

Đánh giá khả năng tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu hàn khi được xử lý bằng phương pháp rung khử ứng suất dư

Bùi Mạnh Cường*, Nguyễn Văn Dương

Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

Ngày nhận bài 17/10/2017; ngày chuyển phản biện 23/10/2017; ngày nhận phản biện 20/11/2017; ngày chấp nhận đăng 28/11/2017

Tóm tắt:

Ứng suất dư sinh ra trong quá trình hàn phần lớn là các ứng suất có hại, làm cong vênh, nứt gãy chi tiết, đặc biệt làm giảm tuổi thọ mỏi của kết cấu. Về nguyên tắc, khi loại bỏ được các ứng suất dư này sẽ làm tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu hàn, tuy nhiên khi thực hiện quá trình khử ứng suất dư bằng phương pháp rung động, kết cấu lại phải chịu tác động của tải trọng cưỡng bức có cường độ lớn với tần số nhất định, điều này sẽ gây ra tổn thương mới cho kết cấu và có thể làm giảm tuổi thọ của chúng. Về vấn đề này, các nghiên cứu trong và ngoài nước rất ít được công bố. Trong bài báo này, các tác giả trình bày kết quả nghiên cứu, khảo sát và so sánh mức độ thay đổi tuổi thọ mỏi của kết cấu ứng dụng trên chi tiết trục căng xích máy xúc ĐK-5A sau khi hàn phục hồi và được xử lý khử ứng suất dư bằng phương pháp rung động.

Từ khóa: Kết cấu hàn, rung khử ứng suất dư, ứng suất dư.

Chỉ số phân loại: 2.3

Evaluating the possibility of increasing the fatigue life of welded structures by the vibratory residual stress relief method

Manh Cuong Bui*, Van Duong Nguyen

Faculty of Mechanical Engineering, Military Technical Academy

Received 17 October 2017; accepted 28 November 2017

Abstract:

Residual stresses produced in the welding process mostly are harmful ones which make the welded structures be bent and cracked, and specially reduce the life of the structures. Applying the residual stress relief method will increase the age of the connectors; however, when performing the process of balancing with vibration, the connectors must be influenced by the load at a high frequency. This will damage the connectors and may reduce their age. However, domestic and foreign research on this issue is rarely published. In this paper, the authors present the results of research, investigation and comparison of the change in the fatigue life of the structures applied on the ĐK-5A contact shaft after restoration welding and being processed by the vibratory residual stress relief method.

Keywords: Residual stress, vibratory residual stress relieving, welded structures.

Classification number: 2.3

Đặt vấn đề

Khử ứng suất dư bằng phương pháp rung động có những ưu điểm nổi trội mà các phương pháp truyền thống khác như già hóa tự nhiên, ủ... không có được. Đây là phương pháp nhanh, tiết kiệm năng lượng và không làm thay đổi màu sắc, thẩm mỹ, tính chất vật liệu của chi tiết. Đặc biệt, phương pháp này cho phép khử ứng suất dư cho kết cấu có khối lượng và kích thước lớn mà phương pháp truyền thống như ủ khử ứng suất dư không thực hiện được. Vì vậy, trong những năm gần đây phương pháp khử ứng suất dư trong kết cấu bằng rung động thu hút sự quan tâm nghiên cứu của rất nhiều nhà khoa học trên thế giới, đã có những nghiên cứu đề cập và làm sáng tỏ ảnh hưởng của các thông số công nghệ như tần số, cường độ đặt lực kích thích đến hiệu quả rung khử ứng suất dư trong kết cấu [1, 2]. Tuy nhiên, một trong những yếu tố cơ bản, quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng ứng dụng của phương pháp này trong thực tế kỹ thuật là mức độ thay đổi tuổi thọ của kết cấu khi được xử lý bằng

*Tác giả liên hệ: Email: manhcuongkck@gmail.com

phương pháp rung khử ứng suất dư lại rất ít được nghiên cứu và đề cập. Chính vì vậy, việc nghiên cứu, khảo sát và so sánh mức độ thay đổi tuổi thọ môi của kết cấu ứng dụng trên các chi tiết thực tế có ý nghĩa quan trọng trong việc ứng dụng phương pháp này vào thực tiễn sản xuất.

Mô hình tích lũy tổn thương môi và tuổi thọ môi của kết cấu chịu ảnh hưởng của quá trình rung khử ứng suất dư

Để đánh giá tuổi thọ môi của kết cấu chịu ảnh hưởng của quá trình rung khử ứng suất dư, ta sử dụng mô hình tích lũy tổn thương môi tuyến tính do Miner đề xuất [3-5]. 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 trình chịu tải của kết cấu. Tổng tích lũy tổn thương môi đối với chi tiết khi được xử lý bằng phương pháp rung khử ứng suất dư và khi không được rung khử ứng suất dư lần lượt được xác định theo công thức (1) và (2).

$$D_l = D_r + D_m \quad (1)$$

$$D_0 = D_{\sigma m0} \quad (2)$$

Trong đó, $D_{\sigma m1}$ là tổn thương môi của kết cấu trong quá trình làm việc sau khi được rung khử ứng suất dư, có ứng suất trung bình (ứng suất dư) ứng với mỗi chu trình chịu tải là σ_{m1} ; $D_{\sigma m0}$ là tổn thất môi của kết cấu trong quá trình làm việc khi không được rung khử ứng suất dư, có ứng suất trung bình (ứng suất dư) ứng với mỗi chu trình chịu tải là σ_{m0} ; D_r , $D_{\sigma m1}$ và $D_{\sigma m0}$ lần lượt được xác định theo các công thức (3), (4), (5).

$$D_r = \sum_{i=1}^R \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

$$D_{\sigma m1} = \sum_{i=1}^L \frac{n_{i\sigma m1}}{N_{i\sigma m1}} \quad (4)$$

$$D_{\sigma m0} = \sum_{i=1}^L \frac{n_{i\sigma m0}}{N_{i\sigma m0}} \quad (5)$$

Trong đó, N_i là số chu trình tới phá hỏng theo đường cong môi khi biên độ ứng suất ở mức i sinh ra do quá trình rung khử ứng suất dư; n_i là số chu trình 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 trình tới phá hỏng theo đường cong môi 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 rung), σ_{m0} (ứng suất dư sinh ra trong kết cấu hàn không được xử lý rung khử ứng suất dư); $n_{i\sigma m1}$, $n_{i\sigma m0}$ lần lượt là số chu trình 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 trình tới phá hỏng $N_{i\sigma m1}$, $N_{i\sigma m0}$ được xác định trên cơ sở đường cong môi hiệu chỉnh khi kể đến yếu tố ảnh hưởng của ứng suất trung bình σ_{mj} , σ_{m0} làm giảm giới hạn bền môi của kết cấu theo giả thuyết của Gerber [4, 5].

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

Trong đó, σ_{-li} được xác định theo giả thuyết của Gerber [5].

$$\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-li}} = 1 - \left(\frac{\sigma_{mj}}{\sigma_B} \right)^2 \quad (7)$$

Hay:

$$\sigma_{-li} = \frac{\sigma_{ai}}{1 - \left(\frac{\sigma_{mj}}{\sigma_B} \right)^2} \quad (8)$$

Ở đây, σ_{mj} ($j = 0, 1$) là ứng suất trung bình hay ứng suất dư trong kết cấu khi không được xử lý rung khử ứng suất dư và khi được rung khử ứng suất dư; σ_{ai} là biên độ ứng suất trong mỗi chu trình chịu tải i ; σ_B là giới hạn bền kết cấu; C là hệ số đường cong môi.

Kết cấu trong quá trình làm việc được xem là bị phá hỏng vì mỗi khi tổng tổn thất môi tích lũy bằng 1 [3-5], 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:

$$D_r + D_{\sigma m1} = 1 \quad (9)$$

$$D_{\sigma m0} = 1 \quad (10)$$

Từ điều kiện (9), (10), ta xác định được tuổi thọ môi trung bình (số chu trình 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 công thức như sau:

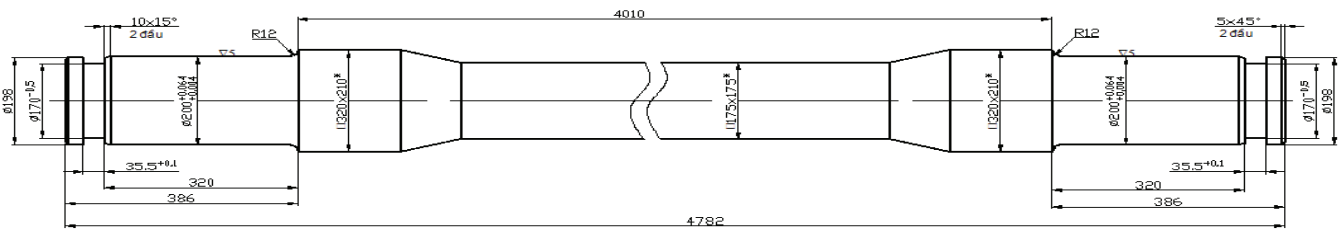
$$\bar{N}_r = (1 - D_r) \frac{\sum_{i=1}^L i \cdot m}{\sum_{i=1}^L i \cdot m} \quad (11)$$

$$\bar{N}_0 = \frac{\sum_{i=1}^L n_{i\sigma m0}}{\sum_{i=1}^L \frac{n_{i\sigma m0}}{N_{i\sigma m0}}} \quad (12)$$

Các công thức (11), (12) là cơ sở để đánh giá khả năng tăng tuổi thọ môi của kết cấu nhờ phương pháp rung khử ứng suất dư.

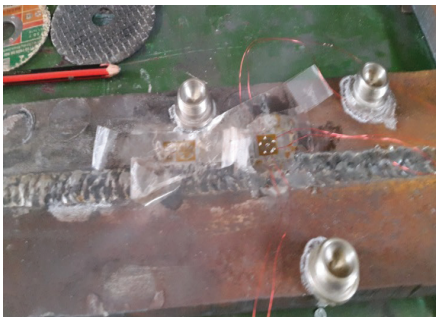
Kết quả thực nghiệm và thảo luận

Để minh họa vấn đề đánh giá khả năng tăng tuổi thọ môi của kết cấu dạng hàn khi được xử lý bằng phương pháp rung khử ứng suất dư, ta xem xét bài toán rung khử ứng suất dư cho trục căng xích máy xúc ЭКТ-5А được phục hồi bằng phương pháp hàn ngỗng trục phải tại vị trí R12 vào thân trục (hình 1). Trục căng xích máy xúc làm từ thép 40X, có mô đun đàn hồi $E = 2,17 \cdot 10^5$ Mpa; mật độ $\rho = 7,85$ kg/m³; $\sigma_B = 610$ MPa; $\sigma_{-1} = 430$ Mpa [3, 4].



Hình 1. Trục căng xích máy xúc ЭКГ-5А.

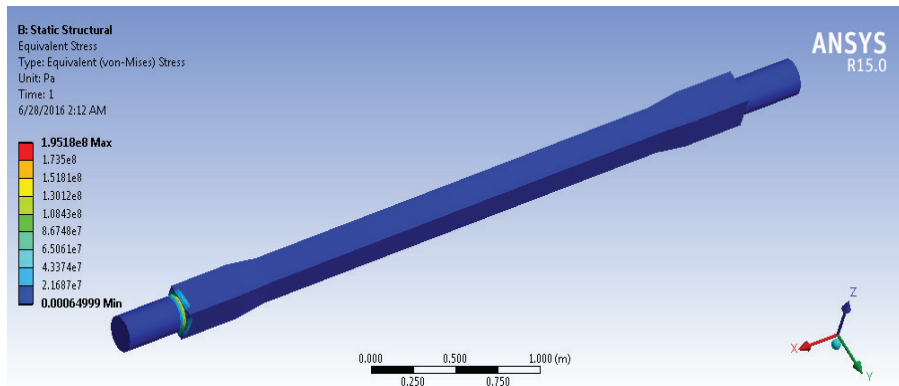
Sự hình thành ứng suất dư do hàn phục hồi và quá trình rung khử ứng suất cho trục căng xích máy xúc ЭКГ-5А được phân tích trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm ANSYS của Mỹ, được đo kiểm tra lại bằng phương pháp khoan lỗ theo tiêu chuẩn ASTM E837-01 [6] trên thiết bị và tem đo chuyên dụng của nhóm nghiên cứu (hình 2). Kết quả phân bố ứng suất dư do hàn phục hồi được thể hiện trên hình 3. Bảng 1 thể hiện kết quả phân tích ứng suất dư và đo kiểm tại vị trí sát cạnh mỗi hàn. Dựa vào bảng 1 ta thấy, kết quả phân tích và đo kiểm khá gần nhau, sai số không quá 10%.



Hình 2. Tem đo ứng suất dư.

Bảng 1. Ứng suất dư (Von-Mises) (MPa) tại cạnh mép hàn trên trục căng xích máy xúc ЭКГ-5А trước khi rung khử ứng suất dư.

Kết quả mô phỏng	Kết quả đo theo phương pháp khoan lỗ theo tiêu chuẩn ASTM E837-01	Sai số (%)
195,3	210,9	8%



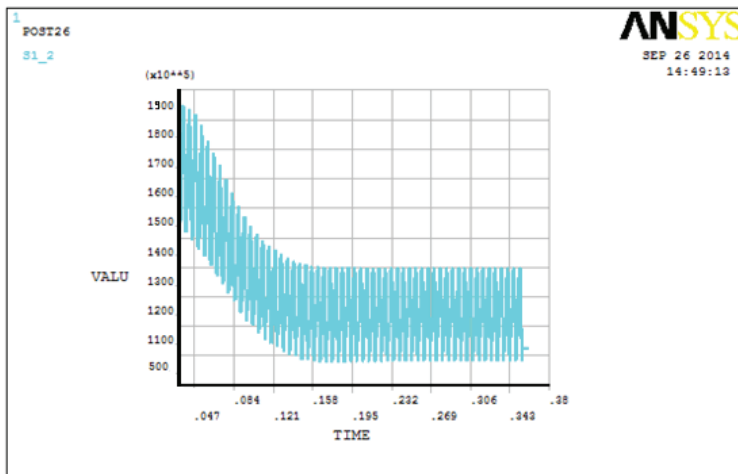
Hình 3. Phân bố ứng suất dư trên trục căng xích sau khi hàn phục hồi.



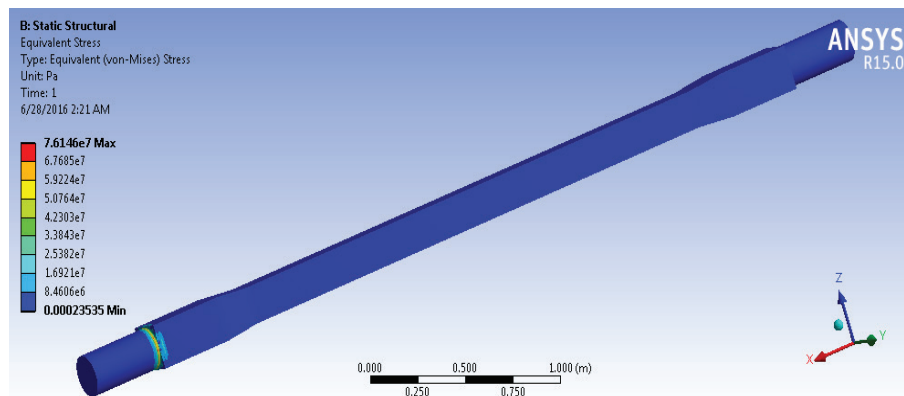
Hình 4. Rung khử ứng suất dư cho chi tiết trục căng xích.

Quá trình rung khử ứng suất dư cho trục căng xích được tiến hành theo khuyến cáo chung của phương pháp rung khử ứng suất dư trong khoảng thời gian 5 phút, tại tần số cộng hưởng của kết cấu 30 Hz (hình 4). Sự thay đổi ứng suất theo thời gian tại điểm cạnh mép hàn trong quá trình rung khử ứng suất dư được thể hiện trên hình 5.

Từ đồ thị hình 5 ta thấy, quá trình tích thoát ứng suất dư thực sự chỉ xảy ra trong vài trăm chu kỳ đầu, sau đó ổn định và không đổi. Phân bố ứng suất dư trên trục căng xích sau quá trình rung khử được thể hiện trên hình 6. Trục căng xích sau khi rung khử ứng suất dư được đo kiểm bằng tem đo và thiết bị chuyên dụng của nhóm tác giả tại cạnh mép hàn, gần vị trí đo trước



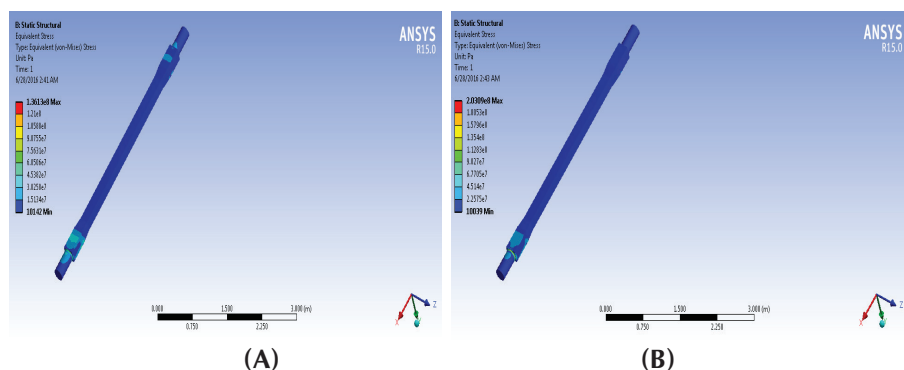
Hình 5. Sự thay đổi ứng suất theo thời gian tại điểm cạnh mép hàn trong quá trình rung khử ứng suất dư.



Hình 6. Phân bố ứng suất dư trên trục căng xích sau khi rung khử ứng suất dư.

Bảng 2. Ứng suất dư (Von-Mises) (MPa) tại cạnh mép hàn trên trục căng xích sau khi rung khử ứng suất dư.

Kết quả mô phỏng	Kết quả đo theo phương pháp khoan lỗ theo tiêu chuẩn ASTM E837-01	Sai số (%)
76,1	68,1	-10%



Hình 7. Phân bố ứng suất trên trục căng xích trong quá trình làm việc trong 2 trường hợp sau khi được rung khử ứng suất dư (A) và khi không được rung khử ứng suất dư (B).

đó, kết quả mô phỏng và đo kiểm được thể hiện trên bảng 2.

Trục căng xích sau khi hàn phục hồi phải làm việc trong điều kiện chịu uốn dưới tác dụng của tải trọng dạng mạch động ở 2 đầu trục với cường độ lực là 40.000 N, phân bố ứng suất trong quá trình làm việc của trục căng xích được thể hiện trên hình 7.

Dựa vào sự thay đổi ứng suất theo thời gian trong quá trình rung khử ứng suất dư (hình 5) và ứng suất sinh ra trong quá trình trục căng xích làm việc (hình 7), nhóm nghiên cứu tiến hành tính toán tuổi thọ môi cho trục căng xích máy xúc ЭКГ-5А trên cơ sở sử dụng tổ hợp chương trình DAFLAPS [5, 7, 8]. Đây là tổ hợp chương trình đã được nhóm tác giả nghiên cứu, xây dựng tại phòng thí nghiệm cơ điện tử thuộc Trường Đại học Kỹ thuật tổng hợp quốc gia Irkutsk (Liên bang Nga) và đã được cấp bằng sở hữu trí tuệ [7]. Kết quả phân tích tuổi thọ môi cho trục căng xích trong hai trường hợp khi trục căng xích được xử lý bằng công nghệ rung khử ứng suất dư và khi không được rung khử ứng suất dư thể hiện trên bảng 3. Kết quả tính toán ta thấy rằng tuổi thọ môi của trục căng xích có thể tăng lên trên 30% khi được xử lý bằng công nghệ rung khử ứng suất dư trong thời gian 5 phút, tuy nhiên khi tăng thời gian rung khử ứng suất dư lên 35 phút tuổi thọ của nó lại giảm (bảng 4).

Bảng 3. Tuổi thọ môi (số chu trình làm việc đến hỏng) của trục căng xích máy xúc ЭКГ-5А khi rung khử ứng suất dư và khi không được rung khử ứng suất dư - thời gian rung 5 phút.

Khi rung khử ứng suất dư	Khi không rung khử ứng suất dư	Sai số (%)
4,37E+09	2,86E+09	34,6%

Bảng 4. Tuổi thọ mỗi (số chu trình làm việc đến hỏng) của trục căng xích máy xúc ЭКГ-5A khi rung khử ứng suất dư và khi không được rung khử ứng suất dư trong thời gian rung 35 phút.

Khi rung khử ứng suất dư	Khi không rung khử ứng suất dư	Sai số %
1,92E+09	2,86E+09	-48%

Kết luận

Ứng suất dư sinh ra trong quá trình hàn phần lớn là có hại, làm giảm tuổi thọ của kết cấu. Về nguyên tắc, khi giảm được các ứng suất dư sinh ra trong quá trình hàn sẽ làm tăng tuổi thọ cho kết cấu. Một trong những phương pháp có thể làm tăng tuổi thọ cho kết cấu dạng hàn chính là ứng dụng công nghệ rung khử ứng suất dư. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, ứng dụng công nghệ rung khử ứng suất dư đối với kết cấu dạng hàn có thể làm tăng tuổi thọ cho chúng, trong trường hợp này có thể làm tăng tuổi thọ cho trục căng xích máy xúc ЭКГ-5A đến 34%. Tuy nhiên, từ kết quả nghiên cứu cũng cho thấy thời gian thực hiện rung quá

lâu không những không làm giảm ứng suất dư mà còn làm giảm tuổi thọ của kết cấu, thậm chí gây phá hỏng môi cho kết cấu ngay trong quá trình rung khử ứng suất dư.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyen Van Duong, Bui Manh Cuong, Ta Dinh Xuan (2014), "Study on the Mechanical Principle of Residual Stress Relieving in Workpiece by Vibratory Force", *Proceedings of the International Conference on Engineering Mechanics and Automation-ICEMA3*, ISBN: 978-604-913-367-1, pp.260-265.

[2] X.C. Zhao, Y.D. Zhang (2008), "Simulation of vibration stress relief after welding based on fem", *Acta Metallurgica Sinica*, **21**(4), pp.289-294.

[3] Серенсен, Когаев, Шнейдерович (1975), "Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность", *Руководство и справочное пособие*, Машиностроение,

москва, **4**(1), п.488.

[4] В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков (1985), *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*, М. Машиностроение.

[5] Буй Мань Кыонг, О.В. Репецкий (2011), *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011613210, Схематизация случайных процессов нагружения и расчет на усталостную прочность (DAFLAPS_Fatiguelife)*, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

[6] American Society for Testing and Materials, *ASTM Standard E837-01: Determining Residual stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method*.

[7] О. Репецкий., Буй Мань Кыонг (2012), *Прогнозирование усталостной прочности рабочих лопаток турбомашин*, Дюссельдорф: Palmarium Academic Publishing.

[8] Bùi Mạnh Cường (2013), "Xác định các đặc tính bền mỏi và dự đoán tuổi thọ mỏi của các chi tiết máy và kết cấu trong thời kỳ thiết kế trên cơ sở phương pháp số và tổ hợp chương trình", *Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 9*, Nhà xuất bản Bách khoa, Hà Nội.