

PHÂN TÍCH, THIẾT KẾ ĐẦU RUNG CHO QUÁ TRÌNH TIỆN CÓ HỖ TRỢ CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM

ANALYSIS, DESIGN OF HORN FOR ULTRASONIC VIBRATION ASSISTED
TURNING

Nguyễn Thành Trung*, Phạm Văn Đảm, Vũ Toàn Thắng
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Có nhiều kỹ thuật sản xuất và ứng dụng công nghiệp sử dụng dao động siêu âm. Trong gia công cơ khí, kỹ thuật siêu âm được áp dụng để hỗ trợ quá trình gia công cắt gọt. Một thành phần chính của thiết bị sử dụng hiệu ứng siêu âm trong quá trình gia công là đầu rung siêu âm (ultrasonic horn) hay còn gọi là đầu khuếch đại siêu âm (ultrasonic booster). Tính năng của thiết bị siêu âm phụ thuộc và thiết kế hợp lý hình dạng của đầu rung. Trong bài báo này, các tính chất động học theo các hình dạng khác nhau của đầu rung siêu âm được trình bày. Sự phụ thuộc của các tính chất động lực học trong miền tần số (Modal properties) vào thông số hình học và tính chất vật liệu của đầu rung được phân tích. Phân tích Modal (tần số tự nhiên, hình dạng mode rung động) được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM – Finite Element Method).

Từ khóa: Đầu rung siêu âm; Tiện có hỗ trợ của rung động siêu âm; Phương pháp phần tử hữu hạn; Phân tích modal; Tần số tự nhiên.

ABSTRACT

There are many manufacturing techniques and industrial applications that use ultrasonic vibration. In mechanical machining, ultrasonic technology is applied to assist the cutting process. A main component of the equipment that uses the ultrasonic effect in the machining process is the ultrasonic horn, also known as the ultrasonic booster. The performance of the ultrasonic device depends on the appropriate architecture of the horn. In this study, the modal properties of the ultrasonic horn according to different shapes are presented, the dependence of horn's modal properties on the geometry and material properties of is analyzed. Modal analysis (natural frequency, vibration mode shape) is performed using the Finite Element Method (FEM).

Keywords: Ultrasonic horn; UAT; Finite element method; modal analysis; Natural frequency.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện tượng rung động siêu âm đang ngày càng được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp khác nhau như làm sạch siêu âm, hàn các vật liệu nhựa, phi kim, hỗ trợ trong gia công chi tiết cơ khí. Sự cải thiện đáng kể về chất lượng và hiệu suất đã đạt được khi áp dụng siêu âm vào trong quá trình công nghệ [1, 2]. Trong hỗ trợ gia công cắt gọt, rung động siêu âm được tạo ra nhờ bộ chuyển đổi áp điện (piezoelectric transducer) dựa vào việc biến đổi năng lượng điện (lấy từ nguồn điện tần số siêu âm) thành năng lượng cơ học. Rung động này được truyền vào dụng cụ cắt (có thể truyền vào phôi nhưng ít dùng vì khó thiết kế và biên độ rung động thay đổi nhiều) để tham gia vào quá trình cắt gọt.

Quá trình gia công có siêu âm hỗ trợ thường được ứng dụng trong kỹ thuật gia công chính xác cao và cho các vật liệu không giòn, khó cắt ví dụ như: Thép cứng, hợp kim Titan, Niken, vật liệu composite [3-5] Chế độ rung - va đập tần số cao đã mang lại những cải thiện và tính chất đặc biệt trong quá trình cắt gọt, ở đây, trong các điều kiện rung động và chế độ cắt phù hợp quá trình tương tác giữa dao và phôi là sự cắt gọt không liên tục và chuyển thành quá trình vi va đập.

Các chuyển đổi siêu âm tạo ra các dao động ở tần số 20 kHz hoặc cao hơn, tuy nhiên, biên độ dao động lại chưa phù hợp để hỗ trợ trong gia công cắt gọt. Để khắc phục vấn đề này, người ta cần một chi tiết để truyền và khuếch đại biên độ dao động. Chi tiết này có thể gọi là đầu rung (horn) với một đầu được gá đặt trực tiếp vào chuyển đổi áp điện và đầu còn lại gá kẹp dụng cụ cắt. Đầu rung phải được thiết kế để tần số cộng hưởng trùng với tần số làm việc chuyển đổi áp điện, do vậy, hình dạng và

vật liệu chế tạo sẽ quyết định tần số riêng của đầu rung. Tùy thuộc vào ứng dụng cụ thể mà có thể chế tạo đầu rung bằng hợp kim Titan, thép hoặc thép không gỉ. Hình dạng chủ yếu của đầu rung siêu âm là: Trụ, côn, trụ bậc, hàm lữ thừa. Trong các bài báo trước đây [6-8], việc lựa chọn hình dạng và kích thước đầu rung được xác định bằng mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Tuy nhiên, hình dạng chủ yếu cả các đầu rung vẫn ở dạng tiêu chuẩn như bốn hình kể trên mà chưa tính đến các rãnh gá dao. Trong bài báo này, các tính chất động học của đầu rung siêu âm ứng dụng trong nguyên công tiện ngoài được trình bày. Ảnh hưởng của những rãnh vát và khối lượng không đồng tâm đến tần số riêng và hình dạng mode rung động được phân tích.

2. THIẾT KẾ ĐẦU RUNG SIÊU ÂM

Chức năng làm việc của đầu rung là khuếch đại biên độ rung động từ chuyển đổi áp điện đến dao tiện ở độ lớn hiệu quả để hỗ trợ trong gia công. Do vậy, đầu rung đóng vai trò là phương tiện truyền năng lượng rung động đến dụng cụ cắt để tương tác với phôi. Đầu rung thực hiện được vai trò này là vì nó ở trạng thái cộng hưởng với chuyển đổi áp điện, vậy nên việc thiết kế và chế tạo đầu rung phải đúng nguyên lý và chính xác. Đầu rung được chế tạo không đáp ứng điều kiện cộng hưởng sẽ làm giảm hiệu suất gia công và có thể gây ra hỏng hóc cho hệ thống tạo rung động, phá hủy nguồn điện siêu âm.

2.1. Nghiệm giải tích của dao động tự do của đầu rung

Phương trình cơ bản đầu rung dao động dọc có tiết diện tròn thay đổi $S(z)$ áp dụng cho môi trường liên tục 1 chiều (thanh đàn hồi mỏng) có dạng như sau:



$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = c_p^2 \left[\frac{1}{S(z)} \frac{\partial S(z)}{\partial z} \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

Ở đây, z là tọa độ theo phương dọc.

$u(z, t)$ - Dịch chuyển dọc trục của mặt cắt ngang;

$S(z) = \pi(r(z))^2$ - Diện tích mặt cắt ngang;

$r(z)$ - Bán kính của mặt cắt ngang;

$c_p = \sqrt{E/\rho}$ - Vận tốc của sóng dọc trong vật liệu có mô đun đàn hồi E và trọng lượng riêng ρ .

Do vậy, dao động tự do của đầu rung dạng trụ ($r(x) = r$) được mô tả bằng phương trình:

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = c_p^2 \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \quad (2)$$

Nghiệm của phương trình (2) có dạng $u(z, t) = U(z) T(t)$. Khi đó, phương trình vi phân riêng (2) được tách thành hai phương trình vi phân thông thường sau:

$$\frac{d^2 U(z)}{dz^2} + \frac{w_0^2}{c_p^2} U(z) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + w_0^2 T(t) = 0 \quad (4)$$

w_0 là tần số góc tự nhiên.

Theo [6] áp dụng các đại lượng không thứ nguyên sau:

Tọa độ không thứ nguyên theo phương dọc: $\xi = \frac{z}{l_0}$; $\xi \in [0; 1]$,

Dịch chuyển dọc không thứ nguyên của mặt cắt ngang: $\Psi(\xi) = \frac{U(z)}{l_0}$,

l_0 là chiều dài toàn bộ của đầu rung.

Vào phương trình (3), chúng ta thu được phương trình không thứ nguyên:

$$\frac{d^2 \Psi(\xi)}{d\xi^2} + \beta^2 \Psi(\xi) = 0 \quad (5)$$

Nghiệm của phương trình (5) có dạng:

$$\Psi(\xi) = A \cos(\beta\xi) + B \sin(\beta\xi) \quad (6)$$

với $\beta = l_0 \frac{w_0}{c_p}$

Cả hai mặt của đầu rung đều có khả năng chuyển động theo phương hướng trục, phía đầu vào được gắn với chuyển đổi áp điện tạo ra dao động siêu âm dọc trục và đầu ra kẹp dụng cụ cắt. Khi đó, các điều kiện biên ở 2 đầu của đầu rung dao động tự do là:

$$\left. \frac{d\Psi(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=1} = 0 \quad \left. \frac{d\Psi(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0 \quad (7)$$

Áp dụng điều kiện (7) vào phương trình (6) thu được các thông số modal như sau:

Tần số tự nhiên (Hz) của mode thứ k :

$$f_{0k} = \frac{k}{2l_0} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

Để đạt được hiệu quả gia công mong muốn khi có hỗ trợ của sóng siêu âm, chỉ có dạng mode thứ nhất và thứ hai của đầu rung được sử dụng. Với $k = 1$ gọi là dạng nửa bước sóng, $k = 2$ là dạng bước sóng.

Sự xác định hình dạng mode và tần số tự nhiên của đầu rung dạng trụ là tương đối đơn giản, tuy nhiên, việc xác định các thông số này

đối với hình dạng không trụ thì phức tạp hơn rất nhiều. Do vậy, để tính toán các thông số modal này của đầu rung có dạng hình học phức tạp thì sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là cách tốt nhất.

2.2. Phân tích phần tử hữu hạn của rung động tự do của đầu rung

Phương trình chuyển động mô tả dao động tự do của đầu rung theo mô hình phần tử hữu hạn được biểu diễn ở dạng sau:

$$M\ddot{u} + B\dot{u} + Ku = 0 \quad (9)$$

Ở đây, M , B , K lần lượt là ma trận khối lượng, giảm chấn và độ cứng,

$\ddot{u}, \dot{u}, u$ lần lượt là véc tơ gia tốc, véc tơ vận tốc và dịch chuyển của các node.

Giả thiết rằng, vật liệu chế tạo đầu rung có khả năng giảm chấn rất thấp nên có thể bỏ qua thành phần giảm chấn trong phương trình dao động. Với $B = 0$, phương trình (9) có thể viết lại thành:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (10)$$

Các tính chất động học của đầu rung được xác định bằng bài toán tìm nghiệm riêng:

$$(K - \omega_i^2 M)\phi_i = 0 \quad (11)$$

Ở đây, ϕ_i – Véc tơ đặc trưng thứ i .

ω_i – Tần số góc tự nhiên của dạng mode thứ i .

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG TẦN SỐ RIÊNG CỦA ĐẦU RUNG VÀ THỰC NGHIỆM

Các phân tích bằng phương pháp số

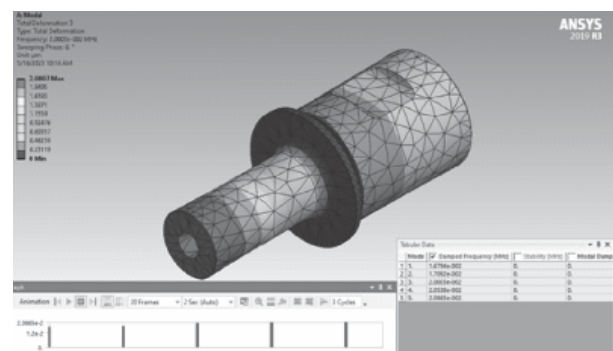
được thực hiện cho các hình dạng đầu rung khác nhau. Vật liệu chế tạo đầu rung được sử dụng để mô phỏng số là thép không gỉ có các thông số như sau: Mô đun đàn hồi $E = 1,93 \times 10^{11}$ Pa, khối lượng riêng $\rho = 7750$ kg/m³, hệ số Poisson $\nu = 0,31$. Đầu rung được thiết kế theo nguyên tắc có chiều dài nửa bước sóng, đường kính phần trụ lớn $D_1 = 54$ mm, đường kính phần trụ nhỏ $D_2 = 31$ mm, ngoài ra, có phần tai kẹp đường kính 63 mm, dày 3,5 mm để gá cố định.

Chiều dài l_0 của đầu rung được tính sơ bộ theo công thức:

$$l_0 = \frac{\lambda}{2} = \frac{c_p}{2f} = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

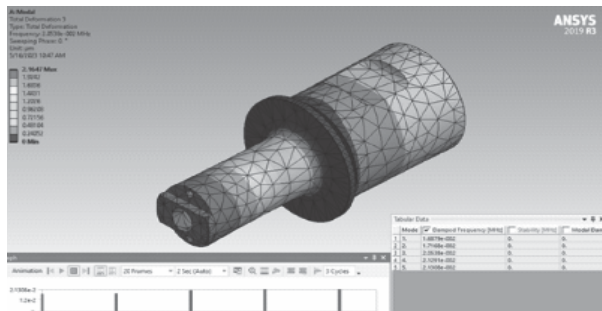
Với tần số làm việc của chuyển đổi áp điện là 20 kHz.

Ta có, $l_0 = \frac{1}{2 \times 20000} \sqrt{\frac{1,93 \times 10^{11}}{7750}} = 124,76$ mm. Tuy nhiên, chiều dài này chưa tính đến các lỗ, rãnh trên đầu rung để lắp ghép. Sử dụng phần mềm Ansys 2019 R3 để mô phỏng các tính chất Modal của đầu rung để tìm ra tần số tự nhiên của đầu rung. Hình 1, thể hiện mode rung động theo phương dọc trục với chiều dài 128,4 mm, tần số tự nhiên 20003 Hz.

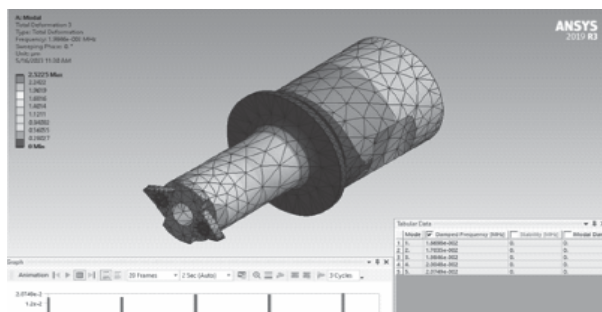


Hình 1. Hình ảnh mô phỏng tần số tự nhiên của đầu rung bằng Ansys 2019 R3

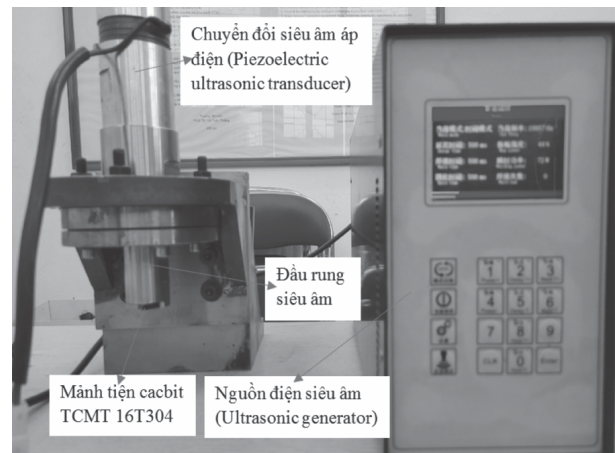
Để ứng dụng đầu rung trong hỗ trợ quá trình tiện truyền thống, phần đầu trụ nhỏ được phay 2 rãnh có kích thước rộng $\times$ sâu là 8×4 mm và làm lỗ ren bắt vít M4. Lúc này, kết quả mô phỏng tần số tự nhiên theo mode dọc trục tăng lên thành 20538 Hz như hình 2 mô tả. Tiếp tục, 2 mảnh tiện TCMT 16T304 được lắp lên đầu rung bằng vít kẹp M4 và có tần số tự nhiên được mô phỏng là 19846 Hz (hình 3). Để kiểm nghiệm các kết quả mô phỏng, đầu rung có kích thước như mô phỏng được chế tạo và lắp trên chuyển đổi áp điện. Nguồn điện siêu âm cung cấp dòng điện để tạo ra dao động cơ học cho đầu rung thông qua chuyển đổi áp điện. Tần số đáp ứng của nguồn điện siêu âm được coi là trùng với tần số tự nhiên của hệ đầu rung và chuyển đổi áp điện. Hình 4, thể hiện hình ảnh thực tế khi lắp ráp và tạo rung động cho hệ rung và tần số đáp ứng của nguồn điện là 19971 Hz.



Hình 2. Hình ảnh mô phỏng tần số tự nhiên của đầu rung sau khi phay 2 rãnh đối xứng kích thước 8×4 mm.



Hình 3. Mô phỏng tần số tự nhiên của đầu rung sau khi phay 2 rãnh và lắp 2 mảnh tiện đối xứng ở hai bên.



Hình 4. Hình ảnh thực tế tần số đáp ứng của nguồn điện siêu âm khi lắp đầu rung và hai mảnh tiện cacbit TCMT16T304.

Sự sai khác giữa kết quả mô phỏng tần số riêng của đầu rung và tần số đáp ứng của nguồn điện là điều dễ hiểu vì khi gia công đầu rung có dung sai chế tạo, tính chất vật liệu không lý tưởng và tần số đáp ứng của nguồn là cho cả hệ gồm đầu rung, chuyển đổi áp điện, các chi tiết dùng để lắp ghép như vít kẹp chặt, mặt bích, dây điện... cũng làm cho trở kháng của cả hệ thay đổi, nhưng sự sai khác là không nhiều 125 Hz tương đương 0,63%.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã thực hiện việc phân tích và thiết kế đầu rung ứng dụng trong quá trình tiện có hỗ trợ của rung động siêu âm. Nguyên tắc thiết kế khi đầu rung có dạng trụ lý tưởng là nửa hoặc một bước sóng, khi tăng chiều dài lên thì tần số tự nhiên của đầu rung giảm đi và ngược lại. Tuy nhiên, đầu rung hỗ trợ trong tiện có kết cấu phức tạp và khi khoét các lỗ, rãnh làm tăng tần số tự nhiên (tương đương với việc làm chiều dài ngắn lại), ngược lại khi thêm vật liệu vào làm giảm tần số đi. Kết quả mô phỏng so với thực nghiệm sai khác nhau không quá 1 %. ❖

Ngày nhận bài: 18/5/2023
Ngày phản biện: 24/5/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Mohsen Khajehzadeh, Omid Boostanipour, Mohammad Reza Razfar. “Finite element simulation and experimental investigation of residual stresses in ultrasonic assisted turning”. Ultrasonics 108 (2020), 106208.
- [2]. L. Zou, Y. Huang, M. Zhou, L. Duan. “Investigation on Diamond Tool Wear in Ultrasonic Vibration Assisted Turning Die Steels”. Materials and Manufacturing Processes (2017) trang 1505–1511.
- [3]. Wei Bai, Anuj Bisht, Anish Roy, Satyam Suwas, Ronglei Sun và Vadim V. Silberschmidt. “Improvements of machinability of aerospace-grade Inconel alloys with ultrasonically assisted hybrid machining”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 101 (2019), p1143–1156.
- [4]. Inigo Llanos, Asngela Campa, Ariane Iturbe, Pedro J. Arrazola, Oier Zelaeta. “Experimental Analysis of Cutting Force Reduction During Ultrasonic Assisted Turning of Ti6Al4V”. Procedia CIRP 77 (2018), p86-89.
- [5]. Jie Chen, Weiwei Ming, Qinglong An, Ming Chen. “Mechanism and feasibility of ultrasonic-assisted milling to improve the machined surface quality of 2D Cf/SiC composites”. Ceramics International, volume 46 (2020), p15122-15136.
- [6]. M. Nad. “Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies”, Applied and Computational Mechanics 4 (2010), p79–88.
- [7]. K. Vivekananda, G.N. Arka, S.K. Sahoo. “Design and Analysis of Ultrasonic Vibratory Tool (UVT) using FEM, and Experimental study on Ultrasonic Vibration-assisted Turning (UAT)”, Procedia Engineering 97 (2014), p1178-1186.
- [8]. Hamed Razavi, Mohammadreza Mirbagheri. “Design and fabrication of a novel vibrational system for ultrasonic assisted oblique turning process”, Journal of Mechanical Science and Technology 30 (2016), p827-835.