

ANALIZA MOŻLIWOŚCI I PRZYDATNOŚCI NIEINWAZYJNYCH METOD DETEKCJI PROPAGACJI FRONTÓW PALENIA W ŁADUNKACH STAŁYCH PALIW RAKIETOWYCH

Streszczenie: W artykule wykonano analizę w zakresie możliwości i przydatności nieinwazyjnych metod detekcji przemieszczania frontów palenia w ładunkach stałych paliw raketowych usytuowanych w laboratoryjnych komorach spalania typu bomba Crawforda lub zaelaborowanych w silnikach raketowych. Przed analizą każdej z metod, podano ogólne zasady detekcji przemieszczania frontów palenia stałych paliw raketowych wraz z rysunkami ilustrującymi konfigurację układów detekcji oraz zasadę ich działania. Podstawowym celem tych metod jest ciągły (quasi-ciągły) pomiar chwilowej (rzeczywistej) szybkości palenia stałych paliw raketowych bez naruszania struktury ich ładunków. Ww. metody wykorzystują techniki optyczne (VIS), promieniowanie rentgenowskie, mikrofałe oraz fale ultradźwiękowe. Nieinwazyjne badania szybkości palenia stałych paliw raketowych znajdują się w polu zainteresowania ośrodków naukowo-badawczych państw przodujących w zakresie techniki raketowej, w tym organizacji naukowo-badawczych i standaryzacyjnych NATO.

AN ANALYSIS OF CAPABILITY AND SUITABILITY OF NON-INTRUSIVE METHODS TO DETECTION OF BURNING ZONES PROPAGATION IN ROCKET PROPELLANT CHARGES

Abstract: It was done an analysis concerning capabilities and application suitability of non-intrusive methods for detection of movement of burning zones in solid rocket propellants inserted in special, laboratory combustion chambers of type Crawford combustion bomb or situated in rocket motors. Before the analysis of each method, general principles related to detection of burning zones traveling in solid propellants, were given together with drawings describing configurations of detection systems and their principles of operation. A basic aim of these methods, is obtainment of continuous (quasi-continuous) measurement of real, instantaneous burning rate for solid rocket propellants without disturbance of their charge structural integrity. Above mentioned methods use optical (VIS) techniques, X-rays, microwaves and ultrasounds. Non-intrusive methods dealing with burning rate measurements of solid rocket propellants, are objects of strong interest of many research-testing centers in countries leading in rocket technology, including NATO research-technical and standardisation agencies and centers.

1. Wstęp

Detekcja propagacji frontów/stref palenia w ładunkach stałych paliw raketowych jest warunkiem koniecznym, zapewniającym ciągły pomiar ich szybkości palenia. Ciągły pomiar szybkości palenia ma szczególne znaczenie przy badaniu tzw.

„przejściowych/niestacjonarnych” faz palenia paliw raketowych, zwłaszcza podczas zapłonu i w końcowej fazie palenia tj. podczas „dopalania paliwa”. Określenie szybkości przemieszczania frontów/stref palenia umożliwia ocenę przydatności ładunków paliw raketowych pod względem ich składu chemicznego, kształtu, wewnętrznej struktury, szczególnie jednorodności, ocenę jakości procesu technologicznego wytwarzania ładunków, a także konstrukcji silników raketowych. Pomiar i badania niniejszej charakterystyki palenia są konieczne do wykonania obliczeń parametrów balistyki wewnętrznej i zewnętrznej raket oraz pocisków raketowych, zwłaszcza ich układów napędowych. Na przykład, szybkość palenia ma krytycznie istotny wpływ i znaczenie na uzyskanie oraz utrzymanie podstawowego parametru balistycznego układu napędowego rakiety/pocisku raketowego, jakim jest ciąg (siła ciągu). W tym miejscu warto zauważyć, że zmiana szybkości palenia paliwa raketowego np. w zakresie $\pm 1\%$ powoduje zmianę ciągu w zakresie $\pm(1,5 - 2) \%$. Poszukiwaniami nowych i rozwojem dotychczas stosowanych nieinwazyjnych metod pomiaru szybkości palenia, czyli takich, które nie zakłócają zjawiska palenia/propagacji frontu palenia i jednocześnie zapewniają praktycznie ciągły pomiar przemieszczania frontu palenia, zajmują się przodujące na świecie w technice raketowej, takie państwa jak Stany Zjednoczone Ameryki Północnej, Francja, Wielka Brytania, Niemcy oraz firmy – liderzy w branży technologii produkcji stałych paliw raketowych i silników raketowych na paliwo stałe. Istotną część działalności przemysłu produkującego stałe paliwa raketowe poświęcona jest badaniom/pomiarom szybkości palenia, zarówno podczas opracowywania/projektowania nowych paliw raketowych, ich wytwarzania jak i podczas eksploatacji. Wszystkie państwa posiadające tradycje w opracowywaniu i produkcji stałych paliw raketowych są wyposażone w urządzenia i stanowiska badawcze do pomiaru szybkości palenia. Są one stale modernizowane w celu zwiększenia dokładności i wiarygodności otrzymanych danych/wyników odnoszących się do szybkości palenia. O dużym zainteresowaniu w skali światowej problemami badania szybkości palenia stałych paliw raketowych w silnikach raketowych dobitnie świadczą bardzo intensywne i szerokie działania oraz inicjatywy międzynarodowe prowadzone od kilkunastu lat przez grupy eksperckie NATO, mające na celu opracowanie skutecznych metod pomiaru szybkości palenia stałych paliw raketowych, w tym metod nieinwazyjnych. W latach 1997-2001 Grupa Ekspercka 016 Badawczo-Technicznej Organizacji (RTO) Panelu NATO ds. Technik/Technologii Stosowanych (AVT) podjęła się zadania oceny dotychczas stosowanych w ramach państw NATO metod pomiaru szybkości palenia stałych paliw raketowych. W 2002 r. z prac ww. Grupy Eksperckiej opublikowano Raport Techniczny RTO-TR-043 [1] obejmujący cele, koncepcje, poszukiwania, badania oraz zalecenia (rekomendacje) w ww. zakresie. Po opublikowaniu Raportu Technicznego [1], grupy ekspertów NATO w ramach prac badawczych i standaryzacyjnych prowadzonych przez Podgrupę 1-szą ds. Materiałów Wysokoenergetycznych Grupy Eksperckiej ds. Bezpieczeństwa Amunicji AC/326 Konferencji Krajowych Dyrektorów ds. Uzbrojenia (CNAD) państw członkowskich NATO, przystąpiono do opracowywania Publikacji Sojuszniczej NATO – AOP-59, dotyczącej nieinwazyjnych metod pomiaru szybkości palenia stałych paliw raketowych oraz Porozumienia Standaryzacyjnego (STANAG-u) 4674 mającego na celu wprowadzenie niniejszej publikacji do stosowania przez zainteresowane państwa.

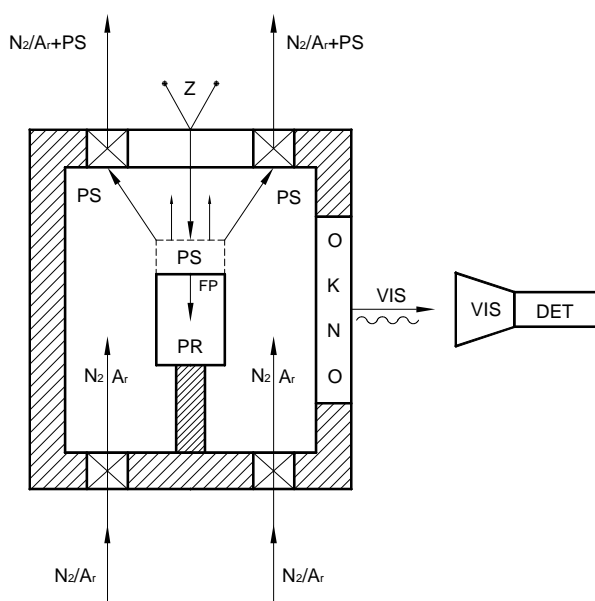
2. Analiza nieinwazyjnych metod detekcji przemieszczania frontów palenia w ładunkach stałych paliw raketowych

2.1 Wprowadzenie

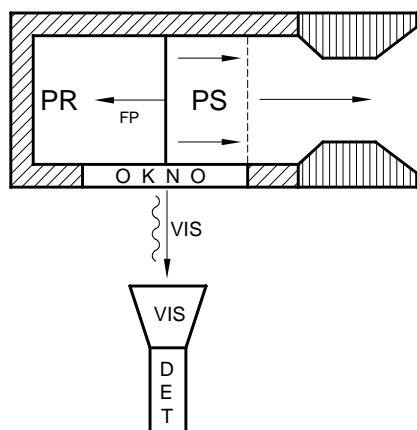
Najbardziej znane metody/techniki detekcji przemieszczania frontów/stref palenia w stałych paliwach raketowych wykorzystują kamery optyczne (VIS) [1-5], korzystnie superszybkie, o wysokiej rozdzielczości obrazu, rejestrujące propagację i strukturę świecącego się frontu palenia poprzez przezroczyste okna wykonane w komorach spalania, ultradźwięki [1,2,6,7], promienie rentgenowskie oraz mikrofałe [1,6,7].

2.2 Metoda optyczna (VIS)

Optyczne metody (VIS) detekcji przemieszczania frontów palenia w ładunkach stałych paliw raketowych wykorzystują okna obserwacyjne [1-5] (Rys.1,2) wykonane w komorach spalania typu bomby Crawforda (Rys.1) albo w silnikach raketowych (Rys.2). W przypadku zastosowania bomby Crawforda, ładunki paliw raketowych otoczone są obojętną gazową atmosferą, zazwyczaj azotową lub argonową, co wymaga zastosowania dosyć skomplikowanych, pneumatycznych, przepływowych układów oraz zabiegów zapobiegających przesłanianiu palącego się paliwa przez produkty spalania. Warunki, w jakich zachodzi palenie paliwa w atmosferze obojętnego gazu wyraźnie odbiegają od warunków rzeczywistych występujących w komorach spalania silników raketowych, wpływając istotnie na szybkość palenia. Ze względu na wysokie temperatury palenia paliw raketowych, zazwyczaj mieszczących się w zakresie od 1500 K do 3500 K, zarówno w bombach Crawforda jak i silnikach raketowych możliwe jest zastosowanie jedynie stosunkowo niewielkich okien o dużej grubości, wykonanych z materiałów przezroczystych dla promieniowania VIS - szklanych, czyli o ograniczonej żaroodporności i stosunkowo niskiej wytrzymałości mechanicznej, takich jak szkło kwarcowe, szafirowe lub organiczne wykonane z polimetakrylanu metylu (plexiglasu).



Rys. 1: Konfiguracja i zasada działania układu detekcji VIS ruchu frontu palenia (FP) stałego paliwa raketowego (PR) zamontowanego w komorze spalania typu bomby Crawforda posiadającej okno obserwacyjne, wypełnionej N₂/Ar – azotem albo argonem – obojętnym gazem koniecznym do utrzymywania stałego ciśnienia w komorze spalania i kierowania produktów spalania (PS) w celu umożliwienia obserwacji FP przez detektor (DET). Z – układ zapłonowy.

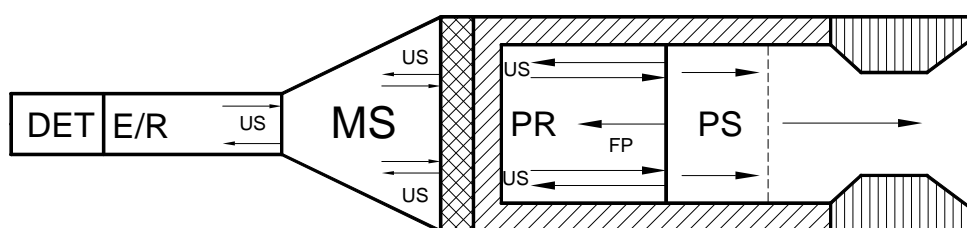


Rys. 2: Konfiguracja i zasada działania układu detekcji VIS ruchu frontu palenia (FP) stałego paliwa raketowego (PR) zaelaborowanego w komorze spalania silnika raketowego posiadającego okno obserwacyjne umożliwiające obserwację FP przez detektor (DET). PS – produkty spalania.

2.3 Metoda ultradźwiękowa

Ultradźwiękowa technika/metoda rejestracji propagacji frontów palenia w ładunkach paliw raketowych polega na emisji ultradźwięków [1,2,6,7] przez generatory/głowice usytuowane poza ładunkiem paliwa, pracujące w systemie nadawczo-odbiorczym (Rys.3). Wytwarzane fale ultradźwiękowe przechodzą przez materiał paliwa, odbijają się od ruchomego/przemieszczającego się czoła strefy/frontu palenia dzięki znacznej różnicy wielkości impedancji akustycznej między nie spaloną (pozostałą) częścią paliwa a produktami spalania, po czym wracają do źródła fal ultradźwiękowych. Pomiar czasów propagacji powracających fal ultradźwiękowych (echa) zależy bezpośrednio od zmieniającej się w czasie palenia grubości nie spalonej części paliwa. Aby uniknąć problemów związanych z tłumieniem fal ultradźwiękowych, maksymalna grubość warstwy materiału paliwa, przez który przemieszczają się fale ultradźwiękowe nie powinna przekraczać 40 mm [1,7]. Stanowi to istotne, geometryczne ograniczenie możliwości pomiarowych metodą ultradźwiękową. Innym, nie mniej istotnym ograniczeniem stosowania metody ultradźwiękowej jest wymóg umieszczenia materiału sprzęgającego między generatorem fal ultradźwiękowych a ładunkiem paliwa w celu śledzenia zmian grubości nie spalonej części paliwa do jego całkowitego spalania. Materiał sprzęgający spełnia funkcję linii opóźniającej umożliwiającej rejestrację grubości paliwa do wartości zerowej (odpowiadającej pełnemu spalaniu paliwa) i jednocześnie stanowi warstwę izolacyjną, chroniącą generator (nadajnik-odbiornik) fal ultradźwiękowych przed gorącymi, agresywnymi chemicznie produktami spalania. Jednak największą wadą ultradźwiękowej metody rejestracji propagacji/szybkości frontów/stref palenia jest konieczność znalezienia i doboru materiału sprzęgającego dopasowanego pod względem akustycznym do materiału paliwa przy zachowaniu ich zgodności/kompatybilności materiałowej w sensie fizykochemicznym, co jest zadaniem trudnym do zrealizowania, biorąc pod uwagę, że materiał sprzęgający nadaje się tylko dla określonego rodzaju (typu) paliwa raketowego. Ponadto, materiał sprzęgający musi posiadać odpowiednio dużą wytrzymałość mechaniczną oraz właściwości wiążące (przyczepność) względem powierzchni materiałowych, z którymi znajduje się w kontakcie. Warto również zauważyć, że pewną niedogodność podczas pomiaru metodą ultradźwiękową, obniżającą jej dokładność, stanowią zaburzenia propagacji fal ultradźwiękowych spowodowane powstawaniem pól naprężeniowych-odkształceniowych w układzie materiałowym - paliwo raketowe/materiał sprzęgający, przede wszystkim w wyniku wytworzenia ciśnienia w komorze silnika raketowego podczas spalania paliwa. Stwierdzono również [1], że metoda ultradźwiękowa zastosowana do pomiaru przemieszczania frontów palenia odlewanych, homogenicznych

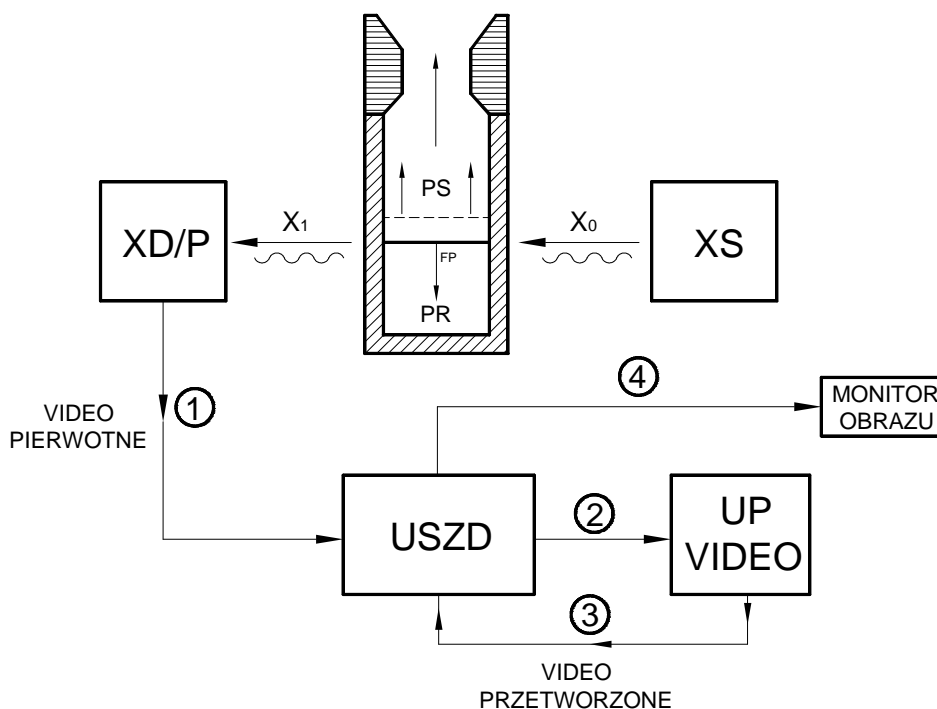
paliw dwubazowych (CDBP – Castable Double-Base Propellants) powoduje powstawanie zwiększonej, nadmiernej ilości zakłócających sygnałów odbiciowych spowodowanych obecnością specjalnego proszku zastosowanego do procesu odlewania, które mogą przesłaniać mierzony sygnał odbiciowy pochodzący od przemieszczającego się frontu palenia. Podstawowe błędy metody/techniki ultradźwiękowej wynikają również z niedokładności pomiaru początkowej długości ładunku paliwa raketowego, jego właściwości oraz pomiaru czasu odbicia generowanego sygnału ultradźwiękowego. Wszystkie ww. ograniczenia i utrudnienia wymagają kosztownych i czasochłonnych inwestycji obejmujących zbudowanie stanowiska pomiarowego i wyszkolenia personelu obsługującego takie stanowisko.



Rys. 3: Konfiguracja i zasada działania układu detekcji ruchu frontu palenia (FP) stałego paliwa raketowego (PR) zaelaborowanego w komorze spalania silnika raketowego za pomocą ultradźwięków (US) emitowanych i odbieranych przez generator/odbiornik (detektor – DET) (E/R) poprzez materiał sprzęgający (dopasowanie impedancji akustycznej). PS – produkty spalania.

2.4 Metoda rentgenowskiej radioskopii pomiaru w czasie rzeczywistym (RTR)

Detekcja propagacji strefy/frontu palenia za pomocą techniki RTR polega na rejestracji/zapisie zmian położenia frontu/strefy palenia w wyniku wykonania serii zdjęć (filmu) rentgenowskich (rentgenowskiego) podczas spalania ładunku paliwa w komorze silnika raketowego (Rys.4). Dokładność określenia miejsca strefy/frontu palenia w funkcji czasu trwania spalania zależy od szybkości wykonywanych zdjęć (ilości klatek/zdjęć na sekundę) i możliwości powiększania obrazu cyfrowego zdjęcia rentgenowskiego. Podstawową wadą techniki RTR jest wysoki koszt, złożoność aparatury rentgenowskiej, wysokie wymagania w zakresie jej zasilania oraz stosunkowo wysoki poziom ryzyka związany z narażeniem zespołu obsługującego stanowisko badawcze na promieniowanie przenikliwe. Ponadto, efektywne zastosowanie techniki RTR zależne jest od stopnia przenikalności promieniowania rentgenowskiego przez materiały komory spalania silnika raketowego oraz ładunku paliwa.



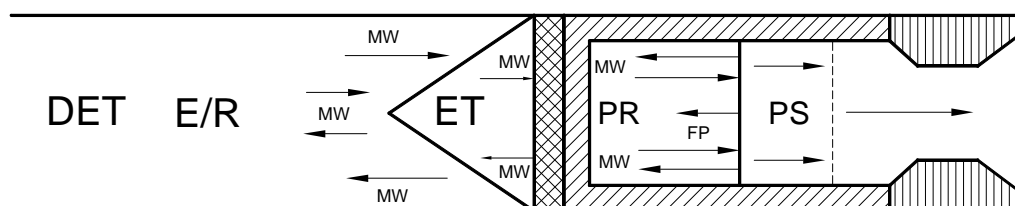
Rys.4: Konfiguracja i zasada działania układu detekcji ruchu frontu palenia (FP) stałego paliwa rakietowego (PR) zaelaborowanego w komorze spalania silnika rakietowego za pomocą promieniowania rentgenowskiego (X), pracującego w systemie detekcji RTR. PS - produkty spalania, XS – źródło promieniowania X, XD/P – detektor/przetwornik promieniowania X w obraz VIDEO, USZD – układ sterowania i zapisywania danych, UP VIDEO – układ przetwarzania sygnałów VIDEO, X_0 – natężenie promieniowania X padającego na komorę spalania silnika rakietowego, X_1 – natężenie promieniowania X padającego na detektor i przetwornik promieniowania X (X/DP).

2.5 Metoda mikrofalowa

Zastosowanie mikrofalowej techniki do pomiaru przemieszczania się frontu/strefy palenia w paliwie polega na porównywaniu przesunięcia kąta fazowego (częstotliwościowego) mikrofal padających i odbitych od ruchomej powierzchni czoła frontu/strefy palenia (Rys.5). Mikrofałe wytwarzane są przez generator mikrofalowy – np. w postaci anteny tubowej (dyszowej) [1,7] spełniającej również rolę odbiornika. Kąt przesunięcia fazowego między sygnałem mikrofalowym padającym i odbitym zmienia się z szybkością proporcjonalną do szybkości propagacji frontu/strefy palenia, przy czym stałym współczynnikiem proporcjonalności jest stała fazowa mikrofal materiału paliwa rakietowego. Stała ta jest również funkcją geometrii/kształtu falowodu oraz zależy od stałej dielektrycznej paliwa. Technika mikrofalowa wymaga zastosowania kosztownej aparatury i urządzeń a także nowoczesnych systemów zbierania, analizowania i redukowania ilości danych w celu uzyskania prawidłowej interpretacji wyników pomiarów. Niestety, metalizowane stałe paliwa rakietowe (zawierające sproszkowany metal, zazwyczaj glin) stanowiące bardzo istotną oraz liczną rodzinę heterogenicznych/kompozytowych paliw rakietowych sprawiają olbrzymie trudności w zakresie wykorzystania techniki mikrofalowej do pomiaru szybkości ich palenia.

W przypadku stosowania techniki mikrofalowej należy również wziąć pod uwagę zmiany właściwości dielektrycznych paliwa oraz izolacji termicznej/ścian silnika rakietowego, zwłaszcza w obszarach ulegających intensywnemu ogrzewaniu. Podstawowym źródłem niepewności pomiaru oraz ograniczeniem stosowania techniki mikrofalowej są współczynniki

tłumienia oraz odbicia fal, które mają wpływ na dokładność pomiaru i jednocześnie mogą obniżyć zdolność układu pomiarowego w zakresie zbierania i przetwarzania danych podczas badań.



Rys. 5: Konfiguracja i zasada działania układu detekcji ruchu frontu palenia (FP) stałego paliwa rakietowego (PR) zaelaborownego w komorze spalania silnika rakietowego za pomocą mikrofal (MW) emitowanych i odbieranych przez generator/odbiornik (detektor- DET) (E/R) poprzez element transmisyjny (ET).

3. Wnioski

Spośród omawianych nieinwazyjnych metod ciągłego (quasi-ciągłego) pomiaru propagacji frontów palenia w ładunkach stałych paliw rakietowych, absolutnie nieinwazyjną jest jedynie optyczna – pasywna metoda (VIS), natomiast pozostałe metody są w mniejszym lub większym stopniu inwazyjne, ponieważ aktywnie działają na paliwo rakietowe ultradźwiękami, promieniowaniem rentgenowskim oraz mikrofalami.

Usytuowanie kierunku propagacji frontów palenia w ładunkach stałych paliw rakietowych względem kierunku detekcji promieniowania VIS oraz X, jest poprzeczne (korzystnie powinno być prostopadłe) (Rys.1,2,4), zaś względem kierunku rozchodzenia się ultradźwięków i mikrofal jest wzdłużne (Rys.3,5), w celu uzyskania optymalnych warunków odbicia ultradźwięków i mikrofal od powierzchni frontu palenia..

Aby w jak największym stopniu prędkości palenia ładunków stałych paliw rakietowych odpowiadały rzeczywistym prędkościom palenia, detekcja przemieszczania frontów palenia powinna być prowadzona w silnikach rakietowych małogabarytowych (w zmniejszonej skali) podczas początkowej i środkowej fazy badań, zaś w końcowej fazie badań – w eksploatowanych, pełnogabarytowych silnikach rakietowych (badania w pełnej skali). Takie podejście metodologiczne w zakresie badania prędkości palenia stałych paliw rakietowych, przejawia się w dosyć intensywnej i szerokiej działalności badawczej oraz standaryzacyjnej państw NATO, prowadzonej w ciągu ostatnich kilkunastu lat [1, 8-10].

Literatura

- [1] NATO RTO Technical Report (RTO-TR-043); AC/326 (AVT-016)TP/28); Evaluation of methods for solid propellant burning rate measurement, NATO-RTO; Neuilly-Sur-Seine Cedex, France; 2002; pp. 131-184.
- [2] George P. Sutton, Oscar Biblarz; Rocket propulsion elements; John Wiley & Sons, Inc.; New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto; 2001; pp. 418-437.
- [3] N. Kubota; Propellants and explosives. Thermochemical aspects of combustion; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2002; pp. 235 – 236, 491,492.

- [4] Ed. Kenneth K. Kuo, M. Summerfeld; Fundamentals of solid propellant combustion; vol. 90 AIAA series; AIAA Inc.; New York; 1984; p.556.
- [5] N. Eisenreich, H.P. Kugler, F. Sinn; An optical system for measuring the burning rate of solid propellant strands; Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12; 1987; pp. 78-80.
- [6] A. Davenas; Solid rocket propulsion technology; Pergamon Press; Oxford, New York, Seoul; 1993; pp. 111-117.
- [7] F. Cauty, "Non-intrusive measurements methods applied to energetic material regression rate determination", Editors: S. Krishnan, S. K. Athithan; Propellants, explosives, rockets, and guns; Proceedings of The Second International High Energy Materials Conference and Exhibit; December 8-10, 1998; IIT Madras, India; Allied Publishers Limited; New Delhi, Mumbai, Calcutta, Lucknow, Madras, Nagpur, Bangalore, Hyderabad, Ahmadebad; 1998; pp. 3-17.
- [8] NATO Allied Ordnance Publication 57 (AOP-57); Tests for measuring the burning rate of solid rocket propellants with subscale motors; NATO – NSA- Brussels; Belgium; 2010.
- [9] NATO STANAG 4672; Tests for measuring the burning rate of solid rocket propellants with subscale motors; NATO-NSA-Brussels; Belgium; 2010.
- [10] NATO Allied Ordnance Publication 58 (AOP-58); Methods for analyzing data from tests designed to measure the burning rate of solid rocket propellants with subscale motors; NATO – NSA- Brussels; Belgium; 2010.