

# NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN MÔ HÌNH SUY BIẾN CÁC ĐẶC TÍNH CƠ HỌC VẬT LIỆU CỦA TẤM COMPOSITE DẠNG LỚP DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG CHU TRÌNH CÓ TÍNH ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ

## MODELING OF THE PROCESS OF ACCUMULATION OF DAMAGES IN CYCLIC LOADING WITH THE ACCOUNT OF TEMPERATURE

Phạm Chung<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Quang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự

<sup>2</sup>Viện Kỹ thuật Phòng không – Không quân

### TÓM TẮT

Nội dung của bài báo này trình bày về vấn đề suy giảm đặc tính cơ học vật liệu của tấm composite đa lớp dưới tác dụng của tải trọng nhiệt theo chu trình. Đây là vấn đề đang thu hút được sự quan tâm sâu sắc của các nhà khoa học trên toàn thế giới, là vấn đề có vai trò rất quan trọng đối với lĩnh vực thiết kế, chế tạo kết cấu sử dụng composite dạng tấm. Tải trọng lặp tác dụng lên tấm composite dạng lớp trong khoảng thời gian nhất định, là nguyên nhân gây nên sự phá hủy kết cấu, ngay cả khi tải trọng đó chưa đạt tới giá trị giới hạn bền của vật liệu. Đối tượng nghiên cứu là tấm composite điển hình trong lĩnh vực hàng không với các góc đặt cốt kiểu  $[0, 90^\circ]_s$ ,  $[0, \pm 45^\circ]_s$  và  $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$ . Kết quả tính toán mô phỏng thu được cho phép so sánh sự suy giảm đặc trưng cơ học của tấm composite dưới tác dụng của tải trọng theo chu trình không tính đến và khi có tính đến tác động nhiệt độ. Kết quả tính toán chỉ ra rằng, tác động nhiệt độ theo chu trình có ảnh hưởng lớn tới quá trình suy biến đặc tính cơ học của vật liệu. Trên cơ sở kết quả nghiên cứu thu được, cho phép đưa ra các khuyến cáo công nghệ thiết thực cho quá trình thiết kế và chế tạo kết cấu dạng tấm composite dạng lớp.

**Từ khóa:** Tải có chu trình; Tải trọng nhiệt; Vật liệu composite; Vật liệu đa lớp.

### ABSTRACT

*In the process of exploitation of composite materials, both under static loading with a relatively high amplitude and under cyclic loading, a phenomenon of decreasing mechanical and strength properties is observed, sometimes called the phenomenon of degradation of mechanical and strength properties. The cause of this phenomenon is associated with the process of accumulation of scattered lesions in composite materials. In its turn, the growth process of material damage is determined both by mechanical phenomena caused by the formation and growth of various microdefects, and by viscous resistance, diffusion, chemical processes and other nonmechanical phenomena accompanying damage processes. In general, the process of growth of scattered lesions precedes the appearance of macrocracks, which, as a rule, require special methods of experimental detection. The available experimental data make it possible to assert that this process, manifested in the reduction of the stiffness and strength properties of the composite, plays often a decisive role in the destruction of the composite.*

**Keywords:** Aviation materials; Composite materials; Cyclic loading; Thermal loading.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong suốt quá trình khai thác sử dụng kết cấu composite, khi kết cấu chịu tải trọng tĩnh cơ – nhiệt với biên độ lớn cũng như khi chịu tải theo chu trình sẽ xuất hiện hiện tượng suy biến các đặc tính cơ học và tính chất độ bền của kết cấu. Nguyên nhân của hiện tượng này là do sự tích lũy theo thời gian phổ các khuyết tật bên trong kết cấu composite: Sự hình thành và phát triển các vi khuyết tật, hiện tượng thấm thấu, các quá trình chuyển hóa do các phản ứng hóa học giữa các vật chất gây nên... Theo thời gian, phổ các vi khuyết tật sẽ phát triển và lan rộng, từ đó sẽ dẫn đến hiện tượng phá hủy kết cấu composite[1-4].

Cơ chế tích lũy khuyết tật trong kết cấu composite dưới tác động của tải trọng cơ – nhiệt theo chu trình diễn ra tương đối đa dạng so với các kết cấu kim loại khác[2]. Ví dụ, khi kết cấu composite đồng phương chịu uốn thì tùy thuộc vào mức vật liệu mà các khuyết tật xuất hiện có thể là đứt sợi pha cốt, có thể là mất ổn định đối với các sợi cốt bị nén, có thể là sự tách lớp giữa các lớp vật liệu...

Quá trình tích lũy vi khuyết tật bên trong kết cấu composite dưới tác động của tải trọng cơ – nhiệt theo chu trình phụ thuộc nhiều vào đặc trưng chịu tải trọng của kết cấu, khi chịu tải trọng tĩnh sẽ dẫn đến xuất hiện nhóm các khuyết tật phá hủy pha cốt, còn khi chịu tải trọng theo chu trình sẽ gây nên nhóm các khuyết tật dạng tách lớp (phá hủy liên kết giữa pha nền và pha cốt) [1].

Nội dung chính của nghiên cứu này là mô phỏng quá trình suy biến các đặc tính cơ học của kết cấu composite đa lớp dạng tấm dưới tác dụng của tải trọng theo chu trình trên cơ sở các mô hình cho phép mô tả quá trình suy biến các đặc trưng cơ học bên trong kết cấu.

## 2. MÔ HÌNH SUY BIẾN CÁC ĐẶC TÍNH CƠ HỌC BÊN TRONG KẾT CẤU COMPOSITE

Mô tả quá trình tích lũy các khuyết tật bên trong kết cấu composite gắn liền với việc đánh giá sự thay đổi các đặc tính cơ học của vật liệu trong suốt quá trình khai thác sử dụng. Như đã biết, trong các kết cấu composite thường xuất hiện hiện tượng giảm giá trị mô đun đàn hồi khi kết cấu chịu tải trọng [1]. Việc sử dụng các mô hình suy biến giản đơn cho phép mô tả sự suy giảm các đặc trưng hiệu dụng của kết cấu, là yếu tố làm giảm hiệu quả khai thác cũng như tuổi thọ của kết cấu. Khi nghiên cứu, mô phỏng quá trình suy biến đặc trưng cơ học của kết cấu composite có thể coi các đại lượng đặc trưng cho độ bền, tuổi thọ kết cấu là thông số cơ bản. Khi đó, các biểu thức mô tả sự thay đổi mô đun đàn hồi, độ chống uốn, sự thay đổi độ bền có dạng [1]:

$$S^* = 1 - \frac{E}{E_0}; S^* = 1 - \frac{E \cdot I}{E_0 \cdot I_0}; S^* = 1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_{b_0}} \quad (1)$$

Trong đó,  $S^*$  - Tham số khuyết tật, phụ thuộc vào tham số quá trình  $t$ . Tham số  $S^*$  thay đổi từ giá trị không tới giá trị tới hạn – là giá trị tương ứng với thời điểm cuối của quá trình tích lũy vi khuyết tật (hay còn gọi là thời điểm bắt đầu phá hủy kết cấu). Nếu các giá trị tới hạn của  $S^*$  được định danh thì  $S^*$  có thể được viết dưới dạng  $S^* = k \cdot S(t)$ . Các hệ số được xác định từ các điều kiện tới hạn. Ví dụ, khi  $\frac{E \cdot I}{E_0 \cdot I_0} \approx 0,75 \dots 0,85$  thì xem  $k \approx 0,2$ .

Trên thực tế, các tính chất khai thác sử dụng của phần tử kết cấu luôn được xác định bởi các tính chất cơ học của vật liệu. Khi đó, coi tính chất vật liệu, nghĩa là các tensor mô đun đàn hồi của vật liệu phụ thuộc vào thời gian thực  $t$  của quá trình.

$$E_{ijklm}(t) = E_{ijklm}^0 - \Delta E_{ijklm}(t) \quad (2)$$

Trong đó:  $E_{ijklm}^0$  - Mô đun đàn hồi của vật liệu không có khuyết tật,  $\Delta E_{ijklm}(t)$  phụ thuộc vào thời gian của quá trình, đại lượng này cho phép xác định quá trình suy giảm các đặc tính cơ học, ngoài ra còn có liên quan tới hiện tượng suy biến do quá trình tích lũy các vi khuyết tật.

Giả sử tensor  $(\Delta E_{ijklm}(t))_{th}$  ở biểu thức (2) là giá trị tới hạn cho phép, ở giá trị này thì kết cấu vẫn bảo toàn các đặc tính hiệu dụng. Khi đó, có thể đề xuất tiêu chí hoạt động của kết cấu trong điều kiện vẫn đảm bảo các đặc tính hiệu dụng:

$$\min_{ijklm} \left( \int_0^{t^*} (\Delta E_{ijklm}(t))_{th} dt \right) = \Delta E_{th} \quad (3)$$

Trong đó,  $t^*$  là thời gian tới hạn, là đại lượng xác định tuổi thọ thực của kết cấu.

Như được đề cập trong [1],  $(\Delta E_{ijklm}(t))_{th}$  được xác định từ điều kiện bền tới hạn và các điều kiện khác, ví dụ từ điều kiện sao cho tần số riêng không vượt quá dải giá trị cho phép.

Khi đó, trong điều kiện thực tế sự suy giảm lớn nhất của các đại lượng đặt trung không vượt quá 15%. Trong rất nhiều trường hợp sẽ đánh giá được đại lượng  $t^*$  dưới dạng tường minh [1].

Để mô tả quá trình suy biến các tính chất hiệu dụng của kết cấu composite ta sử dụng mô hình phát triển vi khuyết tật như biểu thức (4) với các giá trị  $a=0; b \neq 0$ .

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= v(t) \\ \frac{ds}{dt} &= a + b \cdot s(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = s_0 \cdot v(t, S) + a(t, S) \cdot N(t) + b(t, S) \cdot S(t) \quad (5)$$

Hệ các phương trình (4) và (5) là hệ kín các phương trình mô tả quá trình hình thành và phát triển các vi khuyết tật bên trong kết cấu composite. Các điều kiện biên đối với hệ phương trình có dạng:

$$S|_{t=0} = S_0; \quad s|_{t=0} = s_0; \quad v|_{t=0} = v_0 \quad (6)$$

Trong công trình [12] đã chỉ ra rằng, quá trình tích lũy vi khuyết tật ở giai đoạn đầu chiếm từ 20% đến 30% tổng các vi khuyết tật xuất hiện trong suốt quá trình.

Trong trường hợp tổng quát, đối với các mô hình ở biểu thức (4) và (5) khi xem  $v(t) = v = \text{const}$ ,  $s(t) = s_0 = \text{const}$  thì biểu thức của đại lượng  $S$  có dạng:

$$S = \left[ - \left( 1 + \frac{m}{b_0} \right) e^{-b_0 t} + m t + \left( 1 + \frac{m}{b_0} \right) \right] \cdot s_0 c \quad (7)$$

Trong đó,  $m = \frac{a}{b}$ ,  $c = \frac{v}{b}$ ;  $m, b_0, s_0, c$  - Các tham số của mô hình.

Trong trường hợp riêng, khi  $a=0, b \neq 0$  thì biểu thức (7) sẽ có dạng:

$$S = (1 - e^{-b_0 t}) s_0 c \quad (8)$$

Trong đó,  $b_0, s_0, c$  là các hằng số.

Để đơn giản hóa quá trình tính toán mô phỏng ta sử dụng các giả thuyết sau:

1) Trong các sợi pha cốt, không có hiện tượng tích lũy khuyết tật, khi đó mô đun đàn hồi dọc các sợi trong từng lớp sẽ không suy biến;

2) Coi rằng hiện tượng suy biến các tính chất của kết cấu composite chỉ được xác định bởi hiện tượng tích lũy khuyết tật ở pha nền;

3) Đối với mô đun đàn hồi và mô đun trượt sử dụng các công thức thu gọn, có dạng:

$$E_2^i = E_{20} [1 - K_E^i \cdot S_E(t, \sigma, \tau)]; \quad G_{12}^i = E_{120} [1 - K_G^i \cdot S_G(t, \sigma, \tau)] \quad (9)$$

Trong đó,  $E_{20}$  và  $E_{120}$  là mô đun đàn hồi của vật liệu không có khuyết tật.

Khi đó, mô hình suy biến của mô đun ngang và mô đun trượt có dạng:

$$E_2^i = E_{20} [1 - K_E^i \cdot (1 - e^{-b_E^n})]; \quad G_{12}^i = E_{120} [1 - K_G^i \cdot (1 - e^{-b_G^n})] \quad (10)$$

Các tham số  $K_E^i$  và  $E_{120}$  phụ thuộc vào giá trị ứng suất,  $b_E$  và  $b_G$  là các vi tham số được xác định theo thực nghiệm. Nói chung, các giá trị này là khác nhau theo các qui luật suy biến đối với mô đun đàn hồi và mô đun trượt.

4) Tham số  $K_E^i$  xác định sự phụ thuộc của vận tốc thay đổi mô đun so với giá trị hiện hành. Khi đó:

$$K_E^i = K_{Eo} f_{KE}(\sigma_2^i) = K_{Eo} \left\{ \frac{\sigma_2^i + |\sigma_2^i|}{2\sigma_{2b}} \right\}^{m_0} \quad (11)$$

Trong đó,  $m_0$  là vi tham số, được xác định từ thực nghiệm,  $K_{Eo}$  là vi tham số được xác định từ thực nghiệm đối với các tính chất cơ học.

5) Tham số  $K_G^i$  xác định sự phụ thuộc của vận tốc thay đổi mô đun trượt so với giá trị hiện hành.

$$K_G^i = K_{Go} f_{KG}(\sigma_2^i, \tau_{12}^i) = K_{Go} \left\{ \left( \frac{\tau_{12}^i}{\tau_b} \right) + \alpha \left( \frac{\sigma_2^i + |\sigma_2^i|}{2\sigma_{2b}} \right)^{m_\sigma} \right\} \quad (12)$$

Trong đó,  $m_\tau$ ,  $m_\sigma$ ,  $\alpha$  - các vi tham số, được xác định từ thực nghiệm;  $K_{Go}$  được xác định từ thực nghiệm.

Chi tiết về phương pháp và trình tự xác định các tham số của mô hình  $K_{Eo}$ ,  $K_{Go}$ ,  $m_0$ ,  $m_\tau$ ,  $m_\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $b_E$ ,  $b_G$  được đề cập trong [1].

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Thông số đầu vào

Tính toán mô phỏng được tiến hành đối với ba trường hợp:

- 1) Composite lớp với góc đặt  $[0, 90_2^o]_s$ ;
  - 2) Composite lớp với góc đặt  $[0, \pm 45^o]_s$ ;
  - 3) Composite lớp với góc đặt  $[0, \pm 45^o, 90^o]_s$
- Vật liệu được sử dụng là các bon - eposid với

Bảng 1. Tính chất của vật liệu composite:

Thông số	Giá trị
$E_1$ [GPa]	137
$E_2$ [GPa]	6,86
$E_3$ [GPa]	6,86
$G_{12}$ [GPa]	4,41
$G_{13}$ [GPa]	4,41
$G_{23}$ [GPa]	4,41
$\nu_{12}$	0,28
$\nu_{13}$	0,21
$\nu_{23}$	0,21

Tải trọng lớn nhất khi chịu kéo theo chu kỳ đạt 0,7 giá trị ứng suất tới hạn [1].

( $\sigma_{th} = 547 \text{ MPa}$ ). Ứng suất tới hạn trong các lớp  $\sigma_{2b} = 60 \text{ MPa}$  và  $\tau_b = 70 \text{ MPa}$ .

Đối với lớp vật liệu có góc đặt  $[0, 90_2^o]_s$  các tham số của mô hình suy biến xác định được là:

$K_{E0} = 0,538$ ,  $m_0 = 3,17$ ,  $b_E = 8,78$ ,  $\alpha = 0,1$ . Các tham số còn lại không ảnh hưởng tới kết quả

tính toán đối với lớp composite nhóm  $[0, 90_2^o]_s$ , chúng sẽ được đề cập đến khi tính toán lớp composite  $[0, \pm 45^o]_s$ .

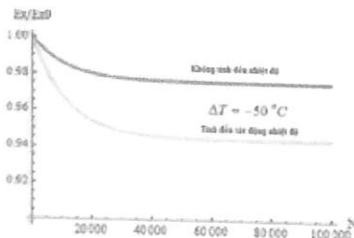
### 3.2. Kết quả tính toán mô phỏng

Để khảo sát sự ảnh hưởng của tải trọng nhiệt tác dụng lên kết cấu composite lớp, ta sử dụng nguyên lý chồng chất đối với ứng suất, có dạng:

$$\begin{aligned} \sigma_x^\Sigma &= \sigma_x^i + \sigma_x^{iT}; \\ \sigma_y^\Sigma &= \sigma_y^i + \sigma_y^{iT}; \\ \tau_{xy}^\Sigma &= \tau_{xy}^i + \tau_{xy}^{iT} \end{aligned} \quad (13)$$

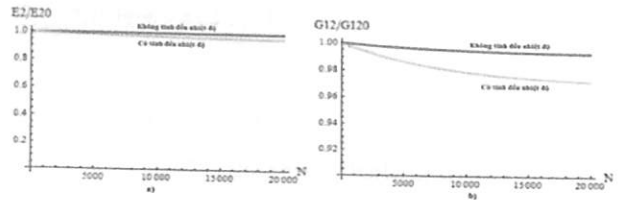
Các ứng suất nhiệt độ  $\sigma_x^{iT}$ ,  $\sigma_y^{iT}$ ,  $\tau_{xy}^{iT}$  được xác định theo [1], chúng được xem là không đổi đối với từng lớp vật liệu.

Sau đây, sẽ sử dụng các tham số của mô hình suy biến đã xác định được trong các tính toán trên để tiến hành đánh giá sự ảnh hưởng của tải trọng nhiệt.



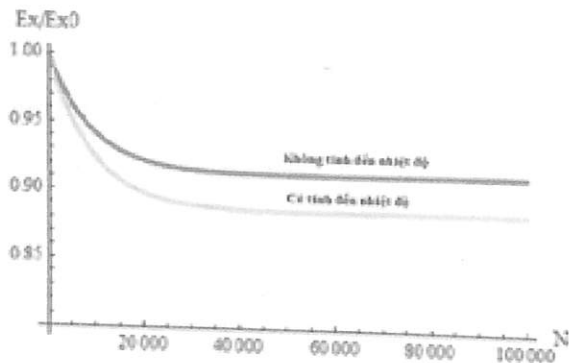
Hình 1. Sự thay đổi mô đun hiệu dụng của lớp composite với góc đặt  $[0, 90_2^o]_s$  dưới tác dụng của sự chênh lệch nhiệt độ  $\Delta = - 50^oC$ .

Kết quả tính toán mô phỏng chỉ ra rằng, khi có chịu thêm tác động của trường nhiệt độ thì giá trị mô đun hiệu dụng của kết cấu composite giảm dần và tỷ lệ thuận với giá trị tải trọng tác dụng lên kết cấu. Điều này nói lên rằng mô hình suy biến được sử dụng là phù hợp.



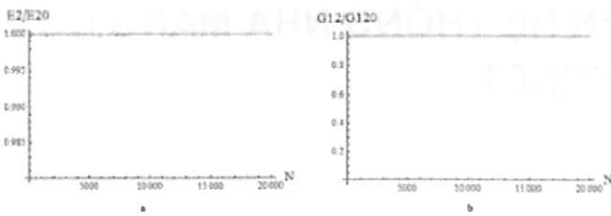
Hình 2. Sự thay đổi mô đun ngang (hình a) và mô đun trượt (hình b) của lớp composite với góc đặt  $[0, \pm 45^o]_s$  dưới tác dụng của sự chênh lệch nhiệt độ  $\Delta = - 50^oC$ .

Kết quả thu được như trên hình 2 cho thấy, sự tác động của trường nhiệt độ cũng ảnh hưởng tới sự thay đổi của mô đun ngang và mô đun trượt đối với lớp composite kiểu  $[0, 90_2^o]_s$ . Tác động đó làm tăng tốc độ suy biến các tính chất cơ học của kết cấu.



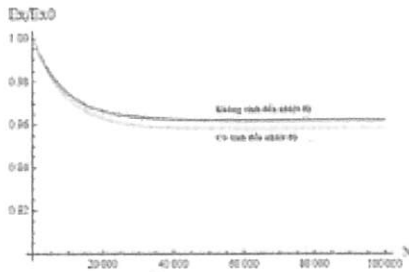
Hình 3. Sự thay đổi mô đun hiệu dụng của lớp composite với góc đặt  $[0, \pm 45^o]_s$  dưới tác dụng của sự chênh lệch nhiệt độ  $\Delta = - 50^oC$ .

Tương tự như lớp composite với góc đặt  $[0, 90_2^o]_s$ , dưới tác dụng của trường nhiệt độ lớp composite với góc đặt  $[0, \pm 45^o]_s$  các giá trị mô đun hiệu dụng của kết cấu composite giảm dần và tỷ lệ thuận với giá trị tải trọng tác dụng lên kết cấu.



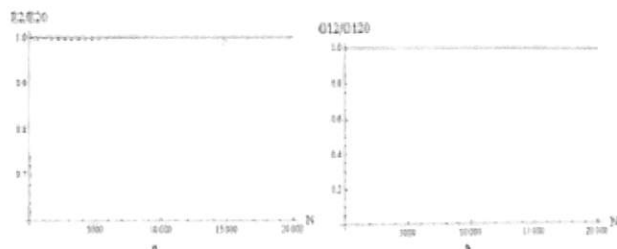
Hình 4. Sự thay đổi mô đun ngang (hình a) và mô đun trượt (hình b) của lớp composite với góc đặt  $[0, \pm 45^\circ]_s$  dưới tác dụng của sự chênh lệch nhiệt độ  $\Delta = - 50^\circ C$ .

Trên hình 4, ta thấy sự thay đổi giá mô đun ngang và mô đun trượt khi không chịu tác động nhiệt độ và khi có tác động nhiệt độ là không đáng kể, giá trị chúng xấp xỉ nhau.



Hình 5. Sự thay đổi mô đun hiệu dụng của lớp composite với góc đặt  $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$  dưới tác dụng của sự chênh lệch nhiệt độ  $\Delta = - 50^\circ C$ .

So với nhóm kết cấu composite với góc đặt  $[0, 90^\circ]_s$  và  $[0, \pm 45^\circ]_s$  thì nhóm kết cấu với góc đặt  $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$  giá trị mô đun hiệu dụng đối với hai trường hợp không chịu tác động nhiệt độ và khi chịu tác động nhiệt độ có sự chênh lệch không nhiều.



Hình 6. Sự thay đổi mô đun ngang (hình a) và mô đun trượt (hình b) của lớp composite với góc đặt  $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$  dưới tác dụng của sự chênh lệch nhiệt độ  $\Delta = - 50^\circ C$ .

Trên hình 6, ta thấy sự thay đổi giá mô đun ngang và mô đun trượt khi không chịu tác động nhiệt độ và khi có tác động nhiệt độ là không đáng kể, giá trị chúng xấp xỉ nhau.

#### 4. KẾT LUẬN

Kết quả tính toán mô phỏng chỉ ra rằng, mô hình suy biến các đặc trưng cơ học của kết cấu composite tâm được sử dụng là phù hợp. Mô hình sử dụng cho phép mô tả chính xác ứng xử kết cấu composite dưới tác dụng của tải trọng nhiệt theo chu trình.

Sự tác động của nhiệt độ theo chu trình làm suy giảm đáng kể các thông số đặc trưng của kết cấu composite được đề cập.

Kết quả đạt được là cơ sở quan trọng, hữu ích đối với quá trình tính toán, thiết kế, chế tạo và vận hành các trang thiết bị làm từ vật liệu composite tâm với góc đặt thuộc nhóm  $[0, 90^\circ]_s$ ,  $[0, \pm 45^\circ]_s$  và  $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$ . ❖

Ngày nhận bài: 08/11/2018

Ngày phản biện: 19/11/2018

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ванин, Г. А. 1985. Микромеханика композиционных материалов. Киев: Наукова думка, 302 с.
- [2]. Болотин, В. В. 1984. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композиционных материалов. Механика композиционных материалов, N2, 239-255.
- [3]. Нгуен, Д. К. 2013. Исследование влияния термоциклирования на механические свойства образцов углепластика. Международный семинар “Динамические и технологические проблемы механики конструкции и сплошных сред”. Т. 2 105 - 112.
- [4]. Rouquie, S. 2005. Thermal cycling of carbon/epoxy laminates in neutral and oxidative environments. Composites Science and Technology, 107-112.