

Ảnh hưởng của xúc tác đến tốc độ cháy và sự biến thiên nhiệt độ trong vùng cháy của thuốc phóng trên nền nitrat xellulo và nitroglycerin với P/H = 1

Phạm Quang Hiếu*, Vũ Xuân Sơn

Viện Thuốc phóng Thuốc nổ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng.

*Email: hieuplus@gmail.com

Nhận bài: 10/8/2023; Hoàn thiện: 13/10/2023; Chấp nhận đăng: 12/12/2023; Xuất bản: 25/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.92.2023.92-99>

TÓM TẮT

Hỗn hợp xúc tác cháy gồm đồng-chì phthalate (PMC) và cacbon kỹ thuật (C) không chỉ ảnh hưởng đến tốc độ cháy của thuốc phóng gốc nitrat xellulo và nitroglycerin với P/H=1 mà còn ảnh hưởng đến đặc tính phân bố nhiệt độ tại các vùng cháy của thuốc phóng. Ảnh hưởng của hệ xúc tác này đến tốc độ cháy thuốc phóng thể hiện rõ nhất ở áp suất thấp 0.7 MPa, áp suất càng cao thì ảnh hưởng càng giảm ($Z \sim 1$). Đối với xúc tác chứa 6% PMC + 1% C cho hệ số Z cao nhất, hỗn hợp xúc tác này làm tăng nhiệt độ cháy so với mẫu nền ở điều kiện cháy áp suất thấp, cụ thể: $Z=3.4$ và nhiệt độ bề mặt pha K tăng từ 621 lên 654 K, nhiệt độ cháy lớn nhất tăng từ 1399 đến 1527 K và hệ số truyền nhiệt χ trên bề mặt pha rắn tăng từ 0.00071 lên 0.00247 cm^2/s .

Từ khóa: Ballistic; Thuốc phóng A; Pha K; Xúc tác cháy; PMC; Cặp nhiệt.

1. MỞ ĐẦU

Sự cháy của thuốc phóng nói chung và thuốc phóng ballistic nói riêng là một quá trình hóa lý phức tạp, gồm nhiều giai đoạn chuyển hóa từ thuốc phóng ban đầu thành các sản phẩm khí kèm theo tỏa nhiệt [1].



P = 0.7 MPa

P = 1.2 MPa

P = 1.6 MPa

P = 2.1 MPa

P = 2.6 MPa

Hình 1. Hình ảnh thuốc phóng cháy tại các áp suất khác nhau [2].

Đối với từng mức thuốc phóng ballistic lại có một loại hoặc hỗn hợp một vài chất xúc tác cháy được cho là có hiệu quả đáng kể. Sự phụ thuộc của tốc độ cháy với áp suất cháy được thể hiện như sau [1]:

+ Thuốc phóng pirocxilin (chỉ chứa thành phần năng lượng chính là nitrat xellulo) và thuốc phóng ballistic khi cháy ở áp suất lớn hơn 50 MPa thì tốc độ cháy tỉ lệ thuận với áp suất cháy theo phương trình:

$$u = u_1 p \quad (1)$$

Ở đó, u_1 là hệ số tốc độ cháy, nó phụ thuộc vào thành phần của thuốc phóng. Đối với thuốc phóng pirocxilin u_1 có giá trị trong khoảng $0.55 \div 0.80 \text{ mm/s.MPa}$, còn đối với thuốc phóng ballistic trên nền nitroglycerin u_1 có giá trị trong khoảng $0.4 \div 1.2 \text{ mm/s.MPa}$.

+ Thuốc phóng pirocxilin và thuốc phóng ballistic khi cháy ở áp suất trong khoảng $2 \div 20 \text{ MPa}$ thì tốc độ cháy tỉ lệ thuận với áp suất cháy theo phương trình:

$$u = B_0 + Bp^\nu \quad (2)$$

+ Đối với động cơ tên lửa rắn, phương trình thể hiện sự phụ thuộc tốc độ cháy vào áp suất được thể hiện như sau:

$$u = Bp^\nu \quad (3)$$

Trong đó, B, B₀ và ν là các hệ số cố định, phụ thuộc vào bản chất thuốc phóng.

Để giảm sự phụ thuộc giữa tốc độ cháy và áp suất, thuốc phóng được cho thêm một hàm lượng nhất định chất xúc tác cháy như các hợp chất của chì, đồng,... nhờ đó làm giảm hệ số phụ thuộc ν trong một số vùng áp suất nhất định [1]. Theo tác giả A.P. Denisuk cho rằng khi tăng tốc độ cháy của thuốc phóng dẫn đến sự thay đổi nhiệt độ cháy ở trong cùng điều kiện cháy tương ứng [1].

Theo một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, không chỉ C mà ngay cả PMC cũng tạo ra khung muôi cacbon trong quá trình cháy của nitrat xellulo, tại bề mặt khung muôi này sẽ tích tụ các hạt xúc tác và làm tăng hiệu quả của quá trình cháy tiếp theo [3-6].

Do đó, trong bài báo này, nhóm tác giả đã sử dụng hỗn hợp xúc tác cháy gồm PMC và C để xác định sự thay đổi tốc độ cháy cũng như miền phân bố nhiệt độ cháy của thuốc phóng có tỷ lệ P/H=1.

2. THỰC NGHIỆM

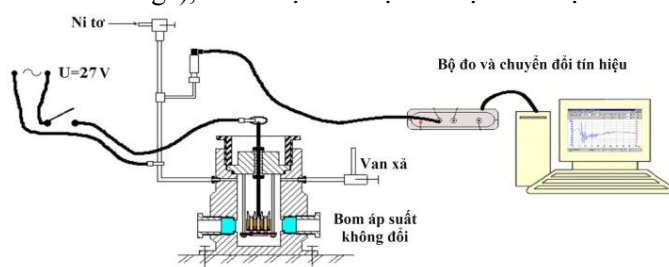
2.1. Thuốc phóng

Sử dụng thuốc phóng nền trong nghiên cứu có thành phần như sau (gọi là thuốc phóng A) [1]: Nitrat xellulo: 49.0% (hàm lượng H); Nitroglycerin: 49.0% (hàm lượng P); xentralit-2: 1.0% và vazolin: 1.0%, các chất này do Nga chế tạo. Xúc tác cháy sử dụng để cho vào thuốc phóng A là PMC (kích thước hạt không lớn hơn 45 μ m, Nga) và C mức KGO-250 (nhập khẩu). Thuốc phóng A1 chế tạo từ thuốc phóng A + 3% PMC + 1% C; thuốc phóng A2 chế tạo từ thuốc phóng A + 6% PMC + 1% C và thuốc phóng A3 chế tạo từ thuốc phóng A + 9% PMC + 1% C theo phương pháp bổ sung xúc tác trong giai đoạn cán nitromass thuốc phóng.

Các thỏi thuốc phóng được ép thành hình trụ đặc, có kích thước Φ 7 mm, chiều dài 15 mm được phủ lớp chống cháy hồ 1 đầu. Quá trình cháy được coi là định diện theo bề mặt cháy dài của thỏi thuốc phóng khi mỗi cháy từ mặt đầu hồ của thỏi thuốc phóng.

2.2. Phương pháp đo tốc độ cháy của thuốc phóng trong bom áp suất không đổi [1]

Phương pháp này sử dụng bom áp suất có thể tích 2-3 lít, có áp suất tới hạn đến 30 Mpa (phòng Lab khoa IXT/RCTU- Nga), sơ đồ hệ thiết bị đo được thể hiện ở hình 2:

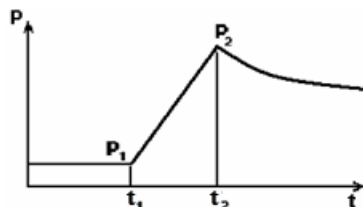


Hình 2. Hệ thiết bị đo tốc độ cháy.

Hệ thiết bị đo này cho phép xác định tốc độ cháy ở nhiều áp suất khác nhau bằng cách lần đo thứ nhất ở áp suất cao nhất, các lần đo tiếp theo ở áp suất thấp hơn thông qua van điều chỉnh áp suất. Việc cung cấp áp suất vào trong bom đo áp được thực hiện bằng bơm khí nén, sử dụng khí trơ là nitơ để không ảnh hưởng đến quá trình cháy.

Nguyên lý đo của phương pháp này dựa trên biểu đồ ghi nhận sự thay đổi áp suất ban đầu (p_1) đến khi đạt áp suất lớn nhất (p_2), khoảng thời gian này chính là thời gian mà thỏi thuốc phóng cháy hết. Từ thời gian cháy, áp suất ban đầu và chiều dài thỏi thuốc có thể tính được tốc độ cháy tại áp suất tương ứng đó (với điều kiện coi như áp suất khí sinh ra của quá trình cháy nhỏ hơn rất

nhieu so với áp suất ban đầu). Trên cơ sở các số liệu tốc độ cháy và áp suất cháy, sử dụng phần mềm Origin 8.5 để xây dựng đồ thị sự phụ thuộc tốc độ cháy của các mẫu thuốc phóng ở các áp suất khác nhau.



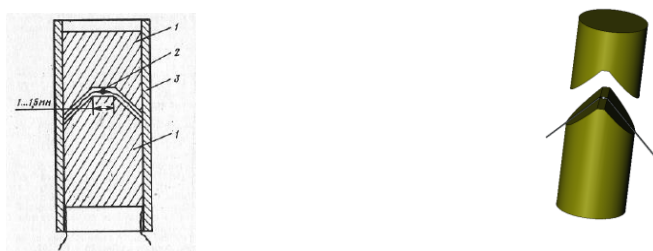
Hình 3. Nguyên lý xác định thời gian cháy trong bom áp suất [1, 6, 8].

Ảnh hưởng của xúc tác cháy đến tốc độ cháy được biểu diễn qua tỷ lệ $Z=U_k/U_0$, trong đó U_0 là tốc độ cháy của mẫu nền và U_k là tốc độ cháy của mẫu thuốc phóng có chứa xúc tác cháy ở trong cùng một áp suất cháy.

2.3. Phương pháp đo nhiệt độ trong quá trình cháy của thuốc phóng

Có hai phương pháp chính để đo nhiệt độ trong các vùng cháy của thuốc phóng: Ảnh nhiệt hoặc bằng cặp nhiệt điện [1]. Trong bài báo này nhóm tác giả sử dụng cặp nhiệt điện được chế tạo từ Wolfram-Rheni với chiều dày 5 mm để tiến hành đo, xác định nhiệt độ cháy thuốc phóng bằng thiết bị Pico model ADC-216 của phòng Lab khoa IXT/RCTU- Nga.

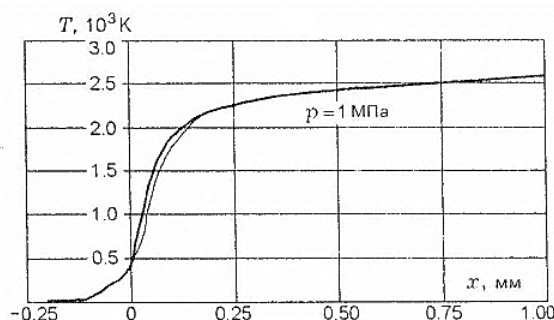
Cặp nhiệt điện được đặt chính giữa thỏi thuốc theo như hình 4.



Hình 4. Hình ảnh thỏi thuốc phóng trước khi tiến hành đốt cháy:

- 1, 2 - Nửa thuốc phóng ballistic [1];
- 2 - Cặp nhiệt điện;
- 3 - Lớp vỏ bọc chống cháy [6].

Đồ thị nhiệt độ T theo khoảng cách x từ bề mặt pha K (hay theo thời gian t) có hình dạng tương đối phức tạp, được xây dựng trên dữ liệu thu được bằng phần mềm Origin 8.5, qua đồ thị có thể xác định chính xác một số điểm nhiệt độ, ở đó cho phép xác định sự thay đổi các vùng cháy của thuốc phóng. Đối với mỗi áp suất tiến hành đo 5÷7 lần và sau đó lấy giá trị nhiệt độ trung bình tại mỗi vùng cháy. Đồ thị mẫu $T(x)$ như hình 5 sau:



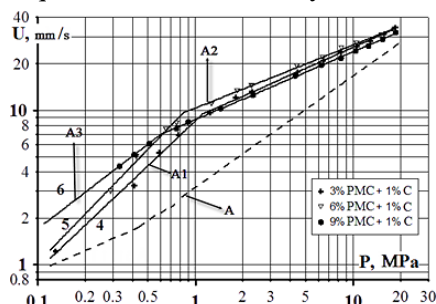
Hình 5. Mẫu đồ thị phân bố nhiệt độ theo khoảng cách tới bề mặt pha K [7].

Trên đồ thị $T(x)$ tiến hành xác định các giá trị như sau: T_p - Nhiệt độ trên bề mặt pha K (ranh giới pha rắn và pha hơi khí của thuốc phóng) được xác định là điểm uốn trên đường cong nhiệt độ tương ứng với sự thay đổi pha; T_d, L_d - Nhiệt độ và chiều dài vùng hỗn hợp khí; T_1 - Nhiệt độ tại điểm giảm đi e lần so với T_p ; L_1 - Chiều dài vùng nung nóng từ T_1 đến T_p ; T_g - Nhiệt độ cháy lớn nhất; L_g - Chiều dài vùng nhiệt độ cháy lớn nhất; $\varphi = dT/dx$ - Gradient nhiệt độ và χ - Hệ số dẫn nhiệt của thuốc phóng [6].

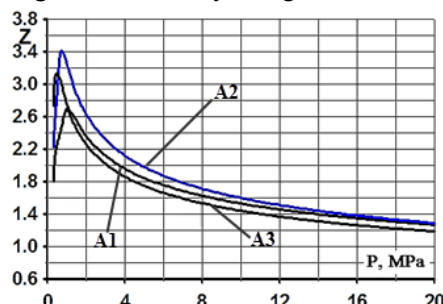
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả đo tốc độ cháy ở các áp suất khác nhau

Kết quả xác định tốc độ cháy của các mẫu thuốc phóng được trình bày trong hình 6:



Hình 6. Tốc độ cháy của các mẫu thuốc phóng ở các áp suất khác nhau.



Hình 7. Sự biến thiên của tỷ lệ Z các áp suất khác nhau.

Từ hình 6 cho thấy, trong vùng áp suất cháy nhỏ hơn 0.6 MPa, thuốc phóng A3 có tốc độ cháy cao hơn mẫu nền thuốc phóng A và cả thuốc phóng A1, A2. Ở áp suất lớn hơn 0.6 MPa thuốc phóng A2 có tốc độ cháy cao hơn các mẫu còn lại và ở áp suất 0.7 MPa mẫu A2 có tốc độ cháy 7.82 mm/s so với mẫu thuốc phóng A có tốc độ cháy 2.30 mm/s.

Kết quả sự biến thiên của Z ở các áp suất khác nhau của các mẫu thuốc phóng có chứa xúc tác cháy so với mẫu thuốc phóng nền được thể hiện ở hình 7.

Kết quả xác định sự phụ thuộc của tốc độ cháy vào áp suất theo công thức (3) đã nêu ở mục 2.2 của các mẫu thuốc phóng như bảng 1 sau:

Bảng 1. Các hệ số của sự phụ thuộc tốc độ cháy vào áp suất.

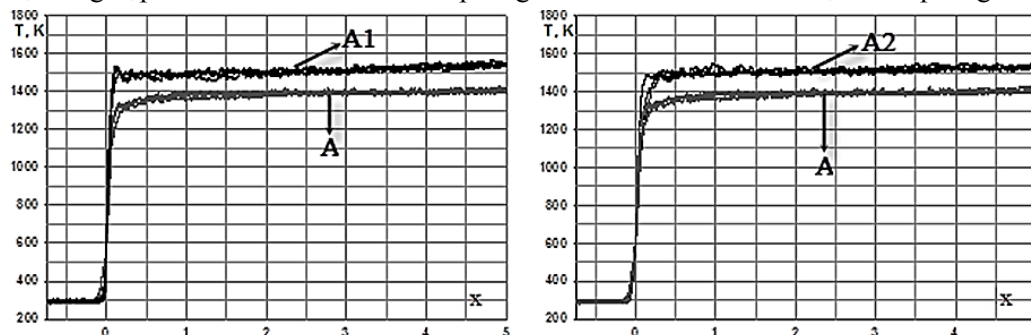
Mẫu	% C	% PMC	B	v	$\Delta P, \text{MPa}$	
					Từ	Đến
A	-	-	2.48	0.43	0.1	0.4
			2.97	0.72	0.4	20
A1	-	3	8.29	0.97	0.1	1.1
			9.03	0.45	1.1	20
A2	1	6	11.37	1.05	0.1	0.8
			10.34	0.41	0.8	20
A3	-	9	10.34	0.78	0.1	0.6
			8.70	0.44	0.6	20

Từ kết quả trên cho thấy hỗn hợp xúc tác cháy là PMC và C có ảnh hưởng đến tốc độ cháy của thuốc phóng A, đặc biệt rõ nhất là khi cháy ở dải áp suất thấp. Theo tài liệu [2-4], các tác giả đã chỉ ra rằng xúc tác chỉ xảy ra hiệu quả khi trên bề mặt cháy có sự hình thành và phát triển khung muôi cacbon, ở vùng này xảy ra sự tích lũy xúc tác và chúng hoàn toàn không bị thiêu kết, khi đó quá trình cháy trên bề mặt khung muôi cacbon giữ vai trò chủ đạo.

Giá trị lớn nhất của tỷ lệ $Z = 3.4$ đối với mẫu thuốc phóng A2 có chứa 6% PMC + 1% C khi cháy ở áp suất 0.7 MPa. Khi tăng áp suất thì ảnh hưởng của xúc tác cháy giảm, điều này được giải thích là do khi tăng áp suất (đến 20 MPa) khả năng tạo khung muôi cacbon bị giảm mạnh.

3.2. Kết quả xác định nhiệt độ cháy

Nhóm tác giả đã tiến hành đo nhiệt độ cháy của 3 mẫu thuốc phóng A, A1 và A2. Hình 8 dưới đây thể hiện tổng hợp của 6 lần đo đối với thuốc phóng A và 7 lần đo đối với 2 loại thuốc phóng A1, A2.



Hình 8. Phân bố nhiệt độ tại các vùng cháy theo khoảng cách từ bề mặt cháy của thuốc phóng ở 0,7MPa: a - Hình ảnh so sánh của A và A1; b - Hình ảnh so sánh của A và A2.

Từ kết quả tại hình 8 cho thấy, ảnh hưởng của hỗn hợp xúc tác cháy không chỉ đến nhiệt độ bề mặt cháy (tăng 20 - 30 K) mà còn ảnh hưởng đến nhiệt độ cháy lớn nhất (tăng 130-230 K) khi cháy ở áp suất 0.7 MPa và làm tăng gradient nhiệt độ cháy của thuốc phóng. Các đồ thị sau thể hiện kết quả xác định nhiệt độ cháy của các mẫu thuốc phóng ở áp suất 0.7 MPa.

Đối với mẫu thuốc phóng nền A tại áp suất 0.7 MPa có tốc độ cháy $u = 2.30$ mm/s:

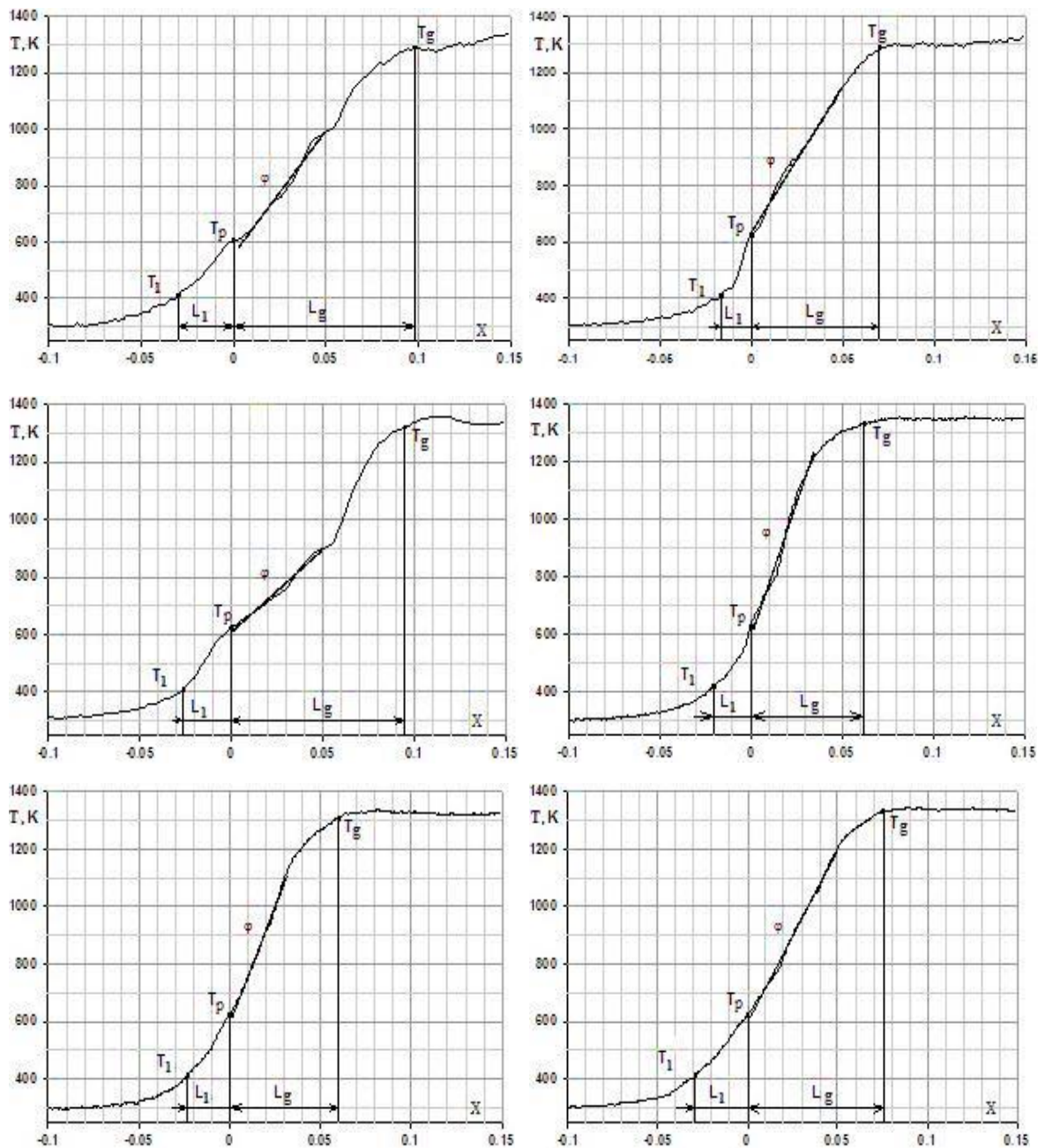
Bảng 2. Kết quả xác định nhiệt độ cháy của mẫu A tại áp suất 0.7 MPa.

TT	T_0 , K	T_1		T_p , K	$\varphi \cdot 10^{-4}$, K/cm	T_g		$\chi \cdot 10^3$, cm ² /s
		K	L_1 , mm			K	L_g , mm	
1	293	409	0.030	607	11.76	1387	0.828	0.71
2	293	416	0.033	626	10.36	1385	1.120	0.70
3	293	415	0.035	626	18.57	1411	0.879	0.65
4	293	416	0.037	615	16.23	1382	0.689	0.72
5	293	418	0.030	628	11.97	1430	0.812	0.69
6	293	414	0.032	625	12,25	1399	0.880	0.80
TB	Δ_1	6	0.003	14	3.16	14	0.179	0.06
	293	415	0.033	621	13.52	1399	0.868	0.71
	Δ_2	-3	-0.004	-7	-5.05	-31	-0.252	-0.09

Đối với mẫu thuốc phóng A1 tại áp suất 0.7 MPa có tốc độ cháy $u = 5.87$ mm/s ($Z = 2.55$):

Bảng 3. Kết quả xác định nhiệt độ cháy của mẫu A1 tại áp suất 0.7 MPa.

TT	T_0 , K	T_1		T_p , K	$\varphi \cdot 10^{-4}$, K/cm	T_g		$\chi \cdot 10^3$, cm ² /s
		K	L_1 , mm			K	L_g , mm	
1	293	424	0.010	648	10.76	1599	6.16	0.59
2	293	424	0.021	649	10.57	1575	6.76	1.23
3	293	420	0.031	638	11.60	1607	6.60	1.82
4	293	418	0.020	632	9.54	1587	6.92	1.17
5	293	419	0.018	635	8.61	1714	7.01	1.06
6	293	423	0.015	647	13.13	1666	7.03	0.88
7	293	424	0.012	648	13.91	1706	6.73	0.70
TB	Δ_1	2	0.013	21	2.55	61	0.58	0.47
	293	422	0.018	642	11.16	1636	6.74	1.06
	Δ_2	-4	-0.008	-21	-2.75	-78	-0.29	-0.76



Hình 10. Đường cong nhiệt độ tại các vùng cháy theo khoảng cách từ bề mặt cháy của thuốc phóng A của các lần đo ở 0.7MPa.

Đối với mẫu thuốc phóng A2 tại áp suất 0.7 MPa có tốc độ cháy $u = 7.82 \text{ mm/s}$ ($Z = 3.40$):

Bảng 4. Kết quả xác định nhiệt độ cháy của mẫu A2 tại áp suất 0.7 MPa.

TT	T_0, K	T_1		T_p, K	$\varphi \cdot 10^{-4}, \text{K/cm}$	T_g		$\chi \cdot 10^3, \text{cm}^2/\text{s}$
		K	L_1, mm			K	L_g, mm	
1	293	422	0.038	643	6.90	1523	4.22	2.90

2	293	431	0.033	669	10.73	1527	4.01	2.51
3	293	428	0.029	659	10.80	1527	3.98	2.21
4	293	421	0.031	641	8.61	1523	4.22	2.36
5	293	429	0.030	664	8.68	1538	4.01	2.29
6	293	425	0.031	653	8.69	1531	4.26	2.36
7	293	425	0.035	653	8.87	1519	3.99	2.67
TB	Δ_1	5	0.003	13	2,14	8	0,12	0.26
	293	426	0.032	654	9.04	1527	4.10	2.47
	Δ_2	-5	-0.006	-15	-1,76	-11	-0.16	-0.43

Kết quả này cho thấy hỗn hợp xúc tác cháy không chỉ ảnh hưởng đến tốc độ cháy ở áp suất thấp mà còn làm tăng nhiệt độ của các vùng phân bố nhiệt và tăng hệ số dẫn nhiệt của thuốc phóng nền. Điều này có nghĩa là tốc độ truyền nhiệt của khung muối cacbon lớn hơn tốc độ truyền nhiệt tại pha K của thuốc phóng không có xúc tác. Ngoài ra, với việc sử dụng 6% PMC cùng với 1% C làm xúc tác cho thấy hiệu quả lớn hơn ($Z=3.4$) khi so sánh với kết quả của tác giả Nien Tran Aung ($Z < 2$) chỉ sử dụng 1.5% C [6].

4. KẾT LUẬN

Như vậy, hỗn hợp xúc tác cháy gồm PMC và C không chỉ ảnh hưởng đến tốc độ cháy của thuốc phóng trên nền nitrat xellulo và nitroglycerin với P/H = 1 mà còn ảnh hưởng đến miền phân bố nhiệt độ cháy. Ảnh hưởng của hệ xúc tác cháy này tới tốc độ cháy của thuốc phóng thể hiện rõ nhất khi ở áp suất thấp 0.7 MPa, càng tăng áp suất sự ảnh hưởng càng giảm ($Z \sim 1$), đối với xúc tác gồm 6% PMC + 1% C cho hiệu quả xúc tác cao nhất. Hỗn hợp xúc tác với tỷ lệ thành phần này làm tăng các đặc tính nhiệt độ cháy so với mẫu nền khi thuốc phóng cháy ở áp suất thấp: Tốc độ cháy tăng 3,4 lần, nhiệt độ bề mặt pha K tăng từ 622 lên 654 K, nhiệt độ cháy lớn nhất tăng từ 1399 lên 1527 K và tăng hệ số truyền nhiệt χ trên bề mặt pha rắn của thuốc phóng từ 0.00071 lên 0.00247 cm²/s.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. А.П. Денисюк, “Горение пороха и ТРТ”, с. 7-42, (1988).
- [2]. Lengelle G., Duterque J., Trubert J. F., “Special course on internal Aerodynamics in Solid rocket Propulsion”, Combustion of Solid Propellants, Belgium, pp. 63, (2002).
- [3]. А. П. Денисюк, Марголин А. Д., Токарев Н. П. и др. “Роль сажи при горении баллистических порохов со свинецсодержащими катализаторами”, Физика горения и взрыва, Т. 13, № 4, с. 576-584, (1977).
- [4]. А. П. Денисюк, Марголин А. Д., Токарев Н. П. и др. “Закономерности горения баллистических составов при перегрузках”, ФГВ, Т. 14, № 4, с. 29-36, (1978).
- [5]. А. П. Денисюк, Демидова Л. А., Галкин В. И. “Ведущая зона горения баллистических порохов с катализаторами”, ФГВ, Т. 31, № 2, с. 32-40, (1995).
- [6]. Ньен Чан Аунг. “Влияние состава пороха на эффективность действия катализаторов горения”, дис. канд. наук. Москва. 143 с, (2008).
- [7]. А. А. Зенин. “Исследование механизма горения гексогена и октогена различными экспериментальными методиками”, Физика горения и взрыва, Т.45, № 5, с. 60-81, (2009).
- [8]. А. П. Денисюк. “Определение баллистических характеристик и параметров горения порохов и трт”, Лаб. Практикум, М:РХТУ им. Д.И.Менделеева.136 с, (2009).

ABSTRACT

Effect of combustion catalyst on the burning rate and temperature transformation in fire zones of propellant on nitrate cellulose and nitroglycerin with P/H = 1

A mixture of combustion catalysts, including lead-copper phthalate (PMC) and carbon (C), not only affects the burning rate of fuel based on cellulose nitrate and nitroglycerin with P/H=1, but also affects the combustion region of the fuel temperature distribution. The effect of this burning catalyst system on the fuel combustion rate is most evident in the low pressure range (0.7 MPa), the higher the pressure, the lower the effect (Z-1) for the catalyst containing 6% PMC + 1% C for the highest Z factor A catalytic mixture with such a ratio of components increases the combustion temperature compared to the background sample at low pressure: the surface temperature of the K-phase increases from 622 to 654 K, the maximum combustion temperature increases from 1399 to 1527 K, and the heat release increases transfer coefficient χ on the surface of the solid fuel phase from 0.00071 to 0.00247 cm²/s.

Keywords: Ballistic; Propellant A; Phase K; Catalysis burning; PMC; Thermopair.