

Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials, 2017, 9, 105 – 116; DOI: 10.22211/matwys/0139
ISSN 2083-0165

Copyright 2017 © Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

Praca doświadczalna / Research paper

Wstępne analizy wymagań balistycznych prochów LOVA do amunicji czołgowej nowej generacji *Preliminary analysis of ballistic requirements of LOVA propellants for new generation tank ammunition*

Bartosz Fikus, Zbigniew Leciejewski, Jakub Michalski, Zbigniew Surma,
Radosław Trębiński

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Instytut Techniki Uzbrojenia,
ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, PL

Streszczenie: Pod koniec 2016 r. Konsorcjum Naukowo-Przemysłowe (Mesko S.A., Polska Grupa Zbrojeniowa S.A., Politechnika Warszawska, Wojskowa Akademia Techniczna, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia) rozpoczęło realizację projektu badawczo-rozwojowego, którego celem jest opracowanie i wykonanie demonstratorów technologii krytycznych elementów do nowej generacji, polskiej amunicji czołgowej 120 mm. Do elementów krytycznych w tym projekcie zaliczono samospalającą się łuskę, małowrażliwy materiał miotający oraz pręty wolframowe do pocisku podkalibrowego. Zadaniem Wojskowej Akademii Technicznej jest opracowanie podstaw technologii i wykonanie w skali laboratoryjnej małowrażliwego materiału miotającego typu LOVA (zespół badawczy Wydziału Nowych Technologii i Chemii) oraz przeprowadzenia badań balistycznych i badań symulacyjnych zjawiska strzału w 120 mm czołgowym układzie miotającym z wykorzystaniem amunicji elaborowanej opracowanym prochem LOVA (zespół badawczy Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa).

W niniejszym artykule zawarto analizy literaturowe dotyczące właściwości energetyczno-balistycznych prochów typu LOVA oraz prochu JA-2. Ponadto przeprowadzono własne badania pirostatyczne prochu JA-2 (produkcji Nitrochemie AG) oznaczonego jako LO5460. Badania te przeprowadzono w komorze manometrycznej o pojemności 200 cm³. Na podstawie zarejestrowanego (w czasie) ciśnienia gazów prochowych określono siłę prochu, kowolumen gazów prochowych oraz krzywe żywości dynamicznej. Wykorzystując wyniki pomiarów geometrii ziaren prochu określono współczynnik liniowej szybkości spalania. Wyniki badań własnych pozwoliły na przeprowadzenie wstępnych badań symulacyjnych zjawiska strzału w 120 mm układzie miotającym.

Abstract: At the end of 2016, the Polish Scientific-Industrial Consortium (Mesko S.A., Polish Armed Forces Group, Warsaw University of Technology, Military University of Technology, Military Institute of Armament Technology) started a R&D project aimed at developing and implementing technology demonstrators of critical elements for the new generation of 120 mm Polish tank ammunition. Critical elements in this project are: self-burning cartridge case, insensitive propellant and tungsten rods for projectile. The task of the Military University of Technology is to develop technology and perform laboratory-scale LOVA propellant and carry out ballistic research and simulation studies of a shot in a 120 mm tank barrel system using developed ammunition. This paper contains comparative theoretical analysis of the energetic and ballistic properties of LOVA and JA-2 gun propellants. In addition, own experimental closed vessel tests of JA-2 gun propellant designated LO5460 were performed. Closed vessel test were carried out in manometric chamber having the volume of 200 cm³. Based on the

recorded pressure changes, the force and co-volume were calculated and the dynamic vivacity curves were determined. Using the results of measurements of propellant grains geometry, the linear burning rate was determined. The results of our own research allowed us to conduct preliminary simulations of the shooting phenomenon in a 120 mm gun propulsion system.

Słowa kluczowe: mało-wrażliwy materiał miotający, badania pirostatyczne

Keywords: insensitive gun propellant, closed vessel tests

1. Wprowadzenie

Rozwój przyszłościowej amunicji o wysokich parametrach balistycznych oraz prochowych układów miotających jest ukierunkowany na poprawę charakterystyk energetyczno-balistyczno-użytkowych klasycznych prochów jedno-, dwu- i wielobazowych oraz na poszukiwanie nowych miotających materiałów wybuchowych o składzie chemicznym bardziej przyjaznym dla środowiska (tzw. *Green propellants*), które powinny umożliwić:

- wzrost prędkości wylotowej pocisków, szczególnie w klasycznym rozwiązaniu konstrukcyjnym układu miotającego,
- zmniejszenie zużycia wewnętrznej powierzchni lufy, co przyczynia się do zwiększenia jej żywotności, a także polepszenia celności broni,
- zmniejszenie wrażliwości amunicji na działanie czynników mechanicznych i termicznych (podczas transportu, przechowywania i eksploatacji),
- zwiększenie stabilności charakterystyk balistycznych amunicji w wyniku zmian temperaturowych środowiska w szerokim zakresie.

Amunicję o obniżonej wrażliwości na działanie czynników mechanicznych i termicznych można ogólnie podzielić na dwie grupy [1] – IM oraz LOVA. Pierwszą z nich, czyli IM (ang. *Insensitive Munitions*), stanowi amunicja zawierająca materiały miotające o polepszonych właściwościach na oddziaływanie czynników mechanicznych, takich jak uderzenie pociskiem, odłamkiem lub ładunkiem kumulacyjnym. Materiały miotające zastosowane w tej amunicji zawierają zwykle nitrocelulozę i są nadal wrażliwe na oddziaływanie podwyższonej temperatury (np. podczas podgrzewania).

Drugą grupę amunicji o obniżonej wrażliwości stanowi LOVA (ang. *Low Vulnerability Ammunition*). Zmniejszona wrażliwość materiałów miotających przeznaczonych do tej amunicji (dalej zwanych prochami LOVA) jest zwykle powiązana z wyższą wartością progową cieplnego impulsu zapłonowego i zmniejszeniem szybkości spalania przy niskim ciśnieniu gazów prochowych.

Tab. 1. Składy prochów typu LOVA pierwszej generacji

Składnik	Zawartość w prochu [%]	
	XM-39	M-43
Nitroceluloza, NC (%N)	4,0 (12,6)	4,0 (12,6)
Centralit I	0,4	0,4
Siarczan potasu, K ₂ SO ₄	1,2	–
Heksogen, RDX	74,8	76
Acetlocytryniantrietylu, ATEC	7,6	–
Octano-maślan celulozy, CAB	12,0	12
BDNPA/BDNPF	–	3,8/3,8

Koncepcja tego typu prochów złożonych (kompozytowych) zrodziła się już w czasie II wojny światowej. Wtedy to opracowano pierwsze materiały miotające zawierające stałe cząstki utleniacza zawieszzone w uplastycznionej osnowie polimerowej (tzw. lepszcze). W trakcie ostatnich 50 lat zaproponowano i przebadano wiele kompozycji prochowych tego typu, które generalnie składają się z 70-80% wysokoenergetycznego wypełniacza – w tej roli stosuje się zwykle heksogen (RDX) lub oktogen (HMX), 10-25% polimeru i jednego lub kilku plastyfikatorów.

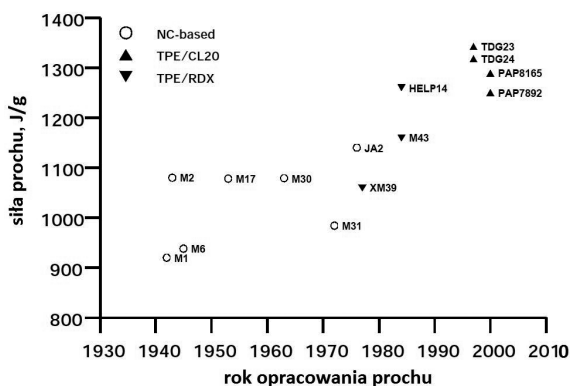
RDX i HMX charakteryzują się dodatnią entalpią tworzenia, korzystnym bilansem tlenowym oraz dużą odpornością termiczną i dlatego stanowią atrakcyjny zamiennik wrażliwej nitrogliceryny w materiałach miotających o obniżonej wrażliwości, tj. prochów typu LOVA pierwszej generacji XM-39 i M-43 (Tabela 1). Zdecydowano, że wyjściowe składy tworzonych w Wydziale Nowych Technologii i Chemii WAT kompozycji prochu LOVA będą kształtowały się następująco [2]:

- a) energetyczny wypełniacz, od 72% do 80%, jako jeden z trzech wymienionych poniżej:
 - RDX, lub
 - RDX/Nitroguanidyna (NQ), lub
 - NQ/ NH_4ClO_4 ,
- b) polimer, od 14% do 18%, jako jeden z trzech wymienionych poniżej:
 - octano-maślan celulozy (CAB), lub
 - CAB/nitroceluloza (NC), lub
 - NC/hydroksypropyloceluloza (HPC),
- c) plastyfikator, od 6% do 10%, jako jeden z dwóch wymienionych poniżej:
 - acetylocytriantrietylu (ATEC),
 - diazotan glikolu dietylenowego (DEGDN).

Badania nad rozwojem w Polsce technologii prochów typu LOVA wymagają posiadania również danych referencyjnych dla oceny balistycznych właściwości nowo opracowanych prochów. Z kolei badania symulacyjne zjawiska strzału, w których będzie zastosowana nowa polska amunicja (z prochem typu LOVA), powinny być przeprowadzone z wykorzystaniem rzeczywistych danych dotyczących kształtu ziaren prochowych oraz wartości charakterystyk energetyczno-balistycznych tych prochów, takich jak: siła prochu, kowolumen, żywność dynamiczna, szybkość spalania. Wartości tych charakterystyk pozyskuje się w wyniku realizacji badań pirostatycznych.

W początkowym etapie realizacji projektu badawczo-rozwojowego założono, że proch JA-2 (a właściwie jego charakterystyki geometryczne ziaren oraz energetyczno-balistyczne) będzie prochem wzorcowym w stosunku do opracowywanego prochu małowrażliwego. Na rysunku 1 pokazano zaczerpnięte z raportu [3] zestawienie siły prochu dla prochów opracowanych w różnych latach. Wartości siły prochu JA-2 umiejscowione są pomiędzy wartościami siły prochów typu LOVA: XM-39 oraz M-43.

W niniejszym artykule zawarto analizy literaturowe dotyczące właściwości energetyczno-balistycznych prochów typu LOVA oraz prochu JA-2. Ponadto przeprowadzono własne badania pirostatyczne prochu JA-2 (produkcji Nitrochemie AG) oznaczonego jako LO5460. Badania te przeprowadzono w komorze manometrycznej o pojemności 200 cm³.



Rys. 1. Zestawienie wartości siły prochu dla prochów JA-2, XM-39 oraz M-43 na tle wybranych prochów opracowanych w latach 1930-2010 [3]

Na podstawie zarejestrowanego (w czasie) ciśnienia gazów prochowych określono siłę prochu, kowolumen gazów prochowych oraz krzywe żywności dynamicznej. Wykorzystując wyniki pomiarów geometrii ziaren prochu

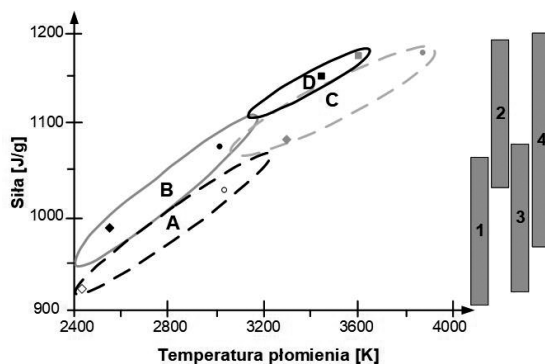
określono współczynnik liniowej szybkości spalania. Wyniki badań własnych pozwoliły na przeprowadzenie wstępnych badań symulacyjnych zjawiska strzału w 120 mm układzie miotającym.

2. Badania literaturowe i własne prochu JA-2

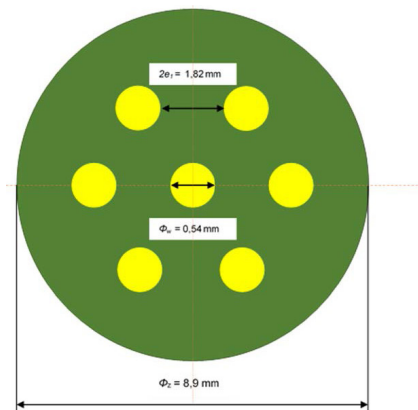
Proch JA-2, wykorzystywany do elaboracji 120 mm amunicji czołgowej o oznaczeniu M829A1/A2 z pociskiem APFSDS-T, jest prochem należącym do grupy prochów dwubazowych (rys. 2), wykonywanych w technologii SCDB (ang. *Surface Coated Double Base*). W prochach tych oprócz nitrocelulozy (o zawartości około 13,2% N) i nitrogliceryny (NG) występuje jeszcze DEGDN (Tabela 2). Oryginalny kształt ziaren to ziarna cylindryczne, 7-kanalikowe o długości 15,5 mm (rys. 3).

Tab. 2. Składy prochów dwubazowych M8 [5] i JA-2 [6]

Proch	NC	NG	DEGDN	Difenyloamina	Centralit I	Akardyt II	KNO ₃
M8	52,15	43,0	–	3,0	0,6	–	1,25
JA-2	59,5	14,9	24,8	–	–	0,7	–



Rys. 2. Umieszczenie prochów jedno- (A), trój- (B) i dwubazowych (w tym: – NG (C) oraz – DEGDN/(NG) (D)) we współrzędnych siła prochu – temperatura spalania, z uwzględnieniem przeznaczenia prochu (– do małych i średnich kalibrów (1); – moździerzowe (2); – artyleryjskie (3); – do amunicji czołgowej (4)) oraz wybranych marek: – JA-2 (■); – L1 (■); – M1 (◇); – M5 (◆); – M9 (●); – M10 (○); – M15 (◆); – M30 (●). [4]

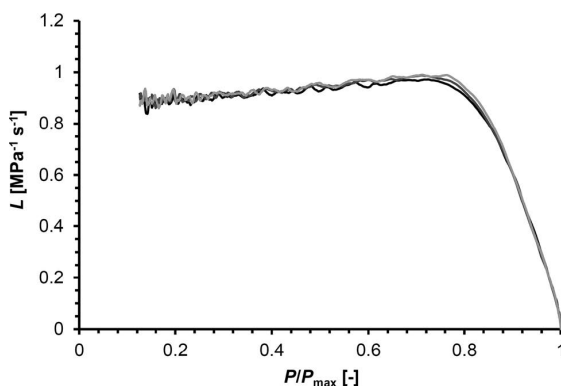


Rys. 3. Charakterystyczne wymiary ziarna JA-2 w przekroju poprzecznym

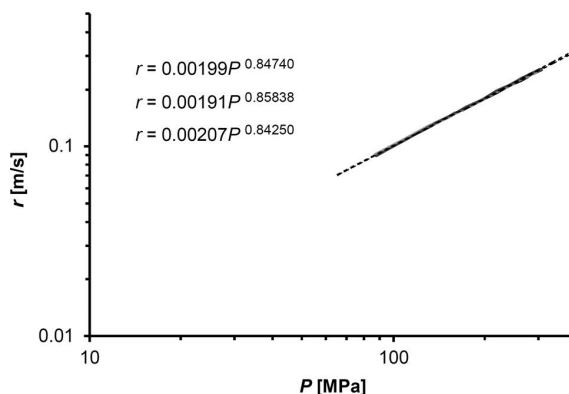
Podstawą określania podstawowych właściwości energetyczno-balistycznych prochów jest pomiar ciśnienia $p(t)$ i ciśnienia maksymalnego p_m wysokotemperaturowych gazów prochowych w komorze manometrycznej o określonej objętości W_0 , podczas spalania w niej ładunków prochowych o różnych masach ω (tym samym w warunkach różnej gęstości ładowania $\Delta = \omega/W_0$).

Poniżej zaprezentowano – opublikowane w [6] – wybrane wyniki badań pirostatycznych oryginalnego prochu JA-2 przeprowadzonych w komorze manometrycznej o objętości 700 cm^3 zgodnie z procedurą opisaną w porozumieniu standaryzacyjnym STANAG 4115 [7]. Rys. 4 i 5 prezentują żywość dynamiczną (w funkcji p/p_{\max}) i szybkość spalania (w funkcji p). Wartości współczynnika β potęgowego prawa szybkości spalania ($r = \beta \cdot p^\beta$) podano w $[\text{m/s} \cdot (\text{MPa})^\beta]$. Żywość dynamiczną określano z zależności

$$L \left(\frac{p}{p_{\max}} \right) = \frac{dp}{p p_{\max}} \quad (1)$$



Rys. 4. Żywość dynamiczna (doświadczalna) oryginalnego prochu JA-2 [6]



Rys. 5. Szybkość spalania oryginalnego prochu JA-2 [6]

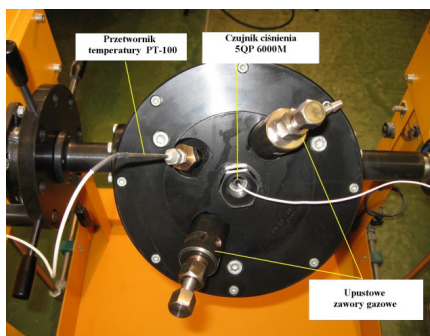
Badania własne prochu JA-2 (o symbolu LO5460) przeprowadzono w Laboratorium Balistyki Instytutu Techniki Uzbrojenia Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa WAT na stanowisku badawczym, którego głównymi elementami stanowiska są:

- komora manometryczna, w postaci grubościennego, cylindrycznego naczynia o objętości $W_0 = 200 \text{ cm}^3$, umożliwiająca spalanie prochu w warunkach izochorycznych (rys. 6 i 7),
- piezoelektryczny przetwornik ciśnienia 5QP 6000M, zamieniający wielkość mechaniczną (ciśnienie) na

- proporcjonalną wartość ładunku elektrycznego,
- wzmacniacz ładunku typu TA-3/D firmy Vibro-Meter, wysyłający do urządzenia przetwarzającego sygnał elektryczny (napięcie) proporcjonalny do wartości mierzonego ciśnienia,
 - 12-bitowy, 4-kanalowy przetwornik analogowo-cyfrowy typu DAS-50 firmy Keithley (USA), zamieniający wychodzący ze wzmacniacza ładunku sygnał analogowy na postać cyfrową,
 - rejestrator (komputer klasy PC), umożliwiającą zachowanie i obróbkę wyników pomiaru.



Rys. 6. Komora manometryczna firmy AVL-HPI (Austria) na wózku transportowym



Rys. 7. Komora manometryczna – widok od strony dna z gniazdami na elementy pomiarowe

Spalanie prochu inicjowano za pomocą prochu czarnego kb-2, wytwarzając ciśnienie zapłonu 3 MPa. Przeprowadzono po dwie próby dla gęstości ładowania 100 kg/m³ i 200 kg/m³. Na podstawie zarejestrowanego (w czasie) ciśnienia gazów prochowych w komorze spalania określono siłę prochu i kowolumen gazów prochowych oraz dokonano oceny wpływu strat cieplnych na wartości tych parametrów. W kolejnym kroku określono wartość wykładnika w prawie spalania prochu, a następnie określono krzywe dynamicznej żywości. Dla określenia parametrów energetycznych prochu wykorzystano równanie stanu Noblego-Abela (NA):

$$pv = \frac{nRT}{1 - \frac{\alpha_p}{v}} \quad (2)$$

i równanie wirialne (W):

$$pv = nRT \left(1 + \frac{\beta}{v} \right) \quad (3)$$

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.

W tabeli 3 podano wartości parametrów energetycznych dla prochu JA-2 (LO5460) określone na podstawie badań własnych. Korekta dotyczy uwzględnienia strat cieplnych. Symbol NA odnosi się do równania Noblego-Abela, symbol W do równania wirialnego.

Tab. 3. Wartości parametrów energetycznych prochu JA-2

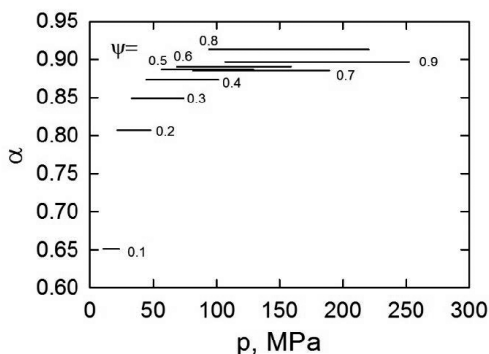
Parametr	Jednostka	LO5460	
		bez korekty	z korektą
Siła prochu	NA, [MJ/kg]	1,020	1,169
	W, [MJ/kg]	0,981	1,135
Kowolumen	[dm ³ /kg]	1,359	1,019
Współczynnik wirialny	[dm ³ /kg]	2,245	1,468

Porównano skorygowane wartości siły prochu LO5460 z danymi zawartymi w pracy [6]. W pracy tej podano wartość 1,153 MJ/kg dla prochu JA-2, zaś wartość 1,165 MJ/kg dla ekwiwalentu JA-2 niezawierającego plastyfikatora oraz 1,120 MJ/kg dla zawierającego 4% plastyfikatora. Kowolumen gazów prochowych podany w pracy [6] wyniósł 0,98 dm³/kg. Są to wartości bardzo bliskie oszacowanym z uwzględnieniem korekty na straty ciepłe. Należy zwrócić uwagę, że zostały one określone na podstawie badań w komorze manometrycznej o pojemności 700 cm³, zatem w warunkach mniejszych strat cieplnych. Przyjmując prawo szybkości spalania w postaci:

$$\frac{d\psi}{dt} = \Gamma(\psi) p_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

gdzie: t – czas, ψ – względna masa (objętość) spalonego prochu, p_0 – ciśnienie atmosferyczne, Γ – dynamiczna żywość prochu oraz α – wykładnik,

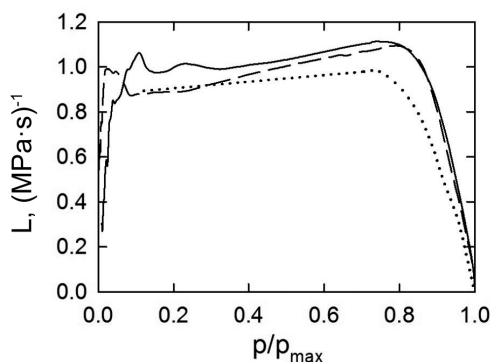
dla wyznaczenia wartości wykładnika α wykorzystano metodę zaproponowaną w pracy [8].



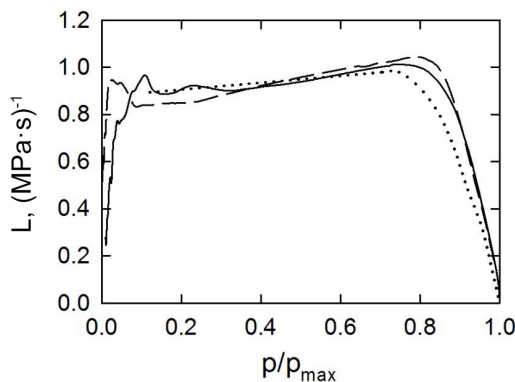
Rys. 8. Wyniki obliczeń wartości wykładnika w prawie spalania – proch LO5460

Dla prochu JA-2 typu LO5460 w zakresie wartości ψ od 0,1 do 0,4 przejawia się wpływ wstępnego przegrzania ziaren prochowych, które powoduje zaniżanie wartości wykładnika w prawie spalania. Jednakże dla $\psi \in [0,5; 0,9]$ uzyskuje się bardzo zbliżone wartości α . Uśredniona wartość α dla tego zakresu ψ wynosi 0,894 (rys. 8). Dysponując wartością wykładnika w prawie spalania możemy określić krzywe dynamicznej żywości prochów. Na rys. 9 pokazano wykresy dynamicznej żywości prochu, zdefiniowanej wzorem (1), dla prochu LO5460, uzyskane na podstawie wyników własnych badań [9]. Krzywe $L(p/p_{\max})$ dla różnych gęstości ładowania nie

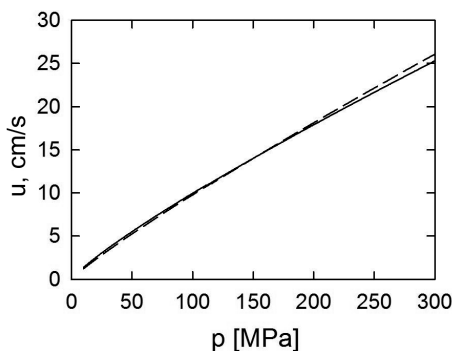
pokrywają się ze sobą. Różnią się one również od krzywej $L(p/p_{max})$ będącej uśrednieniem krzywych pokazanych na rys. 4 (krzywa kropkowana). Określone na podstawie własnych badań krzywe $L(p/p_{max})$ sugerują, że badany proch ma bardziej progresywną charakterystykę niż proch badany w pracy [6]. Może to wynikać z innych wymiarów geometrycznych ziarna prochowego. Inna przyczyna może leżeć we wpływie strat ciepłych. Krzywa podana w pracy [6] otrzymana została na podstawie wyników prób w komorze o pojemności 700 cm^3 , podczas gdy we własnych badaniach stosowano komorę o pojemności 200 cm^3 . W większej komorze straty ciepłe są mniejsze. Zatem większe będą wartości p , p_{max} i dp/dt . Ponieważ przyrosty p i dp/dt w przybliżeniu się kompensują, decydujący wpływ ma przyrost wartości p_{max} . Wartości stosunków ciśnienia maksymalnego z uwzględnieniem strat ciepłych i bez ich uwzględnienia wskazują, że dla gęstości ładowania 100 kg/m^3 wynosi on 1,1, zaś dla gęstości ładowania $200 \text{ kg/m}^3 - 1,048$. Dzieląc przez te wartości obliczone wartości L otrzymujemy wykresy pokazane na rys. 10. Są one bliższe wykresowi z rys. 4.



Rys. 9. Wykresy dynamicznej żywości prochu LO5460 określone ze wzoru (1); linia ciągła $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$, linia przerywana $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$, linia kropkowa – uśrednione wykresy z rys. 4



Rys. 10. Wykresy dynamicznej żywości prochu LO5460 określone ze wzoru (1) i przeliczone z uwzględnieniem strat ciepłych; linia ciągła $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$, linia przerywana $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$, linia kropkowa – uśrednione wykresy z rys. 4



Rys. 11. Zależność szybkości spalania prochu JA-2 od ciśnienia: linia przerywana – uśrednione wartości obliczone ze wzorów (5), linia ciągła – badania własne

W pracy [6] zależność szybkości spalania od ciśnienia aproksymowano trzema zależnościami:

$$u = 0,199 p^{0,8474}; u = 0,191 p^{0,85838}; u = 0,0,207 p^{0,8425}, [u] = \text{cm/s}, [p] = \text{MPa} \quad (5)$$

Średnia wartość wykładnika około 0,85 jest nieco mniejsza od wartości wyznaczonych w badaniach własnych (0,894). Na rys. 11 zestawiono wartości liniowej szybkości spalania uśrednionych z wartości określonych za pomocą wzorów (5) i określonych w badaniach własnych. Jak widać, występuje dobra zgodność wartości szybkości spalania. Dla wyższych wartości ciśnienia pojawia się stosunkowo niewielka niezgodność wartości liniowej szybkości spalania. Wynika ona z wyższej wartości wykładnika w prawie spalania, określonej we własnych badaniach. Dlatego można uznać, że dokonana w opracowaniu ocena szybkości spalania prochu JA-2 daje wyniki zbieżne z danymi literaturowymi.

3. Wstępne symulacje zjawiska strzału

W celu przeprowadzenia symulacji strzału w 120 mm armacie czołgowej opracowano model fizyczny rozpatrywanego układu miotającego oraz sformułowano na podstawie porozumienia STANAG 4367 [10] model matematyczny zjawisk zachodzących podczas strzału, pozwalający na rozwiązanie tzw. problemu głównego balistyki wewnętrznej (PGBW). W celu rozwiązania układu równań modelu matematycznego oraz przeprowadzania symulacji numerycznych opracowano program komputerowy. Symulacje przeprowadzono dla przeciwpancernego pocisku ćwiczebnego ze smugaczem, stabilizowanego brzechwowo, z odrzucanym sabotem (APFSDS-T-TP). Przyjęto, że jednoskładnikowy ładunek miotający w rozpatrywanym układzie wykonany jest na bazie prochu JA-2 o ziarnach w kształcie walca z siedmioma kanalikami – LO5460. Dane przyjęte do obliczeń przedstawiono w tabelach 4 i 5. Charakterystyki układu oporopowrotnego zaczerpnięto z [11].

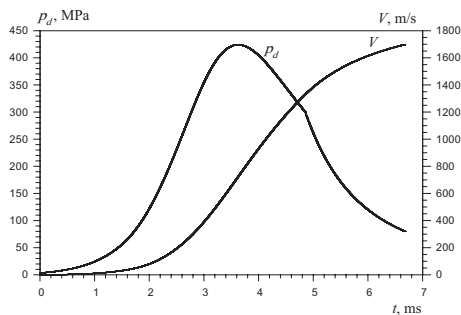
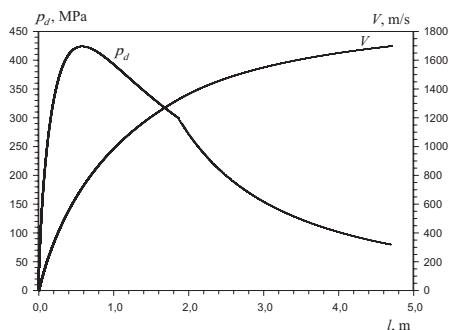
Tab. 4. Charakterystyki konstrukcyjne broni (lufa o przewodzie gładkim) i pocisku APFSDS-T-TP

Parametr	Jednostka	Wartość
Masa zespołu odrzucanego	M_{zo} [kg]	3300
Kaliber lufy	d [mm]	120
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy	l_w [m]	4,7
Objętość komory nabojoywej	W_0 [dm ³]	9,8
Masa pocisku	m [kg]	4,8
Sztywność sprężyny powrotnej	k_s [N/m]	1450
Siła wstępnego ugięcia sprężyny powrotnej	F_0 [N]	12000

Tab. 5 Charakterystyki jednoskładnikowego ładunku miotającego (siedmiokanalikowy proch LO5460)

Parametr	Jednostka	Wartość
Liczba składników ładunku miotającego	n	1
Masa prochu	ω [kg]	7,25
Siła prochu (z badań własnych)	f [J/g]	1020
Izochoryczno-adiabatyczna temperatura spalania prochu	T_i [K]	3450
Wykładnik prawa szybkości spalania (z badań własnych)	N	0,894
Współczynnik prawa szybkości spalania (z badań własnych)	A [m/(s Pa ^N)]	$0,07 \cdot 10^{-7}$
Wykładnik adiabaty gazów prochowych	k	1,2
Kowolumen gazów prochowych (z badań własnych)	α [dm ³ /kg]	1,359
Gęstość prochu	δ [kg/m ³]	1600
Długość ziarna (z badań własnych)	L [mm]	15,5
Średnica ziarna (z badań własnych)	D [mm]	8,78
Średnica kanalika (z badań własnych)	P [mm]	0,546
Grubość warstwy palnej (z badań własnych)	e_l [mm]	0,893

Na rys. 12 i 13 przedstawiono wykresy podstawowych charakterystyk strzału uzyskane w wyniku obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem opracowanego programu komputerowego, danych o wymiarach geometrycznych ziaren prochu LO5460 oraz jego charakterystykach energetyczno-balistycznych uzyskanych w wyniku własnych badań.

**Rys. 12.** Wykresy ciśnienia dennego p_d gazów i prędkości V pocisku w funkcji czasu t **Rys. 13.** Wykresy ciśnienia dennego p_d gazów i prędkości V pocisku w funkcji drogi l pocisku

Według [12, 13] rzeczywiste parametry strzału 120 mm ćwiczebną amunicją czołgową APFSDS-T-TP przedstawiają się następująco:

- ciśnienie maksymalne gazów prochowych: 430 MPa,
- prędkość wylotowa pocisku: 1715 ± 20 m/s.

Zatem uzyskane wyniki badań symulacyjnych na tym etapie świadczą zarówno o prawidłowym opracowaniu modelu matematycznego zjawiska strzału jak i wprowadzanych danych wejściowych (w tym pozyskanych z własnych badań doświadczalnych prochu JA-2).

Opracowany program komputerowy umożliwia analizę krzywych balistycznych również dla ładunku wieloskładnikowego (z uwzględnieniem samospalającej się łuski) z ziarnami o kształtach innych jak siedmiokanalikowe.

4. Wnioski

- 1) Przeprowadzone pirostatyczne badania własne prochu JA-2 z ziarnami typu LO5460 wskazują, że:
 - a) wyznaczone wartości charakterystyk energetycznych są zbliżone z danymi literaturowymi. Po ich skorygowaniu ze względu na straty cieplne, uzyskuje się wartości siły prochu typowe dla prochów typu LOVA,
 - b) analiza dynamicznej żywości prochów dowiodła poprawności fizycznego prawa spalania prochu. Krzywe dynamicznej żywości dla różnych gęstości ładowania pokrywają się ze sobą, poza początkowym i końcowym fragmentem,
 - c) zestawienie charakterystyk szybkości spalania prochu LO5460 z danymi literaturowymi dla prochu JA-2 daje dobrą zgodność wartości.
- 2) Na podstawie wyników wstępnych obliczeń, przeprowadzonych dla 120 mm przeciwpancernego pocisku ćwiczebnego APFSDS-T-TP, wyciągnąć można następujące wnioski:
 - a) możliwe jest osiągnięcie zadowalającej zgodności rzeczywistych i obliczonych parametrów strzału, m.in. takich jak ciśnienie maksymalne gazów w przewodzie lufy oraz prędkość wylotowa pocisku,
 - b) ze względu na realizację obliczeń dla temperatury normalnej, wartości współczynników poprawkowych: współczynnika temperaturowego szybkości spalania f_{BT} oraz współczynnika temperaturowego siły prochu f_{FT} przyjęto równe 1.

Podziękowanie

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.

Literatura

- [1] van Driel A.Ch. 2008. *Ignition Behaviour of Lova Propellant*. Proceedings of the 24th International Symposium on Ballistics, New Orleans (USA), 22-26.09.2008, pp. 258-264.
- [2] *Sprawozdanie merytoryczne z uzyskanych wyników w ramach etapu 1*. Załącznik nr 2 do raportu z zakończenia etapu 1. Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2017. (dokument wewnętrzny WAT dostępny w Wydziale Nowych Technologii i Chemii oraz w Wydziale Mechatroniki i Lotnictwa).
- [3] Horst A.W., Baker P.J., Rice B.M., Kaste P.J., Colburn J.W., Hare J.J. 2001. *Insensitive High Energy Propellants for Advanced Gun Concepts*. Technical Report ARL-TR-2584, Army Research Laboratory, Aberdeen.
- [4] Vogelsanger B., Huber A., Jaskolka H. 2007. *Insensitive Propulsion Systems for Large Caliber Ammunition*. Insensitive Munition and Energetic Materials Technology Symposium, October 15-18, 2007, Miami Florida, USA.
- [5] Leveritt Ch.S., Conroy P.J., Johnson A.W. 2002. *Relative Erosivity of Nitroamine Gun propellants with Thermoplastic/Elastomer Binder Systems*. Proceedings of the 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium, pp. 258-264.

- [6] Manning G.T., Leone J., Zebregs M., Ramlal R.D., van Driel A.Ch. 2013. Definition of a JA-2 Equivalent propellant to be Produced by Continuous Solventless Extrusion. *Journal of Applied Mechanics* 80:031405-1÷7.
- [7] NATO Standardization Agreement (STANAG) 4115. 1997. *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*. 2nd ed., NATO Standardization Agency, Brussels.
- [8] Trębiński R., Leciejewski Z., Surma Z., Fikus B. 2016. *Some Considerations on the Methods of Analysis of Closed Vessel Test Data*. Proc. of the 29th International Symposium on Ballistics, 9-13 May, 2016, Edinburgh, Great Britain, vol.1: 607-617.
- [9] Trębiński R., Leciejewski Z., Surma Z., Fikus B. 2017. Badania pirostatyczne prochu typu JA-2. *Problemy Techniki Uzbrojenia* 142 (2): 7-23.
- [10] STANAG 4367, *Thermodynamic Interior Ballistic Model with Global Parameters*. NATO 2000.
- [11] <http://10bkpanc.wp.mil.pl/pl/69.html> [strona dostępna 02.05.2017].
- [12] http://www.mesko.com.pl/materialy/info/produkty_pliki/186-pdf.pdf [strona dostępna 02.05.2017].
- [13] Pankowski Z. 2008. Żywotność luf 120 mm armat czołgowych. *Problemy Techniki Uzbrojenia* 107 (37): 95-103.

Received: May 3, 2017

Revised: November 24, 2017

Published: December 28, 2017