

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG CHUYỂN VỊ VÀ ỨNG SUẤT TRÊN TRỤC CAM KHI LÀM VIỆC ĐỂ KIỂM BỀN SAU THIẾT KẾ

RESEARCH ON SIMULATIONS OF DISPLACEMENT AND STRESS ON A WORKING CAMSHAFT FOR POST-DESIGN DURABILITY TEST

Đinh Văn Phương

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 09/04/2023, chấp nhận đăng ngày 18/08/2023

Tóm tắt: Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng chuyển vị và ứng suất trên trục cam khi làm việc để kiểm nghiệm bền sau thiết kế, trục cam mô phỏng là trục cam của động cơ 1NZ-FE, tác giả sử dụng phương pháp tính toán, mô phỏng bằng phần tử hữu hạn thông qua phần mềm Abaqus. Sau khi xây dựng bản vẽ trục cam, các dữ liệu đầu vào bao gồm: ngoại lực và vật liệu được thiết lập và đưa vào phần mềm. Kết quả thu được bao gồm ứng suất và chuyển vị được so sánh với ứng suất và chuyển vị cho phép để đánh giá và đưa ra kết luận về độ bền. Ngoài ra, kết quả từ nghiên cứu này cũng là cơ sở cho việc kiểm tra bền khi thiết kế nhằm giảm bớt chi phí chế tạo thử các chi tiết. Đồng thời cũng có thể làm tài liệu tham khảo cho các nhà thiết kế, chế tạo các chi tiết trong lĩnh vực cơ khí, đặc biệt là lĩnh vực cơ khí động lực.

Từ khóa: Kiểm bền, phương pháp phần tử hữu hạn, trục cam, Abaqus.

Abstract: This paper presents the results of simulation study of displacement and stress on a working camshaft to test the durability after the design. The simulated camshaft is used in the 1NZ-FE engine, and the author uses the method calculated, simulated by finite elements through Abaqus software. After building the camshaft blueprint, the input data including external forces and materials which are set and entered into the software. The results obtained include comparisons between the recorded stress and displacement and the acceptable values, in order to evaluate and draw conclusions upon the durability. Additionally, the results from this study are also the basis for durability testing when designing in order to reduce the cost of testing components. At the same time, it can also be a reference for mechanical component designers and manufacturers in various fields of mechanics, especially in the field of dynamic mechanics.

Keywords: Durability test, finite element method, camshaft, Abaqus.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cùng với sự phát triển của công nghệ thông tin, việc ứng dụng các phần mềm hỗ trợ thiết kế (CAE) đã giúp cho quá trình sản xuất ngày càng hoàn thiện và tối ưu. Đối với lĩnh vực cơ khí, việc sử dụng các phần mềm tính toán, thiết kế đã rút ngắn được thời gian, giảm được chi phí và nâng cao hiệu quả lao động.

Trục cam là chi tiết thuộc cơ cấu phân phối trong động cơ đốt trong, cùng với sự phát triển của động cơ đốt trong thì trục cam cũng được phát triển để giúp cho việc tối ưu hiệu suất động cơ được tốt hơn. Trục cam được gắn liền với nhiệm vụ là đóng mở xupap nạp và thải cho động cơ. Hơn nữa, với các cấu tạo, đặc điểm tiếp xúc và kết cấu rất phức tạp cũng

nhiệt độ, áp suất trong quá trình cháy nhiên liệu đã khiến cho nó chịu một cường độ làm việc cao trong môi trường khắc nghiệt mà vẫn phải đóng mở các xupap một cách chính xác hoàn hảo nhất. Cấu tạo của trục cam bao gồm có các vấu cam nạp, cam thải và các cổ trục. Biên dạng cam thường phụ thuộc vào thời điểm xupap và trị số đóng mở của tiết diện lưu thông qua dòng khí. Thông thường trục cam có biên dạng đối xứng và chiều cao vấu cam mang tính chất quyết định đến độ mở của xupap. Do đó, các cam sẽ có biên dạng thông dụng giống như cam lồi cung tròn, cung parabol hay cam tiếp tuyến, cam lõm,... [1].

Khi làm việc, trục cam chịu lực nén ban đầu của lò xo xupap, lực quán tính cơ cấu phối khí khi bắt đầu mở xu páp thải, lực khí thể tác dụng trên mặt nắm xupap thải qui dẫn về đường tâm con đội. Chịu ứng suất uốn, xoắn và ứng suất tiếp xúc [2, 4, 5, 6, 7]. Vì vậy, để kiểm bền trục cam bằng thử công rất phức tạp, khó khăn và không đảm bảo tin cậy.

Phần mềm Abaqus là một trong những bộ phần mềm lớn rất hữu hiệu trong việc mô phỏng kết cấu cơ khí thông qua phương pháp phần tử hữu hạn [8].

Abaqus sở hữu kho phần tử phong phú nên dễ dàng mô phỏng mọi thiết kế trong kết cấu cơ khí theo bất cứ hình dạng nào. Đồng thời có thể mô phỏng và xây dựng kết cấu điển hình với việc phân tích theo đúng tính năng vật liệu sử dụng như kim loại, bê tông cốt thép, các vật liệu cao phân tử hay phức hợp,...

Đây cũng là phần mềm có tính thương mại cao, và việc sử dụng khá đơn giản, phần mềm bao gồm hai khối phân tích chủ yếu đó là Abaqus/Standard và Abaqus/Explicit. Tất cả những thông tin được xử lý qua phần mềm Abaqus được thực hiện thông qua 3 giai đoạn đó là xử lý số liệu, phân tích và xử lý kết quả.

Trong khi phân tích thì Abaqus còn có khả năng tự động lựa chọn lượng tăng tải hay độ chính xác hội tụ cũng như việc nó điều chỉnh tham số một cách phù hợp giúp người dùng không phải bận tâm về việc điều chỉnh tham số này. Kết quả của phần mềm hoàn toàn đáng tin cậy [8].

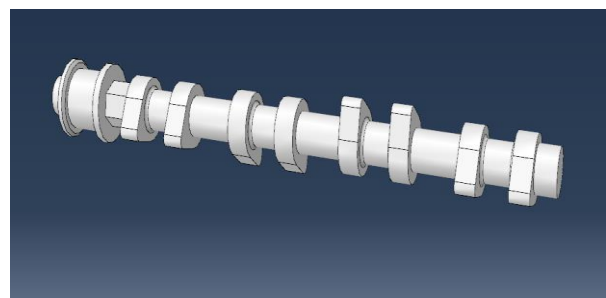
Ngoài ra, khi từ khâu thiết kế đến khâu sản xuất hàng loạt cần rất nhiều thời gian, tiền bạc và công sức như: chế tạo thử, kiểm bền bằng thực nghiệm, lắp ráp hoàn chỉnh trên máy, chạy thử. Do đó, kết quả nghiên cứu mô phỏng có thể làm tài liệu tham khảo để kiểm bền trục cam trước khi thực hiện các bước thực nghiệm.

2. XÂY DỰNG CÁC MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

2.1. Mô hình hình học của trục cam

Quá trình chịu lực của trục cam nạp và cam thải là tương tự nhau [5, 6], tuy nhiên trục cam thải chịu nhiệt lớn hơn nên tác giả chọn cam thải để mô phỏng và tính bền.

Đầu tiên, mô hình hình học của trục cam được đo tỉ mỉ bằng dụng cụ đo chuyên dùng như panme, thước kẹp... đảm bảo độ tin cậy và vẽ lại bằng cách sử dụng phần mềm NX.



Hình 1. Trục cam thải

2.2. Chia lưới

Trong quá trình mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn, mô hình 3D được thiết lập để phân tích chuyển vị và ứng suất. Loại phần tử được chọn trong quá trình chia lưới có thể là khối tứ diện, khối tứ giác, khối lập

phương,... Cách chọn chủ yếu dựa trên độ phức tạp của chi tiết. Trong nghiên cứu này, phần tử được chọn khối tứ diện để phù hợp với các biên dạng gia công. Các phần tử lưới được chia gọi là các nút. Để thể hiện mối quan hệ giữa các nút với nhau, ta sử dụng ma trận độ cứng tổng thể. Cơ sở lý thuyết của phương pháp dựa trên phương trình rời rạc phân bố nhiệt độ tổng quát như sau:

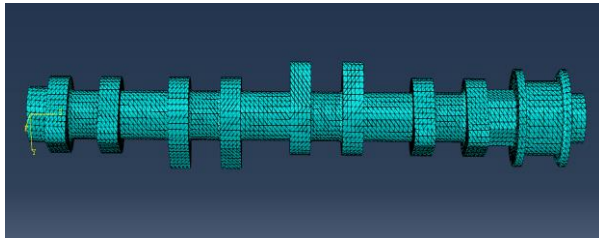
$$T(x, y, z) = \sum_{i=1}^M N_i(x, y, z) T_i = [N][T]$$

Trong đó:

N - số nút;

M - số thứ tự của nút.

Để minh họa, hình 2 ở trên cho thấy các phần tử tứ diện có chung một mặt trong mô hình phần tử hữu hạn. Với 67937 phần tử lưới tứ diện được tạo bởi phần mềm Abaqus để phục vụ quá trình mô phỏng phân tích.



Hình 2. Tạo lưới của trục cam thái

2.3. Mô hình tương tác và mô hình vật liệu

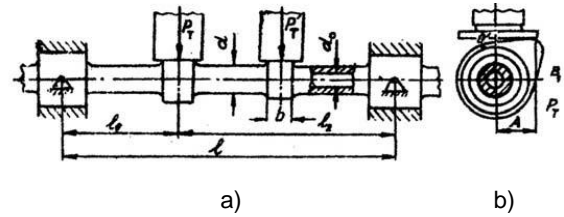
Để có các kết quả đầu ra của mô hình mô phỏng, các mô hình được nhập gồm các dữ liệu đầu vào là mô hình hình học, mô hình vật liệu (độ cứng/ứng suất/nhiệt độ) và mô hình tương tác (chịu lực uốn/xoắn/nén) [8] bao gồm: các lực và mômen tác dụng lên trục cam khi làm việc sẽ được trình bày ở các phần sau đây.

2.3.1. Phân tích lực tác dụng lên trục cam

- Tải trọng tác dụng [4, 5, 6]:

Khi tính toán ta giả thuyết rằng như một dầm

có tiết diện đồng đều được đặt tự do trên 2 gối tựa. Sơ đồ tính toán được biểu diễn như hình vẽ sau [2, 4, 5, 6, 7]:



Hình 3. Sơ đồ tính bền trục cam

Nếu bỏ qua ma sát và trọng lực (vì các lực này rất nhỏ so với các lực khác) thì lực tác dụng lên trục cam sẽ là:

$$P_{Tmax} = P_{lxo} + P_{jt} + P_{kt}$$

Trong đó:

P_{lxo} - lực nén ban đầu của lò xo xupap. (Trạng thái xupap đóng kín).

Kết quả đo thực tế:

$$P_{lxo} = P_{lxmin} = 557,5 \text{ (N)}$$

P_{jt} - lực quán tính của cơ cấu phối khí khi bắt đầu mở xupap quy dẫn về đường tâm con đội.

$$P_{jt} = -m_{ox} \cdot j_x$$

Với: $m_{ox} = 0,24 \text{ (kg)}$ - khối lượng của cơ cấu phối khí qui dẫn về đường tâm con đội được cân thực tế;

$j_x = 5146,7 \text{ (m/s}^2\text{)}$ - gia tốc của cơ cấu phối khí khi bắt đầu mở xupap qui dẫn về đường tâm con đội [2,4,5,6,7];

$$\Rightarrow |P_{jt}| = |-0,24 \cdot 5146,7| = 1235,2 \text{ (N)}.$$

P_{kt} - lực khí thể tác dụng lên mặt nấp xupap thải qui dẫn về đường tâm con đội.

$$P_{kt} = S_{xp} \cdot P_{kt}$$

Với: S_{xp} - diện tích mặt nấp xupap nạp.

$$S_{xp} = \frac{\pi \cdot d_{nm}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 30,5^2}{4} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$$

p_{kt} - áp suất khí thể trong buồng cháy khi bắt

đầu mở xupap.

Chọn $p_{kt} = 1,1 \text{ (MN/m}^2\text{)}$ [3].

$$\Rightarrow P_{kt} = S_{xp} \cdot p_{kt} = 0,73 \cdot 10^{-10} \cdot 1,1 = 0,803 \cdot 10^{-3} \text{ (MN)}$$

Thay vào công thức ta có:

$$P_{Tmax} = P_{lxo} + P_{jt} + P_{kt} = 557,5 + 1235,2 + 803 = 2595,7 \text{ (N)}.$$

▪ Ứng suất uốn [4, 5, 6]:

Mômen uốn trục cam sẽ là:

$$M_{umax} = P_{Tmax} \cdot \frac{l_2}{l_1} \quad \text{MNm}$$

l_1, l_2 là khoảng cách từ hai gối tựa đến cam chịu lực P_{Tmax} .

$$\sigma_u = \frac{M_{umax}}{W_u} = \frac{M_{umax}}{\frac{\pi}{32} d^2 \left[1 - \left(\frac{d_o}{d} \right)^4 \right]} \quad \text{MN/m}^2$$

d và d_o là đường kính ngoài và đường kính trong của trục cam.

▪ Ứng suất xoắn [4, 5, 6]:

Mômen xoắn đạt cực đại khi lực P_t ở xa tâm trục cam nhất, con đội trượt hết phần cung bán kính ρ . Mômen xoắn trục cam do lực lò xo và lực quán tính gây ra trên mặt cam (khi dùng cam lồi) xác định theo công thức sau:

$$M_x = P_{T\theta} A = A [(P_{lx})_t + (P_j)_t] \theta$$

$[(P_{lx})_t + (P_j)_t] \theta$ là lực lò xo và lực quán tính khi cam quay đến điểm B

A là cánh tay đòn lớn nhất của lực $P_{T\theta}$;

$$A = \frac{\rho - R}{\rho - r} (R + h_{max} - r) \sin \frac{\varphi}{2}$$

Mômen xoắn tổng cộng trên trục cam phải xét đến mômen xoắn trên các cam

khác đang cùng làm việc cũng như mômen dẫn động các cơ cấu khác. Mômen xoắn tổng hợp tại một thời điểm sẽ là M_Σ .

Ứng suất xoắn trục cam:

$$\tau_x = \frac{M_\Sigma}{W_x} = \frac{M_\Sigma}{\frac{\pi}{16} d^2 \left[1 - \left(\frac{d_o}{d} \right)^4 \right]} \quad \text{MN/m}^2$$

Ứng suất tổng tính theo công thức Xanh - Vê năng:

$$\sigma_\Sigma = \sigma_u \left[0,35 + 0,65 \sqrt{1 + \left(\frac{2\tau_x}{\sigma_u} \right)^2} \right] \quad \text{MN/m}^2$$

▪ Độ võng cho phép của trục [4, 5, 6]:

Nếu trên đoạn trục có hai cam cùng tên:

$$f = 3,4 \frac{P_T (3l - 4l_1) l_1^2}{E(d^4 - d_o^4)} ; [f] = 0,05 - 0,1 \text{ mm}$$

▪ Ứng suất tiếp xúc mặt cam [4, 5, 6]:

Đối với con đội hình trụ, hình nậm:

$$\sigma_{tx} = 0,418 \sqrt{\frac{P_T E}{b \rho}} \quad \text{MN/m}^2$$

R_l là bán kính con lăn.

$$[\sigma_{tx}] = 600 - 1200 \text{ MN/m}^2$$

2.3.2. Mô hình vật liệu

Bảng 1. Thông số Jonson-Cook của Thép 15Cr [8]

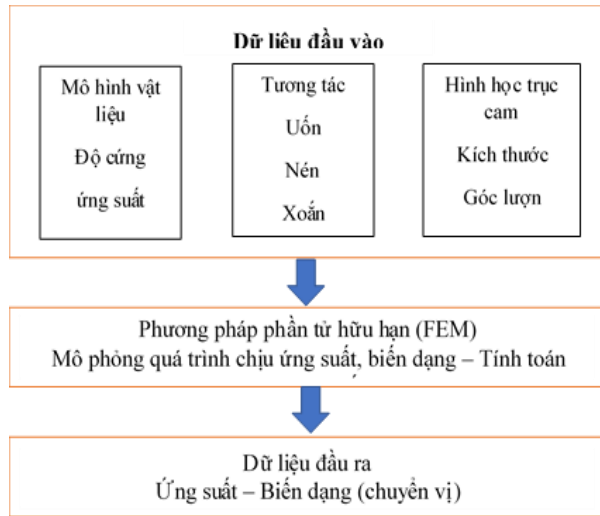
A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	Melt Temp	Trans Temp	Epsilon
1200	1200	2.6	0.22	1.4	1783	1000	0.001

Bảng 2. Tính chất vật lý của thép 15Cr

Tính chất	Thép 15Cr
Khối lượng riêng [kg/m ³]	7850
Mô-đun đàn hồi [Mpa]	340767600000
Hệ số Poisson's	0.34
Độ dẫn nhiệt [W/m/0C]	46.5
Nhiệt dung riêng [J/kg/0C]	510
Hệ số biến dạng nhiệt	0.9

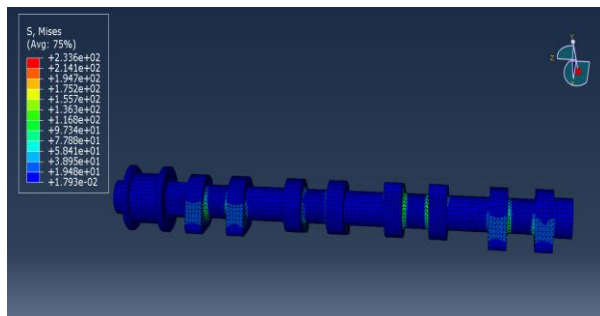
Các mô hình được nhập vào phần mềm Abaqus với các dữ liệu đầu vào là mô hình

hình học, mô hình vật liệu (độ cứng/ứng suất/nhiệt độ) và mô hình tương tác (chịu lực uốn/xoắn/nén) [8].



Hình 4. Sơ đồ khối để tính toán ứng suất – biến dạng của trục cam từ mô hình FEM

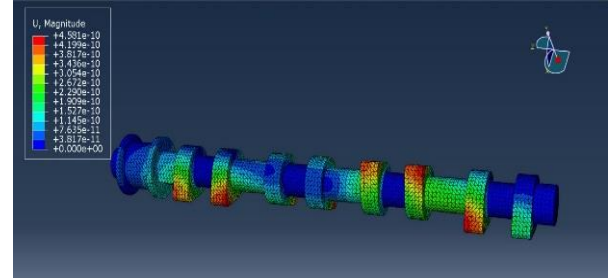
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG



Hình 5. Phân bố lực và giá trị ứng suất của trục cam thái sau khi mô phỏng

Hình 5 cho thấy, trên suốt chiều dài trục cam, ứng suất nhỏ xuất hiện trên vấu cam và phần nối giữa các vấu cam, phần nối giữa các cổ trục cam, điều này thể hiện ở các phần màu xanh với giá trị biến thiên từ 0,01793 đến 97,34 MN/m². Tuy nhiên, phần hiển thị màu vàng (vị trí tiết diện nối vấu cam và cổ trục cam thứ 4 và thứ 1) đến màu đỏ (vị trí tiết diện nối vấu cam và cổ trục cam thứ 3) bắt đầu xuất hiện ứng suất lớn với giá trị từ 116,8 đến 233,6 MN/m² có thể gây gãy trục cam tại tiết diện nguy hiểm này, điều này rất phù hợp với lý thuyết [2, 4, 5, 6, 7].

Tra ứng suất cho phép đối với trục cam với vật liệu 15Cr, ứng suất cho phép không quá 600 MN/m² [2,4,5,6,7]. Từ đó ta có thể kết luận, trục cam hoàn toàn đủ bền.



Hình 6. Chuyển vị của trục cam thái sau khi mô phỏng

Ta so sánh trục cam khi chưa làm việc (chuyển vị bằng 0) và khi làm việc, chuyển vị trên hình 6 cho thấy, trên suốt chiều dài trục cam, chuyển vị nhỏ xuất hiện trên các cổ trục cam, điều này thể hiện ở các phần màu xanh với giá trị biến thiên từ $3,817 \cdot 10^{-11}$ đến $1,527 \cdot 10^{-10}$ mm. Phần hiển thị màu vàng (vị trí ở tất cả các vấu cam) đến màu đỏ (phần nối vấu cam số 3 và số 4) bắt đầu xuất hiện chuyển vị lớn hơn ứng suất lớn từ $3,436 \cdot 10^{-10}$ đến $4,581 \cdot 10^{-10}$ mm.

Các chuyển vị lớn có màu đỏ và vàng có thể làm bó kẹt trục cam, gãy trục cam khi chúng đạt mức độ tới hạn [5, 6]. Do đó, các kết quả của chuyển vị này được xác định để so sánh với giá trị cho phép để đưa ra những đánh giá, kết luận.

Tra chuyển vị cho phép đối với trục cam, chuyển vị cho phép không quá 0,05 mm [2, 4, 5, 6, 7]. Từ đó ta có thể kết luận, trục cam hoàn toàn đạt yêu cầu.

4. KẾT LUẬN

Có thể kiểm bền các chi tiết của động cơ bằng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm Abaqus với độ chính xác đáng tin cậy.

Đã mô tả được phân bố lực, chuyển vị và giá trị ứng suất, chuyển vị trên suốt chiều dài trục

cam động cơ, giá trị ứng suất từ 0,01793 đến 233,6 MN/m², giá trị chuyển vị từ 3,817.10⁻¹¹ đến 4,581.10⁻¹⁰ mm. Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng để kiểm bền các chi tiết sau khi thiết kế, đặc biệt là các chi tiết dạng trục trước khi chế tạo thử.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Văn Anh, “*Giáo trình nguyên lý động cơ đốt trong*”, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2017.
- [2] Nguyễn Đức Phú, “*Giáo trình Kết cấu tính toán động cơ đốt trong tập 1+2+3*”, Nhà xuất bản Giáo dục, 1986.
- [3] Phạm Minh Tuấn, “*Giáo trình Động cơ đốt trong*”, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
- [4] Trần Thanh Hải Tùng, “*Bài giảng kết cấu tính toán động cơ đốt trong*”, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, 2007.
- [5] Nguyễn Duy Tiến, “*Kết cấu và tính toán động cơ đốt trong*”, NXB Giao thông Vận tải – 2006.
- [6] Hồ Tấn Chuẩn, Nguyễn Đức Phú, Trần Văn Tể, Nguyễn Tất Tiến, “*Kết cấu và tính toán động cơ đốt trong*”, NXB Đại học và trung học chuyên nghiệp, 1996.
- [7] Nguyễn Đức Phú, Trần Văn Tể, Nguyễn Tất Tiến, “*Bài giảng động lực học và dao động của động cơ đốt trong*”, Trường Đại học Bách khoa, 1997.
- [8] ABAQUS, “*Theory and Analysis User’s Manual*”. Version 6.8-3. Afazov, S.M., Ratchev, S.M., Segal, J., 2010. Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. Journal of Materials Processing Technology 210, 2154–2162, 2008.

Thông tin liên hệ: **Đinh Văn Phương**

Điện thoại: 0963902766 - Email: dvphuong@uneti.edu.vn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.