NGHIÊN CỨU PHƯƠNG ÁN CẢI TIẾN KẾT CẤU NHẰM GIẢM TẢI TRỌNG CƠ, NHIỆT CỦA PÍT TÔNG ĐỘNG CƠ DIESEL 10D100

Nguyễn Văn Dương[1,*]

[1]*Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn*

Tóm tắt

Trong quá trình làm việc, pít tông phải chịu áp suất và nhiệt độ cao do quá trình đốt cháy hỗn hợp không khí - nhiên liệu, vì vậy việc nâng cao độ bền pít tông là cần thiết. Đối tượng nghiên cứu là pít tông của động cơ diesel trung tốc 10D100. Pít tông này đã được cải tiến, tuy nhiên, độ bền của pít tông vẫn cần được tiếp tục nâng cao nhờ các phương pháp khác nhau. Bài báo tập trung nghiên cứu nâng cao độ bền pít tông bằng cách cải tiến kết cấu pít tông, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của kết cấu pít tông tới thông số công tác của động cơ. Kết quả phân tích cho thấy, ứng suất và nhiệt độ tại các điểm khảo sát trên pít tông sau khi cải tiến kết cấu thấp hơn đáng kể so với thiết kế ban đầu và pít tông nguyên bản. Từ các kết quả ứng suất và nhiệt độ thu được, đồng thời so sánh với các tính chất cơ học của vật liệu, có xét tới ảnh hưởng của nhiệt độ, nhận thấy rằng pít tông mới có độ bền tốt hơn. Sau khi cải tiến kết cấu, pít tông giảm 4 kg (từ 26 kg xuống 22 kg). Ngoài ra, khi thay đổi kết cấu pít tông sẽ thay đổi cân bằng nhiệt trong nhóm pít tông, nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh pít tông có thể thay đổi tới 15ºC. Việc giảm nhiệt độ đỉnh pít tông có thể làm tăng sức bền và độ tin cậy của pít tông, nhưng điều này sẽ làm tăng lượng nhiệt thất thoát từ khí cháy truyền tới đỉnh pít tông.

Từ khóa: *Pít tông; sức bền; kết cấu; thiết kế; ứng suất; 10D100.*

1. Đặt vấn đề

Hàng năm, một số lượng lớn pít tông bị hư hỏng và phải thay thế. Các pít tông bị hư hỏng có thể do nhiều nguyên nhân khác nhau, nhưng chủ yếu liên quan tới nhiệt độ cao và sự tích tụ mỏi [1]. Hư hỏng do mỏi có thể xảy ra ở cả chế độ chu kỳ cao và chu kỳ thấp và thường là kết quả của sự kết hợp giữa các yếu tố như nhiệt độ, gradient nhiệt, điều kiện tải cơ học, áp suất khí cháy và ăn mòn hóa học [1-7]. Vì vậy, việc tăng độ tin cậy và sức bền pít tông là điều cần thiết. Đặc biệt đối với các pít tông động cơ diesel hạng nặng, nhiệt độ đỉnh pít tông có thể lên tới 800°C [8] và áp suất buồng đốt lên tới hơn 20 MPa [9].

Theo tính chất cơ học của vật liệu [10, 11], nhiệt độ càng cao thì giới hạn bền của vật liệu càng giảm, đặc biệt ở trong dải nhiệt độ cao, giới hạn bền của vật liệu bị suy giảm nghiêm trọng. Nghiên cứu [12] đã chỉ ra rằng việc nâng cấp công suất động cơ

[*] Email: duongnv@lqdtu.edu.vn
DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v19.n02.788

khiến ứng suất tối đa tác dụng lên pít tông tăng 50% sẽ dẫn đến tuổi thọ của pít tông giảm 4000 lần. Vì vậy, pít tông cần có kết cấu đảm bảo ứng suất và nhiệt độ thấp khi vận hành.

Trong các nghiên cứu về cải thiện độ tin cậy và độ bền của pít tông [13-19], phương pháp nâng cao độ bền pít tông bằng cải tiến kết cấu được sử dụng khá phổ biến [17, 18], bao gồm việc thay đổi kết cấu pít tông và thay đổi phương pháp làm mát pít tông. Ví dụ như thay đổi từ pít tông liền sang pít tông ghép, hay chuyển từ làm mát pít tông bằng phương pháp làm mát dầu tuần hoàn sang làm mát bằng phun dầu.

Ngoài ra, việc cải tiến kết cấu pít tông cũng có ảnh hưởng rất đáng kể tới thống số và hiệu suất động cơ. Giảm khối lượng pít tông sẽ làm giảm lực quán tính chuyển động tịnh tiến của pít tông và giảm hao phí cơ học trong nhóm pít tông-xilanh. Trong công trình [20], Belohub đã chỉ ra rằng, khi khối lượng pít tông động cơ VAZ-21083 giảm 10%, công suất và mô men xoắn tăng lần lượt là 150 ÷ 300 W và 0,25 ÷ 0,5 Nm, tương ứng với 10 ÷ 20% công suất ma sát giữa pít tông-xilanh. Cũng lưu ý rằng, việc thay đổi kết cấu pít tông làm thay đổi trạng thái cân bằng nhiệt trong nhóm pít tông, điều này có ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình trao đổi nhiệt giữa pít tông với môi chất công tác và quá trình cháy trong động cơ.

Như vậy, việc cải tiến kết cấu pít tông thường với 2 mục đích chính, một là giảm nhiệt độ, ứng suất pít tông khi vận hành; hai là giảm khối lượng pít tông. Đồng thời, trong quá trình cải tiến kết cấu cũng cần đánh giá các thông số công tác, hiệu suất động cơ đối với các kết cấu khác nhau của pít tông để lựa chọn kết cấu phù hợp nhất.

Một trong những phương pháp phân tích pít tông được sử dụng phổ biến hiện nay là phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method) [14, 17-19], dùng để mô phỏng mô hình pít tông trong các điều kiện vận hành và thu được các giá trị ứng suất, nhiệt độ, biến dạng với độ chính xác cao. Ngoài ra, việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích pít tông có thể tiết kiệm thời gian, chi phí và mang lại tính chính xác cao, điều này đặc biệt quan trọng trong giai đoạn đầu của quá trình thiết kế pít tông [21]. Phân tích nhiệt trạng thái ổn định và cấu trúc tĩnh trong ANSYS có thể cho thấy sự phân bố ứng suất, nhiệt độ và biến dạng sau khi áp dụng các điều kiện biên. Các kết quả phân tích về trạng thái nhiệt, trạng thái ứng suất-biến dạng của pít tông là cơ sở chính để đánh giá sức bền và độ tin cậy của nó.

Động cơ 10D100 có vai trò rất lớn trong vận tải đường sắt, đã hơn 60 năm trôi qua kể từ khi bắt đầu được sản xuất hàng loạt và cần được cải tiến một cách nghiêm túc để tăng hiệu suất và độ tin cậy của động cơ, đặc biệt là nhóm pít tông. Trong [22], tác giả đã giới thiệu một kết cấu pít tông ghép thay thế cho mẫu pít tông nguyên bản.

Khối lượng của pít tông mới là 26 kg, bằng 65% khối lượng của pít tông cũ (khối lượng pít tông cũ là 40 kg).

Các báo cáo [20, 22-24] đã chỉ ra định hướng nghiên cứu tiếp theo như sau: Cải tiến kết cấu pít tông nhằm giảm nhiệt độ và ứng suất cơ-nhiệt trên pít tông khi vận hành và giảm khối lượng pít tông, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của kết cấu pít tông tới các thông số của chu trình công tác. Vấn đề này được giải quyết trong bài báo này.

Lưu ý rằng, khi giảm khối lượng pít tông sẽ ảnh hưởng tới tính chất động lực học và cân bằng động cơ, tuy nhiên, các vấn đề trên chưa được xem xét tới trong bài báo này.

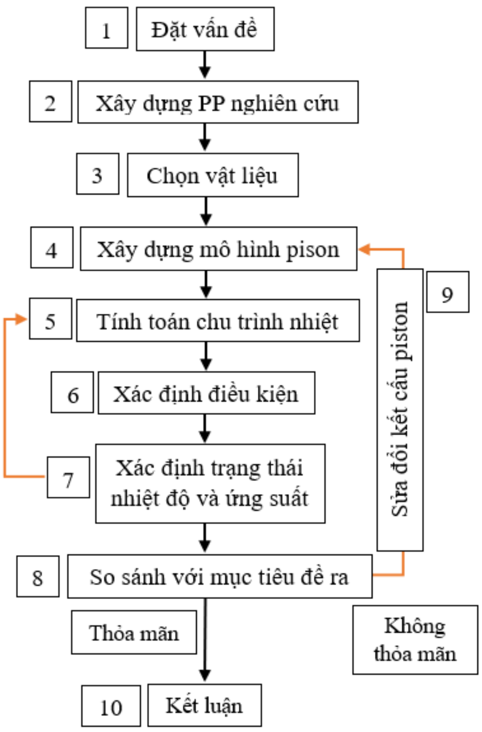
2. Phương pháp cải tiến kết cấu pít tông

2.1. Sơ đồ nghiên cứu

Dựa vào các phân tích và dẫn chứng được nêu ra trong phần 1, phương pháp cải tiến kết cấu pít tông và đánh giá ảnh hưởng của các kết cấu pít tông khác nhau tới thông số, hiệu suất động cơ được xác định như Hình 1.

Trong đó, công việc đầu tiên cần thực hiện là khảo sát trạng thái ứng suất và nhiệt độ của pít tông. Công việc này được thực hiện từ bước 3 đến bước 7 (Hình 1). Sau đó, dựa trên kết quả khảo sát nhiệt độ và ứng suất nhận được và so sánh với tính chất cơ học của vật liệu để đưa ra các phương án cải tiến hợp lý (Bước 8 - Hình 1).

Kết cấu pít tông được thay đổi trong bước 9 (Hình 1) dựa trên kết cấu của pít tông phiên bản đầu tiên và được ký hiệu là "PTM", các phiên bản pít tông khi thay đổi kết cấu từ pít tông PTM được ký hiệu là $PT_0...PT_n$.



Hình 1. Sơ đồ cải tiến kết cấu pít tông.

Lưu ý rằng, khi thay đổi kết cấu pít tông, nhiệt độ pít tông và tính chất quá trình trao đổi nhiệt giữa pít tông với môi trường xung quanh (khí cháy, chất làm mát, các chi tiết…) cũng thay đổi, vì vậy cần xác định lại điều kiện biên trên các bề mặt pít tông (Bước 5-6). Vòng lặp cải tiến kết cấu pít tông sẽ kết thúc khi xác định được kết cấu thỏa mãn yêu cầu đặt ra.

2.2. Tính chất vật liệu

Pít tông của động cơ 10D100 được chế tạo từ gang chịu nhiệt với độ cứng vật liệu HB = 207-255 [25, 26]. Để tính toán, tác giả chọn vật liệu là gang cầu ВЧ60-2 [25, 26] và các đặc tính của vật liệu được thể hiện trong bảng 1 [10, 11].

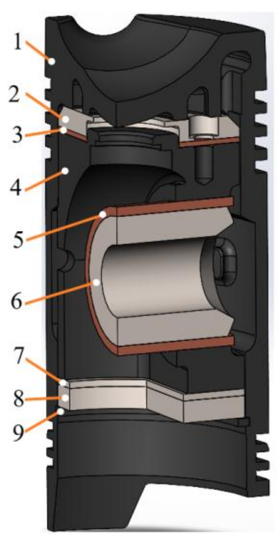
Bảng 1. Phụ thuộc tính chất cơ học của gang cầu ВЧ60-2 vào nhiệt độ

T	λ	C_p	α, 10^{-6}	E	σ_B	σ_T	$\sigma_{ДЛ}$	
							10^4 h	10^5 h
K	w/m.K	J/kg.K	1/K	MPa				
293	54,5	390	10	180000	600	400		
643	46,2	505	11,5	163650	510	307	275	220
699	45,1	510	11,8	160180	5	297	155	115
810	42,4	523	12,25	152410	270	208	45	30
866	41,6	532	12,47	148490	173	151	24	16
923	40,3	568	12,45	142500	99	90	13	8,5

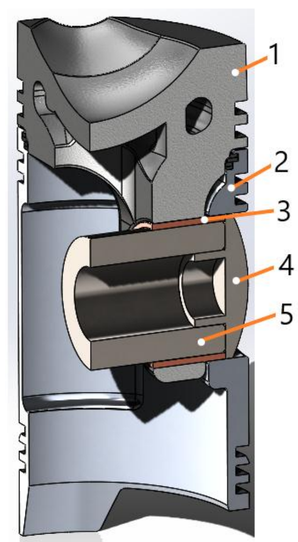
Trong bảng 1: T - nhiệt độ [K]; λ - hệ số dẫn nhiệt [w/m.K]; C_p - nhiệt dung riêng [J/kg.K]; α - hệ số giãn nở vì nhiệt [1/K]; E - mô đun đàn hồi [MPa] ; σ_B - giới hạn bền kéo [MPa]; σ_T - giới hạn chảy [MPa]; $\sigma_{ДЛ}$ - giới hạn bền dài [MPa].

2.3. Cấu tạo pít tông

Kết cấu pít tông nguyên bản (PTNB) và pít tông mới phiên bản đầu tiên (PTM) được thể hiện như trên Hình 2.



1 - cốc pít tông;
2 - tấm đệm trên;
3 - miếng lót trên;
4 - bệ chốt;
5 - bạc lót;
6 - chốt pít tông;
7 - miếng lót dưới,
8 - tấm đệm dưới;
9 - vòng hãm.



1 - đầu pít tông;
2 - thân pít tông;
3 - bạc lót;
4 - nút hãm;
5 - chốt pít tông.

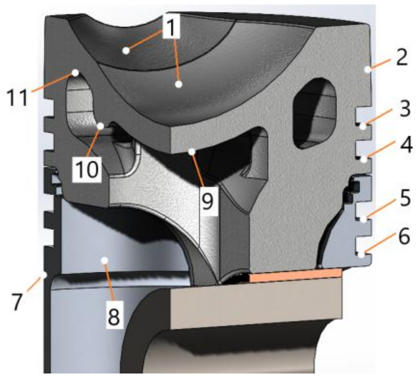
a) *b)*

Hình 2. Kết cấu pít tông PTNB (a) và kết cấu pít tông PTM (b).

Động cơ 10D100 là động cơ 2 kỳ kiểu đối đỉnh, các pít tông đóng vai trò là các van trượt để đóng-mở cửa nạp/xả, vì vậy, khi thiết kế pít tông mới, hình dạng cơ bản bên ngoài của pít tông nguyên bản được giữ nguyên (Hình 2), nhằm giữ nguyên hình dạng buồng cháy và quá trình trao đổi khí của động cơ. Việc thay đổi kết cấu, vật liệu phần thân pít tông và số lượng bộ phận trong nhóm pít tông làm cho khối lượng pít tông giảm từ 40 kg xuống 26 kg.

2.4. Xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông

Nhiệm vụ đầu tiên trong quá trình đánh giá trạng thái ứng suất nhiệt của pít tông là xác định các điều kiện biên (BC) cho các bề mặt khác nhau của pít tông (Hình 3). Để xác định điều kiện biên trên các bề mặt pít tông, tác giả bài báo này sử dụng phương pháp được công bố trong các báo cáo [27, 28]. Trong đó, phần mềm Matlab và Ansys Workbench được sử dụng để mô phỏng sự tương tác giữa nhiệt độ bề mặt buồng đốt tới thông số chu trình công tác của động cơ, và tương tác nhiệt giữa các cặp bề mặt trao đổi nhiệt trong nhóm pít tông - xi lanh. Qua đó, xác định điều kiện biên trên các bề mặt pít tông.



Hình 3. Các bề mặt cần xác định điều kiện biên nhiệt trên pít tông.

Bảng 2. Điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông

STT bề mặt	Pít tông nguyên bản (PTNB)		Pít tông mới (PTM)		STT bề mặt	Pít tông nguyên bản (PTNB)		Pít tông mới (PTM)	
	α_T, W/м^2.K	T, K	α_T, W/м^2.K	T, K		α_T, W/м^2.K	T, K	α_T, W/м^2.K	T, K
1	1955	985	1895	982	**7**	3000	385	3000	355
2	350	656	350	625	**8**	250	370	250	370
3	25000	435	25000	405	**9**	1480	353	1200	370
4	17000	405	17000	376	**10**	425	358	750	370
5	12000	385	12000	360	**11**	650	373	590	370
6	7000	385	7000	357					

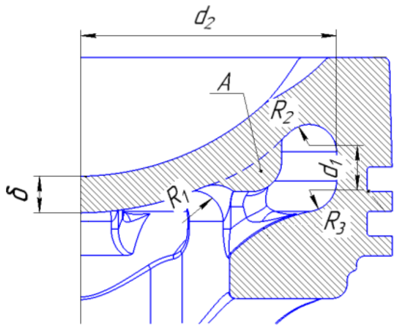
Theo kết cấu pít tông trên Hình 2, pít tông nguyên bản được làm mát bằng dòng dầu phun lên từ đầu nhỏ thanh truyền vào khu vực trung tâm, sau đó dầu đi ra khoang làm mát ngoài cùng. Ở khoang làm mát ngoài cùng, pít tông được làm mát bằng phương pháp quán tính (Hình 2a). Trong khi đó, pít tông cải tiến hoàn toàn được làm mát bằng dòng dầu phun lên từ đầu nhỏ thanh truyền (phương pháp phun dầu - Hình 2b).

Việc thay đổi phương pháp làm mát sẽ có ảnh hưởng nhất định tới hiệu quả làm mát và nhiệt độ pít tông. Vấn đề này đã được tác giả xem xét trong một báo cáo trước đây [24], tác giả đã chứng minh rằng, đối với thiết kế cải tiến (Hình 2b), dầu làm mát ở nhiệt độ 97^{o}C (370 K) cho hiệu quả làm mát tốt hơn. Vì vậy, đối với thiết kế pít tông mới, tác giả chọn dầu làm mát ở 97^{o}C (370 K). Đối với pít tông nguyên bản, các thông số được lấy theo động cơ nguyên bản [25, 26].

Kết quả xác định điều kiện biên nhiệt trên các bề mặt pít tông nguyên bản (PTNB) và pít tông cải tiến (PTM) theo các bề mặt như trên Hình 3 được thể hiện trong Bảng 2.

2.5. Cải tiến kết cấu pít tông

Như đã đề cập đến trong phần 2.3, hình dạng bên ngoài của pít tông cần được giữ nguyên, để bảo toàn hình dạng buồng cháy và quá trình trao đổi khí của động cơ. Vì vậy, khi cải tiến kết cấu pít tông, chỉ có thể thay đổi kích thước, kết cấu bên trong của pít tông. Các kích thước mà tác giả thay đổi trong quá trình cải tiến kết cấu được thể hiện trên Hình 4. Trong quá trình cải tiến kết cấu pít tông, tác giả tiến hành thay đổi kích thước, kết cấu pít tông và so sánh kết quả nhiệt độ, ứng suất giữa các phương án để tìm ra kết cấu tối ưu.



Hình 4. Kết cấu pít tông PTM.

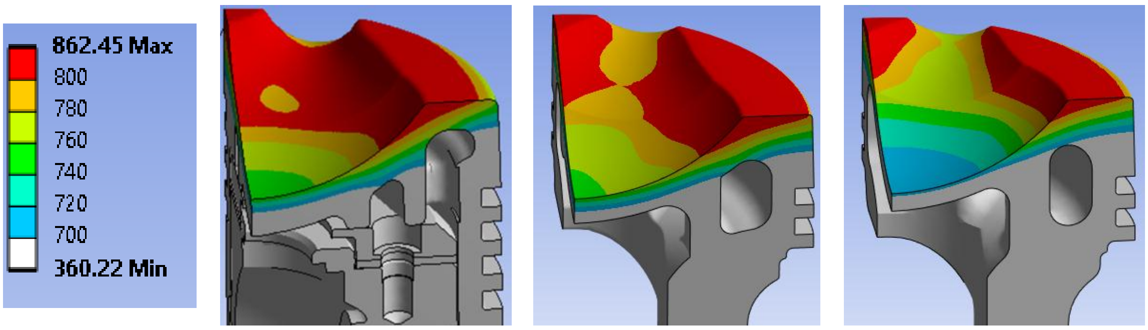
Mô hình pít tông được tính toán ở chế độ công suất định mức, với lưu lượng nhiên liệu tiêu thụ của động cơ là 9,91 g/chu trình, tương đương 505,4 kg/h, tại thời điểm áp suất cực đại (P_z = 10 MPa) và lực ngang N = 23000 N tác dụng lên thân pít tông [21].

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả khảo sát trạng thái nhiệt và trạng thái ứng suất pít tông

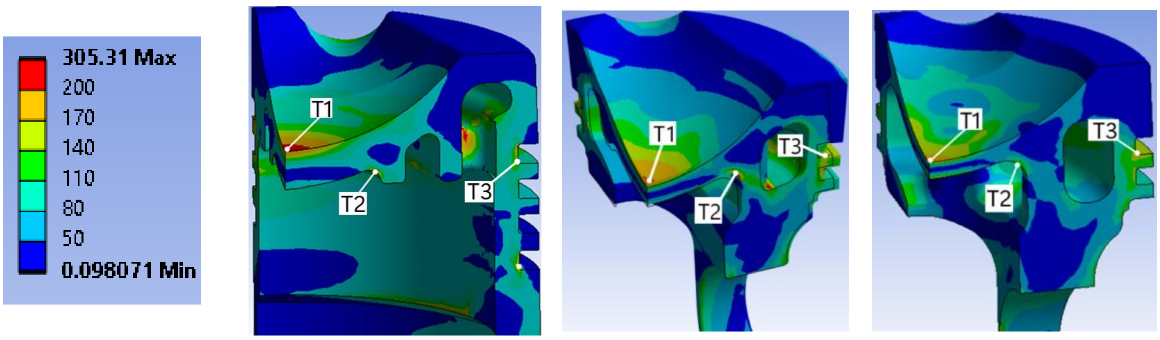
Kết quả xác định trạng thái nhiệt và trạng thái ứng suất của các phương án thay đổi kết cấu pít tông được thể hiện trong Bảng 3, Hình 5 và Hình 6.

Bằng việc sử dụng kết cấu pít tông ghép, khối lượng của pít tông PTM so với pít tông PTNB đã giảm được 14 kg, tuy nhiên, trạng thái ứng suất và nhiệt độ trên pít tông PTM gần như không tốt hơn so với pít tông PTNB (xem Bảng 3, Hình 5 và Hình 6). Phân tích kết cấu pít tông PTM, tác giả nhận thấy rằng, gân tăng cứng “A” (Hình 4) làm cản trở sự lưu thông của dòng dầu làm mát được phun lên từ đầu nhỏ thanh truyền, vì vậy, để giảm nhiệt độ pít tông thì gân tăng cứng này cần được loại bỏ. Tác giả đã tiến hành loại bỏ gân tăng cứng và tăng đường kính R_1 trong pít tông PT_0. Sau khi thay đổi kết cấu, hiệu quả làm mát pít tông đã tăng đáng kể, cụ thể hệ số trao đổi nhiệt giữa dầu làm mát và mặt trong của đỉnh pít tông đã tăng từ 1200 [W/м^2.K]; 750 [W/м^2.K]; 590 [W/м^2.K] lên 1630 [W/м^2.K]; 1050 [W/м^2.K]; 630 [W/м^2.K], theo thứ tự tại các bề mặt 9, 10, 11 trên Hình 3. Trạng thái nhiệt của pít tông PT_0 đã giảm gần 40 K so với pít tông PTM, trong khi ứng suất trên pít tông lại tăng lên đáng kể (xem Bảng 3). Như vậy, vấn đề giảm nhiệt độ pít tông đã cơ bản được giải quyết, công việc tiếp theo là cải tiến kết cấu pít tông từ kết cấu pít tông PT_0 để giảm ứng suất trên pít tông. Các kích thước kết cấu được thay đổi như trên Hình 4. Trong đó, chiều dày của đỉnh pít tông (δ), bán kính góc lượn (R_1, R_2) ảnh hưởng tới độ cứng vững và khả năng tản nhiệt của đỉnh pít tông; các kích thước (d_1, d_2) ảnh hưởng tới độ cứng vững và khả năng tản nhiệt của thành pít tông.



Thang đo *a)* *b)* *c)*

Hình 5. Trạng thái nhiệt của pít tông PTNB (a), PTM (b), PT_8 (c).



Thang đo *a)* *b)* *c)*

Hình 6. Trạng thái ứng suất của pít tông PTNB (a), PTM (b), PT_8 (c).

Kết quả phân tích trạng thái nhiệt và trạng thái ứng suất của các phương án cải tiến kết cấu cho thấy, tại khu vực 1, khu vực 2 và khu vực 3 là các vị trí xuất hiện ứng suất cao (xem Hình 6 và Bảng 3).

Bảng 3. Kết quả xác định nhiệt độ và ứng suất tại các điểm khảo sát trên pít tông

Phương án	δ, mm	R_1, mm	R_2, mm	d_1, mm	d_2, mm	Khu vực 1		Khu vực 2		Khu vực 3	
						T, K	σ, MPa	T, K	σ, MPa	T, K	σ, MPa
PTNB						**755**	**211**	**590**	**244**	**480**	**275**
PTM	12	10	9	15	85	757	201	567	252	455	265
PT_0	12	15	9	15	85	720	242	520	198	430	326
PT_1	12	15	9	15	90	720	242	525	188	410	300
PT_2	12	8	9	15	80	720	195	540	283	435	250
PT_3	17	15	15	10	85	730	217	515	170	425	287
PT_4	7	10	15	15	85	710	216	530	220	425	250
PT_5	7	10	10	15	85	710	210	530	264	425	275
PT_6	8	8	10	15	85	730	220	525	235	420	270
PT_7	8	12	12	15	85	710	210	535	220	420	270
PT_8	**8**	**10**	**15**	**15**	**85**	**710**	**180**	**530**	**225**	**420**	**230**

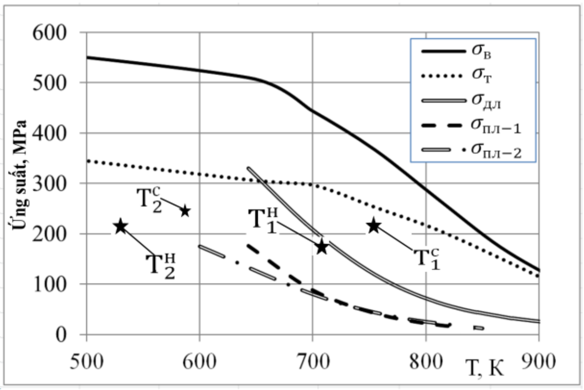
Trong Bảng 3: Khu vực 1 - khu vực trung tâm đỉnh pít tông; khu vực 2 - khu vực góc lượn dưới đỉnh; khu vực 3 - khu vực rãnh xéc măng khí thứ 1 (tương ứng các điểm T1, T2, T3 trong Hình 6).

Khi tăng chiều dày đỉnh pít tông (δ) từ 12 mm lên 17 mm, ứng suất ở trung tâm đỉnh và tại vị trí góc lượn R_1 giảm từ 242 MPa và 198 MPa xuống 217 MPa và 170 MPa, tuy nhiên, nhiệt độ tại trung tâm đỉnh tăng từ 720 K lên 730 K, tại các vị trí 2 và 3, ứng suất đều giảm (xem PT_0, PT_3 trong Bảng 3). Như vậy, việc tăng độ dày đỉnh sẽ tăng độ cứng vững của phần đỉnh pít tông, giúp giảm ứng suất, tuy nhiên nhiệt độ phần đỉnh pít tông sẽ tăng lên do giảm khả năng tản nhiệt. Khi giảm chiều dày đỉnh pít tông xuống 8 mm (pít tông PT_8), kết quả phân tích cho thấy, ứng suất tại vị trí 1 và vị trí 3 giảm từ 242 MPa và 326 MPa ở pít tông PT_0 xuống 180 MPa và 230 MPa ở pít tông PT_8, nhưng ứng suất tại vị trí 2 tăng từ 198 MPa lên 225 MPa. Như vậy, việc giảm chiều dày đỉnh pít tông sẽ làm giảm độ cứng vững của phần đỉnh, làm tăng tải cơ học lên góc lượn R_1. Tuy nhiên, việc giảm chiều dày đỉnh làm tăng hiệu quả làm mát, điều này làm giảm nhiệt độ đỉnh pít tông, làm giảm sự giãn nở nhiệt và giảm ứng suất trên bề mặt đỉnh pít tông (xem Bảng 3, Hình 5c, Hình 6c). Tương tự, khi giảm bán kính R_1, độ cứng vững phần đỉnh sẽ giảm xuống, làm cho ứng suất tại khu vực 2 tăng lên từ 198 MPa ở pít tông PT_0 lên 283 MPa ở pít tông PT_2 (xem Bảng 3).

Theo kết quả khảo sát trạng thái nhiệt và trạng thái ứng suất của các phương án cải tiến kết cấu pít tông thì kết cấu pít tông PT_8 tốt hơn các phương án còn lại.

3.2. Đánh giá kết cấu mới và so sánh với pít tông nguyên bản

Kết quả đánh giá độ bền của pít tông cải tiến và pít tông nguyên bản được thể hiện trên Hình 7. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của kết cấu pít tông tới thông số công tác động cơ được thể hiện trong Bảng 4.



Hình 7. Đánh giá sức bền pít tông

T_1^H , T_2^H , T_1^C , T_2^C - ứng suất tại các điểm T1, T2 (Hình 6) trên pít tông PT_8 và pít tông PTNB [MPa]; σ_B, σ_T , $\sigma_{дл}$ - giới hạn bền kéo tức thời, giới hạn chảy và giới hạn bền dài (với τ = 10000 h) của gang BЧ60-2, [MPa]; $\sigma_{пл-1}$ - giới hạn rão của gang BЧ45 [MPa]; $\sigma_{пл-2}$ - giới hạn rão của gang BЧ20 [MPa].

Từ Hình 7, Bảng 3, Bảng 1 và trong quá trình khảo sát trạng thái nhiệt độ, trạng thái ứng suất của các phương án thiết kế, kết quả cho thấy ứng suất tại hầu hết các điểm khảo sát đều thấp hơn giới hạn bền $\sigma_{дл}$ của vật liệu BЧ60-2 tại các nhiệt độ tương ứng. Khi so sánh với giới hạn rão của vật liệu gang BЧ45 và BЧ20, nhận thấy rằng hầu hết các điểm trên pít tông có giá trị ứng suất nằm dưới giới hạn rão của gang BЧ45 và BЧ20 với các nhiệt độ tương ứng. Điểm T_1^C trên pít tông PTNB xuất hiện ứng suất vượt quá giới hạn bền dài, tuy nhiên vẫn dưới ngưỡng giới hạn chảy. Như vậy, khi so sánh với các giới hạn bền, cả pít tông PTNB và pít tông PT_8 đều đảm bảo độ bền cần thiết.

So sánh giá trị ứng suất và nhiệt độ giữa 2 mẫu pít tông (PTNB và PT_8) cũng như giữa các phương án thiết kế (Hình 7, Bảng 3), nhận thấy kết cấu pít tông PT_8 có giá trị ứng suất và nhiệt độ thấp hơn so với pít tông PTNB và các phương án thiết kế khác. Như vậy, kết cấu pít tông PT_8 có độ bền tốt hơn.

Sau khi cải tiến kết cấu, khối lượng của pít tông PT_8 bằng 22 kg (không tính khối lượng thanh truyền), giảm 4 kg so với thiết kế ban đầu (pít tông PTM - 26 kg).

Kết quả đánh giá ảnh hưởng của kết cấu pít tông tới thông số công tác của động cơ cho thấy, khi chuyển từ pít tông liền (PTNB - Hình 2a) sang pít tông ghép, kết hợp với việc thay đổi phương pháp làm mát, làm cho nhiệt độ trung bình bề mặt đỉnh pít tông giảm từ 815 K ở pít tông PTNB xuống 785 K ở pít tông PT_8, điều này làm giảm sấy nóng khí nạp, làm tăng lưu lượng khí nạp (từ 4,7643 kg/s lên 4,7712 kg/s), tăng hệ số nạp (từ 0,8189 lên 0,8197), tuy nhiên, nhiệt độ bề mặt pít tông giảm làm tăng lượng nhiệt thất thoát qua bề mặt đỉnh pít tông (tăng từ 9,2 kW ở pít tông PTNB lên 10,9 kW ở pít tông PT_8), làm giảm áp suất cháy, nhiệt độ cháy, công suất và hiệu suất chỉ thị. Tuy nhiên, sự thay đổi thông số công tác của động cơ tương đối nhỏ (xem Bảng 4).

Bảng 4. Ảnh hưởng của kết cấu pít tông tới thông số công tác của động cơ

STT	T_P, [K]	P_z , [MPa]	T_z , [K]	Ni , [kW]	η_i	G_{kk} , [kg/s]	N_v	Q_p, [kW]
PTNB	815	10,2	1652	2779	0,4659	4,7643	0,8189	9,2
PT_0	792	10,181	1648	2773	0,4647	4,7708	0,8194	10,5
PT_5	798	10,185	1650	2775	0,465	4,7706	0,8193	10,16
PT_8	785	10,168	1647	2772	0,4643	4,7712	0,8197	10,9

Trong Bảng 4: STT tương ứng với các phương án thay đổi kết cấu trong Bảng 3; T_P - nhiệt độ trung bình trên bề mặt đỉnh pít tông [K]; P_z - áp suất cháy tối đa [MPa]; T_z - nhiệt độ cháy tối đa [K]; Ni - công suất chỉ thị [kW]; η_i - hiệu suất chỉ thị; G_{kk} - lưu lượng không khí [kg/s]; N_v - hệ số nạp; Q_p - lượng nhiệt truyền từ môi chất công tác tới đỉnh một pít tông [kW].

4. Kết luận

Sau quá trình cải tiến kết cấu pít tông, khối lượng pít tông tiếp tục giảm 4 kg, tức là pít tông mới sau khi cải tiến kết cấu (PT_8) có khối lượng 22 kg bằng 55% so với pít tông nguyên bản (PTNB) và bằng 85% so với thiết kế trước khi cải tiến kết cấu (PTM).

Kết quả phân tích nhiệt độ và ứng suất của các phương án cho thấy, kết cấu pít tông PT_8 là tốt hơn các phương án còn lại. Ngoài ra, pít tông PT_8 có nhiệt độ thấp hơn pít tông PTNB, nhiệt độ trung bình của bề mặt đỉnh của pít tông PT_8 là 785 K, so với 815 K của pít tông PTNB. Trạng thái ứng suất trên pít tông PT_8 thấp hơn đáng kể tại hầu hết các điểm được kiểm tra. Ở tâm đỉnh pít tông, ứng suất giảm 30 MPa (180 MPa ở pít tông PT_8 so với 211 MPa ở pít tông PTNB).

Kết quả đánh giá sức bền của pít tông cho thấy cả pít tông PT_8 và pít tông PTNB đều đáp ứng đủ độ bền cần thiết. Tuy nhiên, pít tông PT_8 có nhiệt độ và ứng suất thấp hơn nên sẽ có sức bền và độ tin cậy cao hơn.

Khi thay đổi kết cấu pít tông sẽ làm thay đổi nhiệt độ pít tông và tính chất trao đổi nhiệt giữa pít tông với môi chất công tác, chất làm mát và các chi tiết, qua đó sẽ có ảnh hưởng tới các thông số công tác của động cơ. Tuy nhiên, sự thay đổi này tương đối nhỏ.

Như vậy, dựa trên các tiêu chí đánh giá về khối lượng, trạng thái nhiệt, trạng thái ứng suất và sự thay đổi thông số công tác của động cơ, kết cấu pít tông PT_8 là kết cấu tối ưu.

Tài liệu tham khảo

[1] F. Silva, "Fatigue on engine pistons - A compendium of case studies", *Engineering Failure Analysis,* Vol. 13, No. 3, pp. 480-492, 2006. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2004.12.023

[2] H. Ammar, A. Samuel, and F. Samuel, "Effects of surface porosity on the fatigue strength of AE425 and PM390 hypereutectic Al-Si casting alloys at medium and elevated temperatures", *Materials Science Engineering,* Vol. 473, No. 1-2, pp. 58-64, 2008. DOI: 10.1016/j.msea.2007.03.111

[3] G. G. Martin, "Failure of a stationary pump engine piston", *Journal of Failure Analysis and Prevention,* Vol. 4, No. 1, pp. 37-39, 2004. DOI: 10.1361/15298150417881

[4] H. Ye, "An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications", *Journal of Materials Engineering Performance,* Vol. 12, pp. 288-297, 2003. DOI: 10.1361/105994903770343132

[5] H. Okamoto, N. Anno, and T. Itoh, "New computational and experimental stress analysis method for the design decision on optimum piston configuration of production engine", SSAE Technical Paper 920065, ISSN: 0148-7191, 1992. DOI: 10.4271/920065

[6] A. J. Moffat, B. G. Mellor, C. L. Chen, R. C. Thomson, and P. A. S. Reed, "Microstructural analysis of fatigue initiation in Al-Si casting alloys," in *Materials Science Forum*, *2006*, Vols. 519-521, pp. 1083-1088. © 2006 Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.1083

[7] Y. Wang, X. Qi, and K. Hu, "The reliability analysis for the piston, connecting rod and crankshaft assembly of diesel engine", in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, October 21-23, 2019, Beijing, China*, 2019.

[8] Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков, *Конструирование двигателей внутреннего сгорания: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Двигатели внутреннего сгорания*, М.: Машиностроение, 2008. 496 с., ил. ISBN 978-5-217-03409-3.

[9] H. Junker and W. Issler, "Pistons for high loaded direct injection diesel engines", MAHLE Technical Information.

[10] D. V. Rakutina, V. V. Bukhmirov, and Y. S. Sonyshkova, Reference materials for solving problems in the course “Heat and Mass Transfer”. Ivanovo: GOU VPO "V. I. Lenin Ivanovo State Energy University", 2009.

[11] N. G. Girshovich, *Handbook on iron casting*. Moscow: Mechanical Engineering. Leningr. Department, 1978.

[12] M. Najafi, H. Dastani, M. Abedini, and S. Pirani, "Stress analysis and fatigue life assessment of a piston in an upgraded engine", *Journal of Failure Analysis Prevention,* Vol. 19, pp. 402-411, 2019. DOI: 10.1007/s11668-019-00583-4

[13] A. Jankowski and M. Kowalski, "Design of a new alloy for internal combustion engines pistons", in *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design Albufeira/Portugal*. Editors J. F. Silva Gomes and S. A. Meguid. Publ. INEGI/FEUP, pp. 607-618, 2017.

[14] S. Gai and J. Zhao, "Simulation and Experimental Investigation on Fatigue Resistance of the Forged Steel Piston in High-Duty Engine", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 32, Iss. 7, pp. 3202-3214, 2022. DOI: 10.1007/s11665-022-07316-z

[15] A. Ahmed, M. Wahab, A. Raus, K. Kamarudin, Q. Bakhsh, and D. Ali, "Mechanical properties, material and design of the automobile piston: An ample review", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 9, No. 36, pp. 1-7, 2016. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i36/102155

[16] M. Trunzo, J. Schubbe, S. M. Graham, and P. Caton, "Integration of Carbon Fiber Composite Materials into Air-Cooled Reciprocating Piston Engines for UAV Applications", in *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 9-15, 2012, Houston, Texas, USA*, Vol. 3, pp. 943-956. DOI: 10.1115/IMECE2012-87607

[17] P. C. Mishra and S. Kumar, "Modeling for Design Optimization of Piston Crown Geometry Through Structural Strength and Lubrication Performance Correlation Analysis", *Frontiers in Mechanical Engineering*, Vol. 5, 2019. DOI: 10.3389/fmech.2019.00017

[18] Z. R. Lee and P. X. Ku, "Geometry design and optimization of piston by using finite element method", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2120, No. 1, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2120/1/012013

[19] J. Gao, A. Yao, and C. Yao, "The Thermal Load and Ablation Mechanism of Piston Subjected to Detonation", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 142, No. 9, 2020. DOI: 10.1115/1.4047507

[20] А. В. Белогуб и А. С. Стрибуль, "Прогрессивные решения при проектировании и производстве поршней для автомобильных двигателей", *Двига - тели внутреннего сгорания*, № 1, С. 132-135, 2005.

[21] N. V. Duong, "*Piston of a medium-speed diesel engine construction designing using the modified method of thermal-stress state analysis"*, Ph.D. thesis, Kharkov, 2020, p. 182.

[22] А. В. Белогуб, В. З. Нгуен, О. Ю. Линьков, и С. А. J. Д. в. з. Кравченко, "Разработка конструкции «легкого» поршня для дизелей типа Д100", № 1, С. 50-55, 2016. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.10

[23] N. V. Duong and O. V. Bilohub, "Determination of boundary conditions for calculation thermo stressed condition of piston", *Aerospace Technic and Technology*, Vol. 1, pp. 39-47, 2019. DOI: 10.32620/aktt.2019.1.04

[24] A. Bilohub, N. V. Duong, F. Sirenko, …, I. Zajačko, "Analysis of heat transfer coefficients for simulation of the heat exchange between oil and the internal cavity faces of the isolated piston at variable gravity conditions", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* Vol. 776, No. 1, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/776/1/012020

[25] G. B. Rosenblit, *Heat transfer in diesel engines*. Mechanical Engineering Publ., 1977.

[26] A. G. Avrunin, "Diesel Locomotives 2D100 and 10D100", *Transport,* Moscow, Russia, p. 321, 1970.

[27] P. X. Pham, N. V. Duong, "Determining thermal equivalent boundary conditions for piston surfaces", *Transport and Communications Science Journal,* No. Special issue, pp. 452-464, 2023.

[28] D. V. Nguyen and P. X. Pham, "Developing a Computational Fluid Dynamics-Finite Element Method Model to Analyze Thermal-Mechanical Stresses in a Heavy-Duty Medium-Speed Diesel Engine Piston During Warm-Up", *ASME Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 146, No. 2, 2023. DOI: 10.1115/1.4063901

STRUCTURAL IMPROVEMENT APPROACHES TO DECREASE THE MECHANICAL AND THERMAL LOADS FOR 10D100 DIESEL ENGINE PISTONS

Abstract: *During operation, the piston is subjected to high pressure and temperature due to the combustion of the air-fuel mixture, necessitating improvements in piston durability. This study focuses on a piston of the 10D100 medium-speed diesel engine. Although the piston has undergone previous improvements, its durability still requires enhancement through various methods. This article investigates approaches to improve piston durability by optimizing the piston structure and evaluating its impact on engine performance. Analysis shows that the stress and temperature at the survey modes on the piston, following the new design are significantly lower than both the initial design and the original piston. When comparing these stress and temperature outcomes against the material's mechanical properties, including temperature effects, the new piston demonstrates enhanced durability. The redesigned piston also resulted in a weight reduction from 26 kg to 22 kg. Additionally, modifying the piston structure alters the heat balance within the piston assembly, with the average temperature of the piston top surface potentially changing by up to 15°C. Reducing the piston crown temperature can increase the piston's strength and reliability; however, this also leads to increased heat loss from the combustion gases to the piston crown.*

Keywords: Piston strength; piston structure; piston design; piston stress; 10D100.

Nhận bài: 17/05/2024; *Hoàn thiện sau phản biện:* 22/07/2024*; Duyệt đăng:* 13/08/2024

❑