ĐÁNH GIÁ TUỔI THỌ MỎI CỦA LIÊN KẾT HÀN GIÁP MỐI DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN

Đỗ Văn Sĩ*, Bùi Mạnh Cường

Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết và kết quả thực nghiệm xác định tuổi thọ mỏi của liên kết hàn giáp mối khi chịu tải trọng ngẫu nhiên. Tính toán tuổi thọ mỏi của liên kết hàn trong bài báo này được phát triển từ các phương pháp tính tuổi thọ mỏi khác nhau đã biết cho chi tiết chung. Nghiên cứu thực nghiệm xác định tuổi thọ mỏi của liên kết hàn được tiến hành trên hệ thống thử rung LDS V830 với tải trọng tương đương tải đặt vào trong tính toán lý thuyết. Độ chính xác của các phương pháp tính toán khác nhau được đánh giá thông qua so sánh kết quả giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm. Với sai lệch thấp nhất là 5,6% so với thực nghiệm, phương pháp tính toán của Dirlik là phù hợp nhất để tính tuổi thọ mỏi cho liên kết hàn giáp mối chịu tải ngẫu nhiên.

Từ khóa: *Mỏi liên kết hàn; dao động ngẫu nhiên; tuổi thọ mỏi.*

1. Giới thiệu

Thực tế đã ghi nhận rất nhiều hệ thống máy móc, chi tiết bị hỏng hóc ngay cả khi chịu tải chu kỳ nhỏ hơn giới hạn bền rất nhiều, sự hỏng hóc này diễn ra âm thầm và xuất hiện bất ngờ, do vậy gây thiệt hại nghiêm trọng về kinh tế và nguy hiểm tới tính mạng con người, sự phá hỏng này chính là do mỏi [1]. Để tránh được điều đó và nâng cao độ tin cậy trong khai thác, sử dụng, khi thiết kế hệ thống làm việc chịu tải chu kỳ, một trong những bài toán quan trọng và cần thiết là tính toán tuổi thọ mỏi cho chi tiết, hệ thống. Đặc biệt, bài toán đánh giá tuổi thọ mỏi cho liên kết hàn cần phải được quan tâm do trong liên kết hàn tồn tại ứng suất dư và sự tập trung ứng suất. Hơn nữa, tải tác dụng lên các chi tiết thực tế thường là tải ngẫu nhiên. Việc nghiên cứu đánh giá tuổi thọ mỏi của kết cấu chịu tải ngẫu nhiên trong miền tần số đã được đề cập nghiên cứu, tuy nhiên đối với liên kết hàn còn chưa được quan tâm nghiên cứu đầy đủ. Đặc biệt, việc đánh giá tuổi thọ mỏi của liên kết hàn trên cơ sở kết quả thực nghiệm còn chưa được tiến hành [2]. Bài báo trình bày nghiên cứu tính tuổi thọ của liên kết hàn chịu tải ngẫu nhiên trên cơ sở lý thuyết miền tần số, qua đó tác giả tiến hành tính toán tuổi thọ mỏi của liên kết hàn theo công thức của các công trình đã công bố và so sánh với kết quả thực nghiệm được các tác giả đo đạc trên thiết bị LDS V830 [3].

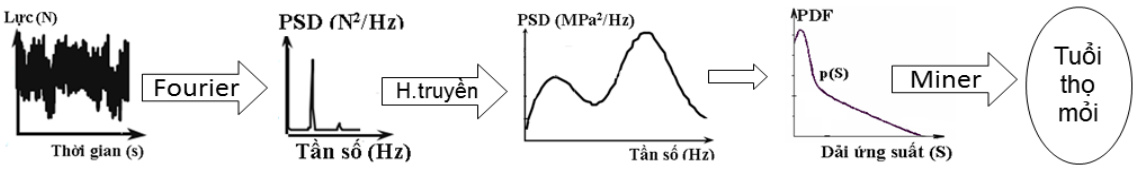
* Email: vansihvkt@gmail.com

https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v15.n02.119

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Mô hình đánh giá mỏi trong miền tần số

Sơ đồ tính tuổi thọ mỏi trong miền tần số được thể hiện như hình 1 [2].



Hình 1. Sơ đồ đánh giá tuổi thọ mỏi trong miền tần số

Tín hiệu về tải ngẫu nhiên được chuyển sang mô tả theo miền tần số bằng thuật toán biến đổi Fourier nhanh (Fast Fourier Transform - FFT). Thông tin về tải được biểu diễn dưới dạng mật độ phổ năng lượng (Power Spectral Density - PSD). PSD biểu diễn rời rạc hóa tải thành các thành phần có tần số xác định, và thể hiện năng lượng mà các thành phần đóng góp vào tải tổng hợp tác dụng lên hệ thống.

$$PSD = \frac{1}{2T_s}\left|FFT\right|^2 \tag{1}$$

trong đó: *FFT* - biên độ phép biến đổi nhanh Fourier; T_s - tần số lấy mẫu.

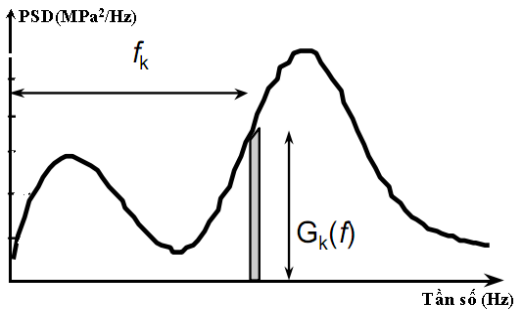
Trong miền tần số, mỗi hệ thống tuyến tính được mô tả bằng các hàm truyền (*Tr*), khi đó đáp ứng của hệ thống ($PSD_{đáp\ ứng}$) được tính là:

$$PSD_{đáp\ ứng} = PSD_{tải}.Tr \tag{2}$$

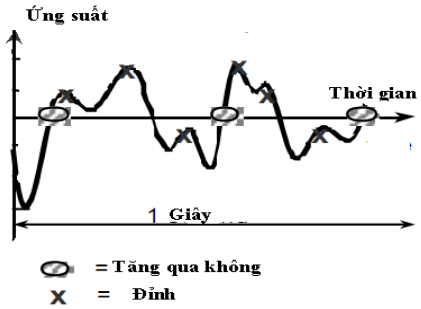
Khi đó mô men thứ *n* của $PSD_{đáp\ ứng}$ là m_n được tính theo công thức:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n G(f)\,df = \sum f_k^n G_k(f)\,\delta f \tag{3}$$

trong đó: *f* - tần số; *n* - số tự nhiên; *G*(*f*) - một dải của $PSD_{đáp\ ứng}$ (Hình 2).



Hình 2. Tính m_n của $PSD_{đáp\ ứng}$



Hình 3. Tần suất E[0] và E[P]

Các thông số thống kê mô tả tính chất tải ngẫu nhiên: $E[0]$ số lần vượt qua 0 (hay giá trị trung bình) theo chiều dương trong một giây, $E[P]$ số đỉnh lồi trong một giây và hệ số bất thường γ của tín hiệu được tác giả [4] đề xuất và tính như sau:

$$E[0]=\sqrt{\frac{m_2}{m_0}};\qquad E[P]=\sqrt{\frac{m_4}{m_2}};\qquad \gamma=\frac{E[0]}{E[P]}=\frac{m_2}{\sqrt{m_o m_4}} \tag{4}$$

Như vậy $\gamma\in[0,1]$. Nếu $\gamma\rightarrow 1$ tải dải hẹp; nếu $\gamma\rightarrow 0$ thì tải dải rộng (Hình 3).

Hàm mật độ xác suất (Probability Density Function - PDF) được xác định từ biểu đồ ứng suất được chuẩn hóa hoặc được suy ra từ $PSD_{đáp\ ứng}$ (Hình 4a).

a) Hàm PDF *b) Dải dS để xác định chu kỳ tải*

Hình 4. Hàm mật độ xác suất của ứng suất

Như vậy, xác suất xuất hiện ứng suất S_i trong dải dS là $p(S_i)dS$. Nếu S_t là số chu trình của tất cả các mức ứng suất thì số chu trình thực tế của mức ứng suất S_i tác dụng lên hệ thống là $n_i = S_t.p(S_i).dS$ (Hình 4b).

Tổng số chu trình N_i tại ứng suất S_i là: $N_i = k/S_i^m$. Trong đó, k và m là các hệ số mô tả vật liệu hay hệ số đường cong mỏi. Do vậy, tổn thất mỏi tích lũy tuyến tính trong kết cấu được tính theo công thức của Palmren-Miner:

$$E[D]=\sum_i\frac{n_i}{N_i}=\sum_i\frac{S_i^m S_t.p(S_i).dS}{k}=\frac{S_t}{k}\int_0^\infty S^m.p(S).dS \tag{5}$$

Theo lý thuyết, kết cấu bị phá hủy nếu $E[D] \geq 1$. Trong thực tế giả định rằng $S_t = E[P].T$, với T là tuổi thọ mỏi của hệ thống tính theo giây, và khi chi tiết làm việc tới hỏng thì $E[D] = 1$. Khi đó, tuổi thọ mỏi của chi tiết được tính:

$$T=\frac{k}{E(P)\int S^m.p(S).dS} \tag{6}$$

Như vậy, để tính được tuổi thọ mỏi T thì phải biết được hàm mật độ xác suất $p(S)$.

2.2. Công thức xác định hàm mật độ xác suất

Các công trình nghiên cứu về lý thuyết và thực nghiệm để tính $p(S)$ đã được đề xuất như:

- Theo J. S. Bendat [5], với giả thiết tải dải hẹp đưa ra công thức tính $p(S)$:

$$p(S) = \left[\frac{S}{4m_0} e^{\frac{-S^2}{8m_0}} \right] \tag{7}$$

- Theo Wirching [6], hiệu chỉnh tổn thất mỏi bởi các hệ số chỉ phụ thuộc vào hệ số đường cong mỏi và độ rộng dải ngẫu nhiên. Khi đó, tổn thất mỏi thu được:

$$E[D]_{\text{Wirching}} = E[D].[a + (1-a)(1-\varepsilon)^c]. \tag{8}$$

với a = 0,926-0,033m; c = 1,587m-2,293; $\varepsilon = \sqrt{1-\gamma^2}$, m là hệ số đường cong mỏi.

- Theo Tunna [7], sải là từ một rãnh tới một đỉnh kế tiếp và được coi là một nửa chu kỳ tải, với cách tính này hàm mật độ xác suất thu được:

$$p(S) = \frac{S}{4\gamma m_0} e^{\frac{-S^2}{8\gamma m_0}} \tag{9}$$

- Theo Hancock, Chaudhury and Dover, Steinberg tính tổng tổn thất mỏi thông qua biên độ ứng suất tương đương S_{eq} theo công thức:

$$E[D] = E[P]\frac{T}{C}(S_{eq})^m \tag{10}$$

+ Đối với Hancock [8], tính toán cho dải hẹp thu được:

$$\left(S_{eq}\right)_{Hancock} = \left(2\sqrt{2m_0}\right)\left[\gamma\Gamma\left(\frac{m}{2}+1\right)\right]^{\frac{1}{m}} \tag{11}$$

+ Với Chaudhury and Dover [9], tính toán cho dải rộng thu được:

$$S_{eq\ C\&D} = (2\sqrt{2m_0})\left[\frac{\varepsilon^{m+2}}{2\sqrt{\pi}}\Gamma\left(\frac{m+1}{2}\right) + \frac{\gamma}{2}\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) + erf^*\ \gamma\ \frac{\gamma}{2}\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)\right]^{\frac{1}{m}} \tag{12}$$

$$erf^*\ \gamma = 0,3012\gamma + 0,4916\gamma^2 + 0,9181\gamma^3 - 2,345\gamma^4 - 3,3307\gamma^5 + \\ + 15,6524\gamma^6 - 10,7846\gamma^7$$

+ Còn theo Steinberg [10]:

$$S_{eq\ Steinberg} = \left[0,683\ 2\sqrt{m_0}^{\ m} + 0,271\ 4\sqrt{m_0}^{\ m} + 0,043\ 6\sqrt{m_0}^{\ m}\right]^{\frac{1}{m}} \tag{13}$$

trong đó, Γ là hàm gama.

- Theo Dirlik [11], với việc sử dụng mô phỏng quá trình ngẫu nhiên bằng máy tính dựa trên kỹ thuật Monte-Carlo, hàm mật độ xác suất được tính theo công thức:

$$p\ S = \frac{\frac{D_1}{Q}e^{\frac{-Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2}e^{\frac{-Z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{\frac{-Z^2}{2}}}{2\sqrt{m_0}} \tag{14}$$

trong đó: $Z = S/(2\sqrt{m_0})$; D_1, D_2, D_3, Q và R là các hàm theo m_0, m_1, m_2, m_4 và được tính theo các công thức:

$$x_m = \frac{m_1}{m_0}\sqrt{\frac{m_2}{m_4}};\ \ \gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}};\ D_1 = \frac{2\ x_m - \gamma^2}{1+\gamma^2};\ \ R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1-\gamma-D_1+D_1^2}; \tag{15}$$

$$D_2 = \frac{1-\gamma-D_1+D_1^2}{1-R};\ D_3 = 1-D_1-D_2;\ Q = \frac{1{,}25\ \gamma - D_3 - D_2 R}{D_1}.$$

3. Tính toán và thí nghiệm

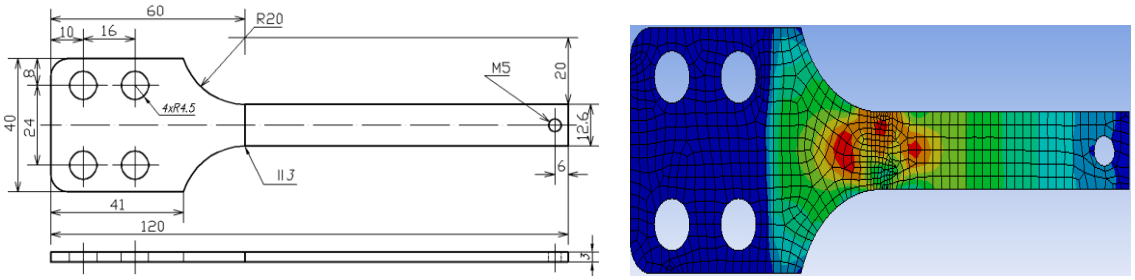
Mẫu dùng để tính toán và thí nghiệm như hình 5. Vật liệu chế tạo mẫu là thép CT34 có thành phần thể hiện trong bảng 1, mẫu được hàn mặt với thông số quá trình hàn trong bảng 2.

Bảng 1. Vật liệu mẫu hàn

Mác	C	Si	Mn	P(max)	S(max)	σ_y(MPa)	σ_u(MPa)
CT34	0,18	0,20	0,5	0,045	0,045	210	340

Bảng 2. Thông số hàn TIG

Que hàn	Cường độ dòng điện (A)	Hiệu điện thế (V)	Vận tốc hàn (cm/phút)
ER70S-6	150	18	25-30

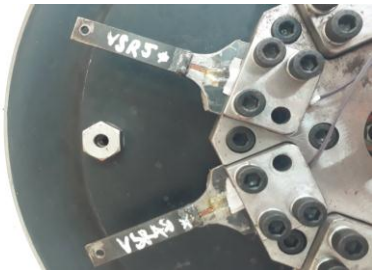


a) Hình dạng mẫu được chế tạo *b) Ứng suất mô phỏng trên ANSYS*

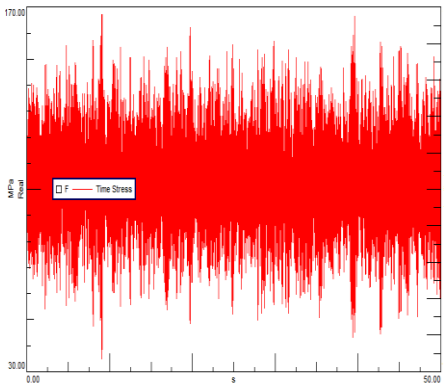
Hình 5. Mẫu hàn để tính và để thí nghiệm

3.1. Tính toán theo công thức

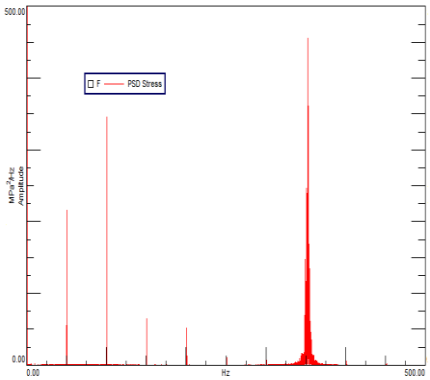
Tải ngẫu nhiên dùng để tính tuổi thọ mỏi cho các công thức (7) đến (14) và để tiến hành thí nghiệm lấy theo tiêu chuẩn IEC 61373 [12]. Tem đo biến dạng được dán tại vị trí chân đường hàn (Hình 6) theo kết quả mô phỏng hình 5b. Sử dụng thiết bị LMS [13] để thu tín hiệu tải trên mẫu qua tem đo biến dạng, sau đó tín hiệu này được cộng thêm lượng ứng suất dư được xác định theo [14] (Hình 7a). Biến đổi $PSD_{đáp\ ứng}$ của liên kết hàn chịu tải ngẫu nhiên theo công thức (2) thu được kết quả như hình 7b. Các thông số đường cong mỏi của liên kết hàn lấy theo [1].



Hình 6. Dán tem đo biến dạng trên mẫu



a) Ứng suất tại vị trí khảo sát



b) $PSD_{ứng\ suất}$

Hình 7. Tải ngẫu nhiên

Tính toán tuổi thọ mỏi theo các công thức (7) đến (14) được thực hiện thông qua chương trình các tác giả viết trên MATLAB, kết quả thu được tuổi thọ mỏi của mẫu được thể hiện trên bảng 3.

Bảng 3. Kết quả tính toán theo các công thức

Phương pháp tính	Tuổi thọ mẫu (s)	Phương pháp tính	Tuổi thọ mẫu (s)
Steinberg	44405	Chaudhury and Dover	155930
J.S. Bendat	47382	Tunna	87224
Wirching	57292	Dirlik	123720
Hancock	225690		

3.2. Thí nghiệm xác định tuổi thọ của mẫu

Mẫu được thí nghiệm trên máy rung LDS để tiến hành thí nghiệm mỏi, đầu rung thực hiện rung để tạo tải theo tiêu chuẩn IEC 61373 như phần 3.1 (Hình 8).

Hình 8. Mẫu được rung thử mỏi

Hình 9. Mẫu bị phá hủy do mỏi

Thí nghiệm đồng thời với 6 mẫu trên đầu rung LDS, đến khi quan sát thấy mẫu bị phá hủy do mỏi (mẫu gãy rời) thì thời gian được ghi nhận cho từng mẫu (Hình 9). Kết quả được thu thập và thể hiện qua bảng 4.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm mỏi, tính theo giây (s)

Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5	Mẫu 6	Trung bình
118404	125604	147600	126072	140904	128520	**131832**

Kết quả thu được theo tính toán trên bảng 3 và kết quả thí nghiệm trên bảng 4 cho thấy, các phương pháp tính toán tuổi thọ mỏi của cùng một liên kết hàn, với cùng một tải trọng có sự sai khác nhau lớn. Kết quả so sánh được thể hiện trên bảng 5.

Bảng 5. So sánh kết quả tính tuổi thọ mỏi mẫu theo tính toán và theo thí nghiệm (%)

Bendat	Wirching	Hancock	Chaudhury & Dover	Steinberg	Tunna	Dirlik
47,38	56,31	72,05	24,77	66,14	33,49	05,67

Kết quả tính toán theo các công thức có sai khác so với kết quả thí nghiệm, lớn nhất là 72,05% và thấp nhất là 5,67%. Trong các phương pháp tính toán lý thuyết, phương pháp do tác giả Dirlik đề xuất có kết quả tính toán sát với kết quả thực nghiệm nhất (sai khác 5,67%). Sự sai lệch lớn này là do các tác giả J.S. Bendat và Hancock tính toán cho dải hẹp, còn tác giả Wirching không kể tới ảnh hưởng của ứng suất trung bình, các tác giả Chaudhury & Dover và Tunna tính toán cho dải rộng nhưng phương pháp tính sải ứng suất và đếm chu kỳ tải chưa sát với tính ngẫu nhiên của tải, tác giả Dirlik dựa trên kỹ thuật tạo biến ngẫu nhiên phản ánh sát với tính chất ngẫu nhiên của tải thực, do vậy kết quả phản ánh khá sát với thí nghiệm.

4. Kết luận

Bài báo đã tính toán được tuổi thọ mỏi cho liên kết hàn chịu tải ngẫu nhiên trong miền tần số, và tiến hành thực nghiệm kiểm tra kết quả. Trong các tính toán này ứng suất dư do hàn đã được kể tới, tải trọng dùng cho tính toán và thực nghiệm thu được trực tiếp trên mẫu, điều này làm cho việc tính toán sát với thực tế nhất.

Tải ngẫu nhiên theo tiêu chuẩn được tạo ra trên hệ thống LDS, tín hiệu tải trên mẫu được thu và xử lý trực tiếp trên máy LMS nên quá trình tính toán ngắn ngọn và tin cậy, $PSD_{đáp\ ứng}$ được lấy từ máy LMS và đưa vào chương trình tính toán tác giả viết trên nền MATLAB để tính tuổi thọ theo các công thức nên đảm bảo về độ chính xác.

Tính toán theo công thức (4), thu được hệ số bất thường của tải $\gamma = 0,2$, điều này chứng tỏ tải là dải rộng, và phương pháp tính toán của Dirlik có kết quả sát với thí nghiệm nhất. Kết quả này định hướng lựa chọn phương pháp tính toán tuổi thọ mỏi nào cho liên kết hàn chịu tải ngẫu nhiên là phù hợp với thực tế nhất.

Tài liệu tham khảo

1. Tom Lasen (2006). *Fatigue Life Analyses of Welded Structures*. ISTE Ltd., Great Britain, 407p. ISBN 10: 1-905209-54-1, ISBN 13: 978-1-905209-54-5.
2. N. W. M. Bishop (1989). Fatigue life prediction from power spectral density data. *Environmental Engineering, 2*, pp. 11-19.
3. LDS V830 Shaker Systems Medium-Force Electrodynamic Vibration Systems.
4. S. O. Rice (1954). *Mathematical Analysis of Random Noise*. Selected Papers on Noise and Stochastic Processes, Dover, New York.
5. Bendat, J. S. (1964). *Probability functions for random responses*. NASA report on contract NAS-4590.
6. P. H. Wirsching, M. C. Light (1980). Fatigue under wide band random loading. *J. Struc. Div. ASCE*, pp. 1593-1607.
7. J. M. Tunna (1986). Fatigue life prediction for Gaussian random loads at the design stage. *Fatigue Fracture Engineering, Mat. Structure, 9*(3), pp. 169-184.
8. C. P. Kam (1988). Fast fatigue assessment procedure for offshore structures under random stress history. *Proc. Instn. Civil Engineers*, pp. 689-700.
9. G. K. Chaudhury and W. D. Dover (1985). Fatigue Analysis of Offshore Platforms Subject to Sea Wave Loading. *Int. J. Fatigue, 7*(1), pp. 13-19.
10. Steinberg, D. S. (2000). *Vibration analysis for electronic equipment*, 3rd edn. Wiley, New York.
11. Turan Dirlik (1985). *Application of computers in fatigue analysis.* The University of Warwick, England, 243p.

12. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 7699-2-64-2013 (IEC 60068-2-64-2008). *Rung ngẫu nhiên băng tần rộng và hướng dẫn*. Hà Nội, 2013.
13. LMS Test.Lab. The integrated solution for noise and vibration testing.
14. Wei Shen, Renjun Yan, Xiaoxing Wang, Enqian Liu, and Lin Xu (2017). Fatigue Life Evaluation of Welded Joints Considering the Local Multiaxial Stress/Strain States and Numerically Determined Residual Stresses/Strains. *International Journal of Steel Structures*, *17*(1), pp. 139-153. DOI 10.1007/s13296-015-0162-5.

EVALUATING FATIGUE LIFE OF THE BUTT WELDED JOINTS UNDER THE EFFECT OF RANDOM LOADING

Abstract: *This paper presents the calculation results from theoretical models and experimental results in determining the fatigue life of butt welded joints subjected to random loads. The theoretical calculating the fatigue life of the butt welded joints was developed on the basis of different methods for calculating of common details published previously. Experiments on determining the butt welded joints' fatigue life were carried out on the LDS V830 vibration test system with the load equivalent to the load used in theoretical calculation. The accuracy of different calculation methods was assessed by comparison of the calculation results and experiment results. With the lowest deviation of 5.6% compared to the experiment results, Dirlik's calculation method is the most suitable to calculate fatigue life of butt welded joints subjected to random loads.*

Keywords: Welded fatigue; random vibration; fatigue life.

Ngày nhận bài: 20/3/2019; *Ngày nhận bản sửa lần cuối:* 24/9/2019; *Ngày duyệt đăng:* 23/6/2020

❑