

NGHIÊN CỨU SỐ TRẠNG THÁI UỐN 4 ĐIỂM TẮM HYBRID (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) SỬ DỤNG TIÊU CHÍ PHÁ HỦY HASHIN

NUMERICAL INVESTIGATION OF FOUR – POINT BENDING BEHAVIOR IN
(GB/T700)/CFRP/(GB/T700) HYBRID LAMINATES USING HASHIN FAILURE
CRITERIA

ThS. **Bùi Chấn Thanh**, ThS. **Dương Lê Hùng**

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

Email: bcthanh@ntt.edu.vn; dlhung@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày một phân tích số về ứng xử uốn bốn điểm của lớp vật liệu hybrid Thép/polyme cốt sợi carbon/Thép (GB/T700)/CFRP/GB(T700) bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong Abaqus. Mục tiêu là đánh giá phản ứng cơ học và cơ chế phá hủy của kết cấu hybrid dưới tải trọng uốn, chỉ xét tiêu chí phá hủy Hashin. Các lớp composite được mô hình hóa bằng mô hình hư hỏng dị hướng, dựa trên sự khởi đầu phá hủy theo Hashin, sau đó là suy giảm độ cứng tiến triển. Các lớp thép được mô phỏng bằng mô hình đàn hồi-dẻo có xét đến hóa bền biến dạng. Phân tích cung cấp cái nhìn sâu sắc về phân bố ứng suất, khởi đầu phá hủy và tiến triển hư hỏng trong lớp tấm. Kết quả cho thấy hư hỏng do kéo và nén của sợi chiếm ưu thế trong các vùng có ứng suất cao, trong khi nứt ma trận xảy ra dưới tải trọng cắt và ngang. Đáp ứng tải-chuyển vị và cơ chế phá hủy cuối cùng được xem xét để hiểu rõ độ bền kết cấu và quá trình phát triển hư hỏng. Dự đoán số cho thấy FEM có hiệu quả trong việc mô phỏng hành vi phá hủy của vật liệu lai. Nghiên cứu này đóng vai trò là nền tảng cho các nghiên cứu tương lai nhằm tối ưu hóa thiết kế tấm lai.

Từ khóa: Vật liệu lai; Uốn bốn điểm; Phân tích phần tử hữu hạn; Tiêu chí phá hủy Hashin; Abaqus.

ABSTRACT

This study presents a numerical investigation of the four-point bending behavior of hybrid steel/carbon fiber reinforced polymer/steel (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) hybrid laminates using the finite element method (FEM) in Abaqus. The objective is to evaluate the mechanical response and failure mechanisms of the hybrid structure under bending loads, considering only Hashin failure criteria. The composite layers are modeled using an anisotropic damage model based on Hashin failure initiation, followed by progressive stiffness degradation. The steel layers are simulated with an elasto-plastic model incorporating strain hardening. The analysis provides insights into stress distribution, failure initiation, and progressive damage within the laminate. Results indicate that fiber tensile and compressive failure dominate in high-stress regions, while matrix cracking occurs under shear and transverse loading. The load-displacement response and ultimate failure mode are examined to understand structural integrity and failure evolution. Numerical predictions highlight the effectiveness of FEM in capturing failure behavior in hybrid laminates. This study serves as a basis for future research on optimizing hybrid laminate designs.

Keywords: Hybrid laminates; Four-point bending; Finite element analysis; Hashin failure criterion; Abaqus.

1. GIỚI THIỆU

Các vật liệu tấm hybrid, đặc biệt là kết cấu các tấm hybrid giữa các tấm kim loại và composite tăng cường bởi sợi đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong các ứng dụng hàng không vũ trụ, ô tô và kết cấu nhờ tỷ lệ bền trên khối lượng cao, khả năng chống ăn mòn và các tính chất cơ học có thể điều chỉnh [1, 2]. Các lớp tấm này kết hợp độ cứng và độ bền cao của CFRP với độ dẻo và khả năng chịu hư hỏng của kim loại, khiến chúng trở thành lựa chọn lý tưởng cho các ứng dụng chịu tải [3]. Tuy nhiên, việc dự đoán phản ứng cơ học và cơ chế phá hủy của chúng vẫn là một thách thức do sự tương tác phức tạp giữa các lớp kim loại và composite. Một trong những cơ chế phá hủy quan trọng của vật liệu tấm lai là hư hỏng sợi và ma trận, có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kết cấu. Nhiều tiêu chí phá hủy, chẳng hạn như Tsai-Wu, Puck và Hashin, đã được phát triển để dự đoán sự phá hủy của composite [4, 5]. Trong số đó, tiêu chí phá hủy Hashin được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng phân biệt các chế độ hư hỏng của sợi và ma trận dưới các điều kiện tải khác nhau [6]. Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ứng xử uốn bốn điểm

của tấm lai (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) bằng tiêu chí phá hủy Hashin trong khuôn khổ phần tử hữu hạn. Khác với các nghiên cứu trước đây sử dụng mô hình vùng liên kết (CZM) để đánh giá hiện tượng tách lớp [7], nghiên cứu này giả định liên kết hoàn hảo giữa các lớp và chỉ xem xét sự khởi đầu và tiến triển hư hỏng trong các lớp composite.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Vật liệu CFRP được sử dụng trong mô phỏng là composite sợi carbon T700, được sản xuất bởi Toray, Tokyo, Nhật Bản, với độ dày 2 mm. Một loại nhựa prepreg tiêu chuẩn với hàm lượng nhựa 38% được sử dụng trong nghiên cứu này. Các tính chất cơ học của CFRP được trình bày trong Bảng 1, trong đó E_1 là mô đun đàn hồi theo phương dọc, E_2 là mô đun đàn hồi theo phương ngang, ν là hệ số Poisson, và G là mô đun cắt. Các tấm thép GB/T700 cacbon thấp, được biết đến với độ dẻo cao, được lựa chọn với độ dày 1 mm và các tính chất cơ học của chúng được trình bày trong 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

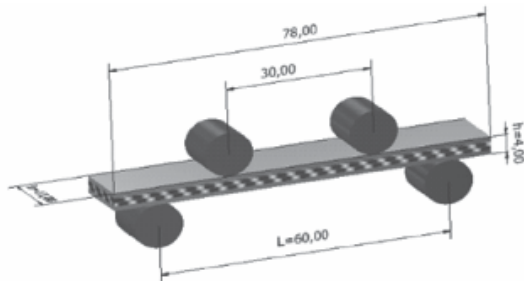
Bảng 2. Các tính chất vật liệu của GB/T700

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



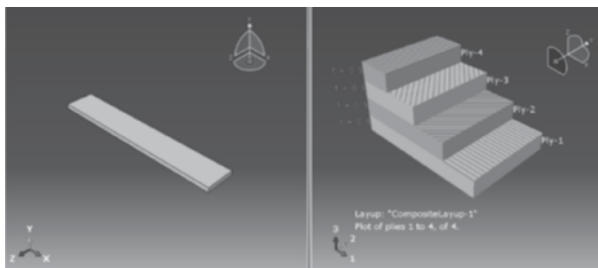
2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Mô hình phần tử hữu hạn

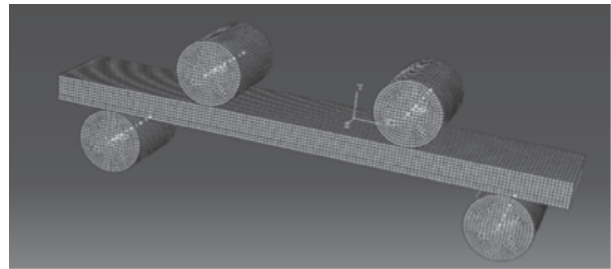


Hình 1. Mô hình mô phỏng uốn 4 điểm theo tiêu chuẩn D7264

Tấm hybrid bao gồm tấm composite CFRP xen vào giữa 2 tấm GB/T700. Mô hình hình học mô phỏng tuân theo kích thước tiêu chuẩn D7264 để tăng độ chính xác. 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 được thấy trong Hình 1. 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 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$, mỗi lớp có độ dày 0,5 mm, như được thể hiện trong Hình 2. Lưới mạng tính 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.



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



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

2.2.2. Điều kiện biên và tải

Một thiết lập uốn bốn điểm được thực hiện với điều kiện biên hỗ trợ đơn giản. Một tải trọng điều khiển dịch chuyển được áp dụng tại tâm 2 phần tử hỗ trợ đặt phía trên mẫu, theo tiêu chuẩn D7264. Các điểm hỗ trợ và mũi tải được mô phỏng như các vật thể cứng để giảm thiểu lỗi tính toán. Tiếp xúc mặt - mặt được áp dụng giữa tấm, mũi tải và các điểm hỗ trợ, và thuộc tính tiếp xúc bình thường được đặt là tiếp xúc cứng, thuộc tính tiếp xúc tiếp tuyến được đặt với hệ số hàm phạt là 0,25.

2.2.3. Mô hình hư hỏng cho tấm lai (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Mô hình hỏng kết hợp tiêu chí hỏng Hashin cho lớp CFRP và tiêu chí hỏng dẻo cho các lớp thép GB/T700 để dự đoán hư hỏng tiến triển dưới tải trọng uốn.

2.2.3.1. Tiêu chuẩn hư hỏng Hashin cho lớp CFRP

Mô hình hư hỏng Hashin được dùng để dự đoán phương thức hư hỏng trong lớp CFRP:

✓ Hư hỏng kéo sợi ($\sigma_{11} > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

✓ Hư hỏng nén sợi ($\sigma_{11} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

✓ Hư hỏng kéo nền ($\sigma_{22} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

✓ Hư hỏng nén nền ($\sigma_{22} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

2.2.3.2. Tiêu chí hư hỏng dẻo cho tấm GB/T700

Tiêu chí hỏng dẻo được sử dụng để dự đoán biến dạng dẻo và nứt trong các lớp thép. Hỏng xảy ra khi biến dạng dẻo tương đương ($\bar{\epsilon}_p$) đạt đến một giá trị tiêu chuẩn ($\bar{\epsilon}_p^f$):

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_p^f} \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_p^f} \geq 1 \quad (5)$$

Trong đó:

- $\bar{\epsilon}_p$ là độ biến dạng;

- $\bar{\epsilon}_p^f$ là biến dạng hư hỏng;

- Tích phân đại diện cho sự tích tụ hư hỏng, dẫn đến nứt dẻo khi tiêu chí này được thỏa mãn.

Ngoài ra, tiêu chí chịu kéo Von Mises được sử dụng để xác định sự bắt đầu của biến dạng dẻo:

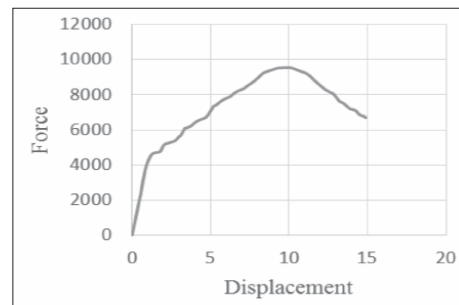
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \geq \sigma_y \quad (6)$$

Trong đó:

- σ_{eq} là ứng suất tương đương Von Mises;
- S_{ij} là tensor ứng suất lệch;
- σ_y là ứng suất chảy của thép GB/T700.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ thảo luận về kết quả mô phỏng thử nghiệm độ bền uốn bốn điểm của vật liệu tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700). Vật liệu tấm lai bao gồm hai tấm thép GB/T700 và một lớp CFRP được tạo thành từ bốn lớp prepreg với định hướng sợi như thể hiện trong Hình 2. Sự khác biệt về mô-đun đàn hồi và độ bền giữa thép GB/T700 và CFRP dẫn đến hành vi cơ học khác nhau.



Hình 4. Đường cong lực - chuyển vị của tấm hybrid khi thử uốn 4 điểm

Từ đồ thị ở Hình 4, chúng ta thấy rằng trong quá trình chịu tải trọng uốn 4 điểm tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) trải qua ba giai đoạn biến dạng riêng biệt rõ rệt: biến dạng đàn hồi, đạt ứng suất cực đại, và suy giảm sau đỉnh.

Giai đoạn 1: Ứng xử đàn hồi tuyến tính. Lực tăng tỷ lệ thuận với chuyển vị. Điều này cho thấy tấm laminate tổ hợp đang làm việc trong vùng đàn hồi, tuân theo định luật Hooke. Trong giai đoạn này, cả thép GB/T700 và CFRP đều cùng tham gia chịu tải, và chưa xảy ra hư hỏng hay biến dạng đáng kể. Vật liệu thể hiện độ cứng cao nhờ sự kết hợp giữa lớp CFRP và

lớp thép, điều đó xác nhận rằng kết cấu vẫn ổn định và chưa bị hư hỏng, với phân bố ứng suất đều trên toàn bộ tấm laminate.

Giai đoạn 2: Tiếp tục đặt tải, độ dốc đường cong giảm dần không còn tuyến tính. Vật liệu bắt đầu xuất hiện vi hư hỏng: thép GB/T700 bắt đầu chảy dẻo, nứt ma trận, đứt sợi ở một vài vị trí trong tấm CFRP. Tấm vật liệu không còn làm việc hoàn toàn đàn hồi, và hư hỏng bên trong bắt đầu tích tụ.

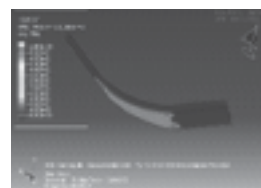
Giai đoạn 3: Khi lực đạt đến giá trị cực đại 9553.67N và chuyển vị 9.797mm tấm CFRP bị hư hỏng đứt sợi, nứt nền hoàn toàn làm khả năng chịu tải của tấm hybrid giảm xuống, vật liệu không còn khả năng chịu tải thêm một cách hiệu quả. Lực giảm từ từ trong giai đoạn này cho thấy quá trình hư hỏng lan rộng chứ không xảy ra một cách đột ngột như phá hủy giòn. Lớp thép vẫn tiếp tục chịu một phần tải trọng, ngay cả khi CFRP bắt đầu xuống cấp.



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

Hình 5 trình bày phân bố ứng suất dọc theo chiều dài của tấm hybrid tại thời điểm phá hủy. Trong quá trình chịu tải uốn bốn điểm, lớp thép GB/T700 phía trên chịu ứng suất nén do tiếp xúc trực tiếp với đầu ép, phù hợp với cơ chế truyền lực trong bài toán uốn. Ngược lại, lớp thép GB/T700 phía dưới chủ yếu chịu ứng suất kéo, phản ánh đặc điểm đối xứng của trạng thái ứng suất uốn điển hình khi lực tác dụng gây cong tấm xuống dưới.

Đối với lớp CFRP nằm giữa, phân bố ứng suất cho thấy sự phân cực rõ rệt: nửa trên của lớp composite chịu nén, trong khi nửa dưới chịu kéo. Sự chênh lệch lớn về mô đun đàn hồi giữa các lớp thép và CFRP dẫn đến dịch chuyển mặt trung hòa khỏi trung tâm hình học của cấu trúc laminate, từ đó tạo nên phân bố ứng suất phi đối xứng trong lớp composite. Cơ chế này đóng vai trò quan trọng trong việc xác định vùng khởi phát phá hủy và sự phát triển vết nứt bên trong vật liệu.



a. Hư hỏng kéo sợi theo tiêu chuẩn Hashin



b. Hư hỏng nén sợi theo tiêu chuẩn Hashin



c. Hư hỏng kéo nền theo tiêu chuẩn Hashin

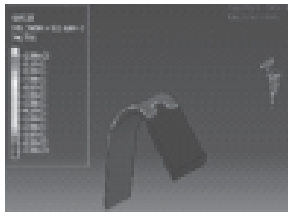


d. Hư hỏng nén nền theo tiêu chuẩn Hashin

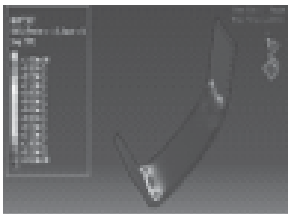
Hình 6. Trạng thái hư hỏng CFRT theo tiêu chuẩn Hashin

Hình 6 minh họa các vị trí xuất hiện hư hỏng ban đầu trong tấm hybrid, chủ yếu tập trung ở lớp CFRP theo tiêu chí phá hủy Hashin.

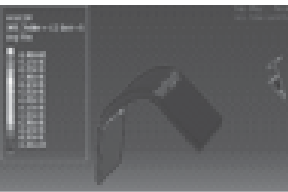
Cụ thể, Hình 6a cho thấy phá hủy sợi do kéo bắt đầu xuất hiện tại một số vị trí trên lớp prepreg thứ tư của tấm CFRP, nơi chịu ứng suất kéo lớn tại chuyển vị $U = 5.061\text{mm}$. Hình 6b thể hiện phá hủy sợi do nén khởi phát tại một số vị trí trên lớp prepreg thứ nhất, khi lớp này chịu ứng suất nén cao tại chuyển vị $U = 7.552\text{mm}$. Khi chuyển vị đạt tới $U = 7.008\text{mm}$ thì xuất hiện phá hủy nền do kéo ở một số vị trí của lớp prepreg thứ tư trong nền ma trận CFRP. Ngược lại, hình 6d cho thấy phá hủy nền do nén bắt đầu xuất hiện sớm hơn tại chuyển vị $U = 3.847\text{mm}$ điều này lý giải do tấm CFRP được định hướng không đối xứng ($0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ$) thì nền đóng vai trò mang tải chính theo phương ngang (vì sợi không hỗ trợ theo phương uốn chính). Khi đó, ứng suất trong nền tăng nhanh dẫn đến phá hủy sớm.



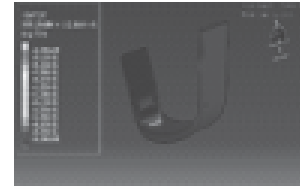
a. Hư hỏng đứt sợi hoàn toàn do kéo theo tiêu chuẩn Hashin



b. Hư hỏng đứt sợi không hoàn toàn do nén theo tiêu chuẩn Hashin



c. Hư hỏng đứt nền hoàn toàn do kéo theo tiêu chuẩn Hashin



d. Hư hỏng đứt sợi không hoàn toàn do nén theo tiêu chuẩn Hashin

Hình 7. Trạng thái hư hỏng CFRP hoàn toàn

Từ hình 7, chúng ta thấy rằng quá trình hư hỏng làm giảm độ bền uốn tấm hybrid chủ yếu là do kéo đứt sợi và kéo gãy nền như hình 7a và 7c, còn quá trình chịu nén CFRP rất tốt chưa gây hư hỏng hoàn toàn như thấy ở hình 7c.7d. Quá trình hư hỏng trên xảy ra đúng thời điểm lúc tấm hybrid chịu lực cực đại $P = 9553.67\text{N}$ và chuyển vị 9.797mm .

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này khảo sát ứng xử uốn của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) dưới thử nghiệm uốn bốn điểm thông qua mô phỏng số. Kết quả cho thấy phản ứng cơ học của tấm có thể được chia thành ba giai đoạn rõ rệt: biến dạng đàn hồi, đạt ứng suất cực đại, và suy giảm sau đỉnh. Ở giai đoạn đầu, laminate biến dạng đàn hồi, với cả thép GB/T700 và lớp CFRP cùng đóng góp vào khả năng chịu tải. Khi tải trọng tăng dần, vật liệu đạt đến ứng suất cực đại là 9553.67N MPa , đánh dấu giới hạn về độ bền uốn kết cấu. Vượt qua điểm này, sự tích lũy hư hỏng dẫn đến giảm dần khả năng chịu tải của tấm.

Phân tích phân bố ứng suất cho thấy lớp thép phía trên và phần trên của lớp CFRP chịu ứng suất nén, trong khi phần dưới của lớp CFRP chịu ứng suất kéo. Cơ chế phá hủy tập trung chủ yếu tại lớp prepreg thứ tư của CFRP, nơi xuất hiện các dạng hỏng như: đứt sợi do kéo, hỏng sợi do kéo và phá hủy nền. 

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]. Ashrafi, B., Ghasemi, H., & Taheri, F. (2016), “*Mechanical performance of hybrid composite laminates reinforced with carbon and glass fibers*”. Composites Part B: Engineering, 105, 135-144.
- [2]. Kim, H., & Lee, D. G. (2012), “*Effect of hybridization on mechanical properties of composite laminates*”. Journal of Composite Materials, 46(7), 857-867.
- [3]. Zhang, D., Li, S., & Sun, G. (2019), “*Experimental and numerical investigation on hybrid CFRP/metal laminates under bending load*”. Materials & Design, 162, 57-68.
- [4]. Tsai, S. W., & Wu, E. M. (1971), “*A general theory of strength for anisotropic materials*”. Journal of Composite Materials, 5(1), 58-80.
- [5]. Puck, A., & Schürmann, H. (1998), “*Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models*”. Composites Science and Technology, 58(7), 1045-1067.
- [6]. Hashin, Z. (1980), “*Failure criteria for unidirectional fiber composites*”. Journal of Applied Mechanics, 47(2), 329-334.
- [7]. Camanho, P. P., & Davila, C. G. (2002), “*Mixed-mode decohesion finite elements for the NASA Technical*”. Report TM-2002-211737.