



Badanie charakterystyk fal podmuchowych generowanych przez ładunki warstwowe

KATARZYNA GAŚSIOR, WALDEMAR A. TRZCIŃSKI

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

Streszczenie. W pracy zbadano wybuch cylindrycznych, warstwowych ładunków heksogen flegmatyzowany — mieszanina azotanu amonu z proszkiem aluminium. Zastosowano technikę rentgenografii impulsowej do rejestracji układu falowego w czasie detonacji ładunków wewnętrznych. Przebiegi ciśnienia w fali podmuchowej i czas świecenia obłoku produktów wybuchu rejestrowano w bunkrach różniących się wielkością i stopniem ich otwarcia (stosunkiem powierzchni otworów do całkowitej powierzchni bunkra). Porównano amplitudy i impulsy nadciśnienia w fali padającej oraz impulsy całkowite nadciśnienia zarejestrowanego w określonym przedziale czasowym. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w procesie projektowania termobarycznych ładunków warstwowych.

Słowa kluczowe: termobaryczne materiały wybuchowe, materiały wybuchowe o podwyższonych zdolnościach podmuchowych, charakterystyki fal podmuchowych

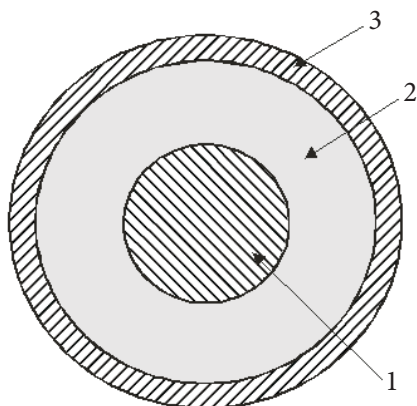
Symbole UKD: 662.1/4

1. Wstęp

Materiały wybuchowe termobaryczne i o podwyższonej zdolności podmuchowej są to najczęściej klasyczne materiały wybuchowe wzbogacone w paliwo, którego spalanie w tlenie z powietrza wzmacnia charakterystyki fal podmuchowych. Zdolność do podwyższenia parametrów podmuchowych jest w pierwszej kolejności osiągana przez dodanie do kompozycji wybuchowej proszków metali, takich jak magnez czy aluminium. Oddzielną grupę materiałów o podwyższonych parametrach podmuchowych stanowią kompozytowe i warstwowe materiały wybuchowe. Materiały kompozytowe składają się z wybuchowej osnowy i dużych,

makroskopowych wtrąceń niewybuchowych, zaś w warstwowym materiałach składniki te występują w postaci cylindrycznych warstw.

W patentach [1-2] zastrzeżeniem patentowym objęto metalizowane kompozycje zawierające lepiszcze, reaktywny metal i utleniacz oraz opcjonalnie plastyfikator i katalizator. Opatentowano również ładunki materiału wybuchowego paliwo stałe-powietrze (SFAE — *Solid Fuel-Air Explosive*) o konstrukcji pierścieniowej. Typowy ładunek składa się z cylindrycznej warstwy (powłoki) zbudowanej ze SFAE otaczającej cylindryczny ładunek kruszącego materiału wybuchowego (rys. 1). Ładunek wybuchowy SFAE może składać się również z mieszaniny reaktywnego metalu lub metalizowanej kompozycji z materiałem wybuchowym.



Rys. 1. Konstrukcja cylindrycznego ładunku materiału wybuchowego paliwo stałe-powietrze (SFAE):
1 — kruszący materiał wybuchowy; 2 — metalizowana kompozycja; 3 — metalowa obudowa

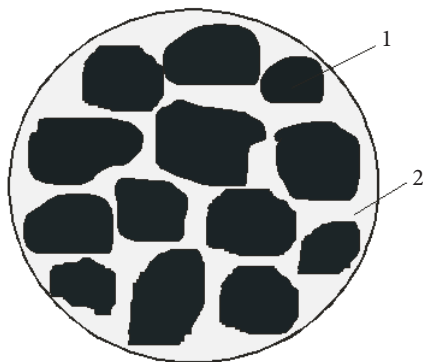
Metalizowana kompozycja może być wytwarzana na dwa sposoby. W pierwszym z nich proszek metalu pokrywany jest polimerem i prasowany. Tak wytworzona kompozycja może być stosowana w głowicach bojowych razem z cylindrycznym ładunkiem materiału wybuchowego typu PBX zawierającego oktogen (HMX), heksogen (RDX) lub heksanitroheksaazaisowurtzitan (CL-20). Drugi rodzaj metalizowanej kompozycji wytwarza się w procesie mieszania, odlewania i utwardzania proszku metalu lub proszku metalu i utleniacza z materiałem wybuchowym w celu wytworzenia materiału typu PBX. Jedna z opatentowanych w [1] kompozycji metalizowanych może składać się z ok. 60-96% wag. proszku reaktywnego metalu, 4-10% lepiszcza i 0-36% utleniacza.

Kompozycje wybuchowe, w zależności od składu i geometrii ładunku, mogą mieć nowe właściwości wybuchowe:

- a) charakteryzują się podwyższonym efektem cieplnym wybuchu spowodowanym intensywnym spalaniem metalicznego paliwa i są zdolne do

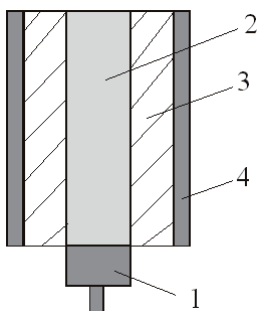
- podtrzymywania wysokiego nadciśnienia w długim czasie w zamkniętej objętości zawierającej ograniczoną ilość tlenu,
- b) są zdolne do wytworzenia względnie wysokiego nadciśnienia (30-60 psi) trwającego dłużej niż 50 ms w środowisku charakteryzującym się szybkim spadkiem temperatury, na przykład w trakcie adiabatycznego chłodzenia produktów reakcji po wybuchu swobodnym nad powierzchnią ziemi,
 - c) są materiałami wybuchowymi o podwyższonej reaktywności, podwyższonym efekcie termicznym i obniżonej temperaturze zapłonu,
 - d) są materiałami termobarycznymi, które charakteryzują się o 100% wyższą energią fali podmuchowej w porównaniu do takich kompozycji, jak tritonal (trotyl/aluminium 80/20).

Przedmiotem zastrzeżenia w patencie [3] są stałe kompozycje wybuchowe, które poddane działaniu słabej fali uderzeniowej, zamiast detonować, ulegają fragmentacji i spalają się, zaś w przypadku obciążenia silną falą uderzeniową w pełni detonują. Proponowane w patencie wysokoenergetyczne kompozycje, spełniające takie warunki, składają się z makroskopowych cząstek, które same w sobie są niewrażliwą kompozycją wybuchową, zawierającą mieszaninę mikroskopowych cząstek materiału wybuchowego, metalicznego paliwa i lepiszcza (rys. 2).



Rys. 2. Kompozycja wybuchowa: 1 — niewrażliwy składnik kompozycji; 2 — materiał bazowy (materiał wybuchowy lub lepiszcze)

Obiektem zastrzeżenia patentowego są również ładunki bojowe zawierające fragmentujące się kompozycje, w szczególności ładunki termobaryczne. Jeden z nich pokazany jest na rysunku 3. Cylindryczny ładunek materiału wybuchowego (2) generuje po detonacji słabą falę uderzeniową w warstwie cylindrycznej (3), składającej się z kompozycji wybuchowej pokazanej na rysunku 2. Słaba fala uderzeniowa zapala i rozprasza makrocząstki kompozycji (3). Rozproszone cząstki spalają się w powietrzu podgrzanym przez falę uderzeniową, na skutek czego dodatkowa energia wzmacnia propagującą się falę podmuchową.



Rys. 3. Ładunek termobaryczny: 1 — detonator; 2 — cylindryczny ładunek materiału wybuchowego; 3 — fragmentująca kompozycja wybuchowa; 4 — metalowa obudowa

Z analizy danych zawartych w patentach [1-3] wynika, że ważnym składnikiem kompozycji wybuchowych jest utleniacz. Jako przykłady utleniaczy wymienione są: nadchloran amonu, sól amonowa dinitroaminy, azotan amonu czy azotan baru. Wiadomo, że podstawowym utleniaczem w górniczych materiałach wybuchowych jest azotan amonu (saletra amonowa — SA). Brakuje danych odnośnie do jego zastosowania w termobarycznych kompozycjach wybuchowych. W pracy [4] zbadano charakterystyki fal podmuchowych generowanych przez ładunki zawierające mieszaninę SA z proszkami aluminium. Zastosowano aluminium płatkowane oraz proszek aluminiowy w ilości 10 i 40% wag. Stwierdzono, że o ile amplituda fal podmuchowych zmierzona dla ładunków SA/Al jest niższa od amplitudy fali wytwarzanej detonacją ładunku heksogenu flegmatyzowanego o tej samej masie, o tyle całkowite impulsy ciśnienia są porównywalne, a nawet większe.

W prezentowanej pracy podjęto próbę oceny możliwości użycia SA jako utleniacza w kompozytowej mieszaninie wybuchowej zastosowanej w cylindrycznym ładunku warstwowym. Zbadano proces detonacji takich ładunków, wyznaczono charakterystyki generowanych fal podmuchowych oraz czas świecenia obłoku reagujących produktów wybuchu.

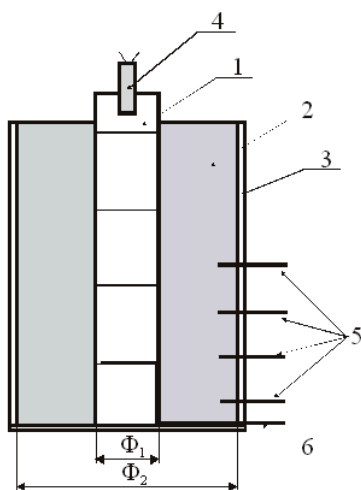
2. Eksperyment

2.1. Układy badawcze

Mieszanina azotanu amonu (NH_4NO_3) i glinu (Al) jest zrównoważona ze względu na ilość tlenu niezbędną do pełnego spalenia glinu i wodoru, jeśli stosunek wagowy SA/Al wynosi $\sim 82/18$. W przypadku gdy utlenia się tylko glin, ten stosunek w przybliżeniu wynosi 60/40. W mieszaninach termobarycznych zawartość utleniacza powinna być minimalna, a paliwo powinno w stopniu maksymalnym

spalać się w tlenie z powietrza. W celach poznawczych do badań wytypowano mieszaniny zawierające 25, 50 i 75% saetry amonowej, a więc odpowiednio mieszaninę o zdecydowanie ujemnym bilansie tlenowym oraz mieszaniny zbliżone do wyżej wymienionych mieszanin.

Schemat badanych ładunków cylindrycznych pokazano na rysunku 4. Wewnętrzny walec o średnicy $\Phi_1 = 16$ lub 25 mm składał się ze sklejonych wyprasek heksogenu flegmatyzowanego (RDX_H) o gęstości 1,67-1,68 g/cm^3 . Masa heksogenu wynosiła ok. 44 g i ok. 109 g odpowiednio dla mniejszej i większej średnicy walca. Detonację ładunku heksogenowego inicjowano za pomocą standardowego zapalnika elektrycznego. Zewnętrzny ładunek stanowiła mieszanina azotanu amonu (saetra amonowa — SA) i proszku aluminium o gęstości usypowej uzależnionej od jej składu. Dla stosunku masowego 25/75 SA/Al gęstość usypowa wynosiła 1,25 g/cm^3 , dla stosunku 50/50 1,14 g/cm^3 , a dla 75/25 1,07 g/cm^3 . Średnica zewnętrzna Φ_2 ładunku wynosiła 62 mm. Zastosowano krystaliczny azotan amonu o rozmiarze cząstek poniżej 0,8 mm oraz proszki aluminium o wymiarze cząstek poniżej 75 μm (przesiewany przez sito 200 MESH) i zawartości 99% glinu. Mieszaninę przygotowywano przez długotrwałe mieszanie. Cały ładunek znajdował się w rurce papierowej o grubości 4 mm.



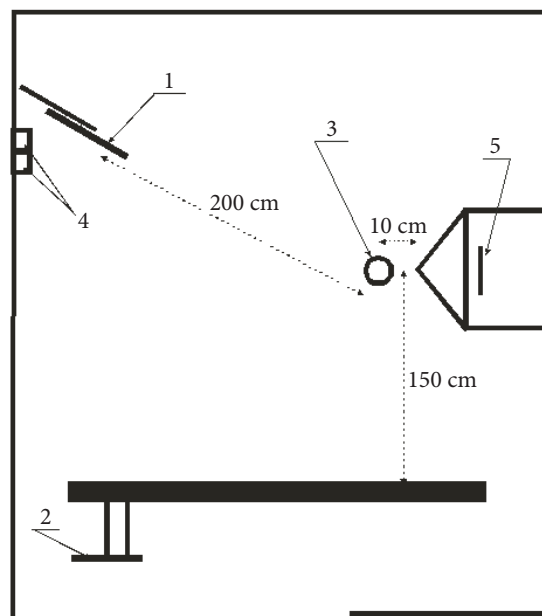
Rys. 4. Schemat badanego ładunku warstwowego: 1 — heksogen flegmatyzowany; 2 — mieszanina SA/Al; 3 — rurka papierowa o grubości 3 mm; 4 — zapalnik; 5 — czujniki do pomiaru prędkości propagacji fali; 6 — czujnik wyzwalający promiennik; Φ_1 — średnica ładunku wewnętrznego (16 lub 25 mm), Φ_2 — średnica wewnętrzna rurki papierowej

Badania prowadzono w małym i dużym bunkrze, których schematy oraz położenie ładunków i czujników pomiarowych pokazano na rysunkach 5-6. Bunkier duży ma objętość ok. 40 m^3 , posiada w górnej części 4 małe otwory każdy o powierzchni ok. 0,05 m^2 , i otwór wejściowy o powierzchni ok. 1,3 m^2 . Bunkier

mały jest obiektem częściowo otwartym o objętości ok. 25 m^3 . Górnym zamknięciem bunkra jest ażurowa osłona przeciwołamkowa (metalowe belki przesunięte względem siebie). Dwa otwory wejściowe do bunkra mają powierzchnię ok. $1,75 \text{ m}^2$ każdy. Ładunki w dużym bunkrze podwieszano na wysokości 1,8 m nad ziemią, zaś w małym na wysokości 1,3 m.

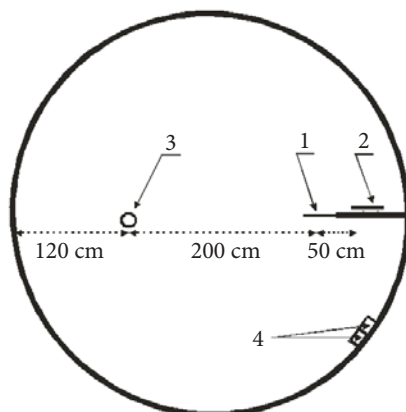
Do rejestracji frontów falowych zastosowano technikę rentgenografii impulsowej. Źródło promieniowania X wyzwalano w momencie dotarcia fali detonacyjnej do czujnika zwarciovego 6 (rys. 4). W części zewnętrznej ładunków umieszczono również czujniki zwarciovowe 5 do pomiaru prędkości propagacji frontu falowego (odległe od siebie o 20 mm).

Przebieg ciśnienia w fali podmuchowej mierzono, wykorzystując czujniki piezoelektryczne PCB. Czujniki umieszczono w taki sposób, aby rejestrowany był początkowy profil ciśnienia w fali padającej (powierzchnia czujnika była równoległa do kierunku propagacji fali). W przypadku czujnika 2 w małym bunkrze (umieszczonego za rogiem ściany) takie usytuowanie czujnika było niemożliwe, ponieważ fala odbijała się od ścian chodnika pod różnym kątem. Do pomiaru czasu świecenia obłoku produktów wybuchu zastosowano dwa rodzaje fotodiod. Sygnał z pierwszej z nich (o symbolu OPT101) był proporcjonalny do intensywności



Rys. 5. Schemat małego bunkra z elementami pomiarowymi: 1 — czujnik ciśnienia w odległości 2 m od ładunku; 2 — czujnik ciśnienia „za rogiem”; 3 — badany ładunek wybuchowy; 4 — fotodiody; 5 — płyta z kliszą

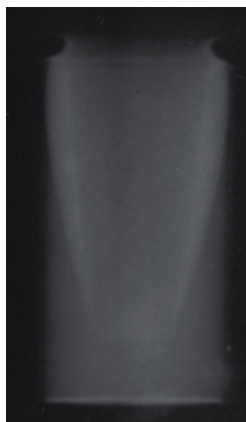
ności światła. W przypadku drugiej diody (BPDP35), w przybliżeniu stały sygnał pojawiał się, gdy natężenia światła przekraczało pewien poziom.



Rys. 6. Schemat dużego bunkra z elementami pomiarowymi: 1, 2 — czujniki ciśnienia odpowiednio w odległości 2 i 2,5 m od ładunku, 3 — badany ładunek wybuchowy, 4 — fotodiody

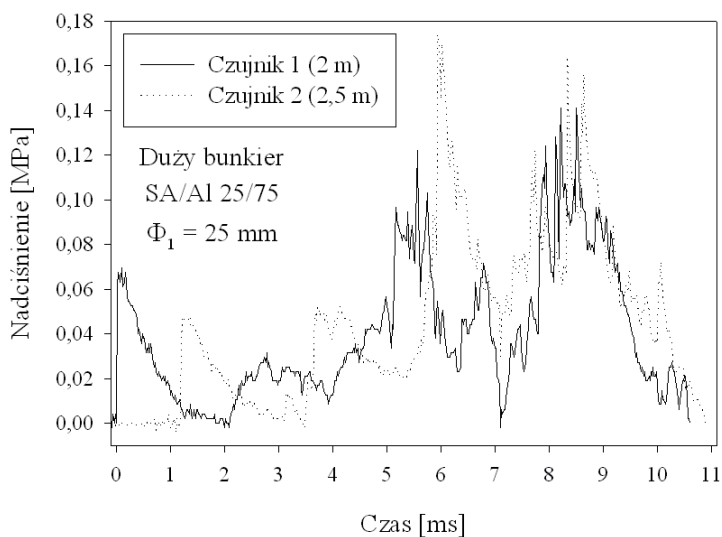
2.2. Przykładowe wyniki pomiarów

Przykładowe zdjęcie rentgenowskie wybuchającego ładunku pokazano na rysunku 7. Na zdjęciu widoczny jest front fali detonacyjnej w wewnętrznym ładunku heksogenowym, fronty fali uderzeniowej w zewnętrznym ładunku z mieszaniny SA/Al oraz granica kontaktowa między produktami detonacji heksogenu i mieszaniną.

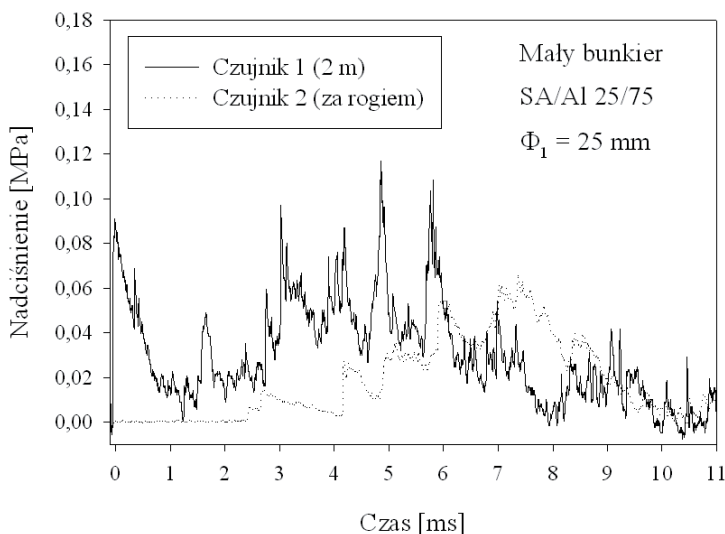


Rys. 7. Zdjęcie rentgenowskie detonującego ładunku warstwowego: RDX_{fl} ($\Phi = 25$ mm) i mieszanina SA/Al 25/75

Na rysunkach 8 i 9 pokazano przebiegi ciśnienia zarejestrowane odpowiednio w dużym i małym bunkrze. W przypadku obu czujników w dużym bunkrze oraz czujnika 1 w małym bunkrze rejestrowano praktycznie cały profil fali padającej.



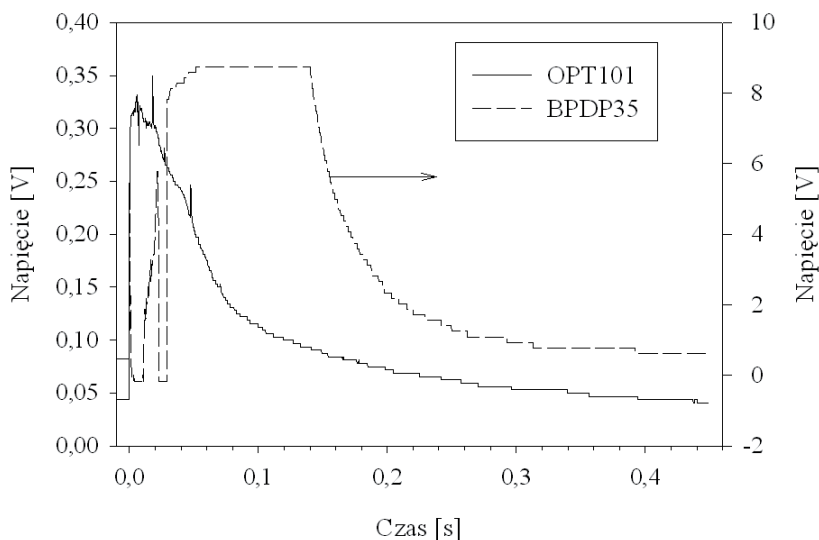
Rys. 8. Przebieg ciśnienia w fali podmuchowej generowanej w dużym bunkrze po wybuchu ładunku warstwowego: RDX_{II} ($\Phi = 25$ mm) i mieszanina SA/Al 25/75



Rys. 9. Przebieg ciśnienia w fali podmuchowej generowanej w małym bunkrze po wybuchu ładunku warstwowego: RDX_{II} ($\Phi = 25$ mm) i mieszanina SA/Al 25/75

Po czasie 1,5-2 ms profil ten zaburzały fale odbite od ścian bunkra lub od obiektów znajdującym się w nim.

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe przebiegi sygnałów z diod.

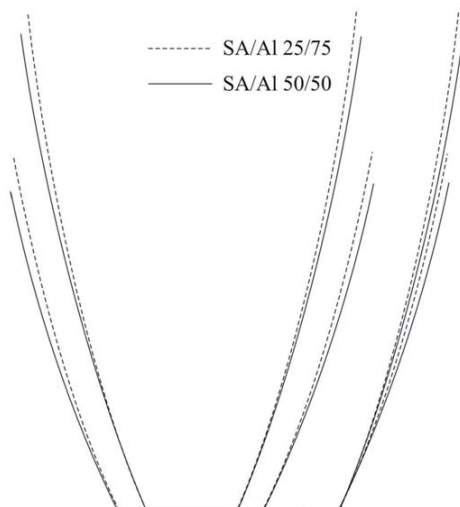


Rys. 10. Przebieg sygnałów z diod po wybuchu w małym bunkrze ładunku warstwowego: RDX_{fl} ($\Phi = 25$ mm) i mieszanina SA/Al 25/75

3. Analiza wyników

Badanie kształtu frontów falowych w warstwowym ładunkach ograniczono do mieszanin zawierających saetrę amonową i proszek aluminium w stosunku 25/75 i 50/50. Na rysunku 11 porównano kształt frontów falowych w badanych mieszaninach SA/Al zarejestrowanych za pomocą rentgenografii impulsowej dla dwóch różnych ładunków heksogenowych. Różnice między profilami dla składów 25/75 i 50/50 dla tej samej średnicy ładunku RDX_{fl} są niewielkie, co oznacza, że parametry ośrodka na froncie falowym w obu przypadkach są zbliżone. Nieznaczny wpływ na przesunięcie się krzywizny frontu miała średnica ładunku RDX_{fl} .

Wyniki prezentowane na rysunku 11 wykazują bardzo duże podobieństwo do profili frontu fali uderzeniowej zarejestrowanych w cylindrycznej warstwie wody w tzw. teście wodnym [5]. W teście tym bada się położenie frontu fali uderzeniowej generowanej w wodzie po detonacji cylindrycznego ładunku wykonane z badanego materiału wybuchowego. Kształt profilu falowego obserwowany w badanych warstwach mieszanin SA/Al jest niemal identyczny z uzyskanymi frontami uderzeniowymi w otoczce wodnej. Oznacza to, że w mieszaninach SA/Al propagują się raczej



Rys. 11. Profile frontów falowych w ładunkach warstwowych dla dwóch średnic ładunków heksogenu flegmatyzowanego (po prawej stronie fronty przesunięte w celach porównawczych)

fale uderzeniowe, a nie fale wybuchowe. Wprawdzie mieszaniny te charakteryzują się znacznie niższą prędkością detonacji niż flegmatyzowany heksogen (eksperymentalna prędkość detonacji heksogenu flegmatyzowanego wynosi ok. 8300 m/s, obliczona za pomocą kodu CHEETAH [6] teoretyczna prędkość detonacji dla mieszaniny SA/Al 50/50 o gęstości $1,07 \text{ g/cm}^3$ wynosi 5900 m/s, zaś dla mieszaniny SA/Al 25/75 o gęstości $1,14 \text{ g/cm}^3$ — 5195 m/s), to jednak w przypadku detonacji kąt nachylenia frontu fali w stosunku do osi symetrii układu byłby znacznie większy. Wniosek ten potwierdzają wyniki pomiaru prędkości detonacji mieszanin pyłu aluminiowego o różnym rozdrobnieniu z azotanem amonu przedstawione w pracy [7]. Stacjonarny proces detonacji w ładunkach cylindrycznych obserwowany był tylko do ok. 42% zawartości aluminium w mieszaninie.

Z badań wykonanych za pomocą rentgenografii impulsowej wynika ważny wniosek odnośnie do kierunku rozpraszania ładunku zewnętrznego. Duże zakrzywienie frontu falowego w mieszaninie SA/Al pozwala przyjąć tezę, że mieszanina jest rozrzucona w zasadzie w kierunku promieniowym. Fakt ten ma istotne znaczenie dla procesów mieszania cząstek aluminium i saletry amonowej z powietrzem i ich spalania.

Pomiar prędkości propagacji fali w mieszaninach realizowany za pomocą równo oddalonych od siebie trzech czujników zwarciovych, umieszczonych w ładunku na głębokości 10 mm okazał się być pomiarem wysoce niemiernym. Obliczone na podstawie wartości czasów zwierania czujników pomiarowych prędkości frontu falowego w mieszaninach SA/Al są dosyć przypadkowe i zmieniają się od 5000 do

50 000 m/s. Są co najmniej trzy przyczyny tak dużego rozrzutu wartości prędkości frontu wzdłuż ładunku. Po pierwsze, z powodu zakrzywienia (rys. 11) front falowy dociera do czujników pod różnym kątem. Drugą przyczyną jest niedoskonałość zastosowanej metody pomiarowej. Dokładne określenie głębokości umieszczenia czujników zwarciovych w ładunku było trudne do weryfikacji. Ponadto front fali przechodzący przez czujnik pod różnym kątem mógł go zwiercać na różnych głębokościach, co w niektórych testach prowadziło do zwarcia czujników pierwszego i trzeciego, a na końcu środkowego.

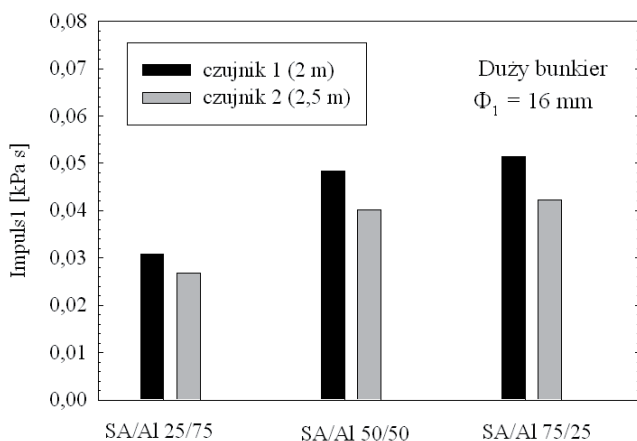
Pomiary przebiegu nadciśnienia po wybuchu ładunku umożliwiły wyznaczenie charakterystyk fal podmuchowych generowanych przez ładunki warstwowe. Tymi charakterystykami są amplituda fali padającej oraz impuls całkowity określony w sposób następujący:

$$I = \int_0^{\tau} \Delta p(t) dt, \quad (1)$$

gdzie τ jest czasem trwania fazy dodatniej padającej fali podmuchowej.

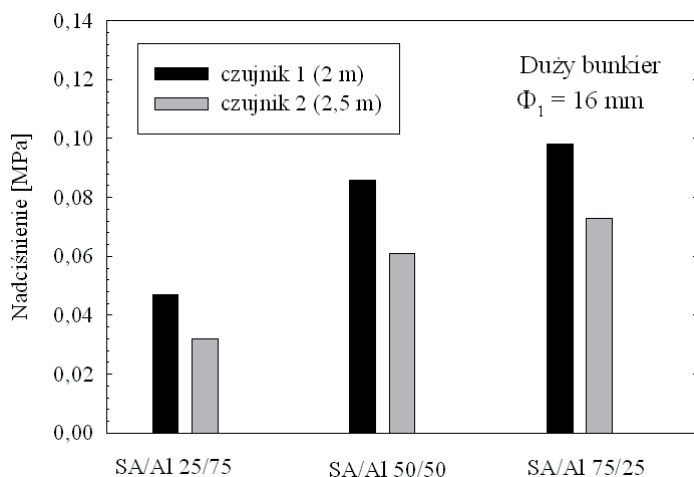
Na rysunkach 12-15 przedstawiono wartości pierwszego impulsu całkowitego oraz amplitudy padającej fali podmuchowej w dużym bunkrze. Na rysunkach 14-15 dodano dla porównania wartości tych parametrów uzyskane dla prasowanej mieszaniny heksogenu flegmatyzowanego i mieszaniny SA/Al 50/50 o masie składników odpowiadającej ładunkowi warstwowemu.

Z danych przedstawionych na rysunkach 12-13 wynika, że wartości charakterystyk fali padającej otrzymane dla składu SA/Al 25/75, w szczególności amplituda fali podmuchowej, są zdecydowanie mniejsze niż dla pozostałych składów. Tymczasem

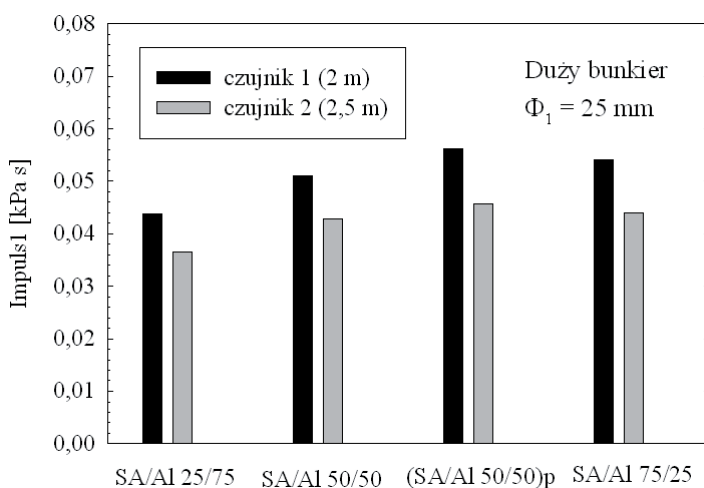


Rys. 12. Wartości pierwszego impulsu padającej fali podmuchowej po wybuchu w dużym bunkrze dla ładunków wewnętrznych o średnicy 16 mm

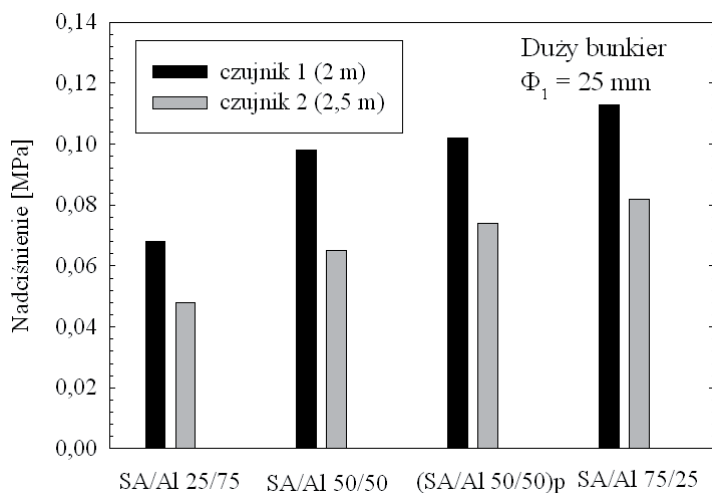
mieszanina o takim składzie byłaby najbardziej interesującym składnikiem materiału termobarycznego ze względu na możliwość wykorzystania tlenu z powietrza do spalania nadmiarowego paliwa. Wartości parametrów fali padającej dla pozostałych składów są do siebie zbliżone, co oznacza, że początkowy stopień utlenienia glinu w produktach rozkładu azotanu amonu w ładunkach zawierających mieszaniny SA/Al 50/50 i 75/25 jest podobny.



Rys. 13. Wartości amplitudy padającej fali podmuchowej po wybuchu w dużym bunkrze dla ładunków wewnętrznych o średnicy 16 mm



Rys. 14. Wartości pierwszego impulsu padającej fali podmuchowej po wybuchu w dużym bunkrze dla ładunków wewnętrznych o średnicy 25 mm

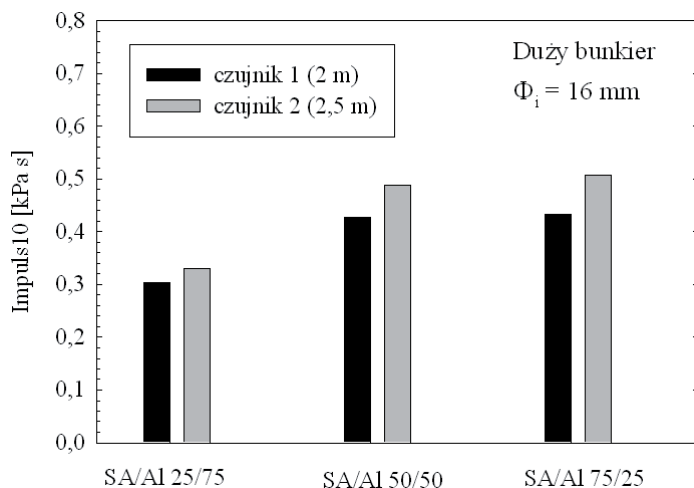


Rys. 15. Wartości amplitudy padającej fali podmuchowej po wybuchu w dużym bunkrze dla ładunków wewnętrznych o średnicy 25 mm

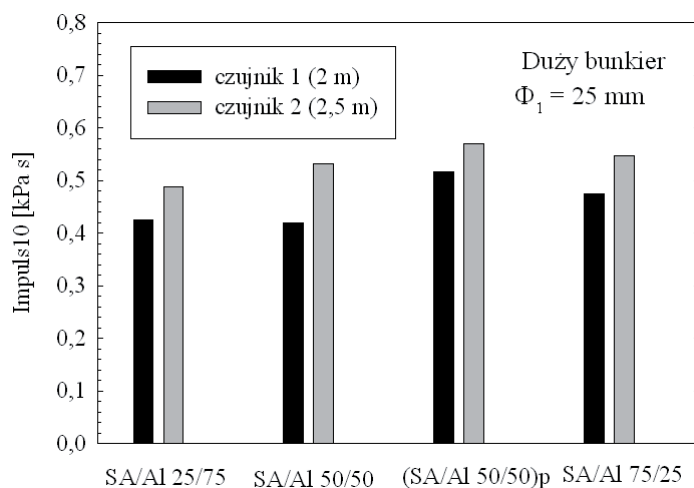
Zastosowanie ładunków heksogenu flegmatyzowanego o większej średnicy i o ponaddwukrotnie większej masie tylko nieznacznie zwiększyło parametry padającej fali podmuchowej (rys. 12-15). Wzrost wartości impulsu i amplitudy jest największy dla składu SA/Al 25/75. Wyniki uzyskane dla prasowanego, jednorodnego ładunku mieszaniny SA/Al 50/50 i heksogenu flegmatyzowanego są zbliżone do tych otrzymanych dla ładunku warstwowego o identycznym składzie. Fakt ten potwierdza wcześniejszy wniosek o spalaniu glinu i produktów wybuchu w początkowej fazie ich rozlotu.

Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono wartości impulsów ciśnienia w dużym bunkrze obliczonych dla czasu $t = 10$ ms. W tym czasie do czujników docierały kolejne fale podmuchowe odbite od ścian bunkra (rys. 8). Propagacja fal odbitych sprzyjała procesom turbulentnego mieszania produktów wybuchu z powietrzem i utleniania zawartego w nich paliwa. Różnice pomiędzy wartościami tak określonego impulsu nadciśnienia dla danej średnicy ładunku heksogenowego są znacznie mniejsze niż w przypadku impulsu fali padającej, w szczególności, gdy ładunek ten ma średnicę $\Phi_1 = 25$ mm. Oznacza to, że w czasie 10 ms od wybuchu zachodzi utlenianie glinu w podobnym stopniu dla wszystkich mieszanin, a ponieważ w ładunkach SA/Al 25/75 jest tego tlenu zdecydowanie mniej niż w pozostałych, w procesie spalania musi być wykorzystywany tlen z powietrza.

Na rysunkach 18-20 przedstawiono charakterystyki fal podmuchowych wyznaczone dla wybuchów w małym i dużym bunkrze. Porównano ze sobą parametry uzyskane z czujników oddalonych w tej samej odległości od osi ładunku. Wartości amplitudy oraz impulsu fali padającej uzyskane po wybuchu w małym bunkrze są



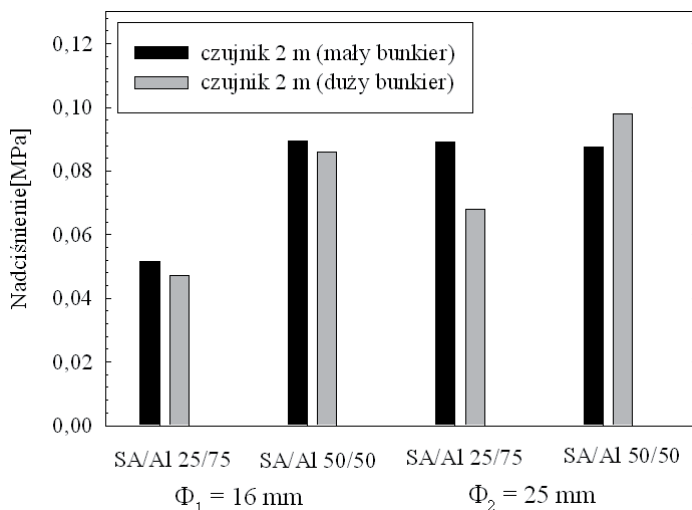
Rys. 16. Wartości impulsu o czasie trwania 10 ms po wybuchu w dużym bunkrze dla ładunków wewnętrznych o średnicy 16 mm



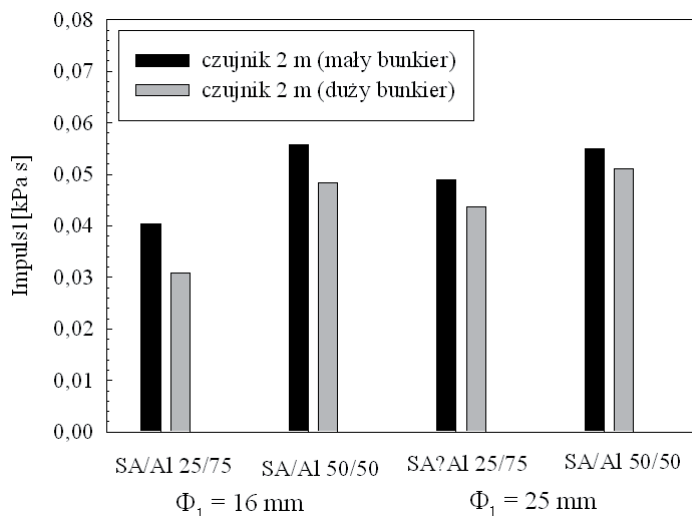
Rys. 17. Wartości impulsu o czasie trwania 10 ms po wybuchu w dużym bunkrze dla ładunków wewnętrznych o średnicy 25 mm

w większości przypadków wyższe od uzyskanych w bunkrze dużym (rys. 18 i 19). Jest to prawdopodobnie związane z mniejszymi odległościami ładunku od ścian i elementów układów pomiarowych (na przykład ekran chroniący kasetę z filmem do zdjęć rentgenowskich). Odbite fale podtrzymują ciśnienie w środku małego bunkra i ograniczają w ten sposób spadek ciśnienia w pierwszej fali podmuchowej docierającej do czujnika. Relacja impulsów ciśnienia o czasie trwania 10 ms z obu bunkrów jest odwrotna. Wartości impulsów uzyskane w bunkrze dużym są większe.

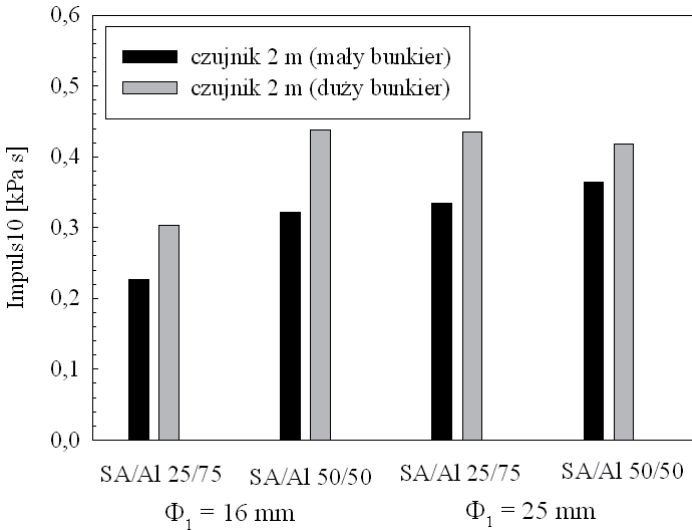
Należy jednak pamiętać, że duży bunkier jest praktycznie zamknięty, oprócz czterech otworów i wejścia, natomiast mały jest bunkrem półotwartym, z przeciwdławkową osłoną ażurową zamiast dachu. Ponieważ prędkości propagacji fali podmuchowej i ekspansji gazowych produktów wybuchu są bardzo duże, w czasie 10 ms znaczna ilość gazu opuszcza bunkier i ciśnienie wewnątrz niego spada.



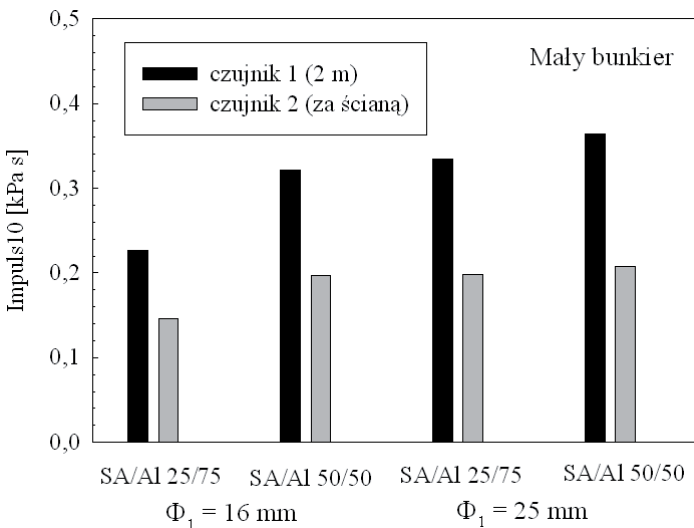
Rys. 18. Porównanie wartości amplitudy padającej fali podmuchowej po wybuchu w małym i dużym bunkrze



Rys. 19. Porównanie wartości pierwszego impulsu padającej fali podmuchowej po wybuchu w małym i dużym bunkrze



Rys. 20. Porównanie wartości impulsów o czasie trwania 10 ms po wybuchu w małym i dużym bunkrze



Rys. 21. Wartości impulsu o czasie trwania 10 ms po wybuchu w małym bunkrze

Na rysunku 21 porównano impulsy o czasie trwania 10 ms zarejestrowane przez czujnik ciśnienia znajdujący się wewnątrz małego bunkra i czujnik umieszczony za ścianą (rys. 5). Impuls ciśnienia rejestrowanego za przesłoną jest mniejszy od impulsu mierzonego wewnątrz bunkra, ponieważ znajduje się w większej odległości od ładunku, a wypływ gazów obniża ciśnienie. Mimo to jego wartość jest stosun-

kowo wysoka i może świadczyć o tym, że tego typu ładunki warstwowe mogą być stosowane skutecznie w częściowo otwartych obiektach.

Wyniki pomiaru czasu świecenia obłoku reagujących produktów wybuchu otrzymane z dwóch fotodiod zestawiono w tabeli 1. W przypadku fotodiody OPT101 koniec czasu świecenia obłoku przyjmowano, gdy zarejestrowany sygnał spadał do wartości 0,1 V. Zwraca uwagę fakt, że czasy świecenia w małym bunkrze są zdecydowanie dłuższe niż czasy uzyskane w bunkrze dużym. To oznacza, że warunki dopalania proszku aluminium w bunkrze małym są korzystniejsze, mimo że bunkier ten jest częściowo otwarty. Wydaje się, że ważnym czynnikiem wpływającym na proces dopalania jest stosunek objętości bunkra do masy ładunku. W bunkrze małym, ze względu na mniejsze odległości ładunku od ścian, odbite fale uderzeniowe są znacznie silniejsze i są zdolne do skuteczniejszego podgrzewania mieszaniny reagującej wewnątrz obiektu. Wpływ stosunku masy ładunku do objętości obiektu zamkniętego na procesy dopalania produktów wybuchu był szczegółowo analizowany między innymi w pracach [8-9].

TABELA 1

Wyniki pomiaru czasu świecenia obłoku reagujących produktów wybuchu rejestrowanego za pomocą dwóch fotodiod BPDP35 i OPT101

	Mieszanina	Ładunek RDX _{II}	Czas świecenia (BPDP35) [ms]	Czas świecenia (OPT101) [ms]
Bunkier duży	SA/Al 25/75	φ 16	80	–
		φ 25	58	52
	SA/Al 50/50	φ 16	–	43
		φ 25	–	41
	[RDX _{II} /(SA/Al 50/50)] _p	φ 50	34 36	33 34
	SA/Al 75/25	φ 16	–	26
		φ 25	33	31
Bunkier mały	SA/Al 25/75	φ 16	165	169
		φ 25	140 142	121 –
	SA/Al 50/50	φ 16	139	–
		φ 25	103	–

4. Podsumowanie

Analiza uzyskanych wyników doświadczalnych pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. W zaproponowanych ładunkach warstwowych zewnętrzna warstwa mieszaniny paliwa i utleniacza zostaje sprężona i rozrzucona przez falę uderzeniową i ekspandujące produkty detonacji wewnętrznego ładunku materiału wybuchowego. Analiza zdjęć rentgenowskich pozwala na stwierdzenie, że w warstwie zewnętrznej nie występuje zjawisko detonacji.
2. Zmierzone charakterystyki fal podmuchowych i czasy świecenia obłoków produktów wybuchu świadczą o zainicjowaniu przez falę uderzeniową procesu rozkładu azotanu amonu i spalania proszku aluminium.
3. Wielkość zastosowanego ładunku heksogenu flegmatyzowanego tylko nieznacznie wpływa na stopień przereagowania glinu w procesie wybuchowym. Wpływ ten obserwuje się jednak w przypadku ładunków z największą zawartością proszku aluminium (75%) w mieszaninie z azotanem amonu.
4. W dłuższym okresie czasu do spalania proszku aluminium wykorzystywany jest niewątpliwie tlen z powietrza.
5. Duży wpływ na proces utleniania proszku aluminium ma stosunek masy ładunku do objętości bunkra.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować dr. inż. Józefowi Paszuli za wykonanie rejestracji przebiegów ciśnienia i czasu świecenia oraz dr. inż. Leszkowi Szymańczykowi za wykonanie zdjęć rentgenowskich.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.10.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] M. L. CHAN, G. W. MEYERS, *Advanced thermobaric explosive compositions*, Patent US 6, 955, 732 B1, Oct. 18, 2005.
- [2] M. L. CHAN, D. T. BUI, G. MEYERS, A. TURNER, *Castable thermobaric explosive formulations*, Patent US 6, 969, 434 B1, Nov. 29, 2005.
- [3] R. H. GUIRGUIS, *Reactively induced fragmenting explosives*, Patent US 6, 846, 372 B1, Jan. 25, 2005.
- [4] J. PASZULA, W. A. TRZCIŃSKI, K. SPRZĄTCZAK, *Detonation performance of aluminium-ammonium nitrate explosives*, Central European Journal of Energetic Materials, 5, 1, 2008, 3-12.
- [5] W. A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, L. SZYMAŃCZYK, *Wyznaczenie ciśnienia detonacji z testu wodnego*, Biul. WAT, 48, 12, 1999.
- [6] L. E. FRIED, *CHEETAH 1.39 — User's manual*, LLNL, 1996.

- [7] A. MARANDA, *Badania parametrów detonacyjnych amonowosaletranych materiałów wybuchowych zawierających pył aluminiowy*, WAT, Warszawa, 1989.
- [8] W. A. TRZCIŃSKI, J. PASZULA, *Confined explosions of high explosives*, Journal of Technical Physics, 41, 4, 2000, 453-470.
- [9] W. A. TRZCIŃSKI, J. PASZULA, P. WOLAŃSKI, *Thermodynamic analysis of afterburning of detonation products in confined explosions*, Journal of Energetic Materials, 20, 3, 2002, 195-222.

K. GAŚSIOR, W. A. TRZCIŃSKI

Investigation of blast wave characteristics for layered charges

Abstract. The research on detonation of cylindrical, layered explosives charges: phlegmatized RDX — a mixture of ammonium nitrate and aluminium was carried out. To measure the shock curvature of the detonation wave, X — ray photography was applied. Pressure blast characteristics and the light output of explosion cloud in the chambers which have different size and level of opening (a ratio of holes' surface to the total chamber surface) were investigated. Amplitudes and impulses of the incident waves and the impulses of the total overpressure, which was recorded in the specified time duration, were compared. The obtained results can be used for the construction of termobaric, layered explosives.

Keywords: termobaric explosives, enhanced blast explosives, blast waves

Universal Decimal Classification: 662.1/.4

