

DAO ĐỘNG CỦA DẦM CÓ CƠ TÍNH BIẾN THIÊN TRONG MÔI TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ CAO DƯỚI TÁC DỤNG CỦA LỰC ĐIỀU HÒA DI ĐỘNG

Bùi Văn Tuyên¹, Nguyễn Đình Kiên²

Tóm tắt: Trong bài báo này, dao động của dầm đơn giản có cơ tính biến thiên (FGM) trong môi trường nhiệt độ cao chịu kích động của lực điều hòa di động được nghiên cứu bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Dầm giả thiết được tạo từ hai vật liệu thành phần là gốm và kim loại với các tính chất của vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ. Trên cơ sở lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, phương trình chuyển động cho dầm được thiết lập từ nguyên lý biến phân Hamilton. Đáp ứng động lực học của dầm được tính bằng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark. Kết quả số đã chỉ rõ ảnh hưởng của nhiệt độ, tham số vật liệu, tần số kích động và vận tốc của lực di động đến dao động của dầm.

Từ khóa : Dầm FGM, nhiệt độ cao, dao động, lực điều hòa di động, phần tử hữu hạn.

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu có cơ tính biến thiên (FGM) được phát minh vào năm 1984, là loại composit mới được tạo từ hai hay nhiều vật liệu thành phần, thường là gốm và kim loại, với tỷ lệ thể tích của vật liệu thành phần thay đổi liên tục theo một hoặc vài hướng không gian mong muốn. Các tính chất hiệu dụng của FGM thay đổi liên tục, vì thế FGM tránh được các nhược điểm của vật liệu composit truyền thống như sự tách lớp và tập trung ứng suất. Nhờ sự kết hợp giữa khả năng chịu nhiệt tốt của gốm và sự bền của thép, FGM có tiềm năng ứng dụng cao trong nhiều ngành công nghiệp cao như hàng không vũ trụ, đóng tàu, ô tô, xây dựng, đồ gia dụng... Đặc biệt FGM có thể sử dụng trong các môi trường khắc nghiệt như nhiệt độ cao, chịu mài mòn và axit...

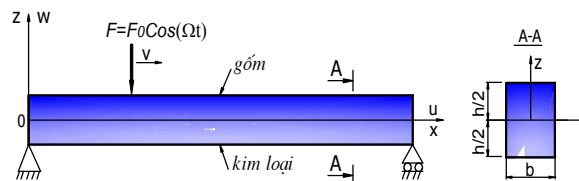
Theo hiểu biết của các tác giả, chưa có công bố nào về dao động của dầm FGM trong môi trường nhiệt độ cao chịu kích động của lực điều hòa di động, và đề tài này được quan tâm nghiên cứu trong bài báo này. Cụ thể, trên cơ sở lý thuyết dầm Euler-Bernoulli và phương pháp phần tử hữu hạn, các tác giả sẽ tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đến đáp ứng động

lực học của dầm FGM đơn giản. Phương trình chuyển động cho dầm được thiết lập dựa vào nguyên lý Hamilton. Đáp ứng động lực học được tính toán với sự trợ giúp của phương pháp tích phân trực tiếp Newmark. Ảnh hưởng của các tham số vật liệu và lực di động tới ứng xử động lực học của dầm được khảo sát chi tiết.

2. XÂY DỰNG CÔNG THỨC

2.1. Các phương trình cơ bản

Xét dầm FGM đơn giản với chiều dài L , chiều cao h , chiều rộng b trong hệ trục tọa độ (x, z) như minh họa trên hình 1. Dầm chịu kích động của một lực điều hòa $F=F_0\cos(\Omega t)$, di chuyển từ đầu trái sang đầu phải với vận tốc không đổi v .



Hình 1. Dầm FGM

Giả thiết dầm được làm từ hai vật liệu thành phần là gốm và kim loại với tỷ lệ thể tích của gốm (V_c) và kim loại (V_m) thay đổi theo chiều cao của dầm theo quy luật hàm số mũ.

¹ Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

² Viện Cơ học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

$$V_c = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n, \quad V_c + V_m = 1, \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (1)$$

Tính chất hiệu dụng (môđun đàn hồi E, hệ số Poisson u, hệ số giãn nở nhiệt $\alpha...$) được đánh giá qua mô hình Voigt có dạng

$$P(z) = (P_c - P_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n + P_m \quad (2)$$

Trong đó: n là tham số vật liệu, xác định sự phân bố của các vật liệu thành phần; chỉ số ‘ c ’ và ‘ m ’ dùng để chỉ pha gốm và pha kim loại; P_c, P_m tương ứng là tính chất của gốm và kim loại (môđun đàn hồi E, hệ số Poisson u, hệ số giãn nở nhiệt $\alpha...$) phụ thuộc vào nhiệt độ T(K) được xác định (Touloukian, 1967).

$$P = P_0 (P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (3)$$

Trong đó: P_0, P_{-1}, P_1, P_2 và P_3 là các hệ số dùng để xác định tính chất của vật liệu trong môi trường nhiệt độ

Theo lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, chuyển vị của một điểm bất kỳ trên dầm, u_1 và u_3 , theo các phương x, z cho bởi

$$u_1(x, z, t) = u(x, t) - zw_{,x}(x, t) \quad (4)$$

$$u_3(x, z, t) = w(x, t)$$

Trong đó: $u(x, t)$ và $w(x, t)$ tương ứng là chuyển vị theo phương x và z của một điểm nằm trên mặt giữa của dầm. Biến dạng và ứng suất dọc trục là:

$$\varepsilon_x = u_{,x} - zw_{,xx} \quad (5)$$

$$\sigma_x = E(z, T)\varepsilon_x \quad (6)$$

Năng lượng biến dạng đàn hồi của dầm là:

$$U_p = \frac{1}{2} \int_0^L [A_{11}u_{,x}^2 - 2A_{12}u_{,x}w_{,xx} + A_{22}w_{,xx}^2] dx \quad (7)$$

Năng lượng biến dạng do tăng nhiệt độ xác định theo (Mahi, nnk 2010):

$$U_t = \frac{1}{2} \int_0^L N_T w_{,xx}^2 dx \quad (8)$$

Tổng năng lượng biến dạng của dầm là:

$$U = U_p + U_t \quad (9)$$

Trong các phương trình (7) và (8) thì A_{11}, A_{12}, A_{22} tương ứng là độ cứng dọc trục, độ cứng tương hỗ giữa uốn-dọc trục và độ cứng chống uốn; N_T là lực dọc trục sinh ra do tăng nhiệt độ. Các đại lượng này được định nghĩa như sau.

$$(A_{11}, A_{12}, A_{22}) = \int_A E(z, T)(1, z, z^2) dA, \quad N_T = - \int_A E(z, T)\alpha(z, T)N dA \quad (10)$$

Động năng của dầm là:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L [I_{11}(\dot{u}^2 + \dot{w}^2) - I_{12}\dot{u}\dot{w}_{,x} + I_{22}\dot{w}_{,x}^2] dx \quad (11)$$

Trong đó I_{11}, I_{12}, I_{22} tương ứng là các mô men khối lượng được xác định bởi.

$$(I_{11}, I_{12}, I_{22}) = \int_A \rho(z, T)(1, z, z^2) dA \quad (12)$$

Thế năng của lực điều hòa di động được cho dưới dạng đơn giản là:

$$V = -F_0 \cos(\Omega t)w(x)\delta(x - vt) \quad (13)$$

Trong đó: F_0 là biên độ của lực, Ω là tần số kích động của lực, $\delta(\cdot)$ là hàm Dirac delta, x là tham số tọa độ tính từ đầu trái của dầm, v là vận tốc của lực. Áp dụng nguyên lý Hamilton ta có thể viết phương trình vi phân chuyển động của dầm không xét đến các lực cản.

$$I_{11}\ddot{u} - I_{12}\dot{w}_{,x} - A_{11}u_{,xx} + A_{22}w_{,xxx} + N_T w_{,xx} = 0 \quad (14)$$

$$I_{11}\ddot{w} + I_{12}\ddot{u}_{,x} - I_{22}\dot{w}_{,x} - A_{12}u_{,xxx} + A_{22}w_{,xxxx} = F_0 \cos(\Omega t)\delta(x - vt)$$

2.2. Công thức phần tử hữu hạn

Để giải hệ phương trình (14) ta dùng phương pháp phần tử hữu hạn. Giả sử dầm được chia thành một số phần tử hai nút (i, j) có chiều dài là l . Véc tơ chuyển vị nút của một phần tử, \mathbf{d} , là

$$\mathbf{d} = \{u_i \quad w_i \quad \theta_i \quad u_j \quad w_j \quad \theta_j\}^T \quad (15)$$

Trong đó: Chỉ số ‘‘ T ’’ sử dụng để chỉ chuyển vị của một vectơ hoặc ma trận; u_i, w_i, θ_i tương ứng là chuyển vị dọc trục, chuyển vị theo phương ngang và góc xoay của nút i ; u_j, w_j, θ_j tương ứng là chuyển vị dọc trục, chuyển vị theo phương ngang và góc xoay của nút j . Chuyển vị dọc trục u và chuyển vị ngang w được biểu diễn qua chuyển vị nút là:

$$u = \mathbf{N}_u^T \mathbf{d}, \quad w = \mathbf{N}_w^T \mathbf{d} \quad (16)$$

Trong đó \mathbf{N}_u và \mathbf{N}_w tương ứng là các ma trận hàm dạng của u và w . Thay (16) vào các phương trình (8), (9), (11) ta có thể biểu diễn các biểu thức năng lượng dưới dạng sau đây

$$U_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{d}^T \mathbf{k}_p \mathbf{d} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{d}^T (\mathbf{k}_{uu} + \mathbf{k}_{uw} + \mathbf{k}_{ww}) \mathbf{d} \quad (17)$$

$$U_t = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{d}^T \mathbf{k}_T \mathbf{d} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{d}^T \mathbf{k}_{ww}^T \mathbf{d}$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{d}^T \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{d}^T (\mathbf{m}_{uu} + \mathbf{m}_{ww} + \mathbf{m}_{u\theta} + \mathbf{m}_{\theta\theta}) \dot{\mathbf{d}}$$

Trong phương trình (17), \mathbf{k}_{uu} , \mathbf{k}_{uw} , \mathbf{k}_{ww} lần lượt là ma trận độ cứng dọc trục, ma trận độ cứng tương hỗ giữa dọc trục và chống uốn, ma trận độ cứng chống uốn; \mathbf{k}_{ww}^T là ma trận độ cứng sinh ra từ việc tăng nhiệt độ; \mathbf{m}_{uu} , \mathbf{m}_{ww} , \mathbf{m}_{uq} , \mathbf{m}_{qq} , lần lượt là ma trận khối lượng nhất quán sinh ra từ chuyển dịch dọc trục; chuyển vị ngang; tương tác giữa chuyển vị dọc trục - góc quay và góc quay của tiết diện ngang. Ma trận độ cứng và ma trận khối lượng nhất quán tổng thể của dầm \mathbf{K} , \mathbf{M} có được từ việc ghép nối các ma trận phần tử.

Phương trình dao động của dầm dưới dạng công thức phần tử hữu hạn là:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{K}\mathbf{D} = \mathbf{F}_{\text{ex}} \quad (18)$$

Trong công thức trên véc tơ lực nút \mathbf{F}_{ex} được biểu diễn dưới dạng.

$$\mathbf{F}_{\text{ex}} = \{000 \dots 0 \dots 0 F_{N1} F_{N2} 0 F_{N3} F_{N4} \dots 0 \dots 000\}^T \quad (19)$$

Trong đó các số hạng khác không thể hiện phần tử có lực tác dụng, còn các phần tử không có lực tác dụng bằng 0. Dùng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark để giải phương trình trên. Trong nghiên cứu này, dùng phương pháp gia tốc trung bình trong họ các phương pháp Newmark vì phương pháp này ổn định không điều kiện (Geradin và Rixen, 1997).

2.3. Các trường hợp tăng nhiệt độ

2.3.1. Nhiệt độ tăng đều (UTR):

Dầm ban đầu ở trạng thái tự do với nhiệt độ phòng ($T_0=300\text{K}$). Nhiệt độ được giả thiết tăng đều cả mặt trên và mặt dưới với lượng tăng là ΔT theo chiều cao của dầm $\Delta T=T-T_0$

2.3.2. Nhiệt độ tăng tuyến tính (LTR):

Giả thiết một dầm đặt trong môi trường nhiệt độ với mặt trên (giàu gốm) có nhiệt độ là T_c và mặt dưới (giàu kim loại) có nhiệt độ phòng là T_m . Nhiệt độ phân bố theo chiều dày của dầm là hàm tuyến tính (Ebrahimi, nnk 2015)

$$T = T_m + \Delta T \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \quad \text{Với } \Delta T = T_c - T_m \quad (20)$$

2.3.3. Nhiệt độ tăng phi tuyến (NLTR):

Trong một số trường hợp, trường nhiệt độ phân bố theo chiều dày của dầm là hàm phi tuyến của tọa độ z . Trường nhiệt độ phi tuyến

nhận được từ lời giải phương trình truyền nhiệt Fourier với ràng buộc là nhiệt độ tại mặt trên của dầm ($z=h/2$) là T_c và tại mặt dưới ($z=-h/2$) là T_m . Cụ thể, phương trình truyền nhiệt Fourier cho bởi công thức

$$-\frac{d}{dz} \left[\kappa(z, T) \frac{dT}{dz} \right] = 0; \quad T\left(\frac{h}{2}\right) = T_c; T\left(-\frac{h}{2}\right) = T_m \quad (21)$$

Giải phương trình (21) cho kết quả

$$T = T_m + \Delta T \frac{\int_{-h/2}^z \frac{1}{\kappa(z, T)} dz}{\int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{\kappa(z, T)} dz} \quad \text{với } \Delta T = T_c - T_m \quad (22)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Xét dầm đơn giản được tổ hợp từ hai vật liệu thành phần là thép không gỉ (SUS304) và nhôm ôxit (Al_2O_3). Các hệ số phụ thuộc vào nhiệt độ của SUS304 và Al_2O_3 được lấy từ (Mahi, nnk 2010). Tham số hình học cho dầm: $L=20\text{m}$, $h=1\text{m}$, và $b=0.5\text{m}$. Biên độ của lực di động $F_0=100\text{kN}$. Bước thời gian sử dụng cho phương pháp Newmark là $\Delta t = DT/n\text{STEP}$, trong đó $DT=L/v$ là tổng thời gian để lực đi hết chiều dài dầm và $n\text{STEP}$ là số bước thời gian, được lấy bằng 500 trong nghiên cứu này. Vận tốc v thay đổi từ 0-300m/s với bước thay đổi là 1m/s. Dầm được chia thành 20 phần tử. Điều kiện biên cho dầm đơn giản là điều kiện về chuyển vị: tại $x=0$, $u_1, u_3=0$; tại $x=L$, $u_3=0$. Lực bắt đầu di chuyển từ đầu trái ($x=0, t=0$) sang đầu phải của dầm với vận tốc không đổi.

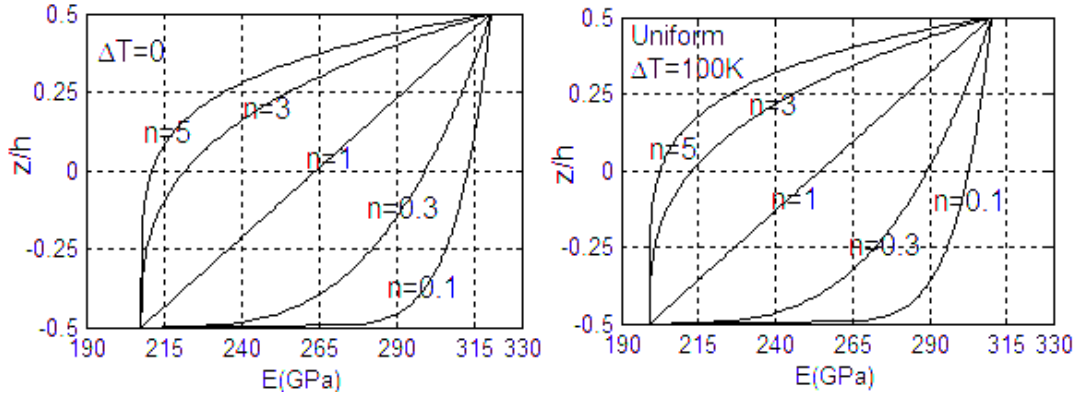
Hình 2 cho ta bức tranh về sự thay đổi của môđun đàn hồi theo chiều cao của dầm trong trường hợp nhiệt độ phòng và nhiệt độ tăng đều $\Delta T=100\text{K}$. Hình 2 cho thấy khi nhiệt độ tăng lên thì môđun đàn hồi giảm đi với bất cứ giá trị nào của tham số vật liệu n . Bảng 1 so sánh tham số tần số của dầm nhận được trong nghiên cứu này với các giá trị khác nhau của n và nhiệt độ với kết quả của (Ebrahimi, nnk 2015). Tham số tần số μ được định nghĩa như sau:

$$\mu = \frac{\omega_1 L^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}} \quad (23)$$

Trong đó: v_1 là tần số cơ bản của dầm; r_m và E_m lần lượt là khối lượng riêng và môđun đàn

hồi của thép ở 300K. Phương trình (18) với véc tơ lực nút $F_{ex}=0$ khi đó dầm dao động tự do. Dao động tự do của dầm có thể biểu diễn dưới dạng $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0}$. Giải phương trình này ta nhận được các tần số dao động tự do (ν) của dầm. Trong các tần số đó tần số thấp nhất khác 0 là tần số cơ bản của dầm. Bảng 1 cho

thấy tần số nhận được trong nghiên cứu này rất gần với kết quả tính bằng giải tích của (Ebrahimi, nnk 2015). Như vậy, tính đúng đắn và tính chính xác của các công thức trong bài báo này được khẳng định và có thể dùng để phân tích dao động của dầm dưới tác dụng của lực điều hòa di động.



Hình 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến Môđun đàn hồi của dầm.

Bảng 1. So sánh tham số tần số của dầm với $L/h=20$

		n=0.1		n=0.2		n=0.5	
		Ebrahimi	Bài báo	Ebrahimi	Bài báo	Ebrahimi	Bài báo
$\Delta T = 20K$	UTR	4.6536	4.6053	4.3867	4.3514	3.8974	3.8768
	LTR	4.7055	4.6553	4.4413	4.4046	3.9554	3.9347
	NLTR	4.7018	4.6559	4.4334	4.4058	3.9354	3.9368
$\Delta T = 40K$	UTR	4.4516	4.3944	4.1782	4.1350	3.6779	3.6510
	LTR	4.6111	4.5515	4.3452	4.3010	3.8554	3.8307
	NLTR	4.6020	4.5529	4.3279	4.3034	3.8141	3.8349
$\Delta T = 80K$	UTR	4.0148	3.9377	3.7212	3.6610	3.1834	3.1442
	LTR	4.4188	4.3382	4.1476	4.0874	3.6458	3.6149
	NLTR	4.3956	4.3410	4.1087	4.0923	3.5591	3.6238

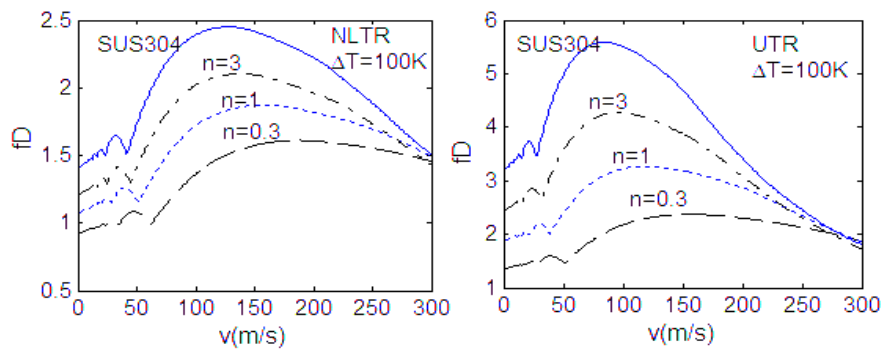
Hình 3 và 4 thể hiện mối quan hệ giữa tham số độ võng động và vận tốc của lực với các giá trị khác nhau của n trong hai trường hợp nhiệt độ là tăng đều và tăng phi tuyến. Tham số độ võng động được định nghĩa như sau: $fD = \max(W(L/2,t)/W_0)$, trong đó $W(L/2,t)$ là độ võng động tại vị trí giữa dầm và W_0 là độ võng tĩnh lớn nhất của dầm thép dưới tác dụng của lực F_0 tại giữa dầm, tức là $W_0 = F_0 L^3 / 48 E_m I$, với $I = bh^3 / 12$ là momen quán tính. Các hình 3 và 4 cho ta thấy tham số vật liệu và nhiệt độ đóng vai trò quan

trọng tới đáp ứng động lực học của dầm FGM. Khi tham số vật liệu n tăng thì tham số độ võng động sẽ tăng và trường hợp tăng tuyến tính thì tăng mạnh hơn. Điều này có thể giải thích rằng khi n tăng thì thể tích kim loại trong dầm sẽ tăng lên do đó mô đun đàn hồi của dầm sẽ giảm dẫn đến độ võng động sẽ tăng.

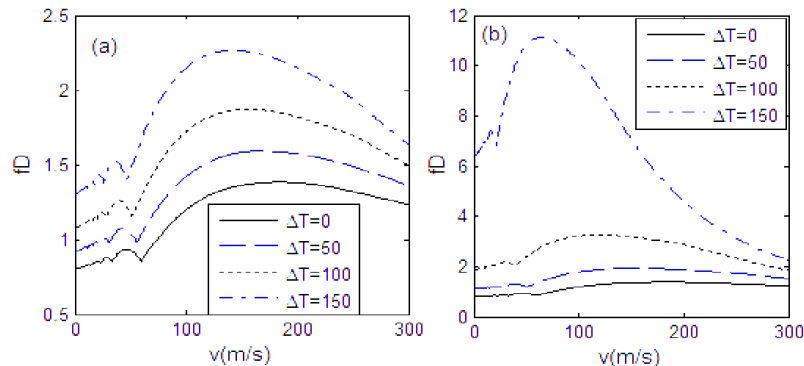
Hình 4 cho thấy sự khác nhau của trường nhiệt độ phân bố trong dầm ảnh hưởng như thế nào tới ứng xử động lực học của dầm. Trường nhiệt độ phân bố phi tuyến, như ta thấy ở hình 4 làm tham

số độ võng tăng mạnh hơn đáng kể so với trường nhiệt độ tuyến tính. Đặc biệt, với $\Delta T=150K$, tham số độ võng động của dầm với trường nhiệt độ phi tuyến tăng đột biến. Lý do của điều này là giá trị $\Delta T=150K$ rất gần với giá trị nhiệt độ tới hạn (172K). Khi nhiệt độ gần nhiệt độ tới hạn, độ cứng chống uốn của dầm suy giảm mạnh và vì thế độ võng động tăng mạnh. Ảnh hưởng của vận tốc lực di động đến tham số độ võng động tương tự như trường hợp dầm đặt trong môi trường nhiệt độ trong phòng. Hình 5 biểu diễn mối liên hệ giữa tần số của lực di động với tham số độ võng động với các giá trị khác nhau của vận tốc, $v=10, 20, 40, 80$ m/s, và $n=1$. Trong cả 2 trường hợp tăng nhiệt độ cho thấy tham số fD chịu ảnh hưởng rõ nét bởi tần số lực kích động Ω và hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi Ω tiến gần tới tần số dao động cơ bản của dầm (Với $\Delta T=0$ thì tần số cơ bản là

$\omega_1=46,9048$ rad/s; với $\Delta T=100K$, thì $\omega_1=40,1869$ rad/s cho nhiệt độ phân bố phi tuyến và $\omega_1=30,5725$ rad/s cho phân bố tuyến tính). Hình 6 minh họa mối liên hệ giữa độ võng tại giữa dầm với thời gian cho các giá trị khác nhau của vận tốc, $v=10, 20, 40$ m/s, và tần số của lực $\Omega=0, 15, 30$ rad/s. Hình 6 cho thấy khi nhiệt độ tăng thì không chỉ độ võng giữa dầm tăng mà hình dáng của đường cong dao động biểu thị quan hệ độ võng-thời gian cũng khác nhau. Như ta thấy ở hình 6, nhiệt độ đóng vai trò quan trọng tới ứng xử động lực học của dầm FGM. Hiện tượng tăng đột biến của độ võng giữa dầm liên quan tới hiện tượng cộng hưởng khi tần số kích động Ω gần với tần số dao động cơ bản như giải thích ở trên. Chẳng hạn trường hợp hiện tượng này xảy ra trong trường hợp nhiệt độ tăng tuyến tính và tần số lực kích động $\Omega=30$ rad/s vì tần số này rất gần với tần số cơ bản của dầm, $\omega_1=30,5725$ rad/s.



Hình 3. Mối quan hệ giữa tham số độ võng và vận tốc của lực di động ($\Omega=0$)



Hình 4. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến fD ($\Omega=0, n=1$) (a) LTR, (b) NLTR

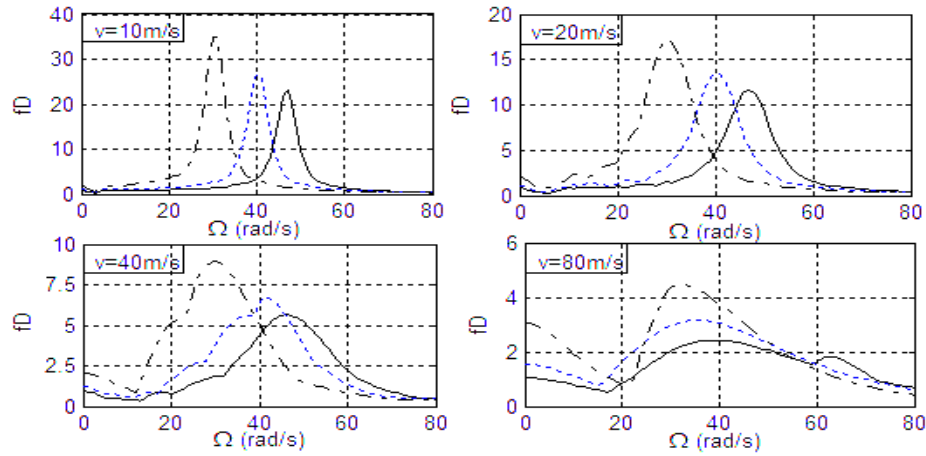
4. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu dao động của dầm FGM đặt trong môi trường nhiệt độ cao, chịu kích động của lực điều hòa di động. Kết quả nghiên cứu cho

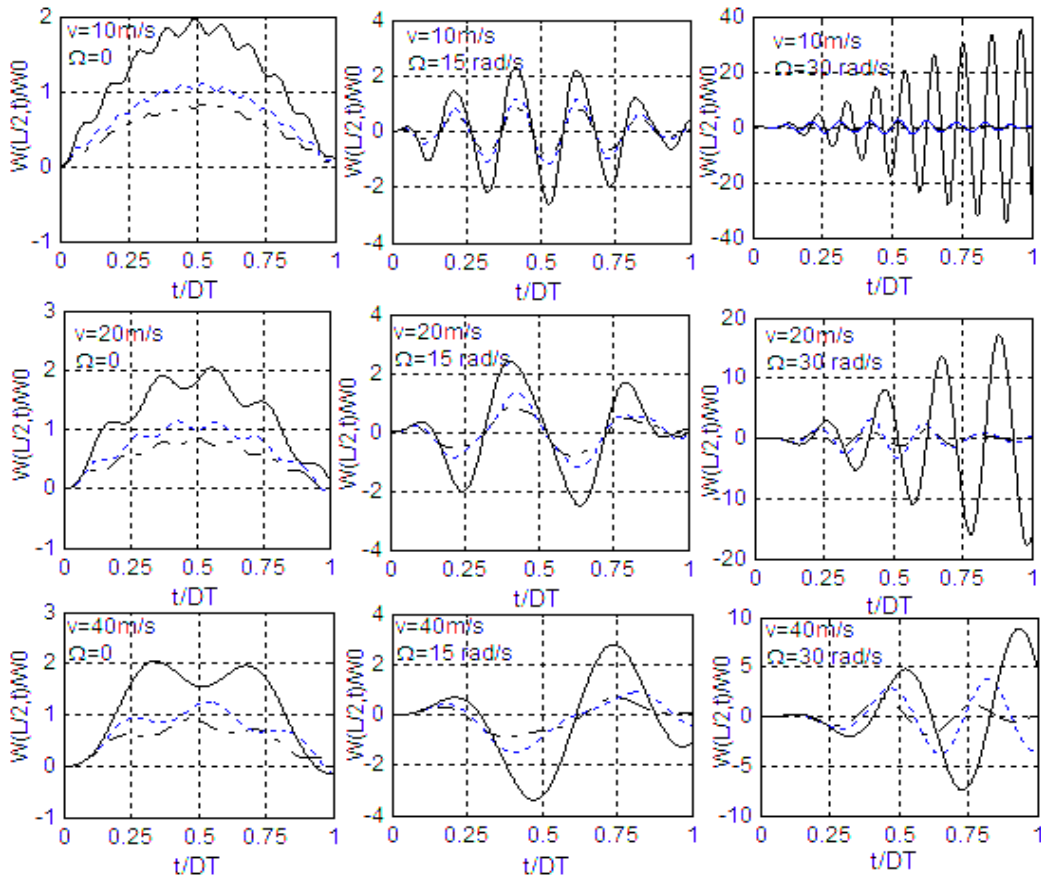
thấy, nhiệt độ có ảnh hưởng rất lớn đến đáp ứng động lực học của dầm. Độ võng động của dầm trong môi trường nhiệt độ cao tăng đáng kể so với trường hợp dầm đặt ở nhiệt độ trong phòng. Sự

tăng độ võng động phụ thuộc vào sự phân bố của trường nhiệt độ theo chiều cao dầm. Biên độ độ võng động tăng nhanh khi nhiệt độ gần tới nhiệt độ tới hạn hoặc trường hợp tần số kích động gần với tần số dao động cơ bản của dầm. Các kết quả

nhận được trong bài báo là cơ sở giúp cho các kỹ sư thiết kế lựa chọn các thông số hợp lý của lực và tỷ lệ phân bố thể tích vật liệu để tránh các trường hợp xảy ra hiện tượng cộng hưởng, cũng như việc thiết kế tối ưu kết cấu.



Hình 5. Mối quan hệ giữa tham số độ võng và tần số của lực di động ($n=1$)
 (-) $DT=0$, (- -) NLTR $DT=100K$, (- · -) UTR $DT=100K$.



Hình 6: Độ võng trực chuẩn giữa dầm theo thời gian với $n=1$,
 (- -) $DT=0$, (- -) NLTR $DT=100K$, (- · -) UTR $DT=100K$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Y.W. Kim (2005), *Temperature dependent vibration analysis of functionally graded rectangular plates*, Journal of Sound and Vibration, 284:531–549
- P. Malekzadeh, S.M. Monajjemzadeh (2013), *Dynamic response of functionally graded plates in thermal environment under moving load*, Composites: Part B, 45, pp. 1521-1533.
- A. Mahi, E.A. Adda Bedia, A. Tounsi, I. Mechab (2010), *An analytical method for temperature-dependent free vibration analysis of functionally graded beams with general boundary conditions*, Composite Structures, 92, pp. 1877–1887.
- N. Wattanasakulpong, B. G. Prusty, D.W. Kelly (2011), *Thermal buckling and elastic vibration of third-order shear deformable functionally graded beams*, International Journal of Mechanical Science, 53(9), pp. 734-743.
- F. Ebrahimi, F. Ghasemi, E. Salari (2015), *Investigating thermal effects on vibration behavior of temperature-dependent compositionally graded Euler beams with porosities*, Meccanica.
- Y.S. Touloukian (1967), *Thermophysical properties of high temperature solid materials*, Volume 4. Oxides and their solutions and mixtures, volume 1. Macmillan, New York.
- Géradin, M. and R. Rixen (1997). *Mechanical Vibrations. Theory and Application to Structural Dynamics*. John Wiley and Sons, Chichester, 2nd edition.

Abstract:

VIBRATION OF FUNCTIONALLY GRADED BEAM IN THERMAL ENVIRONMENT EXCITED BY A MOVING HARMONIC FORCE

In this paper, the vibration of functionally graded simply beam in thermal environment excited by a moving harmonic force is studied by the finite element method. The beam material is assumed to be composed of ceramic and metal with material properties are considered to be temperature dependent. Based on Euler-Bernoulli beam theory, the equations of motion are derived from Hamilton's principle. The implicit Newmark method is employed in computing the dynamic response of the beams. The numerical investigations are carried out to highlight the effect of the temperature rise, material distribution and moving force parameters on the vibration characteristics of the beams.

Keywords: FGM beam, thermal environment, vibration, moving harmonic force.

BBT nhận bài: 29/2/2016

Phản biện xong: 04/10/2016