



**BADANIA PROCESÓW SPALANIA MIESZANIN PIROTECHNICZNYCH
STOSOWANYCH W UKŁADACH OPÓŹNIAJĄCYCH ŚRODKÓW
BOJOWYCH ZA POMOCĄ RENTGENOSKOPII W CZASIE
RZECZYWISTYM (RTR)**

***INVESTIGATIONS OF BURNING PROCESS OF PYROTECHNIC
COMPOSITIONS APPLIED IN DELAY SYSTEMS OF ORDNANCE USING
REAL TIME ROENTGENOSCOPY (RTR)***

Jacek BORKOWSKI,
Radosław WARCHOŁ, Marcin NITA, Maciej MISZCZAK
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

Streszczenie: W artykule przedstawiono eksperymentalne wyniki badań procesów spalania mieszanin pirotechnicznych wykonanych z użyciem rentgenoskopii w czasie rzeczywistym (RTR – Real Time Roentgenoscopy). Badanymi mieszaninami pirotechnicznymi zaelaborowane były korpusy pirotechnicznych układów opóźniających (PUO) stosowanych w środkach bojowych będących na wyposażeniu Sił Zbrojnych RP. Mieszanki pirotechniczne zaprasowane w korpus tworzyły pirotechniczny ładunek opóźniający (PŁO), który w niniejszej pracy miał postać wielosegmentowej kolumny spalającej się papierosowo (ładunki typu „end-burning”).

Wykorzystując technikę RTR wykryto i zarejestrowano przemieszczanie się wzdłuż całej długości pirotechnicznego ładunku opóźniającego granicy rozdziału między niespaloną częścią ładunku a jego produktami spalania. Zastosowane w PŁO trzy typy mieszanin pirotechnicznych, charakteryzowały się zróżnicowanym zobrazowaniem na zdjęciach rentgenowskich z powodu różnorodnej gęstości przereagowanej i nieprzereagowanej części PŁO.

Słowa kluczowe: pirotechniczny układ opóźniający, pirotechniczny ładunek opóźniający, strefa spalania, strefa zmian gęstości, rentgenoskopia w czasie rzeczywistym (RTR)

Abstract: The results of experimental investigations on combustion process of pyrotechnic compositions by using Real Time Roentgenoscopy (RTR) are presented in the paper. The bodies of pyrotechnic delay units (PUO – pirotechniczny układ opóźniający) used by the Polish Armed Forces in ordnance were filled by tested pyrotechnic compositions. The pyrotechnic compositions after pressing into a casing create the pyrotechnical delay charge (PŁO – pirotechniczny ładunek opóźniający) that here has a form of a multi-segmented column that burns like cigarette (end-burning charges). Using RTR technique the move of a layer, separating the un-burnt part of the charge and its combusted products, along the whole length of the pyrotechnical delay charge was detected and recorded. Three types of pyrotechnical compositions were used and they produced different X-ray pictures caused by different densities of reacted and un-reacted parts of PŁO.

Keywords: pyrotechnic delay system, pyrotechnic delay charge, combustion zone, density changing zone, Real Time Roentgenoscopy (RTR)

1. Wstęp

Badania pirotechnicznych układów opóźniających prowadzone w różnych laboratoriach na całym świecie, ograniczają się najczęściej do pomiaru średniej prędkości spalania ładunku wykonanego z pirotechnicznej mieszaniny opóźniającej. Wykorzystywane są w tym celu metody optyczne (kamery, fotodiody) oraz metody akustyczne. Równie często stosowane są układy pomiarowe bazujące na termoparach. Metody pozwalające na ciągłą (quasiciągłą) obserwację procesu spalania pirotechnicznych mieszanin opóźniających, a szczególnie z użyciem układów rentgenowskich nie były szeroko opisywane w literaturze. Do tej pory metody RTR były jedynie powszechnie wykorzystywane do badań procesów spalania paliw raketowych oraz w pewnym stopniu do monitoringu procesu detonacji.

Zadaniem pirotechnicznych układów opóźniających znajdujących się w środkach bojowych (ŚB) Sił Zbrojnych RP (SZ RP) jest wypracowanie określonej zwłoki czasowej. Uzyskanie założonego opóźnienia podyktowane jest wymogami bezpieczeństwa działania ŚB lub niezawodnością działania ŚB. PUO mimo, że charakteryzują się mniejszą dokładnością uzyskiwanych czasów opóźnienia w porównaniu np. z układami elektronicznymi, to są i tak najczęściej stosowane w konstrukcjach ŚB. Na fot. 1, pokazano przykładowe PUO stosowane we współczesnych ŚB SZ RP.

Pirotechniczny układ opóźniający powinien realizować trzy następujące podstawowe etapy działania, gwarantujące jego prawidłową pracę, tj.: przyjęcie impulsu od elementu inicjującego, wypracowanie określonej zwłoki czasowej oraz przekazanie impulsu inicjującego działaniu następnego elementu w łańcuchu ogniowym ŚB. Większość pirotechnicznych ładunków opóźniających stosowanych w PUO spala się papierosowo. Są to ładunki określane w terminologii angielskiej jako „end-burning”.

Na fot. 2 przedstawiono przykładowy PUO, który zbudowany jest z korpusu (2) i PŁO typu „end-burning” [1].

1. Introduction

Investigations of pyrotechnical delay units carried out in different laboratories are usually limited for the measurements of average velocity of combustion for charges prepared from a pyrotechnical delay composition. The optical (cameras, photo diodes) and acoustic methods are used for this reason. The measurement systems basing on thermocouples are also often used. The methods providing a continuous (quasi-continuous) monitoring of the combustion process of pyrotechnical delay compositions, especially with the use of X-ray instruments, were not widely presented in the literature. Up to now the RTR methods were used to test combustion processes of rocket propellants and in some degree to monitor the process of detonation.

The main task of the pyrotechnical delay units in explosive ordnance (ŚB-środki bojowe) of the Polish Armed Forces (SZ RP - Sił Zbrojnych RP) is to provide a specific time delay. The achieving of the assumed delay is caused by requirements of safe action of ŚB or reliability of ŚB functionality. The PUO are commonly used in designs of ŚB in spite of the fact that they are characterised by a lower accuracy comparing to electronic units. On the photograph 1 some examples of PUO used in nowadays ŚB of SZ RP are presented.

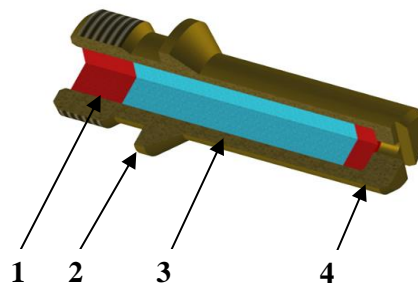
A pyrotechnical delay unit has to perform three following basic stages of action to guarantee its proper operation: reception of the pulse from an initiating element, providing a specific time delay and transferring the pulse initiating the action of a next element in the fire train of the ŚB. The pyrotechnical delay charges used in PUO mostly combust like cigarettes. In English terminology they are called as „end-burning” charges.

On the photograph 2 is presented an example of PUO that is built from a casing (2) and the PŁO of „end-burning” type [1].



Fot.1. Pirotechniczne układy opóźniające stosowane w środkach bojowych (ŚB) Sił Zbrojnych RP (SZ RP) [1]

Photograph 1. Pyrotechnic delay units used in explosive ordnance (ŚB) of the Polish Armed Forces (SZ RP) [1]



Fot. 2. Pirotechniczny układ opóźniający:

1 – mieszanina zapalająca; 2 - korpus; 3 – mieszanina opóźniająca; 4 – mieszanina wzmacniająca impuls ogniowy [2]

Photograph 2. Pyrotechnical delaying unit:

1 – igniting mixture; 2 - casing; 3 – delaying composition; 4 – composition increasing the fire pulse [2]

PŁO zawarty w tym układzie składa się z:

- mieszaniny zapalającej (1) inicjującej spalanie pirotechnicznej mieszaniny opóźniającej (3), przy czym mieszanina zapalająca (1) posiada większą odporność mechaniczną na działanie produktów spalania, powstałych w wyniku zadziałania spłonki zapalającej w porównaniu z pirotechniczną mieszaniną opóźniająca (3);
- mieszaniny opóźniającej (3), która zapewnia wymagany czas opóźnienia;
- mieszaniny (4) wzmacniającej impuls ogniowy przekazywany do następnego

The PŁO included in this unit consists of:

- Igniting mixture (1) initiating the combustion of pyrotechnic delaying composition (3), where the igniting mixture (1) has a greater mechanical resistance against impact of combustion products, generated by the action of the igniting primer, than the pyrotechnic delaying composition (3);
- Delaying composition (3) that provides the required time of delay;
- Composition (4) that is burnt by the delaying composition (3) and increases the pulse of fire transferred to the next

- elementu łańcucha ogniowego, zapalanej od mieszaniny opóźniającej (3);
- korpusu (2) mieszczącego mieszaniny pirotechniczne (1,3,4).

Celem pracy było wykazanie, czy metoda RTR może zostać użyta w procesie badań pirotechnicznych układów opóźniających oraz czy możliwy jest za jej pomocą quasiciągły monitoring procesu spalania.

2. Badania eksperymentalne

W Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia (WITU), badane są m.in. PUO, inicjowane opcjonalnie: spłonką – elektryczną, nakłuciową, drutem oporowym lub promieniem lasera. Po zainicjowaniu działania PUO obserwowany jest początek i koniec procesu spalania za pomocą czujników optycznych, akustycznych lub z użyciem szybkiej kamery VIS. W czasie badań, PUO może być sprawdzany w układzie „otwartym” lub „zamkniętym”. W niektórych dokumentach konstrukcyjnych ŚB podane są czasy palenia PUO dla układu „otwartego” i „zamkniętego”, co jest bardzo pomocne podczas analizy/interpretacji wyników badań.

W WITU, w badaniach, wykorzystuje się Rentgenowski System Diagnostyczny RTR (RSDG RTR) MU 17F 225-9 firmy YXLON do badania poprawności montażu ŚB i ich elementów, w tym PUO. Na przykład, za pomocą RSDG RTR wykonywane jest sprawdzenie PUO pod kątem poprawności jego budowy, w tym zgodności konstrukcji z dokumentacją techniczną np. w zakresie prawidłowości zaprasowania mieszaniny pirotechnicznej w korpusie PUO.

W przypadku nieprawidłowego zadziałania PUO, RSDG RTR umożliwia wskazanie miejsca PUO w którym nastąpiło jego wadliwe działanie.

Na fot. 3a i 3b przedstawiono rentgenogramy PUO stosowanego w zapalniku do pocisku PG-7: przed zainicjowaniem działania PUO i po zainicjowaniu działania. Na fot. 3b zarejestrowano nieprawidłowe działanie PUO polegające na zaniku (przerwaniu) procesu spalania ładunku pirotechnicznego (1) w miejscu zaznaczonym cyfrą (4).

element of the fire train;

- Casing (2) containing pyrotechnic compositions (1,3,4).

The aim of the paper is to prove that the RTR method may be used in the process of testing the pyrotechnic delay units to get a quasi-continuous monitoring of combustion.

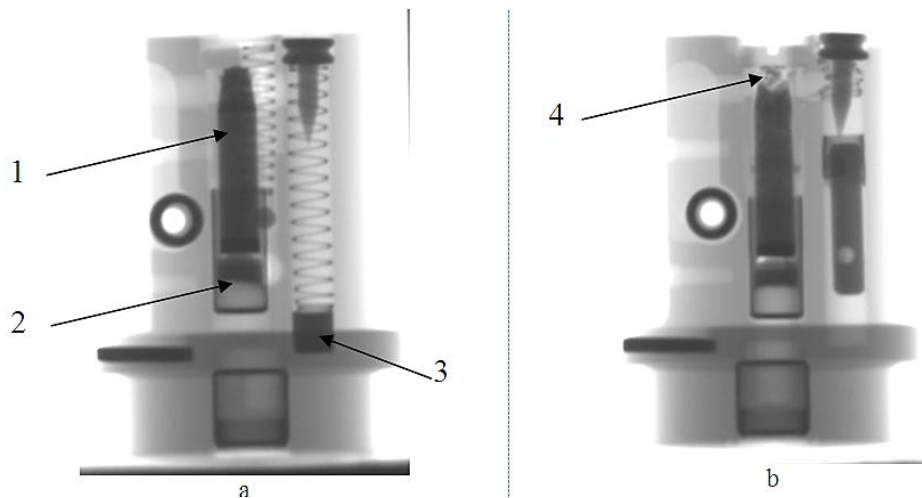
2. Experimental investigations

The PUO initiated by different primers of electric, percussion, resistant wire or laser beam type are tested in laboratories of the Military Institute of Armament Technology (WITU). After activation of PUO the beginning and end of combustion process is observed by using optical or acoustic sensors or by high speed camera VIS. The PUO may be examined during these tests in an “open” or “closed” system. Some ŚB have the design documentation where the burning times for “open” or “closed” systems are given what is very helpful for analysis/interpretation of received results.

WITU also uses in Testing Laboratory for ŚB the X-ray diagnostic system RTR (RSDG RTR) MU 17F 225-9 manufactured by YXLON to check the correctness of assembling the ŚB and their components including PUO. For example the RSDG RTR is used to examine the correctness of PUO design including the compliance of the design with technical documentation for example concerning the proper pressing of pyrotechnic composition into the PUO casing.

In the case of PUO malfunction the RSDG RTR helps to indicate a part of the PUO responsible for it.

The photographs 3a and 3b present the Roentgenograms of PUO used in the fuse for PG-7 missile: respectively before PUO activation and after activation. The photograph 3b has recorded the malfunction of PUO caused by the breaking of burning process in the pyrotechnic charge (1) in the place marked by (4).



Fot. 3. Rentgenogram PUO wraz z elementami łańcucha ogniowego stosowanymi w zapalniku do pocisku PG-7: a – przed zainicjowaniem działania PUO, b – podczas wadliwego działania PUO: 1 – segmentowy, kolumnowy pirotechniczny ładunek opóźniający, 2 – słonka pobudzająca, 3 – słonka zapalająca, 4 – miejsce zgaśnięcia procesu palenia się w PŁO [2]

Photograph 3. Roentgenogram of PUO together with parts of fire train used in the fuse of PG-7 missile: a – before activation of PUO, b – malfunction of the PUO: 1 – segmented, column like pyrotechnic delaying charge, 2 – activating primer, 3 – igniting primer, 4 – the place in PŁO where the burning process has extinguished [2]

Z porównania fot. 3a z fot. 3b wynika, że po zainicjowaniu słonki zapalającej (3) nastąpił początek palenia się pirotechnicznego ładunku opóźniającego (1) w górnej jego części (4), po czym nastąpiło jego przerwane procesu spalania. Nieprawidłowe działanie PŁO (1) spowodowało niepełne działanie łańcucha ogniowego zapalnika w pocisku PG-7. W rezultacie nie nastąpiło zadziałanie słonki pobudzającej (2).

Dotychczas RSDG RTR był stosowany tylko do badań defektoskopowych ŚB w tym PUO. Autorzy postanowili rozszerzyć badania PUO, przeprowadzając obserwację procesów spalania za pomocą RSDG RTR.

Przeznaczony do badań PUO, umieszczono w kabine RSDG RTR (fot. 3), w specjalnym pojemniku z materiału o wysokim współczynniku transmitancji promieniowania rentgenowskiego. Pojemnik był hermetyczny, aby uniemożliwić wydostawanie się produktów spalania do wnętrza kabiny, które byłyby szkodliwe dla jej wyposażenia.

Oprogramowanie sterownika RSTG RTR umożliwiło zapis procesu spalania PUO w systemie RTR z szybkością 30 klatek na sekundę.

Comparing the photographs 3a and 3b it can be seen that after the activation of the igniting primer (3) the burning process in pyrotechnic delaying charge (1) has started in its upper part (4) and then the process was broken. The malfunction of PŁO (1) resulted in incomplete operation of the fuse fire train in PG-7 missile. In the result the initiating primer (2) has not worked.

Up to now the RSDG RTR was used as a defectoscope to test ŚB including the PUO. The authors have decided to extend the tests of PUO and observe the combustion processes by using the RSDG RTR.

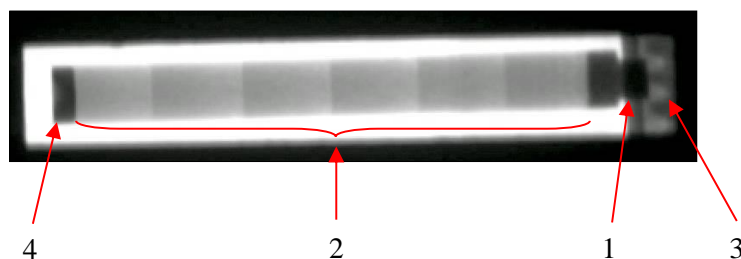
The tested PUO was placed in the RSDG RTR chamber (photograph 3) in a special container made from the material possessing a high level of X-ray transparency. The container was sealed to prevent the leaking of combustion products into the chamber what could damage some parts of the instrument.

The software of RSTG RTR controller provided the recording of burning process at the rate of 30 frames per second.



Zdjęcie 5. PUO stosowany w zapalniku do lotniczej bomby głębinowej [2]

Photograph 5. The PUO used in the fuse of aircraft depth bomb [2]



**Fot. 6. Rentgenogram PUO - przed zainicjowaniem jego spalania [2],
4 – mieszanina wzmacniająca impuls ogniowy; 2 – mieszanina opóźniająca;
3 – korpus; 1 – mieszanina zapalająca**

*Photograph 6. Roentgenogram of PUO – before initiating its burning [2],
4 – the composition amplifying the fire pulse; 2 – delaying composition;
3 – body; 1 – igniting mixture;*

Do badań RTR wytypowano PUO stosowany w zapalniku do morskiej bomby głębinowej [3] zrzucanej ze śmigłowca w celu rażenia okrętów podwodnych.

Zadaniem PUO stosowanego w bombie głębinowej zrzucanej ze śmigłowca jest spowodowanie jej samolikwidacji w przypadku nietrafienia w cel. Zainicjowanie samolikwidatora PUO zachodzi za pośrednictwem spłonki zapalającej, w chwili oddzielenia się bomby od śmigłowca. Czas pracy PUO wynosi 10 ± 2 s.

PUO samolikwidatora bomby głębinowej składa się aluminiowego korpusu (3) (fot. 5), wewnątrz którego zaprasowany jest pirotechniczny ładunek opóźniający (o średnicy 3,7mm i długości 34,6mm) składający się z dziewięciu segmentów pirotechnicznych (fot. 6). Mieszanina zapalająca (1) inicjuje zapłon zasadniczej mieszaniny opóźniającej (2) składającej się z sześciu środkowych segmentów ładunku pirotechnicznego. Mieszanina (2) ma mniejszą gęstość niż

The PUO used in the fuse of antisubmarine sea bomb dropped from the helicopter [3] was selected to be tested by the RTR method. The task of the PUO used in the depth charge dropped from the helicopter is its self-liquidation in the case if a target is missed. The self-liquidator PUO is activated by an igniting primer in the moment when the bomb separates from the helicopter. The time of PUO operation is ca. 10 ± 2 s.

The PUO of depth bomb self-liquidator consists of aluminium body (3) (photograph 5) including a pressed pyrotechnic delaying charge (diameter 3.7mm and length 34.6mm) made from nine pyrotechnic segments (photograph 6). The igniting mixture (1) initiates the ignition of the main delaying composition (2) consisting of six central segments of pyrotechnic charge. The composition (2) has a less density than external segments 1 and 4 with the lead compounds. Each

skrajne segmenty mieszanin zapalających 1 i 4 zawierające związki ołowiu. Każdy segment mieszaniny opóźniającej (2) ma zmienną gęstość, wzrastającą w kierunku mieszaniny zapalającej, wynikającą z technologii jego produkcji.

Na kolejnych foto 7(a-g) przedstawiono etapy przemieszczania się strefy zmian gęstości odpowiadającej strefie spalania w segmentowym PŁO samolikwidatora bomby głębinowej. Strzałką zaznaczono miejsce, gdzie znajduje się w danym momencie strefa spalania. Dodatkowo, foto 7(a-g) zostały poddane obróbce graficznej w celu wyraźniejszego zobrazowania strefy spalania.

W skrajnych segmentach mieszanin zapalających (1, 4) (zdjęcie 6) położeniu strefy spalania odpowiada granica oddzielająca materiał nieprzereagowany (o mniejszej gęstości) od materiału przereagowanego - produktów spalania o większej gęstości (foto 7: d,e,f).

W sześciu zasadniczych segmentach mieszaniny opóźniającej (2), strefie spalania odpowiada cienka warstwa o bardziej lub mniej regularnych kształtach, usytuowana między nieprzereagowaną częścią ładunku a skondensowanymi produktami jego spalania. Warstwa ta charakteryzuje się inną gęstością niż nieprzereagowana część ładunku i skondensowane produkty spalania (foto 7 d,e,f). Skondensowane produkty spalania mają strukturę nieuporządkowaną, zaburzoną o zróżnicowanej gęstości (foto 7: d,e,f,g,h).

Strefa spalania przechodzi przez wszystkie segmenty PŁO.

Po dojściu strefy spalania do ostatniego segmentu mieszaniny wzmacniającej (4), zachodzi dosyć gwałtowne, nieregularne i dwuetapowe spalanie (fot.7g,h), co prawdopodobnie wynika z charakteru mieszaniny wzmacniającej. W efekcie można zaobserwować nieregularny (nieliniowy) kształt strefy spalania w końcowym fragmencie segmentu mieszaniny opóźniającej, sąsiadującej z mieszaniną zapalającą (4).

segment of the delaying composition (2) have a changeable density that increases towards the igniting mixture resulting from its technology of manufacture.

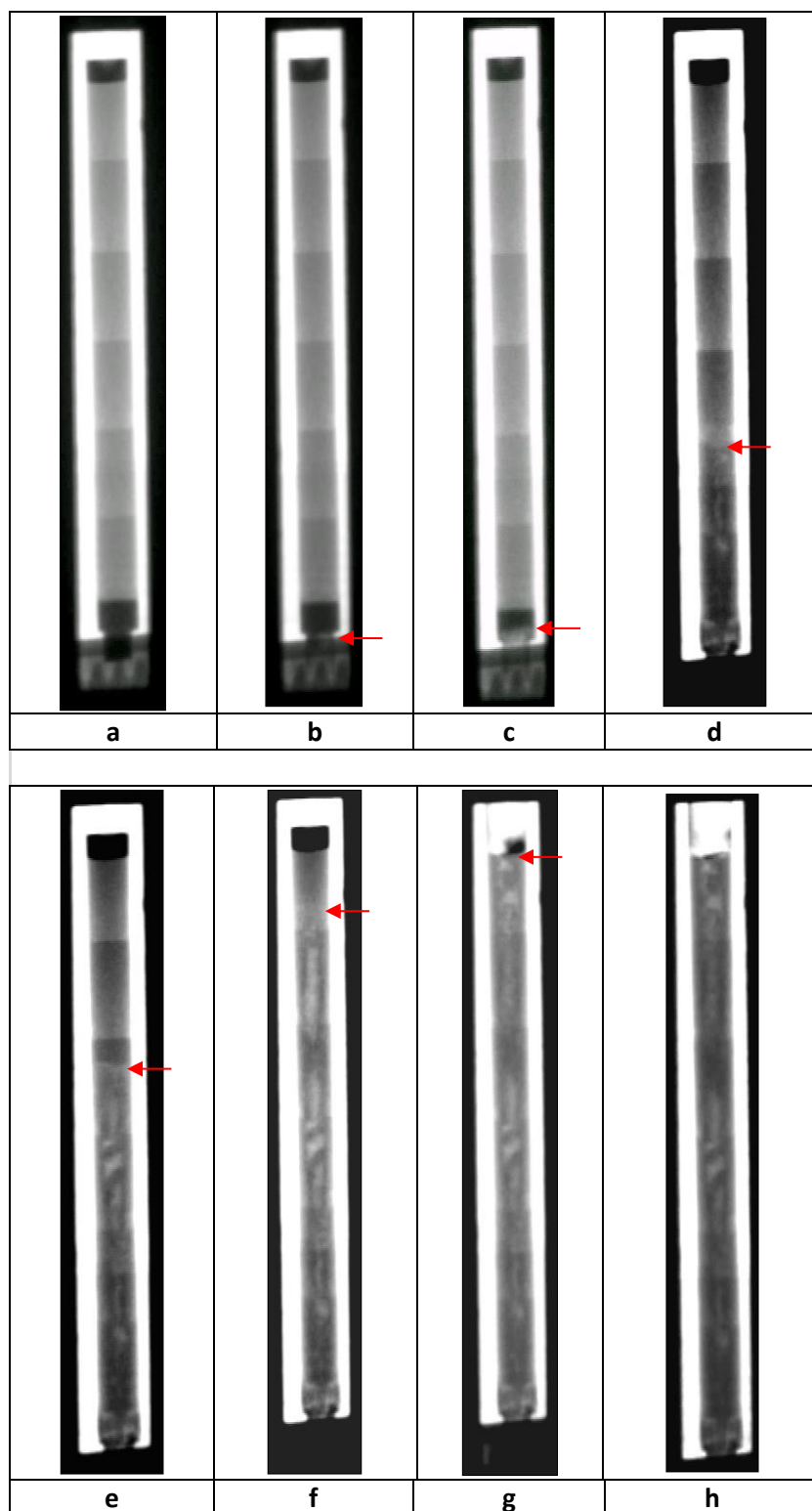
On the next photograph 7(a-g) the changed density zone propagation stages corresponding to the burning zone in the segmented PŁO of the depth bomb self-liquidator are presented. The arrow indicates a position of the burning zone in a moment. Additionally the photographs 7(a-g) were subjected to processing to show in more distinct way the burning zone.

The external segments of igniting mixtures (1, 4) (photograph 6) the position of the burning zone is defined as the border separating the un-reacted material (with a less density) from the reacted material – products of burning with a greater density (photographs 7d,e,f).

In the six main segments of delaying composition (2) the burning zone is defined as a thin layer possessing more or less regular shape that is situated between un-reacted part of the charge and condensed products of its burning. The layer is characterised by a different density than the un-reacted part of the charge and the condensed products of burning (photographs 7d,e,f). Condensed burning products have an irregular and inhomogeneous structure with different density (photos 7d,e,f,g,h).

The burning zone passes through all segments of PŁO.

When the burning zone reaches the last segment of boosting mixture (4) then two-stages rapid and irregular burning happens (photograph 7g,h) what results probably from the characteristic of the boosting mixture. In the result the burning of the final part of the segment of delaying composition adjacent to the igniting composition (4) is irregular (nonlinear).



Fot. 7 (a-g). Rentgenogramy RTR uzyskane podczas spalania PUO samolikwidatora lotniczej bomby głębinowej [2]

Photographs 7 (a-g). Roentgenograms RTR received at burning PUO of the aircraft depth bomb self-liquidator [2]

3. Wnioski

Otrzymane wyniki badań potwierdzają możliwość zastosowania RSDG RTR do obserwacji procesów spalania pirotechnicznych ładunków opóźniających PUO ŚB stosowanych w SZ RP. Pod względem praktycznym, daje to nowe możliwości diagnozy pirotechnicznych układów opóźniających, co autorzy niniejszej pracy będą starali się wykorzystać.

Z analizy radiogramów RTR wynika, że detekcja strefy spalania poza możliwościami sprzętowymi, od których zależy szybkość odświeżania obrazu RTR, zależy również od:

- materiału i grubości ścianek korpusu PUO mieszczącego mieszaninę pirotechniczną;
- gęstości zaprasowania poszczególnych mieszanin w korpus PUO;
- składu mieszaniny pirotechnicznej oraz gęstości jej produktów spalania.

Wykorzystując technikę RTR wykryto i zarejestrowano strefę zmian gęstości odpowiadającej strefie spalania, przemieszczającej się wzdłuż całej długości badanych pirotechnicznych ładunków opóźniających. W przypadku skrajnych segmentów mieszanin zapalających 1 i 4, strefie zmian gęstości odpowiadała granica rozdziału między niespaloną częścią ładunku a produktami spalania usuwanymi z układu.

Natomiast w przypadku segmentów pirotechnicznych zasadniczej mieszaniny opóźniającej (2), strefie spalania odpowiadała cienka warstwa o bardziej lub mniej regularnych kształtach, rozgraniczająca nieprzereagowaną część ładunku od skondensowanych produktów spalania.

Uzyskane zdjęcia umożliwiają w prosty sposób ocenić prędkość, kształt i sposób rozchodzenia się fali spalania w mieszaninie pirotechnicznej. Pozwala to wyciągnąć wnioski co do prawidłowości wykonania samego ładunku opóźniającego oraz poprawności jego działania. Jednakże głównym celem autorów artykułu, była tylko ocena przydatności metody RTR do badań opóźniających mieszanin pirotechnicznych. Cel ten został osiągnięty.

3. Conclusions

The received results of investigations confirm that the RSDG RTR may be used for observation burning processes of pyrotechnic delaying charges PUO ŚB used by the SZ RP. From the practical point of view it provides some new possibilities for diagnosis of pyrotechnic delaying units and the authors of the paper are going to exploit them.

Analysing X-ray pictures RTR it may be noticed that the detection of the burning zone depends on the performance of used instruments and especially on the rate of refreshing pictures in the RTR, and also on:

- Material and thickness of the walls of PUO casing that contains the pyrotechnic composition
- Density of pressurising of particular mixtures into the PUO casing
- Composition of pyrotechnic mixture and density of its combustion products.

Using the RTR technique the zone of changed density, that corresponds the burning zone what moves along the whole length of tested pyrotechnic delay charges, has been detected and recorded. In the case of external segments of igniting mixtures 1 and 4 the zone of changed density is the border separating the un-burnt part of the charge and products of combustion that are removed from the system.

In the case of pyrotechnic segments of delaying composition (2) the burning zone is a thin layer with more or less regular shape that separates the un-reacted part of the charge and condensed products of combustion.

The received photographs give a simple way to estimate the velocity, shape and way of propagation of burning wave in the pyrotechnic composition. It allows drawing the conclusions on the correct assembling and functioning of the delaying charge. Nonetheless the main aim of the paper was to assess the usefulness of the RTR method in testing the pyrotechnic delaying compositions. The aim has been completed.

Literatura / Literature

- [1] Charakterystyka pirotechnicznych układów opóźniających stosowanych w środkach bojowych, Biuletyn Naukowy WITU, Problemy Techniki Uzbrojenia - Nr1/2014, zeszyt nr 129
- [2] Materiały ze zbiorów autorów
- [3] Zapalnik AMW-AE2 do bomb lotniczych, Opis i działanie, Mar. Woj. 985/86, Gdynia 1987
- [4] The Installation of Impulsive X-raying of Burning Samples of Pyrotechnic Compositions, Fiz. Goreniya Vzryva, 1990, 26(6), 89-92
- [5] Pyrotechnic Dissemination Research Studies, Technical Report No 16 (AD-819593), USA, 1967, 84-85

