



BADANIA PIROSTATYCZNE PROCHU TYPU JA-2

PYROSTATIC TESTS OF JA-2 TYPE POWDER

Radosław TRĘBIŃSKI, Zbigniew LECIEJEWSKI,
Zbigniew SURMA, Bartosz FIKUS

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna
Faculty of Mechatronics and Aviation at the Military University of Technology

DOI 10.5604/01.3001.0010.5115

Streszczenie: Przeanalizowano dane literaturowe dotyczące właściwości balistycznych prochów JA-2. Porównano te dane z wynikami własnych badań prochu LO5460 produkcji Nitrochemie AG. Badania pirostatyczne przeprowadzono w komorze manometrycznej o pojemności 200 cm³. Określono siłę prochu i kowolumen gazów prochowych. Stosując metodykę zaproponowaną przez autorów, dokonano oceny wpływu strat cieplnych na wartości tych parametrów. Określono wartość wykładnika w prawie spalania prochu, a następnie krzywe dynamicznej żywości prochu. Krzywe te dla różnych gęstości ładowania praktycznie pokrywają się ze sobą, co wskazuje na adekwatność fizycznego prawa spalania. Wykazano, że zapłon badanego prochu następuje przed całkowitym spalaniem się ładunku zapłonowego. Uwzględniono to, modyfikując metodę wyznaczania dynamicznej żywości. Wykorzystując wyniki pomiarów geometrii ziaren prochu oraz krzywe dynamicznej żywości, określono współczynnik liniowej szybkości spalania. Uzyskano dobrą zgodność zależności liniowej szybkości spalania od ciśnienia z danymi literaturowymi. Wykazano, że geometryczne prawo spalania jest adekwatne do opisu spalania badanego prochu w zakresie zmian względnej objętości spalonego prochu powyżej 0,2.

Słowa kluczowe: badania pirostatyczne, proch JA-2, siła prochu, kowolumen, dynamiczna żywość, szybkość spalania

1. Wstęp

Badania nad rozwojem technologii prochów wymagają danych referencyjnych dla

Abstract: Literature data concerning ballistic properties of JA-2 powders was studied. The data was compared with results of own tests received for powder LO5460 manufactured by Nitrochemie AG. Pyrostatic tests were carried out in the manometric chamber having the volume of 200 cm³. The force of the powder and the co-volume of powder gases were measured. The influence of thermal losses into these parameters was evaluated by using a methodology proposed by the authors. Exponent value in the powder burning law and curves of dynamical liveliness of the powder were established. The curves actually overlap what shows the adequacy of the physical law of burning. It was proved that the ignition of tested powder takes place prior the complete burning of an igniting charge. It was taken into account at modification of the method for establishing the dynamic liveliness. Exploiting results of measurements for powder grains geometry and the curves of dynamical liveliness a coefficient of linear burning velocity was established. A good compliance with literature data was achieved for the dependence of linear burning rate on the pressure. It was proved that the geometrical burning law is adequate with the description of tested powder burning for changes of relative volume of burned powder above 0.2.

Keywords: pyrostatic tests, powder JA-2, force of powder, co-volume, dynamic liveliness, burning rate

1. Introduction

Research works on development of technologies of powders require a refer-

oceny balistycznych właściwości nowo opracowanych prochów. W prowadzonych badaniach jako proch wzorcowy przyjęto proch JA-2. Należy on do grupy prochów dwubazowych, w których oprócz nitrocelulozy (o zawartości około 13,2% N) i nitrogliceryny występuje jeszcze diazotan dietylenoglikolu (DEGDN). Oryginalny kształt ziaren to ziarna cylindryczne, 7-kanalikowe. Proch JA-2 jest prochem wykorzystywanym do elaboracji 120 mm amunicji czołgowej o oznaczeniu M829A1/A2 z pociskiem APFSDS-T.

W tabeli 1 zamieszczono zaczerpnięte z literatury dane odnośnie podstawowych charakterystyk balistycznych prochu JA-2.

ence data base to evaluate ballistic properties of newly developed powders. Powder JA-2 was taken as the reference in performed investigations. It belongs to a group of double-base powders which apart of nitrocellulose (with content of ca. 13.2% of N) and nitroglycerine also includes diethyleneglycol dinitrate (DEGDN). Original grains have a cylindrical form with 7 holes. Powder JA-2 is used for 120 mm tank ammunition marked by M829A1/A2 with APFSDS-T projectile.

Table 1 includes literature data on basic ballistic characteristics of JA-2 powder.

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki fizyczno-balistyczne prochów typu JA-2

Table 1. Basic physical-ballistic characteristics for JA-2 type of powders

Parametr/ <i>Characteristic</i>	[1]	[2]	[3]	[4]
Gęstość / <i>Density</i> [g/cm ³]	1,565	1,661	-	1,661
Siła / <i>Force</i> [J/g]	1153	1140	1142	1130
Kowolumen / <i>Co-volume</i> [cm ³ /g]	0,98	0,996	-	-
Temperatura płomienia / <i>Flame temperature</i> [K]	3548	3412	3416	3410
c_p/c_v	1,23	1,225	-	-
Ciepło spalania/ <i>Combustion heat</i> [J/g]	4765	-	-	-

W pracy [1] przedstawiono wyniki badań zależności liniowej szybkości spalania prochu JA-2 od ciśnienia. Zależność tę aproksymowano wzorami:

$$u = 0,199p^{0,8784}; u = 0,191p^{0,85838}; u = 0,207p^{0,8425}, [u] = \text{cm/s}, [p] = \text{MPa} \quad (1)$$

Na podstawie wykresów zamieszczonych w pracy [5] można oszacować, że dla ciśnienia powyżej 60 MPa zależność liniowej szybkości spalania od ciśnienia ma postać:

$$u = 0,114p, [u] = \frac{\text{cm}}{\text{s}}, [p] = \text{MPa} \quad (2)$$

Z kolei na podstawie wykresów zamieszczonych w pracy [6] zależność ta dla ciśnienia większego od 100 MPa ma postać:

$$u = 0,147p^{0,93}, [u] = \frac{\text{cm}}{\text{s}}, [p] = \text{MPa} \quad (3)$$

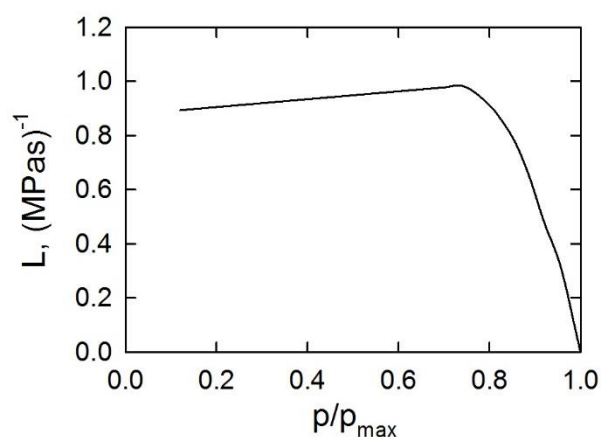
Results of researches on dependence of linear burning velocity on the pressure for powder JA-2 are presented in [1]. The dependence is approximated by equations:

On the basis of graphs included in [5] it may be estimated that for pressures above 60 MPa the dependence of linear burning velocity on the pressure has the form:

On the other hand the graphs included in [6] indicate that this dependence for pressures greater than 100 MPa has the form:

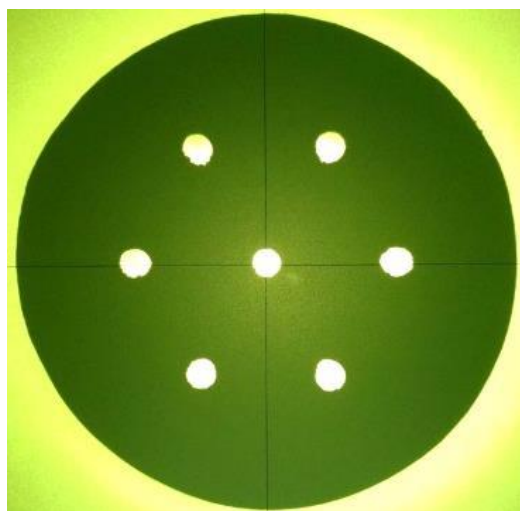
Na rys. 1 przedstawiono wykres dynamicznej żywości prochu JA-2 sporządzony na podstawie wykresu zamieszczonego w pracy [6]. Dynamiczna żywość prochu, określona na podstawie pomiarów wartości ciśnienia p w funkcji czasu t w komorze o pojemności 700 cm^3 , zdefiniowana została jako:

$$L\left(\frac{p}{p_{max}}\right) = \frac{\frac{dp}{dt}}{pp_{max}} \quad (4)$$



Rys.1. Krzywa dynamicznej żywości prochu JA-2, sporządzona na podstawie wykresu zamieszczonego w pracy [6]

Fig.1. Curve of dynamical liveliness for JA-2 powder prepared on basis of the graph included in [6]



Fot. 1. Zdjęcie czołowej powierzchni ziarna prochu LO5460

Photo 1. Picture showing the face of a grain for LO5460 powder

W niniejszej pracy zestawiono przedstawione powyżej dane z wynikami własnych badań pirostatycznych prochu typu JA-2.

2. Badania doświadczalne

W przeprowadzonych badaniach użyto prochu typu JA-2 o nazwie LO5460 produkcji szwajcarskiej firmy Nitrochemie AG. Pomierzone charakterystyki geometryczne ziaren

The present work compares the data presented above with results of own pyrostatic research work for JA-2 type powder.

2. Experimental Investigations

The JA-2 type powder of Switzerland company Nitrochemie AG marked by LO5460 was used in experiments. Geometrical characteristics of powder grains were

prochowych przedstawiono w tabeli 2. Zdjęcie czołowej powierzchni pojedynczego ziarna prochowego pokazano na fot. 1.

measured and are presented in table 2. The picture of the face surface of a powder grain is shown in photo 1.

Tabela 2. Charakterystyki geometryczne ziaren prochu LO5460

Table 2. Geometrical characteristics of LO5460 powder grains

Parametr / Parameter	Wartość / Value
kształt ziarna / Shape of grain	Walcowy / Cylinder
ilość kanalików / Number of holes	7
długość ziarna / Length of grain [mm]	15,5
średnica ziarna / Diameter of grain [mm]	8,9
średnica kanalika / Diameter of a hole [mm]	0,546
grubość warstwy palnej / Thickness of burning layer [mm]	0,893

Wykonano rejestrację czasowych przebiegów ciśnienia $p(t)$ w próbie pirostatycznej w komorze o pojemności 200 cm³ dla gęstości ładowania 100 i 200 kg/m³. Szczegółowy opis stanowiska badawczego przedstawiony został w monografii [12]. Dla każdej gęstości ładowania wykonano 2 próby. Spalanie ładunku prochowego inicjowano za pomocą ładunku prochu czarnego. Naważka prochu czarnego była dobierana w taki sposób, aby ciśnienie zapłonu wynosiło 3 MPa.

Time changes of pressure $p(t)$ were recorded for a pyrostatic trial in the chamber with capacity of 200 cm³ and for the loading densities of 100 and 200 kg/m³. Detailed description of the experimental setup was presented in [12]. Two trials were performed for each loading density. The burning of the powder charge was initiated by a charge of black powder. The weighed portion of the black powder was matched to provide the pressure of ignition of 3 MPa.

3. Określenie parametrów energetycznych

3. Establishing Energetic Parameters

Dla określenia parametrów energetycznych prochu wykorzystano równanie stanu Abela-Noblego (AN):

Energetic parameters of the powder were established by using Abel-Noble (AN) state equation:

$$p(v - \alpha_p) = nRT \quad (5)$$

i równanie wirialne (W):

and virial equation (W):

$$pv = nRT(1 + \beta v^{-1}) \quad (6)$$

Symbole użyte w równaniach oznaczają: p – ciśnienie, v – objętość właściwa, n – liczba moli, R – uniwersalna stała gazowa, T – temperatura, α_p – kowolumen, β – współczynnik wirialny.

Symbols used in equations stand for: p – pressure, v – specific capacity, n – number of mols, R – universal gas constant, T – temperature, α_p – co-volume, β – virial coefficient.

Przy założeniu adiabatyczności procesu spalania, z równań tych można wyprowadzić

Assuming adiabatic character of burning process the relations for maximal pres-

związki określające maksymalną wartość ciśnienia po spaleniu prochu:

sure after completing the burning of powder may be derived from these equations:

$$p_{max} - p_z = \frac{f\Delta}{1 - \alpha_p\Delta} \quad (7)$$

$$p_{max} - p_z = F\Delta(1 + \beta\Delta) \quad (8)$$

Symbol Δ oznacza gęstość ładowania, p_z – ciśnienie zapłonu. Dla określenia wartości siły prochu f , współczynnika F , kowolumenu α_p i współczynnika wirialnego β możemy przedstawić powyższe związki w postaci liniowych funkcji gęstości ładowania:

Symbol Δ means the density of loading, p_z – ignition pressure. The above relations may be presented in a form of linear functions of loading density to establish the powder force f , coefficient F , co-volume α_p and virial coefficient β :

$$\frac{\Delta}{p_{max} - p_z} = \frac{1}{f} - \frac{\alpha_p}{f}\Delta \quad (9)$$

$$\frac{p_{max} - p_z}{\Delta} = F + F\beta\Delta \quad (10)$$

Po obliczeniu wartości współczynników regresji liniowej, wyznaczamy wartości f , F , α_p i β . Wartości określone dla badanego prochu podano w tabeli 3.

The values of f , F , α_p and β are calculated after calculation of coefficient of linear regression. The values established for the tested powder are given in table 3.

Tabela 3. Charakterystyki energetyczne prochu LO5460

Table 3. Energetic characteristics of LO5460 powder

Parametr / Parameter	Wartość / Value
siła prochu / Powder force [J/g]	1020
współczynnik F / Coefficient F [J/g]	981
kowolumen / Co-volume [cm ³ /g]	1,359
współczynnik wirialny / Virial coefficient [cm ³ /g]	2,245

Porównanie wartości charakterystyk energetycznych prochu LO5460 z wartościami z tabeli 1 wskazuje, że uzyskana wartość siły prochu jest wyraźnie zaniżona w stosunku do wartości podawanych w literaturze dla prochu JA-2. Z kolei wartość kowolumenu jest wyraźnie większa. Powyższe rozbieżności mogą wynikać z wpływu strat cieplnych.

Wpływ strat cieplnych oszacowano zgodnie z metodyką zaproponowaną przez autorów w pracy [7]. Bazuje ona na wartości współczynnika wymiany ciepła, określonej na pod-

The comparison of energetic characteristics of LO5460 powder with values included in table 1 shows that the received value of the powder force is lower than the literature values for JA-2 powder. On the other hand the value of co-volume is significantly greater. The above discrepancies may be caused by thermal losses.

The influence of thermal losses was estimated according with a methodology proposed by authors in [7]. It is based on the value of the heat exchange coefficient estab-

stawie analizy opadającej części krzywej $p(t)$. Odpowiada ona ochłodzeniu się gazów prochowych po zakończeniu palenia się ładunku prochowego. Krzywą tą aproksymuje się funkcją wykładniczą:

$$p(t) = p_d \exp[-(t - t_d)/t_r] \quad (11)$$

Osiągnięcie ciśnienia maksymalnego nie oznacza końca palenia się prochu, a jedynie zrównanie się przyływu energii na skutek spalania prochu i strat cieplnych. Dlatego wartości t_d i p_d odpowiadają punktowi na opadającej części krzywej $p(t)$, dla którego można przyjąć, że spalanie prochu zakończyło się. Wybierając te wartości kierujemy się położeniem punktu przegięcia na opadającej części krzywej $p(t)$.

Spadek wartości rejestrowanego ciśnienia nie jest spowodowany jedynie przez wychładzanie się gazów prochowych. Układ do rejestracji ciśnienia, to obwód elektryczny typu RC. Wysokość sygnału zmniejsza się na skutek odpływu ładunku z czujnika piezoelektrycznego. Dlatego wartość t_r , można przedstawić jako:

$$\frac{1}{t_r} = \frac{1}{t_h} + \frac{1}{t_q} \quad (12)$$

Symbol t_h oznacza stałą czasową procesu oddawania ciepła przez gazy prochowe, symbol t_q oznacza stałą czasową obwodu RC. W pracy [7] pokazano, że zależność (12) można przedstawić w postaci:

$$\frac{1}{t_r} = \frac{a_h}{\Delta} + \frac{1}{t_q}, \quad a_h = \frac{hA(T_f - T_0)}{QV} \quad (13)$$

Symbol Q oznacza ciepło spalania prochu, T_f – temperaturę płomienia, T_0 – początkową temperaturę ładunku prochowego, h – współczynnik przejmowania ciepła, A – pole wewnętrznej powierzchni komory, V – pojemność komory.

Sporządzając wykres zależności $1/t_r(1/\Delta)$ można określić wartości a_h i $1/t_q$. Otrzymano wartości $a_h = 135,4 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $t_q = 0,42\text{s}$. Kierując

się na analizę opadającej części krzywej $p(t)$. Odpowiada ona ochłodzeniu się gazów prochowych po zakończeniu palenia się ładunku prochowego. This curve is approximated by an exponential function:

When the maximal pressure is reached the powder still burns and the energy provided by the burning powder equals to thermal losses. For this reason the values t_d and p_d correspond to the point on the dropping part of $p(t)$ curve for which it may be assumed that the burning of the powder has ended. These values are established on the base of position of a bending point on the dropping part of $p(t)$ curve.

The fall of recorded pressure is not exclusively caused by the cooling of powder gases. A circuit used for recording the pressure is an electric RC circuit. The level of signal decreases in effect of piezoelectric sensor discharging. For that the value t_r may be represented as:

Symbol t_h means a time constant for powder gases heat dissipation process and symbol t_q is the time constant of RC circuit. It was shown in [7] that the dependence (12) may be presented in the form:

Symbol Q is the heat of powder combustion, T_f – temperature of flame, T_0 – initial temperature of powder charge, h – heat intercepting coefficient, A – internal surface of the chamber, V – capacity of the chamber.

The values a_h and $1/t_q$ may be determined by preparing the graph of dependence $1/t_r(1/\Delta)$. The values were $a_h = 135.4 \text{ kg/m}^3\text{s}$,

się danymi z tabeli 1 przyjęto $Q = 4765$ J/g, $T_f = 3410$ K, $T_0 = 300$ K, $V/A = 0,007$ m. Otrzymana wartość współczynnika wymiany ciepła wyniosła $h = 1457$ J/m²sK.

Wykorzystując wartość h , policzono metodą opisaną w pracy [7] skorygowane wartości ciśnienia maksymalnego. Wyznaczone na ich podstawie wartości siły prochu i kowolumenu wyniosły odpowiednio $f = 1117$ J/g, $\alpha_p = 1,096$ cm³/g. Są to wartości znacznie bliższe wartościom podawanym w literaturze niż wartości określone bez uwzględnienia strat cieplnych.

4. Określenie szybkości spalania

4.1. Określenie wartości wykładnika w prawie spalania

Dla wyznaczenia wartości wykładnika w prawie spalania prochu wykorzystamy fizyczne prawo spalania [8]:

$$\frac{d\psi}{dt} = \Gamma(\psi)p_0x^\alpha, \quad x = \frac{p}{p_0} \quad (14)$$

Użyte symbole oznaczają: t – czas, ψ – względna masa (objętość) spalonego prochu, p_0 – ciśnienie odniesienia (przyjęto 0,1 MPa), Γ – dynamiczna żywość prochu, α – wykładnik. Wynikająca z powyższego wzoru definicja dynamicznej żywości różni się od definicji określonej wzorem (4). Aby odróżnić obie wielkości, będą one nazywane odpowiednio: dynamiczna żywość Γ i dynamiczna żywość L .

Dla wyznaczenia wartości wykładnika α skorzystamy z metody zaproponowanej w pracy [7]. Wykorzystuje ona wartości $d\psi/dt$ określone dla tej samej wartości ψ w doświadczeniach z różną wartością gęstości ładowania. Polega ona na sporządzeniu dla ustalonych wartości ψ wykresów funkcji:

$$w(\psi, x) = \log\left(\frac{d\psi}{dt}\right) = \log(\Gamma(\psi)p_0) + \alpha \log x \quad (15)$$

Aproksymując wykresy linią prostą wyznacza się wartość wykładnika w prawie spalania α . Wartości pochodnej $d\psi/dt$ określamy za pomocą wzorów:

$t_q = 0.42$ s. Regarding the data from table 1 it was accepted $Q = 4765$ J/g, $T_f = 3410$ K, $T_0 = 300$ K, $V/A = 0.007$ m. The received value of the heat exchange coefficient was $h = 1457$ J/m²sK.

Using the value of h and the method described in [7] the corrected values of maximal pressure were calculated. The values of powder force and co-volume established on this basis were respectively $f = 1117$ J/g, $\alpha_p = 1.096$ cm³/g. These values are much closer to literature data than those without considering the thermal losses.

4. Determination of Burning Rate

4.1. Determination of Exponent Value for the Law of Burning

In order to establish the exponent value in the law of powder burning the physical law of burning is used [8]:

Used symbols stand for: t – time, ψ – relative mass (volume) of burnt powder, p_0 – reference pressure (0.1 MPa is taken), Γ – dynamical powder liveliness, α – exponent. Definition of dynamical liveliness resulting from the above relation differs from definition described by formula (4). In order to distinguish the two values they will be named respectively: dynamical liveliness Γ and dynamical liveliness L .

In order to find out the value of exponent α the method proposed in [7] is used. It uses values of $d\psi/dt$ determined in experiments for the same value of ψ at different values of loading density. It is based on charting, for the set values of ψ , the function:

Approximating the graphs by lines the value of exponent α in the law of burning is determined. The values of derivative $d\psi/dt$ are determined by formula:

$$\frac{d\psi}{dt} = \left(\frac{dp}{d\psi}\right)^{-1} \frac{dp}{dt} \quad (16)$$

Wartości pochodnej dp/dt określamy różniczkując wygładzone eksperymentalne krzywe $p(t)$. Pochodną $dp/d\psi$ obliczamy korzystając ze wzorów wynikających z wirialnego równania stanu:

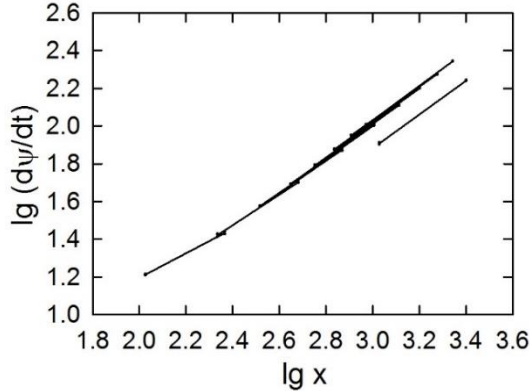
The values of derivative dp/dt are determined by differentiation of smoothed curves $p(t)$. Derivative $dp/d\psi$ is calculated by using the formula originating from the virial equation of the state:

$$\frac{dp}{d\psi} = \frac{F}{v^2\psi^2} \left(1 + \frac{2\beta}{v}\right) \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}\right) \quad (17)$$

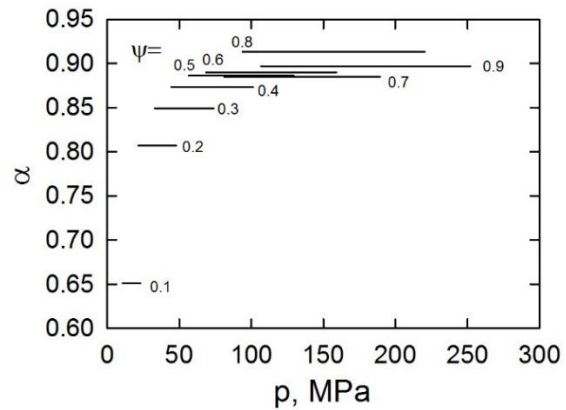
$$p_s = p - p_z, \quad v = \frac{F + \sqrt{F^2 + 4p_s F \beta}}{2p_s}, \quad \psi = \frac{\delta \Delta^{-1} - 1}{\delta v - 1} \quad (18)$$

Symbol δ oznacza gęstość stałego prochu (przyjęto wartość 1661 kg/m^3). Wykresy funkcji $w(\psi, x)$ dla ustalonych wartości ψ pokazano na rys. 2.

Symbol δ means the density of a solid powder (1661 kg/m^3 is taken). The graphs of function $w(\psi, x)$ for settled values ψ are shown in Fig. 2.



Rys. 2. Wyniki obliczeń wartości funkcji w dla ustalonych wartości ψ
Fig. 2. Results of calculations for values of function w for settled values ψ



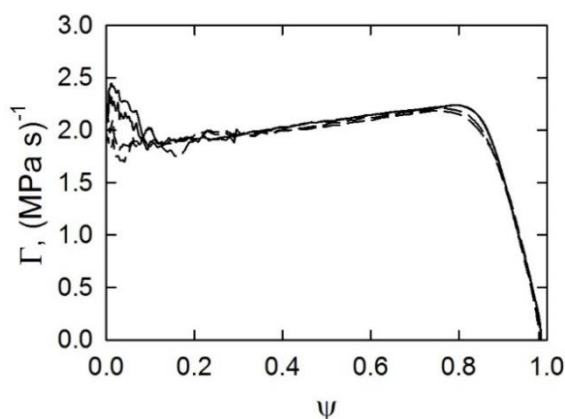
Rys. 3. Wyniki obliczeń wartości wykładnika α w prawie spalania
Fig. 3. Results of calculations for values of exponent α in the law of burning

Na podstawie wykresów funkcji w określono wartości wykładnika α . Wyniki przedstawiono na rys. 3. Podobnie jak w pracy [7] występuje pewien rozrzut wartości wykładnika. Uśredniając jego wartości w zakresie ψ [0,5;0,9] otrzymuje się $\alpha = 0,894$. Jest ona zbliżona do wykorzystywanej w obliczeniach balistycznych wartości 0,9 (np. w pracy [9]).

On the basis of graphs of function w the values of exponent α were established. The results are presented in Fig. 3. Similarly as in [7] there is a spread of exponent values. By averaging them for values of ψ [0.5;0.9] the value $\alpha = 0.894$ is received. It is close to the value of 0.9 used in ballistic calculations (e.g. in [9]).

4.2. Określenie dynamicznej żywości

Do wyznaczenia dynamicznej żywości prochu Γ posłużymy się definicją wynikającą z fizycznego prawa spalania (14). Na rys. 4 przedstawiono wykresy $\Gamma(\psi)$ określone na podstawie wyników czterech prób.



Rys. 4. Krzywe dynamicznej żywości prochu LO5460: linia przerywana – $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$, linia ciągła – $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$

Fig. 4. Curves of dynamical liveliness for powder LO5460: dashed line – $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$, continuous line – $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$

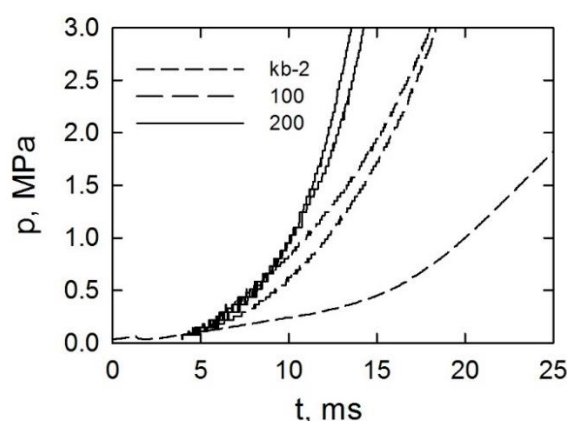
Otrzymane krzywe dynamicznej żywości Γ praktycznie pokrywają się ze sobą. Świadczy to o dobrej powtarzalności wyników badań oraz dowodzi, że fizyczne prawo spalania (14) poprawnie opisuje spalanie badanego prochu.

Dla zakresu wartości ψ [0;0,3] występują na krzywych $\Gamma(\psi)$ zaburzenia, wyrażające się w zwiększeniu wartości Γ dla początkowego okresu palenia się prochu. Na wystąpienie takiego efektu wskazano już w monografii [8]. Według autora monografii [10], można go przypisać wstępnemu nagrzanemu się zewnętrznej warstwy ziaren prochu przed zapłonem.

Pewien wpływ na początkową część krzywych $\Gamma(\psi)$ może mieć przyjęte założenie, że palenie się badanego prochu inicjowane jest po pełnym spalaniu ładunku zapłonowego. Aby zweryfikować to założenie, wykonano pomiary przebiegu ciśnienia w komorze przy spalaniu samego ładunku zapłonowego i porównano z przebiegami ciśnienia zarejestrowanymi przy spalaniu tego ładunku razem z

4.2. Determination of Dynamical Liveliness

Definition resulting from the physical law of burning (14) is used to find out dynamical liveliness of powder Γ . Fig. 4 shows the graphs $\Gamma(\psi)$ prepared on the basis of four trials.



Rys. 5. Początkowe odcinki przebiegu ciśnienia przy spalaniu ładunku zapłonowego (proch kb-2) i prochu LO5460 dla gęstości ładowania 100 i 200 kg/m^3 (po dwie próby)

Fig. 5. Initial stages of pressure changes at burning the igniting charge (powder kb-2) and powder LO5460 for loading densities 100 and 200 kg/m^3 (two trials for each)

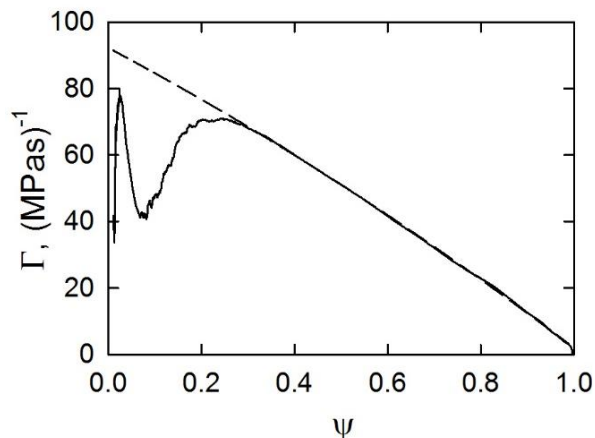
The received curves of dynamical liveliness Γ in practice fully overlap. It proves high repeatability of tests results and evidences that the physical law of burning (14) describes correctly the burning of powder.

There are some disturbances of $\Gamma(\psi)$ curves on the range of values ψ [0; 0,3] which are expressed in increased values of Γ for the initial period of powder burning. Such effect has been already indicated in [8]. The author of [10] claims that it may be caused by an initial heating of external layer of powder grains before the ignition.

Taken assumption that burning of tested powder starts after the igniting charge is completely burnt may also affect in some degree the initial part of $\Gamma(\psi)$ curves. In order to verify this postulate changes of pressure in the chamber at burning the igniting charge alone and at burning both the charge and the powder LO5460 were measured and compared. The initial parts of pressure

prochem LO5460. Na rys. 5 przedstawiono początkowe odcinki przebiegów ciśnienia. Wynika z nich, że zapłon badanego prochu następuje dla wartości ciśnienia znacznie niższych niż przyjęta wartość ciśnienia zapłonu. Zatem przez pewien okres czasu pali się jednocześnie ładunek zapłonowy i ładunek badanego prochu.

Aby uwzględnić wpływ jednoczesnego palenia się ładunku zapłonowego i badanego prochu, określono krzywą żywości $\Gamma(\psi)$ dla spalania samego ładunku zapłonowego. Wartość wykładnika w prawie spalania (14) równą $\alpha_z = 0,813$ zaczerpnięto z pracy [11].



Przebieg krzywej $\Gamma(\psi)$, przedstawionej na rys. 6, można zinterpretować w sposób następujący: ładunek zapłonowy zawarty jest w plastikowym woreczku i otacza główkę zapalczą. Zatem zaczyna się spalać przy gęstości ładowania zbliżonej do gęstości usypowej prochu. Zapłonowi ulegają ziarna znajdujące się blisko masy zapalczącej. Jednakże wzrost ciśnienia powoduje rozerwanie woreczka i ekspansję mieszaniny gazowo-prochowej. Zatem spalanie prochu nie odbywa się już w warunkach izochorycznych. Energia wydzielona przy spalaniu prochu zużywana jest na wykonanie pracy. Odpowiada temu spadek wartości Γ . Po wyrównaniu się ciśnienia w komorze, dalsze spalanie prochu odbywa się w warunkach izochorycznych. Odpowiada temu wzrost wartości Γ . Wskazuje on na to, że część ziaren nie ulega zapłonowi w pierwszej fazie procesu, a dopiero w drugiej, izochorycznej fazie spalania prochu. Zatem „prawdziwa” krzywa dynamicznej żywości prochu kb-2 zaczyna się

changes are shown in Fig. 5. It may be noticed that the ignition of tested powder occurs for much lower values of pressure than the accepted value of ignition pressure. It means that both the igniting charge and the charge of tested powder have been burning together for a certain period of time.

The curve of liveliness $\Gamma(\psi)$ for burning the igniting charge alone was established to assess an impact of simultaneous burning of igniting charge and tested powder. Value of the exponent in the law of burning (14) equal to $\alpha_z = 0.813$ was taken from [11].

Rys. 6. Krzywa dynamicznej żywości Γ prochu kb-2; krzywa przerywana – aproksymacja (19)

Fig. 6. The curve of dynamical liveliness Γ for powder kb-2; dashed curve – approximation (19)

The character of $\Gamma(\psi)$ curve presented in Fig. 6 may be interpreted in a following way. The igniting charge is contained in a plastic bag surrounding the initiating head. Therefore it starts burning at the loading density that is close to the density of loose powder. The grains placed in the vicinity of initiating head are ignited. But the increase of pressure makes the bag break and the gas-powder mixture expand. Since the powder has not been burning more in isochoric conditions. Energy generated at powder burning is spent on performing the work. It is connected with reduction of Γ value. When the pressure in the chamber equalises then the process of powder burning is continued in isochoric conditions. It is connected with an increase of Γ value. It indicates that an amount of grains is not ignited in the first phase of the process but just in the second isochoric phase of powder burning. Therefore the “real” curve of dynamical liveliness of kb-2 powder

dopiero od ok. $\psi = 0,3$. Można ją aproksymować funkcją:

$$\Gamma_z(\psi) = 2 + 105,85(1 - \psi) - 15,64(1 - \psi)^2, \text{ (MPa} \cdot \text{s)}^{-1} \quad (19)$$

Wykorzystując aproksymację za pomocą krzywej (19), modyfikujemy sposób obliczania dynamicznej żywości Γ badanego prochu. Obliczenia zaczynamy od wartości ciśnienia p_1 , dla której krzywe $p(t)$ dla spalania badanego prochu rozchodzą się z krzywą $p(t)$ dla spalania samego ładunku zapłonowego – rys. 5. Obliczamy wartość względnej objętości spalonego prochu czarnego ze wzoru:

$$\psi_{z1} = \frac{p_1}{p_z} \quad (20)$$

Symbol p_z oznacza nominalną wartość ciśnienia zapłonu, odpowiadającą pełnemu spalaniu ładunku zapłonowego. Dla kolejnych wartości ciśnienia p_i oblicza się wartość ψ_z ze wzoru iteracyjnego:

$$\psi_{zi+1} = \Gamma_z(\psi_{zi})p_0 \left(\frac{p_i}{p_0} + 1\right)^{\alpha_z} \Delta t + \psi_{zi} \quad (21)$$

Symbol Δt oznacza krok czasowy pomiaru ciśnienia. Ciśnienie parcjalne produktów spalania prochu czarnego obliczamy ze wzoru:

$$p_{zi+1} = p_z \psi_{zi+1} \quad (22)$$

Wielkość tę podstawiamy we wzorze (15) zamiast wartości p_z i dalsze obliczenia wartości $d\psi/dt$ prowadzimy według wzorów (16)-(18).

Na rys. 7 porównano krzywą dynamicznej żywości Γ , określoną przy uwzględnieniu jednoczesnego spalania ładunku zapłonowego i badanego prochu, z krzywą dynamicznej żywości określoną przy założeniu, że zapłon badanego prochu następuje po pełnym spaleniu się ładunku zapłonowego. Obie krzywe różnią się jedynie dla zakresu wartości ψ [0;0,05]. W tym zakresie następuje stopniowy zapłon badanego prochu i kończy się palenie ładunku zapłonowego.

starts just at ca. $\psi = 0.3$. It may be approximated by function:

Applying an approximation by a curve line (19) we modify the way how the dynamical liveliness Γ of tested powder is calculated. The calculations start from the pressure value p_1 for which the curves $p(t)$ for tested powder burning start to diverge from the curve $p(t)$ describing the alone burning of igniting charge – Fig. 5. The value of relative volume for the burnt black powder is calculated from formula:

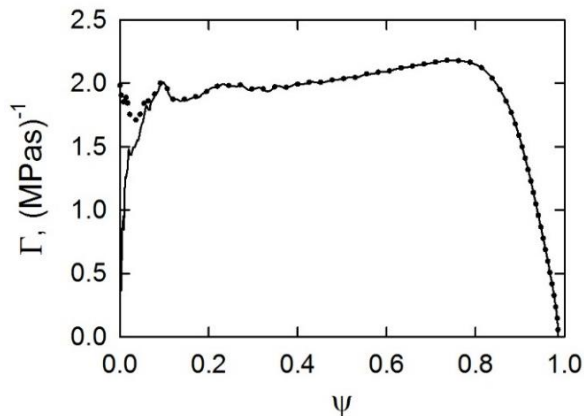
Symbol p_z stands for the nominal value of ignition pressure corresponding to complete burning of igniting charge. For consecutive values of pressure p_i the value of ψ_z is calculated from the iterating formula:

Symbol Δt is a time step of pressure measurement. Partial pressure of black powder burning products is calculated by:

This value is put into (15) to replace values p_z and further calculations of values $d\psi/dt$ are made in line with formulae (16)-(18).

In Fig. 7 the curve of dynamical liveliness Γ received at simultaneous burning of the igniting charge and tested powder is compared with the curve of dynamical liveliness received under the assumption that the ignition of tested powder occurs after the complete burning of the igniting charge. Both graphs differ only for values ψ [0;0,05]. A gradual ignition of tested powder and the end of igniting charge burning occur in this range.

Aby porównać wyniki własnych badań z danymi literaturowymi, obliczono dynamiczną żywość L według wzoru (4). Otrzymane w ten sposób wykresy $L(p/p_{max})$ porównano na rys. 8 z krzywą pokazaną na rys. 1.

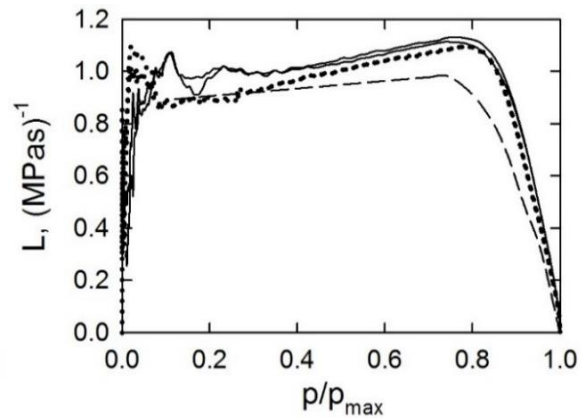


Rys. 7. Krzywe dynamicznej żywości Γ prochu LO5460 określone przy uwzględnieniu jednoczesnego spalania ładunku zapłonowego i badanego prochu (linia ciągła) i przy założeniu pełnego spalania się ładunku zapłonowego przed zapłonem badanego prochu (linia kropkowa)

Fig. 7. Curves of dynamical liveliness Γ of LO5460 powder established for simultaneous burning of igniting charge and tested powder (continuous line) and for the assumption that the igniting charge burns completely before the ignition of tested powder (dotted line)

Wadą definicji dynamicznej żywości L jest zależność tej wielkości od gęstości ładowania (wadą tą nie jest obciążona dynamiczna żywość Γ). Widoczne jest to na rys. 8, na którym różnym gęstościom ładowania odpowiadają różniące się krzywe $L(p/p_{max})$. Ponieważ w pracy [6] nie podano przy jakiej gęstości ładowania określono dynamiczną żywość L , trudno jest porównać wartości L otrzymane na podstawie własnych badań z krzywą z tej pracy. Występujące różnice mogą wynikać z różnicy pojemności komór manometrycznych, w których prowadzono badania pirostatyczne – 200 cm³ w niniejszej pracy i 700 cm³ w pracy [6]. Różnice w pojemności komory przekładają się na różnice we wpływie strat cieplnych oraz różnice w przebiegu procesu zapłonu (tej samej gęstości ładowania odpowiada różna wielkość ładunku prochowego).

To compare the results of own tests with literature data the dynamical liveliness L was calculated with formula (4). Received graphs $L(p/p_{max})$ are compared in Fig. 8 with the curve shown in Fig. 1.



Rys. 8. Krzywe dynamicznej żywości L prochu LO5460: linie ciągłe – $\Delta = 100$ kg/m³, linie kropkowe – $\Delta = 200$ kg/m³ i krzywa na podstawie wykresu z pracy [6] – linia przerywana

Fig. 8. Curves of dynamical liveliness L of LO5460 powder: continuous lines – $\Delta = 100$ kg/m³, dotted lines – $\Delta = 200$ kg/m³ and the curve of the graph taken from [6] – dashed line

A fault of dynamical liveliness L definition is its dependence on the density of loading (the dynamic liveliness Γ has no such fault). It is visible in Fig. 8 where for different densities of loading there are different curves $L(p/p_{max})$. As information about loading density at which the dynamical liveliness L was determined is not included in [6] then it is difficult to compare them with values of L received in own experiments. The differences may exist in effect of different capacities of manometric chambers – 200 cm³ in this paper and 700 cm³ in [6]. Differences in chamber capacities translate into different impact of thermal losses and different run of ignition process (at the same density of loading the sizes of powder charge are different).

4.3. Określenie liniowej szybkości spalania

Do wyznaczenia liniowej szybkości spalania u wykorzystamy związek pomiędzy tą wielkością i objętościową szybkością spalania, wynikający z geometrycznego prawa spalania:

$$\Lambda_0 \frac{d\psi}{dt} = \Sigma_0 \sigma(\psi) u \quad (23)$$

Symbol Λ_0 oznacza wyjściową objętość ziarna prochowego, Σ_0 – wyjściową powierzchnię spalania ziarna, σ – względną powierzchnię spalania po spaleniu ψ części objętości ziarna. Funkcję $\sigma(\psi)$ można określić znając kształt i wymiary ziarna prochowego oraz wykorzystując założenie, że proch spala się warstwami równoległymi do powierzchni palącego się ziarna. Uwzględniając zależność liniowej szybkości spalania od ciśnienia, możemy związek (23) zapisać w postaci:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\Sigma_0}{\Lambda_0} \sigma(\psi) u_0 p_0 x^\alpha, \quad x = \frac{p(t)}{p_0} \quad (24)$$

Symbol u_0 oznacza współczynnik liniowej szybkości spalania. Całkując powyższy związek otrzymujemy:

$$\int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{d\psi}{\sigma(\psi)} = \beta_0 p_0 \int_{t_1}^{t_2} x^\alpha dt, \quad \beta_0 = \frac{\Sigma_0}{\Lambda_0} u_0 \quad (25)$$

Momenty czasu t_1 i t_2 odpowiadają spaleniu odpowiednio ψ_1 i ψ_2 części prochu. Wartości ψ_1 i ψ_2 wybiera się na podstawie krzywych dynamicznej żywości Γ . Wartość ψ_1 powinna znajdować się poza zakresem wartości ψ , w którym obserwuje się wyraźny wpływ wstępnego nagrzania ziaren prochu. Na podstawie wykresów pokazanych na rys.4 wybrano wartość 0,2. Wartość ψ_2 powinna być mniejsza od wartości, przy której obserwuje się wpływ rozpadu ziaren prochu i przejście w degresywną fazę spalania. Wybrano wartość 0,8.

Po obliczeniu wartości całek w równaniu (25), wyznacza się wartość współczynnika β_0 . Na jej podstawie oblicza się wartość u_0 . Uży-

4.3. Determination of Linear Velocity of Burning

To find out the linear velocity of burning u its relation to volumetric burning rate resulting from the geometric law of burning is used:

Symbol Λ_0 means initial volume of a powder grain, Σ_0 – initial area of burning for a powder grain, σ – relative area of burning after a ψ part of grain volume has been burnt. Function $\sigma(\psi)$ may be expressed if the shape and sizes of powder grains are known and the assumption is made that the powder burns in layers which are parallel to the surface of burning grain. Taking into account the linear dependence of burning rate on the pressure the relation (23) may be expressed in the form:

Symbol u_0 means a coefficient of linear burning velocity. Integrating the above relation we can get:

Moments of time t_1 and t_2 correspond respectively to burning ψ_1 and ψ_2 parts of powder. The values ψ_1 and ψ_2 are taken on the basis of the curves of dynamical liveliness Γ . The value of ψ_1 has to be beyond the range of ψ values for which an apparent influence of powder grains heating is visible. On the base of graphs presented in Fig. 4 the value of 0.2 was taken. The value of ψ_2 has to be lower than a value for which the influence of powder grains decomposition may be observed together with the transition into a regressive phase of burning. The value of 0.8 was taken.

After calculating the integrals in equation (25) the value of β_0 coefficient is determined. It is the basis for calculating the value of u_0 .

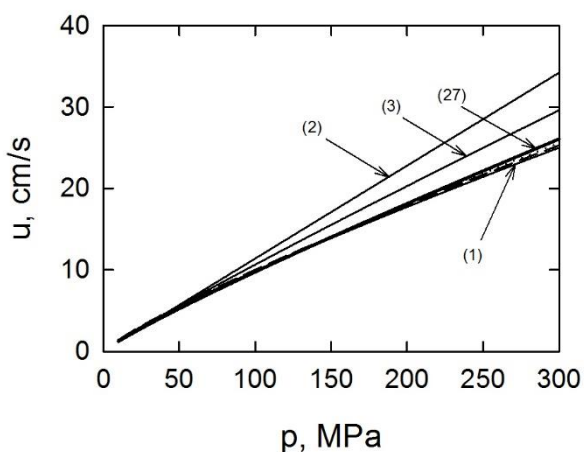
skano wartość 0,203 cm/(MPa·s). Zatem wyznaczone prawo szybkości spalania prochu LO5460 ma postać:

$$u = 0,203 p_0 x^{0,894}, \quad [u] = \text{cm/s}, p_0 = 0,1 \text{MPa} \quad (26)$$

Prawo to można zapisać w sposób analogiczny do równań (1) - (3):

$$u = 0,159 p^{0,894}, \quad [u] = \text{cm/s}, [p] = \text{MP} \quad (27)$$

Na rys. 9 porównano wykresy zależności liniowej szybkości spalania od ciśnienia określone wzorami (1) – (3) i wzorem (27). Trzy wzory (1) dają praktycznie pokrywające się wykresy $u(p)$. Bardzo bliskie wartości liniowej szybkości spalania otrzymuje się na podstawie wzoru (27). Oceniając wykresy dla wzorów (2) i (3), należy wziąć pod uwagę, że wzory te określono na podstawie wykresów zamieszczonych w pracach [5] i [6], zatem ich dokładność jest ograniczona.



Rys. 9. Zależność liniowej szybkości spalania określona na podstawie wzorów (1) (trzy krzywe: ciągła, przerywana i kropkowa), (2) i (3) oraz (27)

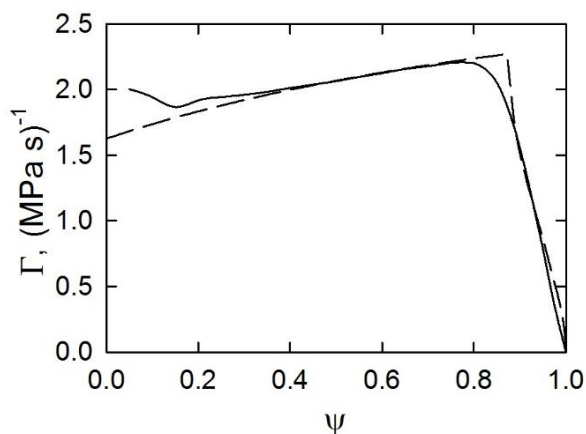
Fig. 9. Dependence of linear burning velocity determined on the basis of formulae (1) (three curves: continuous, dashed and dotted), (2) and (3) and also (27)

Dobra zgodność krzywej $u(p)$ otrzymanej na podstawie własnych badań z krzywymi otrzymanymi na podstawie wzorów podanych w pracy [1], wskazuje na poprawność określe-

The value of 0.203 cm/(MPa·s) was received. Then the obtained law for LO5460 powder burning rate has the form:

This law may be formulated in the same form as equations (1) - (3):

The graphs of dependence of linear burning velocity on the pressure expressed by formulae (1) – (3) and formula (27) are compared in Fig. 9. Three formulae (1) provide in practice the overlapping curves $u(p)$. Very close values are received on the basis of formula (27). Evaluating the graphs for formulae (2) and (3) it has to be considered that they were prepared on the basis of graphs included in [5] and [6] and therefore their accuracy is limited.



Rys. 10. Porównanie krzywych dynamicznej żywości Γ określonych na podstawie fizycznego (linia ciągła) i geometrycznego (linia przerywana) prawa spalania

Fig. 10. Comparison of the curves of dynamical liveliness Γ received on the basis of physical (continuous line) and geometrical (dashed line) law of burning

Good compliance of curve $u(p)$ received by own tests with curves received from formulae given in [1] shows a correct formulation of linear burning velocity.

nia liniowej szybkości spalania.

Z porównania wzorów (14) i (24) wynika, że:

Comparison of formulae (14) and (24) leads to:

$$\Gamma(\psi) = \beta_0 \sigma(\psi) \quad (28)$$

Zatem znając wartość współczynnika β_0 można wyznaczyć dynamiczną żywość Γ dla geometrycznego prawa spalania. Porównano tak obliczoną dynamiczną żywość Γ z dynamiczną żywością Γ określoną na podstawie fizycznego prawa spalania (uśredniono wszystkie krzywe pokazane na rys. 4).

Wynik porównania przedstawiono na rys. 10. Jak widać, geometryczne prawo spalania pozwala dość poprawnie wyznaczyć krzywą dynamicznej żywości Γ . Większe rozbieżności występują dla początkowej fazy spalania prochu, w której przejawia się wpływ wstępnego podgrzania ziaren prochu, oraz w fazie rozpadu ziaren, w której przejawia się wpływ niejednoczesnego zapłonu ziaren prochu.

5. Wnioski

Wyniki badań pirostatycznych prochu typu JA-2 prowadzą do następujących wniosków:

1. Otrzymane w badaniach wartości siły prochu i kowolumenu wymagają korekty uwzględniającej straty cieplne, aby uzyskać wartości zbliżone do publikowanych w literaturze. Wynika stąd wskazówka metodyczna, aby przy badaniach nowych prochów korygować wartości parametrów energetycznych ze względu na straty cieplne.
2. Wartość wykładnika w prawie spalania prochu JA-2 jest bardzo zbliżona do wartości 0,9. Wynik ten nie potwierdza częstych w literaturze opinii, że dla ciśnień większych od 60 MPa wykładnik w prawie spalania równy jest 1.
3. Określona w opisanych badaniach zależność szybkości spalania prochu JA-2 od ciśnienia pozostaje w dobrej zgodności z danymi literaturowymi.

If the value of coefficient β_0 is known then the dynamical liveliness Γ for geometrical burning law may be established. The dynamical liveliness Γ calculated in such way was compared with the dynamical liveliness Γ formulated on the basis of physical law of burning (all curves shown in Fig. 4 were averaged).

The result of comparison is presented in Fig. 10. It is seen that geometrical law of burning gives quite correct values of dynamical liveliness Γ . Greater differences appear in the initial phase of powder burning where an influence of powder grains preliminary heating is observed, and in the phase of grains decomposition with an impact of non-simultaneous ignition of powder grains.

5. Conclusions

Following conclusions may be drawn on the basis of pyrostatic experiments for JA-2 type powder:

1. The values of powder force and co-volume received in experiments have to be corrected in regard of thermal losses to get the similar values to those published in literature. It leads to a methodological hint that in investigations of new powders the values of energetic parameters have to be corrected because of thermal losses.
2. The value of exponent in JA-2 powder burning law approaches very closely to 0.9. It is not in line with wide opinions of literature that for pressures greater than 60 MPa the exponent of burning law equals to 1.
3. The dependence of JA-2 powder burning rate on the pressure formulated in described experiments falls well within the literature data.

- | | |
|--|---|
| <p>4. Wyniki badań potwierdzają poprawność fizycznego prawa spalania prochu w odniesieniu do badanego prochu. Odpowiadająca mu krzywa dynamicznej żywości Γ może być traktowana jako charakterystyka prochu, w odróżnieniu od wykorzystywanej w literaturze dynamicznej żywości L, która jest zależna od gęstości ładowania.</p> <p>5. Geometryczne prawo spalania poprawnie opisuje spalanie badanego prochu dla ograniczonego zakresu względnej objętości spalonego prochu.</p> <p>6. Na krzywych dynamicznej żywości Γ, określonych na podstawie wyników próby pirostatycznej, wyraźnie widoczny jest efekt przyspieszenia spalania przypowierzchniowej, wstępnie nagrzałej, warstwy ziaren prochowych.</p> <p>7. Uwzględnienie jednoczesnego spalania ładunku zapłonowego i badanego prochu wpływa na początkowy kształt krzywej dynamicznej żywości, dowodząc stopniowego zapłonu ładunku.</p> | <p>4. The results of experiments confirm the correctness of the physical law of powder burning in respect to tested powder. The curve of dynamical liveliness Γ that corresponds to it may be treated as a characteristic of the powder in opposite to the dynamical liveliness L that is used in literature and is depended on the density of loading.</p> <p>5. The geometrical law of burning properly describes the burning of investigated powder for a limited range of relative density of the burnt powder.</p> <p>6. An effect of accelerated burning of a preheated layer of powder grains adjacent to the surface is clearly visible on the curves of dynamical liveliness Γ prepared on the basis of results of a pyrostatic trial.</p> <p>7. The consideration of simultaneous burning of igniting charge and tested powder affects the initial part of dynamical liveliness curve and confirms a gradual ignition of the charge.</p> |
|--|---|

Literatura / Literature

- [1] Manning G.T., Leone J., Zebregs M., Ramlal R.D., van Driel A. Ch., Definition of a JA-2 Equivalent Propellant to be Produced by Continuous Solventless Extrusion, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 80, pp. 031405-1÷7, 2013
- [2] Kirshienbaum M. S., Avrami L., Strauss B., Sensitivity Characterization of Low Vulnerability (LOVA) Propellants, Technical Report ARLCD-TR-83005, Aberdeen, March 1983.
- [3] Horst A. W., Baker P J., Rice B. M., Kaste P. J, Colburn J. W., Hare J. J., Insensitive High Energy Propellants for Advanced Gun Concepts, Technical Report ARL-TR-2584, Aberdeen, October 2001
- [4] <http://www.stardestroyer.net/Armour/ShepStuff/Website/Statistics/MilitaryPropelants.htm>, 3.04.2017r.
- [5] Eisenreich N., Eckl W., Fisher T., Weiser V., Kelzenberg S., Langer G., Baier A., Burning Phenomena of the Gun Propellant JA2, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 25, pp. 143-148, 2000.
- [6] Conner C. B., Anderson W. R., Modeling the Combustion of JA2 and Solid Propellants of Similar Composition, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, pp. 2131–2137, 2009.
- [7] Trębiński R., Leciejewski Z., Surma Z., Fikus B, Some Considerations on the Methods of Analysis of Closed Vessel Test Data, *Proc. of the 29th International Symposium on Ballistics*, 9-13 May, Edinburgh, Great Britain, Vol, 1: pp. 607-617, 2016.

- [8] Sieriebriakow M., *Wnutrienniaja ballistika*, Moskwa, Oborongiz, 1949.
- [9] Georgi S., Pockock M., Woodley C., Turpie C., Linking Two- and One-Dimensional Internal Ballistics Analyses, *Proc. of the 28th International Symposium on Ballistics*, Atlanta, USA, September 22–26, pp. 382-393, 2014.
- [10] Assovskij J.G., *Fizika gorenija i wnutrienniaja ballistika*, Nauka, Moskwa, 2005.
- [11] Konecny P., Krizan Z., Determination of Black Powder Burning Rate, *Advances in Military Technology*, Vol.3, N 2, pp. 11-18, 2008.
- [12] Leciejewski Z., *Analiza i ocena poprawności metod badań pirostatycznych prochów jedno i dwubazowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008.

Praca zawiera wyniki badań prowadzonych w ramach projektu współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2016-2019, Projekt Nr DOB-BIO8/05/01/2016

The paper includes the results of investigations carried out in the frame of a project co-financed by the National Centre of Research and Development within 2016-2019, Project Nr DOB-BIO8/05/01/2016

