



Badanie wpływu skali eksperymentu na wyniki testu cylindrycznego

WALDEMAR A. TRZCIŃSKI, MIROSŁAW SZCZEPANIK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Instytut Chemii,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, wtrzcinski@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy zbadano wpływ skali eksperymentu na wyniki testu cylindrycznego służącego do wyznaczania zdolności miotających materiałów wybuchowych. Do badań wytypowano materiały wybuchowe stosowane w amunicji (trotyl, heksogen) oraz materiały o przeznaczeniu cywilnym (amonałe). Stosowano rurki miedziane o różnej średnicy i grubości ścianki. Wyciągnięto wnioski odnośnie do celowości zwiększania lub zmniejszania skali w teście cylindrycznym.

Słowa kluczowe: materiały wybuchowe, zdolność miotająca, test cylindryczny

1. Wstęp

Jednym ze sposobów oceny zdolności miotających materiałów wybuchowych jest tzw. *test cylindryczny* [1-6], w którym rurka metalowa (najczęściej miedziana) napędzana jest produktami detonacji ładunku badanego materiału wybuchowego. W trakcie wykonywania testu mierzy się zależność położenia wybranego punktu na ściance rozpęczanej rurki miedzianej od czasu lub wykonuje zdjęcie kształtu rurki, z którego możliwy jest pomiar radialnego przemieszczenia metalowej rurki. Do rejestracji tego procesu wykorzystuje się fotografię smugową, interferometrię laserową, impulsową fotografię rentgenowską, a także metodę czujników zwarciovych do pomiaru prędkości rurki. Dane z rejestracji miotania rurki umożliwiają określenie *zdolności miotających* materiału wybuchowego (tzw. *energia* lub *prędkość Gurneya*). Analiza wyników rejestracji może dostarczyć również wielu innych informacji niezbędnych do rozwiązania problemów związanych z przekazywaniem energii z ładunku materiału wybuchowego do pocisku lub wkładki kumulacyjnej czy oddziaływaniem wybuchu na

otoczenie. Umożliwia mianowicie wyznaczenie równania stanu i wykładnika izentropy dla produktów detonacji oraz oszacowanie energii detonacji [7-14].

Z przeglądu literatury wynika, że najczęściej do badania zdolności miotających materiałów wybuchowych stosowany jest standardowy test cylindryczny, w którym średnica ładunku badanego materiału wynosi 1 cal (25,4 mm) lub 25 mm, a grubość ścianki rurki miedzianej 0,1 cal (2,54 mm) lub 2,5 mm. W przypadku większości materiałów wybuchowych stosowanych w technice wojskowej średnica ta jest większa od tak zwanej średnicy granicznej, to znaczy średnicy, powyżej której prędkość detonacji materiału wybuchowego nie rośnie. W przypadku materiałów wybuchowych do użytku cywilnego warunek ten nie jest spełniony, co oznacza, że w ładunkach o większej średnicy prędkość detonacji jest większa i w związku z tym zdolność miotająca jest również wyższa. Dlatego też proponuje się przeprowadzenie testu cylindrycznego dla górniczych materiałów wybuchowych w większej skali, na przykład w pracy [6].

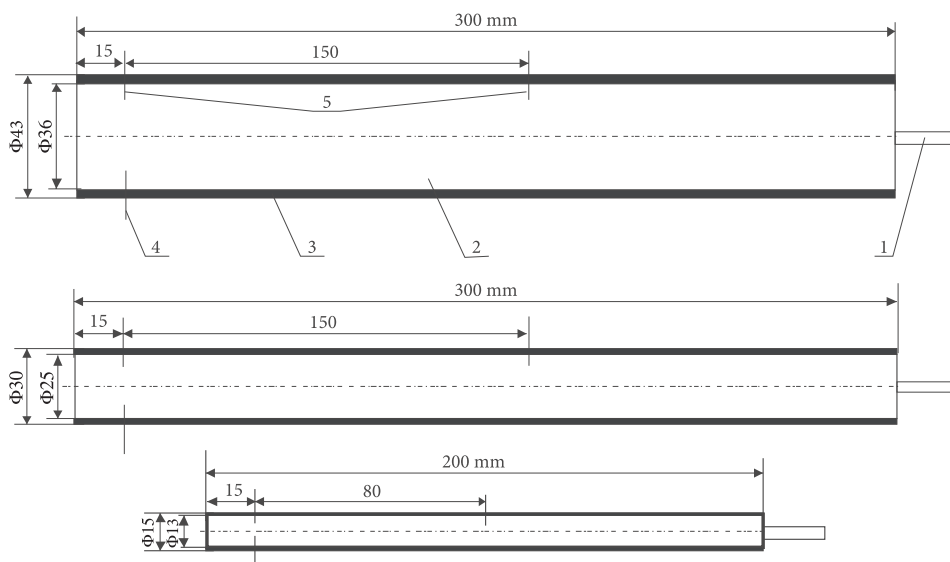
Wpływ rodzaju materiału i wielkości rurek na wyniki testu cylindrycznego analizowano w pracy [15]. Stwierdzono duży wpływ rodzaju materiału rurki (aluminium, stal, miedź) na wyznaczaną zdolność miotającą badanego materiału wybuchowego. Wykazano również, że stosunek gęstości materiału wybuchowego i materiału rurki wpływa na maksymalną prędkość miotanej rurki odniesioną do prędkości detonacji nawet dla silnych wojskowych materiałów wybuchowych. Dlatego też w prezentowanej pracy podjęto próbę zbadania wpływu skali eksperymentu na zdolności miotające materiału wybuchowego określane w teście cylindrycznym.

Wpływ skali testu cylindrycznego na wyznaczone zdolności miotające materiału wybuchowego zbadano zarówno dla wojskowych, jak i górniczych materiałów wybuchowych. W przypadku wojskowych materiałów wykonano test standardowy i test z rurką o średnicy mniejszej. Ze względu na brak możliwości pozyskania odpowiedniej rurki, stosunek masy miotanej rurki do masy materiału wybuchowego (μ) był w obu testach różny. Natomiast dla materiałów nieidealnych stosunek ten był zbliżony, przy czym w tym przypadku zwiększono średnicę rurki w stosunku do rurki standardowej.

2. Część eksperymentalna

Do testu cylindrycznego zastosowano rurki miedziane o różnych średnicach, grubościach ścianek i długościach. Ich wymiary podano na schematach pokazanych na rysunku 1.

Przygotowane rurki przed napełnieniem ich materiałem wybuchowym poddano procesowi ogrzewania w podwyższonej temperaturze (800°C w czasie 0,5 godziny), a następnie chłodzenia w celu usunięcia naprężeń i polepszenia właściwości plastycznych (zmiękczenie). Dzięki temu zabiegowi podczas ekspansji produktów detonacji materiał dłużej zachowywał swoją ciągliwość.



Rys. 1. Schematy zastosowanych układów do testu cylindrycznego: 1 — zapalnik wojskowy; 2 — badany materiał wybuchowy; 3 — rura miedziana; 4 — czujnik wyzwalający wiązkę promieniowania X; 5 — czujniki zwarcia do pomiaru prędkości detonacji

Do badań wytypowano po dwa rodzaje materiałów o przeznaczeniu wojskowym i cywilnym. W pierwszym przypadku był to trotyl i heksogen flegmatyzowany, w drugim mieszaniny azotanu (V) amonu z glinem. Podstawowe dane materiałów wybuchowych stosowanych w testach przedstawiono w tabeli 1.

Zastosowano glin w postaci płatków (Al_{pl}), charakteryzujący się stosunkiem grubości do długości rzędu jeden do kilkudziesięciu. Drugi rodzaj glinu to proszek (Al_{pr}) o rozdrobieniu 325 mesh, czyli w przybliżeniu o wielkości ziaren nieprzekraczającej 80 μm . Ziarna mielonego azotanu amonu były mniejsze niż 0,8 mm.

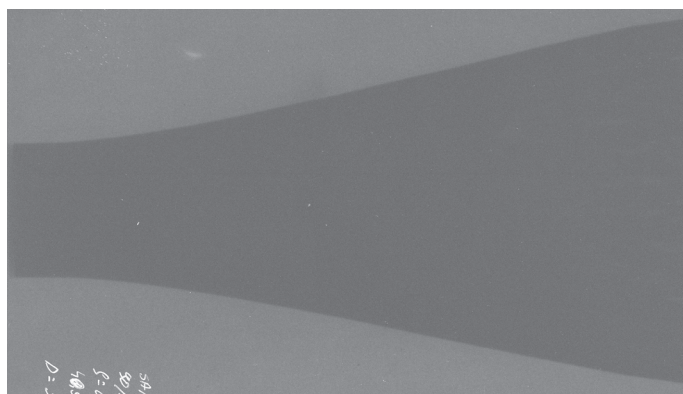
Zarówno trotyl (TNT), jak i heksogen flegmatyzowany (RDX_{fl}) to materiały komercyjne kupione w zakładzie NITRO-CHEM w Bydgoszczy.

TABELA 1

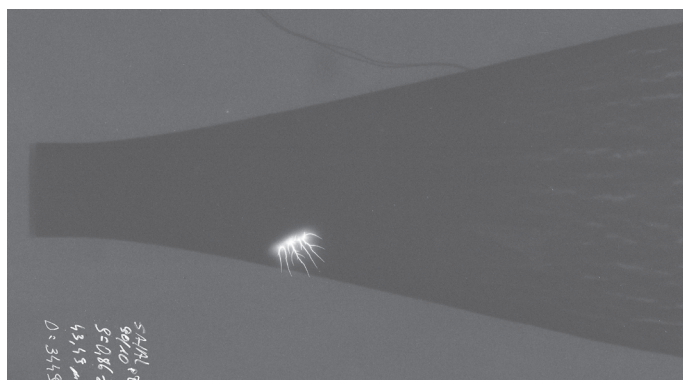
Skład i gęstość badanych materiałów wybuchowych

Materiał wybuchowy	Gęstość [kg/m ³]	% wagowy składnika					
		Heksogen	Trotyl	SA	Al płatki	Al proszek	Wosk
Trotyl pras.	1590	–	100	–	–	–	–
Heksogen fleg.	1670	94	–	–	–	–	6
SA/ Al_{pl}	860	–	–	90	10	–	–
SA/ Al_{pr}	930	–	–	90	–	10	–

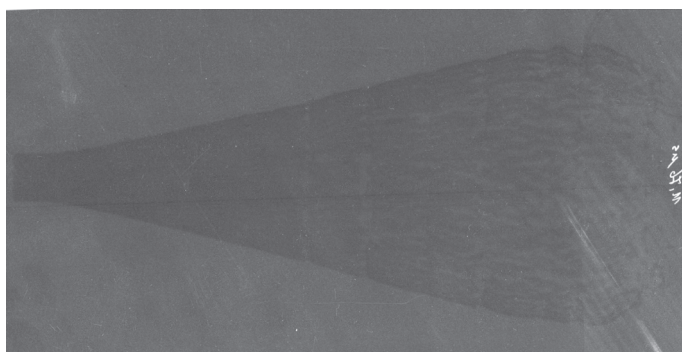
Do rejestracji napędzanej rurki miedzianej w teście cylindrycznym zastosowano zestaw rentgenografii impulsowej SCANDIFLASH XR 450. Wykonano po dwa testy dla każdego materiału wybuchowego w układzie z rurką o danych wymiarach. W przypadku trotylu wykonano jeden test z rurką o średnicy zewnętrznej 30 mm — wyniki drugiego zaczerpnięto z pracy [16]. Natomiast dla heksogenu flegmatyzowanego wykorzystano wyniki obu testów standardowych (rurka o średnicy 30 mm) podane w pracach [16-17]. Przykładowe zdjęcia rurek o różnym rozmiarze pokazano na rysunkach 2-4.



Rys. 2. Rentgenogram rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej 43 mm napędzanej produktami detonacji SA/Al_{pr}



Rys. 3. Rentgenogram rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej 30 mm napędzanej produktami detonacji SA/Al_{pl}



Rys. 4. Rentgenogram rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej 15 mm napędzanej produktami detonacji trotylu

Wyniki pomiaru prędkości detonacji w teście cylindrycznym przedstawiono w tabeli 2. W tabeli podano maksymalny błąd metody pomiaru prędkości.

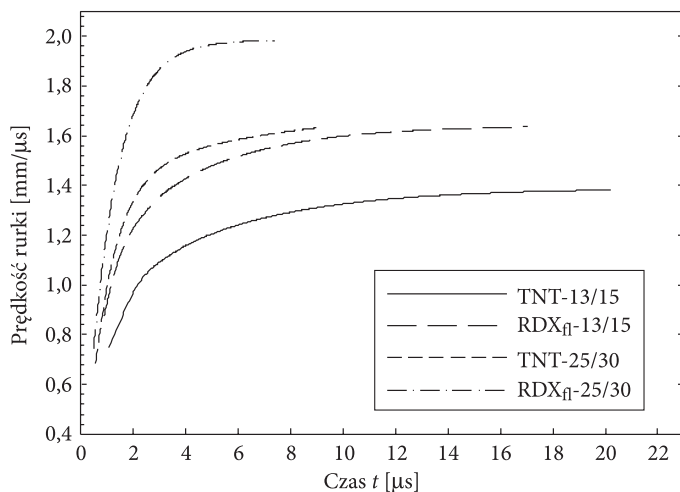
TABELA 2

Wyniki pomiaru prędkości detonacji

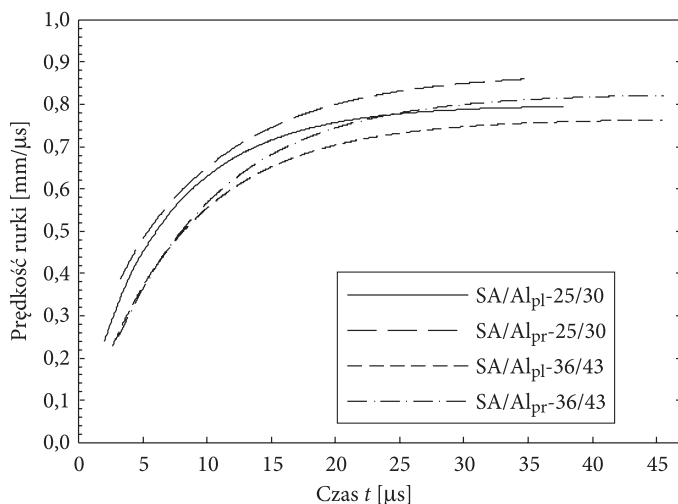
Material wybuchowy	Średnica wew. rurki [mm]	Gęstość [kg/m ³]	D [m/s]
TNT	13	1580	6880 ± 90
		1580	6790 ± 90
	25	1590	6880 ± 50
		1590	6910 ± 50
RDX _{fl}	13	1670	8430 ± 110
		1670	8390 ± 110
	25	1640	8400 ± 60
		1650	8390 ± 60
SA/Al _{pl}	25	870	3480 ± 30
		860	3450 ± 30
	36	870	3570 ± 30
		860	3510 ± 30
SA/Al _{pr}	25	920	3520 ± 30
		940	3520 ± 30
	36	920	3660 ± 30
		940	3710 ± 30

3. Analiza wyników testu cylindrycznego

Procedura wyznaczania zdolności miotającej materiału wybuchowego została szczegółowo omówiona w pracach [3-5]. W pierwszej kolejności z zeskanowanych rentgenogramów zostały odczytane współrzędne zewnętrznej ścianki cylindra za



Rys. 5. Zależność prędkości cylindra od czasu dla rurek napełnionych wojskowymi materiałami wybuchowymi (obok nazwy materiału wybuchowego podano wartości średnicy wewnętrznej i zewnętrznej rurki miedzianej)



Rys. 6. Zależność prędkości cylindra od czasu dla rurek napełnionych górniczymi materiałami wybuchowymi

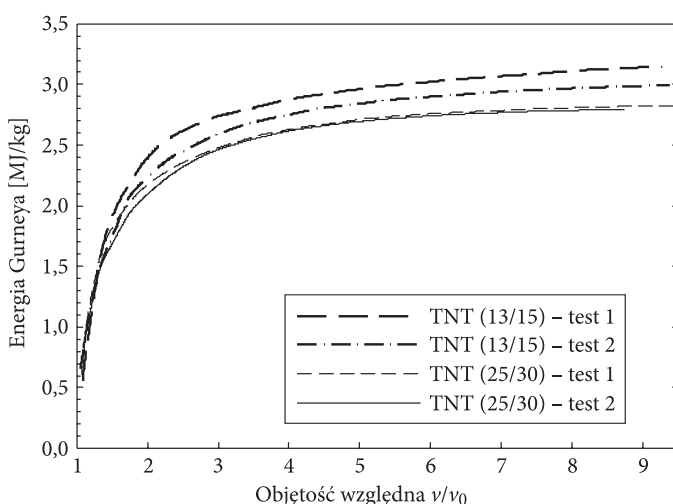
pomocą standardowego programu. Następnie zebrane dane zostały przekształcone na zależność położenia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej. Założenie o stacjonarności procesu napędzania pozwoliło wyznaczyć z profilu rurki i zmierzonej prędkości detonacji zależność prędkości ścianki rurki od czasu. Przykładowe zależności pokazano na rysunkach 5-6.

Zdolność miotającą materiałów wybuchowych można scharakteryzować przez energię Gurneya, która jest sumą energii kinetycznej miotanego ciała i produktów detonacji przypadającą na jednostkę masy materiału wybuchowego. W przypadku cylindrycznych otoczek energia Gurneya wyrażona jest następującą zależnością:

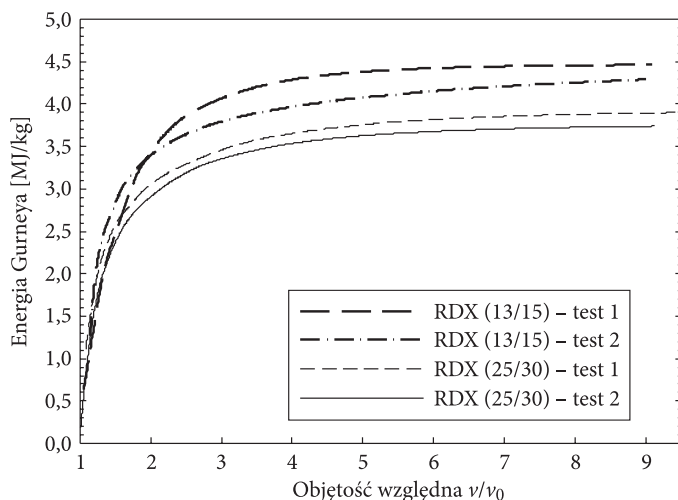
$$E_G = \left(\mu + \frac{1}{2} \right) \frac{u_T^2}{2}, \quad (1)$$

gdzie μ oznacza stosunek masy rurki do masy materiału wybuchowego. W literaturze podawana jest najczęściej maksymalna wartość energii Gurneya, odpowiadająca prędkościom rurek na odległościach, na których zachowują one jeszcze ciągłość lub prędkość Gurneya, będącą pierwiastkiem kwadratowym z podwojonej wartości energii Gurneya. Wyniki testu cylindrycznego umożliwiają badanie zmiany energii Gurneya określonej wzorem (1) w trakcie napędzania rurek. Zależność energii Gurneya od względnej objętości rurki (produktów detonacji) przedstawiono na rysunkach 7-10 dla wszystkich badanych materiałów wybuchowych.

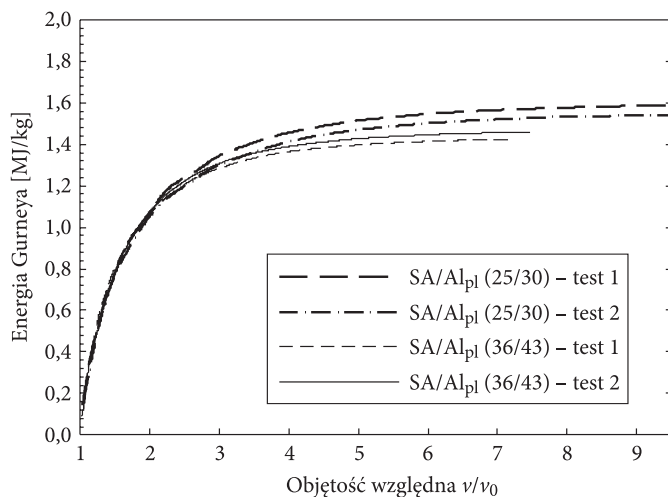
Z analizy wykresów zależności energii Gurneya od objętości względnej rurki miedzianej pokazanych na rysunkach 7-10 wynika, że skala eksperymentu w teście cylindrycznym ma wpływ na uzyskane wyniki. Generalnie w przypadku zastosowania



Rys. 7. Zależności energii Gurneya od objętości względnej dla trotylu



Rys. 8. Zależności energii Gurneya od objętości względnej dla heksogenu flegmatyzowanego



Rys. 9. Zależności energii Gurneya od objętości względnej dla amonalu z Al_{pl}

rurek o mniejszej średnicy i masie otrzymuje się wyższe wartości energii Gurneya dla tego samego materiału zarówno dla materiałów o przeznaczeniu wojskowym, jak i cywilnym. W tabeli 3 zestawiono wyniki testu cylindrycznego dla wojskowych materiałów wybuchowych. Wartości końcowe energii Gurneya określono dla objętości względnej rurki $v/v_0 = 9$. Dla takiego stopnia rozpęczenia na zdjęciach rentgenowskich nie widać jeszcze pęknięć w materiale rurki.

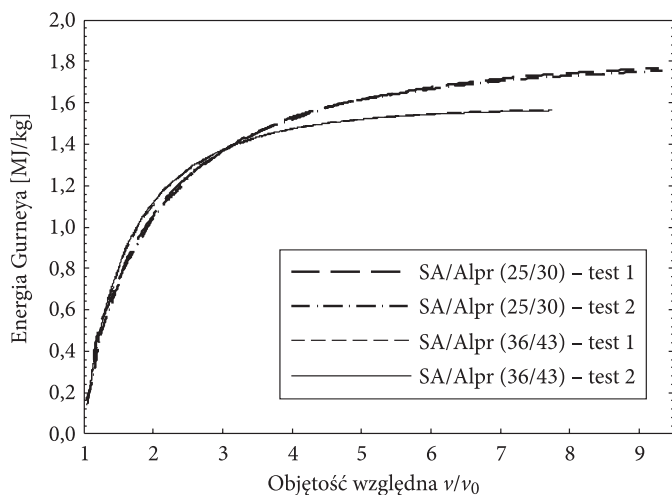
Rys. 10. Zależności energii Gurneya od objętości względnej dla amonalu z Al_{pr}

TABELA 3

Zestawienie wyników dla wojskowych materiałów wybuchowych

Materiał wybuchowy	Średnica wew. rurki [mm]	μ	E_G [MJ/kg] $v/v_0 = 9$	E_{Gs} [MJ/kg]	$\frac{E_{Gs13} - E_{Gs25}}{E_{Gs25}}$ [%]
Trotyl prasowany	13	1,87	3,14	3,07	9,1
		1,86	2,99		
	25	2,46	2,82	2,81	
		2,46	2,80		
Heksogen flegmatyzowany	13	1,77	4,46	4,32	13,2
		1,77	4,18		
	25	2,39	3,89	3,82	
		2,37	3,74		

Zastosowanie rurki miedzianej o średnicy wewnętrznej 13 mm daje końcowe wyniki energii Gurneya o ok. 9% dla trotylu i 13% dla heksogenu flegmatyzowanego wyższe niż w przypadku rurki standardowej o średnicy 25 mm. Na podstawie analizy wykresów na rysunku 5 można stwierdzić, że rurki o mniejszej masie (o mniejszej wartości μ) są napędzane do prędkości maksymalnej w czasie ponad dwukrotnie krótszym niż rurki standardowe. Procesy falowe w cienkiej rurce prowadzą do największego wzrostu jej prędkości w początkowej fazie napędzania. Zatem wpływ fal rozrzedzeniowych propagujących się od miejsca zainicjowania detonacji ładunku

jest mniejszy. W rezultacie końcowe wartości oszacowanej energii Gurneya są wyższe (tab. 3). Kłopoty z zabezpieczeniem kasety z filmem nie pozwoliły wykonać testu z rurą miedzianą o średnicy wewnętrznej 36 mm. Jednak na podstawie analizy danych literaturowych [15] oraz przeprowadzonych testów można przyjąć, że skala eksperymentu ma wpływ na ocenę zdolności miotającej silnych, idealnych materiałów wybuchowych i energia Gurneya dla tych materiałów powinna być wyznaczana w teście standardowym.

Wartości końcowe energii Gurneya dla nieidealnych materiałów wybuchowych przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Zestawienie wyników dla górniczych materiałów wybuchowych

Material wybuchowy	Średnica wew. rurki [mm]	μ	E_G [MJ/kg] $v/v_0 = 9$ $v/v_0 = 7^*$	E_{Gs} [MJ/kg]	$\frac{E_{Gs36} - E_{Gs25}}{E_{Gs25}}$
SA/Al _{pl}	25	4,53	1,59	1,57	-8,3
		4,56	1,55		
	36	4,39	1,46	1,44	
		4,37	1,42		
SA/Al _{pr}	25	4,28	1,76	1,76	-11,1
		4,17	1,75		
	36	4,15	1,56	1,56	
		4,05	1,56		

* dla rurek o średnicy 36 mm wartości energii Gurneya zostały odczytane dla $v/v_0 = 7$

W przypadku nieidealnych materiałów wybuchowych wyniki uzyskane z standardowego testu są wyższe niż dla rurek o średnicy wewnętrznej 36 mm, mimo że stosunek masy rurki do masy materiału wybuchowego μ był w obu testach podobny. Jest to wynik nieco zaskakujący, jeżeli weźmie się pod uwagę, że prędkości detonacji zastosowanych amonali w rurkach o większej średnicy są o ponad 100 m/s wyższe, a czas napędzania rurek w obu testach nie różni się drastycznie, jak w przypadku wojskowych materiałów wybuchowych (rys. 5-6). Jednak należy zauważyć, że rurki miedziane o średnicy 36 mm pękają już przy siedmiokrotnym wzroście objętości, co odpowiada wartościom współrzędnej osiowej x około 150 mm od czoła fali detonacyjnej. Jeśli przyjąć, że od tego przekroju propagują się w produktach detonacji amonali fale rozrzedzeniowe z prędkością dźwięku (rzędu 1000-2000 m/s dla dużych wartości ciśnienia), to osłabiają one działanie produktów na ścianki rurki w dużej objętości. A ponieważ rurka o większej masie jest napędzana w dłuższym czasie, efekt tego osłabienia na prędkość rurki jest większy niż w przypadku testu standardowego.

4. Podsumowanie

Analiza wyników przeprowadzonych testów cylindrycznych pozwala na stwierdzenie, że skala eksperymentu ma wpływ na wyznaczone z testów zdolności miotające materiału wybuchowego, zarówno dla materiałów o przeznaczeniu wojskowym, jak i cywilnym. Generalnie można powiedzieć, że ze wzrostem skali eksperymentu (średnicy rurki miedzianej) maleje wyznaczana energia Gurneya. Przyczyny tego wzrostu mogą być jednak różne. W przypadku materiałów wojskowych zastosowano rurki miedziane o mniejszej średnicy i mniejszej gęstości powierzchniowej niż rurka z testu standardowego. Gwałtowne przyspieszenie cienkich rurek w początkowej fazie napędzania było główną przyczyną, że oszacowana energia Gurneya była większa niż dla rurek standardowych. Oznacza to, że dla silnego materiału wybuchowego stosunek masy miotanej rurki do masy materiału oraz skala eksperymentu mają wpływ na wyznaczaną zdolność miotającą. W przypadku idealnych materiałów wybuchowych o przeznaczeniu wojskowym należy wykonywać standardowy test cylindryczny.

Dla nieidealnych materiałów wybuchowych zastosowanie rurek miedzianych o większej średnicy niż w teście standardowym spowodowało zmniejszenie wyznaczanych zdolności miotających tych materiałów. Chociaż wzrastała prędkość detonacji w układzie o większej skali, co powinno spowodować wzrost energii Gurneya, to jednocześnie wydłużał się czas procesu napędzania rurki, a jej ciągłość została przerwana przy mniejszej względnej objętości rurki. Oba te zjawiska powodują, że wpływ fal rozrzedzeniowych propagujących się za frontem fali detonacyjnej na proces napędzania cylindra był większy w przypadku rurek o większej średnicy, mimo że stosunek gęstości powierzchniowej materiału rurki do materiału wybuchowego był w obu testach zbliżony. Wydaje się, że zwiększenie skali eksperymentu w przypadku nieidealnych materiałów wybuchowych jest uzasadnione jedynie wówczas, gdy w rurekach standardowych materiały te nie detonują lub ich prędkość detonacji jest znacznie mniejsza niż prędkość w rurekach o większej średnicy (np. w przypadku saletroli [18]).

LITERATURA

- [1] J.W. KURY, H.C. HORNING, E.L. LEE, J.L. McDONNELL, D.L. ORNELLAS, M. FINGER, F.M. STRANGE, M.L. WILKINS, *Metal acceleration by Chemical Explosives*, Fourth Symposium (International) on Detonation, White Oak, 1965.
- [2] E.L. LEE, H.C. HORNING, J.W. KURY, *Adiabatic expansion of high explosive detonation products*, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-50422, 1968.
- [3] W.A. TRZCIŃSKI, *Application of a cylinder test for determining energetic characteristics of explosives*, Journal of Technical Physics, 42(2), 2001, 165-179.
- [4] W.A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, *Determination of metal acceleration abilities and detonation energy of explosives from cylinder test*, Journal of Technical Physics, 42(1), 2001, 43-51.

- [5] W.A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, *The application of the cylinder test to determine the energy characteristics of industrial explosives*, Archives of Mining Sciences, 46(3), 2001, 291-307.
- [6] U. NYBERG, I. ARVANTIDIS, M. OLSSON, F. OUCHTERLONY, *Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk emulsion explosives*, Explosives and Blasting Technique, Proceedings of the EFEE 2nd World Conference, Prague, Czech Republic, 2003.
- [7] H.C. HORNING, E.L. LEE, M. FINGER, *Equation of state of detonation products*, Fifth Symposium (International) on Detonation, Pasadena, USA, 1970.
- [8] F. POLK, *Determination of the equation of state of explosive detonation products from the cylinder expansion test*, 6th International Symposium on Ballistics, Orlando, USA, 1981.
- [9] H. HORNBERG, *Determination of fume state parameters from expansion measurements of metal tubes*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 11, 1986, 23-31.
- [10] R.R. IJSSELSTEIN, *On the expansion of high-explosive loaded cylinders and JWL equation of state*, 9th International Symposium on Ballistics, Shrivenham, UK, 1986.
- [11] I-FENG, S.-C. HUNG, C.-Y. CHEN, Y.-M. NIU, J.-H. SHINAN, *An improved simple method of deducing JWL parameters from cylinder expansion test*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 18, 1993, 18-24.
- [12] S. CUDZIŁO, R. TRĘBIŃSKI, W. TRZCIŃSKI, *Determination of the effective exponent of isentrope for the detonation products of high explosives*, Chem. Phys. Reports, 16(9), 1997, 1719-1732.
- [13] R. TRĘBIŃSKI, W.A. TRZCIŃSKI, *Determination of an expansion isentrope for detonation products of condensed explosives*, Journal of Technical Physics, 40(4), 1999, 447-504.
- [14] S. CUDZIŁO, P. KOHLICEK, W.A. TRZCIŃSKI, S. ZEMAN, *Performance of emulsion explosives*, Combustion, Explosion, and Shock Waves, 38(4), 2002, 463-469.
- [15] J.E. BACKOFEN, *The influence of geometry and material properties on an explosive's Gurney velocity and energy*, Proceedings of New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, 2006, 76-89.
- [16] W.A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, *Characteristics of high explosives obtained from cylinder test data*, Chinese Journal of Energetic Materials, 14(1), 2006.
- [17] W.A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, L. SZYMAŃCZYK, *Studies of detonation characteristics of aluminum enriched RDX compositions*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 32(5), 2007.
- [18] R. STECKIEWICZ, *Badanie i prognozowanie czynników rażenia improwizowanych urządzeń wybuchowych, rozprawa doktorska*, WAT, Warszawa, 2009.

W.A. TRZCIŃSKI, M. SZCZEPANIK

Study of influence of an experiment scale on cylinder test results

Abstract. In the work, influence of a scale of experiment on the results of cylindrical test used to determine the acceleration capabilities of explosives was analyzed. Explosives used in ammunition (TNT, hexogen) and explosives for civil purpose (ammonals) were selected for testing. Copper tubes with different diameters and wall thickness were used. Conclusions are drawn regarding the advisability of increasing or decreasing the scale of the cylinder test.

Keywords: explosives, acceleration ability, cylinder test