học cao cũng như trọng lượng nhẹ. Vật liệu tấm hybrid là một loại vật liệu lai hiện đại, bao gồm các lớp kim loại và polymer được gia cường bằng sợi cacbon xen kẽ nhau. Vật liệu tấm hybrid, đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực hàng không, ô tô và kết cấu chịu tải trọng cao nhờ vào các đặc tính ưu việt như tỷ lệ cường độ trên khối lượng cao, hấp thụ năng lượng tốt [1, 2]. Ngoài ra, với sự tối ưu hóa quy trình sản xuất vật liệu và giảm chi phí sản xuất, các tấm lai kim loại sợi (FMLs) còn được sử dụng trong các lĩnh vực công nghiệp khác như thiết bị thể thao và kỹ thuật ô tô [3, 4]. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện để phân tích các tính chất cơ học động và tĩnh của FMLs nhờ vào ưu điểm trọng lượng nhẹ, độ bền cao, khả năng chịu va đập tốt [5, 6] và độ bền chống hư hỏng cao [7].

Các kỹ thuật mô phỏng số đã được sử dụng để mô phỏng quá trình tải tĩnh gần như tĩnh của các tấm, nhằm khám phá các dạng hư hỏng cụ thể bên trong FMLs và phân tích đặc tính hấp thụ năng lượng. Điều này cung cấp giá trị tham khảo quan trọng cho ứng dụng kỹ thuật thực tế của các tấm. Để hiểu rõ hơn về đặc tính cơ học và cơ chế hư hỏng của vật liệu CARALLs (Carbon fiber Reinforced composites/Aluminum Laminates) dưới tác động của thử nghiệm uốn ba điểm, Hu và cộng sự đã thực hiện các thí nghiệm thực nghiệm kết hợp với mô phỏng số. Kết quả nghiên cứu làm sáng tỏ ảnh hưởng của cấu trúc xếp lớp giữa nhôm và sợi carbon đối với tính chất cơ học của mẫu vật CARALLs [8]. Sellitto và cộng sự

cũng đã tiến hành nghiên cứu về phản ứng cơ học của các tấm laminate hình chữ nhật dưới tác động va đập tốc độ thấp, trong đó họ sử dụng phương pháp mô phỏng số để phân tích hành vi va đập của các vật liệu composite.

Tiếp nối các nghiên cứu trên dựa trên sự kết hợp giữa độ bền cao và trọng lượng nhẹ của CFRP với tính dẻo và khả năng chống va đập của thép giúp cho loại vật liệu này trở thành lựa chọn tối ưu trong các kết cấu yêu cầu độ cứng vững và độ bền cao. Nhiều nghiên cứu trước đây đã phân tích đặc tính cơ học của vật liệu tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) dưới các điều kiện kéo, va đập và mỏi. Tuy nhiên, hành vi của chúng khi chịu uốn ba điểm, một yếu tố quan trọng trong thiết kế kết cấu, vẫn chưa được nghiên cứu sâu rộng, đặc biệt là trong bối cảnh mô phỏng số.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Nghiên cứu này được thực hiện trên phần mềm thương mại Abaqus quá trình thử uốn 3 điểm theo tiêu chuẩn D7264. CFRP là vật liệu composite sợi carbon T700 được sản xuất bởi Toray, Tokyo, Nhật bản với độ dày 2mm. Nhựa prepreg tiêu chuẩn với hàm lượng nhựa 38% đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Các tính chất của vật liệu CFRP được trình bày ở bảng 1. 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. Các 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 cơ của CFRP (T700).

Mật độ (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

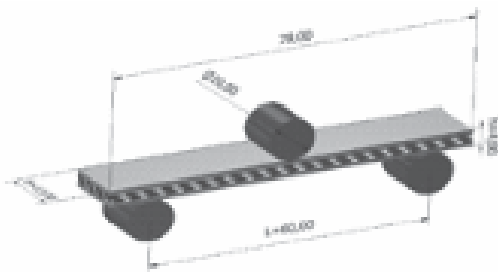
Bảng 2. Các tính chất cơ của GB/T700.

Khối lượng riêng (g/cm ³)	Mô đun đàn hồi E (GPa)	Giới hạn kéo (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Hệ số Poisson ν
7.85	210	450	235	0.3

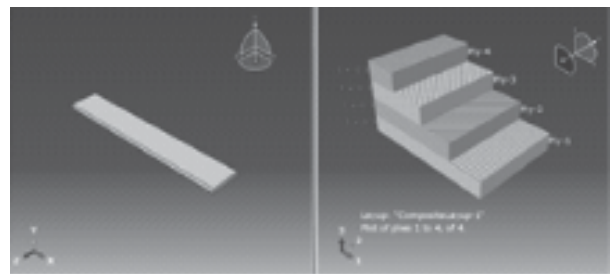
2.2. Phương pháp nghiên cứu

Hiệu suất uốn của tấm hybrid được nghiên cứu thông qua thí nghiệm uốn ba điểm theo tiêu chuẩn ASTM D7264 thông qua máy thử điện tử vạn năng TSE105D. Các mẫu sử dụng trong kiểm tra có chiều dài 78mm, chiều rộng 13 mm và khoảng cách giữa 2 gối đỡ là 60mm, tấm có độ dày 4mm, gối đỡ có đường kính 10mm. Như vậy, để mô phỏng chính xác hơn mô hình mô phỏng được tạo ra giống với thực nghiệm thấy như hình 1, với kích thước tấm cụ thể như sau:

- Lớp thép GB/T700 có độ dày 1mm.
- Lớp CFRP có tổng độ dày 2 mm. Mỗi lớp prepreg có độ dày 0.5mm. Bốn lớp được sắp xếp theo hướng của trục chính (0/45/-45/90) như thấy ở hình 2.



Hình 1. Mô hình thử uốn 3 điểm theo tiêu chuẩn D7264



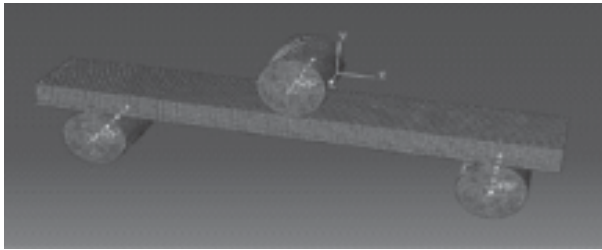
Hình 2. Mô hình định hướng sợi mỗi lớp của tấm CFRP

2.3. Mô hình phần tử hữu hạn và tiêu chuẩn hư hỏng

2.3.1. Mô hình phần tử hữu hạn 3 điểm uốn cho tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Để mô hình chính xác trạng thái của tấm hybrid trong phân tích phần tử hữu hạn, bán kính mũi tải và giá đỡ và kích thước FMLs giống như thực nghiệm. Sự tiếp xúc mặt – mặt được đưa vào giữa các tấm, đầu tải và giá đỡ, và thuộc tính tiếp xúc bình thường được thiết lập là tiếp xúc cứng, thuộc tính tiếp xúc tiếp tuyến với hàm phạt và hệ số ma sát là 0.25. Điều kiện biên của giá đỡ là cố định hoàn toàn và ràng buộc đối xứng được thiết lập cho hai bề mặt của tấm để tránh sự dịch chuyển của vật cứng. Một điểm tham chiếu được thiết lập ở mũi tải và tất cả các bậc tự do đều được ràng buộc trừ hướng tải. Sự dịch chuyển tải ở điểm

tham chiếu được thiết lập, và phản ứng hỗ trợ cùng với độ dịch chuyển của điểm tham chiếu được đưa ra. Các tấm thép GB/T700, mũi tải và giá đỡ được mô hình hóa bởi các phần tử C3D8I và R3D4 tương ứng. Lớp CFRP được mô hình hóa bằng phần tử SC8R. Các thông số vật liệu được sử dụng phù hợp với những gì đưa ra ở trên. Mô hình phần tử được thiết lập theo các ràng buộc và vật liệu trên như thấy ở hình 3 bên dưới.



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn 3 điểm uốn của tấm hybrid

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

2.3.2.1. Mô hình hư hỏng tấm thép GB/T700

Thép 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 T700 dùng tiêu chuẩn hư hỏng dẻo để đánh giá sự hư hỏng ban đầu của nó. Tiêu chuẩn này được giả định rằng sự biến dạng dẻo xảy ra trong suốt quá trình đặt tải vật liệu dẫn đến sự hình thành, phát triển và sự kết tụ các lỗ rỗng và vết nứt tế vi ở bên trong nó làm giảm độ cứng vật liệu và làm giảm hiệu suất 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 hưng hỏng đến nứt hoàn toàn.

2.3.2.2. 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. 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:

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

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

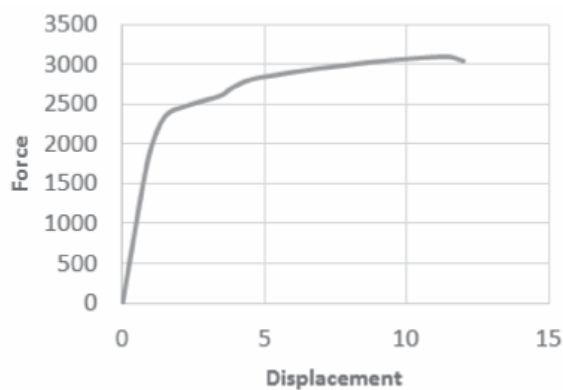
$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T^2} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0) \quad (6)$$

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

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

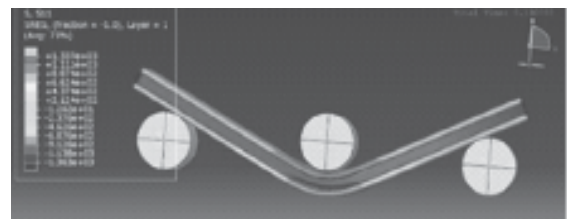
Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ thảo luận kết quả mô phỏng kiểm tra 3 điểm uốn của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700). Tấm hybrid gồm có 2 tấm thép GB/T700 và 1 tấm CFRP gồm 4 lớp được định hướng như hình 2. Sự khác nhau về mô đun và độ bền của vật liệu thép GB/T700 và CFRP dẫn đến trạng thái cơ học khác nhau.



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

Hình 4 minh họa đường cong Lực – chuyển vị của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/

(GB/T700). Có thể thấy rằng có một sự khác nhau đáng kể. Đường cong chia thành ba giai đoạn chính: giai đoạn đàn hồi, và biến dạng dẻo của lớp thép T700, và đứt sợi. Ở giai đoạn đầu, đường cong tăng gần như tuyến tính, cho thấy tấm đang biến dạng đàn hồi, cả lớp CFRP và lớp thép đều ở trạng thái đàn hồi, không có hư hỏng và mẫu khôi phục hoàn toàn khi bỏ tải. Tiếp tục đặt tải, độ dốc đường cong giảm dần, chứng tỏ xuất hiện biến dạng dẻo. Thép T700 bắt đầu chảy dẻo, trong khi CFRP vẫn còn trong giới hạn đàn hồi, lực tiếp tục tăng nhưng với tốc độ thấp hơn do tấm hybrid bắt đầu chịu ứng suất cao. Ở giai đoạn thứ 3, khi biểu đồ đạt đến giá trị cực đại 3094,97 N, sau đó có xu hướng giảm. Lúc này, CFRP bắt đầu gãy hoặc nứt do ứng suất kéo vượt quá giới hạn của sợi cacbon, làm mất khả năng chịu tải của tấm. Khi CFRP bị phá hủy, thép T700 tiếp tục chịu tải nhưng không còn hiệu quả như trước, dẫn đến giảm tải trọng.



Hình 5. Biểu đồ phân bố ứng suất dọc của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)



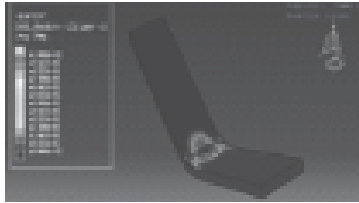
a. Hư hỏng kéo sợi theo tiêu chuẩn Hashin



b. Hư hỏng nén sợi theo tiêu chuẩn Hashin



c. Hư hỏng kéo đứt sợi theo tiêu chuẩn Hashin



d. Hư hỏng nén CFRP theo tiêu chuẩn Hashin

Hình 6. Trạng thái hư hỏng CFRT theo tiêu chuẩn Hashin

Từ hình 5 biểu đồ phân bố ứng suất dọc của tấm (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) tại thời điểm phá hủy. Trong suốt quá trình uốn 3 điểm, lớp thép T700 ở phía trên của mẫu chịu ứng suất nén, trong khi tấm thép ở phía dưới chịu ứng suất nén. Nửa trên của lớp CFRP chịu nén, trong khi nửa dưới của lớp CFRP chịu kéo giãn.

Hình 6 cho thấy vị trí bắt đầu xuất hiện hư hỏng của tấm hybrid chủ yếu tập trung ở sự hư hỏng tấm CFRP theo tiêu chuẩn Hashin. Hình 6a thể hiện sự hư hỏng kéo đứt sợi bắt đầu xuất hiện ở một vài vị trí lớp thứ tư của tấm CFRP khi chịu ứng suất kéo lớn tại thời điểm chuyển vị $U_2 = 3.981$. Hình 6b cho thấy sợi bắt đầu bị đứt nén khi chịu ứng suất nén lớn tại một vài vị trí ở lớp thứ 1 của tấm CFRP tại vị trí chuyển vị $U_2 = 6.051$ mm. Hình 6c cho thấy một vài vị trí nền CFRP bắt đầu hư hỏng khi chịu ứng suất nén chủ yếu xuất hiện ở lớp thứ 4 của tấm CFRP lúc chuyển vị đạt vị trí $U_2 = 7.471$ mm, đồng thời cũng bắt đầu xuất hiện vết nứt tại lớp thứ nhất tiếp giáp lớp thép GB/T700 do bị kéo vượt quá giới hạn theo hướng sợi (độ bền dọc sợi) sợi cacbon có thể bị đứt. Hình 6d cho thấy nền bắt đầu hư hỏng nén ở lớp thứ 1

của tấm CFRP khi sợi trong lớp này bị đứt hoàn toàn nên lúc này chịu ứng suất nén cực lớn dẫn đến hư hỏng nền tại vị trí $U_2 = 12.815$ mm lúc này tấm CFRP bị hư hỏng hoàn toàn dẫn đến ứng suất bắt đầu giảm.

4. KẾT LUẬN

Mô phỏng độ bền uốn 3 điểm của tấm hybrid FMLs (Fiber Metal Laminates) với cấu trúc tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) trong Abaqus cho thấy quá trình hư hỏng diễn ra theo ba giai đoạn chính. Ban đầu, tấm FMLs duy trì trạng thái đàn hồi, với cả thép GB/T700 và CFRP không bị hư hỏng. Khi tải tăng, thép GB/T700 bắt đầu biến dạng dẻo trong khi CFRP vẫn trong giới hạn đàn hồi. Tuy nhiên, khi tải đạt giá trị cực đại 3094,97 N, lớp CFRP bắt đầu hư hỏng, xuất hiện đứt sợi và vết nứt do ứng suất kéo vượt quá giới hạn chịu của sợi carbon. Sự hư hỏng này chủ yếu xảy ra ở các lớp CFRP phía dưới và lớp CFRP tiếp giáp với thép T700. Sau khi CFRP bị phá hủy, khả năng chịu tải của tấm giảm mạnh mặc dù thép T700 vẫn tiếp tục chịu tải, nhưng không còn hiệu quả như trước.

Kết quả mô phỏng cho thấy sự kết hợp giữa thép và CFRP giúp tận dụng ưu điểm của cả hai vật liệu, nhưng sự hư hỏng của CFRP làm giảm đáng kể khả năng chịu lực của tấm hybrid. Mô phỏng này cung cấp cơ sở để tối ưu hóa thiết kế tấm FMLs, cải thiện độ bền và hiệu quả chịu lực trong các ứng dụng thực tế.

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]. Ostapiuk, M.; Bienias, J.; Surowska, B., “*Analysis of the bending and failure of fiber metal laminates based on glass and carbon fibers*”. Sci. Eng. Compos. Mater. 2018, 25, 1095-1106.
- [2]. Rajkumar, G.R.; Krishna, M.; Narasimhamurthy, H.N.; Keshavmurthy, Y.C.; Nataraj, J.R., “*Investigation of Tensile and Bending behavior of Aluminum based hybrid fiber metal laminates*”. Procedia Mater. Sci. 2014, 5, 60-68.
- [3]. Li, H.; Xu, Y.; Hua, X.; Liu, C.; Tao, J., “*Bending failure mechanism and flexural properties of GLARE laminates with different stacking sequences*”. Compos. Struct. 2018, 187, 354-363.
- [4]. Kuhtz, M.; Buschner, N.; Henseler, T.; Hornig, A.; Klaerner, M.; Ullmann, M.; Jaeger, H.; Kroll, L.; Kawalla, R., “*An experimental study on the bending response of multi-layered fibre-metal-laminates*”. J. Compos. Mater. 2019, 53, 2579-2591
- [5]. Yu, G.-C.; Wu, L.-Z.; Ma, L.; Xiong, J., “*Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates*”. Compos. Struct. 2015, 119, 757-766.
- [6]. Vieira, L.M.G.; Dobah, Y.; dos Santos, J.C.; Panzera, T.H.; Rubio, J.C.C.; Scarpa, F., “*Impact Properties of Novel Natural Fibre Metal Laminated Composite Materials*”. Appl. Sci. 2022, 12, 1869.
- [7]. Vieira, L.M.G.; Dobah, Y.; dos Santos, J.C.; Panzera, T.H.; Rubio, J.C.C.; Scarpa, F., “*Impact Properties of Novel Natural Fibre Metal Laminated Composite Materials*”. Appl. Sci. 2022, 12, 1869.
- [8]. Hu, C.; Sang, L.; Jiang, K.; Xing, J.; Hou, W., “*Experimental and numerical characterization of flexural properties and failure behavior of CFRP/Al laminates*”. Compos. Struct. 2022, 281, 115036.