



MIESZANINY PIROTECHNICZNE STOSOWANE W PIROTECHNICZNYCH UKŁADACH OPÓŹNIAJĄCYCH ŚRODKÓW BOJOWYCH

Radosław WARCHOŁ, Marcin NITA
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

Streszczenie: W artykule zebrano informacje dotyczące pirotechnicznych układów opóźniających (PUO) amunicji wojskowej wraz z charakterystykami podstawowych rodzajów mieszanin pirotechnicznych - gazowych i małogazowych stosowanych w tych układach. Następnie przedstawiono uproszczony mechanizm procesu spalania się zaprasowanej w obudowie mieszaniny pirotechnicznej. Działanie omawianych rodzajów mieszanin pirotechnicznych oraz ich charakterystyki, w tym kształt i wielkość strugi produktów spalania wylatujących z przeciwległego końca względem zapłonu, zobrazowano za pomocą zdjęć. W artykule zebrano również informacje na temat oznaczeń i składów opóźniających mieszanin pirotechnicznych stosowanych w środkach bojowych krajowych i zagranicznych.

Słowa kluczowe: mieszanina pirotechniczna, pirotechniczny układ opóźniający, szybkość spalania, mieszanina pirotechniczna małogazowa, proch czarny

PYROTECHNIC COMPOSITIONS APPLIED IN PYROTECHNIC DELAY SYSTEMS OF MUNITIONS

Radosław WARCHOŁ, Marcin NITA
Military Institute of Armament Technology

Abstract: In the presented paper it was collected information on pyrotechnic delay systems used in military ammunition, providing characteristics on basic types of pyrotechnic compositions, i.e. high and low gas ones applied in such delay systems. Then, it was shown simplified mechanism of combustion process of pressed pyrotechnic composition inserted into the body of pyrotechnic item like pyrotechnic delay device. Operation of discussed types of pyrotechnic compositions and their characteristics including size and shape of plume of combustion products out-flowing from the end of delay device situated opposite to its ignition end, was visualized by photography technique. In the paper there were also gathered data on marking and compositions of delay pyrotechnic mixtures used in the ammunition - domestic and abroad ones.

Keywords: pyrotechnic composition, pyrotechnic delay system, burning rate, low-gas pyrotechnic composition, black powder

1. Wstęp

Przez pojęcie mieszaniny pirotechnicznej rozumie się materiał lub mieszaninę fizyczną materiałów, które mogą ulegać wzajemnej, bezdetonacyjnej, samopodtrzymującej się reakcji chemicznej z wytworzeniem efektów cieplnych, dźwiękowych, świetlnych lub innych. Reakcja ta może być zainicjowana na wiele sposobów, np. poprzez działanie bodźców mechanicznych, albo na drodze ogrzania mieszaniny pirotechnicznej do odpowiednio wysokiej temperatury na przykład wiązką promieniowania laserowego.

Główny, egzoenergetyczny proces chemiczny propagujący się w mieszaninie (proces spalania), zachodzi pomiędzy jej najważniejszymi składnikami - substancją palną (paliwem) a utleniaczem. Rolę utleniaczy pełnią zazwyczaj sole kwasów tlenowych, tlenki, nadtlenki, związki chlorowców. Paliwo najczęściej stanowią proszki metali, węgiel lub inne związki organiczne o wysokiej zawartości węgla. Nierzadko w skład mieszaniny pirotechnicznej wchodzi również substancje pomocnicze, których zadaniem może być zapewnienie stabilności procesu spalania, zwiększenie trwałości mechanicznej ładunków pirotechnicznych, ich uniewrażliwienie na bodźce mechaniczne, czy np. zabarwienie powstającego dymu.

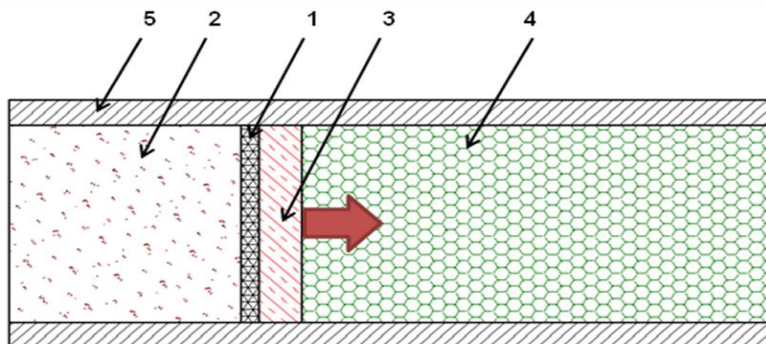
W zależności od rodzaju substancji chemicznych wchodzących w skład mieszaniny pirotechnicznej proces spalania może zachodzić z różną szybkością, oraz wiązać się z występowaniem efektów cieplnych, dźwiękowych lub błyskowych. Łatwość wytwarzania mieszanin pirotechnicznych działających w ściśle określony sposób tłumaczy ich częste zastosowanie w konstrukcjach środków bojowych, motoryzacji, budownictwie, metalurgii i wielu innych gałęziach gospodarki. Zdolność niektórych mieszanin pirotechnicznych do spalania się z szybkością rzędu kilku milimetrów na sekundę, zadecydowała, że pełnią one rolę między innymi mieszanin opóźniających wybuch pocisku, uzbrojenie zapalnika lub rozcalenie pocisku na torze jego lotu.

Celem działania pirotechnicznych układów opóźniających (PUO) jest przekazanie impulsu ogniowego z jednego elementu łańcucha ogniowego, np. spłonki zapalającej, na kolejny element z zadaną i ściśle określoną zwłoką czasową. Często uzyskiwany dosyć szeroki rozrzut czasów spalania, a zatem czas opóźnienia w przekazywaniu impulsu ogniowego przez identyczne ładunki pirotechniczne może być spowodowany niejednorodnością masy pirotechnicznej, nieciągłością gęstości ładunku, zróżnicowaniem rozdrobnienia składników mieszaniny pirotechnicznej oraz wynikać z wielu innych czynników. Mimo to, prostota konstrukcji PUO przy ich niskiej cenie decyduje, że znalazły szerokie zastosowanie jako elementy środków bojowych.

Pierwsze, praktycznie wykorzystywane mieszaniny pirotechniczne opóźniające - gazowe (prochy czarne) składały się z: azotanu (V) potasu (saletry potasowej), węgla drzewnego i siarki, zmieszanych w różnych proporcjach. Uzyskiwane parametry pracy tych mieszanin pirotechnicznych w istotny sposób zależą od warunków zewnętrznych, takich jak ciśnienie, temperatura i wilgotność otoczenia. Na przykład, podczas produkcji prochu czarnego wymagana jest znajomość wpływu rodzaju użytego drewna do produkcji węgla drzewnego, jak również wpływu wielkości rozdrobnienia składników, sposobu i czasu ich wzajemnego mieszania na właściwości otrzymanej mieszaniny pirotechnicznej. Z powyższych względów, aktualnie, częściej wykorzystywane są mieszaniny małogazowe bazujące na proszkach metali stanowiących paliwo, a także tlenkach metali oraz solach kwasów tlenowych spełniających rolę utleniaczy. Niekwestionowaną zaletą takich mieszanin jest łatwiejsze określenie i przewidywanie właściwości użytych składników, a przez to, utrzymanie powtarzalności parametrów pracy PUO wykonywanych na ich bazie. Kompozycje pirotechniczne oparte na proszkach metali charakteryzują się niewielką zmiennością parametrów eksploatacyjnych przy zmianach temperatury początkowej (otoczenia), czasu składowania, a w niektórych przypadkach przy zmianie wilgotności otoczenia i zawartości wody w mieszaninie.

2. Proces spalania zaprasowanej mieszanki pirotechnicznej

Mieszanki pirotechniczne, zaprasowane w obudowę pod danym ciśnieniem do określonej gęstości, charakteryzują się stabilnym, kontrolowanym procesem spalania [1] (rys.1) w odróżnieniu od niestabilnego spalania mieszanki pirotechnicznej w postaci luźnej (sypkiej). Redukcja pustych miejsc w masie mieszanki pirotechnicznej zależy od fizycznych właściwości jej składników oraz ciśnienia zaprasowania.



- 1 - front palenia, 2 - produkty spalania, 3 - strefa podgrzania mieszanki pirotechnicznej,
4 - nie podgrzana część mieszanki pirotechnicznej, 5 - obudowa

Rys. 1. Schemat procesu spalania mieszanki pirotechnicznej zaprasowanej w cylindryczną obudowę

Podczas stabilnego procesu spalania, produkty spalania (2) nie mają możliwości głębokiej penetracji masy pirotechnicznej (3,4). Front palenia (1) jest stosunkowo wąski. W strefie frontu palenia (1) oraz produktów spalania (2) mieszanki pirotechnicznej zachodzi samopodtrzymujący się, egzotermiczny proces jej rozkładu i utleniania w wysokiej temperaturze. W celu uzyskania stabilnego przemieszczania się frontu palenia (1), pomiędzy mieszanką pirotechniczną a obudową (5) nie mogą występować puste przestrzenie, zaś mieszanka pirotechniczna powinna być jednorodna pod względem wymieszania wszystkich składników i gęstości zaprasowania. Ponadto, na stabilne przemieszczanie się frontu palenia (1) wpływ ma utrzymanie stabilnego procesu przekazywania ciepła między strefą produktów spalania (2), frontem palenia (1) a podgrzewaną warstwą (3) mieszanki pirotechnicznej. Warstwa (3) jest podgrzewana przez front palenia (1) i produkty spalania (2): gazowe i skondensowane (ciekłe i stałe), bezpośrednio z nim sąsiadujące. W warstwie (3) mieszanki pirotechnicznej zachodzą procesy topnienia, przemiany fazowe, a także rozkład termiczny.

3. Rodzaje mieszanin pirotechnicznych stosowanych w PUO

3.1. „Gazowe” mieszanki pirotechniczne

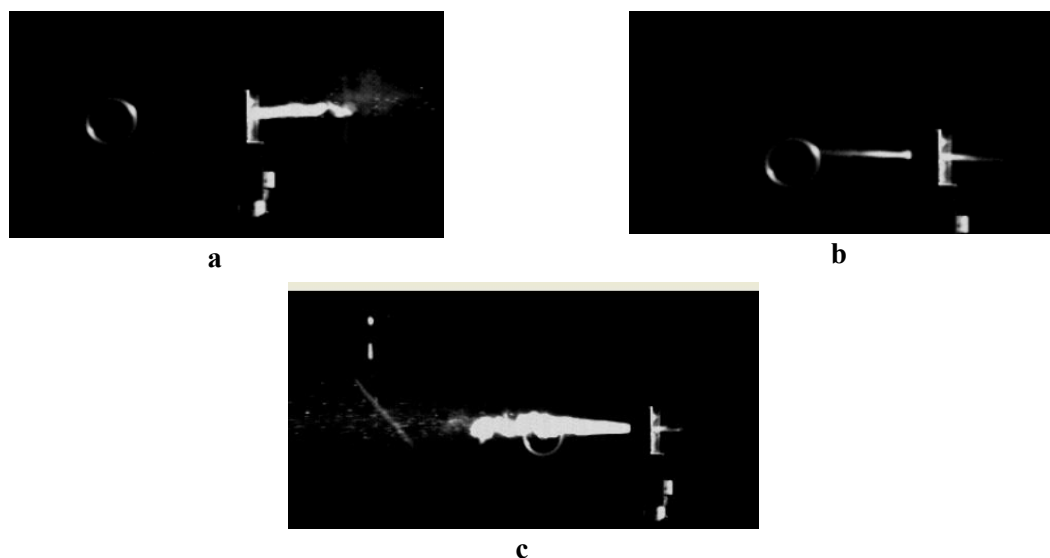
PUO zawierające mieszanki, które podczas spalania generują stosunkowo dużo produktów gazowych często zwane są systemami zimnymi (*cool systems*). Nazwa ta wynika z faktu, że ciepło powstałe podczas spalania jest odprowadzane dosyć intensywnie od frontu palenia przez gazowe produkty reakcji (spalania). W zależności od składu mieszanki pirotechnicznej, tzw. „gazowe” mieszanki pirotechniczne wydzielają głównie tlenki węgla i azotu oraz stałe produkty spalania w zakresie od około 200 do około 400 ml produktów gazowych w przeliczeniu na każdy gram spalanej mieszanki.

Najbardziej popularną gazową kompozycją pirotechniczną stosowaną w PUO jest proch czarny, stanowiący mieszaninę trzech składników: azotanu (V) potasu, węgla drzewnego oraz

siarki, w proporcjach wagowych 75:15:10. Pomimo, że kompozycja ta nie posiada idealnych charakterystyk wymaganych dla mieszanin opóźniających, to i tak zyskała szerokie zastosowanie w PUO ze względu na łatwość zapłonu, prasowania, dostępność składników oraz uzyskiwanie zadowalających, powtarzalnych czasów spalania w ustalonych/założonych warunkach zewnętrznych (otoczenia). Proces technologiczny wyrobu prochu czarnego wykorzystywanego do wyrobu pirotechnicznych mieszanin opóźniających, tzw. „prochu zapalnikowego” podlega zastrzonym wymaganiom co do czystości składników oraz sposobu przeprowadzenia poszczególnych czynności technologicznych (przede wszystkim rozdrabniania i mieszania). Utrzymanie wymaganych charakterystyk i parametrów roboczych PUO, na bazie prochu czarnego, zależy w dużym stopniu od warunków przechowywania.

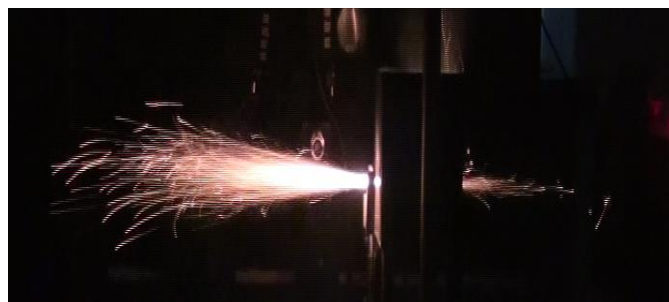
Prędkość spalania zapalnikowego prochu czarnego zaprasowanego w ścieżkach prochowych, podczas spalania w powietrzu, wynosi $8 \div 10$ mm/s. Na podstawie doświadczeń stwierdzono, że zmniejszenie prędkości spalania prochu można osiągnąć kilkoma sposobami, tj. przez zmianę jego składu, poprzez zastosowanie jako składnika częściowo wypalonego węgla drzewnego, zamianę utleniacza - azotanu (V) potasu na inne substancje utleniające oraz wprowadzenie składników zmniejszających prędkość spalania. Jako składniki spowalniające proces (szybkość) spalania stosuje się żywice naturalne (kalafonię, szelak), kauczuk, ebonit, żywice syntetyczne (PCV, bakelit) itp. Obecność tych substancji w mieszaninie w ilości 1 - 2%, powoduje spowolnienie procesu spalania od 1,5 do 2 razy.

Wadą pirotechnicznych ładunków opóźniających na bazie prochu czarnego jest ich znaczna higroskopijność, wydzielanie dużej ilości gazowych produktów spalania oraz silna zależność szybkości spalania od ciśnienia zewnętrznego (szybkość palenia rośnie dosyć gwałtownie wraz ze wzrostem ciśnienia zewnętrznego (tabela 1) [2,3]. Dlatego też, podstawowym problemem wynikającym z zastosowania prochu czarnego w PUO jest zapewnienie skutecznego odprowadzania gazowych produktów spalania poza PUO. Wiąże się to z koniecznością uwzględnienia w konstrukcji PUO odpowiedniej wielkości komory rozprężającej lub wykonania w PUO „otworów wentylacyjnych”. Zwiększa to stopień złożoności konstrukcji PUO, a zatem i amunicji ze względu na konieczność zaprojektowania dodatkowych jej elementów oraz ich uszczelnienia tak, by w trakcie przechowywania amunicji czynniki środowiskowe, zwłaszcza temperatura i wilgoć nie wpływały negatywnie na PUO.



Fot.1. Kolejne etapy spalania PUO na bazie prochu czarnego w układzie obustronnie otwartym:
 a - faza zapłonu opóźniacza pirotechnicznego z prawego końca; b - początkowa faza wyjścia frontu palenia na przeciwny (lewy) koniec opóźniacza pirotechnicznego; c - strumień produktów spalania wyrzucanych z otworu wylotowego opóźniacza z przeciwległego (lewego) końca względem zapłonu wiązką promieniowania laserowego

Na fotografiach 1 (a-c) i 2 zostały przedstawione etapy spalania PUO, sfilmowane kamerą Phantom z szybkością 10 000 klatek na sekundę. Ładunek PUO inicjowany był laserem.



Fot. 2. Strumień produktów spalania wyrzucanych z otworu wylotowego PUO na bazie prochu czarnego z przeciwnego (lewego) końca względem zapłonu wiązką promieniowania laserowego, sfilmowany kamerą standardową z szybkością 60 klatek na sekundę

Z fot. 1 i 2 wynika, że wylotowy strumień produktów spalania (płomień wylotowy wydostający się z lewego końca PUO) inicjujący kolejny element łańcucha ogniowego amunicji jest zwarty i formuje się stopniowo, bez nagłego „wyfuknięcia”. Jednocześnie w trakcie procesu spalania formowany jest strumień rozżarzonych cząstek stałych.

Tabela 1. Przewidywana szybkość spalania prochu czarnego w zależności od ciśnienia zewnętrznego, podana w pozycji literaturowej [2], obliczona na podstawie empirycznego wzoru podanego w pozycji literaturowej [3]

Ciśnienie zewnętrzne [atm]	Szybkość spalania [cm/s]
1	1,21
2	1,43
5	1,78
10	2,10
15	2,32
20	2,48
30	2,71

3.2. „Małogazowe” mieszanki pirotechniczne

Rozwój nowoczesnego uzbrojenia wymusza potrzebę opracowania nowych kompozycji mieszanin pirotechnicznych, umożliwiających szeroki wybór zakresów czasów spalania się PUO oraz zachowanie powtarzalności parametrów ich pracy i niezawodności działania,

w szerokim zakresie warunków środowiskowych (ciśnienie, temperatura, wilgotność). Wymagania te spełniają małogazowe mieszanki pirotechniczne (MMP). W skład MMP wchodzi: paliwo, utleniacz oraz różnego rodzaju dodatki. MMP mogą występować jako dwu-, trój- albo czteroskładnikowe, z użyciem jednego lub kilku rodzaju paliw czy utleniaczy. Zakres rodzajów paliw, stosowanych w MMP jest szeroki, natomiast wybór utleniaczy jest ograniczony do tych, które w czasie rozkładu generują małą ilość produktów gazowych. Przykłady składników używanych do produkcji MMP zostały przedstawione w tabeli 2.

W skład MMP wchodzi również substancje dodatkowe, które mają zapewnić m.in.: zwiększenie lub zmniejszenie stopnia wzajemnego przylegania składników mieszanki, zabezpieczyć MMP przed wpływem czynników środowiskowych oraz polepszyć właściwości mechaniczne MMP.

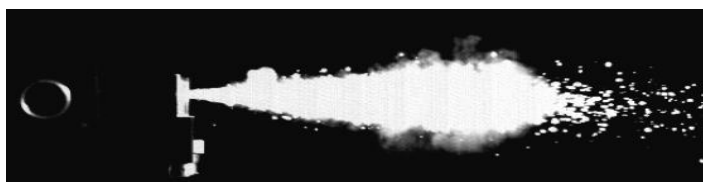
Tabela 2. Składniki wykorzystywane do kompozycji mieszanin pirotechnicznych na podstawie pozycji literaturowej [4,5].

UTLENIACZE	PALIWO (niemetale)	PALIWO (metale)
tlenki nadtlenki chromiany(VI) dichromiany(VI) chlorany(V) chlorany(VII) nadmanganiany azotany(V) siarczki	bor fosfor selen krzem siarka węgiel	aluminium chrom żelazo magnez mangan molibden tytan wolfram cyrkon nikiel antymon

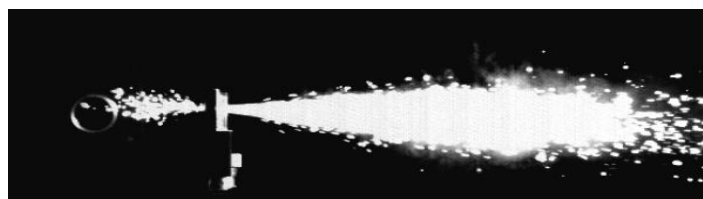
Zawartość procentowa dodatków w danej MMP także wpływa na szybkość jej spalania.

Najczęściej, jako dodatki stosowane są:

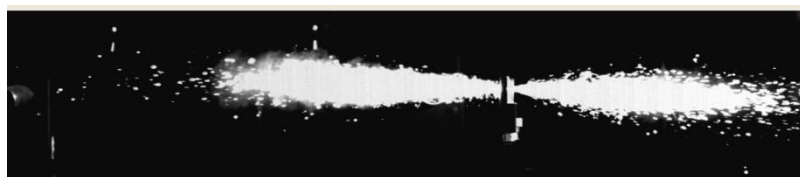
- 1) lepiszcza: spoiwa sproszkowanych składników mieszaniny, do których należą substancje organiczne (syntetyczne polimery, biopolimery, żywice naturalne) oraz nieorganiczne (gips, bentonit);
- 2) preparaty pomocnicze (*formulation aids*) zawierające: substancje przeciwzbrylające (SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 , MgCO_3) oraz smary (grafit, talk, воск, teflon, silikon);
- 3) katalizatory szybkości spalania: Fe_2O_3 , CuO , CrO_2 , MnO_2 ;
- 4) inhibitory szybkości spalania: ulegające przemianie fizyko-chemicznej, która usuwa ciepło z układu, np. przez topnienie lub rozkład (ziemia krzemkowa, zmatowiona krzemionka koloidalna).



a



b



c

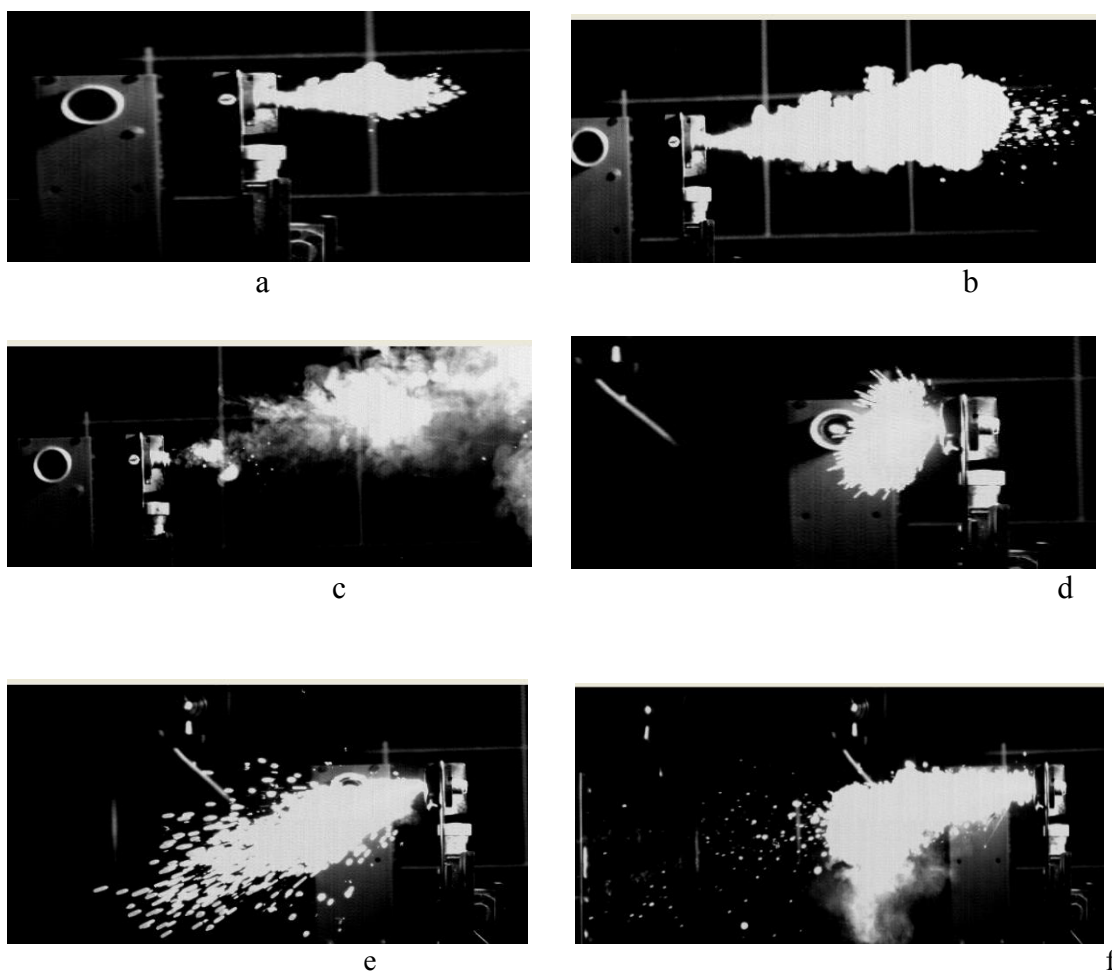
Fot. 3. Etapy palenia się PUO na bazie MMP (układ obustronnie otwarty) o czasie palenia się kilku ms sfilmowane kamerą szybką Plantom (10000 klatek na sekundę):

a - zapłon MMP; b - przejście frontu spalania MMP na drugą stronę układu PUO; c - intensyfikacja strumienia produktów spalania, wylatujących z przeciwległego końca względem zapłonu PUO

Dodatek substancji chemicznie obojętnej może wpłynąć na zmniejszenie powierzchni kontaktu paliwo/utleniacz. Przyczynia się to do zmiany właściwości termicznych układu. Na przykład, dodatki o dużej pojemności cieplnej mogą obniżyć temperaturę spalania, zaś dodatki z niską temperaturą topnienia spełniają rolę topników (*fluxes*).

Proces rozkładu MMP charakteryzuje się egzotermicznym, samopodtrzymującym się przebiegiem reakcji typu redoks. Na przykład, podczas procesu spalania MMP powstają produkty stałe - sadza, żużel (fot. 3) oraz wydzielają się stosunkowo niewielka ilość gazowych produktów (około 5-10 ml w przeliczeniu na 1 g MMP), powstających w wyniku zanieczyszczeń składników mieszanki, odparowania części produktów spalania, rozkładu tlenku metalu lub termicznej rozszerzalności uwięzionego powietrza w PUO. Pomimo, że MMP mogą spalać się w układach hermetycznych, to i tak zapewnia się niewielką komorę rozprężającą, w celu zmniejszenia do minimum wpływu wzrostu ciśnienia zewnętrznego na prędkość spalania MMP.

Na fot. 3 przedstawiono etapy palenia się (układ otwarty) PUO na bazie MMP (o czasie palenia kilku ms) stosowanego w zapalniku do granatu mózdzierzowego, natomiast fot. 4 przedstawia etapy palenia się (układ otwarty) PUO na bazie MMP (o czasie palenia kilku s) stosowanego w czołgowym pocisku dymnym.

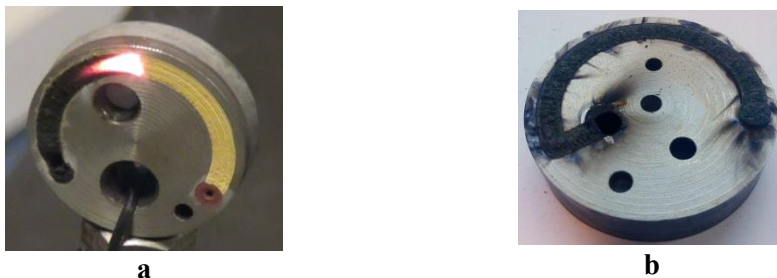


Fot.4. Etapy palenia się PUO na bazie MMP (układ obustronnie otwarty) o czasie palenia się kilku s sfilmowane kamerą szybką Plantom (10000 klatek na sekundę): a, b – fazy zapłonu MMP; c - przemieszczanie się frontu spalania wewnątrz PUO; d,e,f - etapy powstawania strumienia produktów spalania, wylatujących z przeciwnego końca względem zapłonu PUO

Fot. 4 (d-f) przedstawiają gwałtowne tworzenie się strumienia wylotowego (wyfuknięcie) przewidywanego do zainicjowania kolejnego elementu łańcucha ogniowego w amunicji, który w trakcie palenia szybko oddziela się od obłoku gazowych produktów spalania jako

gorące cząstki stałe. Inaczej jest w przypadku PUO na bazie MMP, o czasie spalania wynoszącym około 50 sekund, pokazanego na fot. 5, który jest stosowany w morskich bombach lotniczych.

Podczas spalania pierścieniowej ścieżki pirotechnicznej widoczny jest jedynie niewielki płomień oraz powstałe po spaleniu MMP produkty (sadza, żużel).



Fot 5. PUO stosowany w zapalnikach (czas spalania ok. 50 s) w morskich bombach lotniczych: a - widok palącej się MMP zaprasowanej w pierścieniowe wycięcie w korpusie; b - produkty (sadza, żużel) powstałe ze spalania się MMP

Różnorodność kompozycji MMP, które można uzyskać ze składników przedstawionych w tabeli 2 jest szeroka i każda nowopowstała MMP będzie posiadała swoje własne charakterystyki pracy.

W przypadku nowoprojektowanego PUO, wybór MMP jest określany warunkami eksploatacji danego typu amunicji, w tym warunkami środowiskowymi (otoczenia, klimatycznymi), bodźcami inicjującymi jego działanie np. mechanicznymi itp. Wiele MMP otrzymanych ze składników wymienionych w tabeli nr 2, nie może być stosowana w PUO ze względu na [6]:

- 1) nieregularną, niestabilną szybkość spalania;
- 2) uzyskiwanie żądanych parametrów pracy przy zbyt dużej średnicy zaprasowania mieszaniny;
- 3) zbyt duży współczynnik temperaturowy oraz współczynnik ciśnieniowy szybkości spalania;
- 4) zaburzenia szybkości spalania lub brak spalania w niskich temperaturach oraz przy niskich ciśnieniach;
- 5) higroskopijność,
- 6) zbyt szybkie pogarszanie się właściwości MMP w trakcie jej przechowywania.

W tabeli 3 przedstawiono przykłady MMP stosowanych w PUO występujących w amunicji zagranicznej wraz z danymi parametrów ich pracy na podstawie pozycji literaturowej [7,8].

Ponadto w literaturze [9] można spotkać jeszcze inne MMP stosowane w PUO:

- PbO_2/Si ; Mo/KClO_4 ; $\text{BaCrO}_4/\text{PbO}_2/\text{B}$: stosowane w „milisekundowych” PUO;
- BaO_2/Se ; Fe/KMnO_4 ; Sb/KMnO_4 ; $\text{KNO}_3/\text{C}/\text{S}$: stosowane w „sekundowych” PUO.

Podstawowymi składnikami MMP stosowanych w PUO, które występują w amunicji będącej na wyposażeniu Wojska Polskiego są:

- utleniacze: chloran (VII) potasu, chromian (VI) baru(II), chromian (VI) ołowiu (II);
- substancje palne w postaci siarczków antymonu – Sb_2S_3 i Sb_2S_5 tj. odpowiednio trójsiarczku i pięciosiarczku antymonu oraz nitrocelulozy koloidalnej spełniającej również funkcję lepiszcza scalającego/cementującego wszystkie składniki mieszaniny pirotechnicznej.

W zależności od przeznaczenia, właściwości i składu chemicznego MMP, w Siłach Zbrojnych RP stosuje się cztery rodzaje mieszanin oznaczonych symbolem: MK, MS-2, MGS-54, MGS-100, a w tym trzy odmiany mieszanin MK i MS-2 oznaczone literami A, B,

C, które różnią się wielkością ziaren (rozdrobienia), a przez to czasem spalania. MMP oznacza się na przykład następująco: MK/C, co oznacza MMP spalającą się powoli (MMP tzw. wolnopalna)

Tabela 3. Przykłady MMP stosowanych w zagranicznych PUO

SYMBOL OPÓŹNIACZA PIROTECHNICZNEGO	SKŁAD JAKOŚCIOWY MMP	SZYBKOŚĆ SPALANIA MMP [mm/s]	
MANGANESE DELAY, D-16 (Manganowy opóźniacz) (zgodnie z MIL-M-21383)	Mn BaCrO ₄ PbCrO ₄	1,81 - 12,7	
TUNGSTEN DELAY (Wolframowy opóźniacz) (zgodnie z MIL-M-23132)	W BaCrO ₄ KClO ₄ ziemia okrzemkowa	0,6 - 169,3	
ZIRCONIUM/NICKEL DELAY (Cyrkonowo-niklowy opóźniacz)	Zr-Ni BaCrO ₄ KClO ₄	Typ I	2,1
		Typ II	5,1
		Typ III	12,7
T-10	B BaCrO ₄	bor amorficzny:	7,3 – 50,8
		bor krystaliczny:	2,1 – 2,8

W tabeli 4 zostały przedstawione podstawowe rodzaje MMP opóźniające stosowane w krajowej amunicji, oraz czasy ich spalania na podstawie pozycji literaturowej [10].

Tabela 4. Przykłady MMP stosowanych w krajowych PUO

SYMBOL MMP	SKŁADNIKI MMP	ODMIANA MMP	CZAS SPALANIA MMP [s]
MK	BaCrO ₄ Sb ₂ S ₃ KClO ₄ Nitroceluloza kolodionowa	A	10-12
		B	14-15
		C	15-17
MS	PbCrO ₄ Sb ₂ S ₃ KClO ₄ Nitroceluloza kolodionowa	A	16,5-18,5
		B	5,2-6,4
		C	5,0-5,8
MGS-54	BaCrO ₄ Sb ₂ S ₅ KClO ₄ Nitroceluloza kolodionowa	9,0-9,5	
MGS-100	BaCrO ₄ Sb ₂ S ₅ KClO ₄ Nitroceluloza kolodionowa	14,5-16,0	

Oprócz MMP wymienionych w tabeli 4, do wyrobu PUO i bezpieczników (stosowanych głównie w zapalnikach artyleryjskich) stosuje się także mieszaninę wysokościową SC-1, składającą się z: cyrkonu, minii ołowianej, nitrocelulozy - koloksyliny. Średni czas spalania PUO zapalników artyleryjskich RGM-2 z MMP SC-1 o optymalnej wysokości zaprasowania mieszaniny SC-1 od 2,35 mm do 2,75 mm wynosi od 0,18 s do 0,24 s.

Wnioski

Spśród wielu rodzajów układów opóźniających stosowanych we współczesnej amunicji, to właśnie PUO są w największym stopniu wykorzystywane. Pomimo szybkiego rozwoju, np. elektronicznych opóźniających układów czasowych, ich miniaturyzacji oraz większej dokładności w uzyskiwanych czasach opóźnienia, PUO w wielu asortymentach amunicji są nadal niezastąpione. Przykładem mogą być zapalniki do granatów ręcznych, w których zastosowanie PUO znacznie uprościło ich konstrukcję. Obecnie trwają prace nad ulepszaniem już stosowanych opóźniających mieszanin pirotechnicznych - głównego elementu składowego PUO - poprzez modyfikowanie ich składów oraz wprowadzanie do układu różnych dodatków mających na celu poprawę parametrów ich pracy.

Literatura

- [1] Kosanke K. L., Kosanke B. J., *Pyrotechnic Ignition and Propagation: A Review*. Journal of Pyrotechnics, Issue 6, 1997.
- [2] Conkling J. A., *Chemistry of Pyrotechnics - Basic Principles and Theory*, CRC Press, New York, 1985, str.116.
- [3] Szidłowski A. A., *Osnovy pirotechniki*, Izdatelstwo Maszinostrojenie, Moskwa, 1964, str. 128.
- [4] Kalombo L., *Evaluation of Bi_2O_3 and Sb_6O_{13} as Oxidants for Silicon Fuel in Time Delay Detonators*, University of Pretoria, 2005, str. 25.
- [5] Beck M. W., Brown M. E., Cawthorne D., *Pyrotechnic Delay Composition*, ChemSA June, 1984.
- [6] National Technical Information Service, *Engineering Design Handbook - Military Pyrotechnics Series, Part I, Theory and Application*, Springfield, 1967.
- [7] Ellern H., *Military and Civilian Pyrotechnics*, Chemical Publishing Co., New York, 1985
- [8] Mil-spec Pyrotechnics Catalog, 2012 - http://www.mil-spec-industries.com/images/4/files/Mil-Spec%20Pyrotechnics%20Catalog-Electronic_Version-2014.pdf.
- [9] Wilson M. A., Hancox R. J., *Pyrotechnic Delays and Thermal Sources*, Journal of Pyrotechnics, Issue 13, 2001, str. 48.
- [10] Wojskowa Norma Branżowa - Małogazowe masy wolnopalne. Wymagania, WBN-86/1003-22.

