



Badanie reakcji na bodziec inicjujący oraz wyznaczenie zdolności miotających wypełnień improwizowanych urządzeń wybuchowych

ARTUR STECKIEWICZ*, WALDEMAR A. TRZCIŃSKI

*Centrum Szkolenia Policji, Komenda Główna Policji,
02-514 Warszawa, ul. Puławska 148/150
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy zbadano odpowiedź na silny bodziec inicjujący wytypowanych, nieidealnych kompozycji wybuchowych, najczęściej stosowanych w improwizowanych urządzeniach wybuchowych. Materiały wybuchowe umieszczane były w zamkniętych, ciężkich obudowach — mufach żeliwnych i rurach stalowych. Odpowiedź materiału wybuchowego na impuls inicjujący określono na podstawie wielkości i ilości odzyskanych odłamków. Przeprowadzono również dla wybranych kompozycji wybuchowych tzw. test cylindryczny, czyli rejestrację za pomocą rentgenografii impulsowej procesu napędzania cylindrycznej rurki miedzianej produktami detonacji. Wykonanie testu cylindrycznego umożliwiło oszacowanie zdolności miotających badanych kompozycji — wyznaczono tzw. energię i prędkość Gurneya.

Słowa kluczowe: improwizowane urządzenia wybuchowe, nieidealne materiały wybuchowe, zdolności miotające

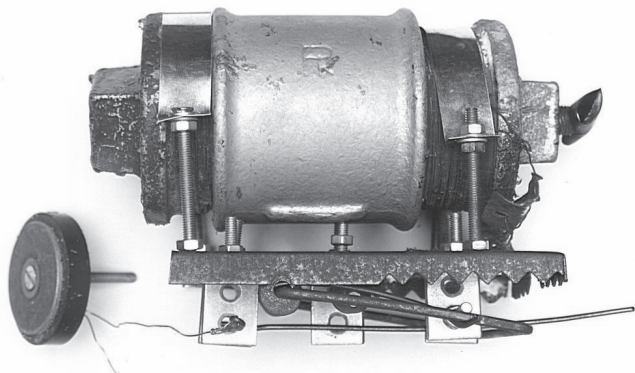
Symbole UKD: 662.1/.4

1. Wstęp

Stosowane często przez terrorystów tzw. „bomby rurowe” są zaliczane do konstrukcji zamkniętych ciężkich o działaniu odłamkowym, zgodnie z przyjętym w pracy [1] podziałem improwizowanych (samodziałowych) urządzeń wybuchowych. Z uwagi na zdolność do skutecznego rażenia odłamkami na znaczne odległości dochodzące do kilkuset metrów, należy tego typu urządzenia zakwalifikować do

grupy konstrukcji improwizowanych stwarzających największy stopień zagrożenia. Z tego powodu oraz z uwagi na ich specyfikę i częstotliwość występowania w praktyce zasadne jest przeprowadzenie odrębnego badania tego typu urządzeń. W szczególności niezbędne jest oszacowanie zdolności miotających wypełnień wybuchowych stosowanych w urządzeniach improwizowanych, co umożliwi prognozowanie prędkości odłamków i stref rażenia.

Łatwość dostępu do obudowy w formie rurowej i stosunkowo prosty sposób jej elaboracji mają niewątpliwie decydujący wpływ na szerokie zastosowanie tego rodzaju rozwiązań konstrukcyjnych przez organizacje terrorystyczne oraz grupy przestępcze niemal na całym świecie. Takim przykładem może być Irlandia, gdzie wizerunek bomby rurowej nabrał niemalże „kultowego” znaczenia. W statystykach polskiej policji od roku 1999 do 2006 odnotowano 102 przypadki zastosowania lub zabezpieczenia podczas działań policyjnych tego typu konstrukcji w różnych jej odmianach, z tego 94 bomby w rurowej obudowie stalowej lub żeliwnej, 5 w miedzianej oraz 3 w aluminiowej. Do częstych rozwiązań należy zastosowanie różnych wielkości muf hydraulicznych, zaślepionych obustronnie fabrycznymi nakrętkami z dołączonymi różnorodnymi elementami pobudzającymi. Klasycznym przykładem tego typu urządzeń były bomby rurowe wykonywane i podkładane na terenie Warszawy w latach 2004-2005 (7 przypadków) — rys. 1. W urządzeniach tych użyto jako wypełniacza mieszaniny pirotechnicznej składającej się z azotanów, siarki i węgla. W wyniku ich eksplozji ranne zostały 3 osoby.



Rys. 1. Przykład samodziiałowej konstrukcji wybuchowej typu rurowego

Już wstępne oględziny miejsca wybuchu tego rodzaju urządzenia pozwalają na odróżnienie, czy sprawca użył w konstrukcji jako wypełniacza kruszącego materiału wybuchowego czy też mieszaniny pirotechnicznej. Świadczy o tym sposób fragmentacji obudowy po wybuchu. Charakterystyczną cechą, właściwą dla większości mieszanin pirotechnicznych, jest rozerwanie obudowy na duże elementy

o nieregularnych kształtach (rys. 2). W nieznaczny sposób lub prawie nienaruszone pozostają elementy o zwiększonej masie lub grubości, np. korki hydrauliczne, elementy łączenia, wzmocnienia żeberkowe ścianek itp.



Rys. 2. Zabezpieczone na miejscu wybuchu korki hydrauliczne i fragmenty bocznych ścianek mufy wypełnionej mieszaniną pirotechniczną

W przypadku elaboracji tego typu konstrukcji materiałami wybuchowymi krującymi następuje rozdrobnienie obudowy na odłamki o zróżnicowanej wielkości. Jest ona uzależniona od wielu czynników. Decydujący wpływ mają: rodzaj i ilość materiału wybuchowego, miejsce i sposób pobudzenia, właściwości wytrzymałościowe obudowy (kruchość, plastyczność) oraz jej masa i kształt.

Reakcja (odpowiedź) mieszaniny wybuchowej na bodziec inicjujący zależy od rodzaju i wielkości bodźca, średnicy ładunku oraz typu otoczki ładunku. Wyznaczonej średnicy krytycznej oraz prędkości detonacji dla ładunku swobodnego (bez otoczki) nie można bezpośrednio wykorzystać do przewidywania odpowiedzi materiału wybuchowego zamkniętego w ciężkiej otoczce, tym bardziej że kształt stosowanych przez terrorystów konstrukcji często odbiega od kształtu cylindrycznego. Dlatego celem niniejszej pracy było zbadanie w pierwszej kolejności charakteru przemiany chemicznej wytypowanych materiałów wysokoenergetycznych zamkniętych w typowym, improwizowanym urządzeniu rurowym (mufy hydrauliczne zamknięte korkami) poprzez analizę stopnia fragmentacji obudowy (liczby i wielkości odłamków). Przy wyborze kompozycji materiałów kierowano się analizą danych policyjnych. Uzyskane wyniki zweryfikowano poprzez zastosowanie znormalizowanego testu z rurą stalową. Następnie zbadano zdolność miotającą wybranych mieszanin wybuchowych, wykonując tzw. test cylindryczny i wyznaczając energię oraz prędkość Gurneya. Wyniki eksperymentalne porównano z rezultatami obliczeń termochemicznych.

2. Część eksperymentalna

2.1. Charakterystyka badanych materiałów wybuchowych

Na podstawie analizy danych policyjnych dotyczących rodzaju i częstotliwości występowania wypełniaczy w bombach rurowych, do badań wytypowano osiem rodzajów kompozycji wybuchowych. Przy wyborze wzięto również pod uwagę stopień dostępności dla świata przestępczego składników mieszanin wybuchowych. Zastosowana w mieszaninach granulowana, rolnicza saletra amonowa charakteryzowała się niską porowatością. Skład badanych kompozycji wybuchowych podano w tabeli 1. W tabeli podano również średnią gęstość ładunków stosowanych w testach rurowych.

TABELA 1

Skład i gęstość badanych materiałów wysokoenergetycznych

Symbol wypełniacza	Składniki	Udział masowy [%]	Średnia gęstość [g/cm ³]
WP	azotan baru/PAM*/siarka (wypełniacz petard)	70/20/10	1,25
P4	proch nitrocelulozowy 4/1	100	0,63
TNT/P4	trotyl/proch 4/1	50/50	0,76
TNT-I	trotyl łuskowany	100	0,78
SA/Al	azotan amonu/aluminium	85/15	1,09
ANFO	azotan amonu/olej	94/6	1,00
TNT-I	trotyl odlewany	100	1,60
PCz	proch czarny**	100	1,20

* PAM — stop magnezu z glinem Al₃Mg₄

** KNO₃/węgiel drzewny/siarka 75/15/10

Przed przystąpieniem do testów rurowych wykonano obliczenia termodynamiczne dla wytypowanych materiałów wysokoenergetycznych w celu oszacowania ich ciśnienia i ciepła wybuchu w stałej objętości oraz ilości gazowych produktów wybuchu. Zastosowano kod CHEETAH [2] z zestawem BKWS [3] dla równania stanu BKW (Becker, Kistiakowski, Wilson) dla produktów spalania. Dane termodynamiczne dla składników kompozycji wybuchowych zaczerpnięto z literatury [4-6]. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Parametry wybuchu w stałej objętości badanych materiałów wysokoenergetycznych

Symbol wypełniacza	Ciepło wybuchu [J/g]	Ciśnienie wybuchu [GPa]	Ilość gazowych PW [dm ³ /kg]
WP	5180	0,64	136
P4	3660	1,81	985
TNT/P4	3709	2,41	918
TNT-I	3640	2,07	882
SA/Al	5996	3,66	805
ANFO	3966	3,48	1078
TNT-I	4519	8,00	708
PCz	2560	1,41	338

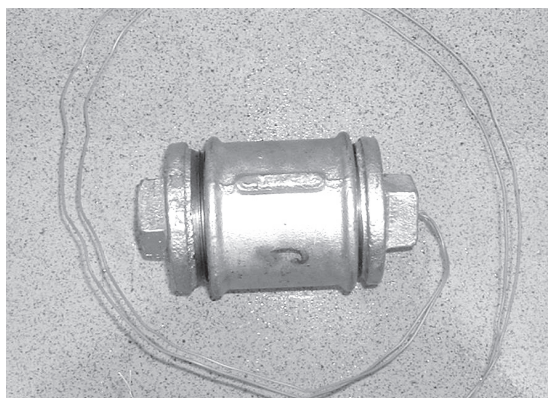
Z danych zawartych w tabeli 2 wynika, że wszystkie wybrane materiały wysokoenergetyczne spełniają dwa warunki konieczne do zajścia wybuchu chemicznego, to znaczy egzotermiczność reakcji oraz obecność gazowych produktów reakcji, chociaż w przypadku mieszanin WP i PCz ilość produktów gazowych jest zdecydowanie mniejsza niż dla typowych kompozycji wybuchowych. Trzecim warunkiem zajścia wybuchu jest duża szybkość reakcji. Czy jest ona wystarczająca, aby badane materiały można zaliczyć do materiałów wybuchowych, przekonamy się, analizując wyniki testów rurowych.

2.2. Testy w zamkniętych rurach

W pierwszej kolejności jako obudowy fragmentujące zastosowano dwucalowe mufy hydrauliczne o średniej pojemności 157 cm³ zaślepione obustronnie korkami (rys. 3). Średnica wewnętrzna mufy wynosiła 60 mm, jej długość około 65 mm, zaś grubość ścianki 3 mm. Wkręcane korki zmniejszały objętość wypełniającego mufę materiału wybuchowego, stąd wyznaczone gęstości ładunków obarczone były znacznym błędem. Zaelaborowane urządzenia wybuchowe umieszczano w kloszowej osłonie z tworzywa sztucznego i zasypywano warstwą piasku wewnątrz metalowego grubościennego pojemnika (rys. 4). We wszystkich przypadkach elementem pobudzającym były wojskowe zapalniki elektryczne typu ERG. Dla każdego z zastosowanych materiałów przeprowadzono po dwie próby.

W testach z zamkniętymi rurami odpowiedź materiału wybuchowego na bodziec zewnętrzny inicjujący przemianę chemiczną ocenia się na podstawie ilości i wielkości odzyskanych fragmentów metalowej otoczki. Ponieważ brak jest danych odnośnie do zależności między stopniem fragmentacji zastosowanej w teście

żeliwnej otoczki a rodzajem odpowiedzi materiału wybuchowego, w pierwszym przybliżeniu wykorzystano dane standardowego testu rurowego (test nr 35) opisanego w przepisach standardowych [7]. Zgodnie z normą [7] wyróżnia się pięć stopni (rodzajów) odpowiedzi materiału wybuchowego zamkniętego w rurze stalowej na impuls inicjujący: 0 — brak reakcji chemicznej (pojemnik nierozzerwany), 1 — palenie (pojemnik rozerwany, ale bez fragmentacji), 2 — deflagracja (od 2 do 9 fragmentów pojemnika), 3 — wybuch od 10 do 100 fragmentów), 4 — detonacja (powyżej 100 fragmentów). W tabeli 3 przedstawiono wyniki testów z mufami żeliwnymi i wyznaczony na tej podstawie rodzaj reakcji badanych kompozycji wybuchowych zgodnie z normą [7].



Rys. 3. Mufa hydrauliczna z ładunkiem testowanego materiału wysokoenergetycznego



Rys. 4. Położenie elementów układu eksperymentalnego przed zasypaniem warstwą piasku

Niektóre z badanych materiałów wysokoenergetycznych zamknięte w żeliwnej otoczce i poddane oddziaływaniu bodźca wybuchowego, wygenerowanego przez zapalnik typu Erg, gwałtownie się palą bez udziału tlenu z powietrza (deflagracja). Do materiałów tych należą proch czarny PCz, proch bezdymny P4 oraz wypełniacz petard WP. Na rysunku 5 pokazano odłamki odzyskane po próbie, w której zastosowano ostatni z nich. Proces deflagracji tych materiałów w zamkniętym pojemniku nie przechodzi w wybuch. Oznacza to, że szybkość przemiany chemicznej jest zbyt mała, by palenie przekształciło się w wybuch, ale wzrastające ciśnienie gazowych produktów spalania powoduje rozerwanie metalowej otoczki. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że taki wynik testu dobrze koreluje z rezultatami obliczeń termochemicznych dla wybuchu w stałej objętości (tab. 2). Wartości teoretycznego ciśnienia wybuchu dla wymienionych wyżej mieszanin są bardzo niskie. A ciśnienie jest jednym z głównych czynników wpływających na kinetykę przemiany wybuchowej.



Rys. 5. Fragmenty mufy po deflagracji mieszaniny WP

Reakcja ANFO jest niejednoznaczna, w jednym przypadku mamy deflagrację, w drugim wybuch. Proch bezdymny wymieszany z trotylem łuskowanym staje się groźnym materiałem wybuchowym (rys. 6). Zaskakująco niebezpiecznym materiałem wybuchowym jest mieszanina saletry amonowej z proszkiem aluminiowym (rys. 7). Liczba odłamków w tym przypadku jest porównywalna z liczbą odłamków odzyskanych po wybuchu trotylu.



Rys. 6. Fragmenty mufy po wybuchu mieszaniny TNT/P4



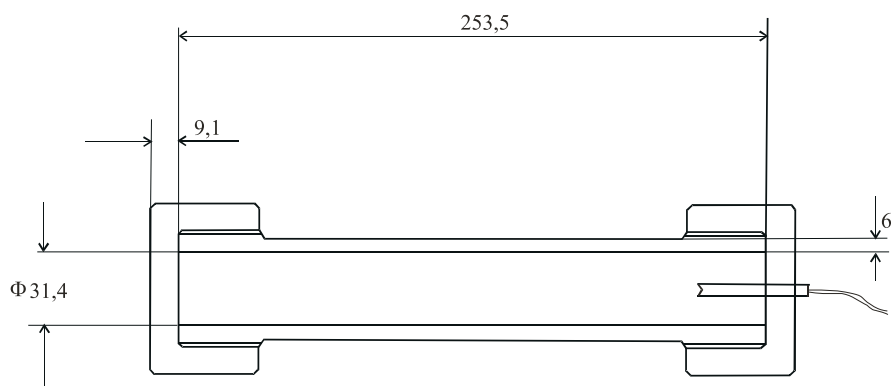
Rys. 7. Fragmenty mufy po detonacji mieszaniny SA/Al

TABELA 3

Wyniki testów w rurze żeliwnej

Symbol wypełniacza	Masa wypełniacza [g]	Masa odzyskanej obudowy [%]	Liczba fragmentów (odłamków)	Rodzaj reakcji
WP	182,0	99,15	17	deflagracja
	211,6	98,52	16	
P4	98,9	97,39	22	deflagracja
	99,8	99,11	20	
TNT/P4	119,3	94,70	82	wybuch
	122,5	99,37	87	
TNT-I	121,3	84,27	133	detonacja
	128,4	98,42	240	
SA/Al	159,1	99,8	187	detonacja
	186,0	99,4	172	
ANFO	165,8	99,6	20	deflagracja wybuch
	150,8	89,01	44	
TNT-I	218,4	95,53	168	detonacja
	243,8	95,47	149	
PCz	182,9	98,80	10	deflagracja
	196,1	99,87	9	

Z powodu braku danych z badań wzorcowych określających rodzaj reakcji wybuchowej w przypadku zastosowania otoczek z muf hydraulicznych, ocena reakcji badanych materiałów wybuchowych prezentowana w tabeli 3 ma charakter przybliżony. W celu weryfikacji stopnia reakcji podanych w tabeli 3, dla wybranych materiałów wybuchowych, dla których w próbach z mufami oszacowano odpowiedź materiału jako wybuch lub detonację, wykonano testy w rurach stalowych o wymiarach zbliżonych do tych stosowanych w teście nr 35 z normy [7]. W próbie tej bada się wrażliwość materiałów wybuchowych na pobudzenie termiczne wygenerowane przez spalanie 1,5 g prochu czarnego pobudzonego do reakcji przez spłonkę elektryczną. W próbach w niniejszej pracy do zainicjowania reakcji chemicznych w badanych materiałach zastosowano jednak elektryczny zapalnik wojskowy typu ERG, podobnie jak we wcześniejszych testach z mufami. Wymiary zastosowanych rur stalowych pokazano na rysunku 8. Zdjęcie rury przed strzałem pokazano na rysunku 9.



Rys. 8. Schemat układu rurowego do badania reakcji wybranych materiałów wybuchowych na pobudzenie zapalnikiem elektrycznym



Rys. 9. Zdjęcie rury stalowej z materiałem wybuchowym przed próbą

Wykonano po jednej próbie dla testowanego materiału wybuchowego. Wyniki testów zebrano w tabeli 4, zaś na rysunkach 10 i 11 pokazano zdjęcia odzyskanych odłamków po wybuchu i detonacji.

TABELA 4

Wyniki testów w rurze stalowej

Rodzaj wypełniacza	Masa ładunku	Masa odnalezionych odłamków [%]	Liczba odłamków	Rodzaj reakcji
TNT/P4	153,3	99,9	79	wybuch
SA/Al	176,8	94,7	69	wybuch
ANFO	166,0	99,2	58	wybuch
TNT-I	151,2	99,7	105	detonacja



Rys. 10. Odłamki odzyskane po wybuchu ładunku ANFO



Rys. 11. Odłamki odzyskane po detonacji ładunku trotylu łuskowanego

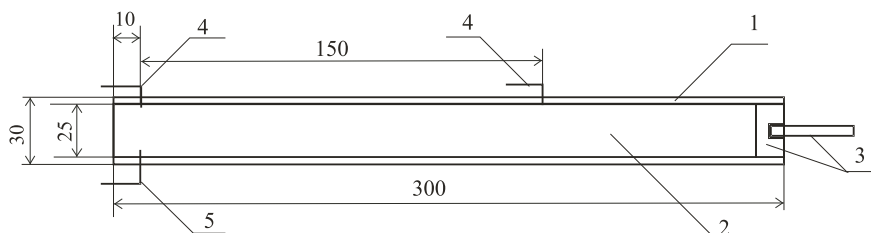
Jak należało oczekiwać, zamknięty w stalowej rurze ładunek trotylu łuskowanego o gęstości usypowej zdetonował pobudzony zapalnikiem elektrycznym. Natomiast odpowiedzią mieszaniny SA/Al w podobnych warunkach był wybuch, chociaż w mufie hydraulicznej zaobserwowano dla tej mieszaniny detonację. Przyczyną tej rozbieżności może być różnica w gęstości ładunku (trudna do powtórzenia w obu układach) albo większa średnica ładunku w układzie z mufą. Mimo tej różnicy, można przyjąć, że kryteria zaproponowane w normie [7] pozwalają z dobrym przybliżeniem ocenić odpowiedź materiałów wybuchowych w próbach z zamkniętą mufą hydrauliczną.

2.3. Test cylindryczny

Oszacowanie prędkości ciał napędzanych wybuchem wypełniacza urządzenia improwizowanego ma duże znaczenie z punktu widzenia przewidywania wielkości

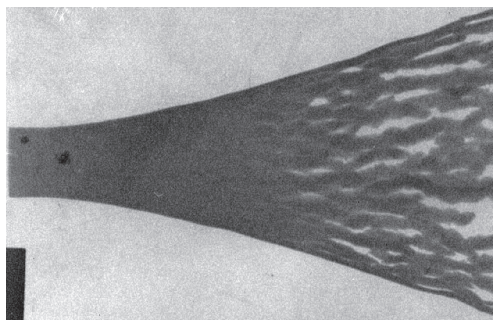
obszaru zagrożonego działaniem odłamków. Najprostszymi metodami oszacowania prędkości ciał napędzonych wybuchem są metody oparte na oszacowaniach energetycznych [8-9]. Wyprowadzone z zależności energetycznych wzory umożliwiają prognozowanie prędkości odłamków, jeśli znana jest tzw. prędkość lub energia Gurneya materiału wybuchowego. Te zaś parametry można wyznaczyć na podstawie wyników z testu cylindrycznego.

Test cylindryczny polega na rejestracji procesu napędzania metalowej rurki przez produkty detonacji ładunku umieszczonego wewnątrz niej. Schemat układu do testu cylindrycznego pokazano na rysunku 12. Ładunek badanego materiału wybuchowego umieszczany jest w miedzianej rurce o standardowych wymiarach. Zastosowane czujniki zwarciove umożliwiają pomiar prędkości detonacji i wyzwolenie układu rejestrującego. W niniejszej pracy rozpęcznie rurki miedzianej rejestrowano za pomocą zestawu do rentgenografii impulsowej SCANDIFLASH XR 450.



Rys. 12. Układ do testu cylindrycznego 1 — rura miedziana, 2 — badany materiał wybuchowy, 3 — zapalnik z 5-g. detonatorem z plastycznego materiału wybuchowego, 4 — czujniki do pomiaru prędkości detonacji, 5 — czujnik wyzwalający wiązkę promieniowania X

Do badań wytypowano te kompozycje z tabeli 1, dla których stwierdzono w testach rurowych wybuch lub detonację, bo tylko ten rodzaj reakcji materiału umożliwia napędzanie ciał do dużych prędkości. Przykładowy rentgenogram rurki miotanej produktami detonacji przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Rentgenogram rurki miedzianej napędzanej produktami detonacji mieszaniny TNT/P4

Wykonano po dwie próby dla trotylu łuskowanego (TNT-ł), mieszaniny SA/Al, mieszaniny TNT/P4 oraz jedną próbę dla trotylu lanego (TNT-l). Niepowodzeniem zakończyły się próby dla ANFO wytworzonego z saletry granulowanej, gdyż detonacja tego materiału w rurze miedzianej o średnicy 25 mm zanika. Dlatego wykonano test cylindryczny dla ANFO z saletry amonowej o podwyższonej porowatości, oznaczonego dalej nazwą ANFO-1. Ten materiał detonował w zastosowanej w teście cylindrycznym rurze miedzianej. Zmierzone prędkości detonacji przedstawiono w tabeli 5. Dla porównania w tabeli umieszczono również teoretyczne prędkości detonacji obliczone za pomocą kodu CHEETAH.

TABELA 5

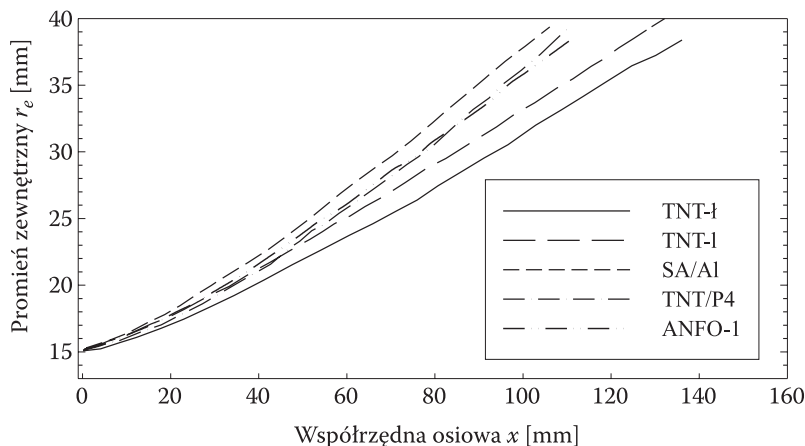
Zmierzone i obliczone prędkości detonacji

Rodzaj wypełniacza	Gęstość [g/cm ³]	Prędkość detonacji [m/s]	Teoretyczna prędkość detonacji [m/s]
TNT-ł	1,20	5480	5719
TNT-ł	1,20	5460	
TNT-l	1,60	6730	7025
TNT/P4	0,73	1690	4735
TNT/P4	0,73	1680	
SA/Al	0,83	1900	4882
SA/Al	0,83	1950	
ANFO-1	0,74	2120	4888

Wartości prędkości detonacji zmierzone dla ładunków trotylowych są porównywalne z teoretycznymi (różnica jest mniejsza niż 5%). Natomiast dla pozostałych materiałów wybuchowych są one ponad dwukrotnie niższe od otrzymanych z bliczeń termochemicznych. Tak duża różnica między teoretycznymi i eksperymentalnymi prędkościami detonacji jest cechą charakterystyczną dla nieidealnych materiałów wybuchowych, w szczególności, gdy średnice użytych w pomiarach ładunków są tylko nieco większe od średnicy krytycznej tych materiałów.

3. Wyznaczenie zdolności miotających

W wyniku komputerowej obróbki zdjęć rurki napędzanej produktami detonacji otrzymuje się zależność położenia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej. Zależność ta i zmierzona prędkość detonacji są wynikiem testu cylindrycznego. Przykładowe profile rurki pokazano na rysunku 14. Na ich podstawie wyznaczono zdolności miotające (tzw. energię Gurneya) testowanych materiałów wybuchowych, wykorzystując metodykę opisaną w pracy [10].



Rys. 14. Przykładowe zależności promienia zewnętrznego rurki od współrzędnej osiowej

W modelu zastosowanym w pracy [10] zakłada się, że proces detonacji w rurze miedzianej w analizowanym przedziale współrzędnej osiowej jest stacjonarny. Wówczas współrzędna osiowa i czas związane są następującą zależnością:

$$x = D \cdot t. \quad (1)$$

Wykorzystując zależności geometryczne, można znaleźć związek między zewnętrznym promieniem rurki a promieniem jej środka:

$$r_m = \sqrt{r_e^2 - \frac{1}{2}(r_{e0}^2 - r_{i0}^2)}, \quad (2)$$

gdzie r_e , r_m oznaczają odpowiednio bieżące położenia w kierunku radialnym zewnętrznej ścianki rurki i środka rurki, r_{e0} i r_{i0} oznaczają początkowe położenia zewnętrznej i wewnętrznej ścianki rurki.

Wykorzystując związek (1), można zamienić zależność promienia rurki od współrzędnej osiowej na zależność od czasu. Czasową zależność promienia środka masy przekroju rurki aproksymuje się następującą funkcją:

$$r_m = r_{m0} + \sum_i a_i \left\{ b_i (t - t_0) - [1 - \exp(-b_i (t - t_0))] \right\}. \quad (3)$$

Wówczas prędkość środka ścianki w kierunku radialnym wyraża się wzorem:

$$u_m \equiv \frac{dr_m}{dt} = \sum_i a_i b_i [1 - \exp(-b_i (t - t_0))]. \quad (4)$$

W celu wyznaczenia energii kinetycznej miotanej rurki niezbędne jest określenie całkowitej prędkości elementu rurki. Z zależności geometrycznej wynika, że kąt ugięcia rurki, Θ (kąt między styczną do trajektorii środka masy rurki i osią x), można wyznaczyć ze związku:

$$\Theta = \arctg\left(\frac{u_m}{D}\right). \quad (5)$$

Natomiast prędkość środka rurki określa ostatecznie zależność:

$$u_L = 2D \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right). \quad (6)$$

Zakłada się, że energię kinetyczną rurki jednoznacznie określa kwadrat prędkości środka rurki.

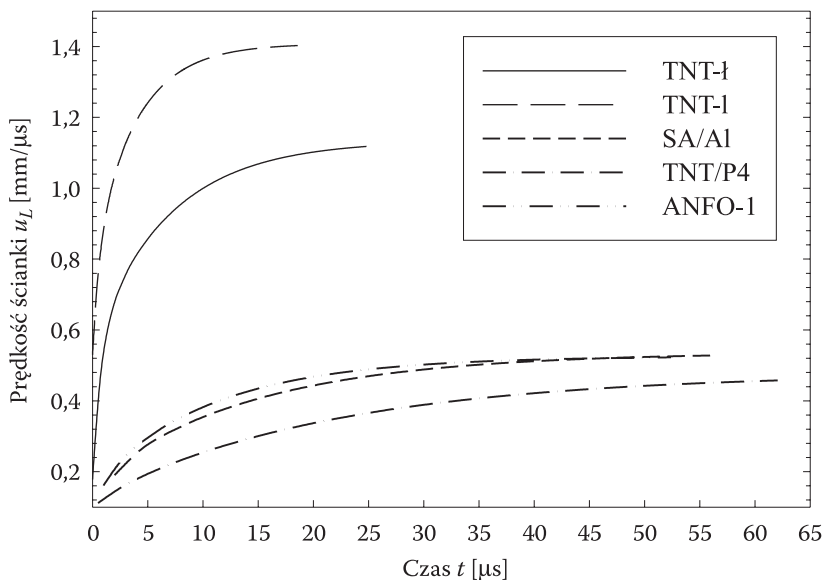
Suma energii kinetycznej rurki miedzianej i podążających za nią produktów detonacji na jednostkę masy materiału wybuchowego nosi nazwę *energii Gurneya* i jest wielkością charakteryzującą *zdolności miotające* produktów detonacji materiału wybuchowego. W pracy [10] wykazano, że wyraża się ona za pomocą wzoru:

$$E_G = \left(\mu + \frac{1}{2}\right) \frac{u_L^2}{2}, \quad (7)$$

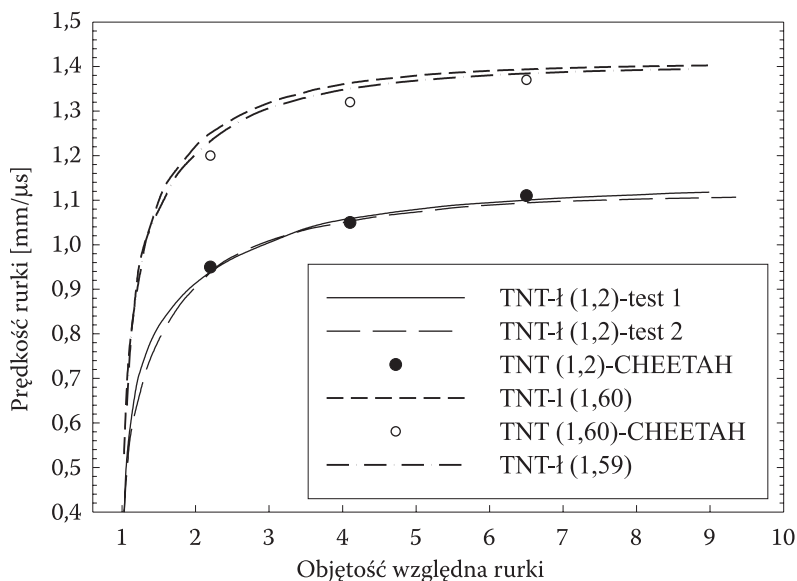
gdzie μ jest stosunkiem masy rurki do masy materiału wybuchowego.

Przedstawioną wyżej procedurę wyznaczania energii Gurneya na podstawie wyników testu cylindrycznego zastosowano dla badanych materiałów wybuchowych. W pierwszej kolejności z profilu eksperymentalnego napędzanej rurki miedzianej wyznaczono zależność położenia środka rurki r_m od czasu (wzory (1) i (2)) i aproksymowano ją za pomocą wzoru (3). Następnie wyznaczono prędkość rurki w funkcji czasu, korzystając ze wzorów (4)-(6). Przykładowe zależności pokazano na rysunku 15.

Porównywanie prędkości rurki miotanej produktami detonacji nieidealnych materiałów wybuchowych z prędkościami teoretycznymi nie ma większego sensu. Dlatego na rysunku 16 dokonano jedynie porównania wyznaczonych z testu cylindrycznego prędkości rurek miedzianych z prędkościami rurek obliczonych za pomocą kodu CHEETAH dla ładunków trotylowych o różnej gęstości. W kodzie CHEETAH istnieje możliwość obliczenia prędkości rurki miedzianej dla trzech wartości objętości względnej rurki: 2,2, 4,1 oraz 6,5. Wynik eksperymentalny dla trotylu prasowanego o gęstości $\rho_0 = 1,59 \text{ g/cm}^3$ zaczerpnięto z pracy [11]. Z danych pokazanych na rysunku wynika bardzo dobra zgodność prędkości obliczonych kodem termochemicznym z prędkościami wyznaczonymi z testu cylindrycznego dla ładunków trotylowych.

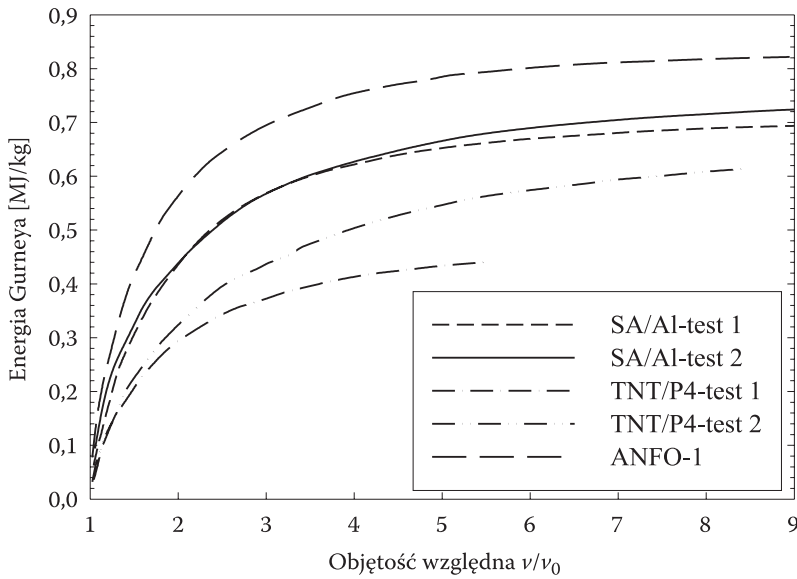


Rys. 15. Przykładowe czasowe zależności prędkości rurki miedzianej napędzanej produktami detonacji

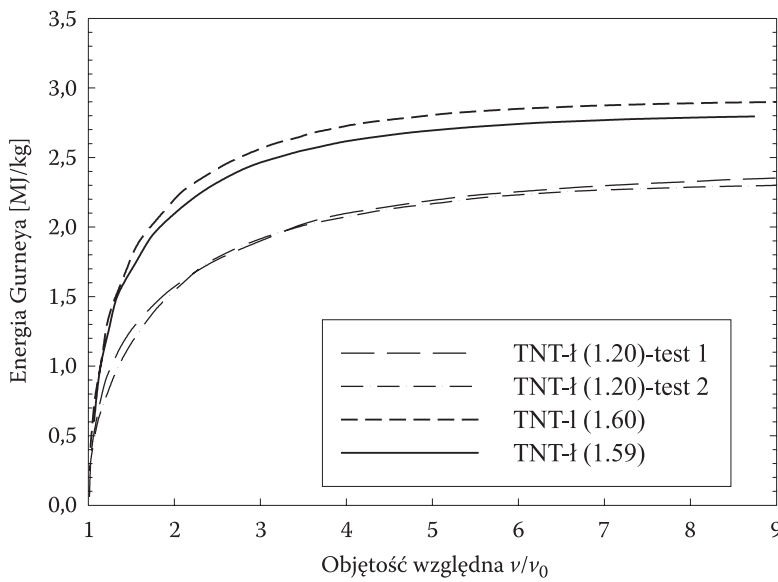


Rys. 16. Zależność prędkości rurki miedzianej napędzanej produktami detonacji trotylu od jej objętości względnej (w nawiasach podano gęstość ładunków)

Na rysunkach 17 i 18 pokazano zależność energii Gurneya badanych nieidealnych materiałów wybuchowych oraz trotylu od stopnia ekspansji produktów detonacji.



Rys. 17. Zależność energii Gurneya nieidealnych materiałów wybuchowych od objętości względnej produktów detonacji



Rys. 18. Zależność energii Gurneya trotylu o różnej gęstości od objętości względnej produktów detonacji (w nawiasach podano gęstość ładunków)

W literaturze podaje się końcowe wartości energii Gurneya (E_G) lub prędkości Gurneya ($u_G = \sqrt{2E_G}$) określone dla objętości rurki tuż przed jej fragmentacją. Tak wyznaczona prędkość Gurneya wykorzystywana jest do obliczania prędkości ciał (płytek, cylindrów, powłok kulistych i powstałych z nich odłamków) miotanych produktami detonacji danego materiału wybuchowego [8-9]. Dlatego w tabeli 6 przedstawiono wartości energii i prędkości Gurneya dla badanych materiałów wybuchowych określone przy dziewięciokrotnym stopniu ekspansji rurki miedzianej. Przy takim stopniu ekspansji rozpoczyna się proces pęknięcia rurki.

TABELA 6

Wartości energii i prędkości Gurneya przy dziewięciokrotnym wzroście objętości rurki miedzianej

Rodzaj materiału wybuchowego	Gęstość [g/cm ³]	Energia Gurneya E_G [kJ/kg]	Prędkość Gurneya u_G [m/s]
TNT-I	1,20	2310	2150
TNT-I	1,60	2900	2410
TNT/P4	0,73	620	1115
SA/Al	0,83	710	1190
ANFO-1	0,74	820	1280

Oszacowana po raz pierwszy prędkość Gurneya dla trotylu lanego jest zbliżona do wartości podawanych w literaturze dla trotylu prasowanego o dużej gęstości [12-13]. Wyznaczone prędkości Gurneya dla nieidealnych mieszanin wybuchowych są prawie dwukrotnie mniejsze od prędkości otrzymanej dla trotylu o gęstości usypowej $\rho_0 = 1,2 \text{ g/cm}^3$. Skutki rażenia odłamków napędzanych produktami detonacji takich mieszanin będą zatem mniej groźne, ponieważ ich prędkość początkowa będzie zdecydowanie mniejsza. Analizie problemu napędzania ciał produktami detonacji nieidealnych kompozycji wybuchowych i prognozowaniu skutków ich oddziaływania na otoczenie poświęcona będzie oddzielna praca.

4. Podsumowanie

Celem pracy było zbadanie reakcji na silny bodziec wybuchowy wytypowanych materiałów wybuchowych i pirotechnicznych zamkniętych w konstrukcjach typu rurowego. Stwierdzono, że wypełniacze z czystych prochów lub mieszaniny pirotechnicznej palą się gwałtownie (ulegają deflagracji). Dla pozostałych badanych materiałów stwierdzono, na podstawie ilości i wielkości fragmentów żeliwnej otoczki, że wystąpił proces wybuchu lub detonacji. Zaobserwowano dobrą korelację pomiędzy wartością teoretycznego ciśnienia obliczonego dla wybuchu w stałej ob-

jętoci a odpowiedzią materiału umieszczonego w mufie żeliwnej. Wyniki testów w standardowych rurach stalowych potwierdziły rezultaty uzyskane dla materiałów wybuchowych zamkniętych w mufach.

Dane z testu cylindrycznego pozwoliły wyznaczyć energię i prędkość Gurneya dla badanych materiałów wybuchowych zdolnych do detonacji w rurze miedzianej o średnicy 25 mm. Oszacowano po raz pierwszy prędkość Gurneya dla trotylu lanego i trotylu o małej gęstości. Wyznaczone prędkości Gurneya dla nieidealnych mieszanin wybuchowych są prawie dwukrotnie mniejsze od prędkości otrzymanej dla trotylu o gęstości usypowej.

Artykuł wpłynął do redakcji 7.11.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] A. STECKIEWICZ, W. A. TRZCIŃSKI, *Samodziałowe urządzenia wybuchowe*, Biul. WAT, 54, 5-6, 2005, 149-162.
- [2] L. E. FRIED, *CHEETAH 1.39 User's Manual*, UCRL-MA-117541 Rev. 3, Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [3] M. L. HOBBS, M. R. BAER, *Calibrating the BKW-EOS with a large product species base and measured C-J properties*, Proceedings of the Tenth Symposium (International) on Detonation, Boston, 1994.
- [4] *JANAF Thermochemical Tables*, Second edition, National Bureau of Standards, Washington 1971.
- [5] I. BARIN, *Thermochemical data of pure substances*, Third edition, VCH, Weinheim, 1998.
- [6] J. E. ROSE, *Properties of black powder and charcoal*, US Naval Ordnance Station, Indian Head, 1974.
- [7] *Energetic materials testing and assessment policy committee — Manual of tests*, DOSG, 2005.
- [8] R. W. GURNEY, *The initial velocities of fragments from bombs, shells, and grenades*, Army Ballistic Research Laboratory report BRL 405, 1943.
- [9] S. CUDZIŁO, A. MARANDA, J. NOWACZEWSKI, R. TRĘBIŃSKI, W. A. TRZCIŃSKI, *Wojskowe materiały wybuchowe*, Częstochowa, 2000.
- [10] W. A. TRZCIŃSKI, *Zastosowanie testu cylindrycznego do wyznaczania energetycznych charakterystyk materiałów wybuchowych*, Biul. WAT, 49, 9, 2000.
- [11] W. A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, L. SZYMAŃCZYK, *Wyznaczanie zdolności miotających i energii detonacji materiałów wybuchowych z testu cylindrycznego*, Biul. WAT, 49, 9, 2000.
- [12] W. P. WALTERS, J. A. ZUKAS, *Explosive effects and applications*, Springer, New York, 1997.
- [13] W. P. WALTERS, J. A. ZUKAS, *Fundamentals of shaped charges*, CMC Press, Baltimore, 1998.

A. STECKIEWICZ, W. A. TRZCIŃSKI

Investigations of explosives response to strong stimulus and determination of propellant features of fillings in improvised explosive devices

Abstract. The reaction of non-ideal explosives, often used as fillings in improvised explosive devices, on a strong stimulus was tested. The explosives were placed in closed heavy containers — cast iron

muffs and steel tubes. The response of an explosive to initiating stimulus was determined on the basis of size and quantity of fragments. For chosen explosive compositions, the so-called cylinder test, i.e., X-ray registration of the acceleration process of a copper tube by the detonation products, was also carried out. The results of the cylinder test enable us to determine the ballistic ability of the tested compositions by estimation of Gurney energy and velocity.

Keywords: improvised explosive devices, non-ideal explosives, ballistic ability

Universal Decimal Classification: 662.1/.4