



**WPLYW UWZGLĘDNIENIA STRAT CIEPLNYCH NA WARTOŚCI
CHARAKTERYSTYK PROCHÓW OKREŚLONE W BADANIACH
PIROSTATYCZNYCH**
***INFLUENCE OF HEAT LOSSES CORRECTION
ON POWDER CHARACTERISTICS
DETERMINED IN PYROSTATIC INVESTIGATIONS***

Radosław TREBIŃSKI, Zbigniew LECIEJEWSKI, Zbigniew SURMA
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46
Military University of Technology, 2 Sylwestra Kaliskiego St., 00-908 Warsaw, Poland
Author's e-mail address: radoslaw.trebinski@wat.edu.pl.; ORCID: 0000-0002-4659-2318

DOI 10.5604/01.3001.0013.7279

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki analizy uwzględnienia strat ciepłych na wartości charakterystyk prochów określone w badaniach pirostatycznych. Wpływ strat ciepłych oceniano oryginalną metodą opracowaną przez autorów. Skorygowane przebiegi ciśnienia posłużyły do wyznaczenia charakterystyk prochu JA-2 oraz prochu kompozytowego SC-100. Określono wartości siły prochu i kowolumenu, dynamicznej żywości L , prędkości spalania, wykładnika i współczynnika w prawie spalania, dynamicznej żywości G , eksperymentalnej funkcji kształtu. Obliczone wartości siły prochu i kowolumenu porównano z wynikami obliczeń termochemicznych. Na podstawie wyników porównania potwierdzono poprawność zastosowanej metody uwzględnienia wpływu strat ciepłych. Pozostałe charakterystyki porównano z określonymi przy braku uwzględnienia strat ciepłych. Stwierdzono, że uwzględnienie strat ciepłych obniża wartości żywości L i G oraz prędkości spalania.

Słowa kluczowe: badania prochów, straty ciepłe, siła prochu, żywość, prędkość spalania

1. Wstęp

Podstawową metodą wyznaczania charakterystyk energetycznych i balistycznych prochów jest test w komorze manometrycz-

Abstract: The paper studies the influence of heat losses in pyrostatic investigations on values of powder (propellant) measured characteristics. The influence of heat losses was assessed by a method developed by authors. Corrected pressure records were used to determine characteristics of JA-2 powder and SC-100 composite powder. Values of powder force and the covolume, the dynamic vivacity L , the burning rate, the exponent and the coefficient in the burning law, the dynamic vivacity G , and the experimental shape function were determined. The values of the force and the covolume were compared with results of thermochemical calculations. Basing on the results of the comparison the correctness of the method was confirmed. Other characteristics were compared with those determined without any correction. It was revealed that the correction for the heat losses diminishes the values of the dynamic vivacities L and G , as well as of the burning rate.

Keywords: powder investigations, heat losses, powder force, vivacity, burning rate

1. Introduction

A closed vessel test is a basic method for identification of powders energetic and ballistic characteristics. Basing on the rec-

nej. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia gazów, wytwarzanych przy spalaniu ładunków prochowych, wyznacza się parametry równania stanu, żywość prochu oraz zależność prędkości spalania od ciśnienia. Charakterystyki te obarczone są pewnym błędem wynikającym z nieuwzględnienia procesu oddawania ciepła przez gazy prochowe do ścianek komory. Aby ograniczyć wpływ tego błędu, dokonuje się korekcji wyznaczonych charakterystyk, uwzględniając straty cieplne. W literaturze zaproponowano różne metody dokonywania tej korekcji (Maillette i Lussier, 1990; Price i Juhasz, 1977; Homan i Juhasz, 2001; Torecki, 1998; Trębiński i in., 2016). W niniejszej pracy zastosowano metodę zaproponowaną w pracy (Torecki, 1998) z modyfikacjami wprowadzonymi w pracy (Trębiński i in., 2017). Przy jej wykorzystaniu określono charakterystyki energetyczne i balistyczne prochu JA-2 i eksperymentalnego prochu kompozytowego. Następnie porównano wartości charakterystyk wyznaczonych z uwzględnieniem strat cieplnych i bez ich uwzględnienia. Na tej podstawie określono celowość uwzględnienia strat cieplnych oraz charakter zmian wprowadzanych przez ich uwzględnienie, tzn. czy wartości liczbowe danej charakterystyki prochu rosną czy maleją.

2. Badania doświadczalne

W przeprowadzonych badaniach użyto dwubazowego prochu typu JA-2 o nazwie LO5460 produkcji szwajcarskiej firmy Nitrochemie AG oraz prochu kompozytowego SC-100 wytworzonego w Zakładzie Materiałów Wybuchowych Wojskowej Akademii Technicznej. Charakterystyki geometryczne ziaren prochowych przedstawiono w tabeli 1.

Wykonano rejestrację czasowych przebiegów ciśnienia $p(t)$ w próbie pirostatycznej w komorze o pojemności 200 cm^3 dla gęstości ładowania 100 i 200 kg/m^3 . Początkowa temperatura prochu wynosiła 20°C . Dla każdej gęstości ładowania wykonano 2 próby.

orded pressures of gases, produced at combustion of propellant charges, the parameters of state equation, the powder vivacity, and the dependence of burning rate on the pressure are identified. These characteristics are burdened by an error caused by not accounted process of heat transport from the propellant gases to the chamber walls. A correction of determined characteristics, taking into account the thermal losses, is made to reduce the influence of this error. Various methods of this correction are proposed in literature (Maillette & Lussier, 1990; Price & Juhasz, 1977; Homan & Juhasz, 2001; Torecki, 1998; Trębiński et al., 2016). A method proposed in (Torecki, 1998) with modifications included in (Trębiński et al., 2017) is applied in the paper. It is used to determine the energetic and ballistic characteristics of JA-2 propellant and an experimental composite propellant. In the next step the values of characteristics determined with, or without, accounted heat losses are compared. On this ground the reasons for considering the thermal losses and the character of changes caused by their consideration, i.e. the growth or fall of numerical values of particular powder characteristics, were determined.

2. Experimental Investigations

Double-base propellant of JA-2 type, named LO5460, produced by the Switzerland firm Nitrochemie AG, was investigated together with composite propellant SC-100 produced by the Laboratory of Explosives of the Military University of Technology. Geometrical characteristics of propellant grains are presented in Table 1.

Pressure records $p(t)$ were obtained at closed vessel tests carried out in a chamber of 200 cm^3 capacity for loading densities 100 and 200 kg/m^3 . Initial temperature of the propellant was 20°C . Two tests were made for each loading density.

Tabela 1. Charakterystyki geometryczne ziaren prochu LO5460 i SC-100

Table 1. Geometrical characteristics of LO5460 and SC-100 propellants grains

Parametr / Parameter	LO5460	SC-100
kształt ziarna / Shape of grain	walcowy / Cylindrical	walcowy
ilość kanalików / Number of channels	7	7
długość ziarna [mm] / Length of grain	15,5	11,5
średnica ziarna [mm] / Diameter of grain	8,9	6
średnica kanałika [mm] / Diameter of channel	0,546	0,5
grubość warstwy palnej [mm] / Thickness of burning layer	0,893	0,5625

Spalanie ładunku prochowego inicjowano za pomocą ładunku prochu czarnego. Naważka prochu czarnego była dobierana w taki sposób, aby ciśnienie zapłonu wynosiło 3 MPa.

3. Metody analizy wyników doświadczenia

Parametry energetyczne prochów wyznaczane są przy wykorzystaniu równania:

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

Poszczególne symbole oznaczają: Δ – gęstość ładowania, p_{\max} – maksymalna wartość ciśnienia, p_z – wartość ciśnienia zapłonu, f – siła prochu, η – kowolumen gazów prochowych. Za pomocą wzorów regresji liniowej wyznacza się wartości współczynników w powyższym równaniu, a na ich podstawie wartości siły prochu i kowolumenu.

Skorygowane, na straty ciepłe, wartości ciśnienia dla danej chwili t oblicza się ze wzoru:

$$p_c(t) = p(t) + \frac{1}{t_q} \int_0^t p(\tau) d\tau + \frac{p_{\max} - p_z}{t_h} t \quad (2)$$

Jako chwilę początkową $t = 0$ przyjmuje się moment czasu, gdy zarejestrowane ciśnienie osiągnie wartość 0,1 MPa. Stała czasowa t_q uwzględnia szybkość odpływu ładunku elektrycznego z czujnika ciśnienia, stała t_h uwzględnia średnią szybkość strat ciepłych. Wielkości te wyznaczone są na podstawie opadającej części przebiegu ciś-

The burning of the propellant charge was initiated by a black powder charge. The portion of the black powder was matched to get ignition pressure 3 MPa.

3. Methods of Experiment Results Analysis

The energetic parameters of propellants are identified using the equation:

Designations stand for: Δ – loading density, p_{\max} – maximum pressure value, p_z – ignition pressure value, f – propellant force, η – propellant gases covolume. Values of coefficients in the above equation are determined using the linear regression, and on their basis the values of the propellant force and covolume.

The values of pressure for a given time t corrected by the thermal losses are calculated from the formula:

As the original moment $t = 0$, a time moment is taken when the recorded pressure reaches the value 0.1 MPa. The time constant t_q accounts the rate of electric charge outflow from the pressure sensor, constant t_h accounts the average rate of thermal losses. These values are determined by a method described in (Trębiński

nienia w sposób opisany w pracy (Trębiński i in., 2017).

Zgodnie ze STANAG 4115 dynamiczną żywość prochu określa się ze wzoru:

$$L(p/p_{\max}) = \frac{dp}{dt} / (pp_{\max}) \quad (3)$$

Przed obliczaniem wartości pochodnej, przebieg ciśnienia wygładza się stosując algorytm Loess (Cleveland, 1979). Algorytm ten zawiera wyznaczenie wartości pochodnej. Prędkość spalania prochu r wyznacza się wykorzystując następujące wzory:

$$r = \frac{de}{dt} = \frac{de}{dz} \frac{dz}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{de}{dz} = \frac{V_0}{S_0} \phi(z) \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dp} = \frac{1}{p_{\max}} \frac{1 + \left(\eta - \frac{1}{\rho} \right) \frac{p_{\max}}{f}}{\left[1 + \left(\eta - \frac{1}{\rho} \right) \frac{p}{f} \right]^2} \quad (6)$$

Symbol e oznacza grubość warstwy spalonego prochu, z – względną objętość spalonego prochu, V_0 – początkową objętość ziarna prochowego, S_0 – początkowe pole powierzchni ziarna prochowego, $\phi(z)$ – względne pole powierzchni palenia (funkcja kształtu).

Po wyznaczeniu zależności $r(p)$ wyznacza się wartości wykładnika n i współczynnika w prawie spalania β wykorzystując zależność wynikającą z prawa Vielle'a:

$$\log_{10} r = \log_{10} \beta + n \log_{10} p \quad (7)$$

Przyjętą powszechnie metodą wyznaczenia wartości n i β z tej zależności jest wybór liniowej części wykresu zależności $\log_{10} r(\log_{10} p)$ i aproksymacja linią prostą. W niniejszej pracy zastosowano alternatywną metodę. Wartości wykładnika n wyznacza się obliczając wartości pochodnej:

et al., 2017) on the basis of descending parts of pressure records.

According to STANAG 4115 the powder dynamic vivacity is found by formula:

Before calculation of the derivative, the pressure records are smoothed by Loess algorithm (Cleveland, 1979). The algorithm includes the calculation of the derivative. The propellant burning rate r is determined by the following formulae:

Symbol e means the thickness of the burnt propellant layer, z – the relative volume of burnt propellant, V_0 – initial volume of propellant grain, S_0 – initial surface area of propellant grain, $\phi(z)$ – relative surface area of burning (a shape function).

When the dependence $r(p)$ is determined the values of exponent n and the coefficient β in the burning law are identified by using the relation resulting from the Vielle's law:

Commonly used method for identification of n and β values from this relation chooses a linear part of the $\log_{10} r(\log_{10} p)$ plot and approximates it by a straight line. An alternative method is used in the present paper. The values of exponent n are determined by calculation of derivative:

$$n = \frac{d \log_{10} r}{d \log_{10} p} \quad (8)$$

Wartości pochodnych oblicza się stosując algorytm Loess. Wyznacza się wartość z , której odpowiada największa wartość n w zakresie $z \in [0,3;0,7]$. Wartości n uśrednia się w tym zakresie, przy czym odrzuca się wartości różniące się od maksymalnej więcej niż 10%. Wartości współczynnika β wyznacza się wykorzystując wzór:

The Loess algorithm is used to calculate the derivative values. A value z , corresponding to the maximum value of n within the range $z \in [0.3,0.7]$, is identified. The n values are averaged within this range, and the values which differ by more than 10% from the maximum value are rejected. The value of β coefficient is calculated from formula:

$$\log_{10} \beta = \log_{10} r - n \log_{10} p \quad (9)$$

Następnie uśrednia się wartości β w zakresie $z \in [0,3;0,7]$, przy czym odrzuca się wartości, którym odpowiada n różniące się od wartości maksymalnej więcej niż 10%. Ta metoda wyznaczania wartości n i β nie wymaga sporządzania wykresu i daje się łatwo zalgorytmizować.

In the next step the values β are averaged in the range $z \in [0.3,0.7]$, and the values corresponding to n which differ by more than 10% from the maximum value are rejected. This method for determination of n and β does not require any plot to be made and can be easily algorithmized.

Wyznaczanie wartości prędkości spalania z wykorzystaniem funkcji kształtu $\phi(z)$ zawodzi, gdy proces spalania prochu odbiega od założeń geometrycznego prawa spalania. Wówczas do wyznaczenia wykładnika w prawie spalania można wykorzystać fizyczne prawo spalania zaproponowane w monografii (Serebryakov, 1949). Prawo to zostało rozszerzone w pracy (Trębiński i in., 2016) na przypadek potęgowej zależności prędkości spalania od ciśnienia:

Determination of the burning rate value with the use of the shape function $\phi(z)$ fails when the propellant burning process deviates from the geometric burning law. Then the exponent in the burning law can be determined by the physical burning law presented in the monograph (Serebryakov, 1949). This law was extended in (Trębiński et al., 2016) to the case of exponential dependence of the burning rate on the pressure:

$$\frac{dz}{dt} = G(z) f_b(p), \quad f_b(p) = p_0 x^n, \quad x = \frac{p}{p_0} \quad (10)$$

Dla liniowego prawa spalania $n = 1$ funkcja $G(z)$ pokrywa się z wprowadzoną w (Serebryakov, 1949) funkcją $\Gamma(\psi)$ (w niniejszej pracy wprowadzono oznaczenie względnej objętości spalonego prochu z zamiast ψ zastosowanego w (Serebryakov, 1949)). Z prawa (10) można wyprowadzić zależność:

For the linear law of burning $n = 1$ the function $G(z)$ is identical to the function $\Gamma(\psi)$ introduced in (Serebryakov, 1949) (in the present paper the relative volume of burnt propellant is designated by z instead of ψ used in (Serebryakov, 1949)). The law (10) leads to the relation:

$$\log_{10} \left(\frac{dz}{dt} \right) = \log_{10} [G(z) p_0] + n \log_{10} x \quad (11)$$

Po wyznaczeniu wartości dz/dt dla różnych wartości gęstości ładowania, otrzymuje się dla danej wartości z liniową zależność pomiędzy $\log_{10}(dz/dt)$ i $\log_{10}x$. Z zależności tej można wyznaczyć wartość n . Aby wyznaczyć wartość współczynnika β możemy wykorzystać związek:

$$G(z) = \theta \phi_{ex}(z), \quad \theta = \beta p_0^{n-1} / (V_0 / S_0) \quad (12)$$

Gdy proch spala się zgodnie z geometrycznym prawem spalania, funkcja $\phi_{ex}(z)$, określająca stosunek pola aktualnie palącej się powierzchni do pola powierzchni wyjściowej, pokrywa się z teoretyczną funkcją kształtu $\phi(z)$. Dlatego będziemy ją nazywać „eksperymentalną funkcją kształtu”. Wartość współczynnika θ określa się ze wzoru:

$$\theta = \int_{0,3}^{0,7} \frac{dz}{\phi_{ex}(z)} / \left(p_0 \int_{t_1}^{t_2} x^n dt \right) \quad (13)$$

Symbole t_1 i t_2 oznaczają wartości zmiennej czasowej odpowiadające wartościom $z = 0,3$ i $0,7$. We wzorze (13) nie znamy funkcji $\phi_{ex}(z)$. Dlatego wartość θ wyznaczamy w sposób iteracyjny, jednocześnie wyznaczając funkcję $\phi_{ex}(z)$. W pierwszej iteracji podstawiamy do wzoru (13) teoretyczną funkcję kształtu. Następnie obliczamy wartości eksperymentalnej funkcji kształtu:

$$\phi_{ex}(z) = \frac{G(z)}{\theta} \quad (14)$$

Tak określoną funkcję $\phi_{ex}(z)$ wstawiamy do wzoru (13) i ponownie wyznaczamy wartość θ . Proces iteracji jest szybko zbieżny i praktycznie wystarczą dwie iteracje. Porównując funkcję $\phi_{ex}(z)$ z teoretyczną funkcją kształtu można ocenić stopień odchylenia się procesu spalania danego prochu od prawa geometrycznego.

After determining the values of dz/dt for different values of the loading density, a linear dependence between $\log_{10}(dz/dt)$ and $\log_{10}x$ is received for a given value of z . Value of n may be determined from this dependence. The value of β coefficient may be established from the relation:

When the propellant burns accordingly to the geometric burning law, the function $\phi_{ex}(z)$, describing the ratio between the current burning surface area to the initial surface area, is identical to the theoretical shape function $\phi(z)$. For this, it is named an „experimental shape function”. Coefficient θ is determined from the formula:

Symbols t_1 and t_2 are values of the time variable for $z = 0.3$ and 0.7 . Function $\phi_{ex}(z)$ in formula (13) is unknown. For that, the values θ are identified by iteration method, and at the same time function $\phi_{ex}(z)$ is determined. In the first iteration the theoretical shape function is put into formula (13). Next, the values of experimental shape function are calculated:

The identified function $\phi_{ex}(z)$ is put into (13) and value of θ is determined again. The process of iteration converges rapidly and in practice two iterations are sufficient. Function $\phi_{ex}(z)$ is compared to the theoretical shape function to assess a degree of deviation of a given propellant burning process from the geometric law.

Parametr /Parameter	JA-2	SC-100
(E) f , kJ/kg	963	970
(Q) f , kJ/kg	1167	1124
(T) f , kJ/kg	1151	1151
(E) η , dm ³ /kg	1,465	1,614
(Q) η , dm ³ /kg	1,011	1,232
(T) η , dm ³ /kg	0,999	1,073

Tabela 2. Charakterystyki energetyczne: eksperymentalne (E), skorygowane na straty cieplne (Q) i teoretyczne (T)

Table 2. Energetic characteristics: experimental (E), corrected for thermal losses (Q) and theoretical (T)

3. Wyniki analizy

W tabeli 2 zestawiono parametry energetyczne prochów wyznaczone bez uwzględnienia strat cieplnych, przy ich uwzględnieniu oraz teoretyczne wartości wyliczone z obliczeń termochemicznych.

Zestawienie wartości siły prochu i kowolumenu obliczonych bez uwzględnienia strat cieplnych i z ich uwzględnieniem z wartościami teoretycznymi wskazuje na celowość korekcji. Wartości siły prochu wyznaczone na podstawie doświadczalnych maksymalnych wartości ciśnienia różnią się od wartości teoretycznych o 16,3% dla prochu JA-2 i 15,7% dla prochu SC-100. Wartości skorygowane różnią się odpowiednio 1,4% i 2,3%. Gorsza zgodność występuje w przypadku kowolumenu, ale trzeba wziąć pod uwagę, że kowolumen stanowi małą poprawkę w równaniu stanu gazów prochowych. W związku z tym, wpływ niedokładności wyznaczenia wartości kowolumenu jest znacznie mniejszy niż wpływ niedokładności wyznaczenia wartości siły prochu.

Na rys. 1 i 2 zestawiono krzywe dynamicznej żywości L określone bez uwzględnienia strat cieplnych i z ich uwzględnieniem, określone na podstawie przebiegów ciśnienia zarejestrowanych dla obu prochów przy gęstości ładowania 200 kg/m³. Uwzględnienie strat cieplnych prowadzi do niższych wartości żywości dynamicznej. Może wydawać się to paradoksalne, jednakże można to wyjaśnić na podstawie pokazanych na rys. 3 i 4 wykresów przebiegów ciśnienia i pochodnej ciśnienia dla prochu SC-100 przy gęstości ładowania 200 kg/m³. Uwzględnienie strat cieplnych w niewielkim stopniu wpływa na wartość pochodnej. W przypadku wartości

3. Results of Analysis

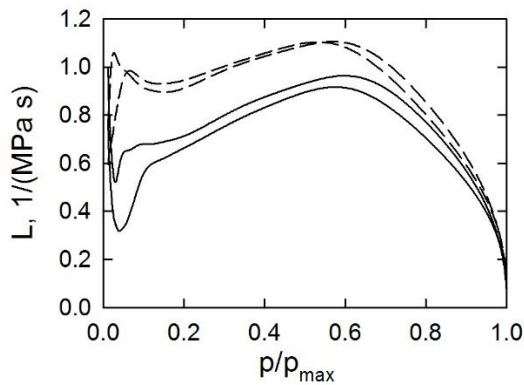
Table 2 presents the energetic parameters of propellants determined without, and with, consideration of thermal losses, and the theoretical values received in thermochemical calculations.

Comparison of values for the force and covolume calculated with and without consideration of thermal losses to the theoretical values indicates the rationale of the correction. The powder force, determined on the basis of maximum experimental values of pressure, differs from theoretical values by 16.3% for JA-2 propellant and by 15.7% for SC-100 propellant. The corrected values differ by 1.4% and 2.3% respectively. A worse compliance occurs in the case of the covolume, but it has to be noted that the covolume makes a small correction in the propellant gases equation of state. It means that the inaccuracies at the covolume identification have less significant influence than the inaccuracies of the propellant force identification.

Figs.1 and 2 show the curves of dynamic vivacity L determined without and with consideration of thermal losses on the basis of pressure values recorded for both propellants at the loading density 200 kg/m³. Accounting the thermal losses gives the lower values of the dynamic vivacity. It seems to be a paradox but it may be explained by the plots of pressure and the derivative of the pressure shown in Figs. 3 and 4, for propellant SC-100 at loading density 200 kg/m³. Consideration of thermal losses affects insignificantly the value of the derivative. This influence is stronger for the values of pressure. It is

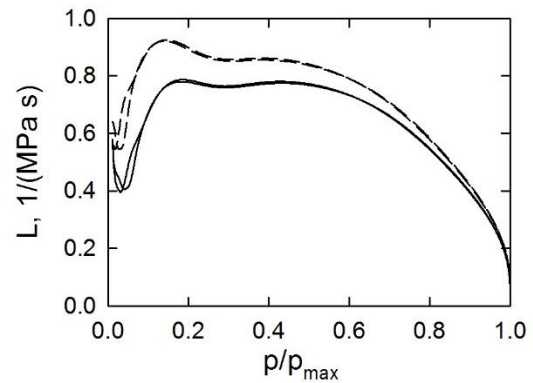
ciśnienia wpływ ten jest silniejszy. Wynika to z faktu, że korekcja wartości pochodnej ma charakter lokalny, natomiast poprawki wartości ciśnienia kumulują się. Oznacza to, że we wzorze (3) nieznacznie rośnie wartość licznika, lecz w większym stopniu rośnie wartość mianownika. W rezultacie wartości dynamicznej żywości maleją. Należy zaznaczyć, że dynamiczna żywość L jest wielkością służącą jedynie do jakościowych porównań prochów.

caused by the fact that the correction of the derivative has a local character, whereas the corrections of pressure values are cumulated. It means that in formula (3) the value of the dividend slightly increases, but the divisor increases in a greater degree. In effect, the values of the dynamical vivacity decrease. It has to be noted that the dynamic vivacity L is a parameter used exclusively for qualitative comparisons of propellants.



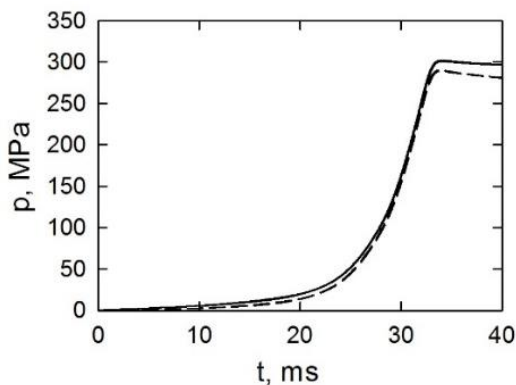
Rys. 1. Krzywe dynamicznej żywości prochu JA-2: z korekcją na straty cieplne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 1. Curves of JA-2 propellant dynamical vivacity: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)



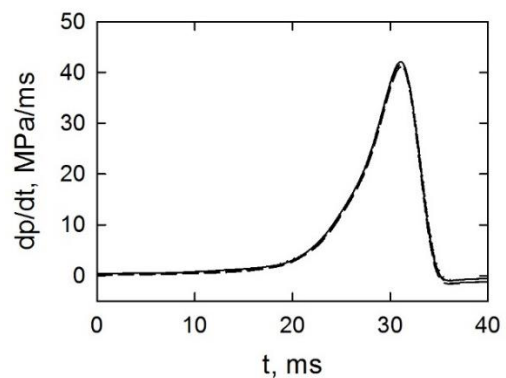
Rys. 2. Krzywe dynamicznej żywości prochu SC-100: z korekcją na straty cieplne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 2. Curves of SC-100 propellant dynamical vivacity: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)



Rys. 3. Porównanie wykresów przebiegu ciśnienia z korekcją na straty cieplne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 3. Comparison of pressure plots with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)



Rys. 4. Porównanie wykresów pochodnej ciśnienia z korekcją na straty cieplne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 4. Comparison of pressure derivative plots with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)

Uwzględnienie strat cieplnych nie zmienia relacji pomiędzy wartościami żywości dla porównywanych prochów. Z tego względu

Consideration of thermal losses does not change the relations between the values of the vivacity for compared propel-

wydaje się niecelowe jej stosowanie w odniesieniu do obliczania żywości dynamicznej L .

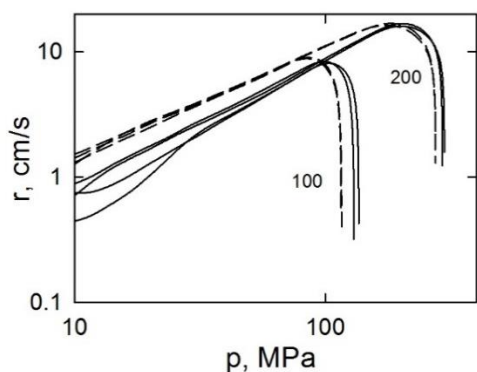
Na rys. 5 i 6 pokazano wykresy zależności prędkości spalania od ciśnienia wyznaczone przy wykorzystaniu geometrycznego prawa spalania. Podobnie jak przypadku dynamicznej żywości, uwzględnienie strat ciepłych obniża wartości prędkości spalania.

Jak będzie pokazane dalej, proces spalania prochu SC-100 odbiega od prawa geometrycznego. Z tego względu nie można wyznaczyć dla niego wartości n i β na podstawie powyższych wykresów. Można to zrobić dla prochu JA-2.

lants. For this reason its application to calculation of the dynamical vivacity L seems to be unsubstantiated.

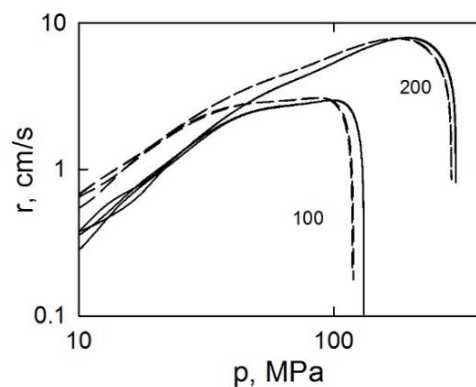
Figs. 5 and 6 show the graphs of the burning rate versus pressure determined by the geometric law of burning. Consideration of thermal losses reduces the value of burning rate similarly as for the dynamical vivacity.

It will be proved later that SC-100 propellant burning process differs from the geometric law. For this reason values of n and β cannot be determined from the above graphs. It can be done for JA-2 propellant.



Rys. 5. Wykresy zależności prędkości spalania prochu JA-2 od ciśnienia: z korekcją na straty ciepłne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 5. Plots of dependence of JA-2 propellant burning rate on pressure: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)



Rys. 6. Wykresy zależności prędkości spalania prochu SC-100 od ciśnienia: z korekcją na straty ciepłne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

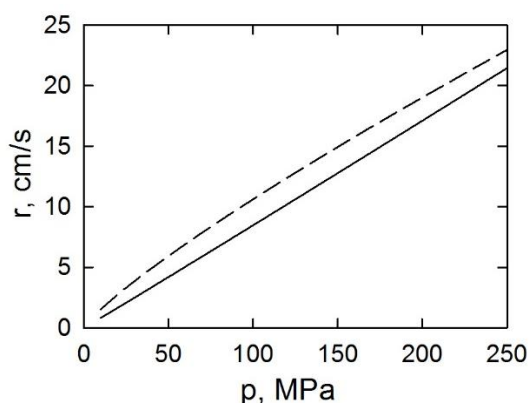
Fig. 6. Plots of dependence of SC-100 propellant burning rate on pressure: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)

Tabela 3. Wartości wykładnika n i współczynnika β w prawie spalania wyznaczone przy braku korekcji i z korekcją

Table 3. Values of exponent n and coefficient β in the burning law determined without correction and with correction

Metoda Method	Parametr Parameter	JA-2		SC-100	
		bez korekcji Without correction	z korekcją With correction	bez korekcji Without correction	z korekcją With correction
Prawo geometryczne Geometric law	n	0,936	1,108	-	-
	β [cm/(s MPa ⁿ)]	0,148	0,054	-	-
Prawo fizyczne Physical law	n	0,841	1,014	1,012	1,127
	β [cm/(s MPa ⁿ)]	0,221	0,079	0,0494	0,0252

W tabeli 3 zestawiono wartości n i β określone przy braku korekcji i z korekcją. W tabeli zamieszczono również wartości n i β określone na podstawie fizycznego prawa spalania. Uwzględnienie strat cieplnych podwyższa wartość wykładnika w prawie spalania, co oznacza silniejszą zależność prędkości spalania od ciśnienia. Jednakże powoduje także zmniejszenie wartości współczynnika w prawie spalania. W rezultacie wartości prędkości spalania w zakresie wartości ciśnienia, dla których wyznaczono wartości n i β nie różnią się zasadniczo, co ilustrują pokazane na rys. 7 i 8 wykresy zależności prędkości spalania od ciśnienia wyznaczone przy wykorzystaniu fizycznego prawa spalania.

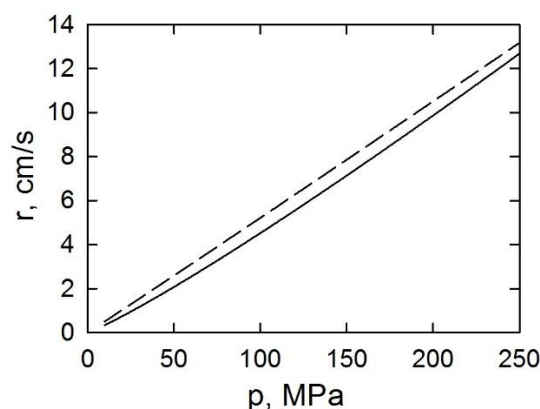


Rys. 7. Wykresy zależności prędkości spalania prochu JA-2 od ciśnienia: z korekcją na straty cieplne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 7. Plots of dependence of JA-2 propellant burning rate on pressure: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)

Nasuwa się pytanie, które z wartości wybrać dla ekstrapolacji do wartości ciśnienia wyższych od 250 MPa. Pewną podpowiedź dają przedstawione w pracy (Grune i Hensel, 1993) wyniki badań w komorze manometrycznej o pojemności 400 cm³ i wytrzymałości do 1500 MPa. Stwierdzono, że dla wyższych wartości gęstości ładowania otrzymuje się silniejszą zależność prędkości spalania od ciśnienia niż wynika z badań przeprowadzonych dla niższych wartości gęstości ładowania. Kształt krzywych zależno-

Table 3 presents the values of n and β determined at the lack of the correction and with the correction. The table also includes the values n and β determined on the basis of the physical burning law. The accounting of thermal losses increases the value of the exponent in the burning law, what strengthens the dependence of the burning rate on pressure. But it also reduces the value of the coefficient in the burning law. In effect, the values of the burning rate for the range of pressures for which the values of n and β were determined, do not differ essentially, what is shown by the plots of the burning rate against the pressure, which were determined by the physical law of burning and are shown in Figs. 7 and 8.



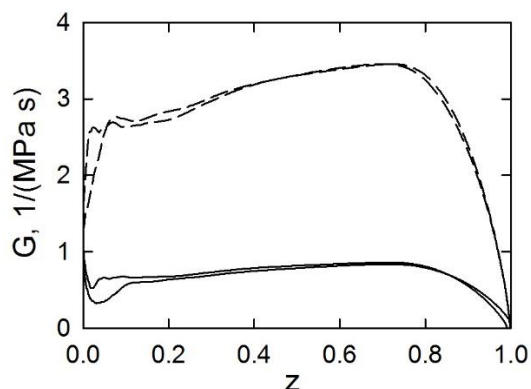
Rys. 8. Wykresy zależności prędkości spalania prochu SC-100 od ciśnienia: z korekcją na straty cieplne (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 8. Plots of dependence of SC-100 propellant burning rate on pressure: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)

A question arises, which values have to be taken for extrapolation of the pressure above 250 MPa. A suggestion may be included in (Grune & Hensel, 1993) presenting the results of tests in the manometric chamber of capacity 400 cm³ and the resistance up to 1500 MPa. It was stated that for the higher values of the loading density there is a stronger dependence of the burning rate on the pressure than indicated by the tests carried out for the lower values of the loading density. The shape of burning

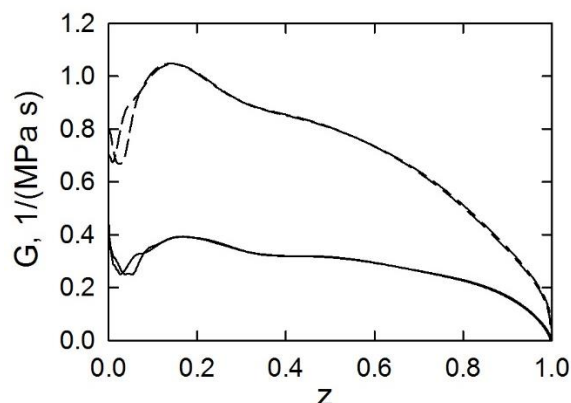
ści prędkości spalania od ciśnienia wskazuje, że wykładnik w prawie spalania ma wartości wyższe niż 1. Odpowiada to wynikom uzyskanym przy korekcji na straty ciepłe. Istnieje zatem uzasadnienie, aby wartości określone przy zastosowaniu korekcji stosować w obliczeniach balistycznych.

rate plots versus pressure indicates that the exponent in the burning law has values greater than 1. It corresponds to the results received at the correction of thermal losses. This is the reason for employing the values determined by the use of correction in ballistic calculations.



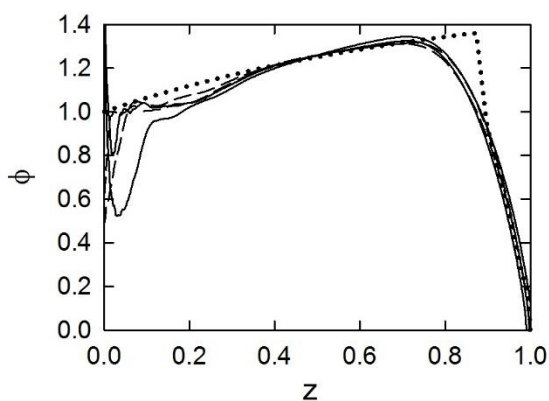
Rys. 9. Wykresy dynamicznej żywości G prochu JA-2: z korekcją na straty ciepłe (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 9. Plots of dynamical vivacity G for JA-2 propellant: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)



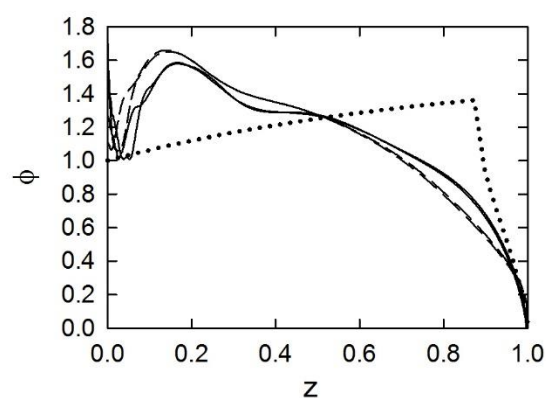
Rys. 10. Wykresy dynamicznej żywości G prochu SC-100: z korekcją na straty ciepłe (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana)

Fig. 10. Plots of dynamical vivacity G for SC-100 propellant: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line)



Rys. 11. Wykresy eksperymentalnej funkcji kształtu prochu JA-2: z korekcją na straty ciepłe (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana), linia kropkowa - funkcja teoretyczna

Fig. 11. Plots of experimental shape function for JA-2 propellant: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line), dotted line – theoretical function



Rys. 12. Wykresy eksperymentalnej funkcji kształtu prochu SC-100: z korekcją na straty ciepłe (linia ciągła) i bez korekcji (linia przerywana), linia kropkowa - funkcja teoretyczna

Fig. 12. Plots of experimental shape function for SC-100 propellant: with thermal losses correction (cont. line) and without correction (broken line), dotted line – theoretical function

Na rysunkach 9 i 10 zestawiono wykresy krzywych dynamicznej żywości G dla przypadku braku korekcji na straty ciepłe i z korekcją. Duże różnice pomiędzy tymi

Figs. 9 and 10 show the plots of the dynamic vivacity G for the cases with, and without, correction. Great differences between these curves are caused by a strong

krzywymi wynikają z silnej zależności wartości G od wartości wykładnika w prawie spalania. Ponieważ korekcja na straty ciepłne powoduje zmianę wartości wykładnika, powoduje to duże zmiany wartości G . Zatem wykorzystanie w obliczeniach balistycznych fizycznego prawa spalania wymaga uwzględnienia korekcji na straty ciepłne.

Alternatywnym podejściem jest wykorzystanie zależności prędkości spalania od ciśnienia oraz eksperymentalnej funkcji kształtu. Na rys. 11 i 12 zestawiono wykresy eksperymentalnej funkcji kształtu określonej dla gęstości ładowania 200 kg/m^3 przy braku korekcji i korekcją. Wykresy te porównano z teoretyczną funkcją kształtu.

Wykresy pokazane na rys. 11 i 12 wskazują, że uwzględnienie strat ciepłnych w niewielkim stopniu wpływa na eksperymentalną funkcję kształtu. W przypadku prochu SC-100 korekta na straty ciepłne w pewnym, stosunkowo niedużym, stopniu wpływa na zbliżenie eksperymentalnej funkcji kształtu do teoretycznej. Tym niemniej, nadal występuje duża rozbieżność eksperymentalnej i teoretycznej funkcji kształtu. W przypadku prochu JA-2 eksperymentalna funkcja kształtu jest znacznie bliższa teoretycznej.

4. Wnioski

1. Uwzględnienie strat ciepłnych istotnie zbliża wartości siły prochu i kowolumenu do wartości otrzymanych z obliczeń termochemicznych. Potwierdza to poprawność zastosowanej metody uwzględnienia strat ciepłnych.
2. Uwzględnienie strat ciepłnych obniża wartość dynamicznej żywości L . Zważywszy na sposób wykorzystania tej wielkości, niecelowe wydaje się uwzględniać straty ciepłne przy określaniu jej wartości.
3. Uwzględnienie strat ciepłnych zmniejsza oszacowane wartości prędkości spalania. Ma to odbicie w zmianie wartości wykładnika n i współczynnika β w prawie spalania. Pierwsza z tych wartości

dependence of value G on the exponent value in the burning law. As the thermal correction makes the exponent value change, it also changes significantly the values of G . Therefore, the application of the physical burning law in the ballistic calculations requires that the correction of thermal losses has to be taken into account.

In alternative approach the dependence of the burning rate on pressure, and the experimental shape function are used. Figs. 11 and 12 show the graphs of the experimental shape function determined at the loading density 200 kg/m^3 for the lack or presence of correction. The plots are compared with theoretical shape function.

The graphs presented in Figs. 11 and 12 indicate that accounting the thermal losses has a little influence on the experimental shape function. In the case of SC-100 propellant the thermal losses correction makes the experimental and theoretical shape functions become similar in certain, but insignificant, degree. Nevertheless, a significant difference still exists between the experimental and theoretical shape functions. In the case of JA-2 propellant the experimental shape function is significantly closer to the theoretical one.

4. Conclusions

1. Accounting the thermal losses significantly puts the values of propellant force and covolume close by to thermochemical results. It confirms the correctness of the method used for taking into account the thermal losses.
2. Consideration of thermal losses reduces the value of the dynamical vivacity L . Concerning the way this parameter is used, it seems unsubstantiated to consider the thermal losses for determination of this value.
3. Consideration of thermal losses reduces the estimated values of the burning rate. It is reflected in changed values of exponent n and coefficient β in the burning law. The first value increases

ulega zwiększeniu, druga zmniejszeniu.

4. Przy wykorzystaniu fizycznego prawa spalania w obliczeniach balistycznych celowe jest wykorzystanie wartości wykładnika n i dynamicznej żywości G określonych przy uwzględnieniu strat ciepłych.
5. Korekta na straty ciepłe słabo wpływa na eksperymentalną funkcję kształtu.

and the second decreases.

4. It is reasonable to use the value of exponent n and dynamical vivacity G determined at consideration of thermal losses if the physical law of burning is employed for ballistic calculations.
5. Correction for thermal losses influences insignificantly the experimental shape function.

Literatura / Literature

- Cleveland WS. (1979). Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, *Journal of American Statistical Association*, 74, 829-836.
- Grune D. & Hensel D. (1993). Burning Behavior of High Energy Propellants in Closed Vessels at High Loading Densities, *Proceedings of the 15-th International Symposium on Ballistics, Vol. 1*, Quebec, Canada, 223-229.
- Homan B.E. & Juhasz A.A. (2001). A New Closed-Bomb Data Acquisition and Reduction Program, ARL-TR-2491, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground.
- Maillette J. & Lussier L.-S. (1990). The Influence of Heat Transfer on the Calculation of Propellant Burning Rates from Closed Vessel Data, *Proceedings of the 12-th International Symposium on Ballistics*, San Antonio, USA, 52-61.
- Price C. & Juhasz A. (1977). A Versatile User-oriented Closed Bomb Reduction Data Program, *BRL Report 2018*, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground.
- Serebryakov M. (1949). *Vnutrennaja ballistika*, Moskwa: Oborongiz.
- STANAG 4115, Edition 2. (1997). *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*, Military Agency for Standardization.
- Torecki S. (1998). Eksperymentalna ocena wpływu strat ciepłych na ciśnienie gazów prochowych w komorze manometrycznej, *Materiały Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”*, Waplewo, 333-341.
- Trębiński R., Leciejewski Z., Surma Z. i Fikus B. (2016). Some Considerations on the Methods of Analysis of Closed Vessel Test Data, *Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics, Vol. 1*, Edinburgh, 607-617.
- Trębiński R., Leciejewski Z., Surma Z. i Fikus B. (2017). Badania pirostatyczne prochu typu JA-2, *Problemy Techniki Uzbrojenia, Vol 142*, 7-23. DOI: 10.5604/01.3001.0010.5115

*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 contains the results of researches and tests conducted in the frame of project
co-financed by the National Centre of Researches and Development within 2016-2019,
Project Nr DOB-BIO8/05/01/2016*

Podziękowania:

Autorzy dziękują prof. Waldemarowi Andrzejowi Trzcieskiemu za udostępnienie wyników obliczeń termodynamicznych.

Acknowledgments:

The authors express their thanks to Prof. Waldemar Andrzej Trzcieski for access to the results of thermochemical calculations.

