

# Modyfikacja warunków zapłonu stałych materiałów miotających podczas pirostatycznych badań porównawczych

## *Modification of ignition conditions of solid propellants during comparative closed vessel tests*

**Zbigniew K. Leciejewski**

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Uzbrojenia,  
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, PL

**Streszczenie.** *Badania pirostatyczne mające na celu m.in. porównanie charakterystyk energetyczno-balistycznych stałych materiałów miotających (prochów) o różnym składzie chemicznym masy prochowej i kształcie ziaren prochowych bazują na założeniach geometrycznego modelu spalania, a warunki badań (określone normatywnie m.in. w STANAG 4115, MIL STD 286) sprowadzają się w zasadzie do:*

1. zachowania identycznej gęstości ładowania, co oznacza spalanie tej samej masy różnych prochów w komorze manometrycznej o ściśle określonej objętości;
2. przyjęcia jednej określonej naważki materiału zapłonowego (proch czarny) do rozpalania różnych prochów.

*Tymczasem ciepły model zapłonu zakładający, że temperatura na powierzchni ziarna powinna być większa od temperatury zapłonu prochu oraz, że gradient temperatury w warstwie przypowierzchniowej ziarna powinien być równy gradientowi jaki występuje podczas spalania ustalonego pod danym ciśnieniem, zmusza do krytycznego spojrzenia na dotychczas obowiązujący sposób realizacji zapłonu.*

*W artykule zaprezentowano porównanie wyników obliczeń szybkości spalania jednobazowego prochu jednokanalikowego o różnej wielkości ziaren prochowych w kontekście analizy gęstości strumienia ciepła transferowanego w wyniku spalania masy zapłonowej (prochu czarnego). Przedstawiono propozycję indywidualizacji doboru warunków zapłonu podczas określania szybkości spalania dla prochów różniących się kształtem i wielkością ziaren prochowych.*

**Słowa kluczowe:** badania pirostatyczne, zapłon, wymiana ciepła.

**Keywords:** closed vessel tests, ignition, heat transfer.

## 1. Wstęp

Zapłon stałego materiału miotającego (prochu) jest procesem przejściowym prowadzącym do spalania ustalonego. Generalnie rzecz ujmując zapłon sprowadza się do doprowadzenia odpowiedniej dawki energii do powierzchni spalania prochu w celu wytworzenia takiego stanu chemicznego i cieplnego, który odpowiadałby spalaniu ustalonemu. Problematyka związana z opisaniem i modelowaniem mechanizmu zapłonu i spalania stałych materiałów miotających, a także ustaleniem odpowiednich warunków zapłonu różnych prochów jest stale rozwijana [1,2,5,9,16]. Jest to szczególnie ważny problem w kontekście ilościowego oraz jakościowego modelowania pracy modernizowanych i przyszłościowych prochowych układów miotających.

W warunkach badań pirostatycznych, których celem jest m.in. wyznaczenie szybkości spalania prochu, zapłon tego prochu w komorze manometrycznej realizowany jest z wykorzystaniem niewielkiej masy prochu czarnego [10,13,15]. Wprawdzie transfer energii do powierzchni ładunku prochu badanego następuje za pomocą [11]:

- przewodnictwa cieplnego i konwekcji od gorących gazów zapłonika,
- promieniowania od gorącego gazu i rozżarzonych cząstek stałych materiału zapłonowego (prochu czarnego),
- zderzania się gorących cząstek stałych zapłonika z powierzchnią prochu,

jednakże powszechnie przyjmuje się, że podstawowym sposobem doprowadzania energii do powierzchni prochu jest przewodnictwo cieplne.

Do analizy rozwoju fazy zapłonu wykorzystywany jest cieplny model zapłonu J.H. Fraser'a i B.L. Nichols'a [11], w którym strumień ciepła wewnątrz materiału miotającego o znanych charakterystykach ciepła właściwego  $c_p$ , gęstości  $\delta$ , energii aktywacji  $E$  oraz przewodności cieplnej  $\lambda$  ma np. postać:

$$c_p \cdot \delta \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \quad (1)$$

z poniższymi warunkami granicznymi dotyczącymi powierzchni:

- ogrzewanej, dla której  $x = 0$  i  $t \geq 0$ :

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_g - T) + q_{cs} \quad (2)$$

- oraz zewnętrznej (nieogrzewanej), dla której  $x = +\infty$  i  $t \geq 0$ :

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Powyższy model cieplny zapłonu pozwala określić kryteria zapłonu ziarna ładunku prochowego w następującej postaci:

- temperatura na powierzchni ziarna powinna być większa od temperatury zapłonu;
- gradient temperatury w warstwie przypowierzchniowej ziarna powinien być równy gradientowi, jaki występuje podczas spalania ustalonego pod danym ciśnieniem co wiąże się z występowaniem określonego czasu, jaki upływa od chwili rozpoczęcia oddziaływania termicznego na ziarno do chwili zapłonu.

W przypadku rozpatrywania radiacyjnej wymiany ciepła, strumień ciepła wymieniany pomiędzy produktami spalania powstałymi ze spalania prochu czarnego (o temperaturze  $T_{pcz}$ ), a powierzchnią  $S$  zapalanego prochu (o temperaturze  $T_{0p}$ ) można zapisać jako:

$$\frac{dQ_r}{dt} = S \cdot \varepsilon \cdot C \left[ \left( \frac{T_{pcz}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{0p}}{100} \right)^4 \right] \quad (4)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – emisyjność względna;  $C$  – stała promieniowania ciała doskonale czarnego.

Konwekcyjne przekazywanie ciepła wynika z bezpośredniej styczności gazowych produktów spalania z nagrzewaną powierzchnią prochu. Strumień ciepła wymieniany pomiędzy gazami (o natężeniu strumienia masy  $\rho w$ , lepkości dynamicznej  $\mu$  oraz temperaturze  $T_{pcz}$ ) powstałymi ze spalania prochu czarnego, a powierzchnią  $S$  zapalanego prochu (o temperaturze  $T_{0p}$ ) można zapisać jako:

$$\frac{dQ_k}{dt} = c \cdot \mu^{0,2} \cdot Pr^{-0,6} \cdot \frac{(\rho \cdot w)^{0,8}}{D} \cdot S \cdot (T_{pcz} - T_{0p}) \quad (5)$$

gdzie:  $Pr$  – liczba Prandtla;  $D$  – wymiar charakterystyczny.

Opierając się na teorii Zeldowicza dotyczącej spalania materiałów wysokoenergetycznych [11] można również obliczyć minimalną ilość ciepła niezbędną do jego pobudzenia. Ta minimalna ilość ciepła równa jest iloczynowi masy materiału pobudzanego, jego pojemności cieplnej oraz różnicy charakterystycznych temperatur tzn. temperatury, przy której rozpoczyna się reakcja egzotermiczna oraz temperatury początkowej prochu.

## 2. Dotychczasowa metodyka realizacji pirostatycznych badań porównawczych

Podstawą wszelkich analiz pirostatycznych, które umożliwiają wyznaczenie i porównanie charakterystyk energetyczno-balistycznych prochów (w tym również szybkości spalania) są założenia geometrycznego modelu spalania ziaren prochowych [3,4,10], w którym przyjmuje się, że:

- istnieje chemiczna i fizyczna jednorodność materiału prochowego;
  - wszystkie ziarna prochu są jednakowe pod względem kształtu i wymiarów geometrycznych;
  - zapłon wszystkich ziaren ładunku prochowego jest natychmiastowy i obejmuje całą ich dostępną powierzchnię spalania;
  - strefa spalania – zgodnie z prawem Pioberta - przemieszcza się warstwami równoległymi w głąb prochu.
- Dotychczasowa praktyka realizacji pirostatycznych badań porównawczych szybkości spalania różnych (zarówno pod względem składu chemicznego jak i wielkości ziaren prochowych) prochów zakłada, że porównywalne warunki badań zostają stworzone wtedy, gdy podczas badań:
1. zostanie użyta komora manometryczna o określonej objętości i geometrii przestrzeni roboczej;
  2. do rejestracji ciśnienia gazów prochowych zostanie użyty ten sam układ pomiarowy;
  3. w komorze manometrycznej zostanie spalona ta sama masa porównywanych prochów, co przekłada się na identyczną wartość zastosowanej gęstości ładowania;
  4. zapłon porównywanych prochów będzie realizowany identycznym rodzajem materiału zapłonowego, o tej samej masie dla ustalonej gęstości ładowania.

Powszechnie wiadomo, że założenia geometrycznego modelu spalania znacznie odbiegają od rzeczywistości. O ile założenie o jednorodności chemicznej i fizycznej może znaleźć praktyczne zastosowanie do klasycznych prochów jedno- i dwubazowych (nitrocelulozowych i nitroglicerynowych), to założenie to nie ma racji bytu w stosunku do prochów o różnej szybkości spalania poszczególnych warstw (prochy flegmatyzowane) lub w stosunku do prochów o strukturze nieciągłej (prochy porowate). Również przyjmowanie założenia wskazującego na to, że wszystkie ziarna określonego rodzaju prochu mają ten sam kształt i wymiary geometryczne nie ma uzasadnienia [8] szczególnie w stosunku do prochów drobnoziarnistych stosowanych głównie w amunicji strzeleckiej.

### 3. Badania własne

#### 3.1 Warunki realizacji i wyniki badań

Ze względu na różnorodność stosowanych w dokumentach normatywnych [m.in. 13,15] systemów zapłonowych postanowiono dla wybranych prochów przeprowadzić badania porównawcze szybkości spalania wykorzystując masy zapłonowe wykonane z prochu czarnego w zakresie (0 ÷ 8) g. Odpowiednie badania pirostatyczne wykonano w komorze manometrycznej o objętości 200 cm<sup>3</sup> dla gęstości ładowania 100 kg m<sup>-3</sup>. Przedmiotem badań były trzy jednobazowe prochy jednokanalikowe o zawartości nitrocelulozy odpowiednio 93,0% (proch A), 96,4% (proch B) i 95,4% (proch C), stosowane w amunicji strzeleckiej i artyleryjskiej, których charakterystyki geometryczne ziaren zawiera tab. 1.

**Tab. 1.** Charakterystyki geometryczne ziaren badanych prochów.

Charakterystyki ziaren prochowych (wartości średnie)	Proch A	Proch B	Proch C
Długość [mm]	1,85	6,20	75,0
Średnica kanalika [mm]	0,15	0,25	1,91
Warstwa palna $2e_1$ [mm]	0,33	0,37	1,52
Względna początkowa powierzchnia spalania dla przyjętej gęstości ładowania $S_{0X}/S_{0A}$	1	0,82	0,19

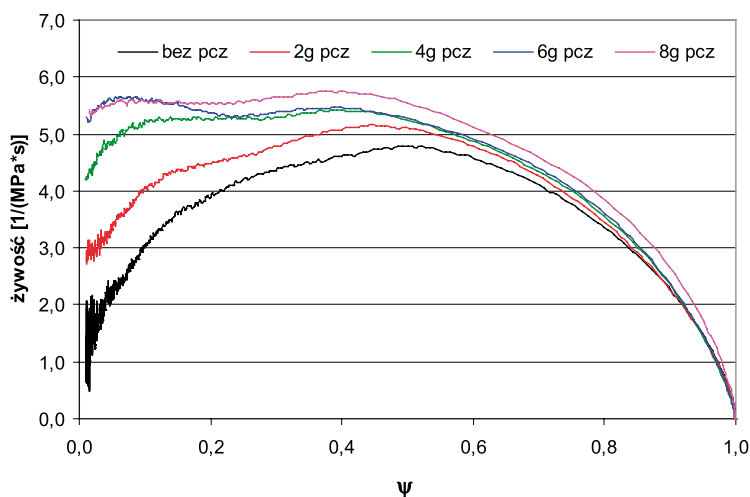
Do pomiaru zmiennego w czasie  $t$  ciśnienia  $p$ , zastosowano układ pomiarowy składający się z przetwornika piezoelektrycznego typu 5QP 6000M firmy AVL-HPI (Austria), wzmacniacza ładunku TA-3/D firmy Vibrometer, przetwornika analogowo-cyfrowego DAS-50 firmy Keithley (USA) oraz komputerowego rejestratora wyników pomiarów.

### 3.2. Analiza wyników badań pirostatycznych

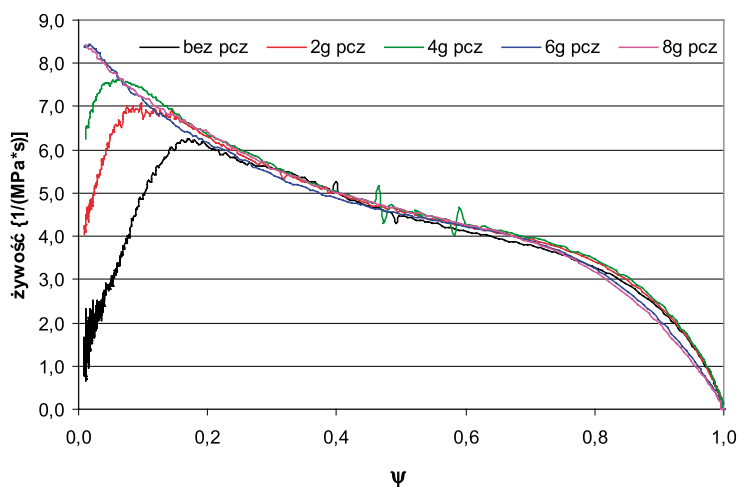
Obiektywny pogląd na rolę jaką odgrywa użycie określonej masy prochu czarnego na sposób zapłonu prochu badanego przedstawiają wyniki analizy dynamiki procesu spalania prochu prowadzone na podstawie funkcji żywości  $G(\psi)$  prochu [10,12].

Wykresy żywości dla prochów A, B i C z zastosowaniem różnych mas zapłonowych zaprezentowano na rys. 1÷3. Dla przypadku idealnego spalania, zgodnie z założeniami modelu geometrycznego (w tym z założeniem, że zapłon wszystkich ziaren ładunku prochowego jest natychmiastowy i obejmuje całą ich dostępną powierzchnię spalania), charakterystyka żywości powinna zmieniać się proporcjonalnie do wielkości dostępnej powierzchni palnej prochu.

Z analizy rzeczywistego procesu spalania przedstawionego na rys. 1÷3 wynika, że w miarę wzrostu zastosowanej masy podsypki zapalającej (prochu czarnego) intensywność dopływu gazów prochowych stopniowo wzrasta, szczególnie w przypadku prochów A i B.



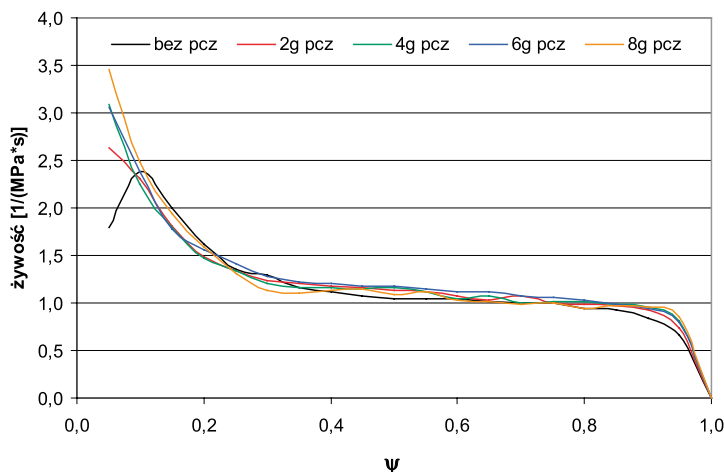
Rys. 1. Wykresy żywości  $G(y)$  dla prochu A.



Rys. 2. Wykresy żywości  $G(y)$  dla prochu B.

Dla tych prochów coraz większa masa prochu czarnego uwalnia, w wyniku jego spalania, coraz większą energię cieplną, co stwarza coraz lepsze warunki do objęcia natychmiastowym zapłonem coraz większej

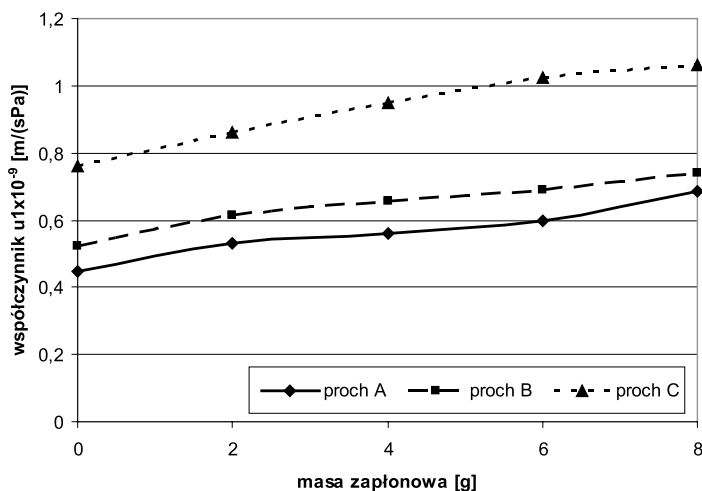
powierzchni spalania drobnych ziaren prochowych i potwierdza wtedy zasadność przyjęcia jednego z założeń geometrycznego prawa spalania mówiącego o natychmiastowym zapłonie na całej powierzchni wszystkich ziaren prochowych w obrębie analizowanego ładunku prochowego



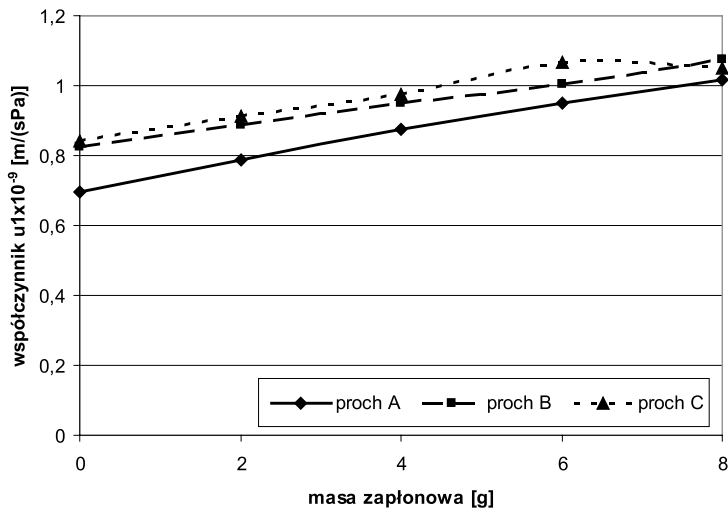
Rys. 3. Wykresy żywości  $G(y)$  dla prochu C.

Analiza powyższych wykresów żywości świadczy również o tym, że najkorzystniejsze warunki zapłonu będą charakterystyczne dla prochu C, dla którego gęstość transferowanego z masy zapłonowej strumienia ciepła (ze względu na najmniejszą – w stosunku do prochów A i B - sumaryczną powierzchnię spalania ziaren) będzie największa.

Dla przyjętych warunków zapłonu, na podstawie zarejestrowanych podczas badań pirostatycznych przebiegów ciśnienia  $p(t)$ , wykonano obliczenia [10,12] współczynnika  $u_1$  liniowej postaci funkcji szybkości spalania  $u(p)$ . Wykresy prezentujące zależność wartości współczynnika  $u_1$  (obliczonych z uwzględnieniem impulsu całkowitego oraz impulsu ograniczonego) od zastosowanej masy zapłonowej zestawiono na rys. 4÷5. Z analizy tych rysunków wynika, że wartość współczynnika  $u_1$  zależy od ustalenia granic całkowania wykresu  $p(t)$  (uwzględnienie lub nie okresu rozpalania i dopalania ziaren prochowych), jak również zależy bezpośrednio od masy zastosowanego materiału zapłonowego (prochu czarnego).



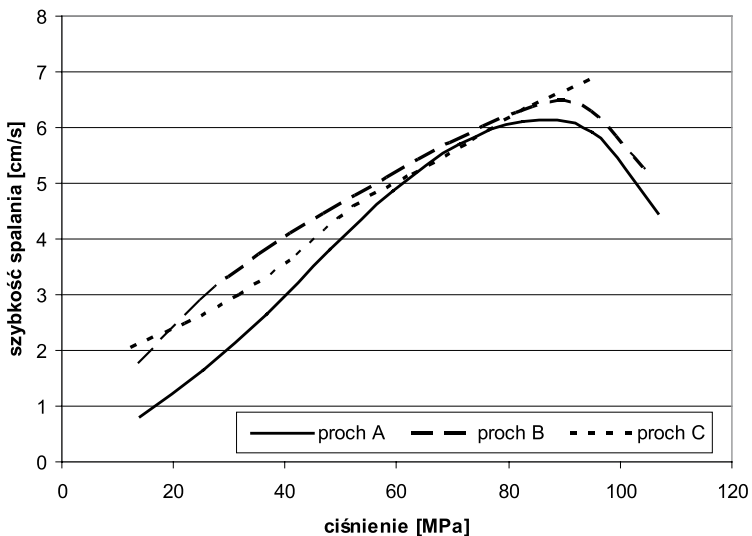
Rys. 4. Zależność wartości współczynnika  $u_1$  (obliczonego z uwzględnieniem impulsu całkowitego) od masy prochu czarnego.



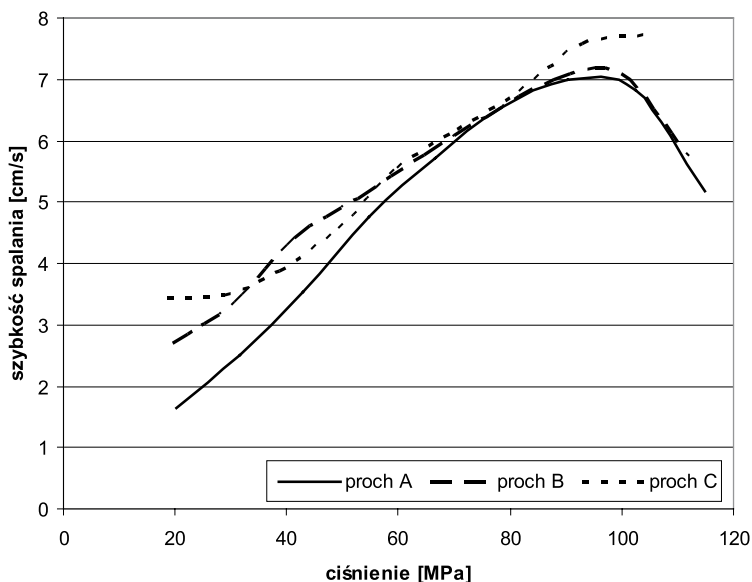
Rys. 5. Zależność wartości współczynnika  $u_1$  (obliczonego z uwzględnieniem impulsu ograniczonego) od masy prochu czarnego.

Niezasadnym wydaje się zatem stosowanie - podczas porównywalnych badań pirostatycznych różnych prochów - jednakowej masy zapłonowej do wyznaczenia współczynnika  $u_1$ . Taki sposób badań i obliczeń można jedynie rozpatrywać dla przypadków spalania prochów z zapłonem w pełni odzwierciedlającym założenia modelu geometrycznego. Z praktyki badawczej Autora [6-8,12] obejmującej badania pirostatyczne prochów wynika, że w zależności od rodzaju kształtu ziarna prochowego, stopnia regularności (powtarzalności) wymiarów geometrycznych ziaren oraz sposobu realizacji zapłonu należy liczyć się z ustaleniem różnych granic całkowania wykresu  $p(t)$ . Nie można zatem stosować jednakowych założeń i warunków metodologicznych do ustalenia szybkości spalania różnych prochów.

Na rys. 6 i 7 zaprezentowano zależności  $u(p)$  dla badanych prochów w przypadku zastosowania prochu czarnego o masie odpowiednio 2 g i 6 g.



Rys. 6. Zależność  $u(p)$  dla masy zapłonowej równej 2 g.



Rys. 7. Zależność  $u(p)$  dla masy zapłonowej równej 6 g.

Wartości  $u(p)$  wyznaczono na podstawie metodyki (zaprezentowanej w [13]), której podstawą jest różniczkowanie eksperymentalnej krzywej  $p(t)$ . Metodyka ta pozwala na otrzymanie znacznie mniejszych - w porównaniu do metody wykorzystującej całkowanie wykresu  $p(t)$  - różnic w wartościach szybkości spalania, ale dopiero poza obszarem rozpalania ziaren prochowych.

#### 4. Uwagi i wnioski końcowe

Z przeprowadzonej analizy mechanizmu zapłonu stałych materiałów miotających wynika, że dla jednakowych warunków realizacji badań pirostatycznych, czyli stosując:

- komorę manometryczną o ściśle określonych wymiarach geometrycznych wewnętrznej komory spalania,
- jednakową masę prochu czarnego jako źródła uwalnianej energii cieplnej,
- jednakową masę prochu badanego,

najkorzystniejsze warunki zapłonu będą charakterystyczne dla tych prochów, dla których gęstość transferowanego z masy zapłonowej strumienia ciepła będzie największa. Zatem podczas realizacji badań pirostatycznych dotyczących porównawczej oceny szybkości spalania prochów należy dążyć do takiego stanu, w którym do porównywalnych warunków badań będzie można zaliczyć nie jednakową masę materiału zapłonowego, ale m.in. jednakową wartość gęstości strumienia ciepła transferowanego do powierzchni spalania badanego prochu. W przypadku kiedy zapłon dwóch różnych prochów (ale o tej samej masie) jest realizowany w wyniku spalania w identycznej komorze manometrycznej tej samej masy zapłonowej to w obu przypadkach mamy wprowadzić do czynienia z tą samą wartością strumienia ciepła  $q_z$  kierowaną do powierzchni spalania, jednakże gęstości strumienia ciepła mogą się różnić z uwagi na inne charakterystyki geometryczne ziaren oraz ich sumaryczną liczbę. Porównywalny strumień ciepła, zgodnie z poniższą zależnością

$$q_z = \frac{Q_z}{t} = S_1 \cdot \lambda_1 \cdot \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_1 = S_2 \cdot \lambda_2 \cdot \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_2 \quad (6)$$

ze względu na różne wartości powierzchni spalania ( $S_1$ ,  $S_2$ ) oraz przewodności cieplnej ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ) prochów, może nie gwarantować ustalenia się w warstwie powierzchniowej prochu odpowiedniego profilu temperatury (zapłonu) na całej dostępnej powierzchni ziaren. Może natomiast wystarczyć do rozpoczęcia procesu zapłonu w wydzielonych ziarnach ładunku prochowego opóźniając niejako proces spalania całego prochu na całej

dostępnej powierzchni spalania i zniekształcając tym samym wyniki badań porównawczych dotyczących szybkości spalania.

Mechanizm przewodzenia ciepła w ciałach stałych jest również podstawą do teoretycznych i eksperymentalnych badań dotyczących ustalenia wielkości wpływających na czas opóźnienia zapłonu  $t_z$  stałych materiałów miotających. Odpowiednia zależność [14]

$$t_z = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot T_p^2 \cdot t^2 \cdot S^2 \cdot Q_z^{-2} \quad (7)$$

potwierdza jednoznacznie, że ustalając warunki zapłonu do badań porównawczych szybkości spalania należy wziąć pod uwagę wartości charakterystyk materiałowych (przewodność cieplna  $\lambda$ , ciepło właściwe  $c_p$ , temperatura pirolizy  $T_p$ ) i geometrycznych (początkowa powierzchnia spalania  $S$ ) prochów oraz warunki oddziaływania gazów zapłonowych na powierzchnię prochu, czyli energię cieplną  $Q_z$  wydzieloną z materiału zapłonowego i czas  $t$  oddziaływania tej energii na dostępną początkową powierzchnię prochu.

## Literatura

- [1] Assovskii I.G., Zakirov Z.G., Leipunskii O.I., *Effect of Ignition on Fuel Combustion*, Combustion, Explosion, Shock Waves, 19, No.1, str.37-42, 1983.
- [2] Assovskii I.G., Zakirov Z.G., Leipunskii O.I., *Ignition and Combustion of Propellant in a Radiating Gas Flow*, Combustion, Explosion, Shock Waves, 22, No.6, str.658-663, 1986.
- [3] Baer P.G., *Practical Interior Ballistic Analysis of Guns*; Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 66 - Interior Ballistics of Guns; str. 37-66; American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington 1979.
- [4] Corner J., *Theory of the Interior Ballistics of Guns*; John Wiley & Sons, Inc., New York 1950.
- [5] Eisenrich N., Fischer T.S., Langer G., Kelzenberg S., Weiser V., *Burn Rate Models for Gun Propellants*, Propellants, Explosion, Pyrotechnics, 27, No. 3, str. 142-149, 2002.
- [6] Leciejewski Z., Surma Z., *Wpływ sposobu rozpalania prochu podczas badań pirostatycznych na jego charakterystyki energetyczno-balistyczne*; Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, Zeszyt 70, str. 113-119, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka 1999.
- [7] Leciejewski Z., Surma Z., *Analiza wyników pirostatycznych badań porównawczych w świetle dokumentów standaryzacyjnych*; Problemy Techniki i Uzbrojenia, Zeszyt 78, nr 3/2001 str. 157-165; Wydawnictwo Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zielonka 2001.
- [8] Leciejewski Z., *Experimental Study of Possibilities for Employment of Linear Form of Burning Rate Law to Characterise the Burning Process of Fine-Grained Propellants*, Central European Journal of Energetic Materials, 5(1), str. 45-61, Institute of Industrial Organic Chemistry, Warsaw 2008.
- [9] Leonov G.N., *Some Aspects of the Effect of the Porosity of the Condensed Phase on the Combustion of Nitrocellulose Propellants*, Combustion, Explosion, Shock Waves, 44, No.5, str. 547-551, 2008.
- [10] Sieriebriakow M., *Balistyka wewnętrzna*, MON, Warszawa 1955.
- [11] Smoleński D., *Spalanie materiałów wybuchowych*; Wydawnictwo MON, Warszawa 1979.
- [12] Sprawozdanie końcowe (pod redakcją S. Toreckiego) z realizacji projektu badawczego KBN nr 0T00A 00811: *Badania kompleksowe właściwości termodynamicznych gazów prochowych i rzeczywistej szybkości spalania prochów oraz weryfikacja zależności obliczeniowych balistyki wewnętrznej*, WAT Warszawa 1999.
- [13] STANAG 4115 Land (Edition 2)/1997 *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*. 1997.
- [14] Taylor M. J., Woodley C. R., Fuller S. R., Gilbert S., Gransden J. I.; *Consideration of the Ignition Delay of Gun Propellants*, Proc. 24<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics, New Orleans, USA, Vol. I, str. 59-66, 2008.
- [15] MIL-STD 286 B, *Propellants, Solid: Sampling, Examination and Testing*
- [16] Woodley C., Taylor M., Wheel H., *Boundary Layer Modelling of the Heat Transfer Process from Igniters to Energetic Materials*, Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Symp. on Ballistics, Vol. I, str. 295-302, Tarragona, Spain, 2007.