



Badania pirostatyczne szybkości spalania prochu w szerokim przedziale gęstości ładowania

ZBIGNIEW K. LECIEJEWSKI, ZBIGNIEW SURMA

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

Streszczenie. Ze względu na ograniczoną wytrzymałość ścianek komór manometrycznych, badania pirostatyczne stałych materiałów miotających realizowane są zwykle przy gęstościach ładowania $\Delta = (50 \div 250) \text{ kg/m}^3$, znacznie mniejszych od gęstości ładowania występujących w realnie istniejących prochowych układach miotających. Ponadto stosowane w trakcie badań pirostatycznych układy zapłonowe oraz warunki zapłonu, wynikające ze znormalizowanej metodologii badań pirostatycznych (opisanej m.in. w NATOwskim dokumencie standaryzacyjnym STANAG 4115, amerykańskiej normie MIL STD 286B, czy też w niemieckiej normie TL 1376-600) znacznie odbiegają od układów zapłonowych stosowanych w rzeczywistej amunicji. Możliwość analizy szybkości spalania prochu dla dużych gęstości ładowania ($\Delta > 250 \text{ kg/m}^3$) daje specyficzna komora manometryczna VCV (ang. *Vented Closed Vessel*) wyposażona w przeponowy zawór bezpieczeństwa, którego przepona pęka przy ciśnieniu niższym od dopuszczalnego, umożliwiając wypływ gazów prochowych i niespalonych części ładunku prochowego do otoczenia.

W pracy przedstawiono szybkość spalania prochu jednobazowego wyznaczoną na podstawie wyników badań pirostatycznych, realizowanych w konwencjonalnej komorze manometrycznej oraz w komorze z przeponą. Badania w komorze z przeponą realizowano w warunkach gęstości ładowania $\Delta = (300 \div 700) \text{ kg/m}^3$.

Słowa kluczowe: badania pirostatyczne, szybkość spalania, materiały miotające

Symbole UKD: 662.1/4

1. Geneza problemu

Szybkość spalania prochu, w warunkach występowania wysokich ciśnień gazów (rzędu kilkadziesiąt-kilkaset MPa) o dużej temperaturze, jest jedną z istotnych charakterystyk balistycznych pozwalających właściwie opisać, a następnie symu-

lować pracę prochowych układów miotających. Rozpowszechnionym w praktyce modelem matematycznym opisującym zjawisko strzału jest model w ujęciu termodynamicznym [2, 7, 9, 11]. Jedną z podstawowych zależności tego modelu jest równanie dopływu gazów z palącego się ładunku prochowego (o masie ω , gęstości δ , początkowej powierzchni palnej S_1 oraz geometrycznej charakterystyce $\sigma(\psi)$)

$$\omega \frac{d\psi}{dt} = \delta \cdot S_1 \cdot \sigma(\psi) \cdot u(p). \quad (1)$$

Występująca w powyższym równaniu szybkość spalania $u(p)$ opisuje zarówno proces zapłonu, jak i proces zasadniczej fazy spalania prochu. Szybkość spalania prochu, którego temperatura początkowa odpowiada temperaturze normalnej, jest funkcją ciśnienia p gazów otaczających palące się ziarno prochu, a najbardziej rozpowszechnioną i stosowaną w laboratoriach badawczych okazała się potęgowa postać szybkości spalania

$$u = \beta \cdot p^n \quad (2)$$

znana jako równanie Saint Roberta, w którym to równaniu współczynnik β i wykładnik potęgowy n są stałymi, charakteryzującymi daną kompozycję prochową. Specyficzną postacią prawa szybkości spalania (2) jest jej zależność liniowa, w której wykładnik potęgowy $n = 1$. Wówczas szybkość spalania jest wprost proporcjonalna (poprzez stały dla danego prochu współczynnik β) do ciśnienia gazów prochowych. Krytyczną analizę liniowej funkcji szybkości spalania oraz ograniczenia w jej stosowaniu opisano w [3].

Podstawą wyznaczenia potęgowej (z wykładnikiem $0 < n < 1$) postaci szybkości spalania są badania spalania prochu w stałej i zamkniętej objętości (w komorze manometrycznej) z rejestracją ciśnienia p gazów w czasie t , zidentyfikowane wymiary geometryczne ziaren prochowych oraz parametry równania stanu gazów prochowych.

Szybkość spalania prochu wyznacza się pośrednio z przekształconego równania (1) dopływu gazów do postaci

$$u(p) = \frac{\Lambda_1}{S_1 \cdot \sigma(\psi)} \cdot \frac{d\psi}{dp} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (3)$$

dla której danymi wejściowymi są:

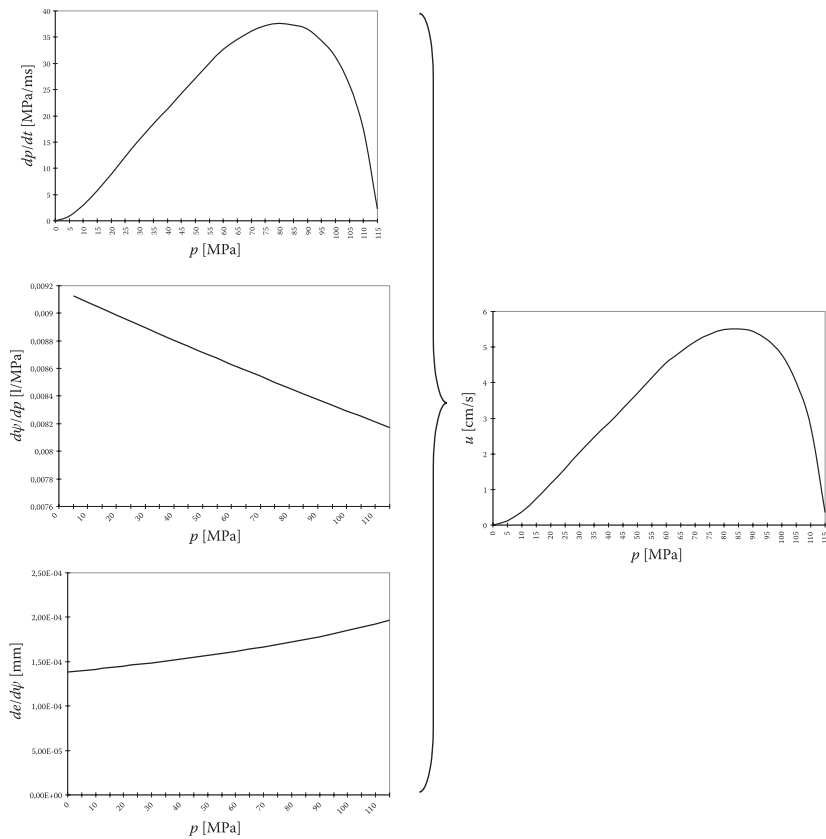
- dp/dt — czynnik wynikający z opracowania eksperymentalnej krzywej $p(t)$;
- $d\psi/dp$ — czynnik wynikający z przekształcenia podstawowego równania pirostatyki (wykorzystującego równanie stanu gazów Noble-Abela) do postaci:

$$\frac{d\psi}{dp} = \frac{f \cdot \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta} \right)}{\left[f + \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot p_\psi \right]^2}; \quad (4)$$

- czynnik wynikający z geometrycznego modelu spalania prochu

$$\frac{\Lambda_1}{S_1} \cdot \frac{1}{\sigma(\psi)} = \frac{de}{d\psi}. \quad (5)$$

Przykładowe wykresy czynników wzoru (3) oraz szybkości spalania $u(p)$ dla jednobazowego prochu rurkowego zaprezentowano na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Składowe wzoru 3 (po lewej) oraz szybkość spalania $u(p)$

Powstały wykres $u(p)$ składa się z dwóch wyraźnie zaznaczonych obszarów: wzrostu i spadku szybkości spalania. Zakres, w którym szybkość spalania maleje (ze wzrostem ciśnienia), nie ma sensu fizycznego, a wynika jedynie z charakteru zmian zarejestrowanej krzywej $p(t)$ w końcowym okresie spalania (dopalania) resztek ziaren prochowych. Do wyznaczenia postaci funkcji (2) wykorzystuje się szybkość spalania $u(p)$ w przedziale dodatnich zmian dp/dt .

Standardowe badania pirostatyczne, które realizowane są zwykle dla gęstości ładowania $\Delta \leq 250 \text{ kg/m}^3$, pozwalają wyznaczyć szybkość spalania dla ciśnień nie przekraczających w praktyce 200 MPa. Prezentowany artykuł ukierunkowany jest zatem na wskazanie problemów związanych z wyznaczeniem szybkości spalania $u(p)$ zarówno dla ciśnień większych od otrzymywanych w trakcie typowych badań pirostatycznych, jak i w fazie zapłonu prochu (w okresie rozpalania ziaren prochowych).

2. Badania pirostatyczne

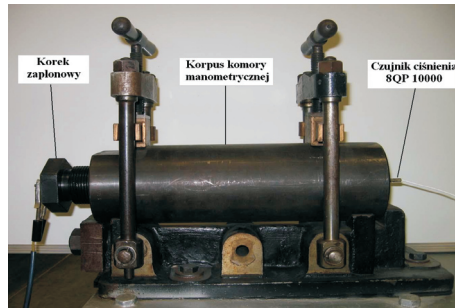
2.1. Warunki realizacji badań pirostatycznych

Ograniczenia konstrukcyjne komór manometrycznych oraz metodyka realizacji badań pirostatycznych nie pozwalają wyznaczyć szybkości spalania prochu dla dużych gęstości ładowania ($\Delta > 250 \text{ kg/m}^3$). Możliwość taką daje specyficzna komora manometryczna VCV (ang. *Vented Closed Vessel*) wyposażona w przeponowy zawór bezpieczeństwa [8]. Przepona tego zaworu pęka przy ciśnieniu gazów prochowych niższym od dopuszczalnego (wynikającego z wytrzymałości komory manometrycznej), umożliwiając wypływ gazów prochowych i niespalonych części ładunku prochowego do otoczenia. Tego typu komora manometryczna jest wykorzystywana [1] głównie do analizy nieregularności mechanizmu spalania ziaren prochowych w warunkach występowania bardzo wysokich ciśnień.

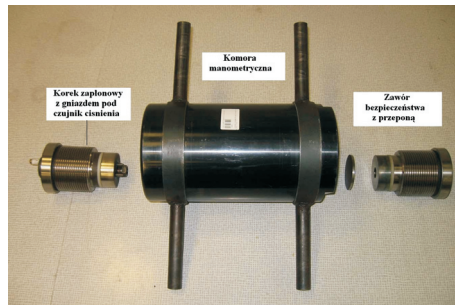
W pracy przedstawiono szybkość spalania prochu jednobazowego, wyznaczoną na podstawie wyników badań pirostatycznych, realizowanych w następujących warunkach:

1. dla gęstości ładowania z zakresu $(75 \div 225) \text{ kg/m}^3$ w konwencjonalnej komorze manometrycznej (rys. 2.1) o objętości $146,5 \text{ cm}^3$;
2. dla gęstości ładowania z zakresu $(300 \div 700) \text{ kg/m}^3$ w komorze manometrycznej VCV o objętości 196 cm^3 wyposażonej w przeponowy zawór bezpieczeństwa (rys. 2.2).

Do pomiaru zmiennego w czasie t ciśnienia p , zastosowano układ pomiarowy z piezoelektrycznymi przetwornikami ciśnienia (firmy AVL-HPI Austria) typu 8QP 10000 (konwencjonalna komora manometryczna) oraz 4QP 6000 (komora manometryczna z przeponowym zaworem bezpieczeństwa), wzmacniaczem ładunku TA-3/D firmy Vibro-Meter oraz rejestratorem cyfrowym.



Rys. 2.1. Komora manometryczna o objętości $146,5 \text{ cm}^3$ na stanowisku badawczym



Rys. 2.2. Komora manometryczna VCV o objętości 196 cm^3

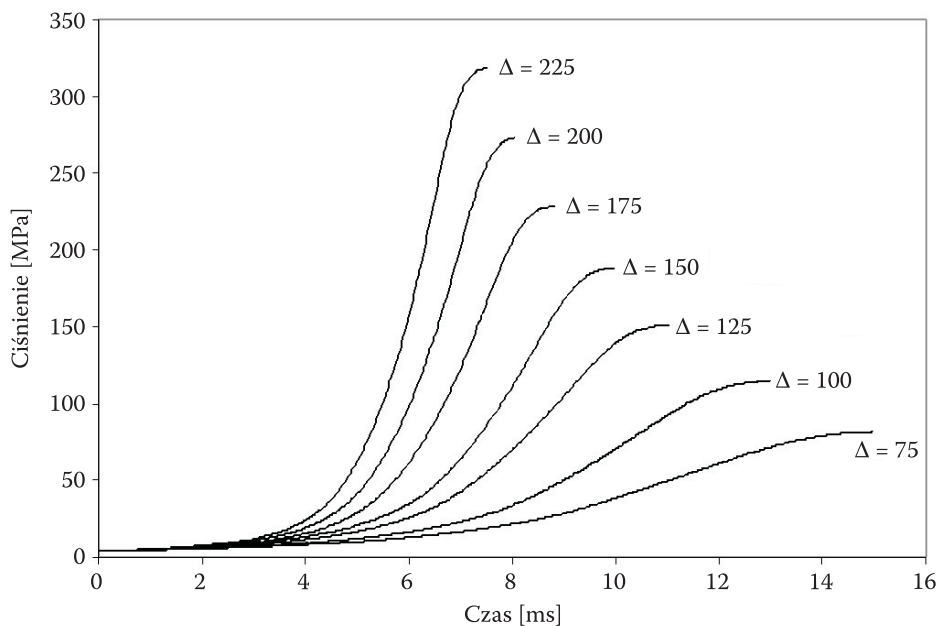
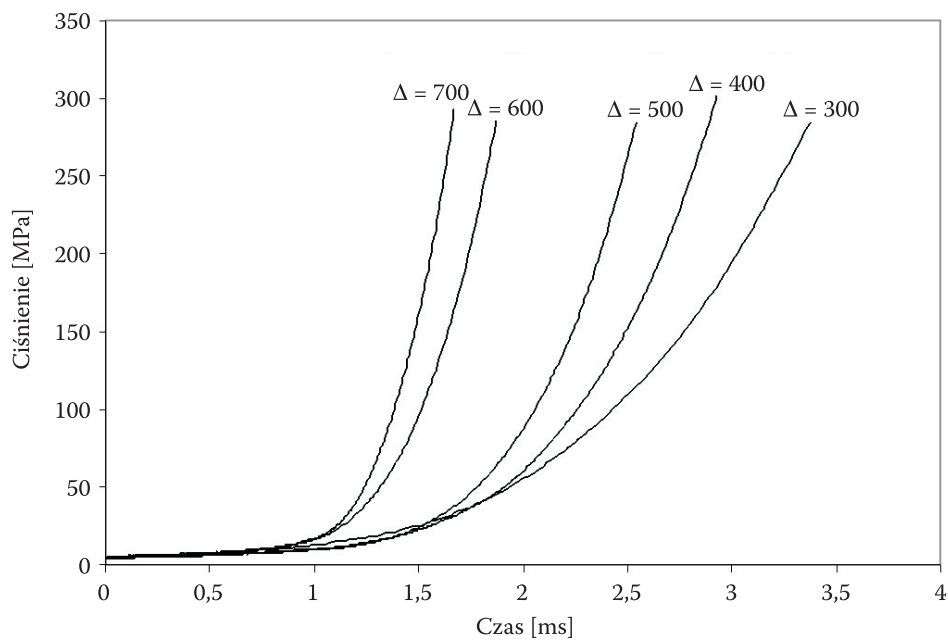
Przedmiotem badań pirostatycznych oraz analiz był jednobazowy proch 7-kanalikowy o znanych charakterystykach geometrycznych ziaren prochowych.

2.2. Wyniki badań pirostatycznych

Zarejestrowane w trakcie badań pirostatycznych wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t w konwencjonalnej komorze manometrycznej oraz komorze z przeponowym zaworem bezpieczeństwa pokazano na rysunkach 2.3 oraz 2.4.

W przypadku komory konwencjonalnej do wyznaczenia szybkości spalania wykorzystuje się te części przebiegu $p(t)$, które odpowiadają rosnącej pochodnej dp/dt .

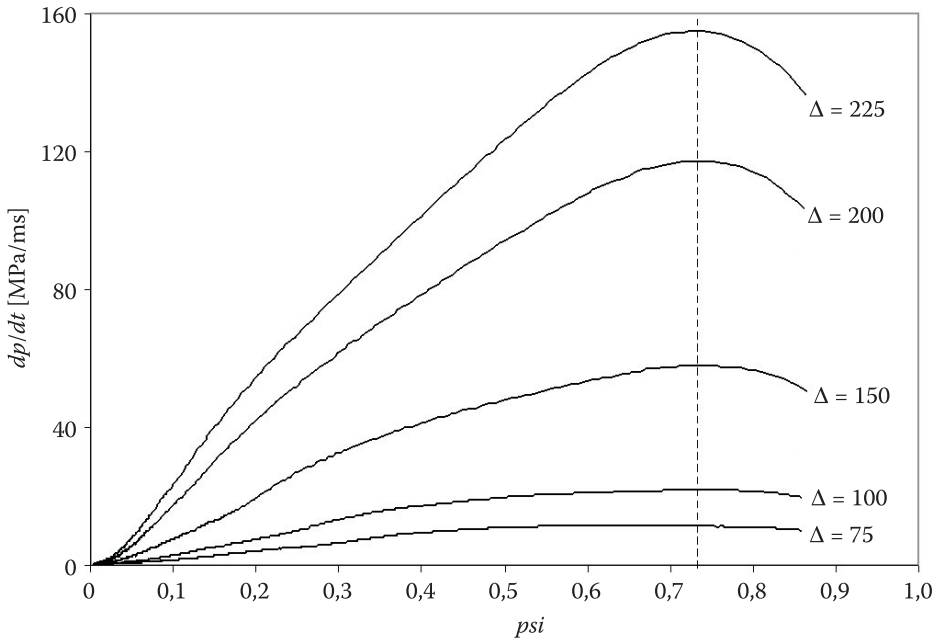
Wyniki badań pirostatycznych, realizowane dla dużych gęstości ładowania Δ (w komorze VCV), umożliwiają wyznaczenie szybkości spalania dla dużych ciśnień p i jednocześnie małych względnych części spalonego ładunku ψ . W tym przypadku wykorzystuje się części wykresów $p(t)$, odpowiadające spalaniu badanego ładunku w stałej i zamkniętej objętości, tj. do chwili pęknięcia przepony.

Rys. 2.3. Wykresy $p(t)$ w konwencjonalnej komorze manometrycznejRys. 2.4. Wykresy $p(t)$ w komorze manometrycznej VCV

2.3. Analiza porównawcza szybkości spalania

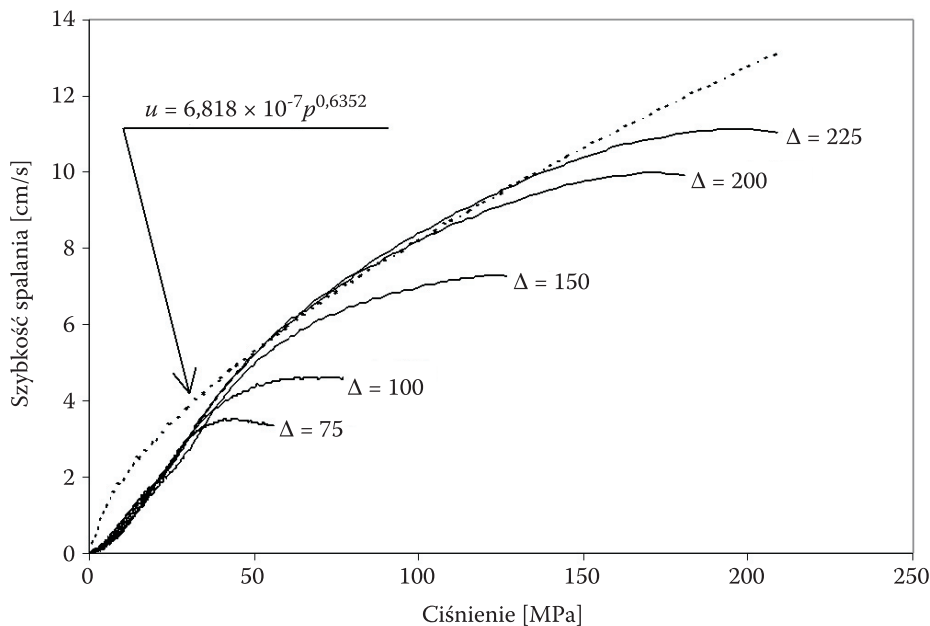
Wyznaczenie szybkości spalania w oparciu o zależność (3) wymaga znajomości wartości stałych równania stanu gazów Noblego-Abela (siła prochu f oraz kowolumen α), wymiarów geometrycznych ziaren prochowych oraz ciśnienia w przedziale odpowiadającym dodatniej pochodnej dp/dt .

Zależność pochodnej dp/dt od względnej części spalonego ładunku prochowego ψ dla badań realizowanych w konwencjonalnej komorze manometrycznej zaprezentowano na rysunku 2.5. Na rysunku tym pionową przerywaną linią zaznaczono wartości maksymalne pochodnych dp/dt , wyznaczające jednoznacznie maksymalne wartości ψ oraz ciśnienia p , które powinny być brane pod uwagę do obliczenia szybkości spalania według zależności (3).



Rys. 2.5. Wykresy dp/dt w funkcji ψ (w zakresie od 0 do rozpadu ziaren) z badań w konwencjonalnej komorze manometrycznej

Do dalszych analiz przyjęto wykres szybkości spalania $u(p)$ wyznaczony na podstawie badań pirostatycznych realizowanych dla gęstości ładowania $\Delta = 225 \text{ kg/m}^3$ (rys. 2.6). Zgodnie z metodyką podaną w [11], współczynnik β i wykładnik potęgowy n zależności (2) należy określać w zakresie odpowiadającym 0,3÷0,7 wartości ciśnienia maksymalnego p_{max} gazów prochowych.



Rys. 2.6. Wykresy $u(p)$ wynikające z badań w konwencjonalnej komorze manometrycznej

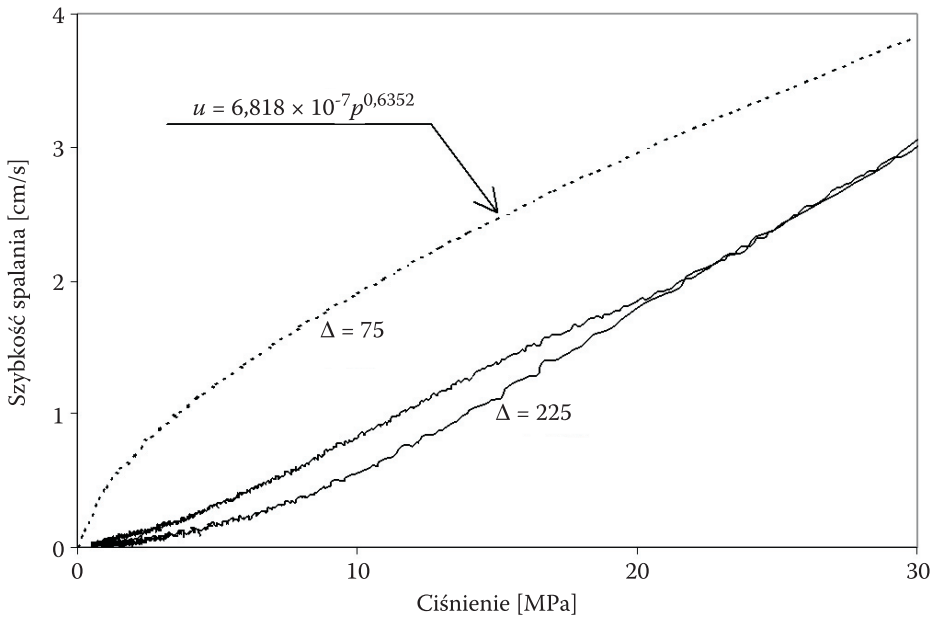
Charakterystyczne punkty wykresu $u(p)$ wybrane z przedziału $0 \div u_{\max}$ (odpowiadające podanemu wyżej zakresowi ciśnienia), przekształca się do postaci logarytmicznej, a powstały w ten sposób wykres $\log(u) = F[\log(p)]$ stanowi podstawę do wyznaczenia wartości współczynnika β i wykładnika n szybkości spalania danej zależnością (2). W oparciu o powyższe ustalenia określono następujące wartości współczynnika β i wykładnika n

$$\beta = 6,818 \cdot 10^{-7} \left[m / (s \cdot Pa^n) \right], \quad n = 0,6352, \quad (6)$$

a przebieg tej funkcji przedstawiono na rysunku 2.6 linią przerywaną.

Tak ustalona, jedna dla całego zakresu ciśnienia, postać szybkości spalania przyjmowana jest następnie do symulacji pracy różnych układów miotających (wykorzystujących badany proch) dysponujących odrębnymi, specyficznymi układami zapłonowymi.

Podobnie jak układy zapłonowe w rzeczywistych układach miotających, tak samo warunki realizacji badań pirostatycznych mogą wpływać na dynamikę procesu spalania prochu, a tym samym na wartość współczynnika β i wykładnika n funkcji ciśnieniowej, szczególnie w początkowym okresie spalania (rozpalanie ziaren prochowych) prochu (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Porównanie, dla początkowego okresu spalania prochu, wykresów $u(p)$ dla skrajnych gęstości ładowania w komorze standardowej z wykresem $u(p)$ wynikającym z (6)

Podobnej analizie poddano również wyniki obliczeń szybkości spalania otrzymane na podstawie funkcji $p(t)$, zarejestrowanych podczas badań w komorze manometrycznej VCV.

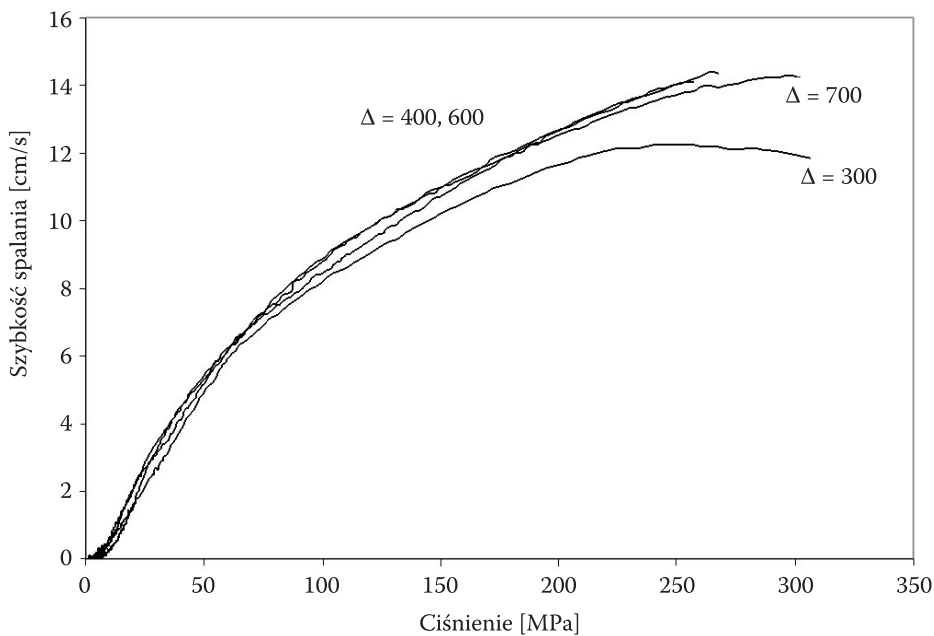
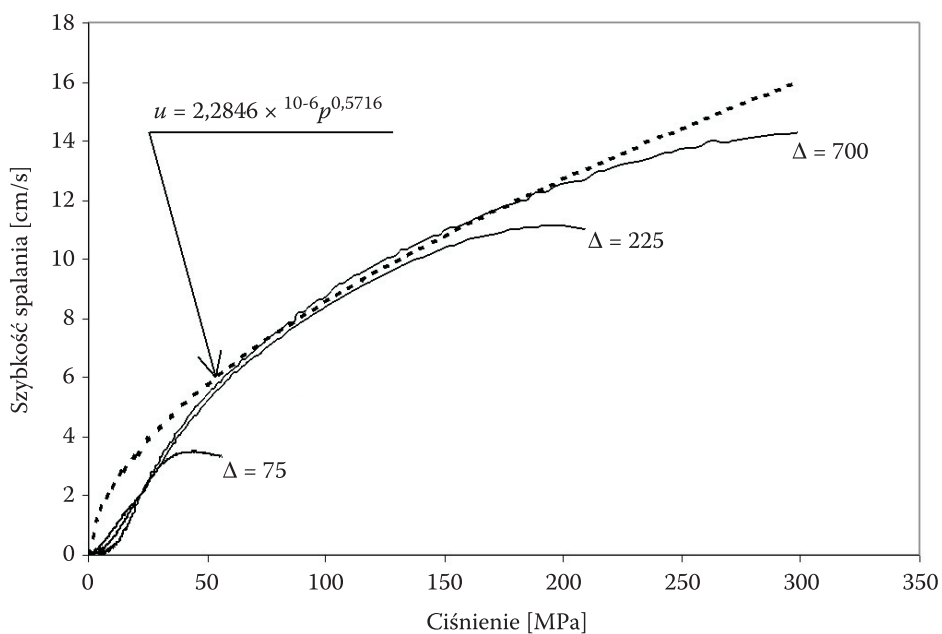
Podczas tych badań zakres ψ był zdecydowanie mniejszy od 0,7. Odpowiednie wykresy $u(p)$ zaprezentowano na rysunku 2.8. Z porównania rysunków 2.6 oraz 2.8 wynika, że stosując komorę manometryczną z przeponowym zaworem bezpieczeństwa istnieje możliwość nie tylko poszerzenia zakresu ciśnienia gazów, ale również zakresu gęstości ładowania, a tym samym wyznaczenie urealnionych wartości β oraz n w zależności (2).

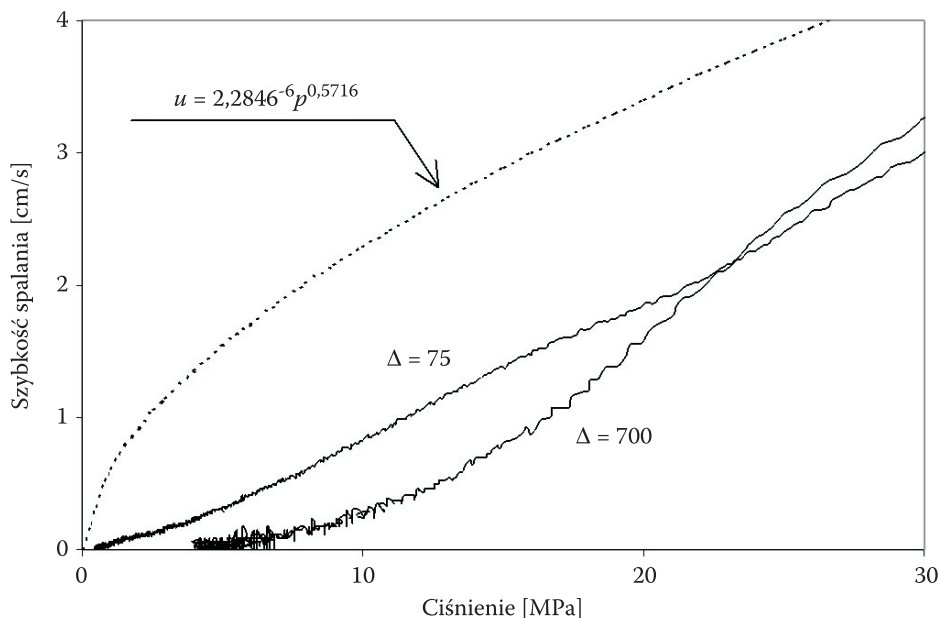
Postępując podobnie jak w przypadku badań pirostatycznych w konwencjonalnej komorze manometrycznej, biorąc za podstawę wyniki $u(p)$ określone dla gęstości ładowania $\Delta = 700 \text{ kg/m}^3$, ustalono następujące wartości współczynnika β i wykładnika n szybkości spalania danej zależnością (2)

$$\beta = 2,2846 \cdot 10^{-6} \left[\text{m}/(\text{s} \cdot \text{Pa}^n) \right], \quad n = 0,5716, \quad (7)$$

a przebieg tej funkcji przedstawiono na rysunku 2.9 linią przerywaną.

Analiza szybkości spalania prochu w okresie początkowym (rysunki 2.7 oraz 2.10) w szerokim zakresie gęstości ładowania pokazuje (dla określonego ciśnienia gazów prochowych) różnice w wartościach szybkości spalania oraz jej systematyczny spadek wraz ze wzrostem gęstości ładowania.

Rys. 2.8. Wykresy $u(p)$ z badań w komorze manometrycznej VCVRys. 2.9. Wykresy $u(p)$ wynikające z badań w konwencjonalnej komorze manometrycznej i w komorze VCV



Rys. 2.10. Porównanie wykresów $u(p)$ dla skrajnych (z obu komór) wartości gęstości ładowania w początkowym okresie spalania prochu z wykresem $u(p)$ wynikającym z (7)

Wyznaczając parametry funkcji szybkości spalania, zwykle koncentruje się uwagę — zgodnie z przyjętą metodyką — na etapie zasadniczego okresu spalania prochu, pomijając jako nieistotne osobliwości dynamiki spalania prochu w początkowej jego fazie [4, 5, 6].

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki badań i analiz wskazują na potrzebę zwrócenia większej uwagi na opis szybkości spalania prochu w jego początkowym okresie (okres pirostatyczny w pracy prochowych układów miotających) zwłaszcza, że stosowane w trakcie badań pirostatycznych układy zapłonowe oraz warunki zapłonu znacznie odbiegają od układów zapłonowych, stosowanych w rzeczywistej amunicji. Bardziej realne odwzorowanie (symulacja) pracy prochowego układu miotającego wymaga zatem, w przypadku stosowania nadal potęgowej postaci prawa szybkości spalania (2), wyznaczenia osobnych wartości współczynnika β i wykładnika n charakterystycznych dla określonych etapów spalania prochu (np. zapłonu i zasadniczej fazy spalania).

3. Uwagi i wnioski końcowe

Polski przemysł zbrojeniowy w przeważającej mierze opiera się na amunicji elaborowanej prochem jedno- lub dwubazowym o tradycyjnej technologii wy-

tworzania, stąd istnieje potrzeba opisanie prawidłowości spalania takiego prochu zarówno pod wpływem zmiennych warunków temperaturowych jego eksploatacji, jak również poznania czynników wpływających na obiektywne wyznaczenie szybkości spalania w trakcie prowadzenia badań pirostatycznych. W wielu przypadkach konwencjonalne badania pirostatyczne pozwalają otrzymać informację na temat szybkości spalania prochu przy ciśnieniach mniejszych od występujących w prochowych układach miotających. Pomocną rolę w tym względzie mogą odegrać badania pirostatyczne, realizowane w komorze z rozrywalną przeponą. Stosując taką komorę istnieje możliwość poszerzenia zakresu ciśnienia gazów, a jednocześnie otrzymywanie dużych ciśnień p przy małych ψ , charakterystycznych w początkowym (pirostatycznym) okresie strzału.

Uwzględniając wyniki przeprowadzonych badań, określenie szybkości spalania prochów wymaga zatem:

1. dostosowania stosowanego w badaniach pirostatycznych sposobu zapłonu do warunków zapłonu występujących w rzeczywistych układach miotających;
2. wyznaczenia wartości współczynnika β i wykładnika n stosownych dla określonych etapów spalania prochu (np. zapłonu i zasadniczej fazy spalania).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2008 jako projekt badawczy nr N501-O/0005/32.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2008 r.

LITERATURA

- [1] D. GRUNE, D. HENSEL, *Burning Behaviour of High Energy Solid Propellants in Closed Vessels at High Loading Densities*, Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics, 26-29 September 1993, Quebec, Canada, 1993, 223-229.
- [2] M. G. MOSS, D. W. LEEMING, C. L. FARRAR, *Land Warfare: Brassey's New Battlefield Weapons and Technology Series into the 21st Century*, vol. 1 — Military Ballistics, Brassey's Ltd., London, UK, 1995.
- [3] Z. LECIEJEWSKI, *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, Published by Institute of Industrial Organic Chemistry, 5(1), Warsaw, 2008, 45-61.
- [4] Z. LECIEJEWSKI, *Singularities of Burning Rate Determination of Fine-Grained Propellants*, Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics, vol. 1, Tarragona, Spain, 16-20 April 2007, 369-376.
- [5] Z. LECIEJEWSKI, Z. SURMA, *Wpływ sposobu rozpalania prochu podczas badań pirostatycznych na jego charakterystyki energetyczno-balistyczne*, Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, z. 70, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka, 1999, 113-119.

- [6] M. RADOMSKI, *Zagadnienie zapłonu drobnoziarnistego ładunku miotającego w amunicji mało-kalibrowej*, Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, z. 50, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, 1993, 67-76.
- [7] M. SIERIEBRIAKOW, *Balistyka wewnętrzna*, MON, Warszawa, 1955.
- [8] R. STELMASIAK, R. WÓJCIK, *Uogólniona metoda badania właściwości balistycznych prochów*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1992.
- [9] S. TORECKI, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa, 1980.
- [10] STANAG 4115 Land (Edition 1), *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*, Military Agency for Standardization, Brussels, 1970.
- [11] STANAG 4367 Land (Edition 2), *Thermodynamic Interior Ballistic Model with Global Parameters*, Military Agency for Standardization, Brussels, 2000.

Z. K. LECIEJEWSKI, Z. SURMA

Investigation of propellant burning rate in broad range of loading density

Abstract. Because of limited durability of walls, closed vessel tests are usually realised for a range of loading density under 250 kg/m^3 (less than in real barrel propellant systems). Adequate formal standards and regulations (STANAG 4115, American standard MIL STD 286B, and German standard TL 1376-600) recommend different conditions of ignition of closed vessel tests. Using a vented closed vessel, equipped with a diaphragm safety valve, analysis of propellant burning rate for high loading densities (above 250 kg/m^3) is possible. Conventional, single-base, seven-tubed propellant was fired to determine burning rate behaviour.

The paper presents the results of burning rate analysis. The burning rate law is expressed as exponential dependence on the pressure ($r = \beta p^\alpha$) where α is the pressure index and β is the burning rate constant of the propellant composition. Comparative closed vessel experiments were realised in a conventional closed vessel (range of loading density of $50 \div 225 \text{ kg/m}^3$) and in a vented closed vessel (range of loading density of $300 \div 700 \text{ kg/m}^3$).

Keywords: closed vessel tests, burning rate, single-base propellants

Universal Decimal Classification: 662.1/4

