

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2016, 8, 13 – 26

ISSN 2083-0165

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

Zastosowanie testu cylindrycznego do wyznaczania charakterystyk nieidealnych materiałów wybuchowych *Application of the cylinder test in determining the characteristics of non-ideal explosives*

Waldemar A. Trzciniński,* Helena Haque-Pawlik

Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, PL

* E-mail: waldemar.trzcinski@wat.edu.pl

Streszczenie: W pracy wykonano test cylindryczny dla wybranych nieidealnych materiałów wybuchowych. Wyniki testu wykorzystano do wyznaczania energii Gurneya, ciśnienia i energii detonacji oraz współczynników równania izentropii JWL (Jones, Wilkins, Lee) dla produktów detonacji. Równania izentropii umożliwiły obliczenie teoretycznej pracy ekspansji produktów detonacji dla badanych materiałów wybuchowych. Wyznaczone równania stanu mogą być wykorzystane na przykład do modelowania oddziaływania produktów detonacji na skały czy napędzania płyt w układach do platerowania.

Abstract: In this work, the cylinder test was performed on a selection of non-ideal explosives. The test data were used to determine the Gurney energy, detonation pressure and energy, and the coefficients of the JWL (Jones, Wilkins, Lee) equation of isentrope for detonation products. The isentrope equations were used to calculate the theoretical expansion work of the detonation products of the tested explosives. The determined equations of state can be used, for example, to model the action of the detonation products on rock materials or the acceleration of plates in cladding systems.

Słowa kluczowe: nieidealne materiały wybuchowe, charakterystyki wybuchowe, równania stanu produktów detonacji, metody badań

Keywords: non-ideal explosives, performance of explosives, equation of state for detonation products, testing methods

1. Wstęp

Do podstawowych charakterystyk nieidealnych materiałów wybuchowych należą prędkość i ciśnienie detonacji, ciepło wybuchu i zdolność do wykonania pracy. Prędkość detonacji wyznacza się wykorzystując czujniki zwarciove i jonizacyjne oraz włókna optyczne umożliwiające pomiar czasu przejścia fali detonacyjnej przez określony dystans w materiale wybuchowym. Do pomiaru ciśnienia detonacji stosuje się czujniki piezorezystancyjne i piezoelektryczne a także metody pośrednie, na przykład test wodny [1]. Ciepło wybuchu wyznacza się najczęściej w bombie kalorymetrycznej dla ładunków umieszczonych w masywnej otoczce zapewniającej szybkie chłodzenie produktów w trakcie ich rozlotu [2]. Rolę stałej otoczki może również spełniać obojętny chemicznie gaz poddany wstępnemu sprężeniu [3]. Do oszacowania zdolności do wykonania pracy stosuje się wahadło balistyczne, ołowiany blok Trauzla, próbę Hessa, test płyty stalowej, test cylindryczny i test podwodny.

Parametrów detonacji nieidealnych materiałów wybuchowych (ciśnienia i prędkości detonacji) nie wyznacza się w zasadzie w sposób teoretyczny ze względu na fakt, że tylko część energii z reakcji chemicznych wydziela się w tzw. strefie reakcji chemicznych fali detonacyjnej. Tymczasem w kodach termochemicznych do obliczania

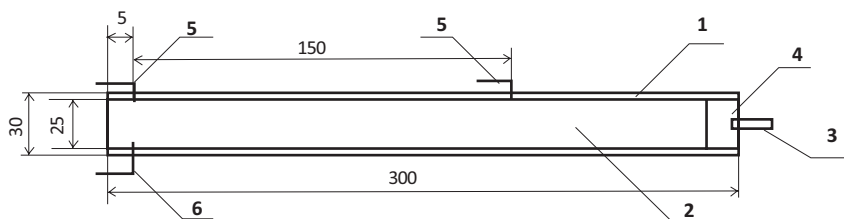
parametrów detonacji, na przykład TIGER [4], CHEETAH [5], EXPLO5 [6], ZMWI [7], zakłada się pełną równowagę chemiczną produktów detonacji w końcu strefy reakcji chemicznych. Dlatego też w przypadku nieidealnych materiałów wybuchowych w normie [8] opisano termochemiczną metodę wyznaczania parametrów wybuchu w stałej objętości: ciśnienia i składu produktów wybuchu, ciepła wybuchu, objętości gazowych produktów wybuchu oraz siły właściwej wybuchu. Realizacją metody opisanej w [8] jest kod termochemiczny ZMWCyw [9].

Wyniki obserwacji napędzania metalowej rurki przez produkty detonacji ładunku materiału wybuchowego umieszczonego wewnątrz niej mogą dostarczyć wielu informacji dotyczących charakterystyk energetycznych i detonacyjnych tego materiału. Próba taka nazywana jest *testem cylindrycznym*. Napędzanie cylindrycznej metalowej otoczki rejestrowane jest za pomocą metod pomiaru szybkościennych procesów, takich jak: fotografia smugowa, interferometria laserowa czy impulsowa fotografia rentgenowska. W pracach [10, 11] przedstawiono metody umożliwiające wykorzystanie danych z rejestracji miotania rurki do określania zdolności miotających i energii detonacji wojskowych materiałów wybuchowych oraz równania stanu i pracy ekspansji ich produktów detonacji, natomiast w pracy [12] podjęto próbę wyznaczenia na podstawie wyników testu cylindrycznego wybranych charakterystyk wybuchowych dla mieszanin azotanu amonu z trotylem i proszkiem glinowym. W niniejszej pracy wykazemy, że test cylindryczny może być z powodzeniem zastosowany do kompleksowej charakterystyki nieidealnych materiałów wybuchowych, do których zaliczają się również materiały wybuchowe przeznaczone do użytku cywilnego.

2. Metodyka badawcza

2.1. Test cylindryczny

Test cylindryczny polega na rejestracji procesu napędzania cylindrycznej miedzianej otoczki produktami detonacji ślizgającej się po jej wewnętrznej powierzchni. Schemat ładunku i rurki miedzianej stosowanych w teście cylindrycznym przedstawiono na rys. 1. Rurki miedziane miały długość 300 mm, średnicę wewnętrzną 25 mm i grubość 2,5 mm. Wymiary te są zbliżone do wymiarów rurki w standardowym teście cylindrycznym (średnica 25,4 mm, grubość ścianki 2,54 mm). Rurki były wyżarzane w próżni w temperaturze ok. 500 °C w czasie 1 h. Do pomiaru prędkości detonacji zastosowano metodę czujników zwarciovych. Baza pomiarowa prędkości detonacji wynosiła 150 mm. Inicjowanie detonacji realizowano za pomocą zapalnika typu Erg i detonatora (ładunek heksogenu flegmatyzowanego o masie 10 g). Do rejestracji procesu wybuchowego napędzania otoczki miedzianych zastosowano zestaw rentgenografii impulsowej SCANDIFLASH XR 450. Impuls promieniowania X wyzwalał był w momencie zwarcia czujnika umieszczonego pod koniec rurki.



Rys. 1. Układ do testu cylindrycznego: 1 – rura miedziana, 2 – badany materiał wybuchowy, 3 – zapalnik, 4 – detonator z heksogenu flegmatyzowanego, 5 – czujniki do pomiaru prędkości detonacji, 6 – czujnik wyzwalający wiązkę promieniowania X

Po zeskanowaniu zdjęć rentgenowskich przedstawiających kształt miotanych rurek mierzono położenie punktów na profilu zewnętrznej powierzchni rurki (wykorzystując program SigmaScanPro) i otrzymano zależność promienia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej. Następnie dokonano skalowania wyników do wartości rzeczywistych (obraz na zdjęciach rentgenowskich był powiększony). Do dalszych badań wybierano

w przybliżeniu przedział zmian współrzędnej osiowej od przekroju z czujnikiem wyzwalającym lampę rentgenowską do przekroju, w którym rurka ogranicza objętość około 9 razy większą od objętości początkowej. Powyżej tej objętości rurka miedziana pękała i na zdjęciach obserwowano pojawianie się szczelin.

2.2. Zdolności miotające

Zdolności miotające produktów detonacji materiału wybuchowego określa tak zwana *energia Gurneya* E_G lub *prędkość Gurneya* $v_G = \sqrt{2E_G}$. Energia Gurneya jest sumą energii kinetycznej miotanego ciała i produktów detonacji podążających za nim. W przypadku cylindrycznych otoczek (rurek) jest ona wyrażona za pomocą następującej zależności

$$E_G = \left(\mu + \frac{1}{2} \right) \frac{u_L^2}{2} \quad (1)$$

gdzie μ oznacza stosunek masy rurki do masy materiału wybuchowego, u_L jest prędkością rurki. Szczegółowy opis metodyki wyznaczania energii Gurneya zawiera praca [10].

W modelu zastosowanym w [10] zakłada się, że proces detonacji w rurze miedzianej w analizowanym przedziale współrzędnej osiowej jest stacjonarny. Wówczas współrzędna osiowa x i czas t związane są w sposób jednoznaczny zależnością $x = Dt$, gdzie D oznacza prędkość detonacji. Relacja ta umożliwia zamianę dyskretnej zależności zewnętrznego promienia rurki r_z od współrzędnej osiowej dyskretnym związkiem promienia i czasu. Przy założeniu nieściśliwości materiału rurki można z prostych relacji geometrycznych wyznaczyć wartości promienia środka masy rurki (r_m)

$$r_m = \sqrt{r_z^2 - (r_{z0}^2 - r_{w0}^2)/2} \quad (2)$$

gdzie r_{z0} i r_{w0} oznaczają początkowe wartości promieni ścianki zewnętrznej i wewnętrznej rurki. Czasową zależność promienia środka masy przekroju rurki aproksymuje się jest następującą funkcją

$$r_m = r_{m0} + \sum_{i=1,2} a_i \{ b_i (t - t_0) - [1 - \exp(-b_i (t - t_0))] \} \quad (3)$$

gdzie r_{m0} oznacza początkowy promień środka masy rurki, a_i , b_i , t_0 – parametry aproksymacji. Z tej ostatniej zależności uzyskuje się poprzez różniczkowanie prędkość rurki u_L , a ze związku (1) energię Gurneya.

2.3. Energia detonacji

Wyniki testu cylindrycznego można wykorzystać również do oszacowania *energii detonacji* badanego materiału wybuchowego. Energię detonacji definiuje się jako pracę wykonaną przez produkty detonacji w trakcie ich rozprężania od objętości w punkcie Chapmana-Jougueta (CJ), v_{CJ} , do objętości nieskończonej [13, 14]

$$e_0 = -e_c + \int_{v_{CJ}}^{\infty} p_i dv \quad (4)$$

gdzie p_i jest izentropą rozprężania produktów detonacji, $e_c = (p_{CJ} - p_0)(v_0 - v_{CJ})/2$ jest energią kompresji materiału wybuchowego na froncie fali detonacyjnej; p_0 i p_{CJ} oznaczają ciśnienie początkowe i w punkcie CJ, zaś v_0 objętość właściwą materiału wybuchowego ($v_0 = 1/\rho_0$). Można wykazać, że tak zdefiniowana energia detonacji różni się nieznacznie od kalorymetrycznego ciepła detonacji [10].

W pracy [10] wykazano, że istnieje związek między energią Gurneya miotanej rurki dla objętości produktów detonacji dążącej do nieskończoności ($v \rightarrow \infty$) a energią detonacji. Związek ten jest następujący

$$\frac{e_0}{e_0^s} = \frac{E_G}{E_G^s} = \frac{\left(\mu + \frac{1}{2} \right) \left(u_L \right)^2}{\left(\mu^s + \frac{1}{2} \right) \left(u_L^s \right)^2} \quad (5)$$

gdzie e_0 i e_0^s oznaczają energię detonacji danego materiału wybuchowego i materiału wzorcowego, u_L i u_L^s są prędkościami rurki napędzonej produktami detonacji danego i wzorcowego materiału wybuchowego po ich

rozprężeniu do nieskończonej objętości. Energie detonacji we wzorze (5) odniesione są do jednostki masy materiału wybuchowego.

Na podstawie zależności (4) można oszacować energię detonacji danego materiału wybuchowego, jeżeli znana jest energia detonacji materiału wzorcowego, a także wyniki testu cylindrycznego dla obu materiałów. Metodę określenia prędkości rurki dla nieskończonej objętości zaproponowano w [10]. Sposób ten polega na przedstawieniu wyznaczonego z testu cylindrycznego kwadratu prędkości rurki w funkcji odwrotności względnej objętości produktów detonacji v_0/v i ekstrapolacji tej zależności do $v_0/v = 0$. W pracy [15] wykazano jednak, że we wzorze (5) prędkość otoczki dla objętości nieskończonej można zastąpić prędkością wyznaczoną dla względnej objętości rurki równej w przybliżeniu 10. Zakłada się przy tym, że stosunek energii wewnętrznej produktów detonacji do energii Gurneya dla tej objętości jest taki sam dla materiału badanego i materiału wzorcowego.

2.4. Ciśnienie detonacji

Najprostszą postacią izentropy rozprężania produktów detonacji p_i jest adiabata gazu politropowego (gazu o stałej pojemności cieplnej)

$$p_i = p_{CJ} \left(\frac{v_{CJ}}{v_0} \right)^k \quad (6)$$

gdzie k jest stałym wykładnikiem izentropy produktów detonacji. Często wyznacza się tzw. efektywny wykładnik izentropy, określane nie w punkcie CJ, lecz dla pewnego zakresu zmian objętości produktów detonacji. Po wyznaczeniu wartości wykładnika k , ciśnienie detonacji można obliczyć ze związku

$$p_{CJ} = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} \quad (7)$$

Z wyników testu cylindrycznego można zgrubnie oszacować wykładnik izentropy dla badanego materiału wybuchowego. Z analizy danych zawartych w pracy [12] wynika, że w przypadku nieidealnych materiałów wybuchowych wartość wykładnika zmienia się nieznacznie, gdy zmiana względnej objętości produktów nie przekracza wartości 3. Wykładnik izentropy wyznaczony dla tego przedziału zmiany objętości produktów detonacji można więc wykorzystać do oszacowania ciśnienia detonacji.

Algorytm określania efektywnego wykładnika izentropy jest następujący [16]. Modeluje się proces miotania rurki miedzianej przez produkty detonacji badanego materiału wybuchowego rozprężające się zgodnie ze wzorem (6) i rozwiązuje się numerycznie problem miotania rurki dla n wartości wykładnika k_i ($i = 1, n$). Dla każdej wartości k_i otrzymuje się dyskretną zależność położenia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej. Uzyskaną zależność interpoluje się i oblicza wartości $r_{z,j}$ w wybranych punktach x_j ($j = 1, m$). Wartość efektywnego wykładnika izentropy, dla której krzywe teoretyczna i eksperymentalna leżą blisko siebie, określa się minimalizując funkcję

$$g(k) = \sum_{j=1}^m [r_z(x_j) - r_{z,j}(k)]^2 \quad (8)$$

gdzie $r_z(x_j)$ oznacza zależność eksperymentalną. W modelowaniu wykorzystuje się wyznaczone eksperymentalnie prędkość detonacji oraz gęstość materiału wybuchowego.

2.5. Równanie stanu produktów detonacji

Wykładnik izentropy zmienia się znacznie w trakcie rozprężania się produktów detonacji nieidealnych materiałów wybuchowych od wartości rzędu $2 \div 3$ w punkcie CJ do wartości rzędu 1,2 dla niskich ciśnień. Dlatego w sposób bardziej realny właściwości fizyczne ekspandujących gazowych produktów przemiany detonacyjnej opisuje izentropa JWL (Jones, Wilkins i Lee) – [17]. Równanie izentropy JWL ma następującą postać

$$p_i = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + C V^{-(1-\omega)} \quad (9)$$

gdzie $V = v/v_0$, zaś A , B , C , R_1 , R_2 i ω są współczynnikami stałymi dla danego materiału wybuchowego.

Można wykazać, że dla niskich ciśnień równanie izentropy JWL przechodzi w równanie adiabaty Poissona z wykładnikiem $1+\omega$.

W procedurach wyznaczania współczynników JWL wykorzystuje się dane uzyskane z testu cylindrycznego oraz niektóre parametry detonacyjne. W jednej z nich – zaproponowanej w pracy [18] – znajduje się najpierw związki między współczynnikami wynikające z praw zachowania zapisanych dla punktu CJ. W ten sposób stałe A , B , C określa się jako funkcje R_1 , R_2 , ω oraz φ_0 , D , e_0 i p_{CJ} . Gęstość materiału wybuchowego oraz wartości prędkości, energii i ciśnienia detonacji określa się eksperymentalnie. Wówczas do wyznaczenia pozostają tylko stałe R_1 , R_2 i ω , które uzyskuje się porównując wyniki rejestracji napędzania miedzianej rurki z danymi otrzymywanymi z numerycznego modelowania, wykorzystującego równanie izentropy JWL do opisu właściwości fizycznych produktów detonacji. Zastosowany model numeryczny opisano szczegółowo w pracy [19].

Do wyznaczenie wartości współczynników izentropy JWL dla produktów detonacji wykorzystano metodę opisaną w pracy [18]. Metoda ta polega na porównywaniu eksperymentalnej zależności położenia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej z podobnymi zależnościami otrzymanymi z numerycznego modelowania i wyborze rozwiązania najbardziej zbliżonego do danych eksperymentalnych. Aby takie porównanie było możliwe dla m wybranych wartości x_j zależności teoretyczne i eksperymentalną interpoluje się w badanym przedziale współrzędnej osiowej. Wartości współczynników R_1 , R_2 i ω wyznacza się minimalizując funkcję

$$f(R_1, R_2, \omega) = \sum_{j=1}^m [r_z(x_j) - r_{z,j}(R_1, R_2, \omega)]^2 \quad (10)$$

gdzie $r_z(x_j)$ i $r_{z,j}(R_1, R_2, \omega)$ oznaczają odpowiednio zależności eksperymentalną i teoretyczną.

2.6. Praca ekspansji produktów detonacji

Praca ekspansji produktów detonacji od objętości w punkcie CJ do objętości v zdefiniowana jest w sposób następujący [13, 14]

$$w(v) = -e_c + \int_{v_{CJ}}^v p_i dv \quad (11)$$

Wyrażenie na pracę ekspansji produktów detonacji rozprężających się wzdłuż izentropy JWL (9) otrzymuje się po scałkowaniu równania (11)

$$w = e_0 - e_x(v) \quad (12)$$

gdzie

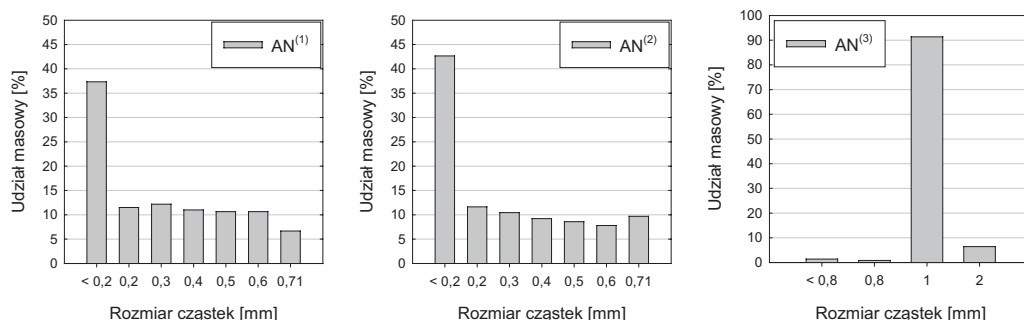
$$e_x(v) = v_0 \left[\frac{A}{R_1} e^{-R_1 v/v_0} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v/v_0} + \frac{C}{\omega} \left(\frac{v}{v_0} \right)^{-\omega} \right] \quad (13)$$

Znajomość energii detonacji oraz współczynników izentropy JWL umożliwia więc obliczenie pracy wykonanej przez produkty detonacji w trakcie ich rozprężania.

3. Materiały wybuchowe

Wybrano dziesięć nieidealnych materiałów wybuchowych, które poddano badaniu za pomocą testu cylindrycznego: sześć amonali, dwa materiały wybuchowe typu ANFO, a także dwa emulsyjne materiały wybuchowe. Do przygotowania mieszanin wykorzystano trzy rodzaje azotan(V) amonu: azotan(V) amonu drobnoziarnisty AN⁽¹⁾, azotan(V) amonu mielony AN⁽²⁾ oraz azotan(V) amonu granulowany o podwyższonej porowatości AN⁽³⁾. Azotan(V) amonu AN⁽²⁾ otrzymano przez zmielenie AN⁽³⁾ w młynku. Przeprowadzono analizę sitową zastosowanych rodzajów azotanu(V) amonu. Wyniki zaprezentowano na rys. 2.

Rozkłady granulometryczne azotanu amonu drobnoziarnistego i mielonego są do siebie bardzo zbliżone. Najwięcej cząstek ma rozmiar poniżej 0,2 mm. W przypadku granulowanego azotanu amonu ponad 90% ziaren ma wielkość w zakresie (1 ÷ 2) mm.



Rys. 2. Rozkład granulometryczny proszków azotanu amonu zastosowanych w badanych mieszaninach

Przygotowane mieszaniny wybuchowe zawierały także proszek glinu 5-7345 Benda Lutz Skawina o następujących parametrach: zawartość metalu minimum 92%, powierzchnia krycia ($5000 \div 6000$) cm^2/g , pozostałość na sicie $125 \mu\text{m}$ maksimum 2%, średni rozmiar ziaren ($55 \div 75$) μm .

Oznaczenie i skład nieidealnych materiałów wybuchowych wybranych do badań przedstawiono w tab. 1. W tabeli podano również gęstości materiałów i prędkości detonacji zmierzone podczas wykonywania testu cylindrycznego.

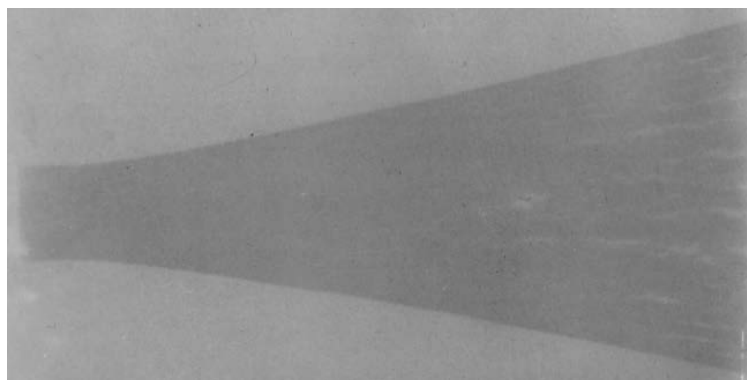
Tab. 1. Oznaczenie, skład i wybrane parametry testowanych mieszanin wybuchowych

Materiał wybuchowy	Skład [% mas.]	Gęstość [g/cm^3]	Prędkość detonacji [m/s]
amonal1_05	AN ⁽¹⁾ /Al 99,5/0,5	0,90	2600
amonal1_1	AN ⁽¹⁾ /Al 99/1	0,90	2780
amonal1_2	AN ⁽¹⁾ /Al 98/2	0,90	3100
amonal2_5	AN ⁽²⁾ /Al 95/5	0,79	2810
amonal2_10	AN ⁽²⁾ /Al 90/10	0,80	3040
amonal2_15	AN ⁽²⁾ /Al 85/15	0,83	3200
ANFO 1	AN ⁽¹⁾ /olej 94,5/5,5	0,98	3070
ANFO 2	AN ⁽³⁾ /olej 94,5/5,5	0,75	2180
MWE 1	AN 64,4 NaNO ₃ 14,6 olej mineralny 6 woda 15 + mikrobalony 0,8	1,04	5160
MWE 2	AN 82 emulgator 2,2 olej mineralny 3,3 polibutadien 0,5 woda 12 + mikrobalony 3	1,06	5460

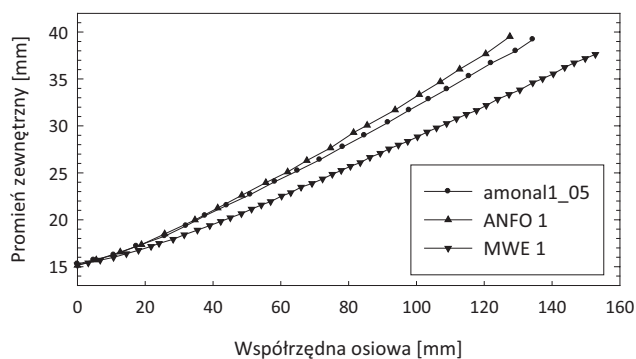
4. Wyniki

4.1. Test cylindryczny

Przykładowe zdjęcie rurki miedzianej napędzanej produktami detonacji pokazano na rys. 3. Na rys. 4 pokazano przykładowe zależności promienia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej po ich odczytaniu ze zdjęć i przeskalowaniu.



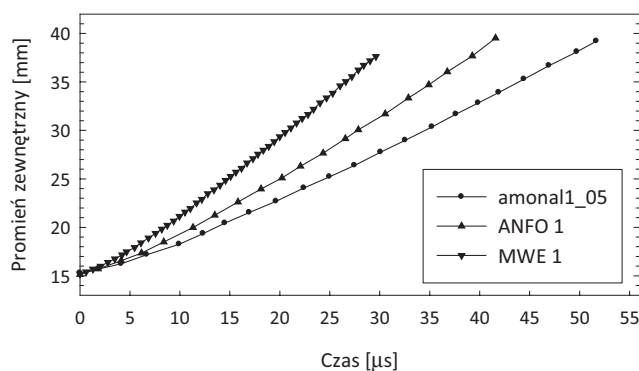
Rys. 3. Zdjęcie rentgenowskie (inwersja) rurki miedzianej napędzanej produktami detonacji mieszaniny amonal1_2



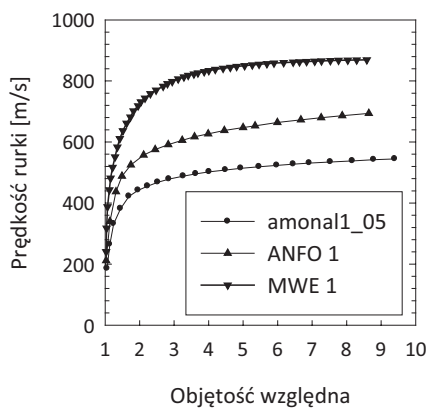
Rys. 4. Zależność promienia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej dla wybranych mieszanin wybuchowych

4.2. Zdolności miotające

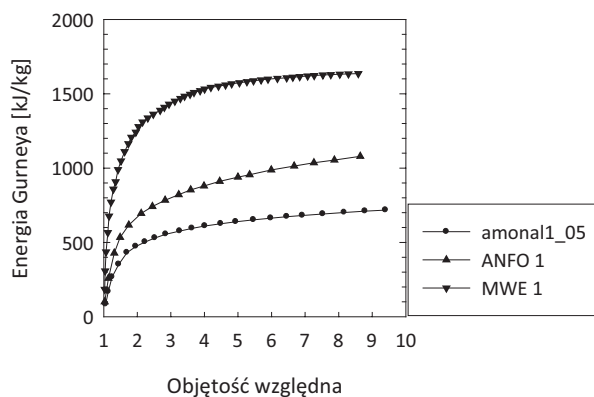
Zdolności miotające badanych materiałów wybuchowych wyznaczono z wyników testu cylindrycznego za pomocą metodyki opisanej w punkcie 2.2. Kolejne rezultaty obliczeń dla wybranych mieszanin pokazano na rys. 5-7.



Rys. 5. Zależność promienia zewnętrznej ścianki rurki od czasu dla wybranych mieszanin wybuchowych



Rys. 6. Zależność prędkości rurki od względnej objętości rurki dla wybranych mieszanin wybuchowych



Rys. 7. Zależność energii Gurneya od względnej objętości rurki dla wybranych mieszanin wybuchowych

W tab. 2 zebrano końcowe wartości energii i prędkości Gurneya dla wszystkich badanych materiałów wybuchowych.

Tab. 2. Końcowe wartości energii i prędkości Gurneya dla badanych mieszanin

Material wybuchowy	Energia Gurneya [kJ/kg]	Prędkość Gurneya [m/s]
amonal1_05	712	1193
amonal1_1	763	1235
amonal1_2	989	1406
amonal2_5	1139	1509
amonal2_10	1557	1765
amonal2_15	1836	1916
ANFO 1	1079	1469
ANFO 2	818	1279
MWE 1	1639	1810
MWE 2	1996	1998

W przypadku amonali z grupy amonal1 o jednakowej gęstości, ich zdolności miotające rosną wraz ze wzrostem

zawartości proszku glinowego. Podobnie jest dla amonali z grupy amonal2, mimo różnic gęstości, wraz z rosnącą zawartością glinu wzrasta energia Gurneya. Wartości E_G dla testowanych amonali mieszczą się w zakresie (700 ÷ 1840) J/g. Badane materiały wybuchowe typu ANFO znacznie różnią się od siebie parametrami detonacyjnymi, co również przekłada się na ich zdolności miotające. Największą wartość energii Gurneya spośród badanych nieidealnych materiałów wybuchowych ma MWE 2, który zawdzięcza ją najwyższej gęstości oraz prędkości detonacji.

Wartość E_G uzyskaną dla amonal2_10 można porównać z energią Gurneya otrzymaną w pracy [12] dla amonali zawierających również 10% glinu (1795 kJ/kg oraz 1805 kJ/kg odpowiednio dla amonalu zawierającego płatkowany glin i proszek glinu). Amonal2_10 ma niższą wartość energii Gurneya. Spowodowane jest to mniejszą gęstością tego materiału w porównaniu do gęstości 1,0 g/cm³ amonali z [12].

W pracy [20] wykonano duży test cylindryczny dla materiałów typu ANFO oraz emulsyjnych materiałów wybuchowych o różnej gęstości. Rurki miedziane stosowane w tym teście miały długość 1 m, średnicę wewnętrzną 100 mm i grubość ścianki 5 mm. Większa średnica ładunku spowodowała, że materiały typu ANFO o gęstości od 0,776 g/cm³ do 0,91 g/cm³ detonowały z prędkościami od 3854 m/s do 4317 m/s. Skala testu cylindrycznego spowodowała również, że wyznaczone wartości energii Gurneya od 1590 kJ/kg do 2470 kJ/kg są wyższe od energii otrzymanych dla ANFO1 i ANFO2 (tabela 2). W przypadku emulsyjnych materiałów wybuchowych energie Gurneya podane w tabeli 2 dla MWE 1 i MWE 2 są porównywalne lub tylko nieznacznie niższe od wartości określonych w [20] dla materiałów emulsyjnych o zbliżonej gęstości (2000 kJ/kg dla gęstości 1,13 g/cm³ oraz 1820 kJ/kg dla gęstości 0,89 g/cm³).

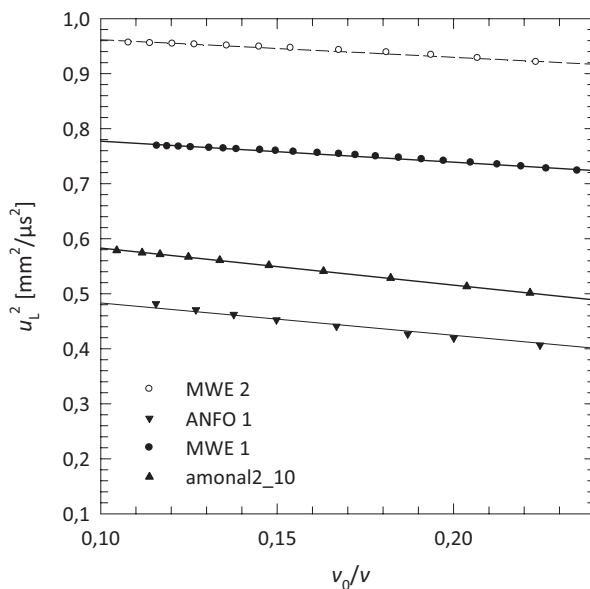
4.3. Energia detonacji

W metodzie wyznaczania energii detonacji jako wzorcowy materiał wybuchowy wybrano MWE 2, gdyż jest on najbardziej idealnym materiałem wybuchowych z badanych mieszanin. W celu określenia energii detonacji dla wzorcowego materiału wykorzystano wyznaczoną już energię Gurneya dla tego materiału oraz wnioski wynikające z analizy danych zawartych w pracy [21]. W pracy tej stwierdzono, że stosunek E_G/e_0 dla emulsyjnych materiałów wybuchowych zmienia się w zależności od gęstości od 0,57 do 0,71. Porównując gęstość MWE 2 z gęstościami materiałów emulsyjnych z publikacji [20] wybrano dwa najbliższe materiały i obliczono, że stosunek E_G/e_0 wynosi 0,60. Biorąc pod uwagę taką wartość tego stosunku oraz wartość energii Gurneya dla MWE 2 (2000 J/g) wyznaczono jego energię detonacji $e_0 = 3330$ J/g. Wartość ta dobrze koreluje z teoretyczną energią wybuchu (3210 J/g) oszacowaną dla MWE 2 za pomocą kodu termochemicznego ZMWCyw [9].

Na rys. 8 przedstawiono zależność kwadratu prędkości rurki od v_0/v dla wybranych mieszanin wybuchowych i materiału wzorcowego i określono wartości u_L^2 dla $v_0/v = 0,1$ po wykonaniu aproksymacji liniowej danych eksperymentalnych. Następnie ze wzoru (5) obliczono energie detonacji. Wyniki obliczeń dla wszystkich mieszanin przedstawiono w tab. 3. W tabeli podano również wartości energii detonacji odniesione do jednostki objętości materiału wybuchowego, ponieważ w tej formie energia występuje w równaniu JWŁ.

Tab. 3. Wartości energii detonacji dla badanych mieszanin

Materiał wybuchowy	Energia detonacji [kJ/kg]	Energia detonacji [GPa]
amonal1_05	1170	1,05
amonal1_1	1300	1,17
amonal1_2	1660	1,49
amonal2_5	1900	1,50
amonal2_10	2580	2,07
amonal2_15	3050	2,53
ANFO 1	1840	1,80
ANFO 2	1400	1,05
MWE 1	2820	2,93
MWE 2	3330	3,53

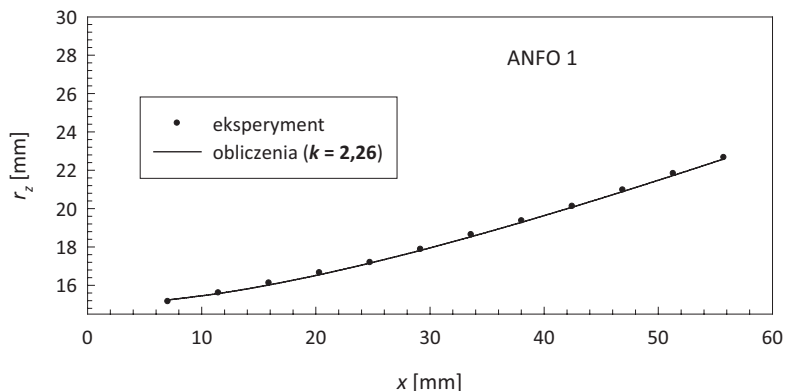


Rys. 8. Zależność kwadratu prędkości rurki od odwrotności względnej objętości rurki dla wybranych mieszanin wybuchowych i materiału wzorcowego

Najniższą wartość energii detonacji ma amonal1_05 i podobnie jak w przypadku energii Gurneya rośnie ona wraz ze wzrostem zawartości proszku glinu w mieszaninie. ANFO 1 mający wyższą gęstość i prędkość detonacji niż ANFO 2 ma energię detonacji o ponad 400 kJ/kg większą. W przypadku emulsyjnych materiałów wybuchowych nieznacznie różniących się gęstością, energia detonacji MWE 1 istotnie odbiega od energii detonacji MWE 2 (o ok. 500 kJ/kg).

4.4. Ciśnienie detonacji

Ciśnienie detonacji określano zgodnie z metodyką opisaną w punkcie 2.4. Przykładowe porównanie eksperymentalnego i obliczonego profilu rurki miedzianej pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Porównanie eksperymentalnej zależności położenia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej dla ANFO 1 z zależnością teoretyczną otrzymaną z modelowania dla $k = 2,26$

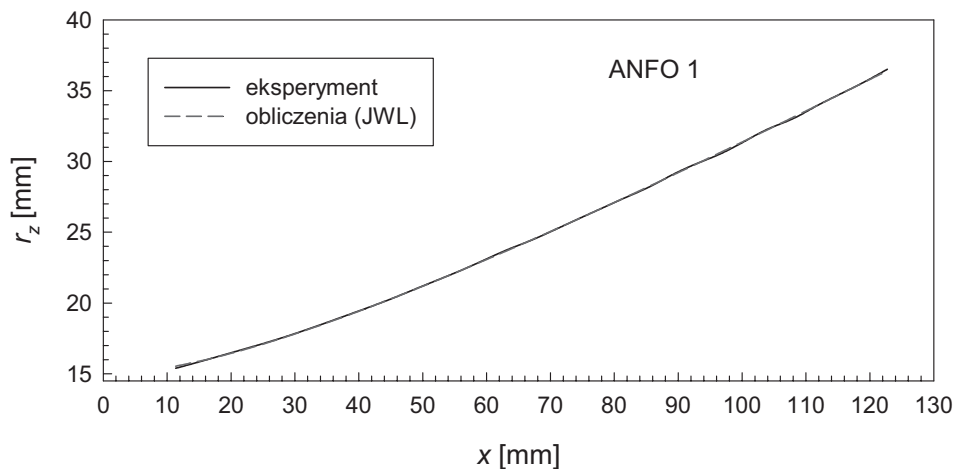
Po wyznaczeniu wartości wykładnika izentropy k obliczono ze wzoru (7) ciśnienie detonacji dla wszystkich badanych mieszanin wybuchowych (tab. 4).

Tab. 4. Wyznaczone wartości wykładnika izentropy produktów detonacji i ciśnienia detonacji

Material wybuchowy	Wykładnik izentropy k	Ciśnienie detonacji [GPa]
amonal1_05	2,32	1,83
amonal1_1	2,31	2,10
amonal1_2	2,30	2,62
amonal2_5	2,02	2,07
amonal2_10	1,88	2,57
amonal2_15	1,91	2,92
ANFO 1	2,26	2,83
ANFO 2	1,70	1,32
MWE 1	3,17	6,64
MWE 2	3,47	7,07

4.5. Równanie stanu produktów detonacji

Współczynniki równania izentropy JWŁ określono zgodnie z metodyką opisaną w punkcie 2.5. W procedurze obliczania współczynników wykorzystano wartości ρ_0 , D , e_0 i p_{CJ} wyznaczone wcześniej z danych z testu cylindrycznego. Przykładowe porównanie eksperymentalnego i obliczonego profilu rurki będące podstawą określenia współczynników R_1 , R_2 i ω pokazano na rys. 10. Wartości współczynników dla wszystkich badanych mieszanin zabrano w tabeli 5.

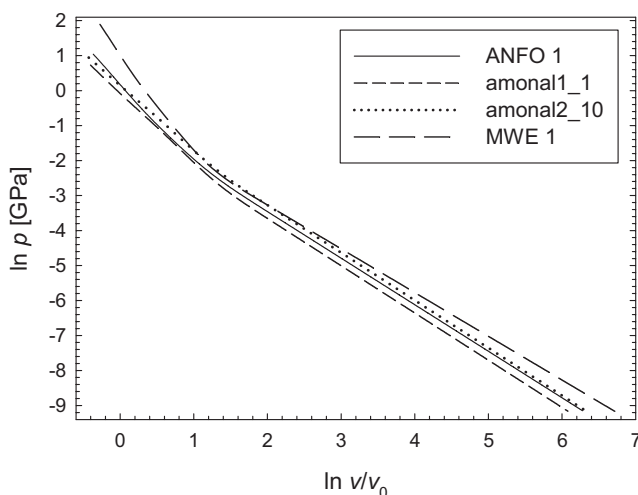


Rys. 10. Porównanie eksperymentalnej zależności położenia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej dla ANFO 1 z teoretyczną zależnością otrzymaną z modelowania dla zadanych wartości współczynników równania JWŁ

Tab. 5. Wyznaczone wartości współczynników izentropy JWŁ dla produktów detonacji

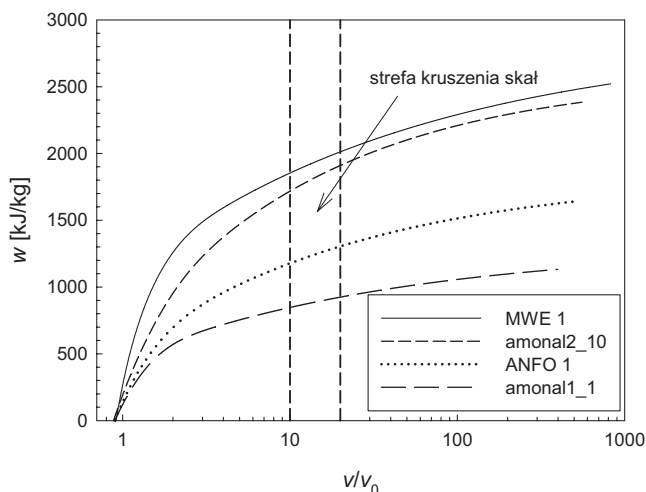
Material wybuchowy	Gęstość [g/cm ³]	A [GPa]	B [GPa]	C [GPa]	R ₁	R ₂	ω
amonal1_05	0,90	34,49088	2,489112	0,2156430	5,45	1,77	0,31
amonal1_1	0,90	46,85419	3,695866	0,1692735	5,86	1,80	0,24
amonal1_2	0,90	63,97425	4,550542	0,2225416	6,06	1,76	0,25
amonal2_5	0,79	25,80325	2,008028	0,3844177	5,39	1,57	0,35
amonal2_10	0,80	25,70372	2,249723	0,5747416	5,46	1,56	0,36
amonal2_15	0,83	19,00063	0,4134094	0,9858901	4,58	1,33	0,44
ANFO 1	0,98	39,46218	2,551085	0,4084917	4,84	1,68	0,31
ANFO 2	0,75	10,54115	1,076869	0,2945305	5,64	1,36	0,39
MWE 1	1,04	299,5846	7,831956	0,4620317	5,65	1,86	0,25
MWE 2	1,06	1454,080	13,66986	0,3342879	7,91	1,76	0,18

Na rys. 11 pokazano izentropy JWŁ dla produktów detonacji wybranych materiałów wybuchowych. Z przebiegu krzywych wynika, że w zakresie zmian objętości względnej produktów detonacji od punktu Chapmana-Jougueta do wartości 3 ($\ln(v/v_0) < 1,1$) kąt nachylenia danej izentropy nie zmienia się w sposób znaczący. To oznacza, że wykładnik izentropy, definiowany jako $k \equiv -(d \ln p / d \ln v)$, można przyjąć jako stały w tym zakresie zmian objętości produktów detonacji. Założenie to wykorzystano przy wyznaczaniu ciśnienia detonacji z danych z testu cylindrycznego.

**Rys. 11.** Izentropy JWŁ dla produktów detonacji wybranych mieszanin wybuchowych

4.6. Praca ekspansji produktów detonacji

Wyznaczone wartości współczynników izentropy JWŁ i energii detonacji wykorzystano do obliczenia pracy ekspansji produktów detonacji badanych materiałów wybuchowych zgodnie z wzorami (12) i (13). Zależność pracy ekspansji od objętości względnej produktów detonacji dla wybranych mieszanin wybuchowych pokazano na rys. 12. Pracę ekspansji obliczano do objętości względnej odpowiadającej ciśnieniu 0,1 MPa.



Rys. 12. Praca ekspansji produktów detonacji wybranych mieszanin wybuchowych

Na rys. 12 zaznaczono strefę kruszenia skał. W momencie spekania górotworu powstają szczeliny, poprzez które „uciekają” produkty detonacji i ich oddziaływanie na skałę jest osłabione. Przyjmuje się, że praca ekspansji oszacowana dla $v/v_0 = 10, 15$ i 20 może być wykorzystana do oceny efektywnej zdolności do wykonania pracy produktów detonacji danego materiału wybuchowego odpowiednio w skałe o dużej, średniej i małej zwięzłości [21]. Z analizy zależności pracy ekspansji od objętości dla wszystkich badanych mieszanin wybuchowych wynika, że do momentu spekania skał o dużej zwięzłości wykonana przez produkty detonacji praca wynosi od 65% do 68% energii detonacji e_0 , zaś w przypadku skał o małej zwięzłości od 70% do 75% tej energii. W literaturze podaje się, że w przybliżeniu tylko $(50 \div 70)\%$ energii detonacji wykorzystywana jest do niszczenia skał [21].

5. Podsumowanie

Analiza wyników badań przeprowadzonych w pracy pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- test cylindryczny wraz z programami numerycznymi stanowi ważne narzędzie służące do wyznaczania charakterystyk detonacyjnych (energii Gurneya, ciśnienia i energii detonacji oraz równania stanu produktów detonacji) dla nieidealnych materiałów wybuchowych,
- zarówno energia Gurneya, energia detonacji, jak i teoretyczna zdolność do wykonania pracy rośnie wraz ze wzrostem zawartości proszku glinu w badanych amonalach,
- największą prędkością detonacji, zdolnością miotającą, a także energią detonacji spośród testowanych mieszanin wybuchowych charakteryzuje się MWE 2.

Parametry wyznaczone z testu cylindrycznego mogą być wykorzystane do obliczania prędkości płyt oraz cylindrycznych i sferycznych otoczek, zdolności do wykonania pracy, a także modelowania procesów oddziaływania produktów detonacji na otoczenie (na przykład propagacji fal uderzeniowych w górotworze i jego niszczenia).

Literatura

- [1] Trzeński A. Waldemar, Cudziło Stanisław, Szymańczyk Leszek. 2001. Determination of the detonation pressure from a water test. *Engineering Transactions* 49(4) : 443-458.
- [2] Ornellas D.L. 1974. The heat and the products of detonation in a calorimeter of CNO, HNO, CHNF,

- CHNO, CHNOF, and CHNOSi explosives. *Combustion and Flame* 23 : 37-46.
- [3] Kiciński Wojciech, Trzciński A. Waldemar. 2009. Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 96 (2) : 623-630.
- [4] *Tiger computer program documentation*. Stanford Research Institute, 1974.
- [5] Fried L.E. 1996. *CHEETAH User's Manual*. Lawrence Livermore National Laboratory.
- [6] Sućeska Muhammad. 1991. Calculation of the detonation properties of C-H-N-O explosives. *Propellants Expl., Pyrot.* 16 : 197-202.
- [7] Grys Sebastian, Trzciński A. Waldemar. 2009. Termodynamiczne modelowanie procesów spalania i detonacji idealnych układów heterogenicznych. Cz. 2. Aplikacja numeryczna. Warszawa : Biuletyn WAT 58(2) : 275-296.
- [8] *Materiały wybuchowe do użytku cywilnego. Materiały wybuchowe kruszące. Część 15. Obliczanie właściwości termodynamicznych*. PN-EN 13631-15, 2007.
- [9] Grys Sebastian, Trzciński A. Waldemar. 2010. *ZMWCyw – program do obliczania właściwości termodynamicznych materiałów wybuchowych do użytku cywilnego*. Katowice : Prace Naukowe Głównego Instytutu Górniczo-Środowisko : 41-50.
- [10] Trzciński A. Waldemar. 2001. *EMAIL Application of a cylinder test for determining energetic characteristics of explosives*. *Journal of Technical Physics* 42 (2) : 165-179.
- [11] Trzciński A. Waldemar, Cudziło Stanisław. 2006. *EMAIL Characteristics of high explosives obtained from cylinder test data*. *Chinese Journal of Energetic Materials* 14 (1) : 1-7.
- [12] Trzciński A. Waldemar, Cudziło Stanisław. 2001. *EMAIL The application of the cylinder test to determine the energy characteristics of industrial explosives*. *Archives of Mining Sciences* 46 (3) : 291-307.
- [13] Jacobs S.J. 1956. *Energy of detonation*. United States Naval Ordnance Laboratory, Report NAVORD – 4366.
- [14] Fickett W., Davis W.C. 1979. *Detonation*. Berkeley : University of California Press.
- [15] Trzciński A. Waldemar. 2006. *EMAIL On some methods of determination of detonation energy of explosives*. *Archivum Combustionis* 26 (1-2) : 55-62.
- [16] Cudziło Stanisław, Trębiński Radosław, Trzciński A. Waldemar. 1997. *EMAIL Determination of the effective exponent of isentrope for the detonation products of high explosives*. *Chemical Physics Reports* 16 (9) : 1719-1732.
- [17] Lee E.L., Horning H.C., Kury J.W. 1968. *Adiabatic expansion of high explosive detonation products*. Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-50422.
- [18] Trębiński Radosław, Trzciński A. Waldemar. 1999. *EMAIL Determination of an expansion isentrope for detonation products of condensed explosives*. *Journal of Technical Physics* 40(4) : 447-504.
- [19] Trębiński Radosław, Trzciński A. Waldemar. 1997. *EMAIL Modelling of the process of driving a cylindrical tube by detonation products described by the JWL equation of state*. *Journal of Technical Physics* 38(4) : 783-797.
- [20] Nyberg U., Arvanitidis I., Olsson M., Outchterlony F. 2003. *Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk emulsion explosives*, Proceedings of EFEE 2nd World Conference on Explosives and Blasting Technique, Prague, Czech Republic, (R. Holmberg, Ed.), Lisse : A.A. Balkema Publishers 181-191.
- [21] Person P.A., Chiappetta R.F. 1994. *Shock waves and detonation, explosive performance*. Pretoria : Proceedings NIXT'94.

Received: 18th August 2016

Accepted: 5th December 2016

Published: 30th December 2016