

## WPŁYW ZASTOSOWANEGO W BADANIACH PIROSTATYCZNYCH ZAPŁONU PROCHU NA JEGO SZYBKOŚĆ SPALANIA I FUNKCJĘ TEMPERATUROWĄ

*Podczas realizacji badań pirostatycznych zapłon prochu realizowany jest (np. w STANAG 4115, MIL-STD 286B) w warunkach znacznie odbiegających od tych, jakie występują w rzeczywistych układach miotających. O ile wyznaczone w tych badaniach wartości charakterystyk energetycznych prochów (siła prochu, kowolumen) można bezpośrednio transponować jako dane wejściowe do równań problemu głównego balistyki wewnętrznej to okazuje się, że szybkości spalania prochu jest bardziej wrażliwa na zmienne warunki zapłonu i nie jest możliwe jej bezpośrednie transponowanie do równania dopływu gazów bez wprowadzenia odpowiednich współczynników poprawkowych. W artykule wskazano na osobliwości dotyczące obiektywnego wyznaczenia współczynników prawa szybkości spalania i funkcji temperaturowej prawa szybkości spalania.*

### 1. Wstęp

Proces symulacji zjawiska strzału z broni palnej niezbędny m.in. w trakcie projektowania luf prochowych układów miotających realizowany jest w oparciu o specyficzne dane wejściowe pozwalające rozwiązać układ równań np. termodynamicznego modelu balistyki wewnętrznej [8]. W celu otrzymania, wynikających z rozwiązania tego modelu, krzywych balistycznych niezbędne jest dostarczenie pewnych danych eksperymentalnych takich jak siła prochu  $f$  i kowolumen  $\alpha$  gazów prochowych niezbędnych do obliczenia prędkości  $V$  pocisku i jego przemieszczenia (drogi)  $l$ , jak również średniego (w objętości zapociskowej) ciśnienia  $p$  gazów prochowych działającego na dno pocisku o masie  $m$ , obliczanego w oparciu o poniższą zależność

$$p = \frac{\left( \frac{f\omega\psi}{\Theta} - \sum_j E_j \right) \cdot \frac{f\omega\psi}{T_1}}{\left( W_0 + sl - \frac{\omega}{\delta}(1-\psi) - \alpha\omega\psi \right) \cdot \frac{f\omega\psi}{\Theta T_1}} \quad (1)$$

oraz postaci prawa szybkości spalania  $u(p)$ , w celu obliczenia masowej szybkości spalania prochu; w przypadku stosowania regularnych geometrycznie kształtów ziaren prochowych o znanej początkowej ich powierzchni spalania  $S_1$  i objętości  $\mathcal{A}_1$

oraz znanej zależności  $\sigma$  opisującej zmianę powierzchnię spalania ziarna, charakterystyka ta zwykle [5,6] jest wyrażana jako

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} \cdot \sigma \cdot u \quad (2)$$

Dokładna znajomość wartości danych termodynamicznych jak również szybkości spalania odgrywa istotną rolę w procesie symulacji zjawiska strzału niezbędnego do obiektywnego projektowania wytrzymałościowego luf, jak również wypracowania danych wejściowych do analizy ruchu pocisku na torze jego lotu. Podczas odpowiednich analiz balistycznych prowadzonych w szerokim przedziale temperatur eksploatacji sprzętu uzbrojenia, siłę prochu i kowolumen (współczynniki równania stanu Noble-Abel'a) zwykle traktuje się jako stałe i niezależne od temperatury początkowej  $t_0$  prochu, natomiast zakłada się, że funkcją temperatury początkowej prochu jest szybkość jego spalania co ma odzwierciedlenie we wprowadzeniu odpowiedniego współczynnika temperaturowego (funkcji temperaturowej) do postaci prawa szybkości spalania jak np.:

-  $f_1(t_0)$  odpowiednio do liniowej postaci prawa szybkości spalania [5,6]

$$u = f_1(t_0) \cdot u_1 \cdot p \quad (3)$$

- lub  $f_{BT}$  odpowiednio do potęgowej postaci prawa szybkości spalania [7]

$$u = f_{BT} \cdot \beta \cdot p^n \quad (4)$$

Od lat 80. ubiegłego wieku w pracach badawczo-rozwojowych prowadzonych przez czołowych producentów materiałów miotających i amunicji [1,2] szczególnie dużo uwagi poświęca się na stworzenie prochów, których charakterystyki energetyczno-balistyczne będą całkowicie niezależne lub słabo zależne od zmian temperaturowych otoczenia (eksploatacji). Dominują przy tym dwie koncepcje:

- a) zastosowanie specjalnych regulatorów spalania w stosowanych już dwu- i trzybazowych prochach (o określonym składzie) poprzez powlekanie (żelatynizowanie) warstw wierzchnich (np. technologia SCDB – Surface Coated Double Base Propellants).
- b) rozwój nowych kompozycji prochowych o nazwie LTC (Low Temperature Coefficient Propellant), w których składnik wybuchowy jak DEGDN (diethylenglycoldinitrate) lub NG (nitrogliceryna) jest zastępowany przez nowy energetyczny plastyfikator.

Polski przemysł zbrojeniowy w dalszym ciągu jednak opiera się na amunicji elaborowanej prochem jedno- lub dwubazowym o tradycyjnej technologii wytwarzania, stąd istnieje potrzeba opisanie prawidłowości spalania takiego prochu pod wpływem zmiennych warunków temperaturowych jego eksploatacji, jak również poznania czynników wpływających na obiektywne wyznaczenie szybkości spalania w trakcie prowadzenia badań pirostatycznych. Problem ten Autor poruszył po raz pierwszy w [3] koncentrując się jednak tylko na wynikach badań pirostatycznych prochu jednobazowego, prowadzonych dla normalnych warunków temperaturowych.

## 2. Pirostatyczne badania doświadczalne

### 2.1 Warunki badań

Analizując znane opracowania normatywne można znaleźć różne zalecenia co do stosowania form zapłonu prochu w trakcie prowadzenia badań pirostatycznych. W pierwszym wydaniu (z 1970 r.) porozumienia STANAG 4115 [7] ustalono, że dla komory manometrycznej o objętości wewnętrznej komory spalania  $W_0=700 \text{ cm}^3$ , dla gęstości ładowania  $\Delta=200 \text{ kg/m}^3$  (co odpowiada naważce badanego prochu  $\omega=140 \text{ g}$  umieszczonego luzem w komorze spalania) ustalono, że niezbędna do zainicjowania zapłonu masa prochu czarnego umieszczonego w woreczku bawełnianym powinna wynosić  $\omega_z=1,3 \text{ g}$ , co odpowiada ciśnieniu zapłonu  $p_z=0,59 \text{ MPa}$ . W drugim wydaniu (z 1997 r.) tego dokumentu pomimo wskazania konkretnej objętości komory spalania ( $W_0=700 \text{ cm}^3$ ) nie podaje się wartości gęstości ładowania, dla których należy prowadzić badania pirostatyczne oraz nie podaje się wartości masy materiału inicjującego zapalenie prochu badanego. Amerykańska norma MIL-STD 286B [9] ustala, że dla komory manometrycznej o objętości wewnętrznej komory spalania  $W_0=200 \text{ cm}^3$ , dla gęstości ładowania  $\Delta=100$  i  $200 \text{ kg/m}^3$ , masa prochu czarnego (materiał zapłonowy), zapalającego umieszczony luzem w komorze spalania materiał badany powinna odpowiednio wynosić  $\omega_z = 0,5$  i  $1,0 \text{ g}$  co odpowiada ciśnieniu zapłonu odpowiednio  $p_z= 0,7$  i  $1,6 \text{ MPa}$ .

W stosowanej w WAT wieloletniej praktyce badawczej zasadą było przyjmowanie takiej masy zapłonowej, wykonanej z prochu czarnego, która niezależnie od stosowanej gęstości ładowania generowałaby ciśnienie zapłonu równe  $3 \text{ MPa}$ .

Ze względu na różnorodność stosowanych systemów zapłonowych postanowiono wykonać badania porównawcze szybkości spalania określonego prochu z zastosowaniem mas zapłonowych z zakresu  $0\div 8 \text{ g}$  wykonanych z prochu czarnego. Odpowiednie badania pirostatyczne wykonano w komorze o objętości  $200 \text{ cm}^3$  dla gęstości ładowania  $100 \text{ kg/m}^3$  dla trzech wartości temperatur początkowych prochu  $t_0 = -50^\circ \text{ C}$ ,  $20^\circ \text{ C}$  (jako temperatura normalna) i  $+50^\circ \text{ C}$ . Przedmiotem badań był jednobazowy (o zawartości nitrocelulozy  $93\%$ ), drobnoziarnisty (ziarna w kształcie rurek) proch produkcji krajowej stosowany w amunicji strzeleckiej.

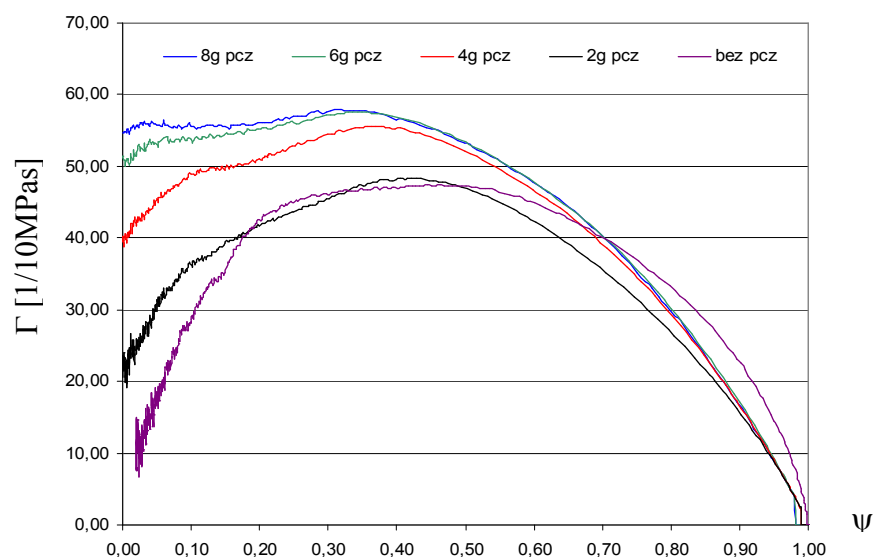
### 2.2 Badania szybkości spalania w temperaturze normalnej

Na podstawie zarejestrowanych w trakcie badań pirostatycznych wykresów  $p(t)$  przeprowadzono obliczenia żywości  $\Gamma$  według poniższej zależności

$$L_{\text{exp}} = \frac{1}{p_{\psi}} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

a odpowiednie wykresy  $\Gamma(\psi)$  przedstawiono na rysunek 1.

Z analizy rysunku tego wynika, że w miarę wzrostu zastosowanej masy podsypki zapalającej (prochu czarnego), warunki zapłonu coraz bardziej odpowiadają założeniom geometrycznego modelu spalania (natychmiastowe spalanie na całej powierzchni ziaren prochowych).



Rys. 1 Wykresy żywości  $\Gamma(\psi)$  badanego prochu z zastosowaniem różnych mas zapłonowych z prochu czarnego

Analizę szybkości spalania badanego prochu przeprowadzono w oparciu o:

- metodę całkowania eksperymentalnego wykresu  $p(t)$  [6] w celu wyznaczenia wartości współczynnika  $u_1$  liniowego prawa szybkości spalania (3)

$$u_1 = \frac{e_{ab}}{I_p} = \frac{e_{ab}}{\int_{t_{\psi_a}}^{t_{\psi_b}} p dt} \quad (6)$$

gdzie:  $e_{ab}$  – grubość warstwy palnej ( $e_1$ ) lub grubość spalonej warstwy prochu w ograniczonym zakresie ( $\psi_a \div \psi_b$ )

$I_p$  – całkowity (dla grubości warstwy palnej) lub ograniczony (dla spalonej warstwy prochu) impuls ciśnienia gazów prochowych;

Ograniczenie w stosunku do impulsu ciśnienia gazów prochowych (oraz grubości spalonej warstwy prochu) wynika z konieczności pominięcia w obliczeniach współczynnika  $u_1$  okresu rozpalania prochu i okresu dopalania ziaren prochowych charakterystycznych dla modeli zapłonu odbiegających od założeń modelu geometrycznego. Granice zakresu stosowalności  $\psi$  mogą być różne w zależności od kształtu i wielkości ziaren prochowych oraz zastosowanego systemu zapłonu.

- metodę różniczkowania eksperymentalnego wykresu  $p(t)$  [7] w celu wyznaczenia ciągłej charakterystyki  $u(p)$  badanego prochu

$$u = \frac{de}{dt} = \frac{de}{d\psi} \cdot \frac{d\psi}{dp} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (7)$$

gdzie:  $de/d\psi$  - określa zmianę grubości spalonej warstwy prochu ze zmianą względnej masy spalonego prochu;

$d\psi/dp$  – określa zmiany względnej masy spalonego prochu ze zmianą ciśnienia (z przekształconej zależności Noble-Abel'a)

$dp/dt$  - szybkość zmian ciśnienia wyznaczana na podstawie eksperymentalnej krzywej  $p(t)$ .

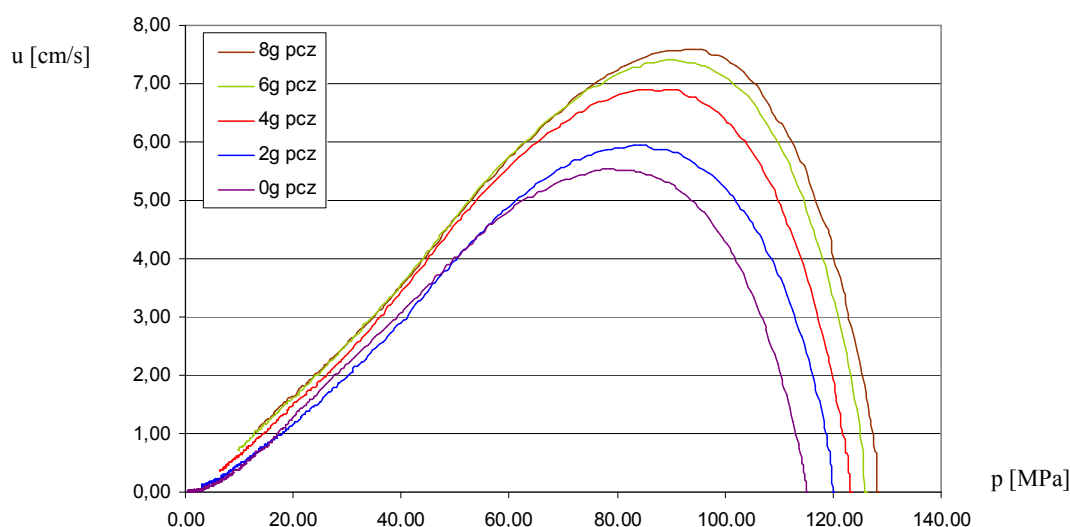
Współczynniki  $\beta$  i  $n$  równania (4) można otrzymać poprzez odpowiednie opracowanie, doprowadzonego do postaci logarytmicznej, wykresu  $u(p)$ .

Wartości obliczonego zgodnie z (6) współczynnika  $u_1$  (dla impulsu całkowitego oraz impulsu ograniczonego) prezentuje tabela 1, natomiast wykresy  $u(p)$  powstałe na podstawie (7) zestawiono na rys. 2.

Tabela 1 Zestawienie obliczonych wartości impulsu oraz współczynnika  $u_1$  badanego prochu dla różnych mas podsypek zapłonowych

Badany parametr	Masa $\omega_z$ prochu czarnego				
	0g	2g	4g	6g	8g
Impuls całkowity [MPas]	0,3898	0,3208	0,2674	0,2313	0,2238
$u_1 \times 10^{-9}$ [m/Pas]	0,417	0,506	0,607	0,702	0,726
Impuls dla $\psi = (0,2 \div 0,8)$ [MPas]	0,1367	0,1312	0,1082	0,0979	0,0941
$u_1 \times 10^{-9}$ dla $\psi = (0,2 \div 0,8)$ [m/Pas]	0,703	0,741	0,897	0,984	1,036

Z przeprowadzonych badań pirostatycznych i analiz wynika, że szybkość spalania badanego drobnoziarnistego prochu, dla danej gęstości ładowania, zależy od ustalenia granic całkowania wykresu  $p(t)$ , jak również bezpośrednio od masy zastosowanego materiału zapłonowego (prochu czarnego). Przy stałej gęstości ładowania rosnąca masa prochu czarnego jest równoznaczna z większą porcją wyzwolonej (dostarczanej) energii, która zostaje przekazywana do stałej powierzchni ziaren prochowych. Tym samym zostają stworzone coraz korzystniejsze warunki do jednoczesnego zapłonu coraz większej liczby drobnych, z reguły nieregularnych geometrycznie ziaren prochowych, czyli do spełnienia jednego z założeń geometrycznego modelu spalania.



Rys. 2 Wykresy  $u(p)$  badanego prochu dla rosnących mas prochu czarnego

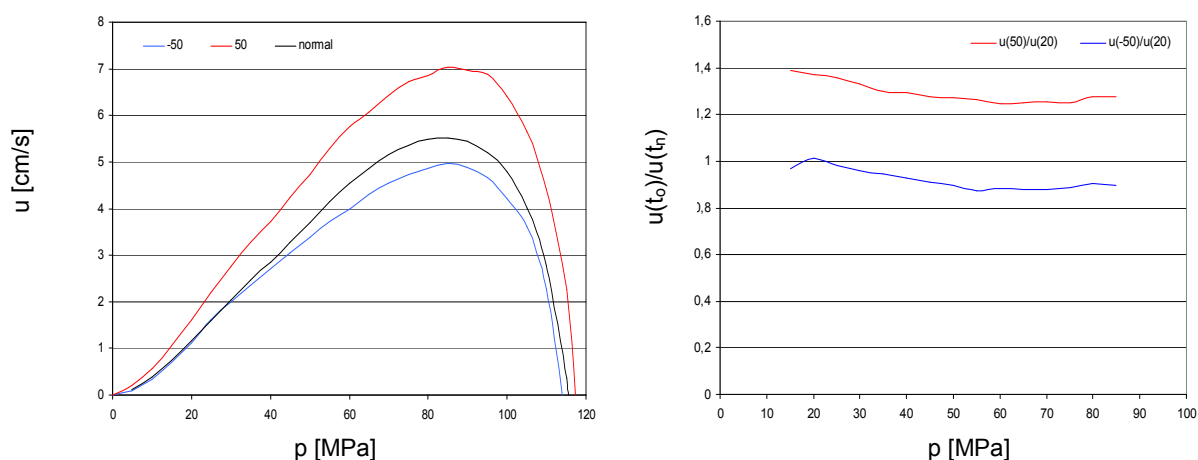
Poczynione obserwacje dotyczące rosnącego - wraz z masą prochu czarnego - współczynnika  $u_1$  liniowego prawa szybkości spalania, mają swoje odzwierciedlenie również w przypadku odpowiednich analiz szybkości spalania  $u(p)$  wynikającej z zależności (7) co prezentuje rysunek 2. Dyskretne, dla danego ciśnienia, wartości szybkości spalania obliczone na podstawie (3) oraz (7) wykazują ich zbieżność w przypadku zastosowania współczynnika  $u_1$  obliczonego na podstawie ograniczonego impulsu ciśnienia gazów prochowych, co potwierdza (dla badanego prochu) prawidłowość pominięcia w obliczeniach okresu rozpalania prochu i okresu dopalania ziaren prochowych.

### 2.3 Badania szybkości spalania dla różnych temperatur początkowych prochów

Odpowiednie badania pirostatyczne przeprowadzono również dla gęstości ładowania równej  $100 \text{ kg/m}^3$  dla trzech różnych ( $-50^\circ \text{C}$ ,  $20^\circ \text{C}$ ,  $+50^\circ \text{C}$ ) temperatur początkowych  $t_0$  prochu. Do zapłonu prochu wykorzystano porównawczo dwa systemy zapłonowe: jeden bez prochu czarnego (tylko główka zapalcza) i drugi z zastosowaniem masy zapłonowej składającej się z 2 g prochu czarnego. Obliczone wartości współczynnika  $u_1$  liniowego prawa szybkości spalania zgodnie z (6) oraz względne (w stosunku do temperatury normalnej) szybkości spalania zestawiono w tabeli 2.

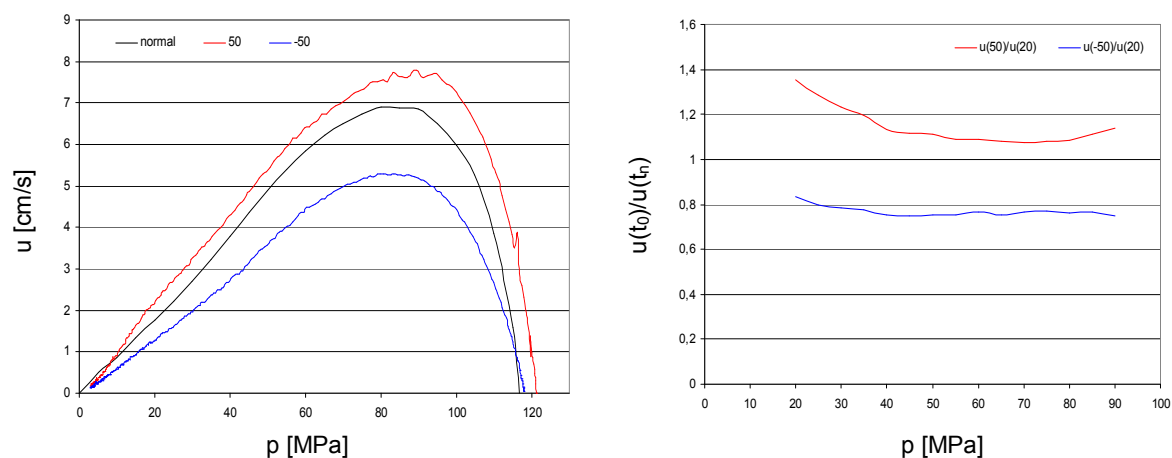
Tabela 2 Porównanie obliczonych wartości współczynników  $u_1 \{ \times 10^{-9} [\text{m}/(\text{Pas})] \}$

Początkowa temperatura prochu	Impuls całkowity				Impuls ograniczony ( $\psi=0,2 \div 0,8$ )			
	Zapłon prochem czarnym		Zapłon bez prochu czarnego		Zapłon prochem czarnym		Zapłon bez prochu czarnego	
	$u_1$	$\frac{u_1(t_0)}{u_1(20^\circ \text{C})}$	$u_1$	$\frac{u_1(t_0)}{u_1(20^\circ \text{C})}$	$u_1$	$\frac{u_1(t_0)}{u_1(20^\circ \text{C})}$	$u_1$	$\frac{u_1(t_0)}{u_1(20^\circ \text{C})}$
$-50^\circ \text{C}$	0,422	0,69	0,402	0,96	0,720	0,78	0,653	0,93
$20^\circ \text{C}$	0,608	1	0,417	1	0,920	1	0,703	1
$50^\circ \text{C}$	0,702	1,15	0,565	1,35	1,015	1,10	0,885	1,26



Rys. 3 Zmiany szybkości spalania (wykres lewy) oraz względnej szybkości spalania (wykres prawy) dla różnych temperatur początkowych prochu (zapłon bez prochu czarnego)

Na rys. 3 i 4 zestawiono wykresy szybkości spalania  $u(p)$  dla różnych temperatur początkowych badanego prochu, obliczone zgodnie z (7) oraz ich odniesienie do szybkości spalania charakterystycznej dla temperatury normalnej.



Rys. 4 Zmiany szybkości spalania (wykres lewy) oraz względnej szybkości spalania (wykres prawy) dla różnych temperatur początkowych prochu (zapłon z prochem czarnym)

Z analizy danych zawartych w tabeli 2 wynika, że zarówno sposób zapłonu jak i zastosowana metoda obliczania impulsu ciśnienia mają wpływ nie tylko na wartość obliczanego współczynnika  $u_1$  prawa szybkości spalania, ale również na wartość funkcji temperaturowej. Odnosząc dyskretne wartości względnych szybkości spalania zawarte w tabeli 2 do wykresów charakteryzujących zmiany względnej szybkości spalania (rys. 3 i 4) uzyskano potwierdzenie, że bardziej wiarygodną metodą określania wartości współczynnika  $u_1$  dla badanego prochu drobnoziarnistego jest metoda wykorzystująca ograniczony impuls ciśnienia, który to impuls nie uwzględnia niestabilności początkowego okresu rozpalania prochu i końcowego okresu dopalania ziaren prochowych. Granice całkowalności impulsu powinny być dobierane indywidualnie dla każdego kształtu prochu i zastosowanego systemu zapłonowego na podstawie analizy eksperymentalnego przebiegu  $p(t)$  i wynikającego z niego wykresu żywości  $\Gamma(\psi)$ .

## Wnioski

Znajomość szybkości spalania prochu w temperaturze normalnej oraz w szerokim zakresie temperatur eksploatacji sprzętu wojskowego jest ważną przesłanką do prawidłowej analizy wyników symulacji pracy prochowych układów miotających, a w ślad za tym do obiektywizacji procesu projektowania luf broni palnej oraz analizy ruchu pocisku na torze jego lotu.

Badania pirostatyczne pozwalają uzyskać informację na temat szybkości spalania prochu w warunkach występowania ciśnień porównywalnych z ciśnieniami rejestrowanymi w prochowych układach miotających. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że warunki zapłonu (wynikające z zastosowanego systemu zapłonu) występujące w rzeczywistych układach miotających znacznie odbiegają od warunków zapłonu stosowanych w badaniach pirostatycznych.

Poza tym wynikająca z badań pirostatycznych szybkość spalania prochu (dla danej gęstości ładowania) zależna jest od masy zastosowanego materiału zapłonowego, która jest „miarą” dostosowania modelu zapłonu do ideału wynikającego z założeń geometrycznego modelu spalania i nie może być traktowana jako obiektywny parametr balistyczny prochu.

Obiektywizacja wyznaczenia szybkości spalania danego prochu oraz jego funkcji temperaturowej wymaga zatem albo dostosowania wykorzystywanego w badaniach pirostatycznych systemu i metody zapłonu do warunków zbliżonych do stosowanych w rzeczywistych układach miotających, albo dodatkowo indywidualnego określenia (dla danego prochu) współczynników korekcyjnych szybkości spalania wynikających z porównania krzywych balistycznych - głównie  $p(t)$  - otrzymanych z badań strzelaniem z symulacyjnymi krzywymi balistycznymi.

*Praca naukowa finansowana ze środków MEiN w latach 2005-2007 jako projekt badawczy własny Nr OT00B01028*

## Literatura

- [1] Jeck-Prosch U., Ryf K.: *High Performance Propulsion Design For Future Kinetic Energy Ammunition*; Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, pp.33-40, 7-11 May 2001, Interlaken, Switzerland
- [2] Langlotz W., Mueller D., Wagner Ch., *LTC Gun Propellants for Use in Machine Gun Ammunition*, Proceedings of 21<sup>st</sup> International Symposium on Ballistics, Adelaide, South Australia, 19-23 April 2004, pp.682-687.
- [3] Leciejewski Z., Surma Z., *Wpływ sposobu rozpalania prochu podczas badań pirostatycznych na jego charakterystyki energetyczno-balistyczne*, Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, Zeszyt 70/1999, str.113-119, Wydawnictwo WITU Zielonka, 1999 r.
- [4] Leciejewski Z., Surma Z., *Analysis of Influence of Propellant Charge Initial Temperature on Ballistic Parameters of Firing*, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Symposium on Weapon Systems, Brno, Czech Republic, 04-06 May 2005, pp. 27-34.
- [5] Torecki S. Leciejewski Z. I inni, Sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr OT00A00811, *Badania kompleksowe właściwości termodynamicznych gazów prochowych i rzeczywistej szybkości spalania prochów oraz weryfikacja zależności obliczeniowych balistyki wewnętrznej*. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1999.
- [6] Torecki S., *Balistyka wewnętrzna*. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1980.
- [7] STANAG 4115 LAND (Edition 2) – *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*.
- [8] STANAG 4367 LAND (Edition 2) – *Thermodynamic Interior Ballistic Model with Global Parameters*
- [9] MIL-STD 286 B, *Propellants, Solid: Sampling, Examination and Testing*