

ĐỘ BỀN DAI TÁCH LỚP VÀ TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA VẬT LIỆU POLYME COMPOZIT TRÊN CƠ SỞ NHỰA EPOXY EPIKOTE 828/OELO GIA CƯỜNG SỢI CACBON, ĐÓNG RẮN BẰNG XYANETYLDIETYLENTRIAMIN

Đặng Hữu Trung^{1*}, Nguyễn Phạm Duy Linh¹, Trần Hải Ninh¹, Trần Vĩnh Diệu¹, Đoàn Thị Yên Oanh²

¹Trung tâm Nghiên cứu vật liệu polyme, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²Nhà Xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Đến Tòa soạn 14-5-2015; Chấp nhận đăng 20-12-2015

Abstract

Carbon fabric/epoxy (CF/EP) composite toughened by OELO was prepared to improve fracture toughness of the composite. The obtained testing results showed that the Izod impact strength of carbon fabric/epoxy composites significantly increased by 31.4 % from 37.2 KJ/m² to 48.9 KJ/m² just by adding 6 phr (part per hundred of resin) OELO was dispersed in the epoxy matrix. Both mode-I interlaminar fracture toughness of carbon fabric/epoxy (OELO/EP) composites at crack initiation and propagation also improved by 37.2 % and 17.7 %, respectively by content of 6 phr OELO in compositions. Damaged surfaces of fractured samples were investigated using scanning electron microscopy (SEM) techniques. Results obtained from dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) showed that the glass transition temperatures of the epoxy resin matrix were slightly reduced on the addition of 6phr OELO.

Keywords. Epoxy resin, fracture toughness, epoxidized linseed oil oligomer, composite materials.

1. MỞ ĐẦU

Vật liệu polyme compozit gia cường sợi liên tục được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: Công nghệ ô tô, hàng không, hàng hải, hệ thống đường ống và công nghiệp dân dụng... [1-3]. Hiện nay, vật liệu polyme compozit ngày càng được lựa chọn sử dụng trong công nghệ hàng không do các ưu điểm nổi bật. Hãng Boeing sử dụng tới 50 % và hãng Airbus sử dụng 25 % vật liệu compozit trên cơ sở nhựa epoxy để chế tạo thân, cánh và đuôi máy bay [4]. Tuy nhiên, để sử dụng cho các mục đích nêu trên, vật liệu polyme compozit cần đáp ứng được các chỉ tiêu như độ bền dai cao, nhẹ và khả năng chống phân lớp tốt. Một nhược điểm cố hữu của vật liệu polyme compozit trên cơ sở nhựa epoxy Epikote 828 là dòn, khả năng chống va đập và phân lớp kém.

Vì vậy, việc nghiên cứu nâng cao độ bền dai của vật liệu polyme compozit gia cường sợi cacbon trên cơ sở nhựa epoxy Epikote 828 là rất cần thiết, nhằm mục đích mở rộng phạm vi ứng dụng chúng.

Hiện nay, có rất nhiều công trình tập trung chủ yếu vào việc nâng cao độ bền dai của vật liệu polyme compozit trên cơ sở nhựa epoxy, tác nhân tăng độ bền dai chủ yếu là cacbon nano, vi sợi nano, các loại cao su lỏng v.v. K. L. Kepple và đồng

nghiệp [5] đã dùng ống cacbon nano phân tán vào nền epoxy, kết quả cho thấy đã làm tăng 46 % độ bền dai phá hủy tách lớp (G_{IC}). N. T. Phong và cộng sự [6] lại sử dụng 0,1 % sợi nano-polyvinyl alcohol (nPVA) phân tán vào nền epoxy, kết quả cho thấy đã làm tăng năng lượng tách lớp ban đầu (G_{IC}) lên 65 % và năng lượng tách lớp của quá trình (G_{IP}) lên 73 %.

Trong công trình này, đã nghiên cứu ảnh hưởng của oligome dầu lanh epoxy hóa (OELO) có nguồn gốc từ thiên nhiên đến khả năng dai hóa của vật liệu polyme compozit trên cơ sở nhựa epoxy Epikote 828 gia cường sợi cacbon.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Hóa chất và vật liệu

Dầu lanh epoxy hóa, Akros (Anh) có hàm lượng nhóm epoxy 22,9 %.

Nhựa epoxy Epikote 828 (Shell Chemicals), có hàm lượng nhóm epoxy 22,6 %.

OELO được tổng hợp tại Trung tâm Nghiên cứu vật liệu polyme, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội có hàm lượng nhóm epoxy 17,8 %.

Xyanetyldietylenetriamin (XEDETA), được tổng hợp theo tài liệu [7].

Vải cacbon loại AS4 (Hexcel) có mật độ 230 g/m².

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp tính toán lượng chất đóng rắn amin

Lượng chất đóng rắn amin X (g) cho 100 g nhựa epoxy được tính theo công thức:

$$X = \frac{E \frac{M}{n}}{43} k \quad (1)$$

Trong đó: E là hàm lượng nhóm epoxy; M là khối lượng phân tử của chất đóng rắn amin; n là số nguyên tử hydro hoạt động trong chất đóng rắn amin; 43 là khối lượng nhóm epoxy; k là hệ số điều chỉnh.

2.1.2. Chuẩn bị mẫu

OELO được phân tán trực tiếp vào nhựa epoxy Epikote 828 với các hàm lượng 0, 4, 6, 8, 10 và 12 PKL (phần khối lượng), sau đó tổ hợp được đóng rắn bởi chất đóng rắn XEDETA (xyanetyl-dietyltri-amin) ở hệ số $k = 1,2$. Vật liệu compozit gia cường sợi cacbon được lăn ép bằng tay, sau 3 tuần cắt và đem đi xác định tính chất cơ học.

2.2.3. Phương pháp xác định tính chất cơ học của vật liệu polyme compozit

Độ bền kéo được xác định trên máy INSTRON

5582-100 KN (Mỹ) theo tiêu chuẩn ASTM D638, tốc độ kéo 2 mm/phút, nhiệt độ 25 °C, độ ẩm 70 %.

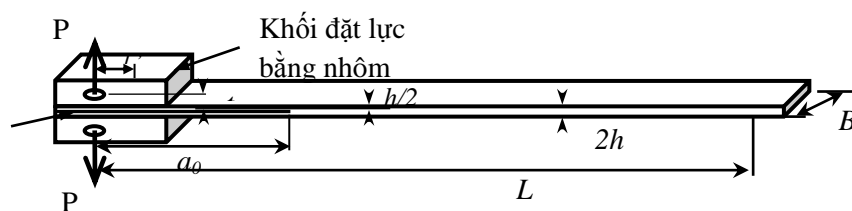
Độ bền uốn được xác định trên máy INSTRON 5582-100 KN (Mỹ) theo tiêu chuẩn ASTM D790, tốc độ uốn 2 mm/phút, khoảng cách giữa hai gối đỡ bằng 80 mm, nhiệt độ 25 °C, độ ẩm 70 %.

Độ bền va đập Izod được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D256 trên máy Tinius Olsen (Mỹ), nhiệt độ 25 °C và độ ẩm 70 %.

2.2.4. Chế tạo mẫu dầm công-xôn kép (DCB)

Vật liệu compozit dạng tấm gồm 10 lớp vải cacbon được chế tạo theo phương pháp lăn ép bằng tay. Nhựa nền epoxy được đóng rắn ở nhiệt độ phòng bằng chất đóng rắn XEDETA với hệ số $k = 1,2$. Tỷ lệ khối lượng nhựa/sợi = 40/60. Để tạo vết nứt ban đầu, một tấm PTFE (polytetrafluetylen) dày khoảng 10 μm được đặt vào sau lớp vải thứ 5 sao cho chiều dài vết nứt ban đầu $a_0 = 50$ mm. Sau 3 tuần mẫu được cắt và đem đi xác định độ bền dai phá hủy tách lớp.

Mẫu dầm công-xôn kép (DCB) có chiều dài 150 mm, chiều rộng 20 mm được cắt ra từ tấm compozit. Cạnh bên của mẫu được mài nhẵn và đánh dấu bằng sơn trắng với khoảng cách 1 mm để dễ dàng theo dõi chiều dài vết nứt phát triển. Hai khớp nối động bằng nhôm được dán vào hai mặt của mẫu ở phía cuối đầu có vết nứt tạo sẵn bằng keo dán 502. Hình 1 mô tả cấu hình của mẫu DCB dùng cho phương pháp xác định độ bền dai phá hủy tách lớp theo phương thức I [8].



Hình 1: Mẫu dầm công-xôn kép (DCB)

2.1.5. Thử độ dai phá hủy tách lớp biến dạng phẳng (Mode-I interlaminar fracture toughness test)

Phương pháp thử độ dai phá hủy tách lớp biến dạng phẳng được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM D5528-01 [8], trên máy đo cơ học đa năng LLOYD 500N (Anh) với tốc độ kéo 2 mm/phút, thể hiện trên hình 2. Lực tác dụng, độ dịch chuyển của chiều rộng vết nứt và chiều dài vết nứt được ghi lại trong quá trình vết nứt phát triển. Phương pháp hiệu chuẩn cải tiến (modified compliance calibration, MCC) được sử dụng để tính toán độ dai phá hủy tách lớp biến

dạng phẳng của mẫu compozit. G_{IC} và G_{IP} được tính theo công thức sau [8, 6]:

$$G_{IC} = \frac{3m}{2(2h)} \left(\frac{P_c}{B} \right)^2 \left(\frac{BC}{N} \right)^{2/3} F, \quad [\text{J/m}^2] \quad (2)$$

$$G_{IP} = \frac{3m}{2(2h)} \left(\frac{P_p}{B} \right)^2 \left(\frac{BC}{N} \right)^{2/3} F, \quad [\text{J/m}^2] \quad (3)$$

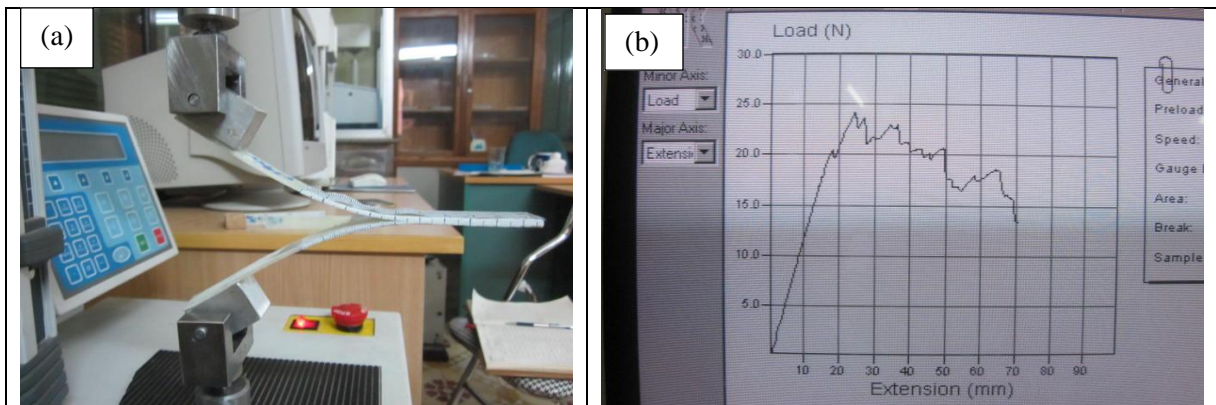
$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\delta t}{a^2} \right) \quad (4)$$

$$N = 1 - \left(\frac{L'}{a}\right)^3 - \frac{9}{8} \left[1 - \left(\frac{L'}{a}\right)^2 \right] \left[\left(\frac{\delta t}{a^2}\right) - \frac{9}{35} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \right] \quad (5)$$

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (6)$$

Trong đó: G_{IC} - độ dai phá hủy khi vết nứt bắt đầu xảy ra, J/m^2 ; G_{IP} - độ dai phá hủy của quá trình phát triển vết nứt, J/m^2 ; B - chiều rộng mẫu DCB, mm; $2h$ - chiều dày mẫu DCB, mm; P_c - lực lớn nhất khi vết nứt bắt đầu xảy ra, N; P_p - lực quá trình phát triển vết nứt, N; δ - độ dịch chuyển của chiều rộng vết nứt, mm; a - chiều dài vết nứt, mm; C - hệ số thuận tương ứng với chiều dài vết nứt.

N - hệ số hiệu chỉnh của δ khi xét đến ảnh hưởng của khớp nối động bằng nhôm đến độ cứng của mẫu; F - hệ số hiệu chỉnh liên quan đến độ dịch chuyển vết nứt; m - hệ số góc của đường thẳng biểu diễn mối quan hệ giữa $(BC/N)^{1/3}$ và $(a/2h)$; t - khoảng cách được định nghĩa trên hình 1, mm; L' - khoảng cách từ tâm của chốt định vị trên khối nhôm đến cạnh của khối nhôm về phía chiều vết nứt phát triển (hình 1), mm.



Hình 2: Thiết bị xác định độ bền dai tách lớp (a) và đồ thị đặc trưng tác dụng lực-độ dịch chuyển của phép đo (b) trên mẫu DCB của vật liệu polyme compozit gia cường sợi carbon

2.2.6. Kính hiển vi điện tử quét

Cấu trúc hình thái học bề mặt phá hủy của các mẫu compozit được quan sát trên kính hiển vi điện tử quét (SEM) JEOL JSM 6360LV (Nhật Bản). Trước khi quan sát bằng SEM, tất cả các mẫu được phủ bằng một lớp mỏng Pt để tránh hiện tượng tích điện.

2.2.7. Phân tích cơ nhiệt động (DMTA)

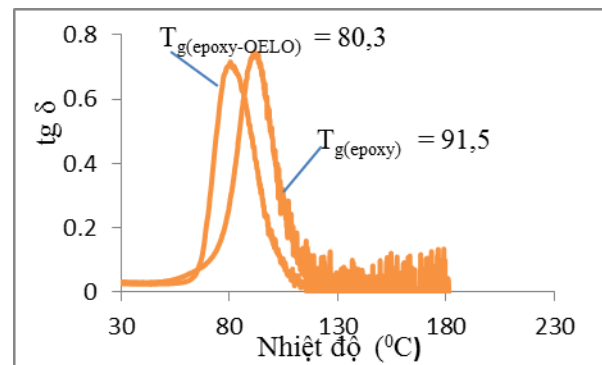
Phân tích cơ nhiệt động (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer - DMTA) của mẫu được xác định trên máy DMA 8000 Perkin Elmer.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đường cong cơ nhiệt động (DMTA) của nhựa nền epoxy Epikote 828 biến tính bằng OELO

Trong quá trình sử dụng ở môi trường khắc nghiệt như chịu rung lắc, nhiệt độ, độ ẩm... ta phải biết được khả năng chuyển trạng thái của polyme để sử dụng cho phù hợp, do vậy đã tiến hành xác định tính chất cơ nhiệt động của mẫu nhựa epoxy không biến tính và có biến tính 6 PKL-OELO, sử dụng chất

đóng rắn XEDETA. Mẫu được đổ trong khuôn thép có kích thước 50x7x2 mm, sau 3 tuần đóng rắn hoàn toàn đem đi xác định cơ nhiệt động. Kết quả nhận được thể hiện trên hình 3.



Hình 3: Đường cong cơ nhiệt động (DMTA) của nhựa nền epoxy Epikote 828 biến tính và không biến tính bằng OELO

Kết quả trên hình 3 cho thấy, ở mẫu không biến tính OELO nhiệt độ hóa thủy tinh $T_g = 91,5 \text{ }^\circ\text{C}$ và $\tan\delta = 0,72$. Trong khi đó ở mẫu có biến tính 6 PKL-OELO, nhiệt độ hóa thủy tinh giảm xuống $T_g = 80,3$

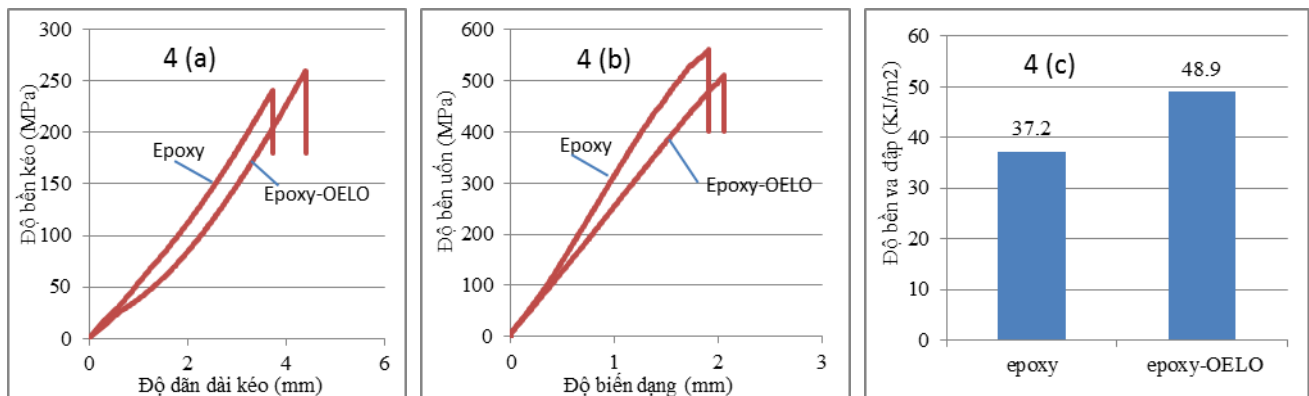
$^{\circ}\text{C}$ và $\tan\delta = 0,71$. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với dự đoán ban đầu là khi đưa OELO vào nhựa epoxy đã làm giảm mật độ khâu mạch, đồng thời làm tăng tính mềm dẻo của nhựa epoxy và kết quả là khả năng chịu nhiệt kém hơn so với nhựa epoxy không biến tính. Các tác giả [9, 10] cũng chỉ ra rằng khi đưa các chất biến tính vào nhựa epoxy để cải thiện khả năng dai hóa của nhựa, cũng làm giảm T_g một cách đáng kể.

3.2. Tính chất cơ học của vật liệu composit trên nền epoxy Epikote 828/OELO gia cường bằng sợi cacbon, sử dụng chất đóng rắn XEDETA

Trong công trình [11] chúng tôi đã khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng OELO đến tính chất cơ học của vật liệu epoxy Epikote 828. Kết quả cho thấy ở

hàm lượng 6 PKL-OELO cho kết quả tốt nhất. Trong công trình này sử dụng 6 PKL-OELO đưa vào vật liệu composit gia cường sợi cacbon trên cơ sở nhựa epoxy Epikote 828. Kết quả nhận được trình bày trên hình 4.

Từ hình 4a và 4b cho thấy, vật liệu composit khi đưa OELO vào nhựa nền không làm thay đổi nhiều đến tính chất kéo và uốn, cụ thể độ bền kéo tăng nhẹ 8,6 % (từ 240,6 MPa lên 261,3 MPa), độ bền uốn giảm nhẹ 8,6 % (từ 552,4 MPa xuống 508,2 MPa). Trong khi đó modun kéo và uốn đều giảm (thể hiện qua đường cong ứng suất trễ hơn). Tuy nhiên, ở hình 4c cho thấy, độ bền va đập Izod có khía của vật liệu polyme composit gia cường bằng sợi cacbon tăng đáng kể khi có mặt OELO. Cụ thể khi có mặt 6 PKL-OELO, độ bền va đập tăng 31,4 % (từ 37,2 KJ/m² lên 48,9 KJ/m²).



Hình 4: Đồ thị ứng suất kéo, uốn và va đập của mẫu vật liệu composit gia cường sợi cacbon, trên cơ sở nhựa epoxy Epikote 828, biến tính và không biến tính bằng OELO

Như vậy, khi đưa OELO vào vật liệu composit cho thấy tổ hợp nhựa epoxy Epikote 828 sau khi đóng rắn có tính mềm dẻo hơn.

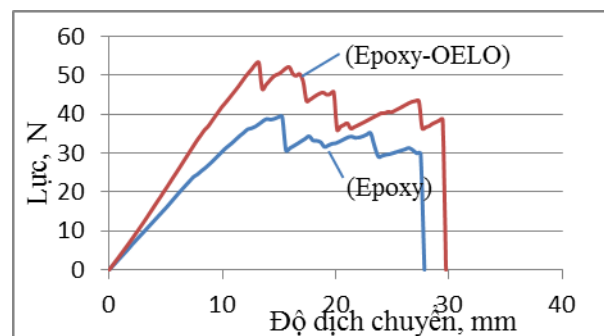
3.3. Độ bền dai tách lớp của vật liệu composit trên nền epoxy Epikote 828/OELO gia cường bằng sợi cacbon, với chất đóng rắn XEDETA

3.3.1. Đường cong tác dụng lực-độ dịch chuyển

Đã sử dụng 6 PKL - OELO để biến tính nhựa nền epoxy Epikote 828, với chất đóng rắn XEDETA và gia cường bằng sợi cacbon, với tỷ lệ khối lượng nhựa/sợi = 40/60. Kết quả nhận được trình bày trên hình 5.

Hình 5 biểu diễn các đường cong đặc trưng cho mối quan hệ giữa lực kéo P và độ dịch chuyển mở rộng vết nứt δ của mẫu DCB có và không có OELO. Ở mẫu có 6 PKL-OELO quan sát thấy tốc độ dịch chuyển của vết nứt chậm và số lần khôi phục để hình thành vết nứt mới nhiều hơn so với mẫu không có OELO, điều này được thể hiện rõ trên đường cong

đặc trưng tác dụng lực-độ dịch chuyển (hình 6). Ở mẫu không có OELO lực tác dụng lớn nhất khi vết nứt bắt đầu xuất hiện và đạt 39,8 N, nhỏ hơn nhiều so với mẫu có 6PKL-OELO 53,6 N. Sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên, lực tác dụng giảm dần và tỷ lệ nghịch với độ dịch chuyển.

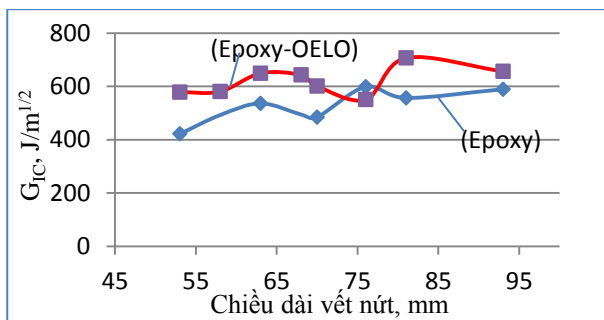


Hình 5: Đường cong đặc trưng lực tác dụng-độ dịch chuyển của phép đo độ bền dai tách lớp trên mẫu DCB của vật liệu composit có biến tính và không biến tính OELO

3.3.2. Độ bền dai tách lớp

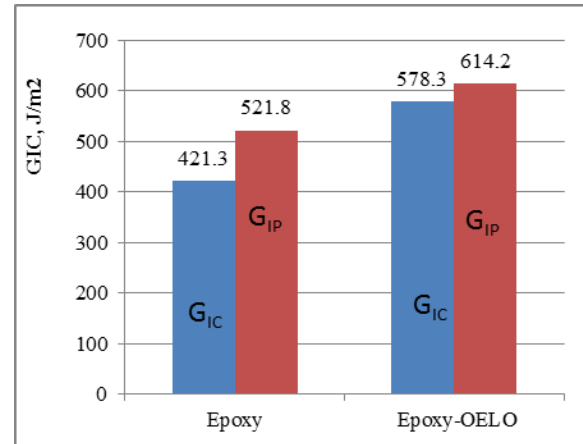
Độ bền dai phá hủy tách lớp phụ thuộc nhiều yếu tố như bản chất của nhựa nền, loại sợi gia cường, modun sợi hay phương pháp gia công vv... Một báo cáo của tác giả N. Baral và đồng nghiệp [12] cho thấy modun của sợi gia cường có ảnh hưởng trực tiếp đến năng lượng tách lớp. Báo cáo kết luận sợi gia cường có modun càng cao thì khả năng chống lại sự phá hủy tách lớp càng thấp.

Mối quan hệ giữa độ bền dai tách lớp với chiều dài vết nứt của vật liệu polyme compozit khi không có OELO và có 6 PKL-OELO được trình bày trên hình 6.



Hình 6: Quan hệ giữa độ bền dai tách lớp G_{IC} và chiều dài vết nứt của mẫu vật liệu compozit có biến tính và không biến tính bằng OELO

Kết quả trên hình 6 cho thấy, nếu sử dụng 6 PKL-OELO biến tính nền epoxy Epikote 828, độ bền dai tách lớp ban đầu G_{IC} tăng 37,2 % so với mẫu không có OELO (từ 421,3 lên 578,3 J/m²). Trong khi đó độ bền dai tách lớp của quá trình G_{IP} khi sử dụng 6 PKL-OELO tăng 17,7 % (từ 521,8 lên 614,2 J/m²), thể hiện trên hình 7.



Hình 7: Độ bền dai phá hủy tách lớp của mẫu vật liệu compozit không sử dụng và có sử dụng OELO

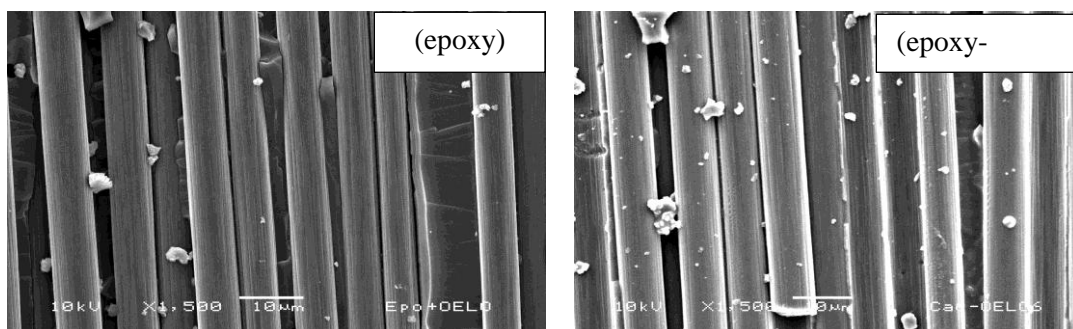
Có được điều đó có thể là do với sự có mặt của 6 PKL-OELO trong tổ hợp vật liệu đã làm tăng kết dính nội của polyme, kết quả là làm tăng năng lượng tách lớp giữa sợi và nền trong vật liệu compozit.

Như vậy, khi đưa 6 PKL-OELO vào vật liệu compozit gia cường sợi cacbon, đã cải thiện đáng kể năng lượng phá hủy tách lớp của vật liệu compozit.

3.3.3. Ảnh SEM bề mặt phá hủy tách lớp của mẫu có và không có OELO biến tính

Để hiểu rõ cơ chế phá hủy tách lớp của mẫu vật liệu compozit có sử dụng và không sử dụng OELO làm tác nhân cải thiện độ bền dai phá hủy tách lớp. Đã tiến hành chụp ảnh SEM bề mặt phá hủy tách lớp của mẫu vật liệu epoxy Epikote 828, sử dụng đóng rắn XEDETA, gia cường bằng sợi cacbon, tỷ lệ khối lượng nhựa/sợi = 40/60.

Kết quả nhận được thể hiện trên hình 8.



Hình 8: Ảnh SEM bề mặt phá hủy tách lớp của mẫu vật liệu compozit có và không có 6 PKL-OELO

Quan sát ảnh SEM cho thấy, ở mẫu không có OELO bề mặt phá hủy của mẫu nhẵn hơn và trên bề mặt sợi có rất ít nhựa bám lại.

Trong khi đó ở mẫu có 6 PKL-OELO bề mặt phá hủy không nhẵn và lượng nhựa bám dính lên bề mặt

sợi sau quá trình tách lớp nhiều hơn. Điều đó chứng tỏ khi có mặt OELO đã làm tăng khả năng liên kết giữa sợi và nền, kết quả dẫn đến năng lượng tách lớp cần thiết của mẫu có chứa 6 PKL-OELO lớn hơn so với mẫu không chứa OELO.

Một báo cáo tương tự của tác giả J. Zhang và cộng sự [13] qua ảnh SEM cho thấy, khi đưa tổ hợp lai tạo nano-silica và cao su lỏng CTBN vào nhựa nền epoxy, bề mặt sợi sau quá trình tách lớp có lượng nhựa bám dính nhiều hơn so với mẫu không biến tính, điều đó đã làm tăng bề mặt bám dính giữa sợi và nền. Kết quả làm tăng năng lượng phá hủy tách lớp.

Như vậy, vai trò của OELO trong tổ hợp vật liệu compozit đã được kiểm chứng và hoàn toàn phù hợp với kết quả nhận được nhờ ảnh SEM.

4. KẾT LUẬN

Khi đưa 6 PKL-OELO vào vật liệu compozit gia cường sợi cacbon, sử dụng chất đóng rắn XEDETA cho thấy: Độ bền kéo và uốn không có sự thay đổi nhiều. Tuy nhiên, độ bền va đập Izod có khía tăng 31,4 % (từ 37,2 KJ/m² lên 48,9 KJ/m²).

Độ bền dai tách lớp ban đầu G_{IC} của vật liệu compozit tăng 37,2 % (từ 421,3 lên 578,3 J/m²) và độ bền dai tách lớp của cả quá trình G_{IP} của vật liệu compozit tăng 17,7% (từ 521,8 lên 614,2 J/m²).

Lời cảm ơn. Các tác giả xin chân thành cảm ơn Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Vật liệu Polyme và Compozit, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội đã tạo điều kiện đầy đủ trang thiết bị trong quá trình nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Literature Review of epoxy toughening, Chapter 8, pp.155-157.
- M. Nikbakht, and N. Choupani. *Fracture Toughness Characterization of Carbon-Epoxy Composite using Arcan Specimen*, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, **2(4)**, 247-253 (2008).
- Epoxy Resins Market for Paints & Coatings, Wind Energy, Composites, Construction, Electrical & Electronics, Adhesives and Other Applications-Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2014-2020.
- Copyright Future Pipe Industries Group 2011, All rights reserved.
- K. L. Kepple, G. P. Sanborn, P. A. Lacasse, K. M. Gruenberg, W. J. Ready. *Improved fracture toughness of carbon fiber composite functionalized with multi walled carbon nanotubes*, Carbon, **46**, 2026-2033 (2008).
- Nguyen Tien Phong, Mohamed H. Gabr, Kazuya Okubo, Bui Chuong, Toru Fujii. *Improvement in the mechanical performances of carbon fiber/epoxy composite with addition of nano-(Polyvinyl alcohol) fibers*, Composite Structures, (**99**), 380-387 (2013).
- Phan Thị Minh Ngọc, Bạch Trọng Phúc, Ngô Thị Thanh Vân. *Tổng hợp và ứng dụng adduct diethyltri-amin-acrylonitril làm chất đóng rắn cho nhựa epoxy trong vật liệu polyme compozit gia cường bằng sợi thủy tinh*, Tạp chí Hóa học, **38(3)**, 45-49 (2000).
- ASTM D5528-94a. *Standard test method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*.
- R. Raghavachar, R.J. Letasi, P.V. Kola, Z. Chen, and J. L. Massingill. *Rubber-Toughening Epoxy Thermosets with Epoxidized Crambe Oil*, JAOCS, **76**, 511-516 (1999).
- Abdouss, Majid, Farajpour, Tohid, Derakhshani, Morteza. *The Effect of Epoxy-Polysulfide Copolymer Curing Methods on Mechanical-Dynamical and Morphological Properties*, Iran. J. Chem. Chem. Eng., **30(4)**, 37-44 (2011).
- Đặng Hữu Trung, Trần Hải Ninh, Trần Vĩnh Diệu, Nguyễn Thị Bích Thủy, Đoàn Thị Yên Oanh. *Ảnh hưởng của oligome dầu lanh epoxy hóa (OELO) đến tính chất cơ học của polyme epoxy*, Tạp chí Hóa học, **52(1)**, 112-116 (2014).
- N. Baral, P. Davies, C. Baley and B. Bigourdan, Delamination behavior of very high modulus carbon/epoxy marine composites, Composites Science and Technology, **68(3-4)**, 995-1007 (2008).
- Jianing Zhang, Shiqiang Deng, Lin ye, Zhong Zhang. *Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Delamination Growth of CF/EP Composites with Matrices Modified by Nano-silica and CTBN rubber*, 13th International Conference on Fracture. June 16–21, 2013, Beijing, China.

Liên hệ: Đặng Hữu Trung

Trung tâm Nghiên cứu vật liệu polyme
 Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
 Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam
 E-mail: trungsms.02@gmail.com; Điện thoại: 0966991799.