

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP LOCATI TRONG XÁC ĐỊNH GIỚI HẠN BỀN MỎI CỦA XÉC-MĂNG PISTON ĐỘNG CƠ XE XÍCH CHUYÊN DỤNG

RESEARCH ON THE APPLICATION OF THE LOCATI METHOD FOR DETERMINING THE FATIGUE LIMIT OF PISTON RINGS IN SPECIALIZED TRACKED VEHICLE ENGINES

Nguyễn Minh Tiến*, Tiêu Văn Đại

Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: minh tien21998@gmail.com

TÓM TẮT

Giới hạn mỏi của xéc-măng piston là một trong những thông số quan trọng quyết định độ tin cậy và tuổi thọ của động cơ xe xích chuyên dụng. Trong điều kiện làm việc thực tế, xéc-măng chịu tác động đồng thời của tải trọng cơ học, nhiệt độ cao và môi trường ma sát khắc nghiệt, dẫn đến quá trình suy giảm bền mỏi phức tạp. Các phương pháp thử nghiệm truyền thống thường yêu cầu thời gian dài, chi phí lớn và chưa phản ánh đầy đủ điều kiện khai thác thực tế. Vì vậy, việc áp dụng thử nghiệm tăng cường nhằm rút ngắn thời gian xác định giới hạn mỏi đang trở thành hướng nghiên cứu cần thiết. Phương pháp này cho phép tăng cường quá trình tích lũy hư hỏng thông qua việc tăng tải, tần số hoặc điều kiện làm việc tương đương. Tuy nhiên, việc lựa chọn chế độ tăng cường phù hợp cần đảm bảo tính tương đồng về cơ chế phá hủy so với điều kiện thực tế. Bài báo phân tích cơ sở khoa học của thử nghiệm tăng cường trong đánh giá độ bền mỏi xéc-măng piston. Trên cơ sở đó lựa chọn phương pháp thử nghiệm tăng cường hợp lý. Phương pháp Locati là một kỹ thuật thử nghiệm tăng cường được sử dụng để xác định giới hạn mỏi của các chi tiết một cách nhanh chóng, thường chỉ cần một mẫu thử duy nhất. Phương pháp này thay thế việc thử nghiệm biên độ cố định truyền thống bằng cách tăng tải trọng theo từng bậc cho đến khi mẫu bị hư hỏng. Kết quả nghiên cứu góp phần nâng cao độ tin cậy của các chi tiết trong quá trình khai thác.

Từ khóa: Xe xích chuyên dụng; Thử nghiệm tăng cường; Tuổi thọ; Bền mỏi; Xéc-măng piston; Phương pháp Locati; Hư hỏng.

ABSTRACT

The fatigue limit of piston rings is one of the key parameters governing the reliability and service life of engines used in specialized tracked vehicles. Under actual operating conditions, piston rings are subjected simultaneously to cyclic mechanical loading, elevated temperatures, and severe frictional environments, resulting in complex fatigue damage accumulation and progressive degradation of mechanical properties. Conventional fatigue testing methods generally require a large number of specimens, long testing durations, and considerable experimental costs, while their ability to reproduce real service conditions remains limited. To overcome these limitations, this study investigates the scientific basis of accelerated testing for evaluating the fatigue strength of piston

rings. Based on an analysis of loading characteristics and fatigue failure mechanisms, an appropriate accelerated testing approach is selected to ensure similarity between laboratory testing conditions and actual operating environments. The Locati method is identified as a suitable accelerated fatigue testing technique due to its capability to rapidly determine the fatigue limit by applying incrementally increasing load levels until specimen failure occurs. Compared with conventional constant-amplitude fatigue tests, the Locati method significantly reduces testing time, specimen consumption, and experimental costs. The results demonstrate that the proposed accelerated testing approach can effectively determine the fatigue limit of piston rings while maintaining the representativeness of fatigue failure mechanisms. The findings contribute to improving the reliability of fatigue life assessment and provide a scientific basis for condition monitoring, durability evaluation, and maintenance planning of engines employed in specialized tracked vehicles.

Keywords: Specialized tracked vehicle; Accelerated testing; Service life; Fatigue strength; Piston ring; Locati method; Failure.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xéc-măng piston là chi tiết làm việc trong điều kiện tải trọng cơ học và nhiệt độ thay đổi theo chu kỳ, chịu tác động đồng thời của áp suất khí cháy, lực quán tính và ma sát với thành xi lanh. Đối với động cơ xe xích chuyên dụng, chế độ làm việc thường xuyên thay đổi, tải trọng lớn và điều kiện khai thác khắc nghiệt làm gia tăng nguy cơ xuất hiện các vết nứt mỏi trên xéc-măng. Sự phá hủy do mỏi của xéc-măng có thể dẫn đến giảm độ kín buồng cháy, tăng tiêu hao dầu bôi trơn, suy giảm công suất động cơ và gây hư hỏng thứ cấp cho nhóm piston – xi lanh. Vì vậy, việc xác định chính xác giới hạn bền mỏi của xéc-măng piston có ý nghĩa quan trọng trong đánh giá độ tin cậy, dự báo tuổi thọ làm việc và xây dựng các giải pháp nâng cao độ bền cho động cơ xe xích chuyên dụng.

Các phương pháp truyền thống như Velera cổ điển yêu cầu số lượng mẫu lớn (≈ 20 mẫu), khối lượng công việc cao (100%) dù cho độ chính xác cao (sai số $\approx 0\%$), dẫn đến chi phí và thời gian thử nghiệm lớn. Phương pháp Pro có cải thiện về khối lượng công việc (10-19%) nhưng vẫn giữ số mẫu cao, nên hiệu quả chưa

thực sự tối ưu. Ngược lại, các phương pháp tăng cường như Enomoto, Locati cho phép giảm số lượng mẫu (3-6 mẫu) và khối lượng công việc ($\approx 4-5\%$), song làm gia tăng sai số xác định. Cụ thể như Enomoto có sai số 10-20%, hạn chế khả năng ứng dụng thực tế. Trong khi đó, phương pháp Locati duy trì sai số ở mức thấp hơn (3-10%) với số lượng mẫu giảm và khối lượng thử nghiệm nhỏ. Do đó, xét trên sự cân bằng giữa độ chính xác và hiệu quả kinh tế, phương pháp Locati được xem là lựa chọn hợp lý cho xác định giới hạn bền mỏi trong các bài toán kỹ thuật ứng dụng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA PHƯƠNG PHÁP

Phương pháp Locati dựa trên giả thuyết cộng tuyến tính hư hỏng mỏi của chi tiết. Ở một mức tải nhất định σ_i trong mẫu thử hoặc chi tiết sẽ hình thành một phần hư hỏng nhất định, tỷ lệ với số chu kỳ tải n_i đã trải qua. Phá hủy do mỏi của chi tiết xảy ra khi tổng các đại lượng hư hỏng tương đối tại các mức ứng suất thay đổi khác nhau đạt tới giá trị bằng một.

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

Trong đó: i là số bậc tải; N_i là số chu kỳ tải ứng với thời điểm mẫu bị phá hủy.

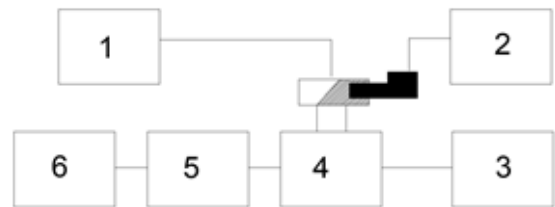
Phương pháp Locati cho phép xác định σ_{-1} dựa trên kết quả thử của một mẫu hoặc một chi tiết dưới chế độ tải biến thiên tăng dần theo từng bậc.

Tổng hư hỏng tương đối $\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i}$ tích lũy trong mẫu đến thời điểm phá hủy được tính toán. Trong đó xác định ba giá trị tổng theo ba đường cong mỗi quy ước: một đường tương ứng với độ bền dự kiến lớn nhất, một đường tương ứng với độ bền dự kiến nhỏ nhất, và đường thứ ba là giá trị trung bình giữa hai đường trên. Các đường cong này có hình dạng tương tự đường cong mỗi lấy từ tài liệu tham khảo, hoặc có thể được xác lập bằng thực nghiệm trên một số lượng mẫu nhỏ. Từ ba giá trị tổng hư hỏng tương đối thu được, xây dựng quan hệ (2) thông qua nội suy đồ thị của quan hệ này sẽ xác định được giá trị thực của giới hạn bền mỏi, tương ứng với điều kiện theo giả thuyết tích lũy tuyến tính hư hỏng.

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = f(\sigma_{-1}) \quad (2)$$

Phương pháp Locati là phương pháp kiểm tra nhanh và có thể áp dụng khi cần đánh giá nhanh sự thay đổi độ bền mỏi của mẫu hoặc chi tiết do ảnh hưởng của các yếu tố như thay đổi tính chất kim loại, công nghệ chế tạo, hình dạng chi tiết. Phương pháp có thể bổ sung đáng kể cho các phương pháp kiểm tra tính đàn hồi của xéc-măng trong động cơ đốt trong hiện đang được áp dụng tại các nhà máy. Việc kiểm chứng khả năng áp dụng phương pháp Locati và lựa chọn chế độ thử nghiệm tăng cường được tiến hành trên các mẫu cắt ra từ xéc-măng pít-tông của động cơ 5TDF của xe xích chuyên

dụng. Mẫu thử có dạng một cung tròn với góc ở tâm 55° , chiều dày 2,5 mm. Vật liệu xéc-măng là thép 65G, độ cứng HRC = 19-27. Các thử nghiệm được thực hiện trên bộ rung điện động kiểu EDV-2 ở nhiệt độ $+20^\circ\text{C}$. Sơ đồ khối của bộ thử rung (hình 1).



Hình 1. Sơ đồ khối của bộ thử rung điện động:
1 - Thiết bị đo tần số; 2 - Thiết bị đo dịch chuyển KM-6; 3 - Bộ chỉnh lưu; 4 - Bộ kích thích dao động điện động EDV-2; 5 - Bộ khuếch đại.

Biên độ dao động của mẫu được đo theo biên độ chuyển vị ở đầu tự do bằng thước đo KM-6; số chu kỳ tải được ghi nhận bằng tần số kế. Mẫu thử được kẹp trên bộ rung bằng đồ gá chuyên dụng, giữa các bề mặt mài phẳng với khóa lực đã hiệu chuẩn ở mô-men 1,5 kgf.m. Chiều dài phần kẹp của mẫu là 40 mm và được kiểm tra khi lắp đặt bằng thước chuyên dụng. Mẫu thử chịu tải uốn chu kỳ và ứng suất tại tiết diện nguy hiểm của mẫu (tại vị trí kẹp) có thể được xác định theo công thức (3).

$$\sigma_i = \frac{M_i}{W_i} = \frac{q.l^2}{2.W_i} \quad (3)$$

Trong đó, M_i là mô-men uốn tại tiết diện nguy hiểm của mẫu, kgf.m; W_i là mô-men chống uốn theo trục của tiết diện, cm^3 ; q là tải phân bố, kgf/cm; l là chiều dài kẹp của mẫu, cm.

Giá trị q được xác định từ biểu thức độ võng của mẫu:

$$q = \frac{8.f.E.J}{l} \quad (4)$$

Trong đó: f là độ võng của dầm, cm; E là mô-đun đàn hồi dọc, kgf/cm²; J là mô-men quán tính tiết diện, cm⁴.

Như vậy, bằng cách ấn định độ võng của mẫu trong quá trình thử có thể xác định được giá trị ứng suất tương ứng tại tiết diện nguy hiểm. Để xác định σ_{-1} theo phương pháp Locati cần phải xác định trước ba đường cong mỏi quy ước của vật liệu chi tiết. Thí nghiệm được tiến hành qua hai giai đoạn:

Giai đoạn 1: Xác lập đường cong bền mỏi thực nghiệm của mẫu xéc-măng bằng các phép thử dài hạn trên số lượng mẫu lớn (35 mẫu) với cơ sở thử $N = 10^7$ chu kỳ;

Giai đoạn 2: Xác định σ_{-1} bằng phương pháp Locati.

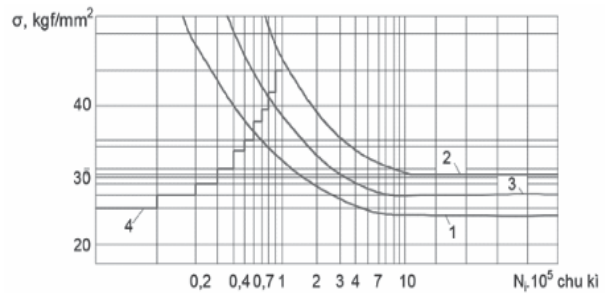
Mức tải ban đầu của mẫu trong thử nghiệm tăng cường theo phương pháp Locati được chọn là 24,8 kgf/mm² vì sau giai đoạn 1 đã thu được giá trị $\sigma_{-1} = 27 \pm 3$ kgf/mm².

Tải được tăng theo từng bậc với cùng một số chu kỳ ở mỗi bậc và quá trình thử tiếp tục cho đến khi mẫu bị phá hủy. Bước tăng ứng suất giữa hai bậc kế tiếp là 2 kgf/mm².

Thời lượng thử tại mỗi bậc là 10^5 chu kỳ tương ứng với tốc độ gia tải $2 \cdot 10^{-5}$ kgf/(mm² chu kỳ). Việc đếm chu kỳ được tiến hành cho tới khi xuất hiện vết nứt mỏi, hiện tượng này được xác định thông qua sự giảm biên độ dao động và sự suy giảm tần số cộng hưởng của mẫu có giá trị 1100-1150 Hz trong quá trình thử.

3. KẾT QUẢ

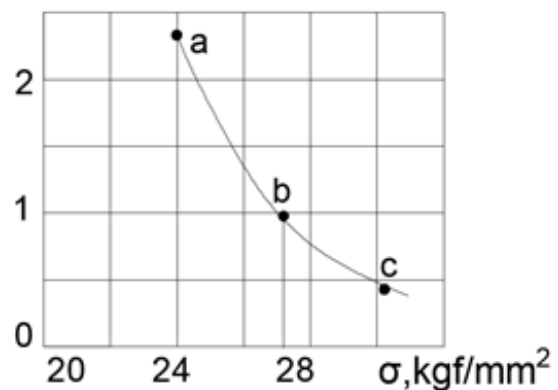
Dựa trên các đường cong mỏi quy ước và giản đồ tải, ta tính được tổng hư hỏng tương đối của mẫu cho đến khi phá hủy (Bảng 1).



Hình 2. Kết quả thử nghiệm mỏi của các vòng piston:

- 1, 2, 3 - Các vị trí biên và vị trí trung bình của các đường cong mỏi giả định (giai đoạn 1);
4 - Biểu đồ tải của mẫu thử (giai đoạn 2).

Bằng phương pháp nội suy đồ thị từ các dữ liệu thu được, xác định mức ứng suất sao cho tổng hư hỏng tương đối bằng 1. Để thực hiện điều đó, lập đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa tổng hư hỏng tương đối của một trong ba đường cong mỏi quy ước và giới hạn bền mỏi tương ứng với từng đường cong (hình 3).



Hình 3. Xác định nội suy giới hạn bền mỏi của mẫu: a, b, c lần lượt bằng σ_{-1} 24, 27 và 30 kgf/mm².

Giá trị ứng suất 27,3 kgf/mm² tương

ứng với điều kiện $\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1$. Trên đồ thị (hình

3) có tổng cộng có 6 mẫu được thử, kết quả được trình bày trong bảng 2.

Bảng 1. Tổng mức hư hỏng tương đối của một trong các mẫu trong thử nghiệm tăng cường ($n = 10^5$ chu kỳ).

Ứng suất σ , kgf/mm ²	Đường cong 1 ($\sigma_{-1} = 24$ kgf/mm ²)		Đường cong 2 ($\sigma_{-1} = 30$ kgf/mm ²)		Đường cong 3 ($\sigma_{-1} = 27$ kgf/mm ²)	
	N	n	N	n/N	N	n/N
24,8	$5,62 \cdot 10^6$	0,018	∞	0	∞	0
26,8	$2,69 \cdot 10^6$	0,037	∞	0	$1 \cdot 10^7$	0,01
28,8	$1,7 \cdot 10^6$	0,059	∞	0	$4,22 \cdot 10^6$	0,024
30,8	$1,19 \cdot 10^6$	0,084	$6,68 \cdot 10^6$	0,015	$2,67 \cdot 10^6$	0,037
32,8	$8,5 \cdot 10^5$	0,12	$4,27 \cdot 10^6$	0,023	$1,86 \cdot 10^6$	0,054
34,8	$6,77 \cdot 10^5$	0,15	$3,23 \cdot 10^6$	0,031	$1,29 \cdot 10^6$	0,077
36,8	$5,62 \cdot 10^5$	0,18	$2,51 \cdot 10^6$	0,04	$1,175 \cdot 10^6$	0,085
38,8	$4,27 \cdot 10^5$	0,234	$2,04 \cdot 10^6$	0,049	$9,43 \cdot 10^5$	0,106
40,8	$3,98 \cdot 10^5$	0,251	$1,7 \cdot 10^6$	0,059	$8,31 \cdot 10^5$	0,12
42,8	$3,31 \cdot 10^5$	0,302	$1,5 \cdot 10^6$	0,067	$7,07 \cdot 10^5$	0,14
44,8	$2,82 \cdot 10^5$	0,355	$1,32 \cdot 10^6$	0,076	$6,31 \cdot 10^5$	0,16
46,8	$2,51 \cdot 10^5$	0,398	$1,19 \cdot 10^6$	0,084	$5,37 \cdot 10^5$	0,186
48,8	$2,13 \cdot 10^5$	0,230	$1,07 \cdot 10^6$	0,046	$5,01 \cdot 10^5$	0,098
Tổng hư hỏng $\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i}$		2,41		0,49		1,1

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm mỏi tăng cường của các mẫu vòng găng piston

Số hiệu mẫu	Ứng suất σ theo phương pháp Locati, kgf/mm ²	Độ sai lệch so với $\sigma_{-1} = 27$ kgf/mm ² , %
1	25,4	-5,9
2	26,4	-2,2
3	26,4	-2,2
4	24,7	-8,5
5	26,2	-2,9
6	27,3	+1,5



Độ lệch trung bình của các giá trị giới hạn bền mỗi thu được theo phương pháp Locati so với giá trị $\sigma_{-1} = 27 \text{ kgf/mm}^2$ xác định bằng thử dài hạn là $\pm 3,8\%$.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp Locati là một công cụ hiệu quả trong đánh giá nhanh giới hạn bền mỗi của chi tiết cơ khí, đặc biệt trong điều kiện cần rút ngắn thời gian thử nghiệm. Thông qua việc sử dụng các đường cong mỗi quy ước kết hợp với giản đồ tải, có thể xác định tổng hư hỏng tương đối và nội suy để tìm giá trị ứng suất giới hạn tương ứng với trạng thái phá hủy. Phương pháp cho phép xây dựng mối quan hệ rõ ràng giữa mức hư hỏng tích lũy và giới hạn bền mỗi, từ đó hỗ trợ phân tích và dự báo tuổi thọ chi tiết. Kết quả so sánh cho thấy độ lệch trung bình của giới hạn bền mỗi xác định theo phương pháp Locati so với trong quá trình khai thác khoảng $\pm 3,8\%$. Ngoài ra, phương pháp có thể được sử dụng như một công cụ hỗ trợ cho các thử nghiệm kiểm tra tính đàn hồi của xéc-măng trong động cơ đốt trong, góp phần nâng cao hiệu quả đánh giá chất lượng và tuổi thọ chi tiết. ❖

Ngày nhận bài: **26/4/2026**

Ngày phản biện: **05/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Phan Văn Khôi, “*Cơ sở đánh giá độ tin cậy*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, năm 2001.
- [2]. Nguyễn Ngọc Ban, Nguyễn Hoàng Nam (1992), “*Khai thác trạng bị Tăng thiết giáp*”. Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [3]. A. S. Pronikov, “*Machine Reliability*”. Mashinostroenie Publ., Moscow, USSR, 1978.
- [4]. “*Development of an Accelerated Testing Method for Track Links and Pins*”. NATI Report, State Registration No. 71022870, Inventory No. B300041.
- [5]. R. E. Kugel, “*Accelerated Life Tests in Mechanical Engineering*”. Znanie Publ., Moscow, USSR, 1968.
- [6]. “*STDF Engine. Technical Description*”. Military Publishing House of the Ministry of Defense of the USSR, Moscow, USSR, 1977.
- [7]. “*STDF Engine: Catalogue of Parts and Assembly Units*”. Military Publishing House of the Ministry of Defense of the USSR, Moscow, USSR, 1974.