



**CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PARAMETRY PRACY
PIROTECHNICZNYCH UKŁADÓW OPÓŹNIAJĄCYCH**
***FACTORS AFFECTING THE OPERATING PARAMETERS
OF PYROTECHNIC DELAY DEVICES***

Radosław WARCHOŁ, Marcin NITA, Rafał BAZELA
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę dostępnej literatury na temat czynników wpływających na parametry pracy pirotechnicznych układów opóźniających (PUO). Przedstawione dane pochodzą z raportów z badań, opracowań, głównie pochodzenia zagranicznego. Zasadniczym elementem PUO jest pirotechniczny ładunek opóźniający (PŁO), który może składać się z jednej lub kilku pirotechnicznych mieszanin opóźniających (PMO). Zastosowanie odpowiedniej PMO oraz zachowanie przez nią wymaganych parametrów pracy w trakcie eksploatacji PUO decyduje o jej przydatności w środkach bojowych. W artykule zostały opisane czynniki, które mają wpływ na działanie PUO. Czynniki te zostały podzielone na wewnętrzne, ściśle związane z konstrukcją PUO oraz zewnętrzne. Opisane czynniki wpływające na działanie PUO zostały dodatkowo potwierdzone wynikami z badań. Zebrane informacje mogą być przydatne dla osób zajmujących się projektowaniem oraz badaniem PUO.

Słowa kluczowe: pirotechniczny układ opóźniający (PUO), pirotechniczny ładunek opóźniający (PŁO), pirotechniczna mieszanina opóźniająca (PMO), szybkość spalania.

1. Wstęp

Pirotechniczne układy opóźniające (PUO) znalazły szerokie zastosowanie w wielu konstrukcjach środków bojowych (ŚB) w celu zapewnienia odpowiedniej zwłoki czasowej od zainicjowania ŚB do jego zadziałania. Czas działania projektowanych obecnie PUO wynosi

Abstract: The paper analyses information available in literature on factors influencing the parameters of pyrotechnic delay devices (PDD). The literature includes research and development reports of mostly foreign origin. The main component of PDDs is a pyrotechnic delay charge (PDC) which may consist of one or more pyrotechnic delay mixtures (PDM). The use of appropriate PDM and maintaining its required parameters during service life decides about its usefulness for the ordnance. The paper describes the factors affecting the operation of PDDs. These factors are divided into internal ones, closely related to the structure of PDDs, and external ones. Described factors affecting the operation of PDDs were additionally illustrated by test results. Collected information can be useful for people involved in designing and testing the PDDs.

Keywords: pyrotechnic delay device (PDD), pyrotechnic delay charge (PDC), pyrotechnic delay mixture (PDM), burning rate.

1. Introduction

Pyrotechnic delay devices (PDD) have been widely used in designs of explosive ordnance (EO) to provide a suitable time delay between its initiation and detonation. For currently designed PDDs the delay time is between a few milliseconds and

od kilku milisekund do kilkadziesiąt minut. Zwłoka czasowa może być wymagana ze względu na bezpieczeństwo działania ŚB lub jego niezawodność działania. Na przykład zwłoka czasowa jest konieczna po zakończeniu działania silnika startowego i rozpoczęciu działania silnika marszowego w pociskach raketowych. Ma to decydujący wpływ na bezpieczeństwo strzelającego. Z kolei niezawodne działanie PUO może decydować o prawidłowym zadziałaniu SB w celu. Na przykład zwłoka czasowa uzyskana za pomocą PUO niezbędna jest do tego, żeby pocisk wybuchł po wnikięciu w cel.

PUO nie jest konstrukcyjnie skomplikowanym układem i w najprostszej konfiguracji składa się z korpusu, w którym jest zaprasowana pirotechniczna mieszanina opóźniająca (PMO, jedna lub kilka). PMO zaprasowane w korpus PUO określa się jako pirotechniczny ładunek opóźniający (PLO).

Oprócz wymaganego opóźnienia ważne jest, aby PUO niezawodnie zapalił się, a następnie przekazał impulsu do następnego elementu łańcucha ogniowego ŚB.

Podczas procesu projektowania PUO jak i późniejszych badań (laboratoryjnych, poligonowych) ważne jest, aby mieć wiedzę, jakie czynniki mogą wpływać na właściwe działanie PUO. Wiedza ta pozwala na dobranie odpowiednich parametrów konstrukcyjnych przy nowoprojektowanych PUO oraz na opracowanie stanowisk badawczych podczas badania poprawności działania PUO.

W artykule przedstawiono analizę danych literaturowych na temat czynników wpływających na główny parametr pracy PUO, jakim jest czas jego działania (opóźnienia), który związany jest z szybkością spalania PMO w danych warunkach. Szybkość spalania PMO podawana jest w literaturze w calach na sekundę, centymetrach na sekundę, gramach na sekundę dla mieszanin wolnopalnych lub w metrach na sekundę dla szybko spalających się mieszanin [1]. Ze względu na brak dostępnych wyników badań PUO w rodzimej literaturze, większość przytoczonych przykładów pochodzi z analizy opracowań obcojęzycznych. Czynniki wpływające na parametry pracy PUO można podzielić na wewnętrzne i zewnętrzne.

Czynniki wewnętrzne obejmują:

a few dozen of minutes. This time delay may be required to provide a safe or reliable operation of EO. A time gap is needed for example in some missiles between the end of launching motor operation and the beginning of marching motor operation. It has a decisive impact into the safety of operator. On the other hand the reliable action of PDD may secure the proper functioning for EO in the target. For example the PDD may make a projectile detonate after penetrating the target in some depth.

The design of PDD is not too complicated and in the simplest configuration it consists of a socket filled with pressed pyrotechnic delay mixture (PDM) of one or more types. The PDM pressed into the case of PDD is defined as a pyrotechnic delay charge (PDC).

Apart of required delay the important thing is PDD reliable ignition and transfer of a fire pulse to the next component of EO firing train.

It is important for the process of PDD designing and testing (in laboratory or proving range conditions) to know factors influencing its effective operation. This knowledge helps to select appropriate design parameters for newly developed PDDs and build testing set-ups to check the correctness of their functionality.

The paper includes an analysis of literature data on factors influencing the main operational parameter of PDD defined as its action time (delay) that is connected with PDM rate of burning at specific conditions. In publications the burning velocity of PDM is given in inches per second, centimetres per second and grams per second for slow burning mixtures or in meters per second for mixtures with high burning rates [1]. As the access to PDD test results in national literature is limited then the most of presented examples come from abroad. The factors influencing the operational parameters of PDDs may be divided on internal and external.

There are following internal factors:

1) Calorific-chemical properties of PDM

- 1) termochemiczne właściwości składników PMO;
- 2) skład PMO, chemiczne i fizyczne właściwości składników PMO, w tym ich czystość oraz wielkość cząstek (rozdrobnienie);
- 3) parametry mechaniczne i geometryczne PMO po zaprasowaniu takie jak wytrzymałość mechaniczna, prawidłowość zaprasowania, średnica zaprasowania.

Do czynników zewnętrznych zalicza się:

- 1) temperaturę otoczenia, ciśnienie zewnętrzne, wilgotność, procesy starzeniowe, w tym utlenianie działające na PUO;
- 2) siły działające na PUO podczas strzału oraz źródło zapłonu PUO;
- 3) konstrukcje układu, w którym znajduje się PUO (wielkość komory rozprężania produktów spalania, zwłaszcza gazowych);
- 4) geometryczne wymiary i materiałowe parametry obudowy PUO (średnicę, długość rodzaj materiału obudowy, w tym jego przewodnictwo cieplne).

2. Czynniki wpływające na parametry pracy pirotechnicznej mieszanki opóźniającej (PMO)

2.1. Czynniki wewnętrzne wpływające na parametry pracy PMO

Pirotechniczna mieszanka opóźniająca jest substancją składającą się z paliwa i utleniacza, która prawidłowo zainicjowana do zapłonu, zdolna jest w ściśle określonych warunkach spalać się z określoną szybkością. Reakcja spalania PMO charakteryzuje się występowaniem płomienia i znacznego gradientu temperatury w PŁO. Przemieszczanie się strefy spalania wzdłuż PŁO zachodzi w wyniku przekazywania ciepła i przenoszenia masy ze strefy reakcji do kolejnych warstw PŁO.

Zasadniczym elementem, określającym podstawowe parametry wyjściowe PMO, jest dobór odpowiednich składników. Obecnie istnieje duży wybór substancji i związków chemicznych, które mogą znaleźć zastosowanie w PMO. Jednak wyprodukowanie

components;

- 2) Composition of PDM, chemical and physical properties of PDM compounds including their purity and the size of grains (pulverisation);
- 3) Mechanical and geometrical parameters of PDM after pressing such as mechanical strength, correctness and diameter of pressing.

There are following external factors:

- 1) Ambient temperature, external pressure, humidity, PDD ageing processes including oxidation;
- 2) Forces acting against PDD at firing and the source of PDD ignition;
- 3) Structure of a system where a PDD is placed (size of decompression chamber for burning, especially gaseous, products);
- 4) Geometrical dimensions and material characteristics of PDD casing (diameter, length and material of socket including calorific conductivity).

2. Factors Influencing Operational Parameters of Pyrotechnic Delay Mixture (PDM)

2.1. Internal Factors Influencing Operational Parameters of PDM

A pyrotechnical delay mixture consists of fuel and oxidiser which after the proper initiation for the ignition is able to burn with a specific rate under precisely defined conditions. PDM burning reaction is characterised by the existence of a flame and a significant gradient of temperature within the PDC. The displacement of burning zone along the PDC happens because of heat and mass transfer from the reaction zone into its consecutive layers.

A basic issue describing output characteristics of PDC is the selection of suitably matched components. Now a wide selection of substances and chemical compounds is available for PDMs. But the fabrication of PDM that meets strict criteria for its deployment in EO significantly

PMO, która spełnia zaostrzone kryteria umożliwiające jej zastosowanie w ŚB w znacznym stopniu zawęża ilość możliwych do zastosowania substancji w składzie PMO.

W przypadku wytypowania określonych substancji spełniających założone wymagania, zmiana wzajemnych proporcji poszczególnych składników wchodzących w skład mieszaniny ma wpływ na proces spalania, w tym na jego szybkość spalania oraz uzyskany efekt cieplny. Optymalizacja składu PMO zapewnia otrzymanie stabilnych form produktów spalania oraz właściwy przebieg reakcji w odpowiednich warunkach przemian fazowych [2].

W tabeli 1 [3] przedstawiono wpływ zmian procentowej zawartości substancji palnej - boru (B) oraz drugiego składnika utleniacza - Fe_2O_3 na czas palenia się dwuskładnikowej mieszaniny pirotechnicznej B/ Fe_2O_3 . Dla każdego składu procentowego PMO, zaprasowano PŁO w korpus i wykonano po trzy próby spalania, otrzymując średnią prędkość spalania.

reduces the number of substances which can be used.

If a selection of specific substances meeting the accepted specifications is taken then the changes of mutual proportions for particular components of the mixture influence the burning process including the rate of burning and the received thermal effect. Optimisation of PDM composition provides that stable forms of burning products are received and the reaction runs properly at suitable conditions of phase conversions [2].

The dependence of burning time of two-part pyrotechnical mixture B/ Fe_2O_3 on the changes of percentage content of burning substance in form of boron (B) and the second component in the form of oxidiser - Fe_2O_3 is presented in table 1 [3]. For each percentage content of PDM the PDC was pressed into the casing to perform three burning trials and get an average rate.

Tabela 1/ Table 1

Skład PMO [%] / PDM composition		Szybkość spalania [mm/s] / Rate of burning
B	Fe_2O_3	
5	95	brak zapłonu/ Lack of ignition
7	93	4,0
10	90	10,1
15	85	28,6
20	80	34,5
25	75	34,5
30	70	30,3
40	60	22,7
50	50	12,0
60	40	3,7
70	30	brak zapłonu/ Lack of ignition

W niektórych dwuskładnikowych PMO, w celu uzyskania jak największych szybkości spalania, stosunek zawartości utleniacza do substancji palnej jest bliski składowi stechiometrycznemu. W praktyce, ze względu na dobre właściwości przewodnictwa cieplnego paliwa stosuje się niewielką procentową nadwyżkę zawartości substancji palnej (paliwa) w stosunku do utleniacza.

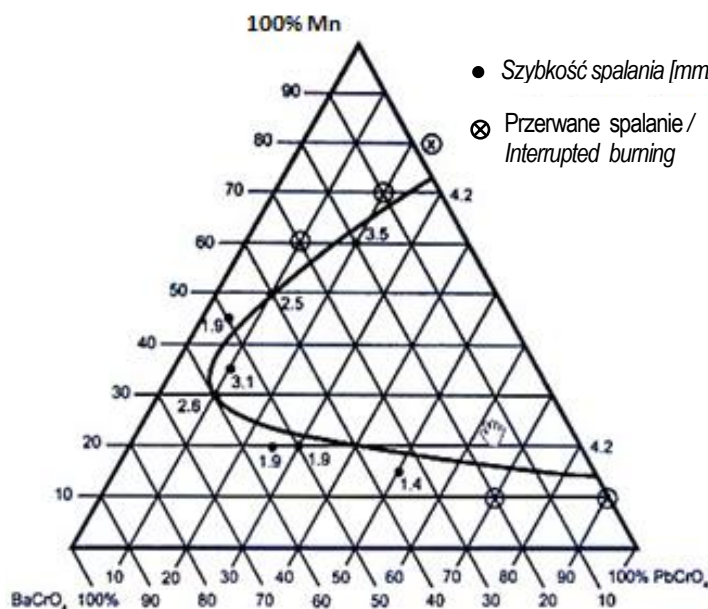
Wprowadzając w dwuskładnikowy skład

In order to get the highest burning rates a relation between contents of oxidiser and burning substance for some two-base PDMs is close to the stoichiometric mixture. In practice a small surplus of the burning substance (fuel) against the oxidiser is used because of beneficial effects of fuel calorific conductivity.

Any incorporation of a third component into two-base PDM (oxidiser/ burning

PMO (utleniacz / substancja palna), trzeci składnik, można zmieniać wynikową szybkość reakcji spalania. Na rysunku 1 przedstawiono diagram [4] obrazujący wpływ procentowej zawartości poszczególnych składników trójskładnikowej PMO na jej szybkość spalania. Z poniższego diagramu wynika, że dla procentowej ilości składników PMO (Mn/ BaCrO₄/ PbCrO₄) w stosunku 70/0/30 oraz 20/0/80, PMO osiąga największą szybkość spalania około 4,2 mm/s. Najmniejsze prędkości spalania (< 2mm/s) PMO uzyskuje przy zawartości: paliwa Mn od 20% do 10%, pierwszego utleniacza BaCrO₄ od 30% do 60% oraz drugiego utleniacza PbCrO₄ od 20% do 50%. Przerwanie spalania zaobserwowano dla następujących składów procentowych (kolejno od prawej strony diagramu): paliwa Mn – 10/60/70/80, the first oxidiser BaCrO₄ – 0/20/30/10/0, the second oxidiser PbCrO₄ – 90/70/10/20/25. Przedstawiona PMO charakteryzuje się nieliniową szybkością spalania. Niewielka zmiana składu procentowego składników powoduje różne szybkości spalania się PMO lub przerwanie spalania.

material) can change the final rate of burning. Fig. 1 shows a diagram [4] illustrating the dependence of burning rate on percentage content of particular components for a three-base PDM. The diagram shows that for percentage relations of 70/0/30 and 20/0/80 for following components (Mn/ BaCrO₄/ PbCrO₄) of PDM the highest burning rate of ca. 4.2 mm/s is received. The smallest burning rates (< 2mm/s) for PDM are received at contents: fuel Mn from 20% to 10%, the first oxidiser BaCrO₄ from 30% to 60% and the second oxidiser PbCrO₄ from 20% to 50%. The burning has been interrupted for following percentage contents (in order from the right side of the diagram): fuel Mn – 10/60/70/80, the first oxidiser BaCrO₄ – 0/20/30/10/0, the second oxidiser PbCrO₄ – 90/70/10/20/25. Presented PDM is characterised by nonlinear burning velocity. Small changes of percentage contents for particular components result in different burning rates of PDM or the interruption of burning.



Rys. 1. Diagram przedstawiający szybkość spalania trójskładnikowej PMO w zależności od procentowego udziału jej składników, tj. manganu (Mn) - paliwa, chromianu baru (BaCrO₄) - pierwszego utleniacza i chromianu ołowiu (PbCrO₄) - drugiego utleniacza

Fig.1. Diagram representing the burning rate for three-base PDM depending on percentage content of components i.e. manganese (Mn) - fuel, barium chromate (BaCrO₄) - first oxidiser and lead chromate (PbCrO₄) - second oxidiser.

W tabeli 2 [5] przedstawiono wpływ procentowej zawartości składników czteroskładnikowej PMO na jej szybkość spalania.

Table 2 [5] shows dependence between percentage content of components in four-part PDM and the burning rate.

Tabela 2 / Table 2

Mieszanina <i>Mixture</i>	Procentowa zawartość W (7-10) μm <i>Percentage content of tungsten W</i>	Procentowa zawartość BaCrO_4 <i>Percentage content</i>	Procentowa zawartość KClO_3 <i>Percentage content</i>	Procentowa zawartość ziemi krzemkowej <i>Percentage content of siliceous earth</i>	Szybkość spalania [mm/s] <i>Rate of burning</i>
–	27	58	10	5	0,6
–	33	52	10	5	0,9
–	49	41	5	5	2,6
–	63	22	5	10	7,1
–	80	12	5	3	16,7

Z danych w tabeli 2 wynika, że wzrost szybkości spalania PŁO następuje ze wzrostem procentowej zawartości paliwa - wolframu, przy jednoczesnym zmniejszaniu składu procentowego dwóch utleniaczy - BaCrO_4 , KClO_3 .

Na jednorodność PMO oraz jej szybkość spalania duży wpływ ma wielkość cząstek jej składników. Zazwyczaj średnica cząstek składników mieszaniny (szczególnie paliwa) jest maksymalnie zmniejszana do wartości mniejszej niż $10\mu\text{m}$, w celu osiągnięcia wymaganej oraz powtarzalnej szybkości spalania PMO.

Zmniejszenie wielkości cząstek utleniacza i paliwa przyczynia się do wzrostu ich „wzajemnego przylegania”, co skutkuje wzrostem objętości właściwej poszczególnych składników PMO. W tabeli 3 [6] przedstawiono wpływ wielkości cząstek na szybkość spalania PMO, której jedynym podstawowym składnikiem palnym był wolfram (W).

Szybkość spalania PMO wzrasta ze zwiększeniem stopnia przylegania cząstek jej składników, który jest funkcją rozdrobnienia składników PMO. Wzrost rozdrobnienia składnika PMO wpływa wprost proporcjonalnie na zwiększenie jego powierzchni właściwej.

Właściwie dobrane ciśnienie zaprasowania PŁO ma decydujący wpływ na jej *wytrzymałość mechaniczną*, wielkość *pustych przestrzeni*, *stabilność jej zapłonu* oraz charakteryzuje się brakiem występowania *efektu wyprzedzania* (ang. „premature effect”) w trakcie spalania PŁO. Wszystkie te czynniki decydują o zachowaniu stabilnych parametrów pracy PŁO. Ciśnienie zaprasowania PMO wpływa na

Data presented in table 2 shows that the rate of burning for PDC increases with the increase of percentage content of the fuel (tungsten) at simultaneous decrease of percentage content for two oxidisers - BaCrO_4 , KClO_3 .

The homogeneity and burning rate of PDM depends strongly on the size of components grains. The diameter of particles in the mixture (especially fuel) is usually maximally reduced below $10\mu\text{m}$ in order to get the required and repeatable rate of burning for PDM.

The reduction of the size for particles of oxidiser and fuel increases the level of their “mutual adhesion” what results in greater specific volumes of PDM particular components. Table 3 [6] shows how the size of particles influences the rate of burning for a PDM with tungsten (W) as a single burning component.

Suitably matched value of PDC pressing has a decisive impact into its *mechanical strength*, the value of *empty spaces*, *stability of ignition* and the lack of *premature effect* at burning. All these factors decide about preserving stable operational parameters for PDC.

The value of PDM pressing affects the character of PDC burning because it is linked with the temperature to which the zone before the burning front is

charakter spalania PŁO, ponieważ ma związek z temperaturą podgrzania strefy przed frontem spalania i przenikaniem gorących produktów spalania w głąb zaprasowanej PMO.

preheated and with the penetration of hot burnt products into the depth of pressed PDM.

Tabela 3 / Table 3

Składniki PMO (procentowy udział wagowy) <i>Components of PDM (weight percentage content)</i>	PMO A / PDM A („M 10”)	PMO B / PDM B („ND 3499”)
% W	40	38
% BaCrO ₄	51,8	52
% KClO ₄	4,8	4,8
% ziemia krzemkowa / <i>Siliceous earth</i>	3,4	5,2
Parametry geometryczne substancji palnej <i>Geometrical parameters of burning substance</i>		
Powierzchnia właściwa 1g cząstek W (cm ² /g) <i>Specific surface for 1g of particles of W (cm²/g)</i>	1377	709
Średnia wartość średnicy cząstek W (10 ⁻⁶ m) <i>Average diameter of particles of W (10⁻⁶m)</i>	2,3	4,9
Szybkość spalania mieszaniny (cal/s) [mm/s] <i>Rate of burning for the mixture (cal/s) [mm/s]</i>	(0,24) [6,09]	(0,046) [1,168]

Jeżeli reakcja spalania przebiega w układzie ciało stałe - ciało stałe lub ciało stałe - ciecz, bez istotnego wpływu fazy gazowej na proces spalania, to obserwuje się, że wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania PMO następuje wzrost jej szybkości spalania. Jeśli reakcja spalania przebiega dzięki gorącym gazowym produktom spalania, wtedy zbyt duże zaprasowanie PMO może opóźnić lub zakłócić przenikanie gorących gazowych produktów spalania w jej wnętrzu. Wówczas, wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania PMO, obserwuje się mniejszą szybkość spalania PMO. W tabeli 4 [7] przedstawiono wpływ ciśnienia zaprasowania PMO na bazie chromianu baru (BaCrO₄) ((90% cz. wag.) i boru (10% cz. wag.) na jej szybkość spalania.

Dla zaprasowanej PMO, uzyskiwany czas spalania związany jest z wymiarami geometrycznymi korpusu (głównie z jego średnicą), w który jest zaprasowana PMO. Zmiana wymiaru średnicy obudowy może wpływać na czas spalania PŁO lub w skrajnych przypadkach po przekroczeniu średnicy krytycznej zaprasowania PMO, następuje zgaśnięcie procesu spalania. PMO zaprasowana poniżej swojej średnicy krytycznej nie ma zdolności do samoczynnego podtrzymywania procesu spalania, co wiąże się ze stratami z powodu wypromie-

If the reaction of burning takes place in the system solid body – solid body or solid body – liquid without any essential impact of gaseous phase into the process of burning then the rate of burning increases with PDM pressing value. If the reaction of burning runs because of hot gaseous products of burning then too high pressing of PDM may delay or disturb the penetration of hot gaseous burnt products into its depth. Then a lower rate of PDM burning is observed for increased values of its pressing. Table 4 [7] shows the influence of pressing value for a PDM based on barium chromate (BaCrO₄) (90% of weight percentage) and boron (10% of weight percentage) on its rate of burning.

The burning time received for pressed PDM depends on geometrical dimensions of casing (generally on its diameter) where the mixture is pressed. The change of casing diameter may affect the PDC burning time or even in extreme cases when the critical diameter is crossed the burning process may be interrupted. The PDM that is pressed below its critical diameter lacks the ability of self-burning what is caused by the losses of heat

niowania ciepła podczas jej palenia się (głównie w niskich temperaturach).

radiated at burning (especially at low temperatures).

Tabela 4 / Table 4

Ciśnienie zaprasowania PMO (100psi) [ok. 0,7 MPa] / PDM pressing value (100psi) [ca. 0.7 MPa]	Czas spalania 1 grama mieszaniny (sekundy) Time of burning for 1g of mixture (seconds)
36	0,272 (najkrótszy/shortest)
18	0,276
9	0,280
3,6	0,287
1,3	0,297
0,5	0,309 (najdłuższy / longest)

Na podstawie danych literaturowych [8], dla PŁO składającego się z PMO na bazie manganu w temperaturze -65°F (ok. 18,3°C) średnica krytyczna ma wartość:

- poniżej 0,109 cala (ok. 2,77 mm) dla czasu spalania odcinka PŁO o długości 1 cala (25,4mm), wynoszącego 3 s;
- poniżej 0,156 cala (ok. 3,96mm) dla czasu spalania odcinka ładunku PŁO o długości 1 cala (25,4mm), wynoszącego 10 s;
- poniżej 0,203 cala (ok. 5,16mm) dla czasu spalania odcinka ładunku PŁO o długości 1 cala (25,4mm), wynoszącego 12,5 s.

Basing on literature information [8] for PDC consisting of PDM on the base of manganese and temperature of 65°F (ca. 18.3°C) a critical diameter has value:

- Below 0.109" (ca. 2.77 mm) for burning the PDC of 1.0" (25.4 mm) length within 3 s;
- Below 0.156" (ca. 3.96 mm) for burning the PDC of 1.0" (25.4 mm) length within 10 s;
- Below 0.203" (ca. 5.16 mm) for burning the PDC of 1.0" (25.4 mm) length within 12.5 s.

Tabela 5 / Table 5

Nr próby Trial No	Szybkość spalania [mm/s] kolumny PŁO o długości 1 cala (25,4 mm) i średnicy 0,20 cala (5,1mm) Burning velocity [mm/s] of PDC with 1.0" (25.4 mm) length and diameter 0.20" (5.1mm)	Szybkość spalania [mm/s] kolumny PŁO o długości 1 cala (25,4 mm) i średnicy 0,26 cala (6,6 mm) Burning velocity [mm/s] of PDC with 1.0" (25.4 mm) length and diameter 0.26" (6.6 mm)
1	4,30	5,24
2	4,33	5,28
3	4,32	5,26
4	4,33	5,20
5	4,27	5,17

W tabeli 5 [9] przedstawiono wyniki badań szybkości spalania się PMO o składzie: Si (30% cz. wag.), Fe₃O₄ (70% cz. wag.), zaprasowanego w tuleję aluminiową o dwóch różnych średnicach wewnętrznych: 0,20 cala

Table 5 [9] shows the results of testing the velocity of burning for PDM consisting of: Si (30% of weight), Fe₃O₄ (70% of weight) pressed into an aluminium cylinder with two different internal diameters: 0.20"

(5,1 mm) i 0,26 cala (6,6 mm) pod ciśnieniem 30,000 psi (ok. 210MPa).

Z powyższych danych widać, że PMO zaprasowana w tuleje o mniejszej średnicy wewnętrznej ma niższą prędkość spalania niż PMO zaprasowana w tuleje o większej średnicy wewnętrznej. Różnice w uzyskanych szybkościach spalania wynikają z większych strat cieplnych podczas spalania PMO o mniejszej średnicy tulei. Średnica zaprasowania PMO powinna być tak dobrana, aby straty ciepła występujące podczas jej palenia się nie zakłócały procesu przemieszczania się frontu spalania, a tym samym nie miały wpływu na uzyskiwany czas opóźnienia.

Dla zapewnienia stabilnej szybkości spalania PMO dąży się, aby każdy składnik użyty do jej produkcji charakteryzował się jak najmniejszą zawartością zanieczyszczeń. Wymagania techniczne dla danej PMO zakładają określoną i dopuszczalną zawartość procentową zanieczyszczenia, przy czym dopuszcza się obecność pewnej zawartości zanieczyszczeń w PMO, ponieważ może to mieć korzystny wpływ na przykład na: zmniejszenie temperatury termicznego rozkładu utleniacza, wspomaganie procesu spalania substancji palnej oraz polepszenie propagacji zapłonu w PŁO. Zbyt duża zawartość zanieczyszczeń w PMO może doprowadzić do wystąpienia niekorzystnych efektów podczas spalania oraz eksploatacji, takich jak: nadmierne wytwarzanie gazowych produktów, efekt katalityczny, niestabilność chemiczna lub zmiany termochemiczne.

Kolejnym ważnym czynnikiem, który decyduje o parametrach pracy PUO jest zjawisko związane z wytwarzaniem ciśnienia wywieranego na czoło frontu spalania PMO przez gazowe produkty spalania samej PMO oraz elementu inicjującego np., spłonki (jeśli PŁO znajduje się w układzie zamkniętym). Ciśnienie produktów spalania oddziałując na front (strefę) spalania PŁO najczęściej powoduje wzrost szybkości spalania PMO. W celu zmniejszenia tego zjawiska, stosuje się w PUO wolną przestrzeń (tzw. komorę rozprężającą) znajdującą się między PŁO a inicjatorem lub wykonuje się technologiczny otwór wentylacyjny w korpusie środka bojowego. Zastosowanie powyższych środków

(5.1 mm) and 0.26" (6.6 mm) under the pressure of 30,000 psi (ca. 210MPa).

The above data shows that the PDM pressed into the cylinder with lower internal diameter has the lower burning rate than pressed into the cylinder with larger internal diameter. The differences in received velocities of burning are caused by greater losses of heat when the PDM burns within a cylinder with lower diameter. The PDM pressing diameter has to be so matched that the losses of heat at burning do not disturb the process of displacement for the burning front and by the same do not affect the time of delay.

In order to provide a stable velocity of the PDM burning the lowest level of contaminations is required for compounds used for its fabrication. Although technical specifications for a specific PDM include a set and acceptable percentage content of contamination some level of contamination is acceptable for PDM as it may be beneficial for reduction of temperature of oxidiser's thermal decomposition, boosting the fuel burning process and the improvement of propagation of the ignition within PDC. On the other hand a higher level of contaminations in PDM may be a cause of disadvantageous effects at burning and storing such as: excessive generation of gaseous products, catalytic effect, chemical instability or thermochemical changes.

A phenomenon connected with burnt gaseous products of PDM and an initiating component e.g. the primer, which generate the pressure acting against the head of PDM burning front, is a next significant factor affecting the operation of PDD (if PDC is in a closed system). The pressure of burning products acting against the front (zone) of PDC burning usually increases the rate of PDM burning. In order to reduce this effect a free space is applied in PDDs (called as decompressing chamber) placed between the PDC and the initiator or a technological venting hole is made in the casing of explosive ordnance. The above mentioned steps are used for PDCs consisting of PDMs which generate

dotyczy PŁO, które składają się z PMO wytwarzających stosunkowo dużo gazowych produktów w trakcie spalania, takich jak np. proch czarny.

W tabeli 6 [10] przedstawiono czasy spalania PŁO, składającego się z PMO - B/Fe₂O₃ dla różnych objętości komór rozprężających znajdujących się nad PŁO. PMO została zaprasowana pod ciśnieniem 320 MPa w tuleje ołowiane o średnicy 5,5mm i długości 10mm. Wykonano po 6 prób spalania dla każdego PŁO oraz dla różnych objętości komór rozprężających. Badanie przeprowadzono w układzie zamkniętym. PŁO był inicjowany przez spłonkę zapalającą. Początek czasu spalania był mierzony w sposób akustyczny natomiast koniec za pomocą fotodiody.

relatively large amounts of gaseous products during the burning such as the black powder.

Table 6 [10] shows the burning times of PDC consisting of PDM - B/Fe₂O₃ for different volumes of decompressing chambers placed above the PDC. The PDM was pressed under the pressure of 320 MPa into lead bushings with 5.5 mm diameter and 10 mm length. For each PDC six burning trials were performed for different volumes of decompressing chambers. Test was carried out in a closed system. The PDC was initiated by the igniting primer. The start of burning process was measured by an acoustic method and the end by a photodiode.

Tabela 6 / Table 6

Długość korpusu mieszczącego zaprasowany PŁO [mm] <i>Length of casing with pressed PDC</i>	Objętość wolnej przestrzeni nad PŁO [cm ³] <i>Volume of free space above PDC</i>	Długość zaprasowanej kolumny PŁO [mm] <i>Length of pressed core of PDC</i>	Czas spalania [s] <i>Burning time</i>
10	0,24	7,20±0,07	0,165±0,010
15	0,37	7,22±0,06	0,181±0,011
20	0,48	7,19±0,05	0,200±0,012
25	0,60	7,19±0,05	0,210±0,009
30	0,73	7,21±0,03	0,210±0,005
35	0,85	7,18±0,05	0,214±0,005

Jak wspomniano powyżej, produkty spalania PMO mogą być w stanie gazowym, powodując zwiększenie ciśnienia w wolnej objętości PUO i tym samym wzrost szybkości spalania PŁO. Mogą mieć także postać fazy skondensowanej – np. żużlu, który zmienia dynamikę strat ciepła i przepływu gazów, powodując zakłócenia w procesie spalania w PŁO. Czasami świadomie wybiera się PMO do PŁO, podczas spalania których powstający żużel szybko zastyga, zamykając wypływ produktów gazowych wstecz. Powoduje to odizolowanie frontu spalania od wpływu czynników zewnętrznych, mogących zakłócić proces spalania. PUO posiadający PŁO na bazie PMO o takich właściwościach nazwany jest samouszczel-

As it was mentioned above the PDM burning products may be in a gaseous state what increases both the pressure within a free space of PDD and the velocity of PDC burning. They may also exist as a condense phase of cinder which changes the dynamics of heat losses and flow of gases and disturbs PDC burning process. In some cases a PDM with a cinder that sets rapidly after burning and blocks the flow of gaseous products backward is intentionally selected for PDC. It separates the burning front from the impact of external conditions which may disturb the burning process. A PDD with the PDC built on the base of such

niający. Tego rodzaju PUO można zastosować do prac pod wodą lub wykorzystać w układach przekazujących zapłon, gdzie pożądane jest wyrzucenie w określonym kierunku produktów spalania. W niektórych mieszaninach pirotechnicznych, w celu zminimalizowania negatywnego oddziaływania żużla na proces spalania, zwiększa się średnicę kolumny, w którą zaprasowuje się PMO. Zdjęcie 1 przedstawia przekrój osiowy PUO w trakcie procesu spalania małogazowej PMO, z widocznymi produktami spalania w postaci żużla powstającego za frontem spalania.

PDM is named as self-tightening one. Such PDD may be used for underwater work or in ignition transferring systems where the products of burning have to be ejected in a specific direction. In some pyrotechnical mixtures the negative reactions of the cinder into burning process are limited by increasing the diameter of the column the PDM is pressed in. Photo 1 shows an axial cross-section of a PDD during PDM burning action with a low gas yield with cinder visible behind the burning front.



Fot. 1. Proces spalania PMO (pirotechnicznego ładunku opóźniającego) [11]

Photo 1. PDM (pyrotechnic delay charge) burning process [11]

2.2. Czynniki zewnętrzne wpływające na parametry pracy PUO

W trakcie projektowania PUO należy wziąć pod uwagę rodzaj materiału korpusu, w którym zostanie zaprasowana PMO. Może się zdarzyć, że PMO o identycznym składzie, zaprasowana według tej samej technologii (identyczna średnica oraz grubość ścianek korpusu), ale w korpusy wykonane z różnych materiałów, o różnej przewodności cieplnej, będzie wykazywać odmienne parametry pracy PUO.

W przypadku zastosowania materiału korpusu o wysokiej przewodności cieplnej należy sprawdzić szybkość spalania PŁO przy zadanej średnicy jej zaprasowania oraz grubości ścianek korpusu. Właściwości przewodnictwa cieplnego materiału, z jakiego wykonany jest korpus oraz otoczenie, w jakim ten korpus jest umieszczony mają wpływ na czas opóźnienia wypracowany przez PUO. Materiały o wysokiej przewodności cieplnej takie jak: aluminium, miedź czy brąz przekazują energię cieplną wzdłuż korpusu, podgrzewając nieprzereagowaną część PŁO, tym samym zwiększając jej szybkość spalania.

Jakikolwiek inny element znajdujący się w kontakcie z korpusem PUO, umożliwiający

2.2. External Conditions Affecting Operational Parameters of PDD

The material of socket for pressing the PDM has to be considered at designing a PDD. It may happen that PDD can show various operational parameters for PDMs of the same composition which are pressed, according to the same technology (identical diameter and wall thickness of the socket), into sockets made from materials of different calorific conductivities.

The rates of PDC burning at specific values for diameter of pressing into the socket and thickness of its wall have to be checked when material of high calorific conductivity is used for sockets. Characteristics of thermal conductivity for material the socket is made of and the environment the socket is placed into affect the delay time provided by PDD. Materials with high thermal conductivity like aluminium, copper or bronze transfer the energy of heat along the socket and by preheating the unburned part of PDC increase its rate of burning.

odprowadzanie energii cieplnej z korpusu PUO do otoczenia może spowolnić proces spalania PŁO lub nawet przerwać go. W praktyce stosuje się do wyrobu korpusów PUO materiały o niskiej przewodności cieplnej, takie jak stal nierdzewna. Korpusy PUO ze stopów aluminium mogą być wykorzystywane dla PUO wolnopalnych z tym zastrzeżeniem, że zewnętrzna powierzchnia korpusu PUO musi być anodowana, w celu zmniejszenia przewodnictwa cieplnego.

W PUO, w którym używa się szybko spalających się PMO, tworzących PŁO, straty ciepła w małym stopniu wpływały na wahania szybkości spalania PŁO w odróżnieniu od PUO, w którym zastosowano wolnopalne PMO jako PŁO. Dlatego szybkoopalne PMO można zaprasować jako PŁO w obudowy o mniejszych średnicach.

W tabeli 7 [12] zestawiono szybkości spalania PŁO na bazie PMO typu antymon / nadmanganian potasu (Sb/KMnO_4) zaprasowanej w korpusy z różnych materiałów. Dodatkowo zmieniano wielkość cząstek Sb oraz jego zawartość. Doświadczenie wykonano z kolumną o długości 35 mm, średnicy wewnętrznej 3,5 mm i składzie Sb 30% ($< 53\mu\text{m}$), w otwartym PUO.

Any piece of structure being in contact with PDD socket can take out a portion of thermal energy from it what might delay the PDC burning process or even interrupt it. Materials with low thermal conductivity such as the stainless steel are used in practice to fabricate PDD sockets. Aluminium alloys may be used for slow burning PDD sockets provided that their external surface is treated by anodising to reduce the calorific conductivity.

Losses of heat influence the changes of PDC burning rate in low degree for PDD exploiting PDMs with high burning rates in contrary to PDMs with low burning rates. For this reason the PDMs with high burning rate may be pressed as PDCs into the sockets of lower diameters

Table 7 [12] presents PDC burning velocities received for PDMs based on (Sb/KMnO_4) antimony/ potassium permanganate pressed into sockets of different materials. Additionally the size of Si particles and its content were changed. The experiment was carried out with the column of 35 mm length and 3.5 mm internal diameter and content of Si equal to 35% ($< 53\mu\text{m}$) at open PDD.

Tabela 7 / Table 7

Material obudowy, w której znajdował się PŁO <i>Material of the socket where the PDC was embedded</i>	Średnia szybkość spalania PŁO [mm/s] <i>Average rate of burning for PDC</i>
Kolumna PŁO otoczona powietrzem <i>Column of PDC surrounded by air</i>	1,9±0,1
Aluminium	2,2±0,1
Tworzywo termoplastyczne (ang „polyether imide”) <i>Thermoplastic material (“polyether amide”)</i>	2,5±0,1
Plexiglas (Perspex) <i>Plexiglas (Perspex)</i>	1,3±0,1
SiO_2	2,4±0,1
CaCO_3	2,2±0,1

W tabeli 8 [13] zestawiono czasy spalania odcinka kolumny PŁO o długości 1 cm i składzie: $\text{Si/Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$ zaprasowanego w korpusy

Table 8 [13] shows burning times of PDC column with 1 cm length consisting of $\text{Si/Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$ pressed into the sockets

wykonane z dwóch różnych materiałów - aluminium albo stali nierdzewnej. Zawartość składnika palnego - Si była stała i wynosiła 30% cz. wagowych, natomiast zmianie podlegał stosunek ilościowy $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$. Badanie wykonano w otwartym PUO, przeprowadzono 5 prób dla danego składu PMO uzyskując średni czas spalania (w nawiasie odchylenie standardowe ww. czasów spalania). Długość kolumny, zaprasowanego PMO wynosiła 15,2 mm, natomiast grubość ścianki korpusu 0,23 mm. Z przedstawionych danych wynika, że szybkość spalania PMO jest większa w aluminiowej obudowie dla wszystkich składów wariantów PMO w porównaniu z obudową stalową. PMO o składzie (Si/ $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$) 30/45/25 w obudowie stalowej nie zapaliła się.

made from aluminium or stainless steel. Content of burning component - Si was constant and equal to 30% of weight whereas the ratio of $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$ was changeable. Test was carried out for an open PDD and included 5 trials for each PDM composition to get an average burning time (standard deviation in brackets). The length of PDM pressed column was 15.2 mm and the thickness of socket wall was 0.23 mm. Presented data indicates that every option of PDM burns with higher rate in aluminium than in steel casing. The PDM in steel socket composed of (Si/ $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$) 30/45/25 does not burn.

Tabela 8 / Table 8

Rodzaj PMO / <i>Type of PDM</i> Si/ $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$	Szybkość palenia PŁO w korpusie aluminiowym (mm/s) <i>Velocity of burning for PDC in aluminium socket</i>	Szybkość palenia PŁO w korpusie stalowym (mm/s) <i>Velocity of burning for PDC in steel socket</i>
30/70/0	18,5	14,7
30/65/5	13,5	10,9
30/60/10	11	8,9
30/55/15	9,6	6,6
30/50/20	7,1	4,4
30/45/25	5,5	Brak zapłonu/ <i>No ignition</i>

Temperatura otoczenia, w której działa PUO ma również istotny wpływ na uzyskiwane przez PŁO czasy spalania. W wojskowych PUO, gdzie wymagania temperaturowe działania amunicji wahają się często od -40°C do $+50^\circ\text{C}$, PŁO musi mieć zapewniony założony czas spalania w danym zakresie temperaturowym. W tabeli 9 [14] zostały zestawione czasy spalania PŁO zawierającego wolfram (W), nadchloran potasu (KClO_4), chromian baru (BaCrO_4) w zależności od temperatury początkowej (otoczenia). Długość kolumny wynosiła 1.753 cala (44,5 mm), ciśnienie zaprasowania 105,634 psi (0,73 MPa), materiał obudowy- stal, średnica zaprasowania pirotechnicznej mieszanki opóźniającej 0,25 cala (6,35 mm), układ PUO otwarty.

Ambient temperature of PDD operation is also significant for PDC's times of burning. Military applications of PDD require the range of temperatures for the use of ammunition between -40°C and $+50^\circ\text{C}$ and the PDC has to provide the assumed time of burning for these temperatures. Table 9 [14] shows the burning times of a PDC composed from tungsten (W), potassium perchlorate (KClO_4) and boron chromate (BaCrO_4) depending on initial (ambient) temperature. The length of the column was 1.753" (44.5 mm), pressing value was 105,634 psi (0.73 MPa), material of the socket was the steel, diameter of pressed PDM was 0.25" (6.35 mm) and open system of PDD was used.

Tabela 9 / Table 9

Numer badania <i>Number of test</i>	Czas spalania PŁO [s] <i>PDC burning time</i>	
	145°F <i>ca.(ok. 62,8°C)</i>	-50°F <i>ca.(ok. -10°C)</i>
1	15,60	19,30
2	15,20	17,40
3	14,70	17,20
4	14,80	21,80
5	15,20	17,45
6	15,20	17,20
7	15,00	17,80
8	15,00	17,30
9	15,00	17,30
Średni czas spalania <i>Average burning time</i>	15,10	18,05

Z kolei w tabeli 10 [15] zostały zestawione czasy spalania PŁO składającego się z PMO typu B/Fe₂O₃ (25/75) dla trzech różnych początkowych temperatur otoczenia. Każdy otrzymany wynik, dla trzech różnych temperatur jest średnią z dziesięciu pomiarów.

Table 10 [15] includes burning times for a PDC consisting of PDM prepared on the base of B/Fe₂O₃ (25/75) for three different initial ambient temperatures. Each received result is an average from ten measurements.

Tabela 10 / Table 10

Temperatura otoczenia [°C] <i>Ambient temperature</i>	Długość zaprasowanej kolumny PŁO [mm] <i>Length of PDC pressed column</i>	Czas spalania zaprasowanej kolumny PŁO [s] <i>Burning time of PDC pressed column</i>
+60	7,23 ±0,004	0,178 ±0,005
+20	7,19 ±0,005	0,200 ±0,009
- 40	7,20 ±0,007	0,222 ±0,012

Powyższe wyniki potwierdzają ogólną prawidłowość dotyczącą spalania PŁO w zakresie niskich i wysokich temperatur otoczenia. W wyższych temperaturach prędkość spalania jest większa niż w ujemnych temperaturach otoczenia.

Występujące podczas strzału oraz na torze lotu przeciążenia działające na PŁO, spowodowane działaniem przyspieszenia osiowego, kątownego lub siły odśrodkowej mogą mieć wpływ na szybkość spalania PŁO. Jeżeli w wyniku procesu spalania występuje przemiana fazowa ciało stałe

The results presented above confirm the general tendency concerning the burning of PDC at low and high ambient temperatures. The burning rates are higher at higher ambient temperatures.

The accelerations of axial or angular character or caused by action of centrifugal force generated at firing and on flying path may affect the PDC rate of burning. If a solid body - liquid phase conversion takes place during the process

– ciecz, powstające siły promieniowe mogą powodować, że roztopione produkty spalania PŁO są odsuwane z frontu spalania, powodując zakłócenia w procesie spalania PŁO, włącznie z jego przerwaniem.

W tabeli 11 [15] zestawiono czasy spalania kolumny PŁO o długości 10 mm zawierającej wolfram, nadchloran potasu, chromian baru, heksafluorokrzemian baru, krzemionkę koloidalną w trzech różnych temperaturach otoczenia, przy czym, dla tych samych temperatur przeprowadzono pomiary czasów spalania PŁO z jednoczesnym ich obracaniem z prędkością 17000 obrotów na minutę. PMO w ilości 125 mg zaprasowana została w cylindryczny korpus o ww. długości. Z danych w tabeli 11 widać, że siły promieniowe działające na palący się PŁO w znaczący sposób wpływają na zwiększenie się czasów palenia w porównaniu z czasami uzyskanymi przez PŁO, na który siły te nie oddziaływały. Siły promieniowe, działające na palącą się PMO powodują przesuwanie się frontu spalania w kierunku ścianek korpusu zaburzając tym samym jego stabilne przemieszczanie wzdłuż całej kolumny PMO.

of burning then the generated radial forces can make the melted products of PDC burning shift from the burning front and disturb or even interrupt the process. Table 11 [15] includes burning times for the columns of PDC with 10 mm length consisting of tungsten, potassium perchlorate, boron chromate, boron fluosilicate and colloidal silica at three different ambient temperatures and by rotating them with the rate of 17 000 rotations per minute. The PDM in amount of 125 mg was pressed into a cylindrical socket of above mentioned length. Table 11 indicates clearly that radial forces acting into the burning PDC significantly increase the time of burning compared with times received for PDCs without rotation. The radial forces acting into burning PDM shift the burning front towards the socket wall what disturbs the stable displacement of the front along the column.

Tabela 11 / *Table 11*

Temperatura otoczenia / <i>Ambient temperature</i> [°C]	Czas spalania 10 mm kolumny PŁO / <i>Burning time of PDC 10 mm column</i> [s]	
	Bez obrotów / <i>Without rotation</i>	Z obrotami o prędkości 17000 obr/min / <i>With rotation 17 000 r.p.m.</i>
+71	12,5	15,5
+20	13	16
-54	15	18,5

Kolejnym czynnikiem wpływającym na parametry pracy PUO jest rodzaj elementu inicjującego PŁO, który może być inicjowany za pomocą spłonki zapalających (nakłuciowych, elektrycznych) lub promienia lasera. Ważne jest, aby zastosować odpowiednie źródło zapłonu dla danej konstrukcji PUO. Element zapłonowy dający zbyt mocny impuls może spowodować uszkodzenie PŁO już na etapie jego zapłonu, co z kolei może spowodować niestabilne jego spalanie lub brak zapłonu. Niektóre PŁO, inicjowane przez wysokociśnieniowe spłonki zapalające, zabezpieczone są od strony spłonki specjalnym dławikiem (fot. 2), który chroni pirotechniczny ładunek opóźniający przed uszkodzeniem mechanicznym. Dławik ma osiowy otwór, który zapewnia stabilny

A next factor affecting the operational parameters of PDD is a type of PDC initiating element such as igniting primers (prickle, electric) or a laser beam. It is important to use a suitable source of ignition for a specific design of PDD. The igniting element that provides too strong pulse may damage the PDC at the moment of ignition what results in unstable burning or lack of ignition. Some PDCs which are initiated by high pressure firing primers are protected from the primer side by a special choke (Photo 2) against mechanical damage. The choke has an axial hole to provide a stable ignition of

zapłon PŁO. Na fot. 2 jest PUO stosowany w zapalnikach artyleryjskich głowicowych o czasie palenia się od 23 ms do 65 ms.



dławik /choke

W niektórych konstrukcjach PUO, przeważnie zaelaborowanych wolnopalnymi PMO (o czasach spalania wynoszących około kilku sekund), umieszcza się przed zasadniczą mieszaniną opóźniającą jedną lub dwie PMO, które mają przyjąć impuls od spłonki i stabilnie przekazać go do zasadniczej mieszaniny opóźniającej. Na fot. 3 przedstawiono przekrój osiowy pirotechnicznego ładunku opóźniającego (czas palenia się od 3s do 4s) z zasadniczą PMO (żółty kolor, cztery warstwy) oraz z dwiema skrajnymi zapalającymi mieszaninami pirotechnicznymi (kolor brązowy): jedna na początku układu (od prawej strony) i druga na końcu układu. Pierwsza mieszanina pirotechniczna ma przejąć impuls zapłonowy od spłonki zapalającej i stabilnie go przekazać do zasadniczej PMO (kolor żółty). Druga, skrajna mieszanina pirotechniczna ma wzmocnić impuls zapłonowy od PMO i przekazać go do następnego elementu łańcucha ogniowego PUO.



Fot. 3. Przekrój osiowy PŁO z zapalnika UZRGM z warstwowym zaprasowaniem PMO
Photo 3. Axial cross section of PDC from UZRGM fuse with pressed layers of PDM

PUO jest elementem amunicji, który podlega naturalnym procesom starzeniowym. Głównym czynnikiem, który przyspiesza pro-

PDC. Photo 2 shows a PDD used in artillery head fuses with the burning times between 23 ms and 65 ms.

Fot. 2. PUO stosowany w zapalnikach artyleryjskich z widocznym stożkowym dławikiem (kolor srebrny)

Photo 2. PDD used in artillery fuses with a conical choke visible (silver colour)

In some designs of PDD which are usually filled with slow burning PDMs (with burning times reaching the seconds) one or two PDMs are placed before the main delaying mixture to accept the pulse from the primer and transfer it reliably into the main delaying mixture. Photo 3 shows the axial cross section of a PDC (burning time from 3s to 4s) with the main PDM (yellow colour, four layers) and two external pyrotechnical igniting mixtures (brown colour): the one on the beginning of the unit (from the right side) and the second at the end of the unit. The first pyrotechnical mixture has to accept the igniting pulse from the igniting primer and transfer it efficiently to the main PDM (yellow colour). The second border pyrotechnical mixture has to boost the igniting pulse generated by the PDM and transfer it to the next component of PDD fire train.

PDD is a part of ammunition that is subjected to natural ageing processes. The main factor that accelerates the degradation

ces degradacji amunicji jest oddziaływanie wilgoci na jego elementy, głównie na PŁO. W przypadku wadliwie wykonanego (nieuszczelnego) PUO lub w wyniku jego uszkodzenia mechanicznego w trakcie eksploatacji, wilgoć oddziałuje na elementy PUO, głównie na zaprasowany PŁO, powodując w nim niekorzystne zmiany fizykochemiczne, przyspieszające jego rozkład, co negatywnie wpływa na osiągnięte parametry pracy.

W tabeli 12 [16] przedstawiono wpływ wilgoci na PŁO, składający się z PMO: B/Fe₂O₃ (25/75). Do badania przygotowano dwie mieszaniny: jedną zawierającą bor zabezpieczony przez utlenianie się - bor przemywany (ang „washed boron”), drugą zawierającą bor niezabezpieczony - nie przemywany (ang „unwashed boron”). Obie próbki PŁO (luzem) wystawiono na działanie czynników atmosferycznych przez 36 tygodni, a następnie zaprasowano w korpus PUO i zmierzono czas ich spalania. Inne dwie oddzielne próbki PŁO (bor zabezpieczony i niezabezpieczony przed wilgocią) zostały zaprasowane i uszczelnione w korpusie PUO, po czym zbadano czas ich spalania na początku i końcu testu. Różnica w czasach spalania na początku testu może wynikać z czystości boru i jego wilgotności. Nie zabezpieczony bor miał 88% masy wolnego boru i 0,54% wilgoci, natomiast zabezpieczony bor ma 54% wolnego boru i 1,07% wilgoci. PMO zawierające bor są bardzo podatne na absorpcję wilgoci z otoczenia. Wynika to z podatności boru na utlenianie się, co powoduje powstawanie na jego powierzchni tlenków boru, które są bardzo higroskopijne. Dlatego też tlenki boru są główną przyczyną pogorszenia właściwości fizykochemicznych boru. Szybkość utleniania boru zależy od jego „wieku”, sposobu magazynowania oraz narażenia go na działanie czynników atmosferycznych, głównie wilgoci. Autorzy postanowili przemyć bor przed jego użyciem do PMO, wyłukując tlenki boru, które są rozpuszczalne w wodzie. PMO z zabezpieczonym borem praktycznie nie wykazuje żadnych znaczących zmian w uzyskiwanym czasie palenia w porównaniu z PMO z borem niezabezpieczonym, po oddziaływaniu na nie czynników atmosferycznych.

of ammunition is the impact of moisture on components of PDD and mainly on PDC. In the case of a faulty made (unsealed) PDD or in result of its mechanical damage in life time the moisture acts against PDD components and mainly on the pressed PDC by making adverse physical-chemical changes which accelerate its decomposition and by deteriorating its operational parameters.

Table 12 [16] shows the impact of moisture onto a PDC including the PDM that was built from B/Fe₂O₃ (25/75). Two mixtures were prepared for testing: the one that includes the boron protected against oxidation – washed boron, and the second with unprotected boron – unwashed boron. Two samples of PDC (in loose volume) have been subjected to action of atmospheric conditions for 36 weeks and then pressed into PDD sockets to test their burning time. Two other separate samples of PDC (boron protected and unprotected against moisture) were pressed into PDD sockets and sealed to test their burning time at the beginning and at the end of experiment. The difference in burning times at the beginning of the experiment may be caused by the levels of purity and moisture in boron. Unprotected boron has 88% of pure boron and 0.54% of moisture whereas the protected boron has 54% of pure boron and 1.07% of moisture. The PDMs with the boron are very susceptible on absorption of the moisture from the environment. It is a result of boron's susceptibility to oxidation what leads to creation of oxides of boron on its surface as they are extremely hygroscopic. For this reason the oxides of boron are mainly responsible for deterioration of boron physical-chemical properties. The rate of boron oxidation depends of its “age”, the way of storing and exposition against atmospheric conditions including mainly the moisture. Authors have decided to wash the boron oxides which solve in water before using it into PDM. The PDM with protected boron does not indicate any significant changes of the burning time after exposure against atmospheric conditions comparing to PDM with unprotected boron.

Tabela 12

Rodzaj PŁO	Czas spalania 100 mm odcinka PŁO [s]		
	Sprawdzenie		Po 36 tygodniach oddziaływania czynników atmosferycznych
	Początek testu	Koniec testu	
Nie przemywany bor (nie zabezpieczony)	4,1	4,2	5,0
Przemywany bor (zabezpieczony)	2,7	2,9	3,1

Table 12

Type of PDC	Burning time for 100 mm length of PDC [s]		
	Checking		After 36 weeks of seasoning on atmospheric conditions
	Start of test	End of test	
Unwashed boron (unprotected)	4.1	4.2	5.0
Washed boron (protected)	2.7	2.9	3.1

Kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na szybkość spalania PŁO jest oddziaływanie ciśnienia zewnętrznego. Ma to znaczenie np. w amunicji przeciwlotniczej, której pociski wystrzeliwane pod dużym kątem osiągają znaczną wysokość, rzędu kilku kilometrów. Pociski amunicji przeciwlotniczej uzbrojone są w zapalniki z samolikwidatorami pirotechnicznymi o określonym czasie spalania, który powinien jak najmniej zmieniać się w zależności od ciśnienia zewnętrznego.

Dla PMO, które pobierają tlen z otoczenia niezbędny do prawidłowego przebiegu reakcji spalania, należy spodziewać się obniżenia wydajności procesu spalania. Z kolei PMO bogate w składnik palny (paliwo) będą spalać się z trudnością. Najmniej podatne na zmiany ciśnienia otoczenia są mieszaniny posiadające stechiometryczny stosunek paliwa do utleniacza [17]. W tabeli 13 [18] przedstawiono szybkość spalania PŁO, składającego się z PMO KMnO_4/Sb (64%/36%) w zależności od ciśnienia zewnętrznego (w atmosferze azotu). Badaną PMO zaprasowano pod ciśnieniem 20000 psi (ok. 140 MPa) w mosiężną tuleję o średnicy wewnętrznej wynoszącej 10,5mm.

The next factor that may affect the burning rate of PDC is the impact of external pressure. It is important for anti-aircraft ammunition where projectiles are fired under high angles to reach large ceilings of a few kilometres. The rounds of anti-aircraft ammunition are armed with fuses which include a pyrotechnical self-destructer set at a specific burning time that has to be resistant against changes of external pressure.

The effectiveness of burning process may be reduced for PDMs which take the oxygen from the atmosphere for burning. The PDMs with the surplus of burning component (fuel) will burn more difficult. The mixtures with a stoichiometric ratio between fuel and oxidiser are less sensitive to changes of pressure [17]. Table 13 [18] shows the burning velocities of PDC composed from PDM consisting of KMnO_4/Sb (64%/36%) depending on external pressure (in atmosphere of nitrogen). Tested PDM was pressed under the pressure of 20000 psi (ca. 140 MPa) into a brass bushing with internal diameter of 10.5mm.

Tabela 13 / Table 13

Ciśnienie zewnętrzne [MPa] <i>External pressure</i>	Szybkość spalania [cm/s] <i>Burning velocity</i>
0,10	0,202
0,21	0,242
0,34	0,267
0,55	0,296
0,69	0,310
1,03	0,343
1,38	0,372
2,07	0,430
3,45	0,501
5,52	0,529
7,58	0,537
9,65	0,543

3. Wnioski

Artykuł systematyzuje wiedzę na temat czynników wpływających na parametry pracy PMO, które tworzą PŁO.

Większość informacji pochodzi z literatury obcojęzycznej, głównie z raportów z badań nad PŁO lub patentów dotyczących PUO. Głównym parametrem, który charakteryzuje PUO jest czas jego działania. Czynniki, które mają wpływ na czas działania PŁO zostały w artykule podzielone na zewnętrzne i wewnętrzne, z podaniem przykładowych wyników badań. Czynniki wewnętrzne są związane głównie z właściwościami fizykochemicznymi poszczególnych pierwiastków lub związków chemicznych tworzących daną PMO.

Również istotne znaczenie mają proporcje składników PMO, zwłaszcza stosunek składnika palnego do utleniacza, obecność różnych dodatków. Czynniki zewnętrzne dotyczą środowiska pracy PUO, czyli temperatury, wilgotności otoczenia, czynników utleniających, ciśnienia zewnętrznego oraz konstrukcji PUO.

Artykuł może być pomocny dla osób zajmujących się projektowaniem, badaniem i eksploatacją PUO, ponieważ prezentuje problemy z jakimi można się spotkać podczas prac tego typu.

3. Conclusions

The paper presents a systematic review of knowledge on conditions affecting operational parameters of PDM that is a part of PDC.

Most data origins from foreign publications like test reports on PDC and patents on PDDs. The time of operation is a main parameter characterising PDD. Factors affecting PDC operation time were illustrated by exemplary test results and divided in the paper on external and internal ones. Internal factors are mainly linked with physical-chemical properties of particular chemical elements or compounds which create a PDM.

The proportions between PDM components and the presence of special additives and the ratio between burning component and oxidiser are important. The external conditions refer to operational environment of PDD i.e. temperature, humidity, oxidising factors, external pressure and its design.

The paper may be helpful for persons dealing with designing, testing and using the PDDs as it describes issues which may be encountered at such work.

Literatura / Literature

- [1] Chemistry of Pyrotechnics - Basics Principles and Theory, John A. Conkling, USA, 1985, Library of Congress Cataloging in Publication Datastr, str. 51.
- [2] Decysekundowe masy opóźniające, A. Wojewódka, Monografia, Politechnika Śląska, Gliwice 2014 str. 49.
- [3] Report MRL-R-994 - The Development of a Boron and Iron Oxide Delay System, Department of Defence, Melbourne, Victoria.1986, P.P. Elischer, G.Cleal, M. Wilson, str 3.
- [4] Pyrotechnic Delays and Thermal Sources, M.A. Wilson and R.J. Hancox. Pains Wessex, Journal of Pyrotechnic, No. 13, Summer 2001, P/L. Melbourne, Australia, Chapter 8, page 7.
- [5] Pyrotechnic Delays and Thermal Sources, M.A. Wilson and R.J. Hancox. Pains Wessex, Journal of Pyrotechnic, No. 13, Summer 2001, P/L. Melbourne, Australia, Chapter 8, page 15.
- [6] Chemistry of Pyrotechnics - Basics Principles and Theory, John A. Conkling, USA, 1985, Library of Congress Cataloging in Publication Datastr, str. 90.
- [7] Chemistry of Pyrotechnics - Basics Principles and Theory, John A. Conkling, USA,1985, Library of Congress Cataloging in Publication Datastr, str.92.
- [8] Engineering Design Handbook, Military Pyrotechnics Series, Part one, Theory and application, Headquarters United States Army Material Command, Washington, 1967, str. 111.
- [9] Patent Nr US 7,883,593B1, Non Toxic Pyrotechnic Delay Composition, James E. Rose, Magdy Michay, Jan Puszyński.
- [10] Report MRL-R-994 - The Development of a Boron and Iron Oxide Delay System, Department of Defence, Melbourne, Victoria.1986, P.P. Elischer, G.Cleal, M. Wilson, str. 4.
- [11] Zdjęcie ze zbiorów autorów.
- [12] Modification of the Burning Rate of Antimony/potassium Permanganate Pyrotechnic Delay Composition - Michael W. Beck, Michael E. Brown, Combustion and Flame 6: 67-75 (1986).
- [13] Environmentally Benign Pyrotechnic Delays, 38th International Pyrotechnics Seminar, Denver, Colorado, 10-15 June 2012, p. 494-500.
- [14] Single Column Pyrotechnic Delay, Technical Report ARFSD-TR-95006, Wayne W. Smith, March 1996, str. 26.
- [15] Report MRL-R-994 - The Development of a Boron and Iron Oxide Delay System, Department of Defence, Melbourne, Victoria.1986, P.P. Elischer, G.Cleal, M. Wilson, str.5.
- [16] Pyrotechnic Delay Composition, United States Patent, nr 4,963,204, Gunther Faber, Hans Florin, Peter-Josef Grommes, Peter Roh.
- [17] Chemistry of Pyrotechnics - Basics Principles and Theory, John A. Conkling, USA, 1985, Library of Congress Cataloging in Publication Datastr, str. 115.
- [18] The Effect of Ambient Pressure on the Velocity of Propagation of Half-Second and Short Delay Composition, J.S. Glasby, Report No. D.4152, Imperial Chemical Industries, Nobel Division, Ardeer, Scotland. Brak danych o roku wydania , informacja pochodzi z książki Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory, John A. Conkling,Chris Mocella, Library of Congress Cataloging in Publication Datastr, str. 116

