

Nghiên cứu trạng thái ứng suất và biến dạng thành nòng pháo SU 122mm khi bắn bằng phần mềm ANSYS

Researching the stress and strain state of SU 122mm cannon when firing using ANSYS software

Lê Công Ích*, Vũ Công Hàm, Trần Quang Dũng

Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: ichlecong@gmail.com

Mobile: 0983.134.436

Tóm tắt

Từ khóa:

Áp suất khí thuốc; Biến dạng; Nhiệt độ; SU 122 mm; Ứng suất.

Bài báo trình bày kết quả tính toán trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của nòng pháo SU 122 mm khi bắn một phát và bắn nhiều phát liên tiếp bằng phần mềm ANSYS Workbench trên cơ sở sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Các kết quả tính toán ứng suất và biến dạng của nòng pháo có kể đến đồng thời ảnh hưởng của áp suất và nhiệt độ khí thuốc. Các kết quả này được sử dụng để đánh giá độ bền và tuổi thọ của nòng pháo, đồng thời thể hiện ứng xử của nòng pháo SU 122 mm khi bắn.

Abstract

Keywords:

Pressure of gas; Strain; Temperature; SU 122 mm; Stress.

This paper presents calculation results of the temperature, stress and strain of the SU 122mm cannon when firing a single shot and multiple shots by using ANSYS Workbench software based on finite element method. The calculated stress and strain results simultaneously affected pressure and temperature of gas. The results are used to estimate strengths and life expectancy of the cannon barrel, as well as to show behavior of the SU 122mm 's barrel when firing.

Ngày nhận bài: 03/07/2018

Ngày nhận bài sửa: 03/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Nòng pháo là một trong những bộ phận quan trọng nhất của vũ khí, nó có ảnh hưởng rất lớn đến độ chính xác bắn. Những vấn đề liên quan đến động lực học nòng súng pháo đã được nhiều tác giả quan tâm nghiên cứu. Chẳng hạn như bài toán dao động của nòng khi bắn [1], tuổi thọ nòng [2], [3]... Tuy nhiên, các nghiên cứu trong nước thường tập trung vào các loại vũ khí có cỡ nòng nhỏ. Đối với các pháo cỡ nòng lớn hơn 100 mm như SU 122 mm, SU 152 mm... chưa được nhiều tác giả quan tâm nghiên cứu. Trên thế giới, các vấn đề nghiên cứu về vũ khí nói chung và nòng súng pháo nói riêng thường ít được công bố rộng rãi vì nhiều lý do khác nhau. Một số ít nghiên cứu có thể tiếp cận được như [8], [9]... Trong [8], các tác giả đã đưa ra lời giải

giải tích đơn giản của bài toán ứng suất và biến dạng của nòng súng, sử dụng phương pháp năng lượng và tiêu chuẩn Von Mises với các biến cơ bản là các thành phần ứng suất và các phương trình thuật phóng trong đã biết. Kết quả giải bằng giải tích được so sánh với phương pháp số để kiểm tra độ tin cậy. Trong [9], các tác giả nghiên cứu ổn định nhiệt của nòng súng khi giải quyết vấn đề tác dụng của khí thuốc lên thành nòng tại mặt cắt p_{max} bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

Điều kiện làm việc của nòng súng pháo nói chung rất khắc nghiệt, đó là vừa chịu áp suất cao của khí thuốc, vừa chịu nhiệt độ. Vì vậy, trong nghiên cứu này các tác giả trình bày kết quả tính toán trạng thái ứng suất và biến dạng của nòng pháo SU 122 mm khi bắn một phát và bất nhiều phát liên tiếp bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm ANSYS Workbench.

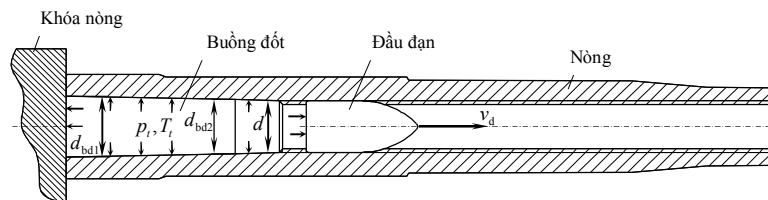
2. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN NÒNG PHÁO SU 122 MM

2.1. Mô hình nòng pháo

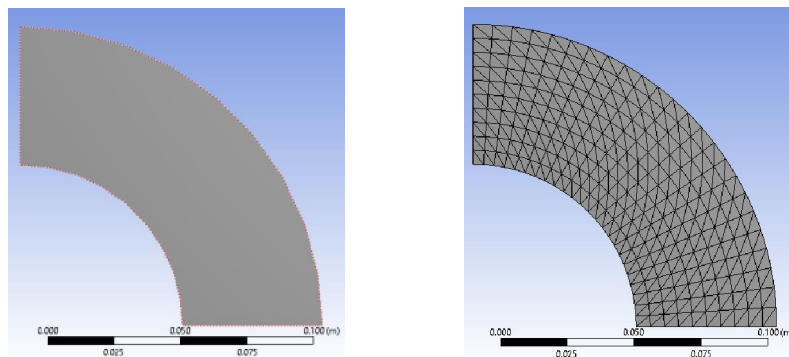
Các giả thiết sau được sử dụng để xây dựng mô hình tính toán [6, 7]:

- Nòng pháo là một ống hình trụ dày, thành trụ tròn, không tính đến dòng nhiệt chảy bao.
- Sự nung nóng nòng chỉ do khí thuốc và ma sát của đai dẫn với bề mặt rãnh nòng khi bắn.
- Trong khoảng thời gian sau phát bắn, coi hệ số tỏa nhiệt vào thành trong nòng bằng không.
- Không tồn tại các dòng hoặc nguồn nhiệt bên trong vật liệu thành nòng.
- Bỏ qua biến dạng nhiệt và sự thay đổi chiều dày thành nòng do mài mòn khi bắn.

Với các giả thiết đã nêu trên, mô hình nòng pháo SU 122mm được xây dựng là mô hình 2D một phần tư của một mặt cắt nòng bất kỳ. Mô hình tải trọng tác dụng lên nòng pháo và mô hình phẳng 2D một phần tư của nòng được thể hiện trên các hình 1 và hình 2.



Hình 1. Mô hình tải trọng tác dụng lên nòng pháo SU 122mm



Hình 2. Mô hình phẳng 2D mặt cắt nòng và mô hình PTHH của một phần tư mặt cắt nòng

Khi thuốc phóng cháy, toàn bộ phần lòng nòng sau đáy đạn chịu tác dụng của áp lực khí thuốc p_t và nhiệt độ khí thuốc T_t . Các giá trị của p_t và T_t thay đổi theo quá trình chuyển động của đạn trong lòng nòng và nhận được khi giải bài toán thuật phóng trong.

2.2. Các thuộc tính vật liệu nòng pháo SU 122 mm

Các thông số vật liệu nòng pháo SU 122mm được sử dụng làm thông số đầu vào cho các bài toán khảo sát trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Tính chất vật liệu nòng pháo SU 122 mm (theo GOST 4543-71)

T-nhiệt độ (°C)	E-mô đun đàn hồi (Pa)	α -hệ số giãn nở vì nhiệt (1/°K)	λ -hệ số dẫn nhiệt (W/m. ⁰ K)	ρ -mật độ (kg/m ³)	C-nhiệt dung riêng (J/(kg.°K))	ν -hệ số Poisson
20	$2,14 \times 10^{11}$	$10,1 \times 10^{-6}$	48	7820	440	0,3
100	$2,11 \times 10^{11}$	$11,9 \times 10^{-6}$	46	7800	466	0,3
200	$2,06 \times 10^{11}$	$12,5 \times 10^{-6}$	42,7	7770	508	0,3
300	$2,03 \times 10^{11}$	$13,2 \times 10^{-6}$	42,3	7740	529	0,3
400	$1,85 \times 10^{11}$	$13,8 \times 10^{-6}$	38,5	7700	563	0,3
500	$1,76 \times 10^{11}$	$14,1 \times 10^{-6}$	35,6	7670	592	0,3
600	$1,64 \times 10^{11}$	$14,4 \times 10^{-6}$	31,9	7630	622	0,3
700	$1,43 \times 10^{11}$	$14,6 \times 10^{-6}$	28,8	7590	634	0,3
800	$1,32 \times 10^{11}$	$14,9 \times 10^{-6}$	26	7610	664	0,3

2.3. Bài toán thuật phóng trong xác định nhiệt độ và áp suất khí thuốc

2.3.1. Hệ phương trình vi phân thuật phóng trong

Với các giả thiết trong [4], HPTVP thuật phóng trong pháo SU 122mm được thiết lập như sau:

$$\begin{cases} dz / dt = s_1 \cdot p / I_k \\ d\psi / dt = s_1 \cdot \chi \cdot (1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \cdot dz / dt \\ dv / dt = s_2 \cdot p \cdot S / (\varphi m) \\ dl / dt = v \\ dT / dt = (\theta T_1 / f \omega \psi) \left((f \omega / \theta) \cdot (d\psi / dt) - T \cdot (f \omega / (\theta T_1)) \cdot (d\psi / dt) - \varphi m v \cdot (dv / dt) \right) \end{cases} \quad (1)$$

trong đó: z - bề dày cháy tương đối của thuốc phóng; ψ - thể tích tương đối thuốc phóng đã cháy; v - vận tốc chuyển động của đạn trong lòng nòng; l - quãng đường chuyển động của đạn trong nòng; T - nhiệt độ khí thuốc trong lòng nòng, s_1, s_2 - hệ số điều khiển (khi thuốc phóng cháy $s_1 = 1$, khi thuốc phóng cháy hết $s_1 = 0$, khi đầu đạn chưa chuyển động $s_2 = 0$, khi đạn chuyển động $s_2 = 1$), p - áp suất thuật phóng, I_k - xung lượng toàn phần của áp suất khí thuốc, χ, λ, μ - các đặc trưng hình dạng của thuốc phóng, S - diện tích tiết diện lòng nòng, φ - hệ số tính công thứ yếu, m - khối lượng đầu đạn, θ - chỉ số đa biến của sản phẩm khí, phụ thuộc vào thành phần thuốc phóng và nhiệt độ, ω - trọng lượng liều thuốc phóng, f - lực thuốc phóng, T_1 - nhiệt độ trung bình khí thuốc tại thời điểm tạo thành khi cháy thuốc phóng.

2.3.2. Phương pháp giải hệ phương trình vi phân thuật phóng trong

Hệ phương trình thuật phóng trong (1) được giải bằng phương pháp Runge-Kutta, sử dụng phần mềm MATLAB. Đối với pháo SU 122mm, các thông số đầu vào bao gồm các đặc trưng cấu tạo của súng pháo, đạn, các đặc trưng thuốc phóng và các điều kiện nhồi xác định trong [5] bằng cách tra cứu số liệu của vũ khí, đạn.

2.4. Bài toán truyền nhiệt của nòng pháo SU 122 mm

Quá trình truyền nhiệt trong nòng súng pháo khi bắn có đặc trưng rất phức tạp và bao gồm có trao đổi nhiệt đối lưu, dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt.

2.4.1. Sự trao đổi nhiệt trong lòng nòng

Theo A. S. Chasikhin [6], giá trị trung bình của hệ số toả nhiệt trong khoảng thời gian tác dụng nhiệt của phát bắn được tính theo công thức:

$$\bar{\alpha}_r = A_\alpha \cdot (\overline{p.u})_x^{0,8} / d_k^{0,2} \text{ khi } x \geq x_{\min} \quad (2)$$

trong đó: x - vị trí mặt cắt tương ứng so với mặt cắt đuôi nòng; x_{\min} - mặt cắt đầu rãnh xoắn trong nòng; $(\overline{p.u})_x$ - giá trị trung bình của tích áp suất với vận tốc khí thuốc tại mặt cắt x trong khoảng thời gian tác dụng nhiệt của phát bắn; d_k - đường kính tương đương của rãnh nòng, được xác định theo công thức: $d_k = \sqrt{4S / \pi}$ (với S là diện tích mặt cắt ngang của rãnh nòng ở khoảng cách x tính từ mặt cắt đuôi nòng); A_α - hệ số phù hợp với thực nghiệm.

2.4.2. Sự toả nhiệt trên bề mặt ngoài nòng

Hệ số toả nhiệt ở bề mặt ngoài của nòng α_t khi có tính đến các quá trình trao đổi nhiệt đối lưu và bức xạ nhiệt [6] được tính theo công thức:

$$\alpha_t = \alpha_{dl} + \alpha_{bx} \quad (3)$$

trong đó: α_{dl} : hệ số toả nhiệt đối lưu tự do hoặc cưỡng bức, α_{bx} : hệ số toả nhiệt khi có bức xạ nhiệt. Các hệ số α_{dl} và α_{bx} được xác định theo [6].

2.4.3. Sự toả nhiệt trong buồng đốt

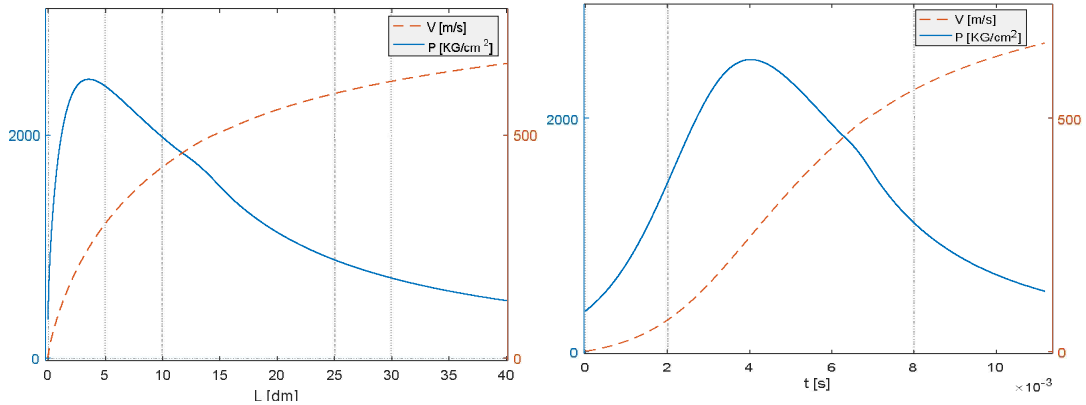
Theo chiều dài phần buồng đốt của nòng, hệ số dẫn nhiệt [6] được lấy xấp xỉ theo công thức sau:

$$\alpha_r(z) = \alpha_{HH} \cdot \left[z / z_{HH} + A \cdot d / d_{KM} (1 - z / z_{HH}) \right] \quad (4)$$

trong đó: A - hệ số phụ thuộc dạng thuốc phóng; α_{HH} - hệ số dẫn nhiệt trong tiết diện đầu rãnh xoắn; z, z_{HH} - tương ứng là khoảng cách từ đáy buồng đốt cho đến tiết diện cần tính và đến tiết diện đầu rãnh xoắn; d, d_{KM} - cỡ nòng và đường kính buồng đốt tại tiết diện tính.

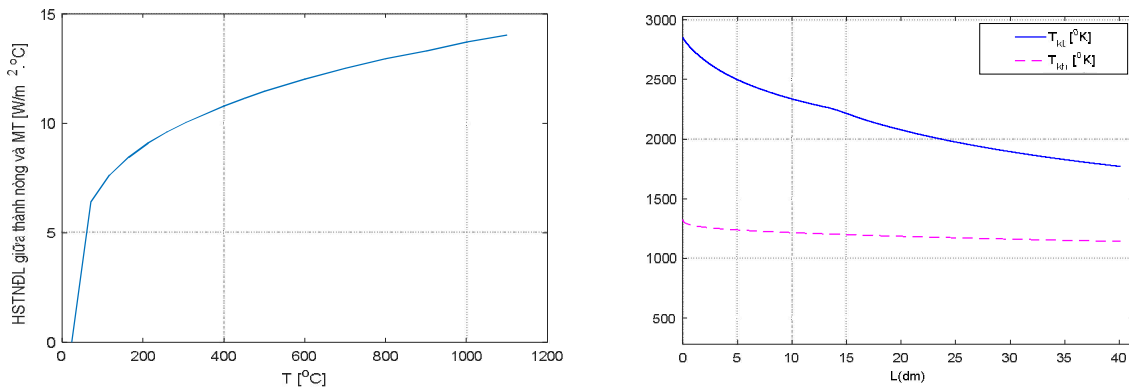
2.5. Kết quả bài toán thuật phóng trong và bài toán truyền nhiệt

Kết quả giải bài toán thuật phóng trong được trình bày trên hình 3 (các trục hoành có đơn vị lần lượt là chiều dài L là [dm] - hình bên trái, và thời gian t là [s] - hình bên phải, các trục tung có đồng thời hai đơn vị khác nhau, ứng với đường đứt là đơn vị vận tốc V [m/s], đường liền là đơn vị áp suất P [KG/cm²], các thông số này và đơn vị của nó được thể hiện trên phần chú thích legend của đồ thị). Các kết quả tính toán này và các kết quả trong [5] có sự sai khác nhỏ, khoảng 6,12%, đủ tin cậy để làm thông số đầu vào cho bài toán truyền nhiệt và bài toán tính ứng suất biến dạng nòng pháo.

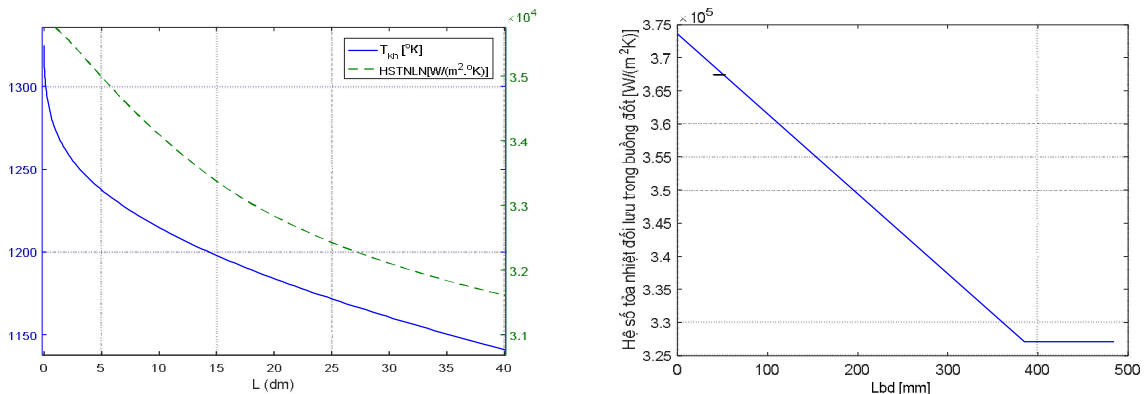


Hình 3. Đồ thị thuật phóng trong theo quãng đường chuyển động của đạn và theo thời gian

Từ các kết quả giải bài toán trong và các công thức (2), (3) và (4), các hệ số tỏa nhiệt đối lưu giữa thành nòng và môi trường, nhiệt độ trung bình khí thuốc, hệ số tỏa nhiệt đối lưu của khí thuốc vào lòng nòng và buồng đốt được tính bằng phần mềm MATLAB và thể hiện trên hình 4 và hình 5. Tương tự trên hình 3, đối với trục trên đồ thị có đồng thời nhiều thông số và đơn vị khác nhau, chúng được thể hiện trên phần chú thích legend của đồ thị, đối với trục chỉ có một thông số và đơn vị, chúng được thể hiện ngay trên trục đồ thị.



Hình 4. Hệ số tỏa nhiệt đối lưu giữa thành nòng với môi trường và nhiệt độ khí thuốc, nhiệt độ trung bình khí thuốc



Hình 5. Hệ số tỏa nhiệt đối lưu của khí thuốc vào lòng nòng và buồng đốt

2.6. Phương pháp xác định ứng suất, biến dạng nòng pháo SU 122mm

Để xác định trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng nòng pháo, nhóm tác giả sử dụng phần mềm ANSYS Workbench với hai mô đun Transient Thermal và Transient Structural. Kết quả khảo sát được thực hiện tại một mặt cắt bất kỳ của nòng pháo. Trên bảng 2 và bảng 3 là các thông số của một số mặt cắt tiêu biểu của nòng pháo. Theo tính năng kỹ chiến thuật, pháo SU 122 mm chỉ có thể bắn đạt tốc độ $4 \div 6$ phát/phút (điều này phụ thuộc thời gian thao tác của kíp chiến đấu cũng như điều kiện hoạt động của pháo), do đó nhóm tác giả sẽ tính toán khi bắn liên tục 4 phát trong thời gian 60s. Khi bắn một phát, thời gian tính toán là 15s, trong đó thời gian đạn chuyển động trong nòng là $0 \div 1,175 \times 10^{-2}$ s.

Bảng 2. Các thông số tính toán tại các mặt cắt của buồng đốt

Vị trí mặt cắt	Nhiệt độ TB khí thuốc (°K)	Áp suất khí thuốc (KG/cm ²)	HSTNĐL lòng nòng (W/m ² .°K)
Mặt cắt buồng đốt thứ 1	1300,15	470,56	373580
Mặt cắt buồng đốt thứ 2	1300,15	470,56	327070

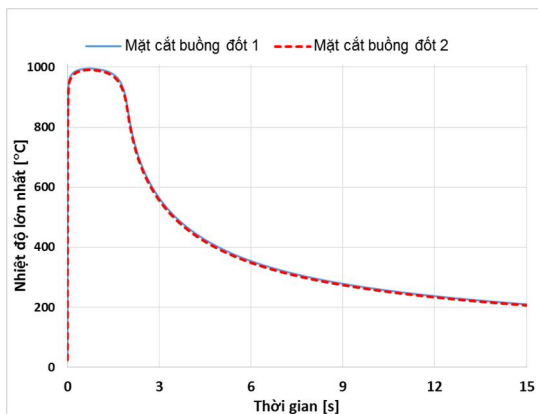
Bảng 3. Các thông số tính toán tại các mặt cắt của lòng nòng

Vị trí mặt cắt	Thời gian (s)	Chiều dài nòng (dm)	Vận tốc đầu đạn (m/s)	Nhiệt độ TB khí thuốc (°K)	Áp suất khí thuốc (KG/cm ²)	HSTNĐL lòng nòng (W/m ² .°K)
Đầu rãnh xoắn	0	0	0	1300,15	470,56	35724,03
p_{max}	0,0041	3,375	240,45	1232,32	2501,27	35238,46
Thuốc phóng cháy hết	0,0066	13,225	484,89	1188,72	1676,05	33637,45
Đầu nòng	0,0110	39,225	658,67	1129,04	523,58	31647,97

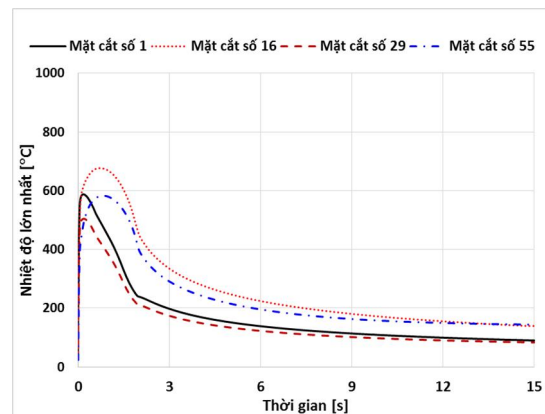
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Trường nhiệt độ, ứng suất, biến dạng của nòng pháo khi bắn một phát

Sự thay đổi nhiệt độ lớn nhất theo thời gian tại các mặt cắt tiêu biểu được thể hiện trên hình 6. Kết quả tính toán cho thấy nhiệt độ phân bố trong buồng đốt là tương đối giống nhau. Nhiệt độ lớn nhất trong các mặt cắt buồng đốt đạt $986 \div 991$ °C. Nhiệt độ lớn nhất tại các mặt cắt lòng nòng nhỏ hơn mặt cắt buồng đốt và giảm dần theo thời gian do sự tỏa nhiệt của bề mặt nòng ra môi trường.



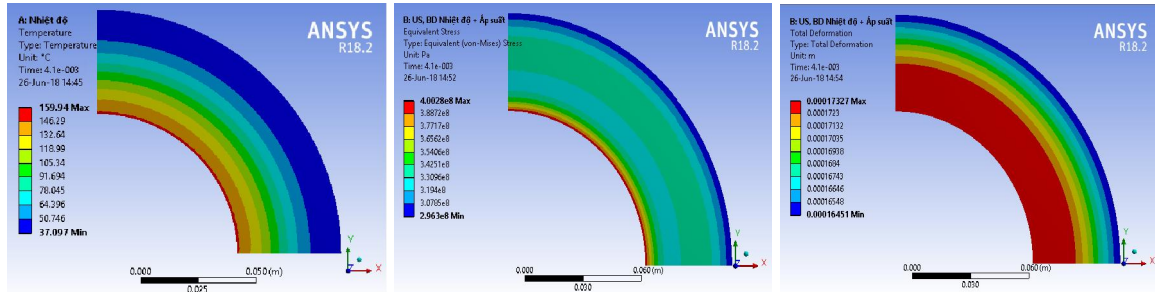
a. Các mặt cắt buồng đốt



b. Các mặt cắt lòng nòng

Hình 6. Sự thay đổi nhiệt độ lớn nhất tại các mặt cắt tiêu biểu

Hình 7 thể hiện kết quả tính toán trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng tại thời điểm áp suất khí thuốc lớn nhất $t_{max} = 0,0041s$ của mặt cắt ứng với áp suất khí thuốc lớn nhất. Các giá trị ứng suất và biến dạng lớn nhất của các mặt cắt tiêu biểu của buồng đốt và lòng nòng được trình bày trong bảng 4.



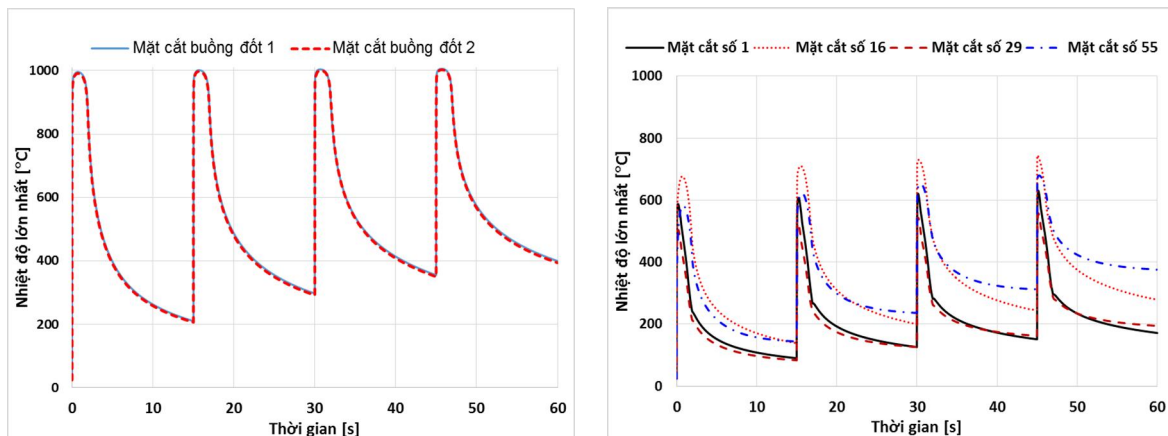
Hình 7. Phân bố nhiệt độ, ứng suất và biến dạng tại mặt cắt p_{max} ở thời điểm t_{max}

Bảng 4. Giá trị ứng suất và biến dạng lớn nhất của các mặt cắt tiêu biểu

Mặt cắt	$t_m = 0,0041s$		$t = 15s$	
	U'SLN [Pa]	BDLN [mm]	U'SLN [Pa]	BDLN [mm]
Mặt cắt buồng đốt thứ 1	$4,330 \times 10^8$	0,234	$3,247 \times 10^8$	0,099
Mặt cắt buồng đốt thứ 2	$4,172 \times 10^8$	0,217	$3,111 \times 10^8$	0,095
Mặt cắt đầu rãnh xoắn	$5,068 \times 10^8$	0,168	$1,033 \times 10^8$	0,035
Mặt cắt p_{max}	$4,003 \times 10^8$	0,173	$1,678 \times 10^8$	0,067
Mặt cắt thuốc phóng cháy hết p_k	---	---	$2,742 \times 10^7$	0,051
Mặt cắt đầu nòng	---	---	$1,181 \times 10^7$	0,116

3.2. Trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của nòng pháo khi bắn 4 phát

Tương tự khi bắn một phát, sự thay đổi nhiệt độ lớn nhất theo thời gian tại các mặt cắt tiêu biểu khi bắn liên tục 4 phát trong một phút được thể hiện trên hình 8.

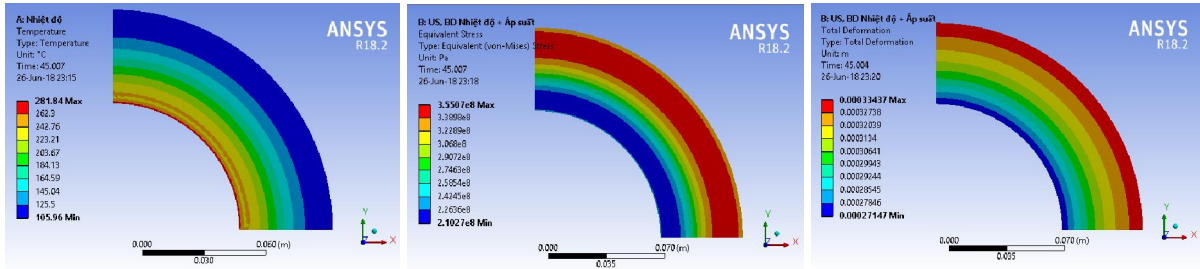


a. Các mặt cắt buồng đốt

b. Các mặt cắt lòng nòng

Hình 8. Sự thay đổi nhiệt độ lớn nhất tại các mặt cắt tiêu biểu khi bắn liên tục 4 phát

Sự phân bố trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của mặt cắt ứng với vị trí thuốc phóng cháy hết tại thời điểm $t_k = 45,0066s$ được thể hiện trên hình 9. Các giá trị ứng suất và biến dạng lớn nhất của các mặt cắt tiêu biểu tại thời điểm 45,0041s và 60s thể hiện trong bảng 5.



Hình 9. Phân bố nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của mặt cắt p_k tại thời điểm t_k

Bảng 5. Giá trị ứng suất và biến dạng lớn nhất của các mặt cắt tiêu biểu

Mặt cắt	$t_m = 45,0041s$		$t = 60s$	
	U'SLN [Pa]	BDLN [mm]	U'SLN [Pa]	BDLN [mm]
Mặt cắt buồng đốt thứ 1	$5,339 \times 10^8$	0,441	$4,919 \times 10^8$	0,314
Mặt cắt buồng đốt thứ 2	$5,117 \times 10^8$	0,419	$3,111 \times 10^8$	0,304
Mặt cắt đầu rãnh xoắn	$4,521 \times 10^8$	0,125	$1,613 \times 10^8$	0,122
Mặt cắt p_{max}	$3,831 \times 10^8$	0,334	$2,526 \times 10^8$	0,235
Mặt cắt thuốc phóng cháy hết p_k	$3,046 \times 10^7$	0,178	$3,046 \times 10^7$	0,178
Mặt cắt đầu nòng	$1,994 \times 10^7$	0,386	$1,994 \times 10^7$	0,386

3.3. Nhận xét các kết quả tính toán

Qua các kết quả khảo sát về trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của nòng pháo khi bắn một phát và bắn nhiều phát liên tiếp có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Nhiệt độ trong buồng đốt lớn hơn nhiệt độ trong phần rãnh xoắn và nhiệt độ trong các mặt cắt nòng pháo khi bắn là khác nhau chứng tỏ có sự phân bố nhiệt độ theo chiều dài nòng.
- Sau mỗi phát bắn, nhiệt độ lớn nhất tại các mặt cắt lòng nòng tăng lên đáng kể (hình 8). Đó là do ảnh hưởng của phát bắn trước, nhiệt độ ban đầu trước khi bắn phát tiếp theo của nòng pháo cao hơn của phát bắn trước đó.

- Khi bắn một phát, ứng suất lớn nhất tại các mặt cắt buồng đốt đạt khoảng $4,330 \times 10^8$ Pa, trong khi tại các mặt cắt lòng nòng thì ứng suất tại mặt cắt lòng nòng số 1 là lớn nhất và bằng $5,068 \times 10^8$ Pa. Khi bắn liên tục 4 phát trong 1 phút, ứng suất lớn nhất trong buồng đốt đạt khoảng $5,339 \times 10^8$ Pa, tại các mặt cắt lòng nòng là $4,521 \times 10^8$ Pa. So với các vật liệu chế tạo nòng pháo SU 122mm ($\sigma_b = 7,85 \times 10^8 \div 9,00 \times 10^8$ Pa [2, 5], hệ số an toàn $n = 1,1 \div 1,2$) chứng tỏ nòng đủ bền.

- Khi bắn liên tục 4 phát trong một phút, biến dạng trong nòng pháo tăng lên đáng kể, ví dụ đối với mặt cắt đầu nòng, biến dạng tại thời điểm $t = 60s$ khi bắn 4 phát/phút sẽ tăng lên 3,3 lần so với bắn một phát ở thời điểm $t = 15s$.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả giải bài toán thuật phóng trong và tính toán nhiệt của pháo SU 122mm và được sử dụng để khảo sát trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của nòng pháo.

Kết quả tính toán cho thấy sự phân bố nhiệt độ theo chiều dài nòng pháo và nhiệt độ thành nòng pháo sau mỗi phát bắn khi bắn liên tục tăng lên đáng kể. Điều này dẫn đến ứng suất, biến dạng và nhiệt độ của nòng pháo đều tăng và có thể ảnh hưởng đến độ chính xác bắn và tuổi thọ nòng pháo. Các kết quả khảo sát và tính toán là cơ sở cho việc tính toán tuổi thọ nòng - giới hạn số phát bắn, cũng như khi thiết kế chế tạo nòng pháo SU 122mm.

DANH MỤC DANH PHÁP/KÝ HIỆU

HPTVP : Hệ phương trình vi phân
HSTNDL : Hệ số tỏa nhiệt đối lưu
PTHH : Phần tử hữu hạn
USLN : Ứng suất lớn nhất
BDLN : Biến dạng lớn nhất

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lanh, N. H., 1996. *Nghiên cứu dao động của nòng khi bắn*, Học viện KTQS, Luận án tiến sĩ.
- [2]. Nguyễn, H. H., 2017. *Nghiên cứu trường nhiệt, ứng suất, biến dạng của nòng pháo phòng không 37mm K65-2 khi bắn liên thanh*, Học viện KTQS, Luận văn cao học.
- [3]. Lanh, N. H., Hải, N. T., Thuần, N. Q., 2006, *Quá trình xung nhiệt của nòng súng pháo*, Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, Hà Nội.
- [4]. Điện, T. Đ., Lượng, N. Q., Doanh, T. V., 2003. *Thuật phóng trong*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- [5]. Lượng, N. Q., Trình, T. Q., 2010. *Số liệu vũ khí - đạn*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- [6]. Lanh, N. H., Hải, N. T., Thuần, N. Q., 2006. *Quá trình xung nhiệt của nòng súng pháo*, NXB Quân đội nhân dân, Hà Nội.
- [7]. Chương, P. H., 2001. *Tuổi thọ nòng*, Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, Hà Nội.
- [8]. Babaei, H., Malakzadeh, M., Asgari, H. 2015. “*Stress Analysis of Gun Barrel Subjected to Dynamic Pressure*”, International Journal of Mechanical Engineering and Applications, Vol. 3, No. 4, pp. 71-80.
- [9]. Akcay, M., and Yukselen, M. A., 2014. *Unsteady thermal studies of gun barrels during the interior ballistic cycle with non-homogenous gun barrel material thermal characteristics*, Military Academy Defense Institute, Turkey.