

ẢNH HƯỞNG CỦA THÀNH PHẦN ỨNG SUẤT ĐẾN ĐẶC TRƯNG BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT CÓ TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT PHỨC TẠP

AFFECTING OF STRESS COMPONENTS ON FATIGUE CHARACTERISTICS PART WITH COMPLEX STRESS STATES

Đỗ Văn Sĩ, Nguyễn Quang Trung

Học viện Kỹ thuật Quân sự

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của các thành phần ứng suất đến đặc trưng bền mỏi của chi tiết trên cơ sở tính toán và đánh giá bằng kết quả thí nghiệm đã công bố. Phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để mô phỏng và xây dựng chương trình tính đặc trưng bền mỏi của mẫu. Trường ứng suất theo các phương và trường ứng suất quy đổi được sử dụng để đánh giá đặc trưng bền mỏi của chi tiết. Kết quả tính toán làm rõ ảnh hưởng của thành phần ứng suất tới đặc trưng bền mỏi của chi tiết, qua đó định hướng cho tối ưu kết cấu khi chịu trạng thái ứng suất phức tạp.

Từ khóa: Thành phần ứng suất; Giới hạn bền mỏi; Ứng suất phức tạp.

ABSTRACT

This article presents research on the influence of stress components on the fatigue characteristics of parts based on calculations and evaluation by published experimental results. The finite element method is used to simulate and develop a program to calculate the fatigue characteristics of the sample. The stress field in all directions and the converted stress field are used to evaluate the fatigue characteristics of the part. The calculation results clarify the influence of stress components on the fatigue characteristics of the part, thereby guiding the optimization of the structure when subjected to complex stress states.

Keywords: Vibratory stress relief; Fatigue life; Welded joint; Random.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nghiên cứu đánh giá đặc trưng bền mỏi của kết cấu đã đạt được nhiều kết quả quan trọng. Các mô hình đánh giá đặc trưng bền mỏi được đề xuất ngày càng phản ánh sát thực hơn về hiện tượng mỏi và giá trị đặc trưng bền mỏi của chi tiết, kết cấu. Các mô hình có thể kể đến như: mô hình ứng suất – biến dạng đơn, mô hình ứng suất – biến dạng tương đương [1], mô hình năng lượng [2] và mô hình mặt phẳng tới hạn [3]. Mô hình ứng suất – biến dạng tương đương chủ yếu tập trung vào việc tìm kiếm các thông số phá hủy tương đương, xây dựng các công thức thực nghiệm hoặc bán thực nghiệm để mở rộng lý thuyết độ bền tĩnh cho độ bền đa trục và giả định rằng các thông số này tạo ra phá hủy mỗi tương tự như do tải đơn trục. Tuy nhiên, các thông số tương đương mà phương pháp này đưa ra không thể giải thích được cơ chế của sự phá hủy mỏi mà chỉ đưa ra dự đoán tuổi thọ mỏi với giả định tương ứng như dưới tải đơn trục hoặc đa trục tỷ lệ. Mô hình dựa trên năng lượng phần nào cũng giải thích được một số tính chất vật lý của sự phá hủy và cũng được ứng dụng rộng rãi trong dự đoán tuổi thọ mỏi của kết cấu. Mặc dù tiêu chí dựa trên năng lượng có thể áp dụng trong đánh giá hỏng hóc kết cấu do tích lũy tổn thất mỏi, nhưng năng lượng là một đại lượng vô hướng trong khi phá hủy do mỏi liên quan mật thiết với các mặt phẳng tới hạn (mặt phẳng trong đó có sự hình thành và phát triển vết nứt mỏi). Do vậy, mô hình năng lượng không thể phản ánh tốt cơ chế hỏng hóc do mỏi ở trạng thái ứng suất biến dạng phức tạp. Mô hình mặt phẳng tới hạn do Findley [4] đề xuất dựa trên cơ chế bắt đầu nứt và hỏng do mỏi. Do có sự giải thích tốt về cơ chế bắt đầu xuất hiện và lan truyền vết nứt mỏi trong trạng thái ứng suất – biến dạng phức tạp, mô hình mặt phẳng tới hạn có nhiều lợi thế hơn trong việc xây dựng các thông số hư hỏng thích hợp

trên một mặt phẳng cụ thể của vật liệu. Thực tế, vết nứt mỏi thường xuất hiện trên mặt phẳng có ứng suất tiếp lớn nhất và sau đó được mở rộng, phát triển bởi ứng suất pháp trên mặt phẳng ấy [5, 6]. Mô hình mặt phẳng tới hạn thường được sử dụng và cho kết quả khá sát với thực tế, đặc biệt là mô hình dựa trên ứng suất [3].

Các mô hình tính toán đặc trưng bền mỏi của chi tiết ngày càng phát triển và phản ánh sát thực hiện tượng thực tế. Tuy nhiên, phương án thay đổi cấu trúc của chi tiết để nó trở nên bền hơn trước các tải trọng lại liên quan tới phương cụ thể, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các thành phần ứng suất tới đặc trưng bền mỏi của chi tiết là cần thiết để tối ưu hóa cấu trúc của chi tiết.

2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN XÁC ĐỊNH ĐẶC TRƯNG BỀN MỎI

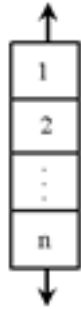
2.1. Cơ sở lý thuyết

Theo mô hình phá hủy giòn – mô hình chuỗi các khâu liên kết nối tiếp nhau, chuỗi sẽ bị phá hủy tại khâu yếu nhất do Weibull đề xuất [7]. Theo mô hình này, chi tiết được coi là các khâu nối tiếp nhau, sự phá hủy bất kỳ một khâu nào thì đều làm chi tiết phá hủy, hình 1a. Có thể xem vật thể là tập hợp của nhiều phần thể tích ΔV_i nối tiếp nhau, mỗi phần thể tích ΔV_i có ứng suất không đổi là σ_i , trong phần thể tích này lại chứa n_i khâu có thể tích đơn vị là V_0 , nối tiếp nhau như hình 1b.

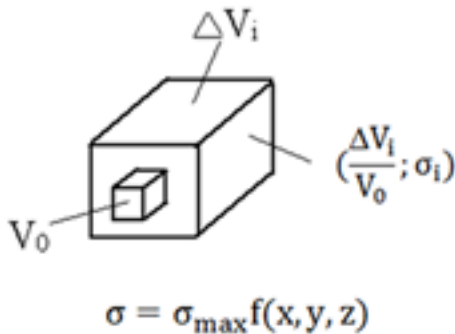
Giá trị $\sigma_{\max}$ trên hình 1b là ứng suất lớn nhất đặt tại một điểm nào đó trong chi tiết, $f(x,y,z)$ là hàm phân bố không thứ nguyên thỏa mãn $0 \leq f(x,y,z) \leq 1$ có thể xác định được khi biết trường ứng suất trong chi tiết khảo sát. Khi đó, phân bố ứng suất trong toàn bộ thể tích của chi tiết được thể hiện qua công thức:



$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot f(x, y, z) \quad (1)$$



a) Chuỗi các khâu nối tiếp



b) Phân chia vật thể thành khâu nối tiếp
Hình 1. Sơ đồ tính xác suất phá hủy của chi tiết

Theo đó thì xác suất phá hủy của chi tiết chịu ứng suất lớn nhất $\sigma_{\max}$ được xác định theo công thức [7]:

$$P(\sigma_{\max} \geq u) = 1 - \exp \left\{ - \int_{V_u > 0} \left[\frac{\sigma_{\max} \cdot f(x, y, z) - u}{\sigma_0} \right]^\alpha \frac{dV}{V_0} \right\} \quad (2)$$

Trong đó: u là giá trị nhỏ nhất của mức ứng suất có thể gây tổn thương mỗi cho chi tiết (thường lấy $u = 0$); σ_0 là tham số tỉ lệ liên quan đến quy luật phân bố xác suất Weibull có thể tra trong các bảng tiêu chuẩn tùy thuộc vào giá trị của hai đại lượng u và α ; α được xác định theo công thức sau [7]:

$$\alpha = \frac{1}{v_\sigma} - 0.64 \quad (3)$$

Trong đó, v_σ là một đặc trưng cơ học của vật liệu, thể hiện độ nhạy của vật liệu đối

với hiện tượng tập trung ứng suất và kích thước chi tiết, giá trị của v_σ cũng được tra trong các bảng thuộc hệ thống tiêu chuẩn tùy theo loại vật liệu cụ thể.

Theo [8], khi giả sử rằng ứng suất nhỏ nhất có thể gây tổn thương mỗi là bằng 0, thì kỳ vọng toán ứng suất phá hủy (giới hạn bền mỗi) sẽ có dạng:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V^*} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4)$$

Trong đó, $V^* = \int_V [f(x, y, z)]^\alpha dV$ là thể tích quy đổi của chi tiết, Γ – Hàm Gama.

Từ phương trình (4), ta có thể thành lập tỷ số kỳ vọng toán ứng suất phá hủy đối với hai chi tiết có kích thước, hình dáng và trạng thái ứng suất khác nhau nhưng chế tạo từ cùng một loại vật liệu như sau:

$$\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2} = \left(\frac{V_2^*}{V_1^*} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

Theo [9], $\bar{\sigma}_1$ được xem là giá trị trung bình của giới hạn bền mỗi của mẫu tiêu chuẩn σ_{-1} , còn $\bar{\sigma}_2$ là giá trị trung bình của giới hạn bền mỗi của chi tiết máy và kết cấu σ_{-1d} , nếu xét tới ảnh hưởng của công nghệ gia công bề mặt K_F , ảnh hưởng của việc giảm tính chất cơ học của vật liệu do sự tăng lên kích thước phôi khi chế tạo chi tiết máy so với mẫu thí nghiệm chuẩn qua hệ số K_v , và ảnh hưởng của ứng suất trung bình σ_m (ứng suất dư) [10] thì từ phương trình (5), ta có:

$$\sigma_{-1d} = K_F \cdot K_v \cdot \left(\frac{V_0^*}{V_d^*} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{\sigma_B - \sigma_m}{\sigma_B} \cdot \sigma_{-1} \quad (6)$$

Trong đó, V_0^* , V_d^* là thể tích quy đổi của mẫu thí nghiệm và của chi tiết máy và σ_B là giới hạn bền của vật liệu làm mẫu.

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn

Có thể dùng phương pháp phần tử hữu hạn để tính V^* như sau [9]:

$$V_0^* = \sum_{m=1}^N V_{ELm}^0 \text{ và } V_d^* = \sum_{m=1}^N V_{ELm}^d \quad (7)$$

Trong đó, N là số lượng phần tử hữu hạn được sử dụng để mô hình hóa mẫu và chi tiết, V_{ELm}^0 và V_{ELm}^d là thể tích quy đổi của phần tử hữu hạn thứ m của mẫu và của chi tiết, theo [9] chúng được xác định phụ thuộc và dạng phần tử hữu hạn, theo dạng phần tử 3 chiều được xác định nhờ công thức tính tích phân theo phương pháp cầu phương Gauss bằng biểu thức sau:

$$V_{ELm}^{0(d)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [f_{ELm}^{0(d)}(x, y, z)]^\alpha \det J_m(\xi, \eta, \iota) d\xi d\eta d\iota = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 W_i W_j W_k [f_{ELm}^{0(d)}(x, y, z)]^\alpha \det J_m(\xi, \eta, \iota) \quad (8)$$

Trong đó, W_i , W_j , W_k là các trọng số Gauss theo các trục ξ, η, ι trong hệ trục tọa độ địa phương của phần tử hữu hạn, $J_m(\xi, \eta, \iota)$ - Ma trận Jacobi trong phép chuyển đổi véc-tơ từ hệ tọa độ đề các (x, y, z) sang hệ tọa độ địa phương (ξ, η, ι) . Chỉ số “0” ứng với mẫu và chỉ số “d” ứng với chi tiết.

$f_{ELm}^{0(d)}(x, y, z)$ là hàm tọa độ không thứ nguyên đối với mỗi phần tử hữu hạn của mẫu và chi tiết được xác định theo công thức sau:

$$f_{ELm}^{0(d)}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i^{0(d)} \frac{\sigma_i^{0(d)}}{\sigma_{max}^{0(d)}} \quad (9)$$

Trong đó, $N_i^{0(d)}$ là hàm dạng của phần

tử hữu hạn ứng với nút thứ i , $\sigma_i^{0(d)}$ là giá trị ứng suất tại nút thứ i của phần tử hữu hạn đối với mẫu và chi tiết, $\sigma_{max}^{0(d)}$ là ứng suất lớn nhất trong mẫu và chi tiết, n là số lượng nút của mỗi phần tử.

2.3. Trường ứng suất quy đổi của chi tiết

Để sử dụng công thức (6), ta cần phải tính ứng suất tại mỗi nút của vật thể theo công thức (9). Do trường ứng suất của chi tiết là phức tạp nên cần phải đánh giá và quy đổi thành trường ứng suất tương đương. Bài báo tiến hành khảo sát các trường ứng suất quy đổi bao gồm: ứng suất chính lớn nhất σ_1 , ứng suất tương đương Von Mises σ_{td}^{vm} và ứng suất trên mặt phẳng tới hạn σ_{td}^{th} , đồng thời ứng suất theo các phương cũng được dùng để đánh giá đặc tính bền mỏi của mẫu.

- Ứng suất tương đương Von Mises tại mỗi nút được tính theo công thức [11]:

$$\sigma_{td}^{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (10)$$

Trong đó, σ_1 , σ_2 , σ_3 lần lượt là các ứng suất chính, với $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

- Trên mặt phẳng có ứng suất tiếp lớn nhất, ứng suất tiếp τ_{ij} và ứng suất pháp σ_{ij}^n được tính theo ứng suất chính theo các công thức:

$$\tau_{ij} = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2}; \sigma_{ij}^n = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2} \text{ với } i, j = 1, 2, 3 \text{ và } i < j \quad (11)$$

Khi đó, ứng suất tương đương trên mặt phẳng này được tính theo biểu thức sau [3]:

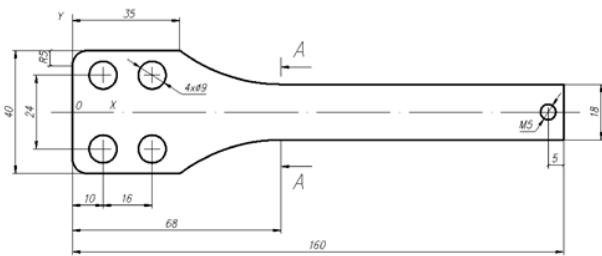
$$\sigma_{td}^{th} = \tau_{ij} (1 + n \frac{\sigma_{ij}^n}{\sigma_{ch}}) \quad (12)$$

Trong đó, n là hệ số phụ thuộc vào vật liệu và được xác định từ các số liệu khi chi tiết

chịu ứng suất đơn trục, đối với vật liệu của chi tiết nghiên cứu, lựa chọn $n = 1$ [3].

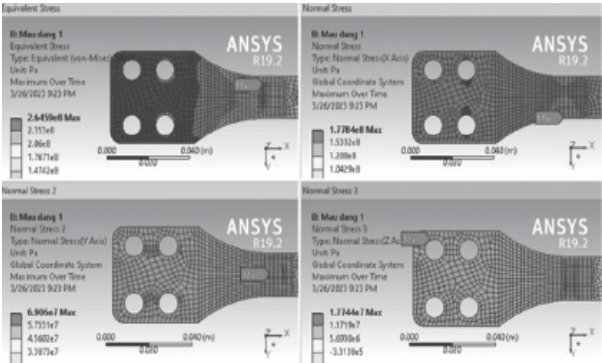
3. MÔ PHỎNG SỐ

Mẫu dùng cho mô phỏng tính toán và thí nghiệm được thiết kế theo tiêu chuẩn, hình dạng mẫu được thể hiện như hình 2, vật liệu của mẫu là thép CT3, thành phần như bảng 1 [12].



Hình 2. Hình dạng, kích thước của mẫu (mm)

Mẫu được mô phỏng quá trình nhiệt hàn, thông số mô phỏng nguồn nhiệt như bảng 2. Sau quá trình nhiệt, trường ứng suất của mẫu được thể hiện như hình 3 [12].



Hình 3. Trường ứng suất của mẫu sau quá trình nhiệt hàn

Bảng 1. Thành phần hóa học của mẫu thí nghiệm

C	Si	Mn	P(max)	S(max)	σ_{ch} (Mpa)	σ_B (Mpa)
0.14-0.22	0.12-0.30	0.40-0.60	0.045	0.045	296	402

Bảng 2. Thông số quá trình hàn

Cường độ dòng điện (A)	Hiệu điện thế (V)	Vận tốc hàn (cm/phút)
120-160	17-19	25-30

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả tính giới hạn bền mỏi của mẫu theo các trường ứng suất tương đương và các thành phần ứng suất được thể hiện trên bảng 3 và bảng 4.

Bảng 3. Giới hạn mỏi của chi tiết được tính theo các trường ứng suất

TT	Trường ứng suất để tính giới hạn bền mỏi σ_{-1d}	Giá trị ứng suất lớn nhất (MPa)	Giá trị tính toán số (MPa)	Thí nghiệm [13] (MPa)	Sai lệch so với thí nghiệm
1	Ứng suất chính lớn nhất	226	116	137	-15,4%
2	Ứng suất Von Mises	348	155		+13,4%
3	Ứng suất trên mặt phẳng tới hạn	157	135		+1,45%

Các thành phần ứng suất ảnh hưởng đến giá trị giới hạn bền mỗi của chi tiết mẫu được thể hiện như bảng 4.

Bảng 4. Giới hạn bền mỗi của chi tiết được tính theo các thành phần ứng suất

TT	Trường ứng suất để tính giới hạn bền mỗi σ_{-1d}	Giá trị ứng suất lớn nhất (MPa)	Giá trị giới hạn bền mỗi tính toán số (MPa)
1	Ứng suất theo phương x	220	113
2	Ứng suất theo phương y	226	219
3	Ứng suất theo phương z	34	116
4	Ứng suất theo phương xy	50	129
5	Ứng suất theo phương yz	84	141
6	Ứng suất theo phương xz	70	117

Kết quả tính toán trong bảng 3 cho thấy, việc sử dụng các trường ứng suất tương đương dùng để tính giới hạn bền mỗi của chi tiết cho các kết quả khác nhau, trong đó mô hình trường ứng suất trong mặt phẳng tới hạn cho kết quả khá chính xác so với thí nghiệm (sai khác +1,45%). Mô hình trường ứng suất tương đương Von Mises và trường ứng suất chính lớn nhất cho giá trị sai lệch khá lớn (lần lượt là +13,4% và -15,4%). Điều đó có nghĩa rằng các thành phần ứng suất có ảnh hưởng nhất định tới kết quả tính giá trị giới hạn bền mỗi. Nếu như trong mô hình trường ứng suất chính lớn nhất là chưa kể hết các thành phần ứng suất, còn mô hình trường ứng suất tương đương Von Mises lại chỉ kể đến ảnh hưởng của độ lớn của thành phần ứng suất tới kết quả tính giới hạn bền mỗi của chi tiết.

Bảng 4 thể hiện giá trị tính giới hạn bền mỗi của chi tiết khi chỉ sử dụng từng thành phần ứng suất. Qua đó cho thấy, theo phương y có ứng suất cực đại lớn nhất (226MPa) đồng thời kết quả tính cho giá trị giới hạn bền mỗi là lớn nhất ($\sigma_{-1d} = 219\text{MPa}$). Tuy nhiên, thành phần ứng suất theo phương z là nhỏ nhất (34MPa) nhưng kết quả tính giới hạn bền mỗi lại cho giá

trị khá cao ($\sigma_{-1d} = 116\text{MPa}$). Điều đó cho thấy, không những giá trị của ứng suất mà còn sự phân bố của trường ứng suất cũng ảnh hưởng rất lớn tới giá trị giới hạn bền mỗi của chi tiết.

5. KẾT LUẬN

- Khi chi tiết có trường ứng suất phức tạp thì các thành phần ứng suất có những ảnh hưởng nhất định tới các đặc trưng bền mỗi của chi tiết, những mô hình có tính tới yếu tố thành phần ứng suất cả về phương chiều và độ lớn cho kết quả tính toán sát với kết quả của thí nghiệm hơn.

- Sự phân bố của cùng với giá trị lớn nhất của trường ứng suất là hai yếu tố ảnh hưởng căn bản tới giá trị giới hạn bền mỗi của chi tiết, việc thiết kế các thiết diện nguy hiểm của chi tiết cần đảm bảo trường ứng suất phân bố đều trên các phương và có diện tích thiết diện lớn để có khả năng giảm giá trị ứng suất cực đại theo các phương. ❖

Ngày nhận bài: 25/5/2024

Ngày phản biện: 20/6/2024



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Yang, W.H. (1980), “*A generalized von mises criterion for yield and fracture*”, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, Vol. 47 No. 2, pp. 297-300.
- [2]. Mrozinski, S. (2019), “*Energy-based method of fatigue damage cumulation*”, International Journal of Fatigue, Vol. 121, pp. 73-83.
- [3]. Fatemi, A. and Socie, D.F. (1988), “*A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading*”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 11 No. 3, pp. 149-165.
- [4]. Findley, W.N. (1959), “*A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending*”, Journal of Engineering for Industry, Vol. 81 No. 4.
- [5]. Skibicki, D., Lipski, A. and Pejkowski (2018), “*Evaluation of plastic strain work and multiaxial fatigue life in CuZn37 alloy by means of thermography method and energy-based approaches of Ellyin and Garud*”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 41 No. 12.
- [6]. Findley, W.N. (1959), “*A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending*”, Journal of Engineering for Industry, Vol. 81 No. 4.
- [7]. MW Brown, KJ Miller (1973), “*A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions*”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Volume 187, Issue 1, https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1973_187_161_02.
- [8]. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. (1985), “*Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*”, М.: Машиностроение.
- [9]. Репецкий О, Буй Мань Кыонг (2012), “*Прогнозирование усталостной прочности рабочих лопаток турбомашин*”, Дюссельдорф: Palmarium academic publishing.
- [10]. Андрей В. С (2004), “*Метод определения характеристик сопротивления усталости деталей сложной формы*”. Транспорт Урала, 3, С.39-43.
- [11]. L.Susmel, R.Tovo, P.Lazzarin. “*The mean stress effect on the high-cycle fatigue strength from a multiaxial fatigue point of view*”. International Journal of Fatigue, Volume 27, Issue 8, August 2005.
- [12]. Hoàng Xuân Lượng (2003); “*Sức bền vật liệu*”, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 471 trang.
- [13]. Bùi Mạnh Cường; “*Phương pháp số và thực nghiệm đánh giá đặc trưng bền mỏi của chi tiết máy khi chịu trạng thái ứng suất phức tạp*”, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, 8-2023.
- [14]. Cuong Bui Manh, Duong Nguyen Van, Si Do Van, Manh Phan Van, Van Thao Le, “*Effects of the Vibration Amplitude in Vibratory Stress Relief on the Fatigue Life of Structures*”, Advances in Technology Innovation, vol. 7, no. 1, 2022, pp. 56-65.