



Badanie parametrów detonacji i charakterystyk fal podmuchowych dla mieszanin nitrometanu z cząstkami stopu glinu i magnezu

WALDEMAR A. TRZCIŃSKI, JÓZEF PASZULA, SEBASTIAN GRYS

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

Streszczenie. W pracy zbadano parametry detonacji i zdolności miotające mieszanin zagęszczonego nitrometanu z proszkiem stopu glinu i magnezu Al_3Mg_4 . Zmierzone prędkość detonacji ładunków oraz wykonano test cylindryczny dla zagęszczonego nitrometanu oraz mieszanin zawierających 15, 30, 45 i 60% Al_3Mg_4 . Ponadto badano charakterystyki powietrznych fal podmuchowych generowanych przez ładunki testowanych mieszanin wybuchowych. Wykonano również obliczenia gazodynamiczne i termochemiczne w celu oszacowania stopnia przereagowania metali w strefie reakcji chemicznych w fali detonacyjnej i w czasie rozprężania się produktów detonacji ograniczonych rurką miedzianą.

Słowa kluczowe: metalizowane materiały wybuchowe, detonacja, zdolności miotające, fale podmuchowe

Symbole UKD: 662.1/4

1. Wstęp

Dodatek stałych cząstek do materiału wybuchowego w postaci ciekłej zmienia mechanizm propagacji fali detonacyjnej w materiale z homogenicznego na heterogeniczny [1]. W przypadku tego drugiego podstawową rolę w procesie propagacji odgrywają tzw. gorące punkty, będące wynikiem oddziaływania fali uderzeniowej na niejednorodny ośrodek. Wpływ dodatku stałych cząstek na detonację ciekłego nitrometanu (NM) był przedmiotem wielu badań [2-10]. Eksperymenty przeprowadzone przez Kato i Brocheta [2] dotyczyły mieszanin nitrometanu z małą zawartością cząstek aluminium (do 15% masy). Uzyskane wyniki pozwoliły udowodnić tezę, że dodatek małej ilości stałych cząstek drastycznie zmienia właściwości

detonacyjne nitrometanu, gdyż tzw. gorące punkty, których powstanie związane jest z obecnością cząstek, powodują wzrost wrażliwości i zmniejszenie średnicy krytycznej. W pracy [3] przeprowadzono systematyczne studia nad heterogenicznymi mieszaninami składającymi się z gęsto upakowanych, sferycznych, szklanych kulek o różnej średnicy zanurzonych w chemicznie uczulonym nitrometanem i wykazano wpływ wymiaru kulek na średnicę krytyczną mieszanin. Autorzy sugerują istnienie dwóch różnych reżimów propagacji detonacji, w zależności od wielkości cząstek. Dla małych cząstek, proces detonacji polega na propagacji fali poprzez stałe wtrącenia. W tym przypadku średnica ładunku maleje wraz ze zmniejszaniem wymiarów cząstek, ponieważ rośnie gęstość gorących punktów związanych z ich obecnością. Dla dużych cząstek propagacja fali detonacyjnej w skali makro jest kontrolowana propagacją lokalnych fal uderzeniowych w międzycząsteczkowych porach (wypełnionych nitrometanem) i średnica krytyczna ładunku maleje wraz ze wzrostem rozmiarów stałych cząstek, ponieważ efekty dyfrakcyjne wokół cząstek stają się mniej intensywne. W pracy [4] mierzono prędkość detonacji heterogenicznych mieszanin składających się z gęsto upakowanego aluminium zanurzonego w nitrometanem. Nie zaobserwowano istotnej reakcji Al w strefie reakcji chemicznych w nitrometanem nawet dla aluminium o wymiarach nanometrów. Do podobnego wniosku doszli autorzy pracy [5], którzy badali prędkość detonacji i wrażliwość na falę uderzeniową nitrometanu zawierającego 40% stałych dodatków. Jednym z nich był proszek aluminium o rozmiarach mniejszych od 150 μm .

Milne [6] oraz Ripley i inni [7] badali strukturę fali detonacyjnej w nitrometanem z gęsto upakowanymi cząstkami wykorzystując dwu- i trójwymiarowe symulacje w mezoskali. Milne [6] sugeruje, że złożone oddziaływanie fal w przepływie za czołem fali uderzeniowej może być charakteryzowane przez dwa punkty soniczne. Pierwszy to standardowy punkt Chapmana-Jougueta, drugi punkt odpowiada prędkości dźwięku w stałych cząstkach. Autor pracy wykazał, że prędkość detonacji w takim heterogenicznym ośrodku zależy od prędkości dźwięku w materiale cząstek. Autorzy prac [6-7] udowodnili również, że stacjonarna strefa za czołem fali uderzeniowej w niejednorodnej mieszaninie cząstki stałe-nitrometan jest znacznie szersza niż strefa reakcji chemicznych w nitrometanem i że szerokość tej strefy liniowo zależy od wielkości cząstek.

Kato i inni [8] mierzyli prędkość detonacji i ciśnienie mieszanin składających się z nitrometanu i gęsto upakowanych (ok. 70% masy) cząstek aluminium o czterech różnych wielkościach. Dla porównania zmierzono prędkość detonacji mieszaniny nitrometanu i cząstek miedzi o dwóch rozdrobnieniach. Wyniki pomiaru prędkości detonacji pokazują, że średnica krytyczna ładunku dla mieszanin NM/Al i NM/Cu zawierających cząstki mniejsze niż 108 μm jest dużo mniejsza niż dla czystego nitrometanu oraz że średnica krytyczna rośnie wraz ze wzrostem wielkości cząstek dodatku. Prędkość detonacji mieszanin NM/Al jest około 2000 m/s większa niż mieszanin NM/Cu. Wynik ten sugeruje, że główną rolę w ustalaniu się prędkości

detonacji w mieszaninie odgrywa prędkość dźwięku materiału dodatku. Profile ciśnienia w strefie reakcji chemicznych oraz w rozrzedzeniowej fali Taylora w mieszaninach NM/Al mierzono za pomocą czujników ciśnienia PVDF. Zaobserwowane rozszerzenie strefy reakcji chemicznych związane jest z oddziaływaniem pomiędzy detonacją nitrometanu w obszarach między cząstkami oraz falami uderzeniowymi propagującymi się w cząstkach aluminium [6]. Na profilach uzyskanych dla mieszaniny zawierającej cząstki aluminium o średnicy 8 μm stwierdzono wzrost ciśnienia spowodowany reakcją aluminium po ok. 2,5 μs za czołem fali detonacyjnej. Autorzy pracy [8] sugerują, że różnice między zmierzonymi i obliczonymi charakterystykami detonacyjnymi świadczą o braku równowagi termicznej i mechanicznej pomiędzy produktami detonacji NM i cząstkami Al.

Szybkość spalania cząstek aluminium w produktach detonacji nitrometanu próbowano oszacować w pracach [9] i [10], wykorzystując wyniki testu cylindrycznego. Baudin i inni [9] badali mieszaniny zagęszczonego nitrometanu (3% PMMA) z proszkiem Al (5 μm) i nanoproszkami Al. Udział masowy proszków w mieszaninach wynosił 20 lub 40%. Dodatek 20% aluminium zwiększa zdolność miotającą mieszaniny w porównaniu ze zdolnością miotającą zagęszczonego nitrometanu już od początku procesu napędzania rurki miedzianej. W przypadku mieszaniny zawierającej 40% Al prędkość rurki miotanej produktami detonacji mieszaniny jest większa od prędkości rurki napędzanej produktami zagęszczonego nitrometanu po 22 μs . Milne i inni [10] wykonali standardowy test cylindryczny dla mieszanin nitrometanu i 20, 30, 40, 50 i 60% proszku aluminium o wielkości cząstek 10,5 μm . Porównując zmierzone i obliczone profile i prędkości miotanej rurki miedzianej, autorzy stwierdzili, że czas spalania cząstek aluminium o średnicy 10,5 μm jest dłuższy niż czas pomiaru procesu miotania rurki w standardowym teście cylindrycznym (do 50 μs) i jego wpływ na prędkość rurki jest niewielki.

Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że zjawiska towarzyszące detonacji mieszanin nitrometanu z cząstkami metali (głównie aluminium) były w ostatnich latach intensywnie badane. Zazwyczaj były to badania dotyczące określonego zjawiska, np. procesu detonacji lub miotania otoczek metalowych. W niniejszej pracy podjęto próbę wykonania kompleksowych badań detonacji mieszanin nitrometanu z metalizowanym dodatkiem dla szerokiego przedziału jego zawartości oraz skutków tej detonacji (prędkość miotanych otoczek miedzianych, parametry fal podmuchowych). Do badań wybrano stop glinu i magnezu, sądząc, że bardzo reaktywny magnez może szybciej reagować z produktami reakcji, zaś spalanie glinu dostarczy więcej ciepła do gazowych produktów w późniejszej fazie ich rozlotu.

Badania rozpoczęto od pomiaru parametrów detonacji i zdolności miotających mieszanin ciekłego nitrometanu z proszkiem stopu glinu i magnezu. Zmierzone prędkość detonacji oraz wykonano test cylindryczny dla zagęszczonego nitrometanu i mieszanin zawierających 15, 30, 45 i 60% Al_3Mg_4 . Zarejestrowano profile powietrznych fal podmuchowych generowanych przez ładunki badanych mieszanin

wybuchowych. Zbadano wpływ zawartości stopu na prędkość detonacji, zdolności miotające produktów detonacji i charakterystyki fal podmuchowych. Wykonano również obliczenia gazodynamiczne i termochemiczne w celu oszacowania stopnia przereagowania glinu i magnezu w fali detonacyjnej i w trakcie rozprężania się produktów detonacji zamkniętych w rurce miedzianej.

2. Prędkość detonacji

W badaniach zastosowano komercyjny nitrometan oraz proszek stopu glinu i aluminium (PAM) wyprodukowany przez Benda-Lutz Skawina (produkt nr SW/302-a, stosunek masowy Al/Mg ~50/50, średnia wielkość cząstek 63 μm , pozostałość na sicie 75 μm — maks. 10%). W celu uzyskania stabilnej zawiesiny zawierającej cząstkę proszku do 60% masy mieszaniny, zwiększono lepkość nitrometanu, dodając do niego PMMA (4% masy). Kompozycję wybuchową przygotowano, mieszając proszek PAM z jednorodną, lepką mieszaniną NM/PMMA przynajmniej 2 godziny przed wykonaniem strzału. Gęstość mieszanin w temperaturze 293 K mierzono metodą piknometryczną.

Ładunki badanych kompozycji do pomiaru prędkości detonacji przygotowano, wlewając 200 g mieszaniny do rur winidurowych o średnicy wewnętrznej 37 mm i grubości ścianki 1,5 mm. Prędkość detonacji mierzono z wykorzystaniem czujników zwarciovych, umieszczanych w otworach rury winidurowej. Cztery bazy pomiarowe o długości 40 mm umieszczone były pod koniec ładunku. Do zainicjowania detonacji stosowano detonatory z heksogenu flegmatyzowanego o masie 10 g i średnicy 20 mm. Dokładność umieszczania czujników w otworach wynosiła ok. 0,7 mm, natomiast dokładność pomiaru czasu ich pokonania przez falę detonacyjną wynosiła 10 ns. W związku z tym maksymalny błąd metody pomiaru prędkości detonacji nie przekraczał 2%.

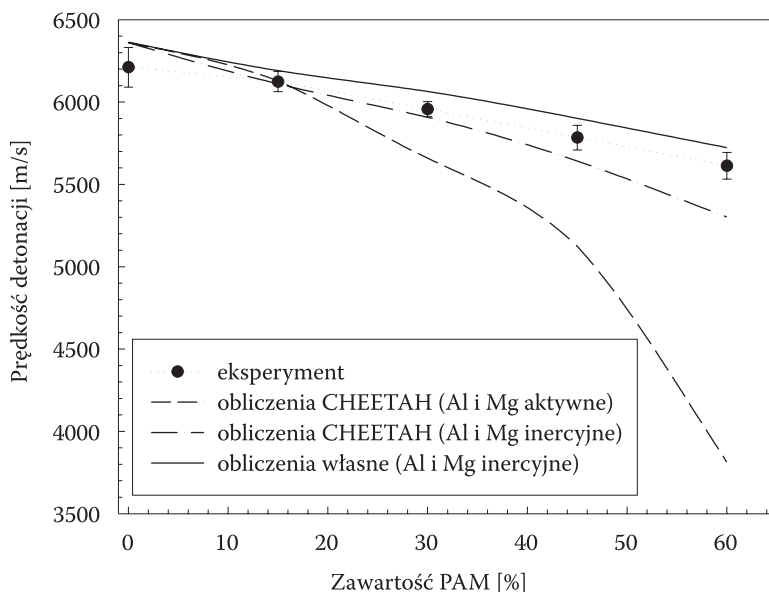
Wykonano po trzy strzały dla każdej mieszaniny wybuchowej. Wyniki pomiarów prędkości detonacji (średnia wartość prędkości i odchylenie standardowe) zebrano w tabeli 1.

TABELA 1

Gęstość i prędkość detonacji mieszanin zagęszczonego nitrometanu z PAM

Mieszanina wybuchowa	Gęstość [g/cm^3]	Prędkość detonacji [m/s]
NM/PMMA 96/4	1,09	6211 \pm 121
NM/PMMA/PAM 81,6/3,4/15	1,16	6124 \pm 61
NM/PMMA/PAM 67,2/2,8/30	1,26	5957 \pm 46
NM/PMMA/PAM 52,8/2,2/45	1,37	5784 \pm 75
NM/PMMA/PAM 38,4/1,6/60	1,50	5613 \pm 75

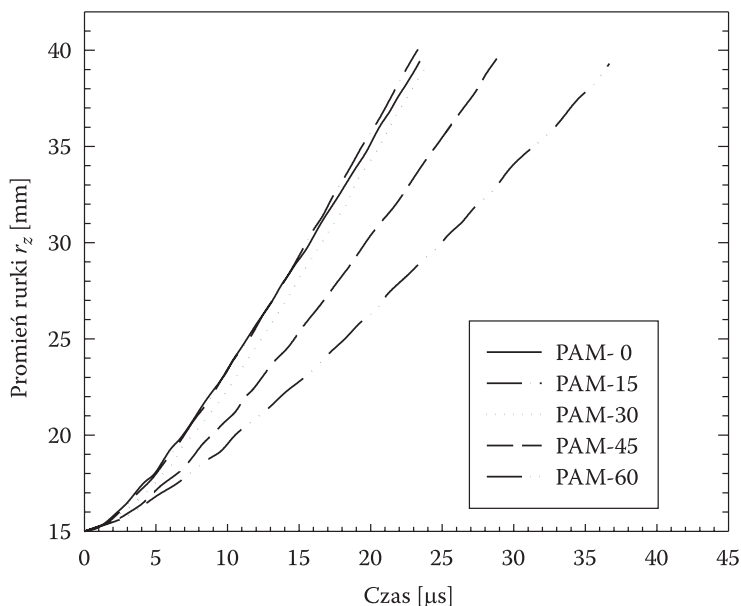
Prędkość detonacji obliczono, wykorzystując kod do obliczeń termochemicznych CHEETAH [11] z zestawem parametrów równania stanu BKW podanych w pracy [12] (zestaw BKWS). W obliczeniach zakładano aktywność chemiczną Al i Mg w strefie reakcji chemicznych fali detonacyjnej lub brak tej aktywności. Wyniki obliczeń porównano z doświadczalnymi wartościami prędkości detonacji na rysunku 1. Dla dużych zawartości cząstek PAM w nitrometanie (powyżej 30%) prędkości zmierzone są większe od prędkości teoretycznych. Należy jednak pamiętać, że w obliczeniach zakłada się pełną równowagę termiczną i mechaniczną w produktach reakcji. Ze względu na krótki czas przebywania cząstek dodatku w strefie reakcji chemicznych założenie takie nie jest w pełni uzasadnione. Dlatego też wykonano obliczenia metodą zaproponowaną w pracy [13]. W przyjętym tam modelu gazodynamicznym dla procesu detonacji zakłada się równowagę mechaniczną w produktach reakcji oraz brak wymiany ciepła pomiędzy gazowymi produktami i inercyjnym składnikiem stałym. Do opisu właściwości fizycznych produktów detonacji zagęszczonego nitrometanu zastosowano równanie stanu JWL wyznaczone za pomocą kodu CHEETAH. Właściwości fizyczne cząstek PAM opisano równaniem stanu Gruneisena [14]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 1. Obliczone prędkości detonacji są tylko nieznacznie większe od eksperymentalnych. Oznacza to, że założenia o braku wymiany ciepła pomiędzy cząstkami PAM i gazowymi produktami detonacji nitrometanu oraz o inercyjności dodatku w strefie reakcji chemicznych są uzasadnione.



Rys. 1. Porównanie eksperymentalnych i obliczonych prędkości detonacji mieszanin nitrometanu z PAM

3. Zdolności miotające

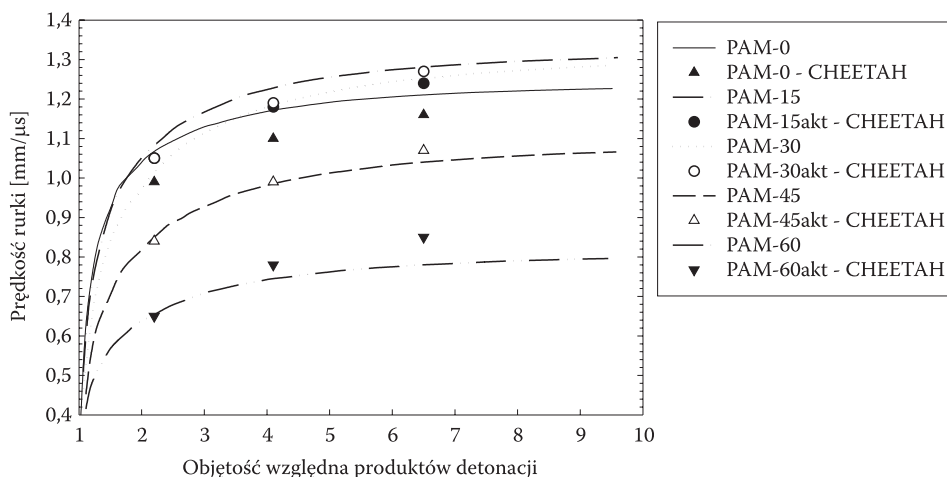
Do określenia zdolności miotających badanych kompozycji wybuchowych wykorzystano wyniki tzw. testu cylindrycznego, polegającego na rejestracji procesu miotania rurek miedzianych produktami detonacji badanego materiału wybuchowego. Do rejestracji profilu napędzanej rurki zastosowano technikę rentgenograficzną. Mieszanki wybuchowe elaborowano do rurek miedzianych o promieniu wewnętrznym $r_w = 12,5$ mm i promieniu zewnętrznym $r_z = 15$ mm. Długość rur wynosiła $l = 300$ mm. Wynikiem testu cylindrycznego są zdjęcia rentgenowskie miotanych rurek oraz mierzone równocześnie prędkości detonacji. Na podstawie zdjęć można otrzymać zależność promienia zewnętrznej ścianki rurki od współrzędnej osiowej. Zgodnie z metodyką opisaną szczegółowo w pracy [15], dane z testu cylindrycznego umożliwiły wyznaczenie w pierwszej kolejności zależności promienia zewnętrznej ścianki rurki od czasu (rys. 2), a następnie prędkości rurki od czasu poprzez zróżniczkowanie tej zależności. Na rysunkach 3-4 przedstawiono zależność prędkości ścianki od objętości względnej produktów detonacji w celu porównania ich z prędkościami obliczonymi za pomocą kodu CHEETAH (oznaczone symbolami). Te ostatnie określono dla trzech wartości objętości względnych produktów detonacji. Dane z obliczeń termochemicznych



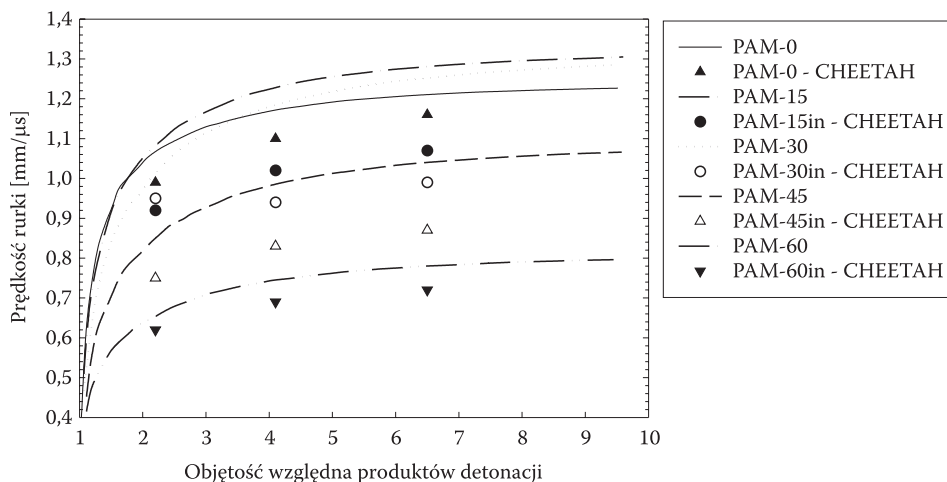
Rys. 2. Zależność położenia zewnętrznej ścianki rurki miedzianej (r_z) od czasu dla mieszanin nitrometanu z PAM

na rysunku 3 uzyskano, zakładając równowagę chemiczną wszystkich składników produktów, zaś punkty na rysunku 4 otrzymano przy założeniu, że glin i magnez są inercyjne chemicznie.

Z danych pokazanych na rysunkach 3 i 4 wynika, że lepszą zgodność prędkości rurki miedzianej obliczonej za pomocą kodu termochemicznego z prędkością wyznaczoną z testu cylindrycznego uzyskuje się przy założeniu aktywności



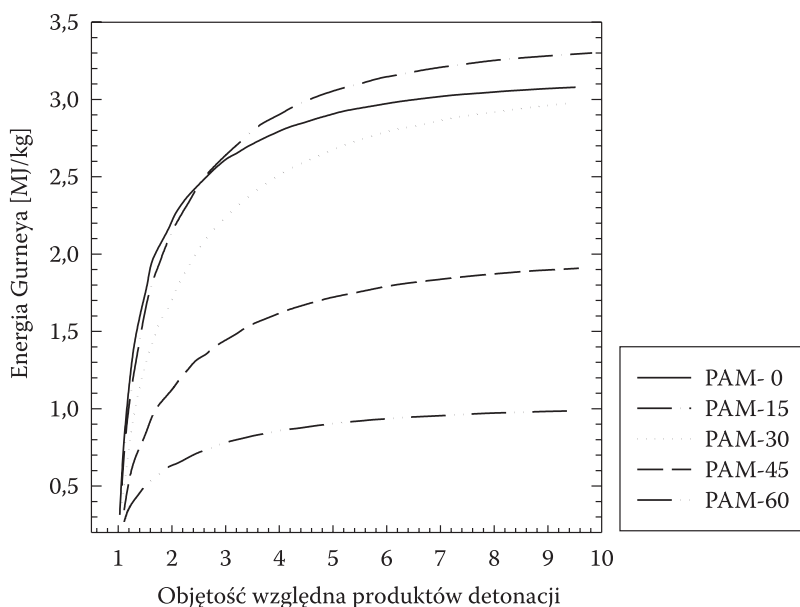
Rys. 3. Zależność prędkości rurki miedzianej od objętości względnej produktów detonacji mieszanin nitrometanu z PAM (obliczenia termochemiczne wykonano przy założeniu reaktywności glinu i magnezu)



Rys. 4. Zależność prędkości rurki miedzianej od objętości względnej produktów detonacji (obliczenia termochemiczne wykonano przy założeniu inercyjności chemicznej glinu i magnezu)

chemicznej glinu i magnezu. Oznacza to, że proszek PAM reaguje w znacznym stopniu z gazowymi produktami detonacji nitrometanu w czasie napędzania rurki do objętości 9-10 razy większej od objętości początkowej (przy takim stopniu rozpęczania zachowana jest jeszcze ciągłość materiału rurki). Czas napędzania rurki waha się od 20 do blisko 40 μs w zależności od zawartości PAM w mieszaninie wybuchowej (rys. 2). Zastosowany proszek PAM (średni rozmiar cząstek 63 μm) jest więc bardziej reaktywny niż proszek aluminium o średnicy cząstek 10,5 μm , gdyż ten drugi nie reagował z produktami detonacji nitrometanu w czasie 50 μs [10].

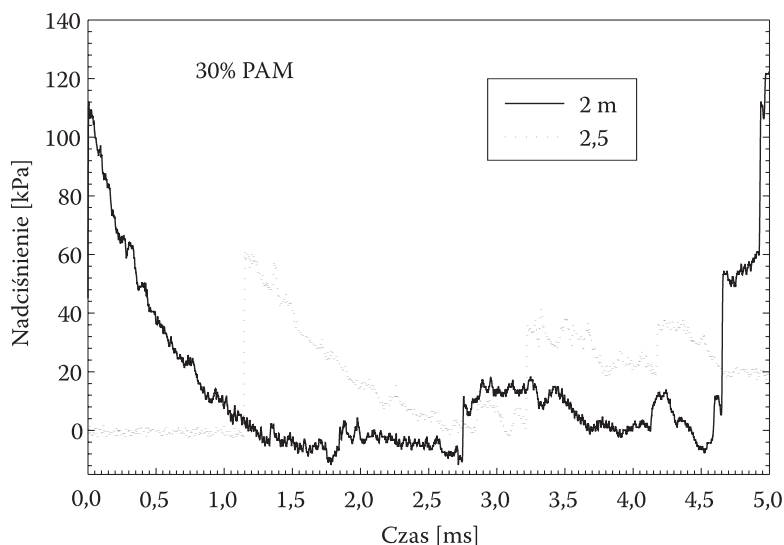
Zdolności miotające produktów detonacji materiału wybuchowego charakteryzuje się za pomocą tzw. energii Gurneya, będącej sumą energii kinetycznej miotanej rurki i podążających za nią produktów detonacji, odniesioną do jednostki masy materiału wybuchowego. Energię Gurneya można wyznaczyć, wykorzystując wyniki testu cylindrycznego [15]. Na rysunku 5 pokazano zależność tak zdefiniowanej energii Gurneya od objętości względnej ekspandujących produktów detonacji. Zdolność miotająca produktów detonacji mieszanin zawierających 15 i 30% PAM jest porównywalna ze zdolnością miotającą nitrometanu zagęszczonego PMMA (w przypadku mieszaniny z 15% PAM jest nawet większa). Dopiero dodanie 45% stopu glinu i magnezu zmniejsza energię Gurneya o ok. 38% w stosunku do nitrometanu.



Rys. 5. Zależność energii Gurneya od objętości względnej produktów detonacji badanych mieszanin wybuchowych

4. Charakterystyki fal podmuchowych

Przebiegi ciśnienia w falach podmuchowych generowanych wybuchem ładunków badanych mieszanin wybuchowych rejestrowano w zamkniętym betonowym bunkrze o objętości ok. 40 m^3 . W testach ładunek materiału wybuchowego o masie ok. 200 g umieszczano w cylindrycznej rurze winidurowej o średnicy wewnętrznej 46 mm i grubości ścianki 2 mm. Do zainicjowania procesu detonacji lub wybuchu zastosowano detonator heksogenowy o masie 5 g i zapalnik elektryczny typu Erg. Ładunek wieszano na wysokości 1,5 m nad powierzchnią ziemi. Dwa czujniki piezoelektryczne umieszczano w odległości 2 i 2,5 m od ładunku w sposób zapewniający pomiar parametrów fali padającej, tzn. powierzchnia czynna czujnika była równoległa do kierunku propagacji fali. Dla każdej mieszaniny wybuchowej wykonano trzy testy. Przykładowe przebiegi nadciśnienia pokazano na rysunku 6.



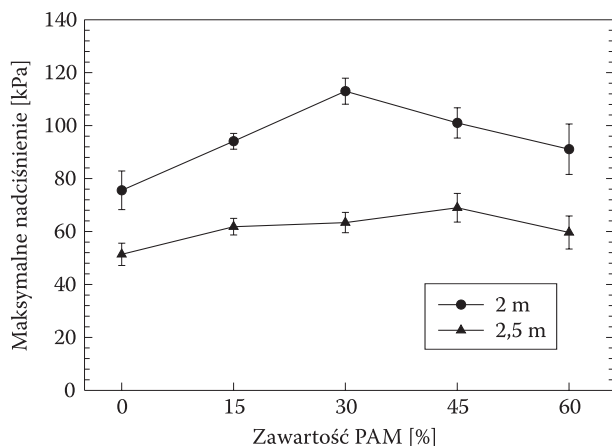
Rys. 6. Przebiegi ciśnienia w fali podmuchowej generowanej detonacją ładunku zagęszczonego nitrometanu z dodatkiem 30% PAM

Uzyskane profile są typowymi przebiegami nadciśnienia w fali podmuchowej generowanej wybuchem ładunku w obiekcie zamkniętym. Ponieważ czujniki umieszczone były w pewnej odległości od ściany bunkra, profile fali padającej są praktycznie niezaburzone. Jednakże po pewnym czasie widoczne są na wykresach również fale odbite. Do wyznaczenia charakterystyk fal podmuchowych wykorzystywano jedynie profile niezaburzonych fal padających.

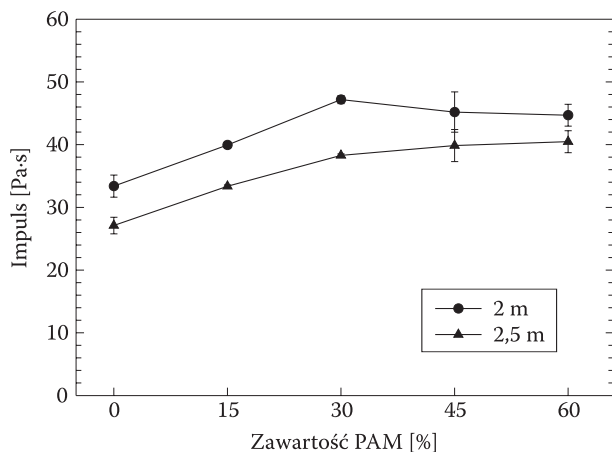
Profil ciśnienia w fali podmuchowej charakteryzuje maksymalna wartość nadciśnienia na czole fali oraz impuls fali zdefiniowany za pomocą wzoru:

$$I_s = \int_0^{\tau^+} \Delta P(t) dt, \quad (1)$$

gdzie $\Delta P(t)$ — przebieg ciśnienia w danej odległości od ładunku, τ^+ — czas trwania fazy dodatniej nadciśnienia. Uśrednione charakterystyki padających fal podmuchowych dla mieszanin zagęszczonego nitrometanu i stopu glinu z aluminium pokazano na rysunkach 7-8. Na wykresach zaznaczono również wartości odchylenia standardowego.



Rys. 7. Zależność maksymalnej wartości nadciśnienia w fali podmuchowej od zawartości PAM



Rys. 8. Zależność impulsu ciśnienia w fali podmuchowej od zawartości PAM

Z analizy danych pokazanych na rysunkach 7-8 wynika, że zarówno maksymalne nadciśnienie, jak i impuls zmierzone dla mieszanin nitrometanu z dodatkiem PAM są większe niż w przypadku nitrometanu bez dodatku. W tabeli 2 pokazano przyrost procentowy tych parametrów.

TABELA 2

Przyrost wartości parametrów fal podmuchowych generowanych przez mieszaniny zawierające PAM odniesiony do parametrów fali z ładunku zagęszczonego nitrometanu (x — odległość od ładunku)

Zawartość PAM [%]	Przyrost maksymalnego nadciśnienia [%]		Przyrost impulsu [%]	
	$x = 2$ m	$x = 2,5$ m	$x = 2$ m	$x = 2,5$ m
15	25	20	20	23
30	50	23	41	41
45	34	34	35	47
60	21	16	34	49

Dobrym wskaźnikiem zdolności danego materiału wybuchowego do generowania fal podmuchowych jest tzw. energetyczny równoważnik trotylowy α_T . Liczbowo jest on równy masie trotylu (TNT) równoważnej energetycznie jednostce masy danego materiału wybuchowego. Mnożąc masę danego ładunku przez α_T określa się masę trotylu wytwarzającą falę podmuchową o tych samych charakterystykach. Oszacowane na tej podstawie wartości maksymalnego nadciśnienia i impulsu dla materiałów wybuchowych innych niż trotyl mogą różnić się znacznie od wartości eksperymentalnych. Różnice te wynikają między innymi z faktu, że nie cała energia wybuchu materiału wybuchowego przekazywana jest do powietrza. Wyniki pomiarów nadciśnienia umożliwiają obliczenie trotylowych równoważników, które lepiej charakteryzują zdolność materiału wybuchowego do generowania fal podmuchowych. Jeśli założymy, że w badanym przedziale masy ładunku maksymalne nadciśnienie jest liniową funkcją masy materiału wybuchowego, to równoważnik trotylowy ze względu na nadciśnienie, α_{Tp} , dla danego materiału X możemy obliczyć ze wzoru:

$$\alpha_{Tp} = \frac{(\Delta P_s)_X}{(\Delta P_s)_{TNT}}. \quad (2)$$

Maksymalne nadciśnienie ΔP_s generowane jest przez ładunki danego materiału wybuchowego i trotylu o tej samej masie i mierzone w tej samej odległości od

miejsca detonacji. W podobny sposób można oszacować równoważnik trotylowy ze względu na impuls:

$$\alpha_{\text{TI}} = \frac{(I_s)_X}{(I_s)_{\text{TNT}}}. \quad (3)$$

Do oszacowania tak zdefiniowanych równoważników trotylowych dla mieszanin nitrometanu z PAM wykorzystano wyniki pomiaru charakterystyk fal podmuchowych generowanych przez ładunki trotylu prasowanego o masie 200 g zmierzone w pracy [16]. Podane tam maksymalne wartości nadciśnienia wynosiły 61,8 i 43,4 kPa, zaś impulsu 28,7 i 23,9 Pa·s odpowiednio na odległościach 2 i 2,5 m od ładunku. Uśrednione wartości równoważników trotylowych dla mieszanin nitrometanu z PAM, określonych ze wzorów (2)-(3), zebrano w tabeli 3. Dla porównania, energetyczny równoważnik trotylowy dla czystego nitrometanu α_T wynosi 1,229 [17].

TABELA 3

Równoważniki trotylowe dla badanych kompozycji nitrometanu z PAM

Zawartość PAM [%]	α_{Tp}	α_{TI}
0	1,20	1,15
15	1,47	1,39
30	1,65	1,62
45	1,61	1,62
60	1,42	1,63

Z analizy danych zawartych w tabel 1 i 2 wynika, że największy wzrost charakterystyk fal podmuchowych obserwuje się dla zawartości 30-45% PAM w zagęszczonym nitrometanie.

5. Podsumowanie

Analiza uzyskanych wyników badania parametrów detonacji, zdolności miotających i charakterystyk fal podmuchowych dla mieszanin nitrometanu z cząstkami stopu glinu i magnezu pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Prędkość detonacji mieszanin zawierających PAM jest mniejsza od prędkości zagęszczonego nitrometanu. Porównanie prędkości eksperymentalnych z obliczonymi jednoznacznie wskazuje na inercyjne zachowanie się dodatku oraz

nierównowagę termiczną między cząstkami dodatku i gazowymi produktami detonacji w strefie reakcji chemicznych. Wynik ten potwierdza wnioski prezentowane w literaturze dla mieszanin nitrometanu z cząstkami aluminium lub magnezu.

2. Zdolności miotające mieszanin z 15 i 30% PAM są porównywalne, a nawet większe niż nitrometanu bez metalicznego dodatku. Z porównania zmierzonych i obliczonych prędkości rurki wynika, że cząstki PAM w dużym stopniu reagują z produktami detonacji w przypadku wszystkich zawartości stopu w mieszaninie. Oznacza to, że częściowe lub całkowite spalanie glinu i magnezu ma miejsce w trakcie napędzania rurki, które trwa od 20 do 40 μ s. Ponieważ z badań literaturowych wynika, że proszek aluminium nie reaguje z produktami detonacji nitrometanu w czasie do 50 μ s, wynik ten sugeruje, że obecność magnezu przyspiesza reakcje spalania cząstek stopu PAM.
3. Maksymalne nadciśnienie i impuls fali podmuchowej generowanej przez mieszaninę zagęszczonego nitrometanu z dodatkiem PAM są większe niż w przypadku nitrometanu bez dodatku. Największy wzrost parametrów fal podmuchowych obserwuje się dla zawartości 30-45% stopu glinu i magnezu. Wyniki pomiarów charakterystyk fal podmuchowych jednoznacznie świadczą o spalaniu cząstek stopu PAM również po wybuchu swobodnego ładunku mieszaniny, tj. ładunku bez metalowej otoczki.

Badania wykonano przy wsparciu finansowym Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego nr T00C 001 31/3964, realizowanego w latach 2006-2009.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.11.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] A. W. CAMPBELL et al., *Shock initiation of solid explosives*, Phys. Fluids, 4, 4, 1961, 511.
- [2] Y. KATO, C. BROCHET, *Cellular structure of detonation in nitromethane containing aluminium particles*, 6th Symposium (International) on Detonation, Coronado, CA, 1976.
- [3] J. J. LEE et al., *Propagation of nitromethane detonations in porous media*, Shock Waves, 5, 1995, 115.
- [4] P. J. HASKINS et al., *The effect of additives on the detonation characteristics of a liquid explosive*, 11th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Atlanta, GA, 2001.
- [5] S. CUDZIŁO, W. A. TRZCIŃSKI, *Influence of some additives on the shock sensitivity of nitromethane*, J. Tech. Phys., 49, 2, 1999, 223.
- [6] A. M. MILNE, *Detonation in heterogeneous mixtures of liquids and particles*, Shock Waves, 10, 2000, 351.
- [7] R. C. RIPLEY et al., *Detonation interaction with metal particles in explosives*, 13th International Detonation Symposium, Norfolk, VA, 2006.

- [8] Y. KATO et al., *Detonation characteristics of packed beds of aluminium saturated with nitromethane*, 13th International Detonation Symposium, Norfolk, VA, 2006.
- [9] G. BAUDIN et al., *Combustion of nanophase aluminium in the detonation products of nitromethane*, 11th International Detonation Symposium, Snowmass, CO, 1998.
- [10] M. MILNE et al., *The burning rate of aluminium particles in nitromethane in cylinder tests*, 12th International Detonation Symposium, San Diego, CA, 2002.
- [11] L. E. FRIED, *CHEETAH 1.39 User's Manual*, UCRL-MA-117541 Rev. 3, Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [12] 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.
- [13] R. TRĘBIŃSKI, W. TRZCIŃSKI, E. WŁODARCZYK, *A method for determining detonation adiabates of explosives with admixture of inert additives*, J. Tech. Phys. 31, 1, 1990, 35.
- [14] R. KINSLOW, *High-velocity impact phenomena*, Academic Press, New York & London, 1970.
- [15] W. A. TRZCIŃSKI, *Application of a cylinder test for determining energetic characteristic of explosives*, J. Tech. Phys., 42, 2, 2001, 165.
- [16] R. STECKIEWICZ, W. A. TRZCIŃSKI, *Characteristics of blast waves produced by improvised explosive devises* (in Polish), Biul. WAT, in press.
- [17] S. CUDZIŁO et al., *Military explosives*, Częstochowa, 2000.

W. A. TRZCIŃSKI, J. PASZULA, S. GRYS

Investigation of detonation parameters and blast wave characteristics for mixtures of nitromethane with particles of aluminium-magnesium alloy

Abstract. In this work, the investigation of detonation parameters and blast wave characteristics of the mixtures of nitromethane and particles of an aluminium and magnesium (Al_3Mg_4) alloy was carried out. The mixtures of gelled nitromethane, containing 15, 30, 45 and 60 wt. % Al_3Mg_4 , were tested. Measurements of detonation velocity and Guerney energy were performed. Parameters of blast waves produced by charges of the investigated explosives were measured. Thermochemical and gasdynamical calculations were also performed. A degree of combustion of the metallic addition with the gaseous products during detonation and expansion is discussed.

Keywords: explosives with metallic additives, detonation, ballistic capability, blast waves

Universal Decimal Classification: 662.1/.4