



**KONCEPCJA „CICHEGO” POCISKU MOŹDZIERZOWEGO.
CZEŚĆ III – KONSTRUKCJA POCISKU ORAZ OBLICZENIA
WYTRZYMAŁOŚCIOWE**

***CONCEPTION OF A “SILENT” MORTAR PROJECTILE.
PART III – DESIGN AND STRENGTH CALCULATIONS***

Marcin GUTOWSKI, Mariusz MAGIER

Zakład Mechaniki i Techniki Uzbrojenia, Instytut Mechaniki i Poligrafii,
Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska,
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

*Department of Mechanics and Armament Technologies, Institute of Mechanics and Printings,
Faculty of Production Engineering, Warsaw University of Technology,
85 Narbutta St., 02-524 Warsaw, Poland*

Author's e-mail address: mariusz.magier@pw.edu.pl; ORCID: 0000-0002-4431-9537

DOI 10.5604/01.3001.0015.6767

Streszczenie: Publikacja zawiera wybrane elementy procesu projektowania „cichego” pocisku moździerzowego. Na jego podstawie można stwierdzić że spełnione zostały główne założenia projektowe. Obliczenia numeryczne wykazały, że możliwe jest zaprojektowanie „cichego” pocisku moździerzowego kalibru 60 mm którego zasięg mieści się w granicach 1200 ÷ 1300 m przy masie własnej 1,8 kg. Ponadto, obliczenia wytrzymałościowe udowodniły że pocisk taki, może zostać wykonany z powszechnie wykorzystywanych materiałów konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: moździerz, pocisk moździerzowy, balistyka wewnętrzna

1. Program grub_ogona.m

Głównym krokiem w wytrzymałościowych obliczeniach numerycznych jest obliczenie minimalnej grubości ogona pocisku, która pozwoli na spełnienie wymagań doty-

Abstract: The paper deals with some selected elements of a designing process for a “quiet” mortar projectile. Basing on it a decision could be made if specifications of the design were met. Numerical computations have proved that it is possible to design a quiet 60 mm mortar projectile with the range of 1200 ÷ 1300 m and own mass 1.8 kg. Moreover, the strength calculations have proved that the projectile can be made of commonly used structural materials.

Keywords: mortar, mortar projectile, internal ballistics

1. Program grub_ogona.m

Calculation of a minimal thickness of projectile's tail is the main stage in strength calculations needed for meeting the specifications. Data taken from the

czących wytrzymałości. Do obliczeń w tej fazie wykorzystywane są dane z kolumn odpowiadających ciśnieniu całkowitemu i drodze pocisku. Stosując wzór ogólny na minimalny promień zewnętrzny lufy:

$$r_z = r_w \sqrt{\frac{3R_{sp} + 2p_1}{3R_{sp} - 4p_1}} \quad (1.1)$$

gdzie:

r_z – promień zewnętrzny ogona,
 r_w – promień wewnętrzny ogona,
 R_{sp} – granica sprężystości materiału na ogon,
 p_1 – ciśnienie wewnątrz ogona.

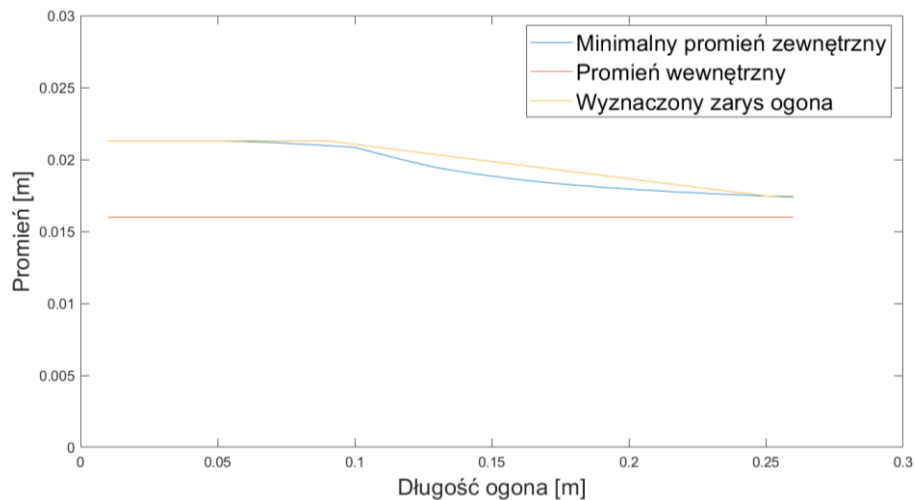
Jako materiał konstrukcyjny na ogon wykorzystana została stal stopowa 40H poddana ulepszeniu cieplnemu o granicy plastyczności $R_e = 780 \text{ MPa}$. Podczas obliczeń stosowany jest współczynnik bezpieczeństwa $k = 1,4$.

columns corresponding to the overall pressure and motion of the projectile are used at this stage of calculations. General expression for minimal external radius of the barrel is used:

where:

r_z – external radius of the tail,
 r_w – internal radius of the tail,
 R_{sp} – elasticity limit for material of the tail,
 p_1 – pressure inside the tail.

40H steel alloy after heat treatment and with plasticity limit $R_e = 780 \text{ MPa}$ was used as the structural material of the tail. Safety coefficient equal to $k = 1.4$ is used at calculations.



Rys. 1. Wykres przedstawiający wyniki obliczeń programu grub_ogona.m [opracowanie własne]

Fig. 1. Graph representing results of calculations of grub_ogona.m program [own development]

Promień – Radius

Długość ogona – Length of the tail

Minimalny promień zewnętrzny – Minimal external radius

Promień wewnętrzny – Internal radius

Wyznaczony zarys ogona – Established contour of the tail

Program oblicza r_z dla każdej kolejnej wartości ciśnienia. Następnie przybliża utworzoną tak krzywą za pomocą trzech odcinków, co zilustrowano na rys. 2. Wyznaczone odcinki

The program calculates r_z for each consecutive value of pressure. In the next step it approximates the received curve by three sections what is illustrated in Fig. 2. The identi-

odpowiadają wymiarom zewnętrznym ogona pocisku. Wykorzystując określone wcześniej dane, takie jak gęstość materiału oraz średnica wewnętrzna ogona, wyznaczana jest masa elementu.

2. Program iteracje.m

Ostatnim stworzonym na potrzeby projektu algorytmem jest iteracyjny algorytm przeszukujący przestrzeń możliwych rozwiązań pod kątem rozwiązania optymalnego. Przestrzeń ta jest n-wymiarowa gdzie n jest liczbą zmiennych parametrów.

W przypadku tego projektu, pożądana jest maksymalna donośność pocisku. Dla uproszczenia założono, że wpływ wymiarów zewnętrznych ogona pocisku mózdzierzowego, ma pomijalny wpływ na jego współczynnik oporu. Dzięki temu zagadnienie można uprościć do postaci poszukiwania maksymalnej prędkości wylotowej.

Krokiem pierwszym, jest ustalenie które parametry będą poddane modyfikacji w celu optymalizacji. Wybranie zbyt małej liczby parametrów, może skutkować nie znalezieniem najlepszej możliwej konfiguracji. Wybranie zbyt dużej ilości parametrów będzie skutkowało znacznym wydłużeniem czasu potrzebnego do rozwiązania. Dla każdego wybranego parametru należy określić przedział wartości oraz liczbę punktów wybieranych z przedziału.

Następnie, każda kolejna kombinacja parametrów przekazywana jest jako dane wejściowe programu *PGBW.m*. Program ten wykonuje symulację strzału i zwraca jej wyniki. Dane dotyczące przebiegu ciśnienia oraz drogi pocisku przekazywane są do programu *Grub_ogona.m*, który w sposób przedstawiony w poprzednim podrozdziale oblicza masę pocisku w danej konfiguracji.

Ze względu na wzajemną zależność ciśnienia maksymalnego od masy pocisku, masy po-

fied sections correspond to external dimensions of the projectile tail. Using the data which was previously identified, such as the density of material, the mass of the component is established.

2. Program iteracje.m

The last algorithm created for the project is an iterating algorithm searching the space of possible solutions to find out an optimal solution. It is a n-dimensions space, and n is the number of changeable parameters.

In the case of this project a maximal range of the projectile is preferred. It was assumed for simplicity reasons that influence of external dimensions of the projectile tail is neglectable for its drag coefficient. In this way the question may be simplified for searching a maximal muzzle velocity.

Selection of parameters which could be modified at the optimisation is the first step. Selection of insufficient number of parameters may cause that the best configuration would not be found. Selection of excessive number of parameters will effect an increase of time needed for finding solution. For each selected parameter an interval of values has to be determined with the numbers of points taken from the interval.

In the next step each consecutive combination of parameters is entered to program *PGBW.m*. The program performs simulation of firing and returns the results. Data concerning the changes of pressure and displacement of the projectile are sent to program *Grub_ogona.m*, which calculates the mass of the projectile for the specific configuration in the way presented in former subsection.

Due to a mutual dependence of maximal pressure on the projectile’s mass, and mass of the projectile on the tail thickness,

cisku od grubości ogona oraz grubości ogona od ciśnienia maksymalnego niemożliwe jest podanie rzeczywistej masy pocisku przed wykonaniem obliczeń. Problem ten został rozwiązany w następujący sposób: Dla projektowanego pocisku założona została masa $1,8\text{ kg}$. Po wykonaniu obliczeń dla tej masy, program *Grub_ogona.m* określa masę rzeczywistą pocisku. Jeżeli jest ona wyższa niż $1,8\text{ kg}$, to rozwiązanie jest odrzucane. Jeżeli jest niższa, zapisywana jest różnica masy. Metoda ta zakłada, że do projektowanej głowicy zostanie dołożony materiał wybuchowy tak, by zrównoważyć niedobór masy. W trakcie działania program *PGBW.m* pod koniec każdej fazy strzału dokonuje sprawdzenia spełnienia założeń. W momencie ich niespełnienia następuje przerwanie obliczeń oraz odrzucenie sprawdzanej konfiguracji. Ma to miejsce na przykład wtedy, gdy na końcu drogi tłoka nie zostanie spalony cały proch. Efektem tych odrzuceń jest to, że mimo iż do sprawdzenia wybraliśmy daną liczbę konfiguracji, ponad połowa z nich może nie dać żadnych rozwiązań. Jest to widoczne na wykresach przedstawionych w dalszej części tego podrozdziału.

Jeśli rozwiązanie nie zostało odrzucone, zostaje zapisane w tabeli wyników. Zapisywana jest: prędkość wylotowa, ciśnienie maksymalne, różnica masy względem założonej oraz parametry przy których te wartości wystąpiły.

Podczas pierwszego uruchomienia programu *Iteracje.m* założono następujące parametry oraz ich przedziały:

and the tail thickness on the maximal pressure it is impossible to have the real mass of projectile before calculations. The problem was solved in a following way: the mass of 1.8 kg was assumed for the designed projectile. When calculations are made for this mass the program *Grub_ogona.m* determines the real mass of projectile. If it is greater than 1.8 kg , then the solution is rejected. If it is lower, then the difference of masses is recorded. The method assumes that the explosive material will be added to the designed head to counterbalance the deficiency of mass. During operation of *PGBW.m* program the meeting of assumptions is examined at the end of each phase of firing. If they are not met the calculations are interrupted and the examined configuration is rejected. It happens for instance when at the end of piston's movement the powder was not burned entirely. In effect, more than half of configurations selected for examination may not provide any solution. It is visible on the graphs presented further in this subsection.

If the solution was not rejected, then it is recorded in the table of results. Following parameters are recorded: muzzle velocity, maximal pressure, mass difference against the assumed value, and parameters at which these values were received.

For the first run of the *Iteracje.m* program following parameters and intervals were assumed:

Tabela 1. Parametry początkowe pierwszej tury optymalizacji

Table 1. Initial parameters for the first cycle of optimisation

Parametr / Parameter	Wartość min. <i>Minimal value</i>	Wartość max. <i>Maximal value</i>	Krok / Step
Średnica wewnętrzna d [mm] <i>Internal diameter</i>	26	34	2
Grubość warstwy palnej prochu e_1 [mm] <i>Thickness of powder burning layer</i>	0,28	0,36	0,02
Długość komory spalania l_0 [mm] <i>Length of combustion chamber</i>	18	24	1,5

Gęstość ładowania $\Delta \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ <i>Density of loading</i>	740	840	20
Droga tłoka $l_{max} [mm]$ <i>Displacement of piston</i>	26	32	2

Tabela 2. Wyniki obliczeń programu iteracje.m / Table 2. Calculation results of iteracje.m program

Lp. #	Prędkość wylotowa $v_w \left[\frac{m}{s} \right]$ <i>Muzzle velocity</i>	Ciśnienie maks. $p_m [MPa]$ <i>Maximal pressure</i>	Różnica masy w stosunku do założonej 1,8 [kg] <i>Mass difference against assumed 1.8 [kg]</i>	Średnica wewnętrzna ogona $d [m]$ <i>Tail internal diameter</i>	Grubość ziarna prochu $e_1 [m]$ <i>Thickness of powder grain</i>	Długość komory spalania $l_0 [m]$ <i>Length of combustion chamber</i>	Gęstość ładowania $\Delta \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ <i>Density of loading</i>	Droga Tłoka $l_{max} [m]$ <i>Displacement of piston</i>
1	130,6974	87,61483	-0,00307	0,032	0,00028	0,018	840	0,3
2	130,4057	93,84945	-0,00095	0,03	0,0003	0,0195	820	0,32
3	130,184	83,55884	-0,00823	0,032	0,00028	0,0195	760	0,32
4	130,1381	93,40739	-0,00062	0,03	0,0003	0,021	760	0,32
5	129,5633	82,31774	-0,00267	0,032	0,0003	0,0195	840	0,32
6	129,5518	82,78194	-0,02436	0,032	0,00028	0,018	820	0,32
7	128,9698	95,43695	-0,01089	0,03	0,00028	0,0195	740	0,32
8	128,7743	93,24735	-0,01225	0,03	0,00032	0,021	840	0,3
9	128,7493	88,8638	-0,01323	0,032	0,00028	0,0195	780	0,28
10	128,7093	99,69229	-0,00586	0,03	0,0003	0,0195	840	0,28
11	128,7076	99,68308	-0,00204	0,03	0,0003	0,021	780	0,28
12	128,7059	94,95018	-0,01826	0,03	0,00028	0,018	800	0,32
13	127,9562	92,08355	-0,01689	0,03	0,00032	0,0225	780	0,3
14	127,9498	93,84945	-0,02369	0,03	0,0003	0,0195	820	0,3
15	127,897	87,96951	-0,00878	0,03	0,00034	0,0225	840	0,32
16	127,8097	87,61483	-0,02631	0,032	0,00028	0,018	840	0,28
17	127,7946	102,1349	-0,00961	0,03	0,00028	0,0195	760	0,28
18	127,7432	107,6355	-0,00051	0,03	0,00028	0,018	840	0,26
19	127,7024	87,98385	-0,02891	0,03	0,00032	0,021	820	0,32
20	127,6794	93,40739	-0,02325	0,03	0,0003	0,021	760	0,3
21	127,6015	91,32347	-0,00289	0,03	0,00034	0,024	800	0,3
22	127,533	83,55884	-0,02979	0,032	0,00028	0,0195	760	0,3
23	127,4467	101,9103	-0,00279	0,028	0,00036	0,024	840	0,3
24	127,2731	101,0824	-0,01962	0,03	0,00028	0,018	820	0,28
25	127,2619	99,09918	-0,01611	0,028	0,00034	0,024	760	0,32
26	127,1408	102,5327	-0,01765	0,028	0,00032	0,021	800	0,32
27	127,1282	107,3151	-0,00285	0,028	0,00032	0,0225	760	0,3
28	126,8985	88,37601	-0,04757	0,03	0,0003	0,0195	800	0,32
29	126,893	82,78194	-0,04566	0,032	0,00028	0,018	820	0,3
30	126,8336	94,79815	-0,01059	0,03	0,00032	0,024	740	0,28

Po wykonaniu obliczeń dla około 3000 kombinacji, wybrana została ta, charakteryzująca się największą prędkością wylotową. W tabeli 2 zaprezentowano konfiguracje charakteryzujące się najwyższą prędkością wylotową.

Kolorem szarym wyróżnione zostały te konfiguracje, które osiągają największą prędkość wylotową dla drogi tłoka równej 300, 280 oraz 260 mm. Na tym etapie należałoby się zastanowić czy zwiększenie prędkości o 3 m/s jest warte wydłużenia pocisku o 40 mm. Jest to jednak pytanie skierowane do potencjalnego użytkownika, na które odpowiedź zależy od jego wymagań taktycznych i logistycznych. Do dalszych rozważań założymy że wybrany został najkrótszy z dostępnych wariantów, oznaczony liczbą 18.

3. Konstrukcja pocisku oraz obliczenia wytrzymałościowe

3.1. Model 3D oraz rysunki pocisku

Po wykonaniu obliczeń wyznaczono następujące parametry ogona pocisku:

Tabela 3. Wyznaczone parametry ogona pocisku

Table 3. Established parameters of projectile's tail

Droga Tłoka <i>Piston way</i>	Średnica tłoka <i>Piston diameter</i>	Średnica pierwszego członu <i>Diameter of first segment</i>	Długość pierwszego członu <i>Length of first segment</i>	Długość drugiego członu <i>Length of second segment</i>	Średnica trzeciego członu <i>Diameter of third segment</i>	Długość trzeciego członu <i>Length of third segment</i>
260 mm	30 mm	37 mm	96 mm	160 mm	33,32 mm	16 mm

Na ich podstawie zaprojektowano zespół napędowy pocisku składający się z cylindra oraz tłoka. Przedstawiony został on na rys.2.

Calculations were made for ca. 3000 combinations, and the one with the greatest muzzle velocity was selected. Table 2 presents configurations characterised with the greatest muzzle velocities.

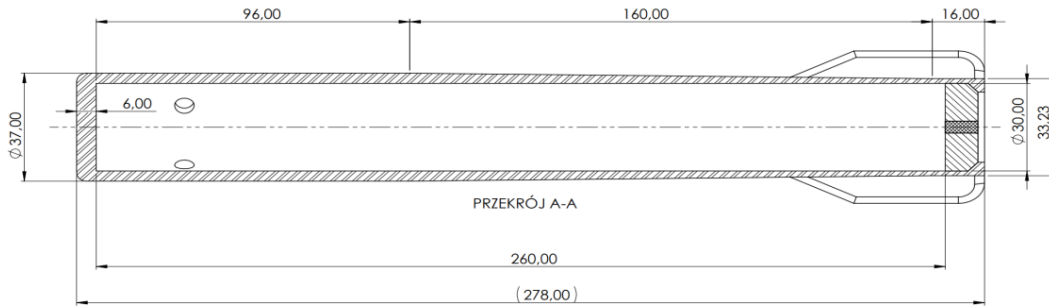
The grey colour distinguishes these configurations which reach the highest muzzle velocity for piston travelling 300, 280 and 260 mm. At this moment it may be considered if increase of velocity by 3 m/s is worth elongation of the projectile by 40 mm. But, it is a question to a possible user, and answer depends on his tactical and logistic specifications. Further considerations deal with the shortest variant among presented which is marked by number 18.

3. Design of Projectile and Strength Calculations

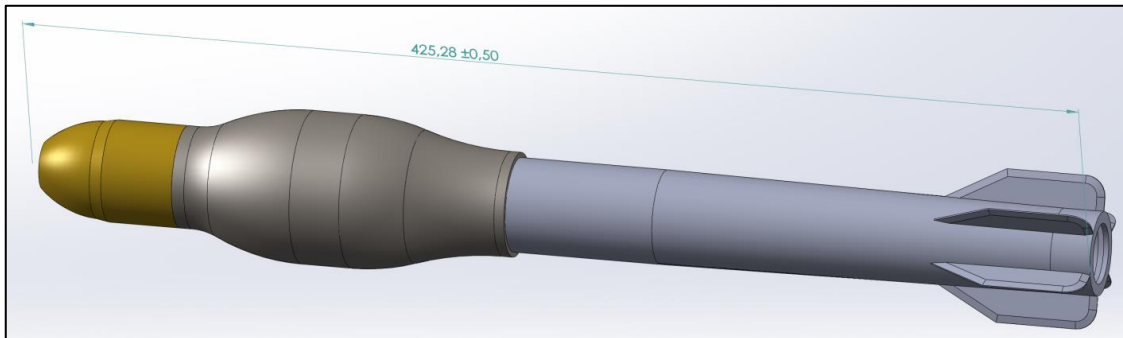
3.1. Model 3D and Projectile's Drawings

Following parameters of projectile's tail were established after calculations:

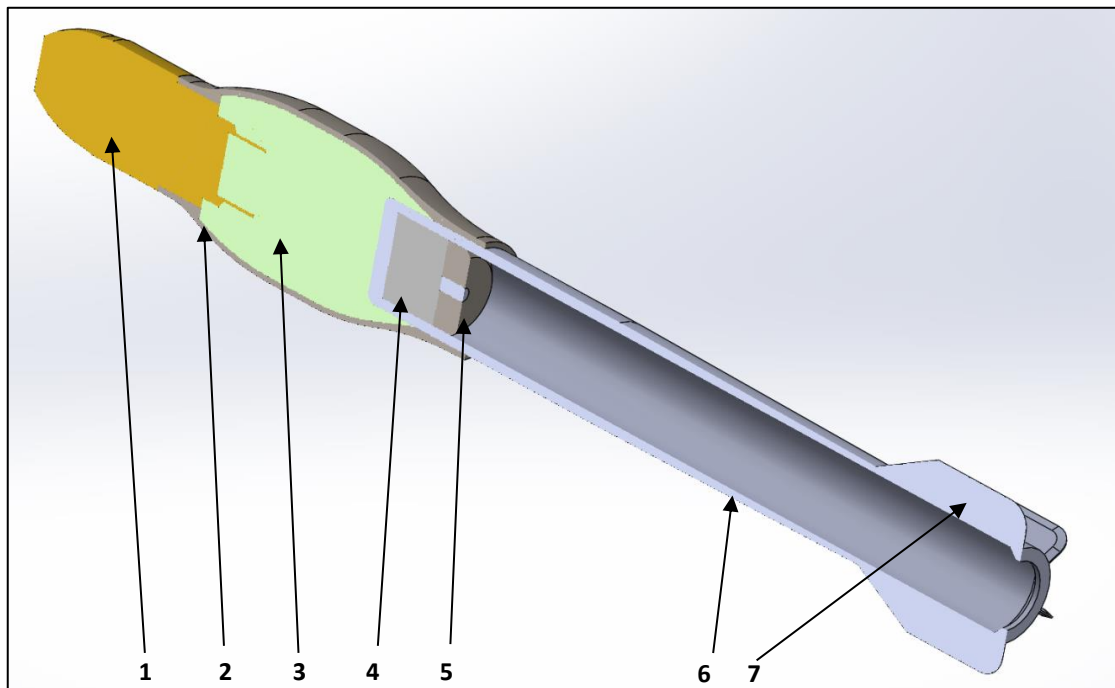
They were used to design driving system of the projectile consisting of cylinder and piston. It is shown in Fig. 2.



Rys. 2. Przekrój zespołu napędowego pocisku [opracowanie własne]
Fig. 2. Cross section of projectile's driving system [own development]



Rys. 3. Trójwymiarowy model pocisku [opracowanie własne]
Fig. 3. Three dimensional model of projectile [own development]



Rys. 4. Przekrój trójwymiarowego modelu pocisku: 1 – zapalnik ZGM, 2 – skorupa,
3 – wypełnienie z trotylu, 4 – ładunek miotający, 5 – tłok, 6 – ogon,
7 – stabilizatory brzechwowe [opracowanie własne]

Fig. 4. Cross section of three dimensional model of projectile: 1 – Fuse ZGM, 2 – Shell,
3 – Filling with trotyl, 4 – Propelling charge, 5 – Piston, 6 – Tail,
7 – Fin stabilisers [own development]

3.2. Obliczenia wytrzymałościowe kolków mocujących

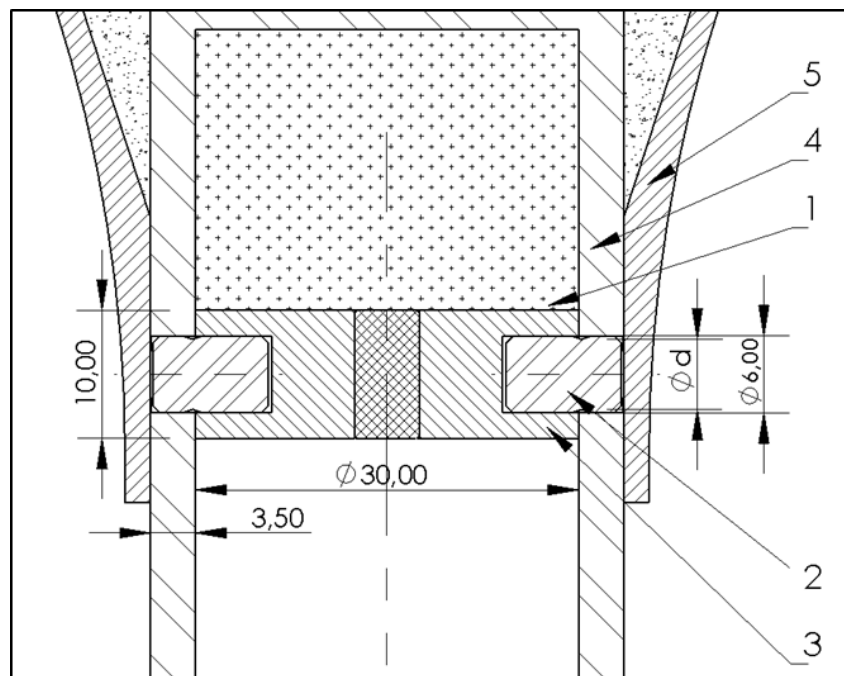
Wykorzystany do obliczeń numerycznych model fizyczny zakłada występowanie ciśnienia forsowania. W klasycznej broni lufowej odpowiada ono ciśnieniu niezbędnemu by płaszcz pocisku wciął się w bruzdy w lufie. W przypadku zaprojektowanego pocisku moździerzowego, nie występuje żaden mechanizm powstrzymujący tłok przed przemieszczaniem się. By osiągnąć założone w obliczeniach ciśnienie forsowania, wynoszące 17 MPa, niezbędne jest zaprojektowanie takiego mechanizmu.

Zaproponowane rozwiązanie wykorzystuje cztery kołki pełniące podwójną funkcję. Oprócz utrzymywania tłoka w miejscu i zwolnienia go przy odpowiednim ciśnieniu, pełnią rolę dodatkowego połączenia pomiędzy skorupą i ogonem pocisku. Schemat tego połączenia zaprezentowano poniżej.

3.2. Strength Calculations of Fixing Pins

Physical model used for numerical calculations assumes the existence of forcing pressure. In classical firearms it corresponds to pressure needed for the jacket of bullet to wedge into the furrows of the barrel. In the case of designed mortar projectile no mechanism exists to prevent the displacement of the piston. Such mechanism has to be designed to get the pressure of enforcement equal to 17 MPa which was accepted for calculations.

Proposed solution uses four pins of double action. Apart arresting the piston in one place and releasing it at sufficient pressure they also provide an additional joint between the shell and the tail of projectile. Schematics of this connection is shown below.



Rys. 5. Schemat połączenia kolkowego zespołu tłoka: 1 – komora spalania z ładunkiem prochowym, 2 – podcięty kołek, 3 – tłok, 4 – cylinder, 5 – skorupa [opracowanie własne]

Fig. 5. Schematics of pin connection for piston unit: 1 – Combustion chamber with the powder charge, 2 – Undercut pin, 3 – Piston, 4 – Cylinder, 5 – Shell [own development]

By kołki zostały zerwane przy odpowiednim ciśnieniu zastosowano podcięcia. Gwarantują one dodatkowo, że kołek zostanie ścięty w odpowiednim miejscu. Obliczono wymaganą średnicę podcięcia.

Materiał na kołek: stal C35, granica do-
rażna wytrzymałości $R_m = 520 \text{ MPa}$, naprę-
żenia dopuszczalne przy ścinaniu $K_\tau = 0,3$,
średnica tłka $D = 30 \text{ mm}$, ilość kołków
 $n = 4$, ciśnienie forsowania $p = 17 \text{ MPa}$.

$$d = \sqrt{\frac{p * D^2}{R_m * K_\tau * n}} = \sqrt{\frac{17 * 30^2}{520 * 0,3 * 4}} = 4,95 \text{ mm}$$

Podczas określania tolerancji wykonania kołków należy pamiętać by wymiar 4,95 mm wykonany był w tolerancji h. Jest to istotne ponieważ zwiększenie tego wymiaru spowoduje zwiększenia ciśnienia forsowania, co przekłada się na zwiększenie ciśnienia maksymalnego i może spowodować uszkodzenie pocisku.

4. Wnioski

Analizując przebieg procesu projektowania opisanego w tej pracy cichego pocisku moździerzowego można stwierdzić że spełnione zostały główne założenia projektowe. Obliczenia numeryczne wykazały, że możliwe jest zaprojektowanie „cichego” pocisku moździerzowego kalibru 60 mm, którego zasięg mieści się w granicach 1200 ÷ 1300 m, przy masie własnej 1,8 kg. Ponadto, obliczenia wytrzymałościowe udowodniły że pocisk taki może zostać wykonany z powszechnie wykorzystywanych materiałów.

Obserwacja trendów dotyczących wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych na polu walki oraz obecnych na rynku systemów tradycyjnych oraz „cichych” moździerz wskazuje, na możliwość zwiększenia się w najbliższych latach zainteresowania sys-

The undercuts were applied to shear the pins at suitable pressure. They warrant additionally that the pit is cut in a relevant place. Required diameter of undercutting was calculated.

The pin is made of steel C35, temporary limit of strength $R_m = 520 \text{ MPa}$, acceptable stresses at shearing $K_\tau = 0.3$, diameter of piston $D = 30 \text{ mm}$, number of pins $n = 4$, pressure of forcing $p = 17 \text{ MPa}$.

In tolerance of workmanship for the pins it has to be remembered that the dimension of 4.95 mm was made in tolerance h. It is important, as any increase of this dimension makes the pressure of forcing become higher, what builds up the maximal pressure and can lead to damaging of the projectile.

4. Conclusions

Analysing the process of designing described in the paper for the quiet mortar projectile it may be stated that the general design specifications were met. The calculations have proved that it was possible to design the “quiet” 60 mm mortar projectile with the range within 1200 ÷ 1300 m and own mass 1.8 kg. Moreover, the strength calculations have proved that the projectile can be made of commonly accessible materials.

Analysis of trends concerning the use of unmanned aerial vehicles on the battlefield and the presence of conventional and “quiet” mortars on the market indicates that systems of “quiet” mortars could become more popular in the nearest years due to their lower detectability. Regarding the de-

temami „cichych” moździerzy za względu na ich niższą wykrywalność. W kontekście rozwoju przedstawionej w tej pracy konstrukcji można określić następujące kierunki rozwoju:

- przeprowadzenie dokładnej analizy wytrzymałościowej konstrukcji, z naciskiem na wytrzymałość ogona w warunkach podwyższonej temperatury oraz stałego oddziaływania ciśnienia;
- wykonanie prototypów pocisku z atrapami podzespołów bojowych, w celu sprawdzenia rzeczywistej donośności;
- analiza i dopracowania głowicy bojowej, której w tej pracy nie poświęcono dużej uwagi, możliwa zmiana zapalnika na dedykowany;
- analiza kształtu pocisku pod kątem zmniejszenia oporu powietrza w trakcie lotu.
- system połączenia kołkowego zespołu tłoka można by zastąpić układem dwukomorowym podobnym do stosowanych w amunicji do 40 mm granatników.

sign presented in the paper following directions of development may be considered:

- Preparing a more accurate analysis of the strength for the design, focused on the tail resistance at increased temperatures and permanent action of pressure;
- Making the prototypes of projectiles with the mock-ups of warheads to check the real range;
- Analysis and upgrading of the warhead, which was left without great attention in the paper, and possible change of the fuse into a dedicated one;
- Analysis of projectile’s shape to reduce the air drag during the flight;
- System of pin connection of the piston unit may be replaced by a two-chamber system similar to that used in ammunition for 40 mm grenade launchers.

Literatura / Literature

- [1] B. Pańczyk. *Metody numeryczne w przykładach*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2012;
- [2] Z. Wrześniński. *Balistyka wewnętrzna klasycznych broni lufowych*. Wydanie I. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018;
- [3] P. Krzyżanowski. *Obliczenia inżynierskie i naukowe: szybkie, skuteczne, efektywne*. Wyd. I - 2 dodr. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [4] A. Krupowicz. *Metody numeryczne zagadnień początkowych równań różniczkowych zwyczajnych*. Warszawa: PWN, 1986;
- [5] Mathworks, Choose an ODE Solver. Dostępny w internecie: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/choose-an-ode-solver.html> [dostęp 03.01.2021]

