

Teoretyczna i eksperymentalna analiza parametrów balistycznych prochu czarnego

Andrzej Papliński, Zbigniew Surma, Andrzej Dębski

Wydział Mechatroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Kaliskiego 2, 00 - 908 Warszawa

Streszczenie: Przeprowadzono badania eksperymentalne i analizę termodynamiczną produktów spalania prochu czarnego. Badania doświadczalne przeprowadzone zostały w komorze manometrycznej. Określono wartość siły prochu (f_p) i wielkość kowolumenu (α_p). Przeprowadzono analizę termodynamiczną produktów spalania. Określono skład chemiczny, energię wewnętrzną produktów spalania przy spalaniu pod stałym ciśnieniem. Przedyskutowano zawartość substancji w fazach skondensowanych w produktach spalania prochu czarnego.

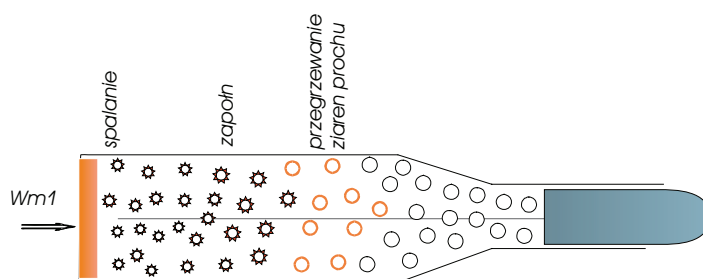
1. Wstęp

Proch czarny jest najstarszym znanym materiałem wybuchowym. W swojej głównej roli, jako podstawowego materiału miotającego, proch czarny został zastąpiony już dość dawno, w drugiej połowie XIX wieku, przez inne materiały wysokoenergetyczne. Tym niemniej, proch czarny pozostał jako składnik ładunków miotających i, pomimo stałego rozwoju i wprowadzania nowych materiałów wybuchowych, rola i miejsce prochu czarnego jako składnika ładunków miotających wydają się być ciągle aktualne.

Podstawowym zadaniem jakie mają do spełnienia pastylki, ładunki pomocnicze wykonywane z prochu czarnego jest zapewnienie efektywnego zapłonu ziaren prochowych głównego ładunku miotającego. W najprostszym podejściu, zadaniem ładunku pomocniczego jest wytworzenie dostatecznej ilości gazów o wysokiej temperaturze tak, aby te wnikały pomiędzy (do wewnątrz) ziaren ładunku zasadniczego zapewniły jego skuteczny zapłon. Podstawowym czynnikiem w tym zakresie jest wielkość masy ładunku pomocniczego, która powinna zapewnić wytworzenie produktów spalania o odpowiedniej objętości (masie).

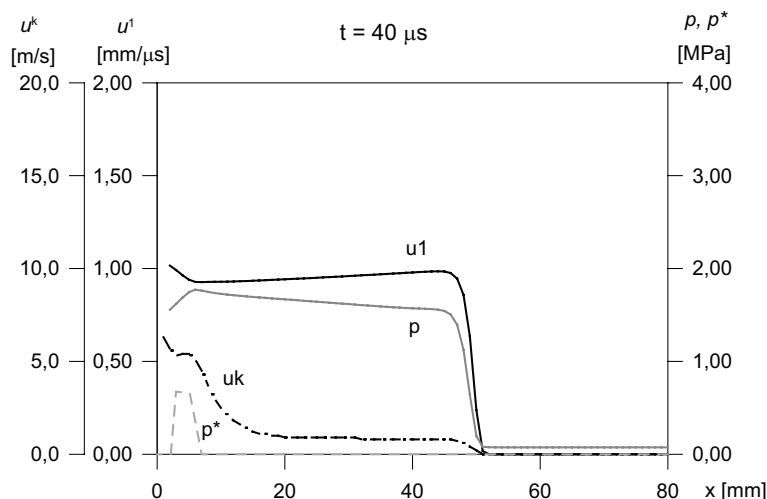
We współczesnych ładunkach miotających stosowane są rozbudowane systemy zapłonu, odpowiednio do wymagań konstrukcyjnych jakie spełniać powinien dany ładunek. Coraz częściej, stosowane są m.in. wielopunktowe systemy zapłonu. Istotnym zadaniem, jakie mają do spełnienia wieloelementowe układy zapłonowe jest uzyskanie określonego tempa i następstwa spalania kolejnych partii ładunku prochowego.

Czasowy rozwój procesu zapłonu i spalania ładunku prochowego opisywany jest przez gazodynamiczne modele balistyki wewnętrznej, np. [1-3]. Na Rys. 1 przedstawiony został, w sposób schematyczny, proces rozwoju zapłonu ładunku prochowego w wyniku wprowadzenia do komory nabojeowej strumienia produktów spalania ładunku zapłonowego ($Wm1$).



Rys. 1. Rozwój procesu spalania w ładunku prochowym, $Wm1$ – strumień produktów spalania ładunku zapłonowego

Gazodynamiczne modele balistyki wewnętrznej pozwalają opisywać rozwój w czasie procesu spalania poszczególnych partii ładunku prochowego, przy uwzględnieniu przepływu gazów prochowych i ruchu spalających się ziaren prochu. Na Rys. 2 przedstawione zostały rozkłady ciśnienia (p) i prędkości masowej (u^1) gazów prochowych oraz prędkości masowej cząsteczek prochu (u^k) w komorze naboju, powstające w wyniku wprowadzenia do komory strumienia produktów spalania ładunku zapłonowego [2].



Rys. 2. Parametry ruchu gazów prochowych (p - ciśnienie, u^1 - prędkość masowa) oraz ziaren prochu (u^k - prędkość ziaren prochu, p^* - ciśnienie międzyziarnowe) powstające po wprowadzeniu strumienia inicjującego, $Wm1 = 1 \text{ g mm}^{-2} \cdot \mu\text{s}$ [2].

Proch czarny stanowi ważny, a często główny składnik ładunków zapłonowych. Prze-prowadzenie poprawnego modelowania i analizy procesu zapłonu głównego ładunku procho-wego przez strumień inicjujący wymaga pogłębionego rozpoznania charakterystyk procesu spalania prochu czarnego oraz określenia parametrów termodynamicznych jego produktów spalania.

W przedstawianej pracy przeprowadzono badania i analizy głównych charakterystyk balistycznych prochu czarnego.

2. Badania eksperymentalne

Do doświadczalnych badań pirostatycznych właściwości energetyczno-balistycznych prochu czarnego użyto komory manometrycznej o pojemności $W_0 = 136,5 \text{ cm}^3$. Ciśnienie p gazów prochowych w funkcji czasu t rejestrowano w układzie pomiarowym składającym się z piezoelektrycznego czujnika ciśnienia typu 8QP 10000 nr 348, wzmacniacza ładunku typu TA-3/D nr 2 i rejestratora z przetwornikiem analogowo-cyfrowym DAS-50. Warunki badań oraz otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Warunki oraz wyniki badań produktów spalania prochu czarnego

Lp.	ω [g]	Δ [kg m^{-3}]	p_m [MPa]	$\frac{p_m}{\Delta}$ [MJ kg^{-1}]
1	6,825	50	15,63	0,3126
2	13,650	100	32,97	0,3297
3	20,475	150	52,00	0,3467

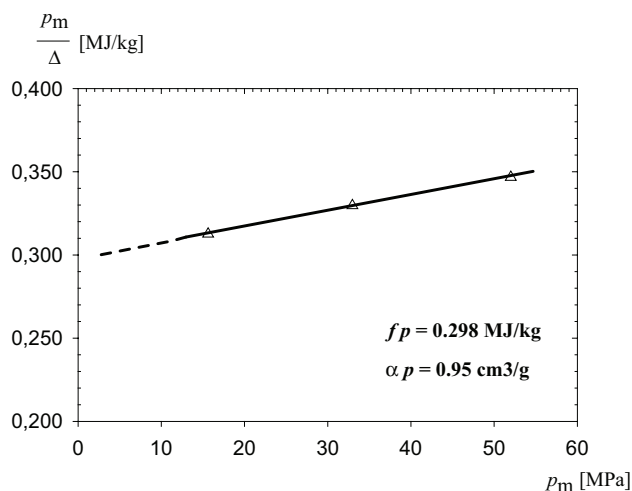
Stosowanie oznaczenia mas ładunku materiału (mass of investigated material) \square Δ gęstość ładunku ($\Delta = \omega/W_0$) (loading density); p_m - ciśnienie maksymalne gazów prochowych (maximal pressure of combustion products).

3. Określenie parametrów balistyczno-energetycznych

Do interpretacji parametrów stanu przyjęto liniową postać równania stanu Noblego-Abela:

$$\frac{p_m}{\Delta} = f_p + \alpha_p \cdot p_m, \quad (1)$$

Wartości charakterystyk energetyczno-balistycznych badanego materiału (f_p i α_p) wyznaczono metodą graficzną, aproksymując otrzymaną doświadczalnie zależność stosunków $\frac{p_m}{\Delta}$ od ciśnienia maksymalnego p_m . Wyniki aproksymacji przedstawione zostały na rys. 3.



Rys. 3. Określenie parametrów równania stanu prochu czarnego

Zauważmy, że określone w ten sposób charakterystyki nie określają w sposób jawny wartości energii wewnętrznej jak również innych parametrów, jak np. wykładnik politropy, które są niezbędne przy prowadzeniu analiz teoretycznych.

4. Analiza składu chemicznego oraz parametrów termodynamicznych produktów spalania prochu czarnego

Przeprowadzono obliczenia składu chemicznego i parametrów termodynamicznych produktów spalania prochu czarnego pod stałym ciśnieniem. Przyjęto następujący skład wyjściowy prochu czarnego:

- KNO_3 74,5%,
- węgiel drzewny 15%,
- siarka 10%,
- woda 0,5%.

Obliczenia wykonywano pakietem programowym MWEQ [4]. Skład chemiczny produktów spalania przedstawiony został w tabeli 2.

Tabela 2. Skład chemiczny produktów spalania prochu czarnego

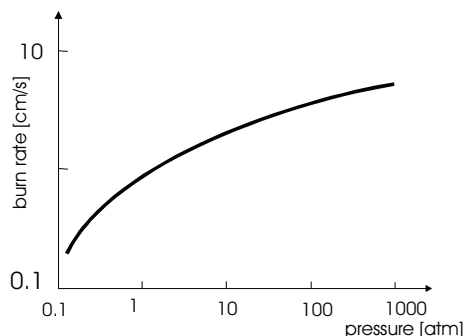
Składnik	Zawartość	Składnik	Zawartość	Składnik	Zawartość
O	$0,5941 \times 10^{-4}$	O ₂	$0,1020 \times 10^{-3}$	H	$0,8904 \times 10^{-2}$
H ₂	0,9411	OH	$0,9910 \times 10^{-2}$	H ₂ O	4,0361
S	$0,1959 \times 10^{-1}$	S ₂	0,6476	S ₃	$0,8317 \times 10^{-2}$
S ₄	$0,2762 \times 10^{-4}$	S ₅	$0,2610 \times 10^{-5}$	S ₆	$0,1566 \times 10^{-7}$
S ₇	$0,7179 \times 10^{-9}$	S ₈	$0,5907 \times 10^{-11}$	SO	0,2053
SO ₂	0,73735	SO ₃	$0,6503 \times 10^{-4}$	S ₂ O	$0,4198 \times 10^{-1}$
H ₂ S	0,7451	H ₂ SO ₄	$0,1108 \times 10^{-6}$		
N	$0,5548 \times 10^{-6}$	N ₂	3,7006	N ₃	$0,1126 \times 10^{-9}$
NO	$0,1599 \times 10^{-2}$	NO ₂	$0,1707 \times 10^{-6}$	N ₂ O	$0,1297 \times 10^{-5}$
NH ₃	$0,6823 \times 10^{-3}$	NS	$0,9731 \times 10^{-4}$		
C	$0,3930 \times 10^{-10}$	CO	4,0964	CO ₂	2,5782
CH ₄	$0,2960 \times 10^{-5}$	HCOOH	$0,2574 \times 10^{-3}$		
K ₂	$0,3630 \times 10^{-8}$	KO	$0,4247 \times 10^{-5}$	K ₂ O	$0,1015 \times 10^{-8}$
K ₂ O ₂	$0,1412 \times 10^{-11}$	KH	$0,1293 \times 10^{-4}$	KOH	$0,3479 \times 10^{-2}$
K ₂ O ₂ H ₂	$0,7076 \times 10^{-6}$	K ₂ SO ₄	$0,1344 \times 10^{-7}$	KNO ₂	$0,3951 \times 10^{-7}$
KNO ₃	$0,2971 \times 10^{-11}$	K ₂ CO ₃	$0,1570 \times 10^{-7}$		
K ₂ CO ₃ (s)	3,6826				

Otrzymana energia wewnętrzna $Q_v = 2,3 \text{ MJ kg}^{-1}$, współczynnik politropy $k = \frac{c_p}{c_v} = 1,15$.

Przy wykonywaniu obliczeń rozpatrzono możliwość występowania w fazie skondensowanej również innych substancji. Stwierdzono, że wytrącanie innych substancji stałych (ciekłych) może nastąpić w niższych temperaturach (przy schłodzeniu produktów spalania w wyniku rozprężania).

5. Analiza szybkości wypalenia pastylki prochu czarnego

Ważnym parametrem określającym warunki działania ładunku wykonanego z prochu czarnego jest jego szybkość spalania. Badania szybkości spalania próbek prochu czarnego wykonywane w różnych ośrodkach wykazują dobrą zgodność. Wynikowa krzywa obrazująca zależność liniowej szybkości spalania od temperatury przedstawiona została na rys. 4.



Rys. 4. Uśredniona zależność liniowej szybkości spalania prochu czarnego od ciśnienia [5]

Zależność przedstawiona na rys. 4 może być aproksymowana wzorem

$$u_1 = 1,72(p/p_0)^{0,164 \pm 0,017}, \quad (2)$$

gdzie: ciśnienie p wyrażane jest w atmosferach; $p_0 = 1 \text{ atm}$.

Na rys. 5 przedstawione zostało zdjęcie fotograficzne ziaren badanego prochu. Wielkość podziałki umieszczonej dla porównania wynosi 1 mm.



Rys. 5. Ziarna badanego prochu czarnego. Powiększenie 50×

W tabeli 3 zestawiono liniowe szybkości spalania prochu czarnego dla wybranych wartości ciśnienia.

Tabela 3. Liniowe szybkości spalania prochu czarnego w zależności od wartości ciśnienia

Lp.	p [MPa]	p [atm]	u^l [mm ms ⁻¹]
1	0,2	2	0,0193
2	0,5	5	0,0224
3	1	10	0,0251
4	5	50	0,0327

W tabeli 4 przedstawiono przykładowe szybkości czasu wypalenia próbek prochu czarnego o grubości warstwy spalania $2e$ przy różnych wartościach ciśnienia.

Tabela 4. Czasy wypalenia próbek prochowych w zależności od wartości ciśnienia

Lp.	p [atm]	u_1 [mm ms ⁻¹]	$2e$ [mm]	Δt [ms]
1	5	0,0224	0,2	4,47
			0,5	11,2
2	10	0,0251	0,2	4,0
			0,5	10,0

Podane wartości mogą być podstawą do oszacowania czasu działania zapłonika zawierającego określoną masę prochu czarnego.

6. Wnioski i uwagi końcowe

- 6.1. W pracy przeprowadzono badania i analizy podstawowych charakterystyk balistyczno-energetycznych prochu czarnego.
- 6.2. Określono wartości siły prochu i kowolumenu, przy wykorzystaniu liniowego równania stanu Noblego-Abela.
- 6.3. Określono skład chemiczny i parametry termodynamiczne (energia wewnętrzna, wykładnik politropy) produktów spalania prochu czarnego. Wielkości te są niezbędne przy prowadzeniu analiz teoretycznych dotyczących procesów rozprężania się produktów spalania.
- 6.4. Rozpatrzono prędkość przereagowania ziaren prochu o typowych wymiarach.

- 6.5. Przeprowadzone rozważania pozwalają na określenie podstawowych charakterystyk procesu spalania i własności produktów spalania prochu czarnego.
- 6.6. Uzyskane wyniki będą podstawą do dalszych badań w tym zakresie.

Literatura

1. A.Papliński, *A two-phase model for transient combustion initiation in granular beds of propellant*, Materiały IV-tej Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej "Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia", Waplewo, 9-11.12.2002, str. 935 – 943.
2. A.Papliński, *Investigation into nonstationary combustion and detonation propagation in granular beds of propellant*, Materiały IV-tej Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej "Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia", Waplewo, 9-11.12.2002, str. 944 - 955.
3. A.Papliński, *Zastosowanie modelu ośrodka dwufazowego do rozwiązania zadania bali-styki wewnętrznej na przykładzie armaty 23 mm*, VI-ta Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa "Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia", Waplewo, 11-13.10.2006, str.776 – 787.
4. A.Papliński, *Określanie składu chemicznego i parametrów termodynamicznych produktów spalania materiałów prochowych*, Materiały XI-tej Konferencji N-T „Problemy rozwoju, produkcji i eksploatacji techniki uzbrojenia”, Problemy Techniki Uzbrojenia 4/2002, str. 53 – 62.
5. K.White, R.A.Sasse, *Some combustion and flame characteristics of black powder*, Proceedings of 18th JANNAF Combustion Meeting, vvol. 2, CPIA Publication 347, 1981, pp. 253-268.