

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ ĐẾN CHUYỂN VỊ UỐN CỦA TẤM COMPOSITE CƠ TÍNH BIẾN THIÊN

RESEARCH ON THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE BENDING DEFORMATION OF COMPOSITE PLATES WITH VARIABLE MECHANICAL PROPERTIES

Nguyễn Thanh Tùng^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2025.286>

TÓM TẮT

Các kết cấu làm bằng vật liệu cơ tính biến thiên được sử dụng phổ biến trong các thiết bị phải làm việc trong môi trường nhiệt độ, do vậy xem xét ảnh hưởng của nhiệt độ đến đáp ứng cơ học của các kết cấu này trong quá trình làm việc là một vấn đề cấp thiết đặt ra. Bài báo này phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ đến đáp ứng uốn tĩnh của tấm composite nhiều lớp làm bằng vật liệu có cơ tính biến thiên. Tấm được đặt trên nền đàn hồi hai hệ số và thỏa mãn lý thuyết biến dạng cắt kiểu mới. Phương trình cân bằng của tấm được thành lập trên cơ sở nguyên lý năng lượng toàn phần cực tiểu, trong đó công của lực nhiệt cũng được xem xét đến. Thuật toán phần tử hữu hạn được áp dụng trong bài báo này để giải quyết phương trình cân bằng vừa thiết lập. Ví dụ minh chứng sự tin cậy của bài báo được thực hiện thông qua so sánh với kết quả giải tích. Bài báo tiến hành xem xét ảnh hưởng của một số tham số đến chuyển vị uốn của kết cấu, trong đó có làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ đến chuyển vị uốn lớn nhất của tấm, từ đó đưa ra những nhận xét quan trọng, giúp các kỹ sư thiết kế có cơ sở khoa học để tham khảo lựa chọn hợp lý nhất.

Từ khóa: Nhiệt độ, nguyên lý năng lượng, phương pháp phần tử hữu hạn, uốn.

ABSTRACT

Structures made of materials with variable mechanical properties are commonly used in equipment that must operate in a temperature environment, so considering the influence of temperature on the mechanical response of these structures during operation is an urgent issue. This paper study the influence of temperature on the static bending response of multilayer composite plates made of materials with variable mechanical properties. The plate is placed on a two-factor elastic foundation and satisfies the new shear deformation theory. The equilibrium equation of the plate is established on the basis of the principle of minimum total energy, in which the work of thermal forces is also considered. The finite element algorithm is applied in this paper to solve the equilibrium equation just established. An example demonstrating the reliability of the paper is made through comparison with analytical results. The article examines the influence of some parameters on the bending displacement of the structure, including clarifying the influence of temperature on the maximum bending displacement of the plate, thereby giving important comments, helping design engineers have a scientific basis to refer to and choose the most reasonable option.

Keywords: Temperature, finite element method, principle of minimum energy, bending.

¹Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

*Email: thanh tung1106@gmail.com

Ngày nhận bài: 08/5/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu có cơ tính biến thiên là loại vật liệu mới được phát minh lần đầu nhờ các nhà khoa học Nhật Bản, nhờ sự kết hợp giữa gốm và kim loại, các kết cấu làm bằng vật

liệu có cơ tính biến thiên có nhiều ưu điểm vượt trội so với các loại vật liệu truyền thống nhờ khả năng chịu tải phức tạp, chống mài mòn, kháng nhiệt tuyệt vời,... Đây là loại vật liệu lý tưởng mà các nhà khoa học sử dụng

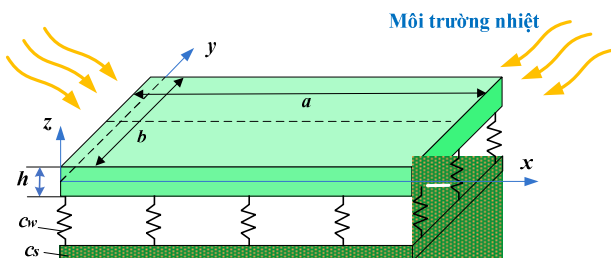
trong các sản phẩm công nghệ phải làm trong các môi trường đặc thù như vách ngăn lò phản ứng hạt nhân, vách ngăn chống các tia bức xạ, lõi của loa phụt động cơ tên lửa,...

Cũng chính vì khả năng ứng dụng to lớn trong thực tế mà nghiên cứu đáp ứng cơ học của kết cấu làm bằng vật liệu có cơ tính biến đổi đã thu hút được sự quan tâm của đông đảo các nhà khoa học. Minh và nhóm nghiên cứu [1] sử dụng phần tử dầm hai điểm nút để mô phỏng đáp ứng uốn của kết cấu nhiều lớp có liên kết chốt, các lớp được tạo ra bởi vật liệu có cơ tính biến thiên, sự sáng tạo của nghiên cứu này đã xem xét sự liên kết giữa các lớp thông qua các chốt để tránh sự trượt và bong tách giữa các lớp. Cường và các đồng nghiệp [2] cũng sử dụng lời giải mô phỏng hữu hạn để phân tích đáp ứng uốn của dầm làm bằng vật liệu cơ tính biến thiên và quay quanh một trục cố định, ảnh hưởng của vận tốc quay của dầm được chỉ ra cụ thể trong các số liệu tính toán. Các nghiên cứu [3, 4] cũng đề xuất phương pháp phần tử hữu hạn để giải quyết bài toán uốn và ổn định tĩnh của tấm có cơ tính biến thiên và có khuyết tật dạng vật liệu phân bố không liên tục. Một số công trình khác [5-7] cũng có nhiều kết quả có giá trị về ứng xử cơ học của kết cấu làm bằng vật liệu có cơ tính biến thiên.

Do các kết cấu composite có cơ tính biến đổi thường làm việc trong môi trường có nhiệt độ, nên việc tìm ra ứng xử của chúng khi có nhiệt độ là vấn đề thú vị và cần phải khám phá, vì vậy bài báo này quyết định giải quyết bài toán này bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

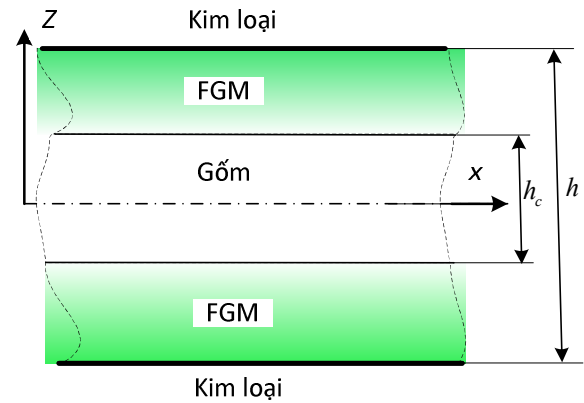
2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ LỜI GIẢI

Tấm composite có mô hình như trên hình 1, tấm được đặt trong môi trường nhiệt độ và tựa trên nền đàn hồi, đặt hệ trục Oxyz sao cho trục Oz vuông góc với tấm, Ox và Oy dọc theo các cạnh tấm. Tấm gồm các thông số hình học là a, b và chiều dày h, chiều dày lớp lõi là h_c .



Hình 1. Mô hình tấm trong môi trường nhiệt

Giả thiết tấm làm việc trong giới hạn đàn hồi, chưa có sự bong tách giữa các lớp vật liệu, mục tiêu của bài báo là tìm chuyển vị uốn của tấm nhiều lớp trong môi trường nhiệt độ.



Hình 2. Vật liệu gốm và kim loại thay đổi theo chiều dày từng lớp

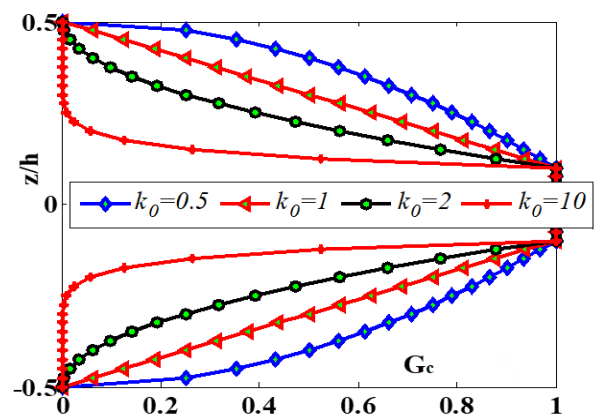
Vật liệu tấm được chia thành ba lớp riêng biệt, trong đó lớp giữa là gốm thuần nhất, hai lớp bề mặt làm từ gốm và kim loại có cơ tính biến đổi trơn liên tục. Tỷ lệ thể tích của gốm ($G_c^{(i)}$) và kim loại ($G_m^{(i)}$) trong lớp thứ i:

$$G_m^{(i)} + G_c^{(i)} = 1 \quad (1)$$

trong đó:

$$\begin{cases} G_c^{(1)} = \left(\frac{2z+h}{h-h_1} \right)^{k_0}; & -0,5h \leq z \leq -0,5h_c \\ G_c^{(2)} = 1; & -0,5h_c \leq z \leq 0,5h_c \\ G_c^{(3)} = \left(\frac{2z-h}{h_c-h} \right)^{k_0}; & 0,5h_c \leq z \leq 0,5h \end{cases} \quad (2)$$

Sự biến đổi của G_c trong từng lớp được thể hiện như trên hình 3.



Hình 3. Giá trị G_c thay đổi theo chiều dày mỗi lớp

Hai đặc trưng cơ tính cơ bản của vật liệu tại mỗi lớp có dạng:

$$\{E^{(i)}, \nu^{(i)}\} = \{E_m^{(i)}, \nu_m^{(i)}\} + \left(\{E_c^{(i)}, \nu_c^{(i)}\} - \{E_m^{(i)}, \nu_m^{(i)}\} \right) G_c^{(i)} \quad (3)$$

trong đó, E và ν là mô đun đàn hồi và hệ số Poát xng của vật liệu, chỉ số c ký hiệu cho gốm và chỉ số m ký hiệu cho kim loại.

Trường chuyển vị của tấm composite gồm hai thành phần chuyển vị trong mặt phẳng tấm và một thành phần chuyển vị vuông góc với mặt phẳng tấm có dạng:

$$\begin{cases} \{w_x, w_y\}(x, y, z) = -z \partial w_b / \{\partial x, \partial y\} - l_z \partial w_s / \{\partial x, \partial y\} \\ w_z(x, y, z) = w_b(x, y) + w_s(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

trong đó, $l_z = z - (h/\pi) \sin(z\pi/h)$. Đây là lý thuyết tấm cải tiến, có biểu thức đơn giản tính toán nhưng độ chính xác vẫn đảm bảo cho tính toán kết cấu trong thực tế.

Trên cơ sở biểu thức (1), bài báo tính được các biến dạng:

$$\boldsymbol{\beta} = z\boldsymbol{\beta}_z + l_z\boldsymbol{\beta}_f; \boldsymbol{\psi}_s = t_z\boldsymbol{\psi}_{s0} \quad (5)$$

trong đó, $\boldsymbol{\varepsilon}$ và $\boldsymbol{\psi}_s$ là véc tơ biến dạng uốn và cắt, biểu thức cụ thể:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\beta}_z &= \{\beta_{zx}, \beta_{zy}, \beta_{zxy}\}^T; \boldsymbol{\beta}_f = \{\beta_{fx}, \beta_{fy}, \beta_{fxy}\}^T; \\ \boldsymbol{\psi}_{s0} &= \{\psi_{sxz}, \psi_{syx}\}^T; \beta_{zx} = -\partial^2 w_b / \partial x^2; \beta_{zy} = -\partial^2 w_b / \partial y^2; \\ \beta_{zxy} &= -2\partial^2 w_b / \partial x \partial y; \beta_{fx} = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}; \beta_{fy} = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2}; \quad (6) \\ \beta_{fxy} &= -2\partial^2 w_s / \partial x \partial y; \psi_{sxz} = \partial w_s / \partial x; \\ \psi_{syx} &= \partial w_s / \partial y; l_z = 1 - dt_s / dz \end{aligned}$$

Trường ứng suất trong lớp thứ i:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_{xy} \end{Bmatrix}^i &= \frac{E_i}{1-\nu_i^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_i & 0 \\ \nu_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_i)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{Bmatrix}^i = \mathbf{G}_b^i \boldsymbol{\beta}^i \\ \begin{Bmatrix} \theta_{xz} \\ \theta_{yz} \end{Bmatrix}^i &= \frac{E_i}{2(1-\nu_i)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_{xz} \\ \psi_{yz} \end{Bmatrix}^i = \mathbf{G}_s^i \boldsymbol{\psi}^i \end{aligned} \quad (7)$$

Trường nội lực của tấm nhiều lớp:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_{xy} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_{xy} \end{bmatrix} \end{Bmatrix} &= \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_b^i \begin{Bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{Bmatrix}^i [z, l_z] dz \\ &= [\mathbf{A}_z, \mathbf{B}_f] \boldsymbol{\varepsilon}_z + [\mathbf{B}_f, \mathbf{D}_f] \boldsymbol{\varepsilon}_f \\ \begin{Bmatrix} T_{xz} \\ T_{yz} \end{Bmatrix}^i &= \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_s^i \begin{Bmatrix} \psi_{xz} \\ \psi_{yz} \end{Bmatrix}^i dz = \mathbf{A}_s \boldsymbol{\psi}_{s0} \end{aligned} \quad (8)$$

với

$$\{\mathbf{A}_z, \mathbf{B}_f, \mathbf{D}_f\} = \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_b^i \{z^2, z l_z, l_z^2\} dz; \mathbf{A}_s = \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_s^i t_z dz \quad (9)$$

Nguyên lý năng lượng toàn phần cực tiểu được bài báo áp dụng để tìm phương trình cân bằng cho tấm trong môi trường nhiệt:

$$\delta(\Phi_{tam} + \Phi_{nen} + \Phi_{luc}) = 0 \quad (10)$$

với Φ_{tam} , Φ_{nen} , Φ_{luc} lần lượt là năng lượng biến dạng của tấm, năng lượng biến dạng của nền và công của lực cơ và lực nhiệt tác dụng lên tấm.

Năng lượng biến dạng của tấm composite nhiều lớp:

$$\begin{aligned} \Phi_{tam} &= \frac{1}{2} \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \int_S \left((\varphi_x)^i (\beta_x)^i + (\varphi_y)^i (\beta_y)^i \right. \\ &\quad \left. + (\varphi_{xy})^i (\beta_{xy})^i + (\theta_{xz})^i (\psi_{xz})^i \right. \\ &\quad \left. + (\theta_{yz})^i (\psi_{yz})^i \right) dz dS \\ &= \frac{1}{2} \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \int_S \left(-L_x \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - R_x \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} - L_y \frac{\partial^2 w_b}{\partial y^2} \right. \\ &\quad \left. - R_y \frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2} - 2L_{xy} \frac{\partial^2 w_b}{\partial x \partial y} \right. \\ &\quad \left. - 2R_{xy} \frac{\partial^2 w_b}{\partial x \partial y} + T_{xz} \frac{\partial w_s}{\partial x} + T_{yz} \frac{\partial w_s}{\partial y} \right) dz dS \end{aligned} \quad (11)$$

Năng lượng biến dạng của nền đàn hồi:

$$\Phi_{nen} = \int_S \left(c_w w_z + c_s \left(\left(\frac{\partial w_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} \right)^2 \right) \right) dS \quad (12)$$

với c_w và c_s là hai tham số độ cứng của nền đàn hồi.

Công sinh ra do tải trọng cơ và nhiệt sinh ra:

$$\begin{aligned} \Phi_{luc} &= \int_S Q w_z dS - \int_S N_{nhiet} \left(\left(\frac{\partial w_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} \right)^2 \right) dS \\ &= \int_S Q (w_b + w_s) dS - \int_S N_{nhiet} \left(\left(\frac{\partial w_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} \right)^2 \right) dS \end{aligned} \quad (13)$$

với Q là ngoại lực vuông góc với mặt phẳng tấm và N_{nhiet} là lực nhiệt phát sinh do ảnh hưởng của nhiệt độ:

$$N_{nhiet} = \sum_{i=1}^3 \int_{h_i}^{h_{i+1}} E^{(i)} \alpha^{(i)} \Delta T dz \quad (14)$$

trong đó, ΔT là sự chênh lệch giữa nhiệt độ môi trường so với nhiệt độ không phát sinh ứng suất của vật liệu.

Kết hợp giữa các biểu thức từ (11) - (13) và phương trình (10), sau một số phép biến đổi, hai phương trình cân bằng theo hai biến thu được:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial L_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 L_y}{\partial y^2} + c_w w_z + c_s \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} \right) \\ - N_{nhiet} \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} \right) + Q = 0 \\ \frac{\partial^2 R_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial R_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 R_y}{\partial y^2} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} \\ + c_w w_z + c_s \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} \right) - N_{nhiet} \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} \right) + Q = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Như vậy phương trình (15) là phương trình cân bằng của tấm nhiều lớp, sự khác biệt so với tấm thông thường là nhiệt độ đã xuất hiện trong phương trình này, điều này cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ đã được thể hiện. Bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn với lưới chia gồm các phần tử bốn nút, véc tơ chuyển vị nút có dạng:

$$\mathbf{n}_e = \sum_{i=1}^4 \left\{ \begin{matrix} w_{bi}, w_{si}, (\partial w_b / \partial x)_i, (\partial w_s / \partial x)_i \\ (\partial w_b / \partial y)_i, (\partial w_s / \partial y)_i \end{matrix} \right\}^T \quad (16)$$

Thế (16) vào (6), lúc này (15) có dạng ma trận:

$$\sum_e (\mathbf{Y}_e + \mathbf{Y}_e^{\text{nen}} - \mathbf{Y}_e^{\text{nhiet}}) \sum_e \mathbf{n}_e = \sum_{i=1} \mathbf{Q}_e \quad (17)$$

Cuối cùng chuyển vị uốn của tấm nhiều lớp có dạng:

$$\mathbf{n} = \sum_e (\mathbf{Y}_e + \mathbf{Y}_e^{\text{nen}} - \mathbf{Y}_e^{\text{nhiet}}) \sum_{i=1} \mathbf{Q}_e \quad (18)$$

3. TÍNH TOÁN SỐ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Chứng minh sự tin cậy

Tấm composite một lớp được chế tạo từ gốm và kim loại chịu tải trọng phân bố đều và phân bố hình sin với cường độ là Q . Tấm vuông với cạnh là a , chiều dày tấm là h thỏa mãn $a/h = 10$, các tham số vật liệu của gốm và kim loại $E_c = 380\text{GPa}$, $E_m = 70\text{GPa}$, $\nu_c = \nu_m = 0,3$, tấm chịu uốn khi chịu tác dụng của ngoại lực và chuyển vị tại giữa tấm được chuẩn hóa $D_w^* = 10w_{\max}h^3E_c/Qa^4$, kết quả tính toán được so sánh như trong bảng 1, trong đó các số liệu ở dòng thứ 3 được thực hiện bằng lời giải chính xác [5]. Các số liệu so sánh cho thấy có sự tương đồng giữa kết quả của bài báo và kết quả đã công bố, điều này chứng minh sự tin cậy của lý thuyết tính toán đã thiết lập.

Bảng 1. Sự so sánh chuyển vị lớn nhất của tấm composite chịu hai loại tải trọng khác nhau

Nguồn	Tải trọng phân bố đều			Tải trọng hình sin		
	$k_0 = 0$	$k_0 = 1$	$k_0 = 2$	$k_0 = 0$	$k_0 = 1$	$k_0 = 2$
Bài báo	0,46	0,92	1,18	0,29	0,58	0,75
Lời giải chính xác [5]	0,46	0,92	1,19	0,29	0,58	0,75

3.2. Tính toán số và thảo luận

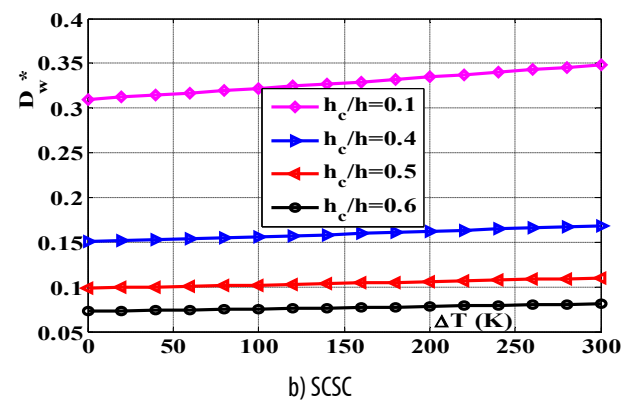
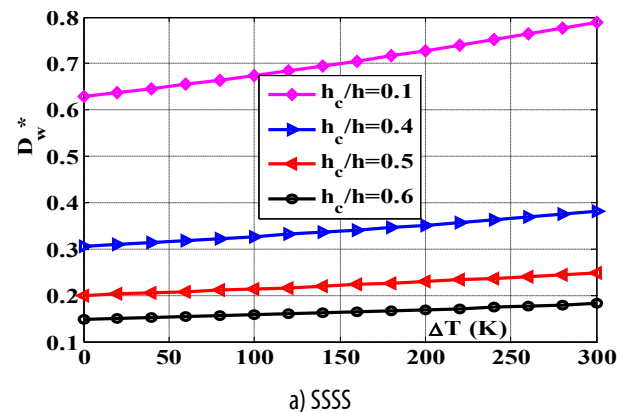
Tấm gồm ba lớp có tỷ lệ chiều dày các lớp có thể thay đổi được thông qua điều chỉnh tham số h_c sao cho giá trị của tỷ lệ h_c/h biến đổi từ 0 đến 0,8. Vật liệu tấm được tạo ra từ gốm là nhôm ô xít Al_2O_3 và kim loại là Ni có các đặc trưng vật liệu $E_c = 390\text{GPa}$; $\nu_c = 0,23$; $\alpha_c = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$; $E_m = 203\text{GPa}$; $\nu_m = 0,31$; $\alpha_m = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Tấm có chiều dài hai cạnh bằng nhau $a = b = 0,5 \text{ m}$, chiều dày $h = a/10$. Thông số khảo sát là chuyển vị tại vị trí giữa tấm ($x = a/2$,

$y = b/2$) và dọc theo vị trí $y = b/2$ với công thức $D_w^* = 100w_z h^3 E_c / \text{Pa}^4$.

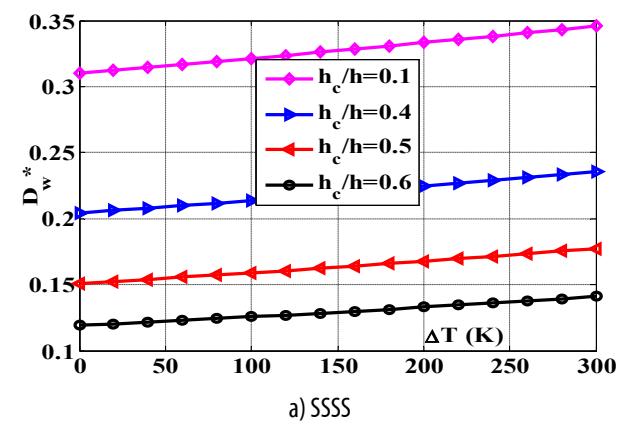
- Ảnh hưởng của nhiệt độ: Hình 4, 5 thể hiện sự biến đổi của chuyển vị lớn nhất tại giữa tấm phụ thuộc vào nhiệt độ, các kết quả tính toán này thể hiện:

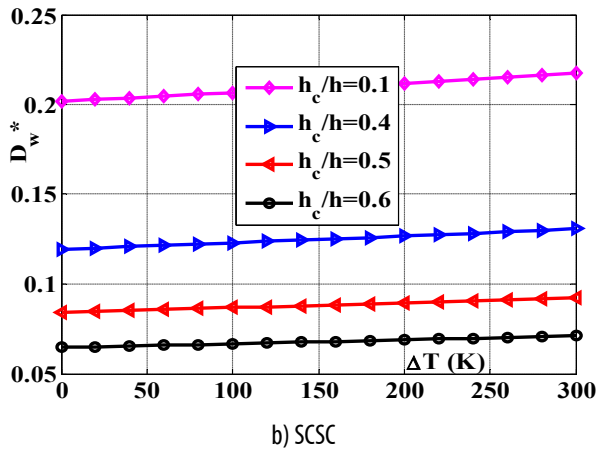
+ Khi nhiệt độ tăng lên, chuyển vị lớn nhất của tấm composite tăng lên, với tấm có tỷ lệ $h_c/h = 0,1$ thì chuyển vị tăng mạnh khi nhiệt độ tăng. Điều này là do tỷ lệ kim trong kim loại nhiều, nên tấm mềm hơn.

+ Trong trường hợp có nền đàn hồi, độ cứng của kết cấu được tăng cường thêm độ cứng của nền, do đó làm cho chuyển vị của tấm giảm xuống.



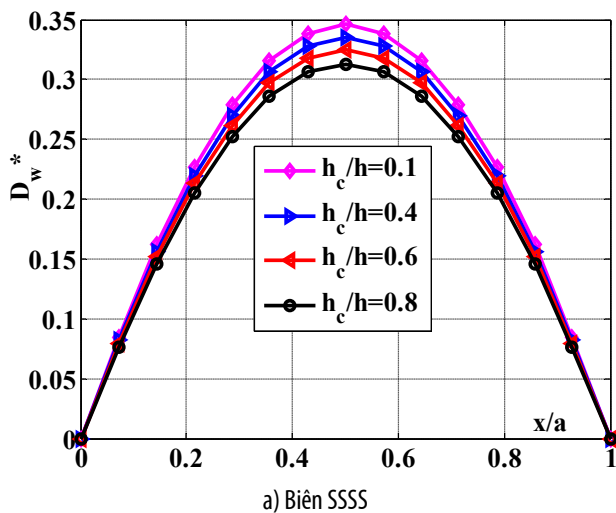
Hình 4. Chuyển vị tại giữa tấm phụ thuộc nhiệt độ trong trường hợp không nền đàn hồi, $C_w = 0$; $C_s = 0$; $k_0 = 0,5$



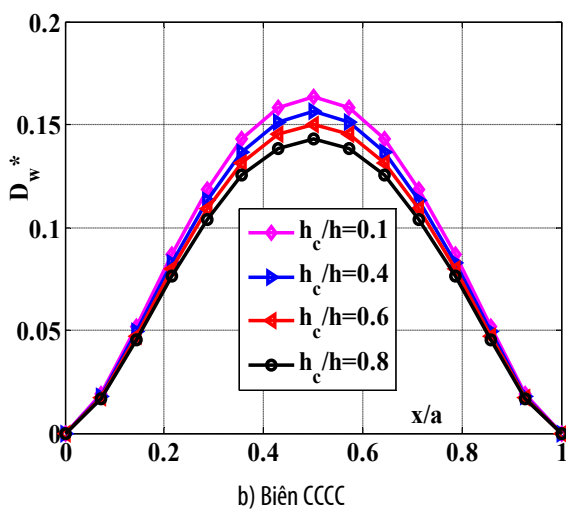


Hình 5. Chuyển vị tại giữa tấm phụ thuộc nhiệt độ trong trường hợp có nền đàn hồi, $C_w = 100$; $C_s = 10$; $k_0 = 0,5$

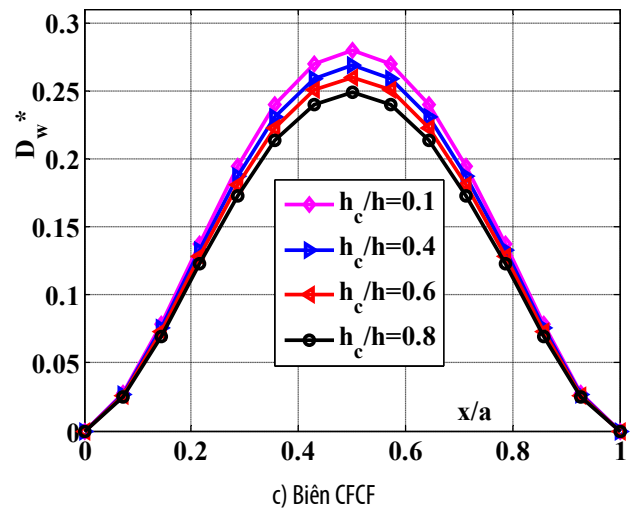
- Ảnh hưởng của chiều dày lớp lõi: để xem xét ảnh hưởng của chiều dày lớp lõi đến đáp ứng uốn của tấm, bài báo cho giá trị của tỷ lệ h_c/h tăng dần từ 0,1 đến 0,8, kết quả tính toán chuyển vị tại đường giữa tấm ba lớp với bốn điều kiện biên khác nhau được chỉ ra trong hình 6, kết quả tính toán này chứng tỏ:



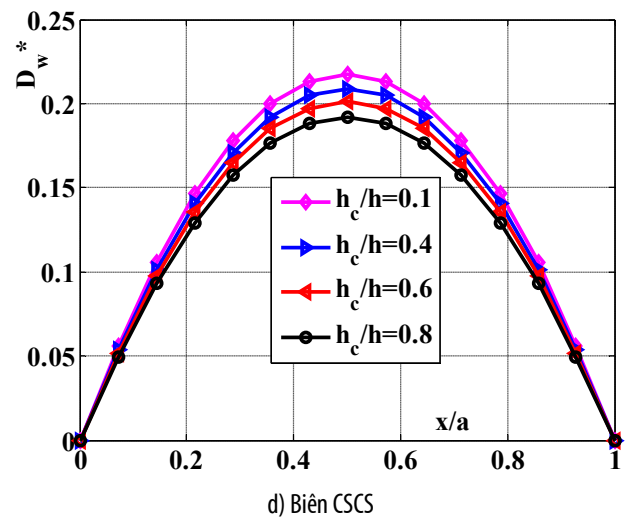
a) Biên SSSS



b) Biên CCCC



c) Biên CFCF



d) Biên CSCS

Hình 6. Chuyển vị tại giữa tấm tại bốn điều kiện biên khác nhau, $C_w = 100$; $C_s = 10$; $k_0 = 0,5$; $\Delta T = 300K$

+ Khi tăng giá trị của tỷ lệ h_c/h thì chuyển vị của tấm composite giảm xuống, điều này có được là do khi tỷ lệ h_c/h tăng lên, tức là chiều dày lớp lõi tăng lên, làm cho hàm lượng gốm trong tấm tăng lên, điều này dẫn đến độ cứng của tấm tăng lên, do vậy chuyển vị của tấm giảm xuống.

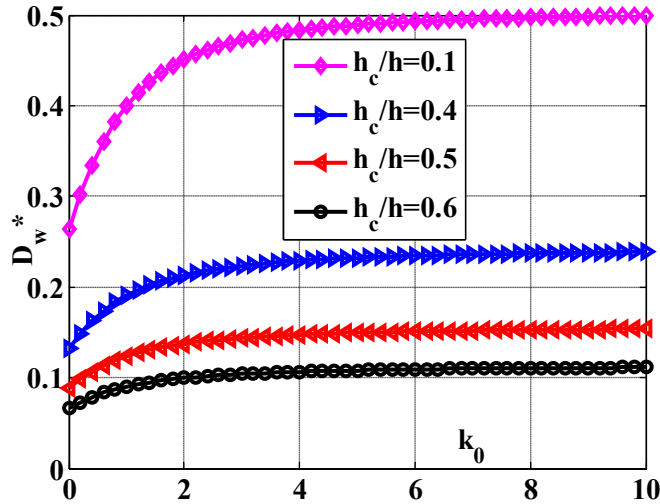
+ Tấm có chuyển vị lớn nhất trong trường hợp có bốn cạnh tựa đơn - SSSS và tấm có chuyển vị nhỏ nhất tương ứng với trường hợp có bốn cạnh bị ngàm - CCCC. Thêm vào đó, điều kiện biên khác nhau cũng làm quy luật biến đổi của độ võng dọc theo chiều dài tấm cũng khác nhau.

- Ảnh hưởng của tỷ lệ thành phần vật liệu: thay đổi số mũ k_0 sao cho giá trị của nó biến đổi từ 0 đến 10, kết quả tính toán chuyển vị lớn nhất tại giữa tấm được thể hiện trên hình 7, 8, các kết quả này thể hiện:

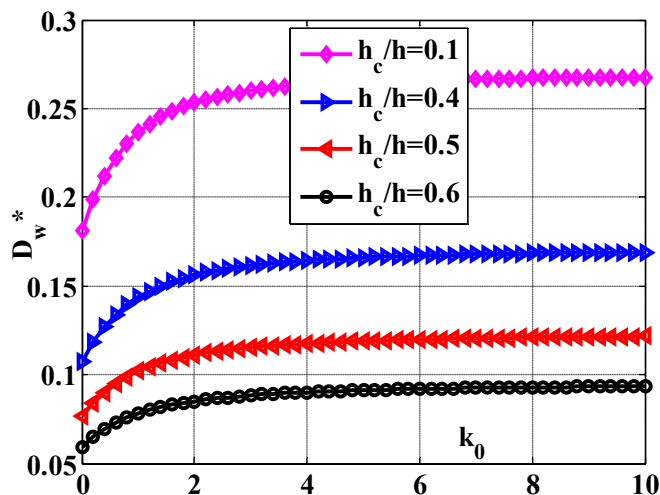
+ Khi số mũ thể tích k_0 tăng lên thì chuyển vị của tấm cũng tăng, điều này có được là do tỷ lệ thành phần vật liệu kim loại trong tấm tăng lên. Ngoài ra, sự tăng lên của

chuyển vị không đồng đều khi tăng số mũ k_0 , sự tăng mạnh chỉ diễn ra khi số mũ k_0 tăng trong khoảng từ 0 đến 2.

+ Khi tỷ lệ chiều dày lớp lõi càng lớn, thì sự tăng lên của chuyển vị không nhiều khi số mũ thể tích k_0 tăng lên. Nền đàn hồi cũng góp phần làm giảm chuyển vị của tấm.



Hình 7. Chuyển vị tại giữa tấm phụ thuộc số mũ k_0 trong trường hợp không có nền đàn hồi, $K_w = 0$; $K_s = 0$; $b/a = 1$; CSCS; $\Delta T = 300K$



Hình 8. Chuyển vị tại giữa tấm phụ thuộc số mũ k_0 trong trường hợp có nền đàn hồi, $K_w = 100$; $K_s = 10$; $b/a = 1$; CSCS; $\Delta T = 300K$

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ đến đáp ứng uốn của tấm composite ba lớp chịu tác dụng của đồng thời tải trọng cơ và nhiệt. Tấm composite được tạo ra từ gốm và kim loại tại hai lớp bề mặt, lớp giữa chỉ có gốm, tấm tựa trên nền đàn hồi hai hệ số. Trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn, bài báo đã giải quyết trọn vẹn cách giải bài toán uốn của tấm nhiều lớp, trong đó lý thuyết biến dạng cắt kiểu mới cũng đã được tính đến. Bài

báo đã thể hiện sự tin cậy thông qua sự so sánh với các kết quả đã công bố, từ đó khảo sát ảnh hưởng của nhiều tham số khác nhau đến chuyển vị uốn của tấm này, đặc biệt là bài báo đã chỉ ra ảnh hưởng của nhiệt độ đến chuyển vị uốn của tấm composite. Điều này làm tăng khả năng ứng dụng của vật liệu composite có cơ tính biến đổi trong các thiết bị làm việc trong môi trường nhiệt độ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. V. Vuong, "Nghiên cứu uốn tĩnh của tấm FGM có vật liệu phân bố không liên tục," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 61 (5A), 94-99, 2024
- [2]. D. V. Vuong, "Nghiên cứu ổn định của tấm FGM có vật liệu phân bố không liên tục," *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, 327, 78-84, 2025.
- [3]. P.V. Minh, N. D. Anh, D. V. Thom, D. X. Kien, "Finite element modeling to explore static bending responses of four-layer FG beam structures considering sliding motions," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 60 (3), 218-233, 2025.
- [4]. B. M. Cuong, T. Abdelouahed, D. V. Thom, T. HV. Nguyen, P.V. Minh, "Finite element modelling for the static bending response of rotating FG-GPLRC beams with geometrical imperfections in thermal mediums," *Computers and Concrete*, 33 (1), 91-102, 2024.
- [5]. A. M. Zenkour, "Generalized shear deformation theory for bending analysis of functionally graded plates," *Applied Mathematical Modelling*, 30 (1), 67-84, 2009.
- [6]. T. D. Pham, Q. H. Pham, V. D. Phan, H. N. Nguyen, V. T. Do, "Free vibration analysis of functionally graded shells using an edge-based smoothed finite element method," *Symmetry*, 11 (5), 684, 2019.
- [7]. T. V. Ke, P. V. Minh, N. T. Dung, L. M. Thai, D.V. Thom, "Flexoelectric effect on bending and free vibration behaviors of piezoelectric sandwich FGP nanoplates via nonlocal strain gradient theory," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12 (4), 6567-6596, 2024.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Thanh Tung

Institute of Technology, General Department of Defense Industry, Vietnam