

# NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM MỎI

• Văn Hữu Thịnh

## ABSTRACT:

*This paper presents research result of manufacturing a rotating-beam fatigue testing machine that can be equipped in the mechanic laboratory. It is used for studying and researching in universities. Focus of the paper shows experimental researches on the change of Young's modulus versus number of fatigue cycles of steel specimens AISI 1045. Based on the research results, we can predict fatigue lifetime of the rotating shaft.*

## I. MỞ ĐẦU

Hiện tượng mỏi là một hiện tượng khá phức tạp, xảy ra khi ứng suất thay đổi theo thời gian. Ứng suất thay đổi này có trị số nhỏ hơn giới hạn bền, thậm chí còn nhỏ giới hạn đàn hồi của vật liệu chi tiết máy. Theo thống kê của các nhà nghiên cứu khoa học về độ bền của Nga: sự phá hủy mỏi của các máy móc cơ khí chiếm 80 % tổng số các nguyên nhân gây ra sự phá hủy của chúng. Còn theo thống kê của Hội Nghiên cứu Kỹ thuật Hàn của Mỹ (WRA) thì sự phá hủy của các chi tiết máy chiếm tới 90%. Do đó, các kết quả nghiên cứu về độ bền mỏi có ý nghĩa rất lớn đối với kỹ thuật hiện đại, cho phép tính toán thiết kế và đánh giá tuổi thọ mỏi của các chi tiết máy. Trong điều kiện một số trường đại học và các Viện nghiên cứu trong thành phố chưa được trang bị máy thí nghiệm mỏi, chúng tôi đã nghiên cứu chế tạo một dạng thiết bị thí nghiệm mỏi uốn quay nhằm phục vụ cho công tác nghiên cứu khoa học và công tác giảng dạy. Như vậy với thiết bị thí nghiệm mỏi và với sự hỗ trợ của các thiết bị đo cần thiết chúng tôi đã nghiên cứu sự ứng xử của vật liệu mẫu thử bằng thép trong quá trình phá hủy mỏi. Trong khuôn khổ của bài báo chúng tôi trình bày sự thay đổi của môđun đàn hồi vật liệu mẫu thử theo số chu kỳ ứng suất.

## II. THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM MỎI

Theo dạng ứng suất sinh ra trong mẫu thử, máy thí nghiệm mỏi gồm các loại:

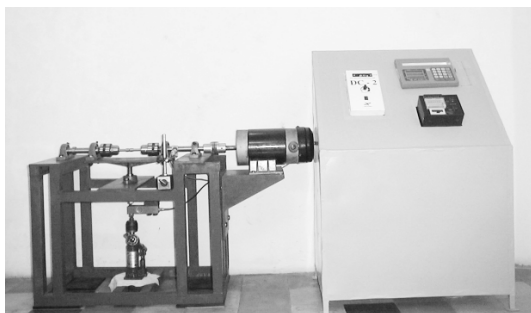
- Máy thí nghiệm mỏi kéo nén.
- Máy thí nghiệm mỏi uốn, uốn quay.

- Máy thí nghiệm mỏi xoắn.
- Máy thí nghiệm mỏi vạn năng: kết hợp các dạng ứng suất uốn + kéo (nén) hoặc xoắn.

Trên cơ sở điều kiện chế tạo và phương pháp nghiên cứu chúng tôi chọn phương án chế tạo thiết bị thí nghiệm mỏi uốn quay như hình 1, gồm có:

- Động cơ điện DC: công suất 1 HP (mã lực), tốc độ quay 2800 vòng/phút.
- Bộ biến tần (DC motor controller): thay đổi tốc độ quay động cơ từ 0 đến 3500 vòng/phút.
- Bộ gia tải: kích thủy lực, thay đổi lực tác dụng lên mẫu thử từ 0 đến 2 tấn.
- Bộ counter và cảm biến từ: đếm số vòng quay của mẫu thí nghiệm (tối đa đến 1010 vòng quay).
- Cảm biến lực (load cell) và đồng hồ hiển thị lực.
- Nói trực đàn hồi + 2 cặp ổ lăn UCF.
- Trục chính + 2 đầu kẹp mẫu thử có đường kính từ 7 đến 12 mm.
- Khung máy.

Thiết bị thí nghiệm mỏi có đặc điểm: kết cấu cơ khí đơn giản, dễ chế tạo, kết hợp các thiết bị đo hiện đại như load-cell (cảm biến đo lực tác dụng lên mẫu thử), bộ counter, cảm biến từ, bộ biến tần. Tháo lắp mẫu thử nhanh chóng, làm việc êm, ổn định, đạt yêu cầu kỹ thuật của thiết bị thí nghiệm.



**Hình 1: Thiết bị thí nghiệm mô phỏng**

Phương pháp thí nghiệm mô phỏng theo tiêu chuẩn TCVN 4169-85. Mẫu thử trong thí nghiệm mô phỏng uốn quay tròn theo TCVN 4169-85 có dạng như hình 2.



**Hình 2: Mẫu thử**

### III. SỰ THAY ĐỔI CỦA MÔĐUN ĐÀN HỒI E THEO SỐ CHU KỲ ỨNG SUẤT.

#### 1 Cơ sở lý thuyết:

Đối với ứng suất tĩnh, trong giới hạn đàn hồi các kim loại có quan hệ giữa ứng suất  $\sigma$  và biến dạng  $\varepsilon$  tuân theo định luật Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Trong đó: E là môđun đàn hồi (Young's modulus) của vật liệu (N/mm<sup>2</sup>) là hằng số.

Tuy nhiên trong trường hợp ứng suất và biến dạng thay đổi theo thời gian thì quan hệ giữa ứng suất  $\sigma$  biến dạng  $\varepsilon$  xác định theo phương trình:

$$a_0 \sigma + a_1 \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \dots + a_n \frac{\partial^n \sigma}{\partial t^n} = b_0 \varepsilon + b_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \dots + b_n \frac{\partial^n \varepsilon}{\partial t^n} \quad (3.2)$$

Trong đó:  $a_0, a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, b_2, \dots$  là các hằng số của vật liệu. Nếu ứng suất và biến dạng thay đổi theo thời gian theo các hàm điều hòa:  $\sigma_0 e^{i\omega t}$  và  $\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}$ , tương ứng với lực và đáp ứng cũng là hàm điều hòa:  $F e^{i\omega t}$  và  $X e^{i(\omega t - \phi)}$ , ta có:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^n \sigma}{\partial t^n} &= (j\omega)^n \sigma_0 e^{j\omega t} \\ \frac{\partial^n \varepsilon}{\partial t^n} &= (i\omega)^n \varepsilon_0 e^{j\omega t - j\phi} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Phương trình (3.2) trở thành:

$$\begin{aligned} [a_0 + a_1(j\omega) + a_2(j\omega)^2 + \dots] \sigma_0 &= \\ [b_0 + b_1(j\omega) + b_2(j\omega)^2 + \dots] \varepsilon_0 e^{-j\phi} & \\ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{b'(\omega) + j b''(\omega)}{a'(\omega) + j a''(\omega)} e^{-j\phi} & \end{aligned} \quad (3.4)$$

Trong đó:  $a', a'', b', b''$  là hàm của  $\omega, a_0, a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, b_2$ .

Tỉ số của 2 số phức là một số phức, do đó ta có thể viết lại:

$$\sigma_0 = \hat{E} \varepsilon_0 = E_0 (1 + j k_i(\omega)) \varepsilon_0 \quad (3.5)$$

Trong đó:  $\hat{E}$  là môđun đàn hồi phức, có dạng  $\hat{E} = E_0 (1 + j k_i(\omega))$  (3.6)

số ảo:  $j = \sqrt{-1}$

ki: hệ số cản.

Phương trình (3.6) chứng tỏ rằng môđun đàn hồi phức không là hằng số như theo định luật Hooke (3.1). Ở đây bằng thực nghiệm chúng tôi nghiên cứu sự thay đổi của môđun đàn hồi  $E_0$  theo số chu kỳ ứng suất thí nghiệm mô phỏng.

Trường hợp cơ bản, bỏ qua ảnh hưởng của lực dọc trục, biến dạng trượt, quán tính quay, phương trình vi phân dao động của dầm (mẫu thử) có dạng:

$$\frac{d^4 \hat{v}(x)}{dx^4} - \left(\frac{\lambda}{1}\right)^4 \hat{v}(x) = \frac{\hat{q}(x)}{\hat{E}J} \quad (3.7)$$

trong đó:  $\lambda$  là giá trị riêng, xác định theo:

$$\lambda = \left[ \frac{m\omega^2}{\hat{E}J} \left( 1 - j \frac{k_a}{m\omega} - \frac{c_a}{m\omega^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.8)$$

$m$ : khối lượng phân bố của dầm,  $m = \rho \cdot A$ ,  
 $\rho$ : khối lượng riêng của dầm,  $A$  là diện tích mặt cắt ngang của dầm.

$l$ : chiều dài của dầm.

$Ca, ka$ : hệ số cản đàn hồi, hệ số cản nhớt của môi trường bao quanh dầm.

$J$ : môment quán tính mặt cắt ngang của dầm.

$\hat{E}$ : môđun đàn hồi phức, xác định theo (3.6).

Trường hợp của mẫu thử chịu lực tác dụng không đổi, nằm trong không khí nên các hệ số đàn hồi  $ca$ , hệ số cản nhớt  $ka$  của môi trường quanh mẫu thử  $ca = ka = 0$ . Đây là trường hợp tĩnh nên  $\lambda = 0$ , bỏ qua ảnh hưởng của lực dọc trục, biến dạng trượt và quán tính quay. Nghiệm tổng quát của (3.7) trong trường hợp này có dạng:

$$v(x) = c_1 x^3 + c_2 x^2 + c_3 x + c_4 + V_r(x) \quad (3.9)$$

trong đó:  $c_1, c_2, c_3, c_4$  là các hằng số.

$V_r(x)$  là nghiệm riêng khi  $q(x) \neq 0$ .

Từ phương trình (3.9) ta được vector biểu diễn chuyển vị và góc xoay tại 2 đầu của mẫu thử:

$$v = (v_1, \varphi_1, v_2, \varphi_2)^T = UC + V_r \quad (3.10)$$

Vector biểu diễn chuyển vị ở 4 nút của mẫu thử:

$$v' = (v_1, v_a, v_b, v_2)^T = U_1 C + V_r' \quad (3.11)$$

trong đó:  $C = (c_1, c_2, c_3, c_4)^T$

$$V_r = V_r' = (0, 0, 0, 0)^T$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ l^3 & l^2 & 1 & 1 \\ -3l^2 & -2l & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ a^3 & a^2 & a & 1 \\ (1-b)^3 & (1-b)^2 & (1-b) & 1 \\ l^3 & l^2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Từ (3.10) & (3.11) ta có phương trình dạng ma trận biểu diễn quan hệ  $v$  và  $v'$ :

$$v = U \cdot U_1 v' \quad (3.12)$$

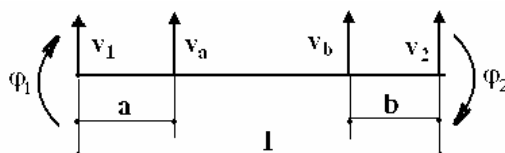
Phương trình xác định độ cứng  $EJ$  của mẫu thử:

$$EJ = \frac{l(M_1^* + M_{1td} - M_2^* - M_{2td})}{2(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (3.13)$$

Trường hợp trên đoạn dầm không có lực tác dụng  $M_{1td} = M_{2td} = 0$ , phương trình (3.13) có dạng:

$$EJ = \frac{l(M_1^* - M_2^*)}{2(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (3.14)$$

Theo (3.14) để xác định độ cứng  $EJ$ , ta phải xác định góc xoay  $\varphi_1$  &  $\varphi_2$  tại 2 đầu của mẫu thử. Tuy nhiên việc đo  $\varphi_1$  &  $\varphi_2$  là rất phức tạp. Áp dụng cơ sở tính toán trên chúng tôi chia đoạn mẫu thử ra 3 phần nhỏ, tương ứng được 4 điểm (nút) và đo độ võng  $v_1, v_a, v_b, v_2$  tại 4 điểm này như hình 3.



**Hình 3: Đo độ võng tại 4 điểm trên mẫu**

Sau khi đo được độ võng tại 4 điểm  $v_1, v_a, v_b, v_2$  thay vào (3.12) ta được  $\varphi_1$  &  $\varphi_2$ .

Thay  $\varphi_1$  &  $\varphi_2$  vào (3.14) ta tính được môđun đàn hồi E của mẫu thử ứng với từng chu kỳ đo đặc (chu kỳ lấy mẫu). Trong đó:

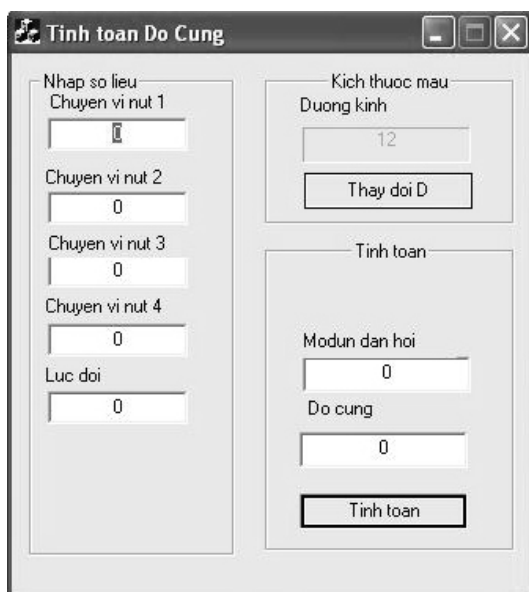
J: mômen quán tính mặt cắt ngang của mẫu

$$J = \frac{\pi d^4}{64}$$
 , d là đường kính của mẫu thử  
 d = 12 mm.

$M_1^*, M_2^*$ : mômen uốn nội lực tại 2 đầu của

đoạn mẫu thử:  $M_1^* = M_2^* = P.l$ . Với  $P = \frac{Q}{2}$ ,  
 Q là lực tác dụng (bằng kích thủy lực) lên mẫu thử. l là chiều dài đoạn mẫu thử, trong thí nghiệm l = 113 mm.

Theo cơ sở tính toán ở trên, chúng tôi đã viết chương trình tính độ cứng và môđun đàn hồi E của mẫu thử. Sử dụng chương trình tính này bằng cách nhập độ võng tương đối tại 4 điểm (đo được từ thí nghiệm), lực tác dụng  $P=Q/2$ , đường kính của đoạn mẫu thử. Chương trình tính E có giao diện như hình 4.



Hình 4: Giao diện của chương trình tính E

## 2. Phương pháp thí nghiệm:

*Mục đích thí nghiệm:*

Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng mỏi lên môđun đàn hồi E của mẫu thử. Từ đó

xác định qui luật thay đổi của môđun đàn hồi E theo số chu kỳ ứng suất.

*Trình tự thí nghiệm:*

Mẫu thử bằng thép AISI 1045 có thành phần (%): C = 0,45; Si = 0,30; Mn=0,70; S =0,04. Độ bền kéo  $\sigma_b = 650\text{N/mm}^2$ .

Khi thí nghiệm từng mẫu thử được tiến hành trong điều kiện không thay đổi về tốc độ quay và lực tác dụng.

Chu kỳ lấy mẫu là sau mỗi  $10^5$  vòng quay của mẫu thử. Ứng với 1 vòng quay của mẫu thử ta gọi là 1 chu kỳ ứng suất.

Lấy mẫu đo lần 1:

- **Bước 1:** Lực tác dụng lên mẫu thử  $P = 0$ . Đo độ võng tại 4 điểm cần đo trên mẫu thử (phương pháp đo như hình 5).



Hình 5: Phương pháp đo độ võng trên mẫu

- **Bước 2:** Tăng lực tác dụng lên mẫu thử  $P =$  lực tác dụng khi thí nghiệm mới. Đo độ võng tại 4 điểm cần đo ở bước 1.
- **Bước 3:** Tính độ võng tương đối tại 4 điểm trên = số đo ở bước 1 - số đo ở bước 2. Lưu số liệu trong phần mềm Excel.
- **Bước 4:** Sử dụng chương trình tính E (hình 4) để xác định môđun đàn hồi E. Đây là E của mẫu thử còn mới nguyên (gọi là  $E_1$ ) ứng với số chu kỳ ứng suất  $N_1 = 0$ .
- **Bước 5:** Tiến hành thí nghiệm ứng với lực và tốc độ đã định trước, cho đến khi đạt  $10^5$  vòng quay thì dừng máy khoảng 60 phút để nhiệt độ của mẫu thử trở về bằng nhiệt độ của phòng thí nghiệm (để

loại trừ ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ đến môđun đàn hồi E).

*Lấy mẫu đo lần 2:* Tương tự như khi lấy mẫu đo lần 1, nhưng bắt đầu từ bước 2. Ứng với lấy mẫu đo lần 2 ta được E<sub>2</sub> và N<sub>2</sub>.

Tiến hành tương tự cho các lần lấy mẫu tiếp theo cho đến khi mẫu thử bị gãy do mỏi, ta được n cặp số liệu (N<sub>i</sub>, E<sub>i</sub>).

### 3. Kết quả thí nghiệm:

Ta biểu diễn sự thay đổi của môđun đàn hồi E theo độ tích lũy mỏi (tổn thương tích lũy). Theo Miner: mỗi bậc ứng suất cao hơn giới hạn mỏi đều gây ra một phần tổn thương cho vật liệu. Nếu phần tử kết cấu chịu một tập hợp ứng suất gồm I bậc khác nhau thì độ tích lũy mỏi tổng cộng là:

$$D = \sum_{i=1}^I \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.15)$$

Khi D = 1 thì phần tử kết cấu (mẫu thử) bị phá hủy mỏi.

Với số liệu thí nghiệm, chúng tôi đã xây dựng các đường cong biểu diễn qui luật thay

đổi của môđun đàn hồi E của các mẫu thử theo độ tích lũy mỏi như hình 6.

Từ số liệu trung bình của 5 mẫu thử, ta được đường cong (gọi là đường trung bình). Áp dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất, ta được phương trình biểu diễn sự suy giảm của môđun đàn hồi E theo độ tích lũy mỏi D:

$$y = 252081e^{-0,5165x} \quad (3.16)$$

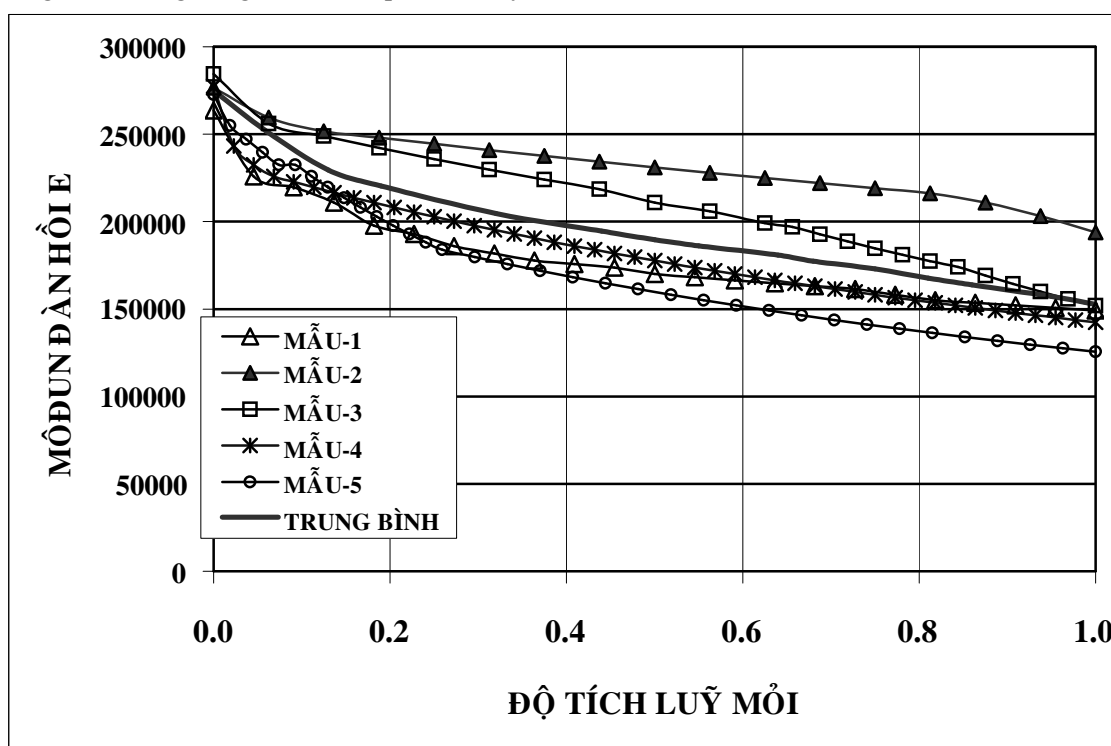
trong đó: y = môđun đàn hồi E (N/mm<sup>2</sup>) của mẫu thử.

x = D = độ tích lũy mỏi.

### 3.4 Dự báo tuổi thọ mỏi

Phương trình (3.16) biểu diễn sự suy giảm của môđun đàn hồi E theo độ tích lũy mỏi D. Trong thí nghiệm hoặc trên trục máy thực, nếu ta đo được độ võng tương đối tại 4 điểm và sử dụng chương trình tính E (như hình 4), ta xác định được môđun đàn hồi tương ứng tại thời điểm cần đo. Theo (3.16) ta được D.

Khi đó tuổi thọ mỏi còn lại của chi tiết máy (tính theo %) = (1 - D)x100%.



Hình 6: Sự thay đổi của môđun đàn hồi E theo độ tích lũy

#### **IV. KẾT LUẬN**

Từ kết quả nghiên cứu ta có một số kết luận sau:

- Ảnh hưởng của hiện tượng mỏi làm suy giảm môđun đàn hồi E của vật liệu chi tiết máy.
- Phương trình (3.16) và số liệu đo đạc trên thực tế là cơ sở để dự báo tuổi thọ mỏi của mẫu thử và chi tiết máy.
- Đây là kết quả mới trong nghiên cứu thực nghiệm, là cơ sở ban đầu để xây dựng phương pháp mới dự báo tuổi thọ mỏi của chi tiết máy, kết cấu.

#### **V. TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Nguyễn Xuân Hùng, Tính toán chính xác kết cấu trên máy tính-Chương trình ADS 2001,NXB KHKT, 2002.
2. Nguyễn Xuân Hùng, Văn Hữu Thịnh, Sử dụng hệ cơ điện để khảo sát ảnh hưởng của hiện tượng mỏi lên tổn thất năng lượng do từ trễ, Tạp chí Phát Triển & Công Nghệ ĐHQG Thành phố HCM, 2004.
3. Nguyễn Xuân Hùng, Văn Hữu Thịnh, The effect of the fatigue on elastic modulus and damping coefficient in the rotating beam fatigue testing, Vietnam University publishers, Hanoi, 2004.
4. Nguyễn Xuân Hùng, Văn Hữu Thịnh, Using an electro-mechanical system to investigate the influence of the fatigue on the energy dissipated per cycle due to the hysteresis damping, Vietnam Journal of Mechanics, Hanoi, 2004.
5. Nguyễn Xuân Hùng, Văn Hữu Thịnh, The influence of the mechanical fatigue on the energy loss of ferromagnetic steel by magnetic method, Vietnam Journal of Mechanics, 2005.