

# Ảnh hưởng của tần số lực cưỡng bức đến hiệu quả khử ứng suất trong công nghệ rung khử ứng suất dư

Nguyễn Văn Dương\*, Bùi Mạnh Cường, Nguyễn Đình Chiến, Nguyễn Tài Hoài Thanh

Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

Ngày nhận bài 25/11/2016, ngày chuyển phản biện 28/11/2016, ngày nhận phản biện 12/12/2016, ngày chấp nhận đăng 20/12/2016

Tần số lực cưỡng bức là thông số công nghệ quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả của quá trình rung khử ứng suất dư. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm ANSYS cho chi tiết hàn dạng thanh cho thấy rung khử ứng suất dư tại tần số cộng hưởng cho mức độ biến dạng của chi tiết lớn hơn và do vậy hiệu quả khử ứng suất dư tốt hơn so với rung ngoài tần số cộng hưởng. Thử nghiệm trên chi tiết mẫu hàn với thiết bị rung khử ứng suất dư HV21 và đo ứng suất dư bằng phương pháp khoan lỗ với thiết bị RS200 cũng khẳng định quy luật ảnh hưởng trên của tần số rung. Các kết quả nghiên cứu có tác dụng định hướng cho việc lựa chọn tham số công nghệ trong ứng dụng phương pháp rung khử ứng suất dư cho các chi tiết trong sản xuất.

**Từ khóa:** lực cưỡng bức, rung khử ứng suất dư, ứng suất dư.

**Chỉ số phân loại 2.3**

## Effects of applied load's frequency on the stress reduction result of vibration stress relieving technology

Summary

Frequency of applied load is an important technological parameter affecting the result of vibration stress relieving process. Simulation results with ANSYS package on welded sample show that resonant vibration creates higher deformation in samples; therefore, it can give better results in comparison with non-resonant vibration. The experiment on welded samples with vibration stress relief equipment HV21 and the residual stress measurement with RS200 system also confirm this rule. The obtained results have been used as recommendations for selecting technological parameters in application of vibration stress relieving for work pieces in reality.

**Keywords:** applied load, residual stress, vibration stress relieving.

**Classification number 2.3**

## Đặt vấn đề

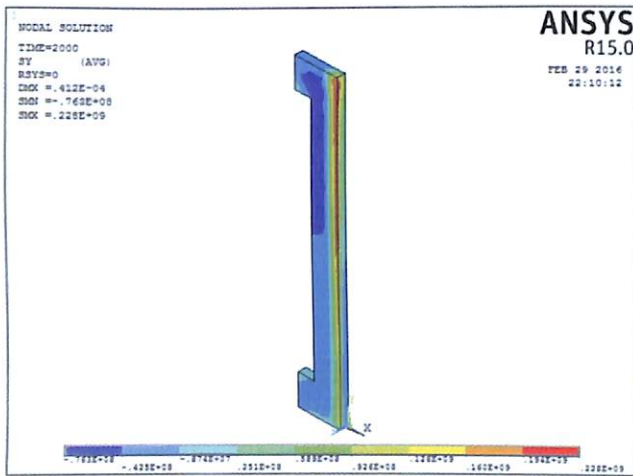
Khử ứng suất dư, làm ổn định hình dạng, kích thước cho kết cấu bằng phương pháp rung động có những ưu điểm nổi trội mà các phương pháp truyền thống khác như già hóa tự nhiên, ủ... không có được. Cụ thể, đây là phương pháp nhanh, tiết kiệm năng lượng và không làm thay đổi màu sắc, thẩm mỹ, tính chất vật 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 là ủ khử ứng suất dư không thực hiện được [1-3]. Bản chất của phương pháp là dùng lực cưỡng bức tuần hoàn tác dụng lên chi tiết, gây biến dạng vi mô dẫn đến tích thoát ứng suất dư [4, 5]. Để ứng dụng công nghệ này cần phải quan tâm 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. Tác giả [6] đã mô phỏng ảnh hưởng của các tham số công nghệ đến quá trình rung khử ứng suất dư cho chi tiết bánh đà với ứng suất dư tạo bằng phương pháp đặt tải cơ học. Nghiên cứu này phát triển nghiên cứu ảnh hưởng của tham số công nghệ rung cho chi tiết hàn với ứng suất dư, dạng chi tiết phổ biến trong thực tế. Đồng thời, tiến hành nghiên cứu thực nghiệm và ứng dụng các kết quả nghiên cứu trong thực tế sản xuất.

\*Tác giả liên hệ: Email: duongdmse@gmail.com

**Mô phỏng số quá trình rung khử ứng suất dư**

Mô hình hình học được khảo sát là chi tiết có cấu tạo từ 2 thanh thép hàn với nhau bằng kỹ thuật hàn MIG. Mỗi thanh có dạng hình chữ nhật với kích thước 600x100x10 mm và được hàn dọc theo cạnh dài. Vật liệu dùng phân tích là loại thép CT38 với các chỉ tiêu cơ tính:  $E = 210 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,33$ ;  $\sigma_{ch} = 210 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_R = 380 \text{ MPa}$ . Mô phỏng được thực hiện trên phần mềm ANSYS với mô hình vật liệu biến cứng động học với modul tiếp tuyến 6.800 MPa.

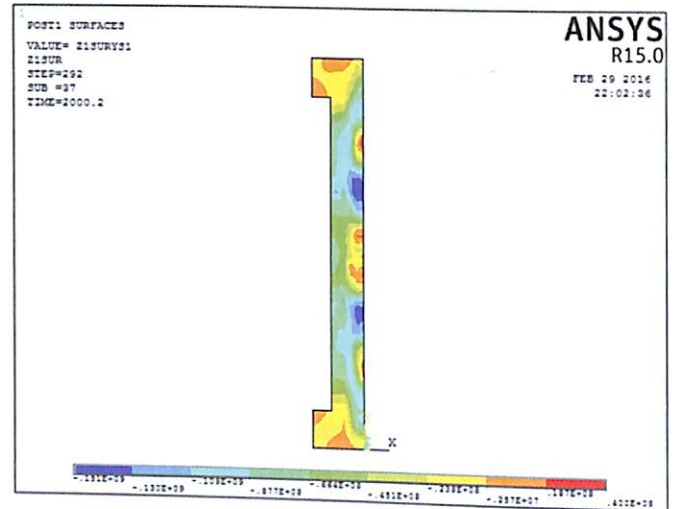
Mô phỏng ứng suất dư khi hàn gồm 2 bước: xác định trường nhiệt độ của chi tiết khi hàn, xác định ứng suất dư hàn từ dữ liệu trường nhiệt độ và cơ tính của vật liệu thay đổi theo nhiệt độ. Trong đó, phân bố dòng nhiệt trên bề mặt chi tiết hàn được giả thiết theo mô hình phân bố chuẩn xung quanh nguồn nhiệt hàn [7]. Do tính đối xứng của chi tiết, để tiết kiệm dung lượng tính toán, mô phỏng được thực hiện cho một nửa chi tiết với giả thiết ngàm cứng 2 đầu. Hình 1 thể hiện phân bố ứng suất dư trong chi tiết sau hàn với chế độ: điện áp hàn  $U = 20 \text{ V}$ , dòng điện hàn 150 A, vận tốc hàn 0,05 m/s.



Hình 1: phân bố ứng suất dư trong chi tiết sau hàn

Mô phỏng quá trình rung khử ứng suất dư được thực hiện trên chi tiết mô hình với 2 đầu ngàm cứng bằng cách tác dụng lực cưỡng bức tuần hoàn vào điểm giữa chi tiết. Biên độ lực cưỡng bức được lựa chọn từ 3.000 N với tần số rung khác nhau: 200 Hz, 315 Hz và 500 Hz. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi rung tại tần số cộng hưởng của chi tiết 315 Hz (hình 2), đỉnh ứng suất dư trong chi tiết giảm từ giá trị 220 xuống 139 MPa. Đặc biệt, ứng suất dư trên bề mặt giảm rất mạnh, đến giá trị cỡ 40 MPa. Trong khi đó, mô phỏng rung khử ứng suất dư với cùng biên độ tại tần số ngoài

cộng hưởng cho phân bố ứng suất dư trong chi tiết hầu như không thay đổi. Điều này được giải thích là do khi rung tại tần số cộng hưởng, mức độ biến dạng của chi tiết lớn hơn, dẫn đến hiệu quả rung khử ứng suất dư cao hơn nhiều.



Hình 2: phân bố ứng suất dư trong chi tiết hàn sau rung tại tần số cộng hưởng 315 Hz và biên độ lực cưỡng bức 5.900 N

**Thực nghiệm trên mẫu nhỏ trong phòng thí nghiệm**

Nghiên cứu thực nghiệm quá trình rung khử ứng suất dư trong phòng thí nghiệm được tiến hành cho các mẫu hàn được hàn theo chế độ tự động. Các mẫu nhỏ phù hợp cho điều kiện phòng thí nghiệm có tần số dao động riêng cỡ vài trăm Hz, song các đầu rung khử ứng suất dư hiện có cũng như của đề tài chế tạo chỉ tạo ra tần số khoảng 100 Hz. Vì vậy, trong quá trình rung, chi tiết được gắn cứng (tháo lắp được) vào một kết cấu để có thể rung ở tần số cộng hưởng phù hợp với dải làm việc của đầu rung khử ứng suất hiện có (hình 3).



Hình 3: kết cấu cố gắn đầu rung khử ứng suất

Thiết bị rung khử ứng suất dư HV21 được thiết kế chế tạo tại Học viện Kỹ thuật quân sự bao gồm: các đầu rung khử ứng suất dạng động cơ điện với quả nặng

lệch tâm và bộ điều khiển trung tâm. Thiết bị này có thể tạo dao động với tần số lên đến 100 Hz và cho phép điều chỉnh biên độ lực ly tâm. Thiết bị có các chương trình dò tìm tần số cộng hưởng, chương trình rung tự động, giám sát hiển thị quá trình rung và chương trình phân tích, hiển thị dữ liệu rung trên máy tính.

Chi tiết trước khi rung được đo ứng suất dư theo tiêu chuẩn ASTM E837-01 bằng thiết bị khoan lỗ đo ứng suất dư RS200 [8]. Trong phương pháp này, người ta gắn lên vị trí cần đo ứng suất dư một cảm biến đo biến dạng đặc biệt để thu được biến dạng tích thoát theo 3 phương khác nhau khi khoan lỗ, từ đó xác định được ứng suất dư. Cảm biến đo sử dụng trong phép đo này là tem EA-06-062RE-120, đồng bộ với thiết bị và mũi khoan có đường kính 1/16 inch (1,56 mm). Cảm biến đo được dán ngay sát đường hàn và định hướng với trục của cảm biến 1, song song với đường hàn. Kết quả đo biến dạng và tính toán bằng phần mềm H-drill [9] của hệ thống cho ứng suất ở vị trí chiều sâu 1 mm:

- Ứng suất chính thứ nhất.
- Ứng suất chính thứ 2.
- Góc giữa phương của ứng suất chính thứ nhất và phương của cảm biến 1 (chiều dài đường hàn).

Nghiên cứu được tiến hành cho 4 mẫu thí nghiệm giống nhau, rung theo các tần số khác nhau. Trước khi rung, thực hiện vòng quét tự động từ 10-110 Hz để dò tìm sơ bộ tần số cộng hưởng của kết cấu. Với kết cấu dạng chế tạo trong nghiên cứu này có 2 đỉnh cộng hưởng thô vào khoảng 40 Hz và 80 Hz. Sau đó tiến hành dò tìm tần số cộng hưởng bằng tay trong dải hẹp 32-50 Hz, kết quả tần số cộng hưởng ở vùng này là 45,7 Hz. Kết quả tần số dao động khi biên độ bắt đầu giảm được lấy làm tần số cộng hưởng (tần số dao động riêng). Tần số dao động riêng có thể thay đổi đôi chút giữa các mẫu khác nhau do sự sai khác về mẫu và gá đặt trong quá trình thí nghiệm.

Sau đó điều chỉnh quá văng của động cơ rung về vị trí tương ứng với momen tĩnh  $mr_0 = 9 \text{ kg.mm}$  và tiến hành rung tại tần số xác định.

- Mẫu 1 rung tại tần số cộng hưởng:  $f_0 = 45,7 \text{ Hz}$ , thời gian rung 15 phút.
- Mẫu 2 rung gần tần số gần cộng hưởng:  $f_0 = 48 \text{ Hz}$ , thời gian rung 15 phút.
- Mẫu 3 rung tại tần số thấp hơn tần số cộng hưởng:  $f_0 = 35 \text{ Hz}$ , thời gian rung 15 phút.

- Mẫu 4 rung tại tần số cao hơn tần số cộng hưởng:  $f_0 = 60 \text{ Hz}$ , thời gian rung 15 phút.

Ngoài ra, còn có thêm mẫu số 5 được rung với quá văng lệch tâm tại vị trí lệch tâm cực đại ( $mr_0 = 11,5 \text{ kg.mm}$ ) với chế độ như mẫu số 4 ( $f_0 = 60 \text{ Hz}$ ).

Kết quả rung khử ứng suất dư cho 5 chi tiết được tổng hợp trong bảng 1. Trong đó  $f_0$  là tần số dao động riêng của chi tiết, được xác định từ việc dò tìm tần số cộng hưởng trước khi rung.  $F_{max}$  là lực rung lớn nhất (biên độ lực ly tâm) tạo ra trong quá trình rung, lực rung này liên quan đến tần số rung và vị trí quá văng lệch tâm (momen tĩnh):

$$F_{max} = mr_0(2\pi f_0)^2 \quad (1)$$

Bảng 1: kết quả đo ứng suất dư trước và sau khi rung ở các tần số khác nhau

Mẫu	Chế độ rung (Hz)	$F_{max}$ (N)	$\sigma_1^0/\sigma_2^0$ (Mpa)	$\sigma_1'/\sigma_2'$ (Mpa)
1	$f_0 = 45,7$	742	126/25	68/32
2	$f_0 = 48$	818	118/31	72/46
3	$f_0 = 35$	438	123/45	108/46
4	$f_0 = 60$	1.279	110/38	115/27
5	$f_0 = 60$	1.634	120/28	118/32

$\sigma_1^0, \sigma_2^0$  là ứng suất chính thứ nhất, ứng suất chính thứ 2 xác định từ phép đo ứng suất dư trên mẫu trước khi rung;  $\sigma_1', \sigma_2'$  là ứng suất chính thứ nhất, ứng suất chính thứ 2 xác định từ phép đo ứng suất dư trên mẫu sau khi rung khử ứng suất dư

Kết quả ở bảng 1 cho thấy, khi rung ở tần số cộng hưởng (mẫu 1) cho hiệu quả khử ứng suất dư mạnh nhất: ứng suất chính thứ nhất giảm từ giá trị 126 MPa trước rung về giá trị 68 MPa sau khi rung. Trong khi đó rung ở các tần số khác xa tần số cộng hưởng, mẫu số 3 và mẫu số 4, ứng suất dư giảm không đáng kể, đặc biệt là với mẫu 3. Nguyên nhân ở đây là do rung ở tần số ngoài cộng hưởng nên mặc dù biên độ lực tác dụng lớn, đến 1.279 N với mẫu 4, nhưng mức độ biến dạng tạo ra trên mẫu trong quá trình rung rất nhỏ. Do biên độ biến dạng tạo ra nhỏ nên chưa đưa vật liệu đến vùng chảy dẻo để gây ra hiện tượng tích thoát ứng suất dư theo yêu cầu. Thậm chí đối với mẫu số 5, khi tăng biên độ lực rung lên rất lớn, đến 1.634 N, song biến dạng gây ra cho chi tiết trong quá trình rung cũng còn nhỏ, chưa đưa vật liệu qua vùng biến dạng nên ứng suất dư hầu như không đổi, từ 120 xuống 118 MPa.

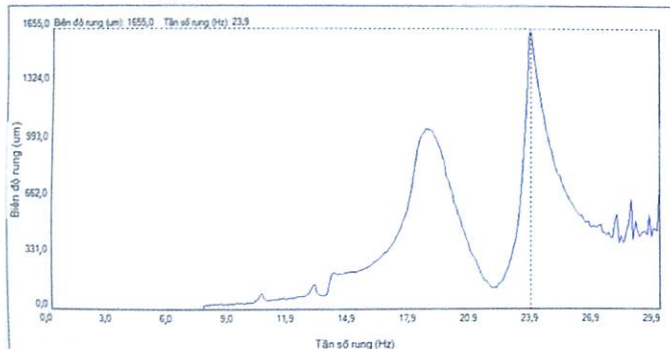
Trong các mẫu nghiên cứu, mẫu số 2 được rung ở tần số lân cận tần số cộng hưởng. Kết quả cho thấy,

mức độ suy giảm ứng suất dư cũng đạt khá cao, gần với mức độ khử ứng suất dư khi rung ở tần số cộng hưởng.

### Ứng dụng cho chi tiết thực tế

Bàn mấp dùng trong công nghiệp lắp ráp ô tô là chi tiết có kích thước lớn được gia công chính xác. Chi tiết này gồm tấm bàn 6.000x3.000x35 mm, thép hộp đỡ dưới 200x120x10x6.000 mm (số lượng: 3), thép hộp đỡ 200x120x10x3.000 mm (số lượng: 5). Trên mặt bàn có gia công 122 lỗ  $\Phi 45H7$  có vai lỗ là  $\Phi 56 \pm 0,2$ . Sai lệch khoảng cách của 2 lỗ  $\Phi 45H7$  xa nhau nhất (cách nhau 5.880 mm) là không quá 0,05 mm. Độ không phẳng yêu cầu trên toàn bộ tấm bàn không vượt quá 0,2 mm. Bàn mấp này được chế tạo bằng phương pháp hàn tấm thép rộng lên 4 thanh thép lớn, sau đó khoan phay phẳng mặt trên và tiến hành khoan lỗ.

Phôi sau hàn bao gồm mặt tấm trên có kích thước 6.000x3.000x40 mm được hàn trên các thanh thép hộp với khối lượng khoảng tổng cộng 7.100 kg. Sau khi hàn bề mặt chi tiết thường bị cong và có ứng suất dư khá lớn với độ cong của mặt trên vào khoảng 10 mm. Sau hàn chi tiết thường được ép trên máy ép thủy lực để hồi phục một phần kích thước và tiến hành khử ứng suất dư trước khi phay mặt trên và khoan lỗ. Quy trình công nghệ chế tạo trong đó có nguyên công rung khử ứng suất dư là bắt buộc. Chi tiết bàn mấp khi rung được đặt trên 3 gối cao su, đặt đầu rung khử ứng suất dư tại 6 vị trí khác nhau bằng thiết bị rung khử ứng suất dư HV21. Tại mỗi vị trí, tiến hành dò tìm tần số cộng hưởng tự động. Hình 4 là đáp ứng biên độ tần số của chi tiết bàn mấp khi rung khử ứng suất dư.

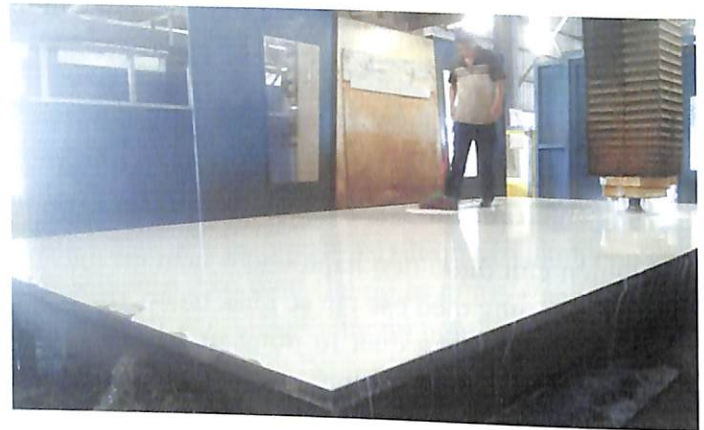


Hình 4: đáp ứng biên độ tần số của chi tiết bàn mấp

Từ phân tích đường đặc tính biên độ tần số cho thấy, nếu rung tại tần số cộng hưởng 23,9 Hz, biên độ dao động của các điểm trong chi tiết đạt giá trị lớn nhất, do vậy hiệu quả rung khử ứng suất dư cao nhất. Vì vậy, đã tiến hành rung cho chi tiết này tại 6 vị trí ở tần số cộng

hưởng, thời gian rung tại mỗi vị trí là 5 phút.

Sau khi rung khử ứng suất theo quy trình nêu trên, chi tiết được phay phẳng mặt trên (hình 5) và khoan lỗ theo quy trình chế tạo chi tiết. Kết quả sau khi phay phẳng mặt trên đến kích thước 6.000x3.000x35 mm chi tiết không có hiện tượng cong vênh và đã gia công đạt dung sai kích thước yêu cầu. Độ không phẳng yêu cầu trên toàn bộ tấm bàn không quá 0,2. Trong quá trình làm việc sau chế tạo, 4 bàn mấp không có hiện tượng cong vênh hay thay đổi kích thước. Các kết quả này cho thấy, ứng suất dư sau hàn đã được khử đáng kể, bởi nếu tồn tại ứng suất dư thì sau khi phay phẳng mặt trên sẽ xảy ra hiện tượng cong vênh bàn mấp và thay đổi khoảng cách lỗ do trạng thái ứng suất dư bị phá vỡ bởi lớp vật liệu phía trên bị bóc đi, gây ra biến dạng ở phần còn lại. Tương tự như vậy, nếu tồn tại ứng suất dư thì sau khi khoan lỗ sẽ xuất hiện hiện tượng lỗ bị méo.



Hình 5: chi tiết bàn mấp được phay phẳng bề mặt trên

### Kết luận

Kết quả mô phỏng số và kết quả thực nghiệm với mẫu hàn đều cho thấy, khi tiến hành rung khử ứng suất dư tại tần số cộng hưởng cho hiệu quả khử ứng suất dư tốt nhất, đặc biệt với ứng suất dư trên lớp bề mặt. Hiện tượng này là do khi rung tại tần số cộng hưởng, biên độ dao động của các phần tử của kết cấu cao hơn, dẫn đến mức độ biến dạng của phần tử cao hơn và hiệu quả khử ứng suất dư cao hơn. Phương pháp rung khử ứng suất dư tại tần số cộng hưởng đã được ứng dụng để khử ứng suất dư sau hàn trong chế tạo chi tiết bàn mấp đạt độ chính xác cao.

### Lời cảm ơn

Các tác giả xin trân trọng cảm ơn Chương trình KC03/11-15 đã tạo điều kiện, hỗ trợ cho nghiên cứu này.

## Tài liệu tham khảo

- [1] William F. Han (2000), *Vibratory residual stress relief and modification to in metals to conserve resource and prevent pollution*, Center of environmental and energy research - Alfred University.
- [2] M.C. Sun, Y.H. Sun, R.K. Wang (2009), "The vibratory stress relief of a marine shafting of 35#bar steel", *Materials Letters*, **58**, pp.299-303.
- [3] D. Rao, J. Ge and L. Chen (2004), "Vibratory Stress Relief in Manufacturing the Rails of a Maglev System", *J. of Manufacturing Science and Engineering*, **126(2)**, pp.388-391.
- [4] S. Kwofie (2009), "Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief", *Materials Science and Engineering A*, **516**, pp.154-161.
- [5] Y.P. Yang (2009), "Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling", *Journal of Materials Engineering and Performance*, **18(7)**, pp.856-862.
- [6] N.V. Duong, B.M. Cuong, T.D. Xuan (2014), "Study on mechanical principle of residual stress relieving in work piece by vibratory force", *Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering mechanics and Automation*, pp.260-264.
- [7] J.A. Goldak, M. Akhlaghi (2005), *Computational Welding Mechanics*, New York: Springer.
- [8] Determining Residual stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method, American Society for Testing and Materials, ASTM Standard E837-01.
- [9] W.C. Kroenke, A.M. Holloway, W.R. Mabe (2000), "Stress Calculation Update in ASTM E 837 Residual Stress Hole Drilling Standard", *Advances in Computational Engineering & Sciences. Tech Science Press*, **1**, pp.695-699.