



PRZEGLĄD OPTYCZNYCH I TERMOELEKTRYCZNYCH UKŁADÓW DETEKCJI PRZEMIESZCZANIA FRONTÓW SPALANIA W STAŁYCH MATERIAŁACH WYBUCHOWYCH

AN OVERVIEW OF OPTICAL AND THERMOELECTRICAL SYSTEMS DETECTING MOVEMENT OF COMBUSTION ZONES IN SOLID EXPLOSIVES

Maciej MISZCZAK

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

DOI 10.5604/01.3001.0010.0288

Streszczenie: W artykule autor dokonał ogólnego przeglądu prac [1-7], w których brał udział, opisujących nieinwazyjne układy detekcji przemieszczania frontów spalania w ładunkach stałych materiałów wybuchowych - paliw raketowych i mieszanin pirotechnicznych - spalających się papierosowo (zw. ładunkami typu „end-burning”) w przelotowych, rurowych komorach spalania. Układy te służą przede wszystkim do określania liniowej szybkości spalania badanych ładunków wybuchowych. Autorskie układy detekcji obejmowały zastosowanie grafitu pirolitycznego (pirografitu) jako materiału konstrukcyjnego i sensorycznego komór spalania oraz jednego z urządzeń detekcji ruchu frontu spalania, tj. kamery IR albo VIS albo termopar. Przeglądu dokonano na tle innych układów detekcji frontów spalania stałych materiałów wybuchowych, wykorzystujących detektory optyczne [8-12] lub termopary [13-21].

Słowa kluczowe: stałe materiały wybuchowe, spalanie, grafit pirolityczny, kamera IR, kamera VIS, termopary

1. Wstęp

W latach 2009 – 2014, w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia (WITU) opracowano trzy, opisane w pracach własnych [1-7], oryginalne, nieinwazyjne układy detekcji przemieszczania frontów spalania w ładunkach stałych materiałów wybuchowych,

Abstract: In this contribution author did a general overview of works [1-7], in which he participated, describing non-invasive systems on detection of movement of combustion fronts in solid end-burning explosive materials – rocket propellants and pyrotechnic compositions - inserted into tube combustion chambers. The systems are used to measure linear burning velocity of tested explosives. Detecting systems, the author has contributed to as well, concerned the application of pyrolytic graphite (pyrographite) as structural and sensory material of combustive chambers and one of devices detecting the displacement of the burning front i.e. an IR or VIS camera or thermocouples. The review has been made in the background of other systems using optical detectors [8-12] or thermocouples [13-21].

Keywords: solid explosive materials, combustion, pyrolytic graphite, IR camera, VIS camera, thermocouples

1. Introduction

Original and non-invasive systems, described in own proceedings [1-7], were developed in the Military Institute of Armament Technology (MIAT) within 2009 – 2014 for detection of displacement of burning fronts within the charges made

takich jak stałe paliwa raketowe oraz mieszaniny pirotechniczne - typu „end-burning”, tj. spalające się „papierosowo”. Detekcja ruchu frontów spalania jest stosowana przede wszystkim do określania liniowej szybkości spalania badanych materiałów wybuchowych. W ramach niniejszych układów zawierających kamerę IR albo kamerę VIS albo termopary, podstawową, stałą konfigurację tworzył badany ładunek stałego materiału wybuchowego przylegający boczną, cylindryczną powierzchnią do wewnętrznej powierzchni rurowej komory spalania wykonanej z grafitu pirolitycznego (pirografitu), charakteryzującej się niezwykle wysoką anizotropią przewodności cieplnej w kierunku osiowym i promieniowym.

Przydatność zastosowań nowo opracowanych układów [1-7] detekcji ruchu frontów spalania w ładunkach stałych materiałów wybuchowych najlepiej jest ocenić na tle innych, znanych, stosowanych w tym samym celu układów optycznych [8-12] oraz układów wykorzystujących termopary, opisanych w pracach [13-21].

2. Znane - optyczne i termoelektryczne układy detekcji ruchu frontów spalania

Znane według publikacji [8-12], optyczne, nieinwazyjne układy detekcji i rejestracji przemieszczania frontów spalania w ładunkach stałych materiałów wybuchowych wykorzystują detektory optyczne VIS (zazwyczaj kamery wideo). Detekcja i rejestracja VIS procesów spalania, w tym przemieszczania frontów spalania, możliwa jest dzięki zastosowaniu w korpusach komór spalania stosunkowo niewielkich, grubościennych, mocno osadzonych (ze względu na wysokie ciśnienie i temperaturę produktów spalania) okien obserwacyjnych wykonanych z przezroczystych materiałów, takich jak szkło kwarcowe, szafirowe, polimetakrylan metylu (PMM). W ramach znanych układów optycznych, spalane ładunki wybuchowe przylegają do okien obserwacyjnych albo otoczone są obojętnym gazem (zazwyczaj azotem albo argonem).

from solid explosives like solid rocket propellants and pyrotechnical mixtures belonging to „end-burning” category i.e. burning like a cigarette. Detection of displacement of burning fronts is carried out in order to measure the linear velocity of burning for tested explosives. These systems consist of IR or VIS camera or thermocouples and a tested charge of solid explosive with a side cylindrical surface adhering to internal wall of tube shaped combustive chamber made from pyrographite that is characterised by extremely high level of anisotropy for thermal conductivity in axial and radial directions.

The usefulness of newly developed systems [1-7] for detection of movement of burning zones within the charges of solid explosives may be assessed in the best way on the background of other known systems used for the same purpose such as optical systems [8-12] and systems using the thermocouples which are described in publications [13-21].

2. Existing Systems for Optical and Thermoelectric Detection of Burning Zones Displacement

Optical non-invasive systems which are currently known and described in [8-12] and used for detection and registration of burning zones within the charges of solid explosives exploit optical VIS detectors (typically video cameras). Detection and registration of burning processes by VIS is possible thanks to application of monitoring windows made from transparent stuff such as quartz or sapphire glasses or methyl polymethacrylate (MPM) plastic which are strongly embedded in the frames of combustion chambers and have a large thickness and relatively low size (because of high pressure and temperature of burning products). In known optical systems the burning explosives stick to surveying windows or are surrounded by a neutral gas (typically nitrogen or argon).

Znane układy optyczne umożliwiają ciągłą rejestrację przemieszczania frontów spalania. Wymagają jednak, po każdej próbie spalaniem, wymiany okien obserwacyjnych w przypadku ich kontaktu z ładunkiem wybuchowym. W celu uniknięcia każdorazowej wymiany okien obserwacyjnych wymagają zastosowania dosyć skomplikowanych, pneumatycznych przepływowych układów regulacyjno-pomiarowych. Pneumatyczne układy zapewniają utrzymanie spalanego ładunku wybuchowego w otulinie gazu obojętnego oraz zapobiegają przesłanianiu spalającego się ładunku przez własne produkty spalania, zwłaszcza podczas spalania bardziej „dymotwórczych” materiałów wybuchowych, takich jak „wysokogazowe” mieszaniny pirotechniczne i heterogeniczne paliwa raketowe.

Znane termoelektryczne układy [13-21] detekcji i rejestracji przemieszczania frontów spalania w stałych materiałach wybuchowych, wykorzystują termopary (zazwyczaj, co najmniej dwie) montowane w ładunku materiału wybuchowego, w określonej odległości od siebie. Metody te polegają na określeniu czasów, którym odpowiada przejście frontu spalania przez punkty pomiarowe określone miejscem usytuowania w ładunku wybuchowym termopar, reagujących na przejście frontu spalania rejestracją wzrostu temperatury. Na podstawie tych czasów oraz odległości między termoparami określa się średnią szybkość przemieszczania frontu spalania na odcinkach ograniczonych termoparami.

Termopary, jako ciała obce w materiale wybuchowym, zakłócają swą obecnością proces spalania. Poza tym, gdy front spalania dochodzi do termopar, są one narażone na intensywne działanie produktów spalania, zwłaszcza ich wysokiej temperatury i/lub stosunkowo wysokiego ciśnienia i/lub dosyć energicznego ich przepływu. Kolejne ograniczenie w zakresie zastosowania termopar w ładunkach wybuchowych wynika z trudności w precyzyjnym umieszczeniu i osadzeniu termopar w tego rodzaju ładunkach (zwłaszcza kruchych) oraz w zapewnieniu kontaktu termopar z materiałem wybuchowym.

Poniżej, zostaną omówione bardziej szczegółowo ww. autorskie, nieinwazyjne układy detekcji przemieszczenia frontów spalania.

The known optical systems provide continuous registration of burning zone movements but the monitoring windows have to be replaced after each burning trial when a direct contact with the explosive charge has happened. In order to eliminate need for regular replacement of surveying windows some relatively sophisticated pneumatic flowing control-measurement systems have to be used. This pneumatic systems have to be deployed to keep the burning charge in the atmosphere of a neutral gas and prevent any screening of this charge by the burning products especially when more “smoke-efficient” explosives such as “highly gaseous” pyrotechnical mixtures and heterogeneous rocket propellants are burnt.

Known thermoelectric systems [13-21] for detection and registration of burning zones within solid explosives deploy thermocouples (typically at least two) which are embedded within the explosive charge at specific distance between them. These methods measure the time between passings of the burning zone through the measurement points corresponding to positions of thermocouples within the charge as they react on the presence of the zone by detection of increased temperatures. On the base of these times and a distance between positions of thermocouples an average velocity of burning zone displacement for this distance is determined.

The thermocouples are foreign bodies within the explosive material which disturb the burning process. Apart from that they are exposed to intensive action of burning products such as high temperatures and/or their relatively high flowing velocities when the burning zone approaches the thermocouples. A next limitation for using thermocouples in explosive charges is caused by difficulties in precise location and fixing of thermocouples in such charges (especially fragile ones) and provision of direct contact between the thermocouples and explosive material.

The systems for non-invasive detection of burning zones to which the author has contributed himself are described below in more detailed way.

3. Instytutowe [1-7] optyczne i termoelektryczne układy detekcji ruchu frontów spalania

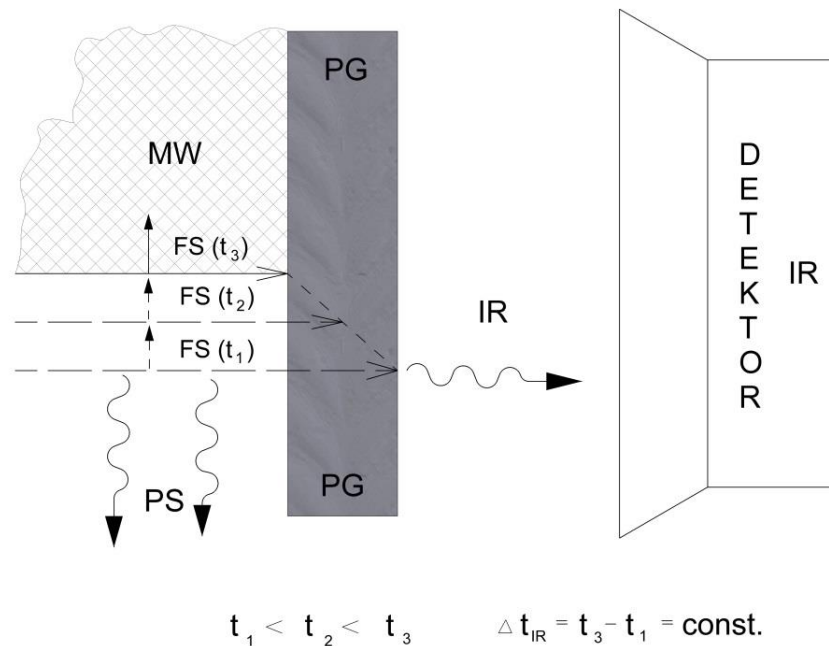
Stałym elementem autorskich układów detekcji ruchu frontów spalania była cylindryczna, pirografitowa komora spalania mieszcząca cylindryczny ładunek stałego materiału wybuchowego – paliwa raketowego lub mieszaniny pirotechnicznej – przylegającego boczną powierzchnią do komory spalania.

Szybkości spalania badanych ładunków materiałów wybuchowych w ww. układach spalania mieściły się w zakresie od 1 do 10 mm/s. Komora spalania wykonana była z pierścieni pirografitowych sklejonych ze sobą czołowo. Wysokość pierścieni pirografitowych była w zakresie od 4 do 6 mm, średnica wewnętrzna komory spalania wynosiła 5-6 mm, a grubość ścianki komory 3 - 4,6 mm.

3. Institute's Own [1-7] Systems for Optical and Thermoelectric Detection of Burning Zones Displacement

A cylindrical pyrographite burning chamber housing a cylindrical charge of solid explosive material – rocket propellant or pyrotechnical composition – sticking by its side surface to the burning chamber was a permanent component of author's systems used for detection of displacement of burning zones.

The burning rates of tested charges of explosives were in the range between 1.0 and 10.0 mm/s. The burning chamber was made from pyrographite rings which were butted by glue. The height of pyrographite rings was 4.0 to 6.0 mm and the internal diameter of the burning chamber was 5.0 – 6.0 mm and the thickness of the wall 3.0 – 4.6 mm.



Rys. 1. Układ detekcji przemieszczania (w czasie t_1 , t_2 i t_3) frontu spalania (FS) stałego materiału wybuchowego (MW) za pomocą kamery termowizyjnej (DETEKTOR IR) obserwującej boczną, zewnętrzną powierzchnię pirografitowej (PG) komory spalania. PS – produkty spalania, Δt_{IR} – stałe przesunięcie czasowe, odpowiadające odległości między położeniem frontu spalania (FS) w czasie t_3 i t_1

Fig. 1. System for detection of displacement (for times t_1 , t_2 and t_3) of burning zone (FS) of solid explosive material (MW) by thermal camera (IR CAMERA) observing the side external surface of pyrographite (PG) burning chamber. PS – burning products, Δt_{IR} – constant time shift corresponding to a distance between positions of burning zones (FS) in moments of time t_3 and t_1

Pirografit, z którego wykonano pierścienie miał następujące właściwości: gęstość $2,19 \text{ g/cm}^3$, odległość między sąsiednimi, równoległymi płaszczyznami krystalograficznymi (a,b) wynosiła $0,342 \text{ nm}$, przewodność cieplna wzdłuż płaszczyzn (a,b), tj. wzdłuż promieni pierścieni, wynosiła $350 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, przewodność cieplna w kierunku (c) prostopadłym do płaszczyzn krystalograficznych (a,b), czyli wzdłuż osi pierścieni, wynosiła $1,77 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, emisyjność promieniowania IR z bocznej powierzchni pierścieni pirografitowych mieściła się w zakresie od $0,95$ do $0,97$.

Podstawowym warunkiem koniecznym, umożliwiającym detekcję ruchu frontu spalania w ładunku typu „end-burning” było zapewnienie przylegania bocznej powierzchni tego ładunku do pirografitowej komory spalania i usytuowanie jej płaszczyzn krystalograficznych (a,b) prostopadle do kierunku ruchu frontu spalania.

Inicjowanie spalania ładunku realizowane było za pomocą układu zapłonowego – lasera CO_2 emitującego promieniowanie o długości $10,6 \mu\text{m}$ i mocy $7,0 \text{ W}$.

Układy detekcji ruchu frontów spalania, odpowiadające poszczególnym nieinwazyjnym metodom przedstawiono na rys. 1-3.

Na rys. 1 przedstawiono układ detekcji ruchu frontu spalania (FS) za pomocą kamery termowizyjnej (DETEKTOR IR) obserwującej boczną, zewnętrzną powierzchnię pirografitowej (PG) komory spalania. Kamera IR pracując w zakresie widmowym wynoszącym $8-12 \mu\text{m}$ rejestrowała z szybkością do 30 klatek na sekundę przemieszczanie izoterm (generowanych przez front spalania) na bocznej, zewnętrznej powierzchni komory spalania.

Na rys. 2 przedstawiono układ detekcji ruchu frontu spalania (FS) za pomocą kamery VIS obserwującej boczną, zewnętrzną powierzchnię warstwy termochromowej (TCH) pokrywającej zewnętrzną, boczną powierzchnię pirografitowej (PG) komory spalania. Kamera VIS rejestrowała przemieszczanie izoterm generowanych przez front spalania, wizualizowanych w postaci zmiany barw zewnętrznej powierzchni warstwy termochromowej.

W ramach niniejszej metody zastosowano dwa następujące rodzaje substancji termochromowych reagujących zmianą barwy na ciepło

Pyrographite used for fabrication of the rings has following properties: density 2.19 g/cm^3 , distance between adjacent parallel crystallographic faces (a,b) was 0.342 nm , thermal conductivity along the faces (a,b) i.e. along the radii of the rings was $350 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, thermal conductivity in direction (c) vertical to crystallographic faces (a,b) i.e. along the axis of the rings was $1.77 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, emissivity of radiation from the side surface of pyrographite rings was in the range of 0.95 to 0.97 .

Basic condition that was required for the detection of burning front of “end-burning” charge was the provision of sticking of the side surface of this charge to the pyrographite burning chamber and positioning its crystallographic faces (a,b) perpendicularly against the direction of burning zone displacement.

The initiation of charge burning process was performed by an ignition system – CO_2 laser radiating on $10.6 \mu\text{m}$ wavelength with the power of 7.0 W .

Systems used to detect displacement of burning fronts which correspond to particular non-invasive methods are shown in figures 1-3.

Fig.1 shows a system detecting the movement of burning zone (FS) by thermal camera (DETEKTOR IR) monitoring the external surface of pyrographite (PG) burning chamber. IR camera operates on the band $8-12 \mu\text{m}$ with the rate up to 30 frames per second and takes pictures of displacing isotherms (generated by the burning front) on the external wall of burning chamber.

Fig. 2 present a system for detection of burning front (FS) displacement by VIS camera recording the side external surface of thermochrom (TCH) layer covering the side wall of pyrographite (PG) burning chamber. VIS camera has recorded the displacement of isotherms generated by burning zone and visualised by changing colours of thermochrom layer external surface.

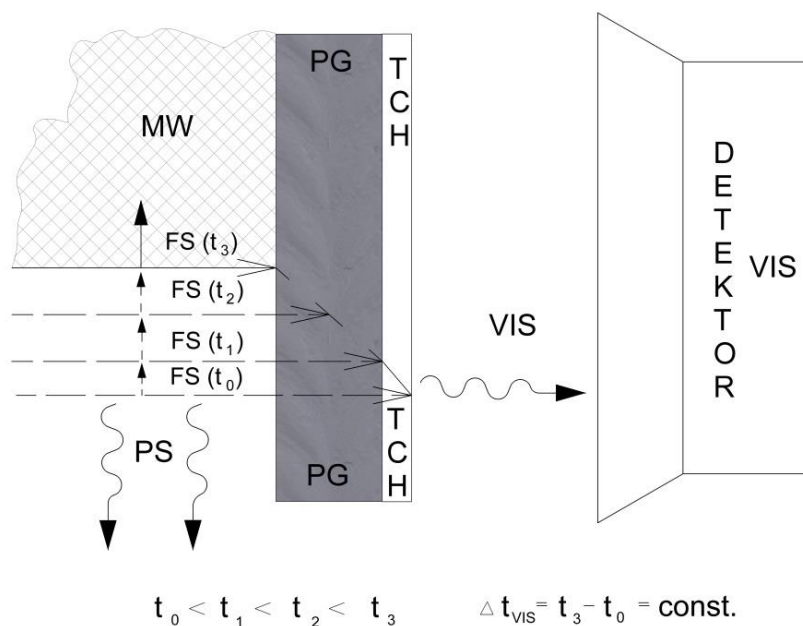
The method uses two following types of thermochrom substance which changes the colour at temperatures above the

w temperaturach nieco powyżej temperatury pokojowej, tj. kompozycję barwnikową typu leuco oraz chiralno-nematyczną kompozycję ciekłokrystaliczną.

Kompozycja barwnikowa typu leuco zmieniła barwę z czerwonej na postać bezbarwną w temperaturze powyżej 28°C, zaś bezbarwna chiralno-nematyczna warstwa ciekłokrystaliczna poniżej temperatury 28°C wykazywała szereg barwnych przemian fazowych w zakresie temperatur od 28°C do 46,8°C, uzyskując min. kolor niebieski i zielony.

ambient temperature i.e. a leuco type colouring composition and chiral-nematic liquid-crystal composition.

The colour showing composition of leuco type has changed the colour from the red to colourless at temperatures above 28°C whereas the colourless chiral-nematic layer of liquid crystal has indicated above 28°C a lot of colourful phase conversions between 28.0°C and 46.8°C showing above all blue and green colours.



Rys.2. Układ detekcji przemieszczania się (w czasie t_0 , t_1 , t_2 i t_3) frontu spalania (FS) stałego materiału wybuchowego (MW) za pomocą kamery wizyjnej (DETEKTOR VIS) obserwującej boczna, zewnętrzną powierzchnię warstwy termochromowej (TCH) pokrywającej pirografitową (PG) komorę spalania. PS – produkty spalania, Δt_{VIS} – stałe przesunięcie czasowe, odpowiadające odległości między położeniem frontu spalania (FS) w czasie t_3 oraz t_0 .

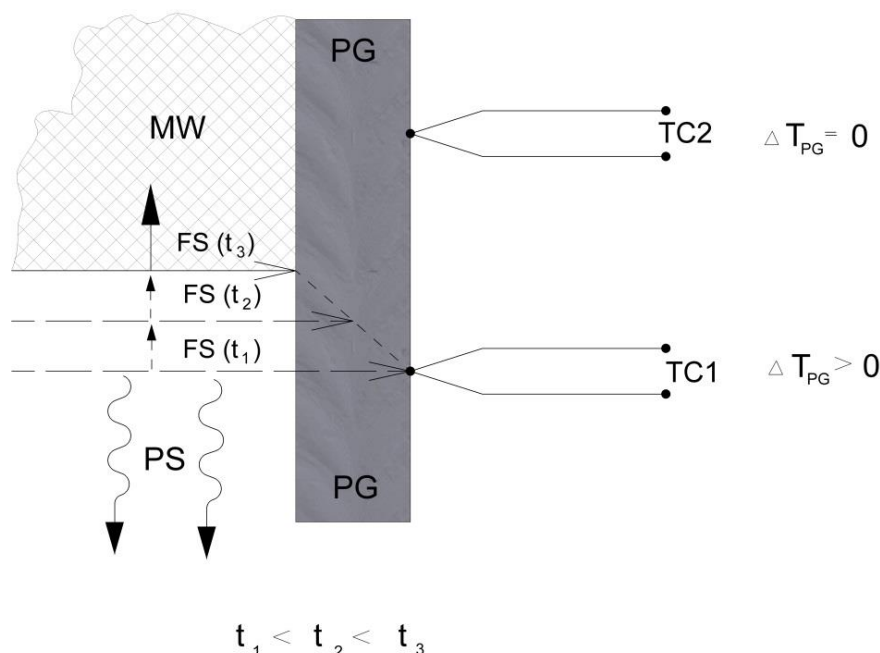
Fig.2. System for detection of displacement (for times t_0 , t_1 , t_2 and t_3) of burning front (FS) for a solid explosive material (MW) by using video camera (DETEKTOR VIS) surveying an external side surface of thermochrom layer (TCH) covering the pyrographite (PG) burning chamber. PS – burning products, Δt_{VIS} – constant time shift corresponding to a distance between position of the burning front (FS) in moments t_3 and t_0 .

Rys. 3 przedstawia układ dwóch termopar (TC1, TC2) niklowo-chromowych typu K przymocowanych do bocznej, zewnętrznej powierzchni pirografitowej (PG) komory spalania za pomocą kleju odpornego na temperaturę do 200°C. Punkty kontaktu termopar z powierzchnią komory spalania leżały na odcinku usytuowanym równoległe do

Fig. 3 shows a system of two nickel-chromium thermocouples (TC1, TC2) of type K fastened to the side pyrographite (PG) wall of burning chamber by a glue resistant to high temperatures (to 200°C). The points where the thermocouples contact with the surface of the burning chamber are situated along a distance which is parallel to the axis

osi wzdłużnej komory spalania. Izotermi generowane przez front spalania dochodzące do punktu styku termopar z komorą spalania powodowały wzrost rejestrowanej przez nie temperatury.

of the burning chamber. The isotherms generated by the burning front approach the point of contact between a thermocouple and the burning chamber and make the temperature registered by thermocouples increase.



Rys. 3. Układ detekcji przemieszczania (w czasie t_1 , t_2 i t_3) frontu spalania (FS) materiału wysokoenergetycznego (MW) za pomocą termopar TC1 i TC2 zamontowanych na bocznej, zewnętrznej powierzchni pirografitowej (PG) komory spalania. PS – produkty spalania, ΔT_{PG} – przyrost temperatury na powierzchni PG, mierzony za pomocą termopary TC1 i TC2

Fig. 3. System for detection of displacement (versus time t_0 , t_1 , t_2 and t_3) of burning front (FS) for high energetic material (MW) by using thermocouples TC1 and TC2 fastened to the side external pyrographite surface (PG) of the burning chamber. PS – burning products, ΔT_{PG} – increase of temperature on the surface of PG measured by thermocouples TC1 and TC2.

W ramach ww. trzech układów detekcji (rys.1-3), izotermi generowane przez front spalania, przechodzące przez ściankę pirografitowej komory spalania, opcjonalnie rejestrowane przez kamerę IR, VIS i termopary, znajdowały się za frontem spalania w stałej odległości. Stałe przesunięcie między położeniem frontu spalania a określoną izotermą pojawiającą się na zewnętrznej powierzchni układu sensorycznego (zawierającego ścianę pirografitową (PG)) wynikało ze stałego przesunięcia czasowego. W przypadku konfiguracji układu stosującego kamerę IR (rys.1) przesunięcie czasowe wynosiło (Δt_{IR}) i odpowiadało przejściu przez izotermę drogi od wewnętrznej powierzchni sensorycznej, tj.

For all above systems of detection (Fig.1-3) the isotherms generated by the burning front and passing through the burning chamber pyrographite wall and optionally registered by an IR or VIS camera or thermocouples were behind the burning front by a constant distance. The constant shift between the position of the burning front and a specific isotherm appearing on the external surface of the sensory system (including pyrographite wall (PG)) was caused by a permanent time shift. In case of the system using IR camera (Fig.1) the time shift was (Δt_{IR}) and corresponded the time needed for an isotherm for covering a distance along the

wewnętrznej powierzchni pirografitowej komory spalania wzdłuż płaszczyzn krystalograficznych (a,b) do zewnętrznej powierzchni bocznej pirografitowej komory spalania.

W przypadku zastosowania układu zawierającego kamerę VIS (rys. 2) przesunięcie czasowe Δt_{VIS} stanowiło sumę Δt_{IR} oraz czasu barwnej odpowiedzi warstwy termochromowej. W układzie detekcji wykorzystującym termopary (rys.3) przesunięcie czasowe stanowiło sumę Δt_{IR} i czasu temperaturowej reakcji termopary.

Maksymalna temperatura zarejestrowana na zewnętrznej, bocznej powierzchni pirografitowej komory spalania, tj. zmierzona przy jej końcu wylotowym, pod koniec procesu spalania nie przekraczała 200°C.

4. Podsumowanie i wnioski

Dzięki niezwykle wysokiej kierunkowej anizotropii przewodnictwa cieplnego pirografitowej komory spalania w kierunku (a,b) i (c), poprzecznym (prostopadłym) usytuowaniu płaszczyzn krystalograficznych (a,b) pirografitu względem kierunku przemieszczania frontu spalania oraz kontaktowi komory spalania (PG) z materiałem wybuchowym możliwa była detekcja przemieszczania frontu spalania poprzez detekcję ruchu izoterm na zewnętrznej powierzchni komory spalania, generowanych przez ten front [1-7]. Ruch izoterm rejestrowany był opcjonalnie za pomocą kamery IR obserwującej zewnętrzną, boczną powierzchnię komory spalania, termopar zamontowanych na zewnętrznej powierzchni komory spalania, usytuowanych wzdłuż tworzącej komory spalania lub za pomocą kamery VIS obserwującej zewnętrzną powierzchnię warstwy termochromowej pokrywającej zewnętrzną powierzchnię komory spalania.

Podobnie, jak za pomocą znanych dotychczas metod [8-21], za pomocą autorskich, opracowanych w WITU nieinwazyjnych metod [1-7] można realizować detekcję i rejestrację frontów spalania w stałych materiałach wybuchowych typu „end-burning” w trybie ciągłym (optyczne układy wykorzystujące kamerę IR lub kamerę VIS) albo dyskretnym

crystallographic faces (a,b) between the internal sensory surface, i.e. the internal pyrographite wall of the burning chamber, and the external pyrographite surface of the burning chamber.

In the case of system using VIS camera (Fig.2) the time shift Δt_{VIS} was a sum of Δt_{IR} and the time needed for thermo-chrom layer to show a colour reaction. For the system deploying thermocouples (Fig.3) the time shift was a sum of Δt_{IR} and thermocouple temperature reaction time.

Maximal temperature recorded on the external side wall of pyrographite combustion chamber i.e. measured at its nozzle end at the termination of burning process was less than 200°C.

4. Summary and Conclusions

For the reason of extremely high directional anisotropy of thermal conductivity represented by the pyrographite burning chamber along direction (a,b) and (c), and a crosswise (perpendicular) location of crystallographic faces (a,b) of the pyrographite against the direction of burning zone displacement, and direct contact between the burning chamber (PG) and explosive material it was possible to detect the movement of isotherms generated by this zone through the detection of displacement of isotherms on the external wall of the combustion chamber [1-7]. The displacement of isotherms was optionally recorded by IR camera observing the side external wall of the burning chamber, by thermocouples fixed on the outside surface of the burning chamber along a contour line creating its axial body or by the VIS camera taking pictures of a thermochrom layer covering the external surface of the burning chamber.

The detection and registration of burning fronts for “end-burning” solid explosive materials may be carried in a similar way to well know [8-21] methods by using author’s non-invasive methods developed in MIAT [1-7] which provide a continuous (optical systems with IR or VIS

(termopary), z tym, że układy opracowane w WITU w porównaniu ze znanymi układami [8-21] są wyraźnie mniej skomplikowane oraz wymagają znacznie mniejszego nakładu pracy w zakresie przygotowania do badań ładunków materiałów wybuchowych.

Pirografitowe komory spalania [1-7], opcjonalnie z warstwami termochromowymi albo termoparami, ze względu na właściwości termofizyczne pirografitu, w tym jego żarowytrzymałość, mogą być wykorzystane wielokrotnie. Warstwy termochromowe oraz termopary są chronione ścianką pirografitową przed bezpośrednim działaniem produktów spalania materiału wybuchowego. A zatem, na zewnętrznej powierzchni pirografitowej komory spalania mogą być montowane termopary znacznie mniej wytrzymałe na wysokie temperatury (tańsze) niż te (znane z dotychczasowego stanu techniki), bezpośrednio montowane w materiale wysokoenergetycznym.

cameras) or discrete way (thermocouples) of operation, whereas the systems developed in MIAT are less complicated and require a bit less amount of efforts to prepare explosive charges for testing than the known systems [8-21].

The pyrographite burning chambers [1-7] combined optionally with thermochrom layers or thermocouples may be used many times because of thermo-physical properties of the pyrographite and especially its resistance against the hot cinder. Thermochrom layers and thermocouples are protected by a wall of the pyrographite against direct impact of explosive material burning products. Therefore the thermo-couples which are much less resistant against high temperatures (and cheaper) may be fixed on the external wall of the burning chamber instead of the ones which are currently used in the known systems for installing them directly within the high energetic material.

Literatura / Literature

- [1] Miszczak M., Świdorski W., *Sposób i układ detekcji przemieszczania frontu palenia w ładunkach stałego materiału wysokoenergetycznego*, Opis patentowy PL 214480 (zgłoszony w Polsce z datą pierwszeństwa w 2009r);
- [2] Miszczak M., Świdorski W., *Sposób i układ detekcji przemieszczania frontu palenia w ładunkach stałego materiału wysokoenergetycznego*, Opis patentowy – dodatkowy- PL 217178 (zgłoszony w Polsce z datą pierwszeństwa w 2011r);
- [3] Miszczak M., Panas A., Świdorski W., *Nowa metoda ciągłego pomiaru szybkości palenia stałego paliwa raketowego za pomocą kamery termowizyjnej*, *Pomiary Automatyka Kontrola* vol.55 (11) (2009) 950-953;
- [4] Świdorski W., Miszczak M., Panas A., *A Novel Technique for the Continuous Evaluation of a Burning Rate of Solid Rocket Propellant by Using IR Thermography*, *QIRT Journal*, vol. 8(1) (2011) 111-114;
- [5] Miszczak M., Świdorski W., *A Novel Method on Visualization of Temperature Fields by Pyrolytic Graphite Sensors and IR Detection Systems*, 16th International Conference on Modern Technologies Proceedings, Sinaia, Romania, (2012) 621-624
- [6] Miszczak M., Świdorski W., *Optical Detection of Combustion Zone Movement in Solid High-energy Materials*, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, vol. 50(2) (2014) 178-182;
- [7] Miszczak M., Świdorski W., Panas A., *A Novel Non-invasive Method for the Detection of Combustion Zone Propagation in Solid High Energy Materials by Means of Thermocouples and Pyrolytic Graphite*, *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 11(3) (2014) 417-431;
- [8] Shelukin G.G., Buldakov V.F., Belov V.P., *Experimental Study of Combustion of*

- Condensed Systems (in Russian)*, Fiz. Goreniya i Vzryva vol. 5(1), (1969) 42-51;
- [9] Rozhdestvenskii Yu.V., *Method and Technique of Studying Combustion Process in Rocket Propellants*, in book: *Rocket Propellants (in Russian)*, Ed. by Paushkin Ya. M and Chulkov A.Z. , (Izdatelstvo Mir, Moskva, 1975) 171-187;
- [10] Eisenreich N., Kugler H.P., Sinn F., *An Optical System for Measuring the Burning Rate of Solid Propellant Strands*, *Propel., Explos., Pyrotech.* vol. 12(2) (1987) 78-80;
- [11] Kubota N., *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA (2002) 235-236;
- [12] Gupta G., Jawale L., Mehilal, Bhattacharya B., *Various Methods for the Determination of the Burning Rates of Solid Propellants – An Overview*, *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 12(3) (2015) 603-604;
- [13] Bahman N.N., *Combustion of Heterogeneous Condensed Systems (in Russian)*, Izdatelstvo Nauka; Moskva (1967) 124-125;
- [14] Razdan M.K., Kuo K.K., *Erosive Burning of Solid Propellants*, in: *Fundamentals of Solid-propellant Combustion*, American Institute of Aeronautics, Inc., New York (1984) 556;
- [15] Strunina A.G., Butakova E.A., Demidova L.K., Barzykin V.V., *Combustion of Gasless Systems at Cryogenic Temperatures (in Russian)*, Fiz. Goreniya i Vzryva, vol. 24(2), (1988) 99;
- [16] Zarko V.E., Kuo K.K., *Critical Review of Methods for Regression Rate Measurements of Condensed Phase Systems*, in: *Non-intrusive Combustion Diagnostics*, (Kuo K.K, Parr T., Eds.), Begel House, New York, (1994) 603;
- [17] Araujo L., Frota D., *Thermochemical Characteristics of AN/AP Based Composite Propellants*, 25th Int. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, Germany, (1994) 58-1/51-9;
- [18] Duraes L., Campos J., Campos-Andrade A., Portugal A., *Decomposition Path of Pyrolysis and Combustion of Potassium Nitrate/Thermite Compositions*, IPS Proc. Semin. 33rd, Fort Collins, CO, USA, (2006) 232-235;
- [19] Dahn C.J., Dastidar A.G., Kashani A., Bradlock M., Brabec T., *A New Small-scale Burn Rate Test Method*, IPS Proc. Semin. 33rd, Fort Collins, CO, USA, (2006) 291-296;
- [20] Hossjer K., *Studies of the Heat Problem of Burning Gasless Pyrotechnic Compositions Compressed in Cylindrical Copper-tubes*, Chem. Probl. Connected with the Explos. Stabil., Proc. Symp. 1st, Stockholm, Sweden, (1967) 92;
- [21] Mordado J., Duraes L., Campos J., Portugal A., *Iron Oxide/Aluminum Fast Thermite Reaction using Nitrate Additives*, New Trends Res. Energ. Mater., Proc. Semin., 5th, Pardubice, Czech Republic, (2002) 208-222.

