

TÍNH TOÁN MỨC TĂNG TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU SAU RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ THEO CÁC GIẢ THUYẾT KHÁC NHAU

CALCUTATING THE INCREASE IN FATIGUE LIFE OF THE STRUCTURE USING VIBRATORY STRESS RELIEF BY DIFFERENT THEORIES

Đỗ Văn Sĩ^{1*}, Bùi Mạnh Cường¹,
Nguyễn Văn Dương¹

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, tính toán, khảo sát về mức độ tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu khi sử dụng công nghệ rung khử ứng suất dư. Trong nghiên cứu này, tiến hành tính toán, khảo sát về mức độ tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu sau khi rung khử ứng suất dư trên cơ sở sử dụng hàng loạt các biểu thức khác nhau do nhiều tác giả trên thế giới đề xuất đồng thời tiến hành so sánh kết quả tính toán thu được với kết quả thí nghiệm trên mẫu thực. Các thí nghiệm tìm tuổi thọ mỏi của kết cấu trước và sau rung khử ứng suất dư được tiến hành trên các mẫu hàn tiêu chuẩn và thực hiện nhờ hệ thống tạo rung LDS. Các nghiên cứu này nhằm mục đích đánh giá, tìm kiếm và định hướng việc sử dụng công thức tính toán lý thuyết hợp lý trong phân tích tuổi thọ mỏi kết cấu sau khi được xử lý nhờ công nghệ rung khử ứng suất dư.

Từ khóa: Ứng suất dư, tuổi thọ mỏi, ứng suất trung bình.

ABSTRACT

This article presents results of the study on the increase in the fatigue life of the structure using Vibratory Stress Relief (VSR) by a number of different formulas proposed by many authors around the world. The experiments on the structure's fatigue life before and after VSR are also carried out on samples in according to welding standards and conducted using the LDS vibrating system. The calculated results are then compared with the experimental results in order to evaluate and find out the best reasonable theoretical formula in the calculation of structure's fatigue life using VSR

Keywords: Residual stress, fatigue life, average stress.

¹Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: vansihvkt@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/10/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/12/2021

Ngày chấp nhận đăng: 27/12/2021

1. GIỚI THIỆU

Từ lâu các nghiên cứu [1, 2, 3, 4] đã chỉ ra rằng dạng chu trình thay đổi ứng suất có ảnh hưởng lớn đến độ bền và tuổi thọ mỏi của kết cấu. Các nghiên cứu được thực hiện bởi các tác giả khác nhau trên thế giới đều chỉ ra rằng tuổi thọ mỏi của kết cấu khi chịu ứng suất thay đổi theo chu trình phi đối xứng sẽ khác với khi chịu ứng suất thay đổi

theo chu trình đối xứng. Biểu thức thể hiện ảnh hưởng sự phi đối xứng của chu trình ứng suất, hay ảnh hưởng của ứng suất trung bình (hoặc ảnh hưởng của hệ số tính chất chu trình) đến độ bền mỏi của kết cấu đã được giới thiệu trong nhiều công trình nghiên cứu khác nhau [1, 2, 5]. Đây là các biểu thức thể hiện ảnh hưởng của ứng suất trung bình trong chu kỳ tải tới đặc tính bền mỏi của kết cấu, dưới dạng đồ thị, chúng là các đường cong ứng suất giới hạn và đường cong biên độ ứng suất giới hạn của chu trình ứng suất [5, 6], dựa vào các đồ thị này cho phép ta đánh giá và biết được ảnh hưởng của ứng suất trung bình (cũng như hệ số tính chất chu trình R) đến độ bền mỏi của vật liệu và kết cấu. Smith [2] là người đầu tiên đề xuất mô tả ảnh hưởng của ứng suất trung bình tới độ bền mỏi kết cấu dưới dạng đồ thị trên cơ sở nghiên cứu độ bền mỏi của thép các bon. Đồ thị Smith đặc trưng cho mối quan hệ giữa các giá trị của ứng suất cực đại và giá trị ứng suất trung bình của chu trình ứng suất tại cùng một tuổi thọ mỏi nhất định [2, 5]. Đồ thị này được vẽ trong hệ tọa độ $\sigma_{\max}(\sigma_{\min}) - \sigma_m$, trục hoành là các giá trị ứng suất trung bình σ_m , còn trục tung là các giá trị ứng suất lớn nhất (ứng suất nhỏ nhất) tương ứng $\sigma_{\max}(\sigma_{\min})$. Đồ thị đường cong ứng suất giới hạn của chu trình ứng suất được thiết lập ở cùng một tuổi thọ nhất định (thông thường là tại số chu trình cơ sở), nghĩa là các chu trình ứng suất có cặp điểm $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ nằm trên đồ thị lấy tại một giá trị σ_m bất kỳ, mẫu hoặc chi tiết sẽ có cùng số chu trình (tuổi thọ) làm việc đến hỏng. Trên cơ sở đồ thị này, nếu biết ứng suất trung bình của chu trình ứng suất là σ_m thì có thể tìm được các giá trị ứng suất tới hạn $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ tương ứng, nghĩa là tìm được giới hạn bền mỏi đối với bất kỳ hệ số tính chất chu trình R nào. Tiếp theo các tác giả Gerber, Goodman, Soderberg, Morrow, Oding, Peterxon, Birger và Stenov [1, 3, 4, 5] đã đề xuất các biểu thức khác nhau để mô tả ảnh hưởng của ứng suất trung bình tới độ bền mỏi của kết cấu. Khi biểu diễn dưới dạng đồ thị các biểu thức này chính là đường cong biên độ ứng suất giới hạn của chu trình ứng suất, đây là các đồ thị đặc trưng cho mối quan hệ giữa các giá trị biên độ ứng suất giới hạn và giá trị ứng suất trung bình của chu trình ứng suất tại cùng một tuổi thọ mỏi nhất định nào đó. Các tác giả Gerber,

Goodman Peterxon, Birger, Stenov [1, 2, 5, 4] đề xuất các biểu thức thể hiện mối quan hệ giữa giới hạn bền mỗi và ứng suất trung bình phụ thuộc vào giới hạn bền của vật liệu. Còn các tác giả Soderberg, Morrow đã chỉ ra rằng các thông số này phụ thuộc vào giới hạn chảy hoặc độ bền phá hủy của vật liệu. Tuy đã có hàng loạt các biểu thức thể hiện ảnh hưởng của ứng suất trung bình đến độ bền mỗi của kết cấu, nhưng rõ ràng những công trình nghiên cứu này không nhất quán và chỉ được thực hiện trên một lớp nhỏ các vật liệu là thép các bon hoặc hợp kim trong điều kiện không có bất kỳ nguyên công xử lý cơ hoặc nhiệt nào. Hiện nay có rất ít công trình nghiên cứu, tính toán, khảo sát để định hướng việc sử dụng công thức tính toán lý thuyết hợp lý khi phân tích ảnh hưởng của ứng suất trung bình tới tuổi thọ mỗi của kết cấu hàn, nhất là sau khi chúng được xử lý nhờ công nghệ rung khử ứng suất dư. Do vậy việc tiến hành nghiên cứu khảo sát mức tăng tuổi thọ của kết cấu sau rung khử ứng suất dư theo các giả thuyết khác nhau vừa có tính khoa học lại có tính ứng dụng thực tiễn rất lớn.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Để đánh giá tuổi thọ mỗi của kết cấu khi kể đến ảnh hưởng của quá trình rung khử ứng suất dư ta sử dụng mô hình tích lũy tổn thương mỗi tuyến tính do Miner đề xuất [7,8,9]. Ở đây ứng suất dư đóng vai trò như ứng suất ban đầu trong kết cấu và là ứng suất trung bình đối với mỗi chu kỳ chịu tải của kết cấu. Tổng tích lũy tổn thương mỗi đối với chi tiết khi được xử lý rung khử ứng suất dư và khi không được rung khử ứng suất dư lần lượt được xác định theo biểu thức (1) và (2).

$$D_1 = D_r + D_{om1} \tag{1}$$

$$D_0 = D_{om0} \tag{2}$$

trong đó: D_{om1} là tổn thương mỗi của kết cấu trong quá trình làm việc sau khi được rung khử và có ứng suất trung bình (ứng suất dư) ứng với mỗi chu kỳ chịu tải là σ_{m1} .

D_{om0} là tổn thất mỗi của kết cấu trong quá trình làm việc khi không được rung khử và có ứng suất trung bình (ứng suất dư) ứng với mỗi chu kỳ chịu tải là σ_{m0} .

D_r là tổn thất mỗi của kết cấu trong quá trình rung khử ứng suất dư.

Khi đó D_r , D_{om1} và D_{om0} lần lượt được xác định theo các biểu thức sau:

$$D_r = \sum_{i=1}^R \frac{n_i}{N_i} \tag{3}$$

$$D_{om1} = \sum_{i=1}^L \frac{n_{i\sigma m1}}{N_{i\sigma m1}} \tag{4}$$

$$D_{om0} = \sum_{i=1}^L \frac{n_{i\sigma m0}}{N_{i\sigma m0}} \tag{5}$$

trong đó: N_i là số chu kỳ tới phá hỏng theo đường cong mỗi khi biên độ ứng suất ở mức i sinh ra do quá trình rung khử ứng suất dư; n_i là số chu kỳ lặp lại của biên độ ứng suất ở mức i trong quá trình rung khử ứng suất dư; R là số mức

biên độ ứng suất khác nhau trong quá trình rung khử ứng suất dư; $N_{i\sigma m1}$, $N_{i\sigma m0}$ lần lượt là số chu kỳ tới phá hỏng theo đường cong mỗi khi biên độ ứng suất ở mức i và có ứng suất trung bình lần lượt là σ_{m1} (ứng suất dư còn lại trong kết cấu sau khi được rung khử), σ_{m0} (ứng suất dư sinh ra trong kết cấu hàn và không được xử lý rung khử ứng suất dư); $n_{i\sigma m1}$, $n_{i\sigma m0}$ lần lượt là số chu kỳ lặp lại của biên độ ứng suất ở mức i trong quá trình kết cấu làm việc; L là số biên độ ứng suất khác nhau trong quá trình làm việc của kết cấu.

Số chu kỳ tới phá hỏng $N_{i\sigma m1}$, $N_{i\sigma m0}$ được xác định trên cơ sở đường cong mỗi hiệu chỉnh khi kể đến yếu tố ảnh hưởng của ứng suất trung bình σ_{m1} , σ_{m0} làm giảm giới hạn bền mỗi của kết cấu [8, 9].

$$N_{i\sigma mj} = \frac{C}{(\sigma_{-1i})^m} \tag{6}$$

Ở đây σ_{-1i} ($i = 0,1$) lần lượt là giới hạn mỗi kết cấu khi không được xử lý rung khử ứng suất dư và khi được rung khử ứng suất dư, C và m là thông số đường cong mỗi.

Kết cấu trong quá trình làm việc được xem là phá hỏng vì mỗi khi tổng tích lũy tổn thất mỗi bằng 1 [7, 8, 9], hay từ các phương trình (3), (4), (5) ta có kết cấu được xử lý rung khử ứng suất dư cũng như kết cấu không được rung khử ứng suất dư sẽ bị phá hỏng vì mỗi trong quá trình làm việc nếu tương ứng thỏa mãn các điều kiện sau:

$$D_r + D_{om1} = 1 \tag{7}$$

$$D_{om0} = 1 \tag{8}$$

Giả sử kết cấu làm việc với tải điều hòa, từ điều kiện (7), (8) ta xác định được tuổi thọ mỗi trung bình (số chu kỳ làm việc đến hỏng) của kết cấu khi được rung khử ứng suất dư và của kết cấu khi không được rung khử ứng suất dư lần lượt theo các biểu thức như sau:

$$\bar{N}_r = (1 - D_r) \frac{C}{(\sigma_{-11})^m} \tag{9}$$

$$\bar{N}_0 = \frac{C}{(\sigma_{-10})^m} \tag{10}$$

Để so sánh tuổi thọ của kết cấu trước và sau rung khử ứng suất dư thì hai kết cấu phải chịu tải là như nhau, do vậy biên độ tải là như nhau, khi đó so sánh (9) với (10) ta có:

$$\frac{\bar{N}_r}{\bar{N}_0} = (1 - D_r) \left[\frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{-11}} \right]^m \tag{11}$$

Mặt khác theo công thức (6), với tải rung là tuần hoàn và gọi biên độ ứng suất rung khử là σ_r , số chu kỳ rung khử là n_r , thì khi đó công thức (3) thành:

$$D_r = \frac{n_r \sigma_r^m}{C} \tag{12}$$

Thay (12) vào (11) ta thu được công thức:

$$\frac{\bar{N}_r}{\bar{N}_0} = \left(1 - \frac{n_r \sigma_r^m}{C} \right) \left[\frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{-11}} \right]^m \tag{13}$$

Công thức (13) cho phép đánh giá mức tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu sau rung khử ứng suất dư so với kết cấu không rung khử ứng suất dư với ảnh hưởng của ứng suất trung bình tới σ_{-1i} , nhiều tác giả đưa ra công thức tính toán như các công thức sau:

Theo tác giả Gerber (1874) [10]:

$$\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-ii}} + \left(\frac{\sigma_{mi}}{\sigma_B}\right)^2 = 1 \tag{14}$$

Tác giả Goodman (1899) và Soderberg (1930) [10]:

$$\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-ii}} + \frac{\sigma_{mi}}{\sigma_B} = 1 \tag{15}$$

Tác giả Peterxon [10]:

$$\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-ii}} = \frac{1}{7} \left(8 - \left[1 + \frac{\sigma_{mi}}{\sigma_B} \right]^3 \right) \tag{16}$$

Theo tác giả Stenov [6, 10]:

$$\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-ii}} = \left(1 - \frac{\sigma_{mi}}{\sigma_B} \right)^m \tag{17}$$

Theo tác giả Smith [10]:

$$\left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-ii}} + 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{mi}}{\sigma_B} + 1 \right)^2 = 5 \tag{18}$$

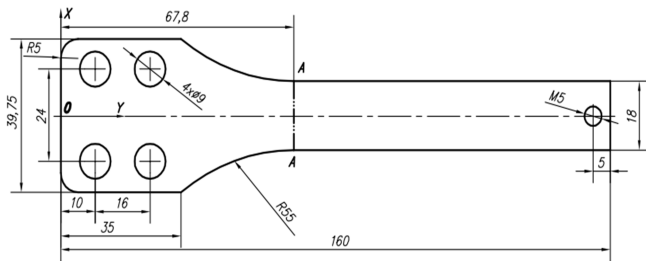
Trong đó: $i = 0, 1$ tương ứng cho kết cấu không khử ứng suất dư và khử ứng suất dư; σ_a là biên độ ứng suất chu kỳ, do tải giống nhau nên $\sigma_{a0} = \sigma_{a1}$; σ_m là ứng suất trung bình; σ_B là giới hạn bền của vật liệu.

3. THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH TUỔI THỌ MỎI CỦA KẾT CẤU

3.1. Mẫu và khảo sát đáp ứng của mẫu

3.1.1. Thiết kế và chế tạo mẫu

Hình dạng, kích thước của mẫu được thiết kế phù hợp với đồ gá trên hệ thống thử nghiệm LDS [11], và đồng thời phải tạo được sự tương thích giữa tần số cao và ứng suất sinh ra lớn. Mẫu chịu tải kiểu uốn phẳng gồm phần đế để gá lắp vào đồ gá còn phần thân chịu ứng suất sinh ra do tải gia tốc, bề dày của mẫu là 6mm. Khi làm việc ứng suất được sinh ra lớn nhất tại vùng thiết diện chuyển tiếp giữa phần đế và phần thân (đường A-A) như Hình 1.



Hình 1. Hình dạng, kích thước mẫu thí nghiệm

Sử dụng vật liệu thép các bon để chế tạo mẫu, thành phần thép thể hiện trên Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần vật liệu thép các bon dùng cho mẫu thí nghiệm

C	Cu	Fe	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Si
0,15%	0,01%	99,2%	0,45%	0,012%	0,005%	0,003%	0,009%	0,008%

Tiến hành chế tạo 20 mẫu có hình dáng hình học như hình 1, các mẫu sau khi được chế tạo sẽ được tạo ứng suất dư bằng phương pháp nhiệt, nguồn nhiệt di động được duy trì 1000°C chạy qua mặt cắt A-A, sau đó làm nguội nhanh bằng nước lạnh (hình 2).



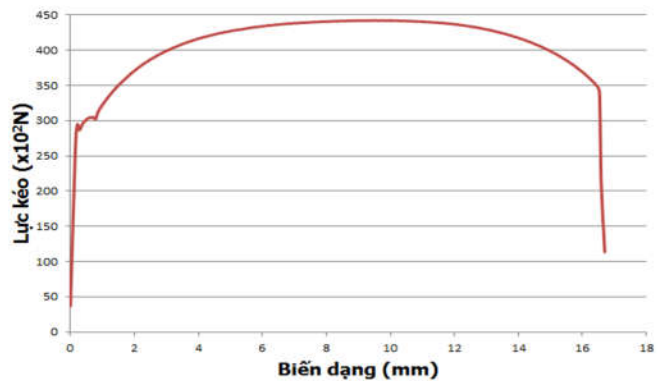
a) Mẫu được nung nóng



b) Đo nhiệt độ trên mẫu

Hình 2. Mẫu được tạo ứng suất dư bằng nhiệt

3.1.2. Khảo sát đặc tính cơ học và đáp ứng của mẫu



Hình 3. Kéo mẫu xác định đặc tính cơ học tĩnh

Thực hiện kéo 3 mẫu trên máy kéo-nén vạn năng MTS-810 Landmark (Mỹ) để xác định đặc tính cơ học của mẫu (hình 3). Kết quả được tính trung bình và được thể hiện trên Bảng 2.

Bảng 2. Đặc tính cơ học của vật liệu làm mẫu

Giới hạn chảy	Giới hạn bền	Mô đun đàn hồi
296MPa	440MPa	200GPa

3.1.3. Đo ứng suất dư của mẫu sau khi gia nhiệt

Tiến hành đo ứng suất dư của mẫu sau khi gia nhiệt, lấy ngẫu nhiên 3 mẫu để tiến hành đo ứng suất dư bằng thiết bị khoan lỗ RS200 và tem đo EA-06-062RE-120, vị trí đo ứng suất dư là vị trí chính giữa đường gia nhiệt trên mẫu như Hình 4, giá trị ứng suất dư (kiểu ứng suất chính lớn nhất) thu được thể hiện trên Bảng 3.



Hình 4. Đo ứng suất dư bằng phương pháp khoan lỗ

Bảng 3. Giá trị ứng suất dư

Lần đo 1	Lần đo 2	Lần đo 3	Trung bình
230MPa	203MPa	215MPa	216MPa

3.1.4. Khảo sát biến dạng, gia tốc và tần số riêng của mẫu

a) Kiểm tra tem đo biến dạng



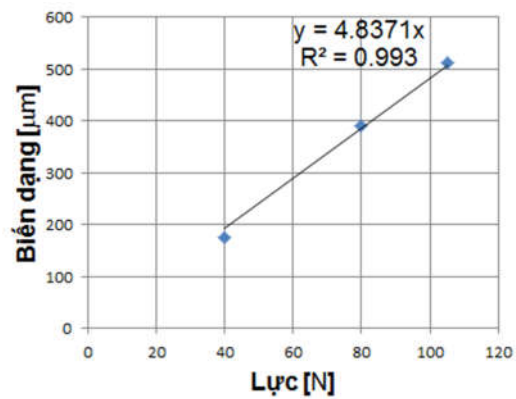
Hình 5. Tem đo biến dạng được dán trên mẫu

Tem đo biến dạng được dán tại vị trí chính giữa đường gia nhiệt trên 5 mẫu để đo biến dạng khi dao động như hình 5. Sau đó mẫu được gá lên đầu rung và kết nối với thiết bị LMS [12] để nhận tín hiệu biến dạng.

Tem đo biến dạng sau khi dán được kiểm tra tính ổn định khi làm việc, lắp các mẫu lên giá, chất tải tĩnh là các khối kim loại tại đầu của mẫu, sau đó đọc các chỉ số biến dạng thu được trên thiết bị LMS, tải tĩnh được chất lên lần lượt là 4kg, 8kg và 10,5kg, kết quả được so với mô phỏng hoàn toàn phù hợp, Hình 6 thể hiện tín hiệu đáp ứng của tem đo biến dạng, qua đó cho thấy tem làm việc bình thường và tin cậy.



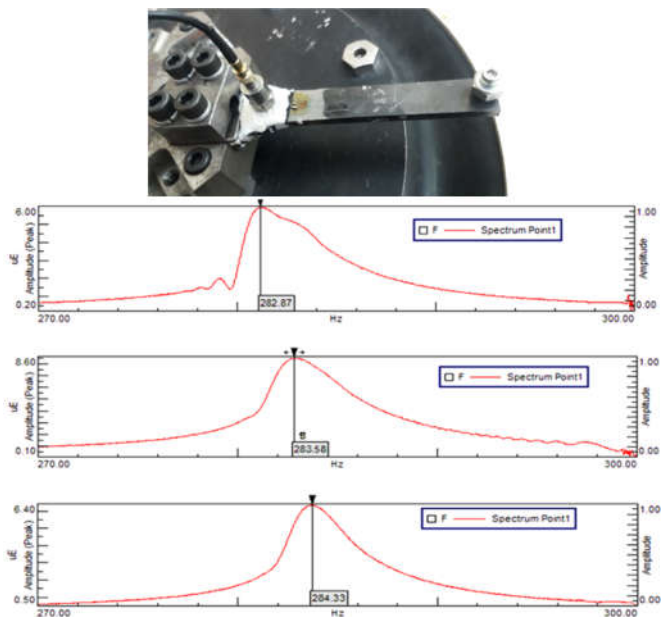
a) Chất tải tĩnh



b) Kết quả đo trên tem điện trở

Hình 6. Kiểm tra đáp ứng tải tĩnh của tem đo biến dạng

b) Khảo sát tần số dao động riêng của mẫu



Hình 7. Tần số dao động riêng của mẫu

Mẫu được giá đặt lên đầu rung của hệ thống LDS như hình 7, tần số đầu rung được thay đổi liên tục từ 270Hz tới 300Hz, tín hiệu dao động của mẫu được thu thập thông qua tem đo biến dạng và được thể hiện trên máy tính như hình 7. Khi tín hiệu được thể hiện trên màn hình máy tính đạt cực đại thì tần số tương ứng chính là tần số dao động riêng của mẫu.

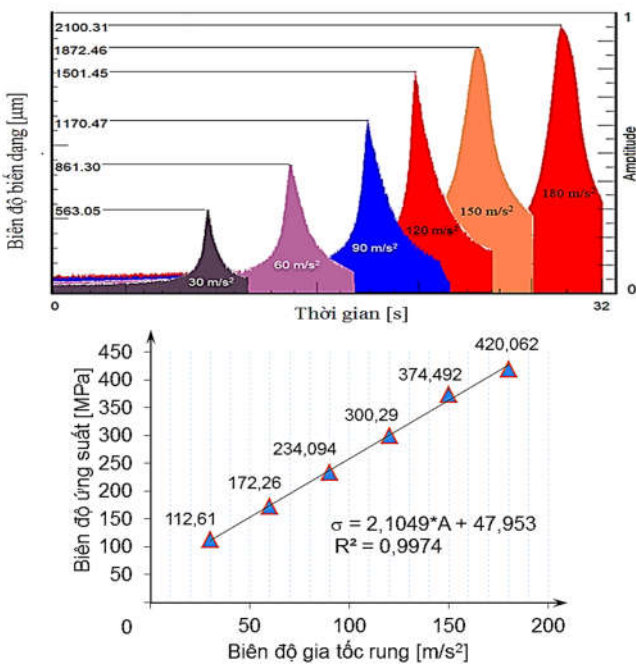
Do các mẫu làm từ một loại vật liệu đồng nhất, có hình dáng, kích thước giống nhau nên tần số dao động riêng của mẫu khảo sát chính là tần số dao động riêng của tất cả các mẫu được nghiên cứu. Hình 7 cho thấy tần số dao động riêng của mẫu là 283,58Hz.

c) Khảo sát mối quan hệ giữa gia tốc - biến dạng của mẫu

Mối quan hệ giữa các thông số biên độ gia tốc rung động với biến dạng tại vị trí khảo sát của mẫu được xem xét, mối quan hệ này làm cơ sở cho việc gia tải cho các chế độ rung khử ứng suất dư. Sau khi dán tem đo biến dạng, mẫu được gắn trên đầu rung của hệ thống rung LDS-V380 và kiểm tra tính làm việc ổn định của tem, qui chuẩn, qui không thiết bị đo. Đầu rung được tạo rung động dạng tải hình sin với biên độ gia tốc thay đổi để khảo sát mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung động và biến dạng tại vị trí khảo sát. Mẫu được giá đặt trên đầu rung như hình 8.



Hình 8. Khảo sát mối quan hệ biên độ gia tốc rung và biến dạng



Hình 9. Mối quan hệ giữa biến dạng và biên độ gia tốc dao động

Cho biên độ gia tốc dao động của đầu rung thay đổi từ 30m/s² đến 180m/s², khoảng cách thay đổi là 30m/s². Tín hiệu biến dạng được thu thập bởi hệ thống máy LMS, kết quả được thể hiện thể hiện trên Hình 9. Mỗi một đồ thị là kết quả của mối quan hệ của biên dạng và tần số được thay đổi theo thời gian tại một biên độ gia tốc rung nhất định.

Từ mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung động và biến dạng trên mẫu, suy ra mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung động và ứng suất tại vị trí khảo sát.

4. THIẾT LẬP THI NGHIỆM

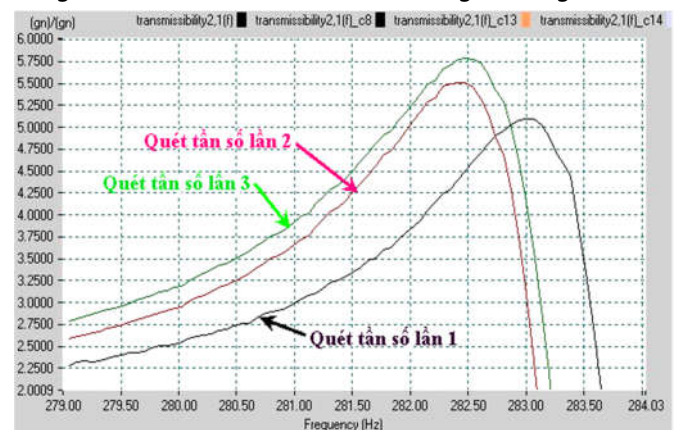
4.1. Rung khử ứng suất dư

Để tạo được mức biến dạng đủ lớn cho chi tiết, kết cấu, trong nghiên cứu này tiến hành rung khử ứng suất dư tại tần số dao động riêng của mẫu (được thiết lập trên chương trình điều khiển của hệ thống LDS), dao động của đầu rung tạo ra ứng suất trên bề mặt ngoài mẫu tại thiết diện khảo sát. Nếu ứng suất dư đo được trước khi rung khử là 216MPa, thì để đạt được mức ứng suất tổng vượt qua giới hạn chảy của vật liệu làm mẫu (296MPa) là 30% thì theo khảo sát mẫu về mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung với ứng suất sinh ra thì phải cho đầu rung dao động với biên độ gia tốc là 57m/s², thời gian rung được lựa chọn theo tài liệu [13]. Thông số rung khử ứng suất dư được thể hiện trên bảng 4.

Bảng 4. Thông số rung khử ứng suất dư

Ứng suất dư trước rung khử tại điểm khảo sát	Tần số rung khử	Ứng suất tải rung tại vị trí khảo sát	Thời gian rung
216MPa	283,5Hz	167,9MPa	5 phút

Sau mỗi lần rung khử, tần số dao động riêng của mẫu được kiểm tra lại. Nếu tần số dao động riêng của mẫu được kiểm tra sau khi rung khử ứng suất dư ở lần sau không có sự thay đổi so với lần trước, thì quá trình rung khử ứng suất dư được hoàn thành, hình 10 thể hiện tần số dao động riêng của mẫu ở các lần kiểm tra sau rung khử ứng suất dư.



Hình 10. Tần số dao động riêng của mẫu sau rung khử ứng suất dư

Sau khi rung khử ứng suất dư, nhóm mẫu được tiến hành kiểm tra giá trị ứng suất dư, đo ứng suất dư theo phương pháp khoan lỗ theo tiêu chuẩn ASTM E837-01. Vị trí đo ứng suất dư như trên Hình 4. Kết quả ứng suất dư chính trên các mẫu sau rung khử là 58MPa.

4.2. Thí nghiệm tìm tuổi thọ mỏi của kết cấu

Mẫu được gá lên bàn rung như khi rung khử ứng suất dư (hình 8), thiết lập hệ thống điều khiển LDS để điều rung dao động với tần số riêng của mẫu, biên độ gia tốc rung sinh ứng suất tại điểm khảo sát phải nhỏ hơn giới hạn chảy của vật liệu. Thời gian tính từ khi bắt đầu thí nghiệm tới khi mẫu gãy chính là tuổi thọ của mẫu. Hai nhóm mẫu trước và sau rung khử được tiến hành thí nghiệm tìm tuổi thọ mỏi, kết quả được thể hiện trên bảng 5.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm tìm tuổi thọ mỏi của mẫu

	Tuổi thọ mỏi của mẫu trước rung khử (<i>chu kỳ</i>)	Tuổi thọ mỏi của mẫu sau rung khử (<i>chu kỳ</i>)	Mức tăng tuổi thọ mỏi (<i>lần</i>)
Mẫu 1	831914	2034576	
Mẫu 2	813686	2305853	
Mẫu 3	1008800	2170213	
Trung bình	884800	2170214	2,45

4.3. Tính mức tăng tuổi thọ mỏi của mẫu thông qua các công thức

Sử dụng thông số rung khử ứng suất dư được thể hiện trong bảng 4, đặc tính cơ học của vật liệu được thể hiện trong bảng 2 và giá trị ứng suất dư sau rung khử 56MPa, tiến hành tính mức tăng tuổi thọ mỏi của mẫu sau rung khử so với trước rung khử theo công thức (13) với các công thức hiệu chỉnh của các tác giả công bố (14) đến (18), kết quả tính toán được thể hiện trên bảng 6.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Qua tính toán mức tăng tuổi thọ mỏi cho các nhóm mẫu theo các công thức các tác giả đã đề xuất và thí nghiệm mà bài báo đã tiến hành. Kết quả về mức tăng tuổi thọ mỏi của các nhóm mẫu sau khi rung khử ứng suất dư so với không rung khử ứng suất dư được thể hiện trong bảng 6.

Bảng 6. Kết quả tính toán khả năng tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu

TT	Sử dụng công thức của tác giả	Mức tăng tuổi thọ mỏi của chi tiết	Sai khác so với kết quả thí nghiệm	Thông số đường cong mỏi (Tiêu chuẩn IIW [7])
1	Gerber	1,15	- 53%	m = 3 C = 10 ^{12,5}
2	Goodman	2,67	+ 9%	
3	Peterxon	0,43	- 82%	
4	Stenov	67,95	+2673%	
5	Smith	0,53	- 78%	
6	Thí nghiệm của bài báo	2,45		

Từ kết quả nghiên cứu thu được có thể khẳng định phương pháp rung khử ứng suất dư có ảnh hưởng tích cực tới đặc tính mỏi của kết cấu có ứng suất dư. Ứng suất dư sau rung khử giảm rõ rệt (từ 216MPa xuống còn 56MPa).

Thông qua kết quả được thể hiện trong bảng 6, kết quả tính toán mức tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu thông qua các công thức có sự sai khác lớn và sai khác nhiều so với kết quả thí nghiệm. Trong các công thức được dùng để tính toán thì công thức tính được đề xuất bởi các tác giả Goodman (sai khác 9%) và Gerber (sai khác 53%) có kết quả sát với kết quả thí nghiệm nhất. Sự sai khác giữa tính toán và thực nghiệm có thể do ảnh hưởng của nhiều yếu tố như: yếu tố vật liệu, hệ số đường cong mỏi sử dụng chưa phản ánh đúng thực tế.

Khi rung động với biên độ lớn (biến dạng của chi tiết vượt qua giới hạn đàn hồi) làm cho các phân tử nằm ở vị trí cân bằng hơn và sự chuyển biến các lệch mạng và pha trong vật liệu được diễn ra. Kết quả làm cho sự phân bố lại đều hơn của ứng suất dư, trong đó ứng suất dư cực đại giảm rõ rệt. Những điều đó làm cho độ bền mỏi của chi tiết, kết cấu tốt hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. L.Susmel, R.Tovo, P.Lazzarin, 2005. *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, p. 928-943.
- [2]. J. Schijve, 2008. *Fatigue of Structures and Materials: Edition 2*. Springer Science & Business Media.
- [3]. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, 1990. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey.
- [4]. Raymond B., 2006. *Calculating and Displaying Fatigue Results*. Product Manager New Technologies ANSYS: Development Engineer.
- [5]. Bui Manh Cuong, 2021. *Giao trình phương pháp danh gia tuổi thọ mỏi của kết cấu*, People's Army Publishing House.
- [6]. Stepnov M.N. 2003. *Computational methods for assessing the characteristics of fatigue resistance of materials and structural elements*. M: MATI Publishing House.
- [7]. Bui Manh Cuong, OV Repetsky, 2011. *Certificate of state registration of a computer program*. No. 2011613210. Schematization of random loading processes and calculation of fatigue strength (DAFLAPS_Fatiguelife). Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks.
- [8]. V. P. Kogaev, N. A. Makhutov, A. P. Gusenkov, 1985. *Calculations of machine parts and structures for strength and durability*. Moscow: Mashinostroenie.
- [9]. *Methods of Investigation of Resistance of Metals to Deformation and Decomposition under Cyclic Loading*. Kiev, "Haykova Duma", 1974, 254 p.
- [10]. B. Heimann, W. Gert, 2010. *Mechatronics*. Novosibirsk.
- [11]. LDS V830 Shaker Systems Medium-Force Electrodynamic Vibration Systems.
- [12]. LMS Test.Lab. *The integrated solution for noise and vibration testing*.
- [13]. L. Stefan, J. Holmgren, 2007. *Alternative Methods for Heat Stress Relief*. Master of science programme Mechanical Engineering, Lulea 14th.

AUTHORS INFORMATION

Do Van Si, Bui Manh Cuong, Nguyen Van Duong

Faculty of Mechanical Engineering, Military Technical Academy