



Materiały wybuchowe termobaryczne i o podwyższonej zdolności podmuchowej

KATARZYNA BARCZ, WALDEMAR A. TRZCIŃSKI

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

Streszczenie. W pracy dokonano przeglądu dostępnej literatury poświęconej wybuchowym materiałom termobarycznym i materiałom o podwyższonej zdolności podmuchowej (burzącej). Podzielono je na ciekłe i stałe mieszaniny oraz materiały kompozytowe, w tym ładunki warstwowe. Szczegółowo scharakteryzowano badane materiały wybuchowe oraz omówiono metody badań ich parametrów wybuchowych, przedstawiono wyniki testów doświadczalnych oraz symulacji komputerowych. Wiele uwagi poświęcono zjawiskom fizycznym towarzyszącym procesowi detonacji takich heterogenicznych kompozycji wybuchowych o zdecydowanym nadmiarze paliwa.

Słowa kluczowe: termobaryczne materiały wybuchowe, materiały wybuchowe o podwyższonej zdolności podmuchowej, fale podmuchowe

Symbole UKD: 662.1/.4

1. Wstęp

Terminem „bomby termobaryczne” określa się szereg różnych rodzajów bomb od paliwowo-powietrznych, w których wytwarzana jest chmura palnego ośrodka i następnie detonacja mieszaniny paliwowo-powietrznej, do metalizowanych materiałów wybuchowych, których ekspandująca „kula ognia” wykorzystuje tlen z powietrza do spalania proszków metali. Tym, co je łączy, jest wygenerowanie fali podmuchowej, charakteryzującej się niższą amplitudą nadciśnienia oraz dłuższym czasem trwania w porównaniu z bombą zawierającą klasyczny, stały materiał wybuchowy. Wskutek tego przy oddziaływaniu fali podmuchowej na przegrodę mamy do czynienia raczej z pchaniem niż uderzeniem — wybuch ładunku termobarycznego nie wybija dziury w ścianie, ale ją przewraca. Aby zabić człowieka, konieczny jest

nagły, uderzeniowy skok ciśnienia ok. 250 kPa trwający ok. 1 ms, ale nadciśnienie ok. 70 kPa podtrzymywane przez 20 ms jest również śmiertelne [1]. W taki właśnie sposób działają bomby termobaryczne.

Detonacja klasycznych, idealnych materiałów wybuchowych generuje bardzo silny, krótkotrwały impuls ciśnienia, który w powietrzu wytwarza falę podmuchową będącą głównym czynnikiem rażenia tych materiałów. Właściwość materiału wybuchowego do wytwarzania fal podmuchowych będziemy nazywać jego *zdolnością podmuchową* lub *burzącą*. Oddziaływanie fali podmuchowej może być dodatkowo wzmacniane przez napędzanie odłamków przez rozprężające się produkty detonacji. Termobaryczne materiały wybuchowe (*Thermobaric Explosives* — TBX) lub materiały wybuchowe o podwyższonej zdolności podmuchowej (*Enhanced Blast Explosives* — EBX) wytwarzają długo trwającą falę ciśnienia o umiarkowanej intensywności, która może propagować się wzdłuż korytarzy, dookoła narożników oraz przez otwory okienne i drzwiowe, stanowiąc śmiertelne zagrożenie dla ludzi chroniących się w budynkach, bunkrach, a nawet pojazdach opancerzonych. Skutki wybuchu tego rodzaju materiałów wybuchowych są podobne bardziej do efektów detonacji mieszanin paliwowo-powietrznych niż idealnych, skondensowanych materiałów wybuchowych. Cechą charakterystyczną materiałów wybuchowych typu TBX i EBX jest zjawisko rozrzucania w początkowej fazie wybuchu nieutlenionych produktów detonacji i nieprzereagowanego paliwa do otaczającego ładunek powietrza. W następnym etapie eksplozji, mieszanina paliwa i tlenu z powietrza ulega samozapłonowi, generując wybuch z długotrwałą falą ciśnienia. Nawet bez odłamków, fala taka sama stanowi poważne zagrożenie dla ludzi.

Materiały typu TBX czy EBX mogą więc dostarczyć znacznie większą energię całkowitą niż konwencjonalne materiały wybuchowe. Należy podkreślić, że główna część dodatkowej energii jest zużywana na podgrzanie ośrodka gazowego i wzmocnienie całkowitego impulsu ciśnienia fali podmuchowej, charakteryzującej się jednak stosunkowo małą amplitudą.

Materiały wybuchowe termobaryczne i o podwyższonej zdolności podmuchowej 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 osiągnięta przez dodanie do kompozycji wybuchowej proszków metali, takich jak magnez czy aluminium. Detonacji takich kompozycji wybuchowych towarzyszą trzy etapy spalania:

1. W pierwszym etapie mamy do czynienia z anaerobowymi (bez udziału tlenu z powietrza) reakcjami w fali detonacyjnej, trwającymi kilka mikrosekund, które są głównie reakcjami typu redoks molekuł materiału wybuchowego. Procesy przebiegające w fali detonacyjnej decydują o zdolnościach kruszących kompozycji wybuchowej, na przykład zdolności do przebijania pancerza.

2. Anaerobowe reakcje spalania, trwające setki mikrosekund, to przede wszystkim reakcje produktów detonacji z cząstkami paliwa, zbyt dużymi, by mogły być spalane w fali detonacyjnej. Reakcje spalania po detonacji wpływają na charakterystyki impulsu ciśnienia decydującego o zdolnościach burzących materiału wybuchowego, tzn. zdolności do niszczenia ścian budynków, bunkrów itp.
3. Ostatni, aerobowy (z udziałem tlenu z powietrza) etap reakcji spalania trwa dziesiątki milisekund i przebiega z udziałem powietrza i bogatych w paliwo produktów detonacji po wymieszaniu ich przez falę uderzeniową generowaną wybuchem i towarzyszące jej turbulencje. Głównym skutkiem procesu dopalania jest ciepło, które podnosi ciśnienie gazów i wzmacnia falę podmuchową. Jej amplituda jest jednak mniejsza niż 10 atmosfer. Ale wzmocnienie nawet tak słabej fali podmuchowej stanowi olbrzymie zagrożenie dla ludzi i sprzętu. Największy efekt cieplny można uzyskać, dodając jako paliwo proszki boru, aluminium, tytanu, magnezu, cyrkonu, węgla lub węglowodorów.

Z przeglądu dostępnej literatury wynika, że bardzo często terminów TBX i EBX używa się zamiennie, ponieważ zjawiska towarzyszące ich wybuchowi są podobne. Przyjmuje się jednak, że ładunki o zwiększonej zdolności podmuchowej (EBX) generują większość energii we wczesnym etapie wybuchu, podczas gdy w przypadku materiałów termobarycznych (TBX) uwalnianie się energii przesuwają się do etapu aerobowego. W niniejszym opracowaniu używamy będziemy terminów zastosowanych przez autorów omawianych kolejno publikacji.

Od dawna wiadomo, że aktywne chemicznie metale, takie jak glin czy magnez, dodaje się do skondensowanych materiałów wybuchowych w celu zwiększenia całkowitej energii wyzwolonej w czasie wybuchu. Chociaż metale te nie reagują wystarczająco szybko, aby brać udział w reakcjach w fali detonacyjnej, mogą one jednak reagować z gazowymi produktami wybuchu lub z tlenem z otaczającej atmosfery i znacznie zwiększyć siłę fali podmuchowej. Porównanie energii spalania metalu w powietrzu (20-30 kJ na gram metalu) z energią detonacji typowych materiałów wybuchowych (6 kJ na gram materiału wybuchowego) sugeruje, że możliwy jest znaczący wzrost efektywnej energii uwalnianej z ładunku materiału wybuchowego, jeśli spalanie cząstek metalu zostanie tak zaprogramowane, aby przebiegało odpowiednio szybko i by uwalniana energia mogła wzmocnić falę podmuchową.

Przyjmuje się, że pierwsze prace nad systemem broni termobarycznej prowadzone były na początku lat 60. ubiegłego wieku w byłym ZSRR, a pierwsze zastosowanie w warunkach bojowych przez wojska rosyjskie miało miejsce w latach 80. w Afganistanie [2]. Oryginalny, rosyjski termobaryczny materiał wybuchowy składał się z prostej mieszaniny metalicznego paliwa — magnezu (Mg) oraz z samospalającej się cieczy — azotanu (V) izopropylu (IPN) i generował długotrwałe fale ciśnienia w afgańskich systemach jaskiń, powodując zniszczenia w podziem-

nych labiryntach na dużych głębokościach. Nie był on jednak pozbawiony wad. Ciekły IPN jest jednocześnie materiałem lotnym i podatnym na wybuch. Dlatego też wyciekając i rozlewając się powoduje poważne zagrożenie, również z powodu swojej toksyczności [3].

W ostatnich latach na świecie prowadzono równolegle badania nad znalezieniem składu stałego materiału wybuchowego, który spowoduje skutki podobne do wzorcowego, ciekłego materiału termobarycznego (IPN/Mg) i nad rozwijaniem testów służącym lepszemu scharakteryzowaniu zjawiska wybuchu takich materiałów. Z zasady wykonuje się w pierwszej kolejności testy w małej skali, które pozwalają zgrubnie ocenić skład materiału wybuchowego pod kątem jego wrażliwości i charakterystyk fal podmuchowych, zaś testy w większej skali umożliwiają dalszą selekcję składników i wybór kompozycji optymalnej z punktu widzenia zdolności podmuchowych. Studia nad składem koncentrują się na kilku typach lepiszcza, różnych materiałach wybuchowych i metalicznych paliwach, w tym nad wpływem rozmiarów i kształtu ich cząstek na charakterystyki detonacyjne, proces rozpraszania i parametry fali podmuchowej. Ostateczny skład kompozycji musi być kompromisem pomiędzy szybkością reakcji, optymalnym rozproszeniem paliwa i nieutlenionych produktów detonacji oraz możliwością zainicjowania spalania mieszaniny paliwa i powietrza. Reakcja wybuchowa musi być na tyle wolna, aby rozproszyć paliwo, ale jednocześnie na tyle szybka, aby proces palenia nie zgasł. Jeśli reakcja jest jednak za szybka, wtedy paliwo jest zbyt szeroko rozpraszane, a gęstość wydzielanego ciepła jest niewystarczająca do zainicjowania utleniania kolejnych cząstek paliwa.

2. Stałe mieszaniny wybuchowe

W trakcie wstępnych badań dotyczących składów stałych materiałów termobarycznych zakładano obecność w mieszaninie wybuchowej jedynie metalicznego paliwa i silnego utleniacza, zgodnie z recepturą rosyjską dla ciekłych kompozycji termobarycznych (IPN/Mg). Przyjęto, że pierwszy i drugi etap spalania zachodzi z udziałem utleniacza wchodzącego w skład ładunku, a w etapie dopalania efekt wzmocnienia osiągany jest przy udziale tlenu z powietrza. We wspomnianym wcześniej artykule [3] autorzy szukali właśnie tego typu kompozycji, porównując ich właściwości początkowo z właściwościami składu rosyjskiego materiału wzorcowego, a następnie każdy kolejny układ wybuchowy porównywali z poprzednimi. Kompozycje były dobierane w taki sposób, aby w produktach detonacji znajdowały się duże ilości wodoru i nieprzereagowanego paliwa. W celu znalezienia optymalnego składu wykorzystano kruszące materiały wybuchowe (HMX — oktogen, RDX — heksogen, CL-20, TNAZ) i różne rodzaje metalicznych paliw, o różnym rozmiarze i kształcie (aluminium nanokrystaliczne, sferyczne cząstki aluminium

o wymiarach 3 μm , 60 μm ; aluminium płatkowane, stop Mg/Al, metale Ti, B, Mg itd.). Badania teoretyczne objęły zagadnienia prędkości i energii detonacji oraz końcowego składu produktów detonacji dla ciśnienia wynoszącego 1 atm.

Do stworzenia najlepszej kompozycji wybrano, wzorując się na mieszaninie IPN/Mg, odlewane i sieciowane kompozycje wybuchowe. Lepiszczce i plastyfikator miały za zadanie zastąpić IPN, a jednocześnie miały mieć zdecydowanie niższą wrażliwość. Tworzenie takich kompozycji jest bezpieczne, ponieważ w trakcie wytwarzania mogą one zawierać dużą ilość cieczy, której parowanie pozwala uzyskać mieszaninę o miękkiej i elastycznej konsystencji. W pracy [3] nie badano mieszanin z dodatkowym utleniaczem.

Testy rozpoczęto wytwarzając 10-gramowe tzw. „bezpieczne próbki”. W trakcie mieszania ilość cieczy w mieszaninie była regulowana i dostosowywana do warunków procesu. Następnie taka próbka była poddawana testom na wrażliwość — na tarcie, na uderzenie, na wyładowania elektrostatyczne oraz na samozapłon. Mieszaniny z nadmierną wrażliwością na którykolwiek z bodźców nie były stosowane w badaniach w większej skali. Testy na zdolność podmuchową przeprowadzono początkowo w częściowo zamkniętym małym bunkrze z zastosowaniem trzech czujników ciśnienia PCB. Czujniki umieszczono na zewnątrz bunkra w odległości 1, 1,5 oraz 2 m od ładunku. W następnym teście, ładunki 500-gramowe umieszczano w dwukomorowym pomieszczeniu. Komory połączone były ze sobą drzwiami, a oprócz tego każda z nich posiadała dodatkowo swoje drzwi zewnętrzne oraz kwadratowe okno. W tej próbie mierzono wysokość podniesienia się dachów obydwu komór na skutek detonacji ładunku oraz rejestrowano ciśnienie za pomocą sześciu czujników ciśnienia.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń autorzy doszli do wniosku, że w przypadku materiałów wybuchowych oktogen okazał się lepszym składnikiem mieszanin termobarycznych niż TNAZ czy CL-20, natomiast porównywalny był z heksogenem. Jeśli zaś chodzi o metale, to optymalna z punktu widzenia zdolności podmuchowych kombinacja proszków metalicznych jest ciągle poszukiwana. Początkowe zastosowanie w testowanych mieszaninach jedynie Al nie przyniosło dobrych rezultatów. Lepszy skutek osiągnięto po dodaniu stopu Mg/Al. Oczekiwano, że magnez będzie spalał się w dużo niższej temperaturze, a wytworzone ciepło spowoduje spalanie aluminium. Zastąpienie części stopu nanokrystalicznym aluminium Alex spowodowało obniżenie impulsu ciśnienia, wbrew temu, czego się spodziewano. To samo działo się po zastąpieniu części stopu płatkowanym aluminium i dokładnie taki sam skutek miało zastosowanie jedynie magnezu jako paliwa. W kolejnych seriach stosowano różnorodne metale podstawiane na miejsce stopu Mg/Al, takie jak bor czy tytan. W ten sposób chciano sprawdzić, czy metale te są dobrymi inicjatorami reakcji spalania w niskich temperaturach. Spodziewano się także, że zastosowanie materiałów termitowych podniesie wartość wydzielanej energii cieplnej i w ten sposób spowoduje całkowite utlenienie aluminium. Uzyskane rezultaty nie potwierdziły oczekiwań. Ostatecznie autorzy

uznali, że zastosowanie stopu, w którym Al pozostaje w bezpośrednim kontakcie z Mg jest dobrym sposobem zainicjowania spalania aluminium i podnosi zdolności podmuchowe testowanych kompozycji wybuchowych.

W pracy [4] badano związek pomiędzy ciepłem spalania a zdolnością podmuchową dla materiałów wybuchowych zawierających aluminium. Badania przeprowadzono pod ziemią, w zamkniętej komorze i na otwartej przestrzeni. Autorzy stwierdzili, że aluminizowane materiały wybuchowe powinny zawierać bardzo dużo tlenu w swoich kompozycjach albo powinno się stworzyć warunki do wykorzystania tlenu z otoczenia. Skład ładunków wybuchowych gwarantujący wzmocnienie efektu wybuchu będzie zależał od ich przeznaczenia i od warunków detonacji. W pierwszej kolejności wykonano testy podziemne. Materiał wybuchowy służący do tworzenia kraterów lub też niszczenia zapór wodnych detonuje się w warunkach zamkniętych, bez dostępu tlenu z otoczenia. W testach mierzono wysokość podniesienia stalowej płyty przez zakopany ładunek testowanego materiału wybuchowego. Na podstawie analizy przemieszczenia się płyty wyznaczano energię podnoszenia. Wytworzono cztery kompozycje wybuchowe o różnych składach materiałów wybuchowych, metali, utleniaczy (tylko jedna kompozycja zawierała dodatkowy utleniacz) oraz lepszczą i porównano ich efekty z tritonalem (trotyl/aluminium 80/20). Następnie przeprowadzono testy w zamkniętej komorze, w której zawartość tlenu była ograniczona. Mierzono przebiegi ciśnienia wewnątrz komory. Do eksperymentów użyto pięć różnych kompozycji odlewanych typu PBX i również porównano ich działanie do skutków wybuchu tritonalu. Ładunki załadowano w plastikowe tuby, a ich całkowita masa wynosiła 2 kg. Na samym końcu przeprowadzono badania na otwartej przestrzeni. W tym celu użyto tych samych kompozycji, co w poprzednim teście w zamkniętej komorze. Mierzono przebiegi ciśnienia i wyznaczano wartości amplitudy i impulsu właściwego fali podmuchowej.

Na podstawie wyników doświadczeń, autorzy pracy wysnuli wnioski odnośnie utleniania głównych pierwiastków zawartych w badanych materiałach wybuchowych, takich jak glin, węgiel czy wodór. Pomocne w tym były wyniki obliczeń teoretycznych dla testowanych materiałów, które posiadają niewystarczającą ilość tlenu potrzebną do całkowitego utlenienia. Stwierdzono, że istnieje duża różnica w ciepłe spalania bez dostępu tlenu z otoczenia, jeśli przyjmie się, że wszystkie pierwiastki reagują jednocześnie (tzw. *synchroniczne samoutlenienie*) albo gdy określony pierwiastek reaguje jako pierwszy w danym układzie (tzw. *asynchroniczne samoutlenienie*). Autorzy przyjęli, że reakcja utleniania przebiega w kolejności glin, węgiel, wodór, a dostępny tlen odpowiada ilości zawartej w samej kompozycji wybuchowej. Biorąc pod uwagę wyniki testów pod ziemią, stwierdzono brak korelacji między ciepłem spalania obliczonym dla synchronicznego samoutlenienia testowanych materiałów i energią podnoszenia. Widoczny jest natomiast związek (zależność liniowa) między zmierzoną energią podnoszenia dla badanych materiałów i obliczonym ciepłem spalania dla asynchronicznego utlenienia. Oznacza to, że w trakcie deto-

nacji aluminizowanego materiału wybuchowego najpierw w fali detonacyjnej ma miejsce utlenienie węgla i wodoru, a następnie tlen znajdujący się w CO_2 i H_2O reaguje, w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury, z glinem, tworząc Al_2O_3 . W modelu asynchronicznego utlenienia przyjmuje się, że w pierwszej kolejności spala się glin, a dopiero później węgiel i wodór.

Na podstawie zmierzonych przebiegów ciśnienia w testach w zamkniętej komorze wyznaczono tzw. quasi-statyczne ciśnienie (QSP) poprzez uśrednienie w czasie tych przebiegów. Stwierdzono liniową zależność między wartościami QSP i całkowitym ciepłem spalania materiałów wybuchowych. Stąd wyciągnięto wniosek, że w trakcie wybuchu w zamkniętych przestrzeniach, w których jest wystarczająca ilość tlenu, ma miejsce całkowite utlenienie paliwa zawartego w ładunku.

Z analizy danych z badań wybuchu swobodnego wynika, że nie ma żadnej korelacji między impulsem ciśnienia generowanym przez taki wybuch i całkowitym ciepłem spalania materiału wybuchowego. Oznacza to, że pierwiastki zawarte w materiałach wybuchowych nie spalają się całkowicie, gdy detonuje on w nieograniczonej przestrzeni, mimo otoczenia bogatego w tlen (powietrze). Jeśli zatem reagowałyby tylko z tlenem pochodzącym z materiału wybuchowego, impuls fali podmuchowej powinien być związany z ciepłem spalania wytworzonym na skutek asynchronicznego utlenienia, podobnie jak w przypadku detonacji pod ziemią. Odkryto jednak, że oprócz ciepła asynchronicznego utleniania, również wartość prędkości detonacji materiału wybuchowego ma wpływ na impuls ciśnienia fali podmuchowej w powietrzu. Efekt wybuchu na otwartej przestrzeni jest funkcją iloczynu ciepła asynchronicznego i prędkości detonacji podniesionej do potęgi $2/3$. Autorzy twierdzą, że impuls fali podmuchowej może być wzmacniany wtedy, gdy szybkość wzrostu ciśnienia na skutek reakcji spalania jest dużo większa niż szybkość jego zanikania powodowanego gwałtownym rozprężaniem produktów wybuchu.

Problem składnika utleniającego został poruszony w opracowaniu [5] dotyczącym zastosowania nowego rodzaju utleniacza w kompozycji typu PBX o podwyższonej zdolności podmuchowej. Co prawda autorzy nie podają nazwy tego utleniacza, jednak sugerują, że taki istnieje i ma lepsze właściwości niż stosowany powszechnie nadchloran amonu (AP). Mimo że nadchloran amonu ma wysoki bilans tlenowy i podwyższa ciepło spalania poprzez asynchroniczne samoutlenianie, to powoduje jednocześnie wzrost wrażliwości kompozycji B [6]. W pracy [5] wykazano, że zastosowanie w kompozycji wybuchowej utleniacza nazwanego OX-A w ilości 20% spowodowało zdecydowanie mniejszą jej wrażliwość na uderzenie niż zastosowanie nadchloranu amonu, ale jednocześnie obniżało zdolność podmuchową kompozycji. Wrażliwość badano w teście, w którym próbka kompozycji wybuchowej napędzona do prędkości 150 m/s uderzała w stalową płytę. Autorzy wykazali, że poprzez użycie mieszaniny utleniaczy OX-A i AP możliwe jest stworzenie takiej kompozycji wybuchowej, która jest mało wrażliwa na uderzenie, a jednocześnie ma dobre charakterystyki podmuchowe.

W celu zbadania zjawisk zachodzących podczas wybuchu stałych mieszanin wybuchowych, określenia profilu fali uderzeniowej w powietrzu oraz rozkładu cząstek i objętości kuli ognistej podążających bezpośrednio za tą falą, Kevin L. McNesby i inni zastosowali technikę wysokiego kontrastu (HBI — *High Brightness Imaging*) [7]. Zazwyczaj jasność emisyjna we wczesnej fazie wybuchu (ok. 500 μ s) jest na tyle duża, że w przypadku większości kamer obraz jest przejaskrawiony. Zastosowanie filtrów lub redukcja strumienia światła docierającego do kamery na wczesnym etapie umożliwia rejestrację przebiegu wybuchu, ale odbywa się to kosztem jakości obrazu późniejszego etapu rozlotu produktów detonacji, gdy strumień światła jest bardzo słaby. Zastosowana technika HBI polega na połączeniu filtrowania strumienia światła docierającego do kamery, dzięki czemu można zarejestrować fazę zainicjowania i rozwoju wybuchu, z techniką oświetlenia celu przez emisję światła o długości fali 510 nm, co umożliwia późniejszą rejestrację zjawiska. Dodatkowo w metodzie tej migawka kamery jest zsynchronizowana z laserem i promień światła jest wysyłany dopiero wtedy, gdy jest ona otwarta (czas otwarcia 10 μ s). Dla potrzeb eksperymentu w odległości ok. 3 m za ognistą kulą ustawiono płytę odblaskową tak, aby rozszerzona za pomocą układu soczewek wiązka lasera przechodząc przez zewnętrzny brzeg ognistej kuli podświetlała ją, a jej obraz widoczny był na płycie. Ostrość kamery cyfrowej ustawiono tak, aby można było zarejestrować obraz na płycie odblaskowej. Do testu wykorzystano sześć różnych kompozycji, z których dwie były tradycyjnymi materiałami wybuchowymi (kompozycja B i tritonal), a reszta to materiały wybuchowe o zwiększonych zdolnościach podmuchowych na bazie RDX i aluminium. Detonowano ładunki o masie 2 kg. Wyniki otrzymane na podstawie przeprowadzonych doświadczeń techniką HBI dla kilku materiałów wybuchowych pokazały znaczne różnice w odległościach między frontem czołowej fali uderzeniowej i brzegiem ognistej kuli. Wartość prędkości fali uderzeniowej w drugiej sekundzie od zainicjowania wybuchu jest zbliżona dla testowanych materiałów i wynosi ok. 650 m/s. Dla niektórych materiałów o zwiększonych zdolnościach podmuchowych, w strefie między główną falą uderzeniową i ognistą kulą pojawia się chmura zawierająca małe cząstki. Właśnie dla takich kompozycji prędkość przemieszczania się ognistej kuli i odległość jej krawędzi od czoła fali w drugiej milisekundzie od zainicjowania detonacji jest największa. Autorzy sugerują, że zaobserwowane zjawisko wskazuje na wzrost turbulencji i mieszania produktów wybuchu wewnątrz kuli ognistej, co w efekcie wzmacnia parametry fali podmuchowej.

Badania charakterystyk fal detonacyjnych w kompozycjach składających się z materiału wybuchowego, aluminium lub innych dodatków prowadzone były również w Zakładzie Materiałów Wybuchowych WAT. W pracy [8] badano wpływ zawartości aluminium (15-60%) i wielkości jego cząstek na parametry fali detonacyjnej kompozycji opartych na heksogenie flegmatyzowanym woskiem (RDX_{fl}). Prowadzono pomiary prędkości detonacji przy różnych średnicach ładunków i w różnych otoczkach.

Wykonano test cylindryczny, którego wyniki były podstawą do wyznaczenia zdolności miotających i charakterystyk energetycznych badanych mieszanin. Zdolność miotającą scharakteryzowano za pomocą energii Gurneya. Z danych z testu cylindrycznego możliwe było również oszacowanie energii detonacji mieszanin.

Na podstawie uzyskanych wyników autorzy stwierdzili, że średnie wartości prędkości detonacji aluminizowanych materiałów wybuchowych powoli maleją wraz ze wzrostem średnicy ładunku w zakresie 15-60 mm. Zamknięcie ładunku w otoczce z miedzi lub z wody spowodowało wzrost prędkości detonacji o ok. 100-200 m/s. Dodanie aluminium obniża prędkość detonacji w porównaniu z czystym składnikiem wybuchowym, mimo tego, że gęstości ładunków są większe. Dodanie płatkowanego aluminium powoduje, że materiał wybuchowy jest bardziej porowaty niż w przypadku dodania proszku i dlatego też zmiany w prędkościach detonacji wraz ze wzrostem zawartości dodatku są bardziej widoczne. Materiał wybuchowy zawierający 30% LiF (zamiast aluminium) detonuje z nieznacznie większą prędkością niż ten zawierający 30% płatkowanego aluminium. Oba materiały wybuchowe mają podobną porowatość. W pracy wyznaczono również fronty fal detonacyjnych i stwierdzono, że mają one w przybliżeniu kształt sferyczny. Wartości promieni krzywizny frontów fal uderzeniowych R_m maleją wraz ze wzrostem zawartości aluminium w mieszaninie. Zamknięcie ładunków w otoczce wodnej podnosi wartość promienia R_m . Promienie krzywizny dla mieszanin zawierających sproszkowane aluminium są większe niż dla tych, w których zastosowano aluminium płatkowane. Wartości energii Gurneya dla mieszanin zawierających 15% Al są wyższe lub porównywalne do tych uzyskanych dla czystego RDX_{fl}. Dopiero dodatek powyżej 30% aluminium obniża energię Gurneya. Oznacza to, że zdolności miotające mieszanin zawierających do 30% sproszkowanego aluminium są wyższe lub porównywalne do zdolności mieszanin wykonanych z czystego RDX_{fl}. Mieszaniny zawierające płatkowane aluminium charakteryzują się mniejszą zdolnością miotającą niż odpowiednie kompozycje z proszkiem Al. Z danych otrzymanych w teście cylindrycznym wynika, że cząstki aluminium biorą udział w reakcjach z gazowymi produktami wybuchu i że ilość reaktywnego aluminium musi być znacząca, gdyż zdolności miotające produktów detonacji mieszanin wybuchowych z 30% zawartością Al są zdecydowanie wyższe niż w przypadku mieszanin z 30% zawartością LiF. Dowiedziono również, że energia detonacji wyznaczona na podstawie danych z testu cylindrycznego jest wyższa niż energia mechaniczna obliczona z izentropy ekspansji produktów detonacji mieszaniny wybuchowej przy założeniu obojętności chemicznej glinu, ale zdecydowanie niższa niż energia mechaniczna mieszaniny z reaktywnym glinem.

Badania nad tymi samymi kompozycjami heksogenu flegmatyzowanego i aluminium kontynuowano w pracy [9]. Tym razem autorzy skupili się na zjawiskach towarzyszących wybuchowi na otwartej przestrzeni i w komorach zamkniętych. Parametry fali podmuchowej generowanej przez badane ładunki mierzono za

pomocą czujników piezoelektrycznych. Stosując jednocześnie fotodiody, określono czas świecenia obłoku. Pomiary ciśnienia quasi-statycznego prowadzono w stalowych komorach o objętości 0,15 i 7 m³ i wypełnionych powietrzem. Oprócz tego wyznaczano ciepło detonacji w bombie kalorymetrycznej o objętości 5,6 dm³ w atmosferze argonu.

Na podstawie wyników wykonanych pomiarów stwierdzono, że pik nadciśnienia fali padającej dla testowanych aluminizowanych kompozycji wybuchowych jest zbliżony lub mniejszy niż dla czystego RDX_{fl}. Zaobserwowano jednak wzrost impulsu, co oznacza, że cząstki aluminium reagowały z produktami gazowymi i powietrzem za frontem fali detonacyjnej. Wzrost parametrów fali podmuchowej był jednak nieznaczny. Czas świecenia produktów detonacji aluminizowanych materiałów wybuchowych był dłuższy niż w przypadku detonacji ładunków wykonanych z samego RDX_{fl} i porównywalny lub większy w porównaniu z ładunkami trotylu o tej samej masie. Na podstawie testów przeprowadzonych w komorach o objętości 0,15 i 7 m³ autorzy wywnioskowali, że wartości QSP dla aluminizowanego RDX_{fl} są większe niż dla czystego RDX_{fl}. Oznacza to, że w komorach ma miejsce reakcja między dodatkiem aluminium a tlenem z powietrza i produktami detonacji. Stwierdzenie to potwierdziły wyniki badań dla kompozycji RDX_{fl}/LiF 70/30. LiF zachowywał się jak obojętny dodatek i dlatego wyznaczone QSP dla tej mieszaniny było dwa razy mniejsze niż dla mieszaniny RDX_{fl}/Al 70/30. Wartość QSP zmierzonego dla mieszaniny zawierającej aluminium płatkowane była niższa niż dla mieszaniny zawierającej sproszkowane aluminium. Stwierdzono, że detonacja mieszaniny RDX_{fl} z aluminium wytwarza więcej ciepła w bombie kalorymetrycznej niż heksogenu flegmatyzowanego bez dodatku. Zmierzone maksymalne ciepło detonacji odpowiadało zawartości aluminium 30%. Dalszy wzrost udziału Al powoduje szybkie obniżenie ciepła detonacji, szczególnie w przypadku kompozycji zawierających aluminium płatkowane. Ciepło detonacji uzyskane z pomiarów kalorymetrycznych okazało się znacznie większe niż całkowita energia detonacji obliczona dla obojętnego glinu, ale jednocześnie dużo mniejsze niż energia całkowita w przypadku glinu reaktywnego. To z kolei oznacza, że w bombie kalorymetrycznej tylko część proszku aluminium wzięła udział w reakcji z gazowymi produktami detonacji.

Kontynuacją prac [8-9] jest publikacja [10] dotycząca nieidealnych kompozycji materiałów wybuchowych opartych na RDX. W pracy tej badano ładunki wykonane z flegmatyzowanego RDX zawierające 30% proszku aluminium (o różnym stopniu rozdrobnienia), gruboziarnistego tlenku glinu lub rozdrobnionego fluorku litu. Badania dotyczyły wpływu obojętnych i reaktywnych dodatków na prędkość detonacji i ciśnienie quasi-statyczne. Do wyznaczenia stopnia dopalenia produktów detonacji i reaktywnych cząstek przeprowadzono wybuchy w komorze wypełnionej różnymi gazami.

Z wyników testów przeprowadzonych w komorze o objętości 0,15 m³ wypełnionej azotem i powietrzem wynikało, że wartości QSP dla aluminizowanych

ładunków są wyższe niż dla ładunków zawierających obojętne dodatki. To oznacza, że w komorze zachodziła reakcja między aluminium a tlenem z produktów detonacji lub z powietrza. Wyznaczane w komorze ciśnienie quasi-statyczne dla mieszanin zawierających rozdrobnione cząstki aluminium (średnica cząstek $\sim 5 \mu\text{m}$) było wyższe niż w kompozycjach z gruboziarnistym aluminium ($70\text{-}90 \mu\text{m}$). Większa powierzchnia właściwa drobnoziarnistego proszku umożliwiała lepszą wymianę ciepła i reakcję tych cząstek z produktami detonacji i z powietrzem. Na wielkość QSP miał również wpływ rodzaj gazu obojętne w komorze. Okazało się, że wartości QSP mierzone w komorze wypełnionej argonem są wyższe niż w atmosferze azotu. Przyczyna leży w różnych właściwościach fizycznych tych gazów. Autorzy poddali również analizie stałe pozostałości powybuchowe odzyskane z komory. Na podstawie krzywych termogravimetrycznych stwierdzono, że po detonacji w powietrzu ładunków zawierających aluminium, w komorze obecny był jedynie tlenek glinu. To oznacza, że węgiel z heksogenu flegmatyzowanego i glin uległy całkowitemu utlenieniu w rozpraszających się produktach detonacji lub zabierając tlen z powietrza. Jeśli natomiast detonacja miała miejsce w atmosferze azotu lub argonu, wówczas pozostałościami powybuchowymi były cztery główne składniki, tj. tlenek glinu (Al_2O_3), azotek glinu (AlN), węgiel oraz metaliczne aluminium. Skład ten został potwierdzony za pomocą techniki dyfraktometrii rentgenowskiej.

Badaniem wpływu rodzaju atmosfery gazowej na dopalanie produktów detonacji aluminizowanych materiałów wybuchowych zajęto się również w pracy [11], prowadząc pomiary kalorymetryczne kompozycji wybuchowych na bazie RDX_n . Badano takie same kompozycje wybuchowe, jak w pracy [10]. Pomiary prowadzono w bombie kalorymetrycznej o objętości $5,6 \text{ dm}^3$ wypełnionej azotem, argonem, powietrzem i mieszaniną argon/tlen 80/20 pod zwiększonym ciśnieniem (2 MPa).

Z wyników doświadczeń autorzy wywnioskowali, że niezależnie od składu atmosfery kompozycje wybuchowe zawierające aluminium dają dużo większy efekt cieplny w porównaniu z mieszaninami zawierającymi składniki obojętne. Co do wpływu rozmiaru cząstek aluminium, to kompozycje zawierające cząstki o średnicy $\sim 5 \mu\text{m}$ uwalniają nieznacznie więcej ciepła niż mieszaniny z cząstkami $75\text{-}90 \mu\text{m}$. Stwierdzono, że badane kompozycje w atmosferze argonu i azotu dają taki sam efekt energetyczny, tak więc gazy te mogą być stosowane zamiennie jako gazy obojętne w pomiarach ciepła detonacji w bombie kalorymetrycznej. Prawie jednakowy efekt energetyczny uzyskiwano również w powietrzu i mieszaninie argonu z tlenem. Obliczone wartości energii detonacji i ciepła wybuchu zmierzone w atmosferze obojętnej dla mieszanin z obojętnym dodatkiem są bardzo zbliżone. Jednakże w przypadku mieszanin aluminizowanych zmierzone w tych samych warunkach ciepło wybuchu jest większe niż energia detonacji obliczona przy założeniu inercyjności Al, ale z kolei jest dużo niższe niż obliczona energia detonacji dla reaktywnego Al. W badaniach dowiedziono również, że detonacja w atmosferze zawierającej ok. 20% tlenu prowadzi do całkowitego dopalenia produktów detonacji i glinu.

W pracy [12] badano wpływ aluminium na parametry detonacyjne materiałów bazujących na azotanie amonu. Mierzono prędkość detonacji oraz parametry wybuchu swobodnego w zamkniętej komorze o objętości $0,15 \text{ m}^3$ wypełnionej powietrzem. Dodatkowo wykonano pomiary ciepła detonacji w bombie kalorymetrycznej o objętości $5,6 \text{ dm}^3$ wypełnionej argonem.

Stwierdzono, że prędkość detonacji mieszanin AN/Al maleje wraz ze wzrostem zawartości aluminium od 10 do 25%. Proces wybuchu natomiast zanika stopniowo w mieszaninach zawierających 40% Al. Ciepło mierzone kalorymetrycznie rośnie wraz ze wzrostem zawartości Al w mieszaninie. Mieszaniny zawierające proszek aluminium generują więcej energii niż te, które zawierają płatkowane Al. Może to być spowodowane obecnością tlenku aluminium w płatkowanym Al. Ciepło wybuchu zmierzone w kalorymetrze jest tylko nieco mniejsze niż obliczone przy założeniu reaktywności glinu. To oznacza, że znaczna ilość glinu bierze udział w reakcji z gazowymi produktami rozkładu azotanu amonu wewnątrz bomby kalorymetrycznej wypełnionej argonem. Wartości QSP mierzone w komorze o objętości $0,15 \text{ m}^3$ są niższe niż obliczone, a rozbieżności rosną w miarę wzrostu zawartości Al w mieszaninie. Quasi-statyczne ciśnienie mierzone dla mieszanin zawierających płatkowane aluminium ma niższe wartości niż dla mieszanin z proszkiem aluminium. W przypadku wybuchu swobodnego pik nadciśnienia podmuchowej fali padającej dla badanych aluminizowanych mieszanin jest niższy niż ten, który został zarejestrowany dla ładunków RDX_{fl} o tej samej masie. Jednakże wartości impulsów są zbliżone. To oznacza, że cząstki aluminium reagują z gazowymi produktami rozkładu azotanu amonu również w trakcie ich rozlotu w przestrzeni otwartej.

Oprócz aluminium do podwyższenia zdolności detonacyjnych często stosuje się stop aluminium i magnezu Al_3Mg_4 (PAM). W pracy [13] badano wpływ zawartości tego stopu na charakterystykę fali detonacyjnej kompozycji opartych na RDX_{fl} . Wykonywano te same pomiary co w poprzednich publikacjach, czyli pomiar prędkości detonacji, QSP oraz ciepła detonacji w bombie kalorymetrycznej. Wykonano również obliczenia termochemiczne dla badanych kompozycji.

Okazało się, że uzyskuje się większą zgodność między eksperymentalną prędkością detonacji a obliczoną, jeśli założy się, że dodatki w mieszaninach są chemicznie obojętne, czyli że ani Al, ani Mg nie reagują w strefie reakcji fali detonacyjnej z produktami rozkładu RDX_{fl} . Otrzymane ciepło detonacji było zdecydowanie wyższe niż energia całkowita obliczona przy założeniu inercyjności Al i Mg, jednocześnie dużo niższa, jeśli założono, że te metale są reaktywne. Udowodniono, że około połowa masy sproszkowanego PAM bierze udział w reakcji z gazowymi produktami detonacji w bombie kalorymetrycznej. Wartości QSP dla mieszanin RDX_{fl} /PAM są wyższe niż otrzymane dla czystego RDX_{fl} , co oznacza, że w komorze zachodzi reakcja metali z tlenem i produktami detonacji. Pik nadciśnienia i impuls fali padającej testowanych mieszanin z proszkiem PAM był wyższy niż zmierzony

dla czystego RDX_{fl} . Stąd wniosek, że cząstki Al_3Mg_4 dopalają się, reagując z gazowymi produktami detonacji i z powietrzem.

3. Ciekłe mieszaniny wybuchowe

Termobaryczne materiały wybuchowe, w skład których wchodzi paliwo ciekłe, przypominają mieszaniny paliwowo-powietrzne FAE (*Fuel Air Explosives*) zarówno w mechanizmie działania, jak i w strukturze obłoku. W ciekłych mieszaninach termobarycznych wykorzystuje się egzotermiczny rozkład paliwa zmieszanego ze sproszkowanym metalem, zazwyczaj jest to 40-75% metalu i 10-20% rozpraszającego ładunku materiału wybuchowego [14]. W przypadku tego typu materiałów uzyskuje się największe gęstości energii, ponieważ zawierają one procentowo więcej paliwa niż inne rodzaje ładunków termobarycznych.

W pracy [14] autorzy próbowali porównać stałe mieszaniny wybuchowe z ciekłymi na bazie IPN, wyznaczając współczynniki trotylowe takich kompozycji. Do badań wykorzystano sferyczne ładunki z paliwem płynnym i wewnętrznym, stałym ładunkiem rozpraszającym z plastycznego pentrytu. Jako podstawowe paliwo w ładunkach termobarycznych zastosowano IPN, następnie wykonano badania z mieszaniną IPN z azotanem 2-etyloheksylu (2-EHN), jak również z mieszaniną IPN z paliwem Diesla. Jako paliwo stałe testowano magnez ($200\ \mu\text{m}$) i aluminium ($5\text{-}10\ \mu\text{m}$) oraz aluminium aktywowane kompleksem fluorku z nikiem — patenty [15-16]. Oprócz tego stosowano elektron, czyli stop magnezu z glinem, krzemem, manganem i cynkiem ($100\ \mu\text{m}$), węgiel drzewny, sproszkowany, czerwony fosfor oraz amorficzny bor. Proszek metalu i paliwo były tłoczone do wnętrza kuli przez jeden z połączonych przewodów wężowych aż do całkowitego usunięcia powietrza. Materiałem odniesienia była typowa kompozycja do wyznaczania równoważnika TNT, a mianowicie kilogramowa kula wykonana z odlewanej TNT, z umieszczonym w niej detonatorem z prasowanego TNT. Pomiary przeprowadzono na otwartej przestrzeni, aby możliwe było użycie prostego modelu do obliczeń równoważnika energii i dlatego, że jest to standardowa metoda wyznaczania ekwiwalentu trotylowego. Autorzy opracowania, wspierając się danymi literaturowymi uznali, że konieczne jest użycie kulistych ładunków, ponieważ jakiegokolwiek odstępstwo od symetrii może powodować silne mieszanie w obszarze przepływu i niejednorodną propagację fali ciśnienia na bliskich odległościach [17-19]. Ładunki zawieszono na wysokości 12 m nad ziemią pomiędzy dwoma prętami. Czujniki ciśnienia zamontowano na trzech różnych odległościach. Najdalszy umieszczono tam, gdzie spodziewano się krawędzi obłoku (ok. 4,7 m), najbliższy — tak, aby rejestrował maksymalne ciśnienie (ok. 2 m), a trzeci umieszczono pośrodku tych dwóch. Przyjęto takie rozmieszczenie czujników, aby zbadać, czy energia fali podmuchowej rośnie czy maleje w miarę jej rozchodzenia się, czyli czy mają miejsce reakcje endo- czy

egzoenergetyczne. Innym powodem takiego rozmieszczenia czujników był zamiar pomiaru prędkości rozchodzenia się fali.

Na podstawie wykonanych doświadczeń ustalono, że w wybuchu termobarycznym zapłon następuje po zmieszaniu się paliwa z otaczającym powietrzem i rozpoczyna się w zewnętrznej części obłoku gazowego. W wyniku tego ma miejsce zjawisko implozji, które zamyka chmurę i w konsekwencji prowadzi do wygenerowania silnego, długotrwałego ciśnienia wewnątrz obłoku. Aby nastąpił efekt implozji, sproszkowany metal powinien mieć strukturę opóźniającą zapłon, a zarazem powinien szybko spalać się, natomiast składnik palny produktów rozkładu powinien mieć zdolność do wzbudzenia zapłonu w momencie, gdy miesza się z powietrzem. Autorzy doszli do wniosku, że najlepiej te wymogi spełnia IPN z uwagi na jego zdolność do generowania wysokiego stężenia stabilnych, wolnych rodników, które ulegają ponownemu zapłonowi, gdy mieszają się z palnymi produktami rozkładu IPN obecnymi w powietrzu. Uważa się, że azotany i nadtlenki również należą do tej kategorii substancji i ich duża zawartość w organicznym paliwie powinna prowadzić do stworzenia korzystnych warunków dla wystąpienia implozji. Sproszkowany metal nie powinien w zasadzie reagować na etapie anaerobowym, ale w etapie aerobowym powinien zapalać się łatwo. Najlepiej służy do tego celu aktywowane aluminium. Uznano, że magnez spala się zbyt szybko w fazie anaerobowej i nie wymaga dużej ilości tlenu, co powoduje bardzo krótki czas trwania impulsu ciśnienia. Zwykle aluminium natomiast nie ulega zapłonowi, chyba że jest bardzo rozdrobnione, ale wówczas spala się również bardzo szybko i prowadzi do wzmocnienia fali uderzeniowej w etapie anaerobowym, zamiast wytworzenia długo trwającego impulsu ciśnienia.

Od składu kompozycji wybuchowej i paliwa zależy również rozkład energii. Ładunki o zwiększonych zdolnościach podmuchowych (EBX) wytwarzają dużą porcję energii we wczesnym etapie wybuchu, podczas gdy prawdziwe materiały termobaryczne (TBX) i materiały typu FAE przesuwają uwalnianie się energii do etapu aerobowego, a FAE generuje prawie w 100% wybuch aerobowy. Stałe materiały termobaryczne i materiały o podwyższonych zdolnościach podmuchowych uwalniają od 2/3 do 3/4 swojej energii w początkowej fazie anaerobowej, podczas gdy ciekłe materiały termobaryczne tylko od 1/3 do 1/2, zostawiając resztę paliwa na spalanie aerobowe. Z punktu widzenia przebiegu ciśnienia w obłoku ta różnica jest bardzo istotna. Dlatego też zawartość składnika spalającego się w etapie aerobowym powinna być jak największa. Jednakże w przypadku stałych paliw w kompozycji nawet nadmiar proszków metali nie gwarantuje wysokiego stopnia spalania aerobowego. Ustalono natomiast, że w przypadku zastosowania IPN jako paliwa, można użyć większej ilości sproszkowanego metalu, uzyskując potencjalnie wyższe poziomy energii i ciśnienia.

Analiza wyników przeprowadzonych w pracy [14] obliczeń i doświadczeń wykazała, że istnieją duże różnice w opóźnieniu spalania aerobowego dla badanych

materiałów wybuchowych. Dla ładunku 1 kg TNT pełne spalanie aerobowe zachodzi w czasie mniejszym niż 2 ms od zainicjowania wybuchu, a w przypadku materiałów termobarycznych o tej samej masie początek spalania w powietrzu obserwowany jest po minimum 7-8 ms. Stąd wyciągnięto wniosek, że w przypadku wybuchów materiałów termobarycznych lub też mieszanin paliwowo-powietrznych, należy brać pod uwagę tylko te równoważniki trotylowe, które wyznaczane są na podstawie przebiegów ciśnienia mierzonego na zewnątrz chmury paliwa w znacznej odległości od ładunku.

W pracy [20] wykonano szereg prób w celu ujawnienia różnic pomiędzy wybuchem standardowego ładunku trotylu a wybuchem aluminizowanego, hybrydowego materiału wybuchowego o nazwie RISAL. Ten drugi materiał zalicza się do tzw. ładunków termobarycznych i stanowi mieszaninę 53% azotanu izopropylu (ciecz) z 29% proszku heksogenu, 14,5% płatkowanego (5 μm) aluminium oraz 3,5% krzemionki. Gęstość kompozycji wybuchowej wynosiła 1,35 g/cm^3 , zaś prędkość detonacji — 5900 m/s. Ładunek RISAL miał kształt cylindryczny, a stosunek długości do średnicy był równy 2. Masy ładunków trotylu oraz RISAL-u wynosiły 1 kg. Badania prowadzono w przestrzeni otwartej i w betonowym budynku o objętości 200 m^3 . W próbach na otwartej przestrzeni ładunki umieszczono na środku stalowej płyty, poziomo do podłoża, natomiast w budynku ładunki umieszczono centralnie na podłodze. Parametry fali podmuchowej mierzono specjalnie do tego celu zaprojektowanymi czujnikami, umieszczonymi w różnych odległościach od środka ładunku (1,5; 2,5 i 3,5 m na otwartej przestrzeni i 0,25; 2,5; 2,75 i 3 m w budynku). Strumień promieniowania cieplnego i temperaturę ekspandujących produktów detonacji mierzono, używając fotodetektorów rejestrujących sygnał dla dwóch długości fali. W pomiarach na otwartej przestrzeni fotodiody ustawiono w odległości 30 m od ładunku i wysokości 0,5 m nad ziemią, natomiast w pomiarach w budynku — za drzwiami.

Wyniki pomiarów ciśnienia na otwartej przestrzeni w odległości 2,5 m od ładunku wykazały, że piki nadciśnienia w przypadku mieszaniny RISAL są około 1,5 raza wyższe niż piki po wybuchu ładunku trotylu. Poza tym dla RISAL-u dłuższy był czas trwania fazy dodatniej w fali podmuchowej. Stwierdzono ostatecznie, że na bliższych odległościach (1-2 m od ładunku) nadciśnienie na froncie padającej fali podmuchowej jest w przypadku ładunku RISAL 1,5-1,7 razy wyższe niż dla ładunków TNT, jednak różnice te zanikają wraz ze wzrostem odległości. Podobną tendencję zaobserwowano przy porównaniu przebiegu impulsu fazy dodatniej. Z pomiarów ciśnienia wysnuło więc dwa wnioski. Po pierwsze stwierdzono, że na bliskich odległościach (1-3 m od ładunku o masie 1 kg) ładunek RISAL ma lepsze zdolności podmuchowe (burzące) niż ładunek TNT. Po drugie, ciśnieniowy równoważnik trotylowy dla wybuchu RISAL-u nie ma wartości stałej i maleje wraz ze wzrostem odległości.

W przypadku wybuchu w budynku pik nadciśnienia zmierzonego w odległości 3 m od ładunku był również wyższy dla RISAL-u. Na zarejestrowanych przebiegach

ciśnienia bardzo wyraźnie widać fale odbite od ścian budynku. Jednakże fale te nie zaburzają amplitudy nadciśnienia padającej fali podmuchowej, jeśli tylko czujnik ustawiony jest w odległości przynajmniej 0,25 m od ściany. Wydłuża się jednak czas trwania fazy dodatniej w porównaniu z wybuchem na otwartej przestrzeni. Cechą wyróżniającą wybuch w zamkniętej przestrzeni jest pojawienie się wielu pików ciśnienia po czasie ok. 10 ms od momentu dotarcia do czujnika padającej fali podmuchowej. Amplituda fali odbitej osiąga ok. 2/3 wartości nadciśnienia pierwotnej fali podmuchowej. Jednocześnie czas trwania wtórnego impulsu wydaje się być nawet dłuższy niż pierwsza faza kompresji. Pozwala to stwierdzić, że badane ładunki mają zdecydowanie większe zdolności burzące w obiekcie zamkniętym niż na otwartej przestrzeni.

Pomiary temperatury na otwartej przestrzeni wykazały, że przebieg temperatury kuli ognistej można podzielić na trzy główne fazy. Przy wybuchu trotylu, zaraz po zainicjowaniu detonacji, temperatura produktów wybuchu gwałtownie spada do wartości poniżej 2000 K, a następnie szybko rośnie do określonej wartości maksymalnej. Ten wzrost związany jest z dopalaniem się ekspandujących produktów detonacji, w tym cząstek węgla. Ostatnia faza to powolny spadek temperatury. Podobny charakter przebiegu można było zaobserwować przy wybuchu RISAL-u. Jednakże typowa wartość temperatury dla tej mieszaniny była o około 200 K wyższa niż dla TNT. Tego efektu należało oczekiwać, ponieważ temperatura spalania cząstek aluminium jest zdecydowanie wyższa niż temperatura spalania węgla.

Przeprowadzone w pracy [20] badania wykazały, że ładunki termobaryczne oparte na heksogenie, azotanie izopropylu i aluminium charakteryzują się lepszymi zdolnościami podmuchowymi niż ładunki trotylowe oraz generują wyższe efekty cieplne w otoczeniu. Zamknięcie przestrzeni wybuchu znacząco wzmacnia ich własności termobaryczne ze względu na wzmożony proces dopalania spowodowany dodatkowym mieszaniami i sprężaniem ośrodka gazowego przez fale odbite.

Dla zbadania procesu detonacji ciekłych materiałów wybuchowych zawierających cząstki metali ważne jest poznanie warunków krytycznych dla ich zapłonu w skali laboratoryjnej oraz w czasie wybuchu ładunków na otwartej przestrzeni. Taki właśnie cel miały badania podjęte przez autorów pracy [21]. Testowane ładunki to gęsto upakowane złoża sferycznych cząstek magnezu nasycone ciekłym materiałem wybuchowym. Według autorów ten rodzaj heterogenicznego materiału wybuchowego bardzo dobrze nadaje się do badania wpływu różnych parametrów fizycznych (rozmiar cząstek, udział masowy składnika stałego) i chemicznych (wrażliwość ciekłego materiału wybuchowego, reaktywność cząstek) na rozprzestrzenianie się fali detonacyjnej. Wiadomo, że wymienione parametry mają wpływ na prędkość detonacji i wielkość klasycznej średnicy krytycznej ładunku. Dla materiałów heterogenicznych zawierających wtrącenia metali wprowadzono pojęcie dodatkowej średnicy krytycznej ładunku dla szybkiego zapłonu cząstek metalu (CDPI — *Critical Charge Diameter for Particle Ignition*). Jest to najmniejsza średnica ładunku, dla

której występuje zapłon cząstek metalu rozproszonych w produktach detonacji oraz w powietrzu i ich szybkie spalanie. Jeżeli ładunek ma średnicę mniejszą od krytycznej CDPI, to obserwuje się „spóźnioną” reakcję (reakcja o zbyt dużej skali czasowej, by uwalniana energia mogła wpływać na parametry fali podmuchowej). Dla małych ładunków cząstki pozostają całkowicie inercyjne chemicznie. Podkrytyczne ładunki (z opóźnioną reakcją) generują fale podmuchowe w przybliżeniu o jeden rząd wielkości słabsze niż ładunki nadkrytyczne z szybką, jednorodną reakcją w całej chmurze cząstek. Pomiędzy nadkrytycznym i podkrytycznym reżimem reakcji istnieje reżim przejściowy, gdy w chmurze cząstek pojawiają się lokalnie obszary szybkiej reakcji, a moc fali podmuchowej jest pośrednia między silną falą ładunku nadkrytycznego i słabą ładunku podkrytycznego. Istotny jest fakt, że tak zdefiniowana średnica krytyczna zależy od termodynamicznej historii cząstek w czasie ich rozpraszania oraz podatności metalu na zapłon. Zainicjowanie palenia cząstek metalu zależy nie tylko od takich parametrów, jak rodzaj materiału cząstki, jej rozmiar, kształt, powierzchnia, ale zależy też od szybkości jej grzania oraz atmosfery utleniającej [22-25]. Zapłon może zachodzić szybko, czyli w tak krótkim czasie, że energia uwalniana przy spalaniu cząstek zwiększa siłę fali podmuchowej, albo być opóźniony. Jeśli jest na tyle opóźniony, że gęstość otaczającego gazu drastycznie spada, wówczas spalanie cząstek może mieć niewielki wpływ na rozprzestrzenianie się fali podmuchowej.

W pracy [21] do wyznaczenia minimalnej temperatury potrzebnej do utlenienia cząstek magnezu zastosowano technikę opartą na „metodzie śladów” [25]. Cząstki metalu wprowadzane były do wnętrza kwarcowej rury z wolnym przepływem powietrza podgrzanego grzałką. W doświadczeniach używano cząstek sferycznego magnezu o rozmiarach 60, 85, 240 i 520 μm . W przypadku cząstek o średnicy 60 μm temperatura zapłonu w powietrzu wynosiła 610°C, chociaż dochodziło czasem do zapłonu tych cząstek w temperaturze 560°C. Za pomocą zdjęć z kamery cyfrowej ustalono, że czas wypalenia się cząstek wynosi 5-10 ms. W drugiej z zastosowanych technik badania procesu utleniania cząstek magnezu wykorzystano zestaw łączący termograwimetr z dyskretnym kalorymetrem skaningowym. Na podstawie pomiarów stwierdzono, że mimo iż reakcja utleniania cząstek o średnicy 85 μm zaczyna się w temperaturze niewiele powyżej 500°C, to przyspiesza w temperaturze ok. 560°C, która odpowiada temperaturze zapłonu wyznaczonej w „metodzie śladów”.

Oprócz badań laboratoryjnych, w pracy [21] przeprowadzono również testy polowe, w których badano średnicę krytyczną ładunku dla zapłonu cząstek w ciekłym materiale wybuchowym. Użyto sferycznych ładunków zawierających upakowane złoża cząstek magnezu nasyconych nitrometanem (NM) uwrażliwionym trietyloaminą (TEA, zawartość 10% wag.). Ładunki miały średnicę od 3,6 cm do 33 cm. Od środka inicjowane były małym, pięciogramowym ładunkiem kruszącego materiału wybuchowego. Ciśnienie w fali podmuchowej było mierzone przez sześć czujników, umieszczonych w odległości od 0,6 m do 2,5 m od środka ładunku.

Proces rozproszenia cząstek i ich zapłon rejestrowały dwie kamery cyfrowe. Szczegółowy opis zastosowanej metody badań zawarty jest w opracowaniu [27]. Podczas wybuchowego rozproszenia cząstek magnezu obserwowano trzy rodzaje zjawisk: i) szybki zapłon, ii) opóźniony zapłon, lub też iii) całkowity brak zapłonu cząstek. W przypadku szybkiego zapłonu pierwsza klatka na kamerze rejestrowała bardzo intensywne świecenie w całej chmurze cząstek. W drugim przypadku lokalny zapłon cząstek generował płomień, który rozprzestrzenił się w obszarze centralnym zawierającym produkty spalania i cząstki. Na tej podstawie autorzy wywnioskowali, że cząstki magnezu zapalają się, jeśli czas ich przebywania w gorących produktach spalania jest wystarczający do ich ogrzania do temperatury zapłonu. Skorelowano obserwowane trzy zjawiska spalania z wielkością cząstek i średnicą ładunku. Warunki dla szybkiego zainicjowania spalania metalu zależą od średnicy zarówno ładunku jak i cząstek. Dla proszku magnezu umieszczonego w sferycznych ładunkach o średnicy do 12,3 cm, średnica krytyczna cząstek dla szybkiego zapłonu leży między 85 i 240 μm . Dla cząstek o wielkości 85 μm do zajścia szybkiego zapłonu wystarczą ładunki o średnicy 3 cm, dla cząstek 240 μm średnica ta wynosi 21,5 cm. W przypadku mniejszych ładunków zapłon cząstki może zachodzić z opóźnieniem, po kilku milisekundach, ale wówczas spalanie cząstek nie jest tak szybkie, aby zwiększyła się siła fali podmuchowej. Dla ładunków cylindrycznych średnica krytyczna dla cząstek 85 μm wynosi ok. 18-25 mm, zaś dla cząstek o wielkości 240 μm wynosi powyżej 49 mm. Tak więc średnice krytyczne CDPI dla ładunków cylindrycznych są zdecydowanie niższe niż w przypadku ładunków sferycznych.

Podobny problem inicjowania spalania cząstek metalu w ciekłym materiale wybuchowym był badany w pracy [28]. Tym razem autorzy testowali ładunki zawierające upakowane złoża cząstek aluminium o rozmiarach od 10 μm do 110 μm , nasycone uwrażliwionym nitrometanem. Stwierdzili, że zapłon i warunki reakcji zależą nie tylko, jak poprzednio, od średnicy ładunku i rozmiaru cząstek, ale również od ograniczającej materiał otoczki. Potwierdzili tezę o istnieniu średnicy krytycznej ładunku dla zapłonu cząstek. O ile dla cząstek kulistego magnezu o średnicy od 60 do 500 μm w ładunkach sferycznych średnica CDPI jest proporcjonalna do średnicy cząstek w potęgze 1,75 [20], to w przypadku sferycznych cząstek aluminium o średnicy od 2 do 10 μm w długich, cylindrycznych ładunkach zależność CDPI od średnicy ładunku i cząstek ma kształt litery U, z minimum CDPI odpowiadającemu średniemu wymiarowi cząstek ok. 50 μm . Wyróżniono trzy reżimy reakcji (odpowiedzi) cząstek: i) podkrytyczny (brak zapłonu rozproszonych cząstek), ii) okołokrytyczny (nieciągła reakcja w ekspandującej chmurze cząstek) oraz iii) nadkrytyczny (szybka, ciągła reakcja w całej chmurze cząstek). Te trzy reżimy odpowiadają, w odwrotnej kolejności, trzem zjawiskom obserwowanym w pracy [21].

Autorzy w pracy [28] skupili się głównie na badaniu wpływu metalowej otoczki na zapłon i reaktywność cząstek aluminium przy detonacji cylindrycznego, skondensowanego ładunku materiału wybuchowego. Badania dotyczyły wpływu

impedancji falowej materiału otoczki oraz jej grubości na proces spalania cząstek aluminium. Badano średnicę krytyczną CDPI, charakterystyki fali podmuchowej oraz rozpad otoczki na odłamki. Próbowano również zbierać i analizować małe odłamki, które mogą wpływać na proces dopalania i falę podmuchową. Do badań użyto trzech rodzajów otoczek. Pierwszą z nich była rura stalowa o grubości ścianki 2,1 mm, dwie kolejne były wykonane z aluminium o grubości 2,1 oraz 6,35 mm. Grubsza rura aluminiowa miała masę w przybliżeniu równą stalowej. W testach wykorzystywano różne rozmiary cząstek aluminium: ok. 13 μm (H-10), ok. 54 μm (H-50) i ok. 114 μm (H-95). Udział masowy aluminium w mieszaninie wahał się od ok. 69% dla H-10 do ok. 72% dla H-50 i H-95.

Na podstawie wykonanych analiz oceniono opóźnienie zapłonu rozpraszanych cząstek w warunkach detonacji w stalowych i aluminiowych rurach. Wynosi ono 13-18 μs dla cząstek o średnicy 13 μm oraz 30-63 μs dla cząstek 54 μm . W reżimie nadkrytycznym reakcji cząstek, rozmiary odłamków pochodzących z otoczki były mniejsze, a fala podmuchowa silniejsza w porównaniu z wynikami otrzymanymi w reżimie okołokrytycznym. W tym ostatnim przypadku siła fali podmuchowej zmieniała się wraz z zawartością objętościową reagujących cząstek oraz szybkością reakcji chmury cząstek. Zaobserwowano również obecność mniejszych odłamków pochodzących z cienkiej aluminiowej otoczki, o wielkości ok. 100 μm , i stwierdzono, że tworzą się one na skutek oporu powietrza działającego na krawędzie większych odłamków podczas ich rozproszenia.

W kolejnym artykule [29] poświęconym ciekłym mieszaninom zawierających złoża sferycznych cząstek metalu (NM uczulany TEA, magnez lub aluminium) badano wpływ skali eksperymentu na charakterystyki fal podmuchowych. Zastosowane sferyczne ładunki miały średnice od 3,6 cm (25 g Mg) do 33 cm (20 kg Mg) w przypadku magnezu i od 7,7 cm (350 g Al) do 28,5 cm (20 kg Al) w przypadku aluminium. Średni rozmiar cząstek magnezu wynosił 60, 85, 240 i 520 μm , zaś aluminium 3, 8, 13, 36, 54 i 114 μm . Detonację inicjowano ładunkiem 5-10 g C4 umieszczonym w centrum szklanej kuli zawierającej mieszaninę nitrometanu i cząstek metalu. Przebieg ciśnienia w fali podmuchowej rejestrowano, wykorzystując sześć czujników umieszczonych w odległości od 0,6 do 3,5 m od środka ładunku. Wybuch obserwowano za pomocą szybkiej kamery video.

Tak jak w opracowaniu [21], w przypadku cząstek magnezu zaobserwowano trzy reżimy spalania cząstek. Generalnie stwierdzono, że zastosowanie małych cząstek i większych ładunków zmniejsza stosunek czasu ogrzewania cząstek do czasu ich przebywania w produktach spalania podczas rozpraszania, co ułatwia proces spalania. To, czy cząstki spalają się szybko, ma ogromny wpływ na charakterystyki generowanej fali podmuchowej. Dla ładunków o średnicach 12,3 oraz 21,5 cm stwierdzono, że w przypadku szybkiego spalania cząstek w reżimie nadkrytycznym, maksymalne nadciśnienie fali podmuchowej jest prawie o rząd wielkości większe niż dla reżimu opóźnionego spalania, zaś impuls właściwy jest

około pięć razy większy. Najwyższe piki nadciśnienia i impulsu otrzymano dla cząstek magnezu o średnicy 85 μm , które spalały się w reżimie nadkrytycznym we wszystkich ładunkach, niezależnie od ich wielkości.

Wyniki pomiarów (amplituda i impuls fali podmuchowej) przedstawiono na wykresach w funkcji względnej odległości od środka ładunku, tzn. odległości odniesionej do charakterystycznego promienia, którego wartość jest proporcjonalna do pierwiastka trzeciego stopnia z energii uwalnianej w trakcie wybuchu (sumy energii wybuchu nitrometanu i energii całkowitego spalania proszków metali). W przypadku proszku magnezu o średnicy 85 μm , zależności amplitudy i impulsu od względnej odległości można opisać w zasadzie pojedynczą krzywą dla wszystkich zastosowanych ładunków (z wyjątkiem impulsu fali podmuchowej generowanej przez największy ładunek zawierający 5,5 kg proszku Mg). Jeśli zastosowano cząstki o średnicy 240 μm , to największą amplitudę i impuls miała fala podmucha wytwarzana przez największy ładunek, zawierający masę 12 kg cząstek Mg. W tym przypadku wyskalowane wartości amplitudy i impulsu były zbliżone do tych używanych dla ładunków z cząstkami o średnicy 85 μm .

W pracy [29] obserwowano również proces spalania cząstek aluminium w sferycznych ładunkach. W przeciwieństwie do ładunków cylindrycznych, w których dla niektórych rozmiarów cząstek (np. 114 μm) proces ich spalania był przerywany, cząstki w ładunkach sferycznych reagowały zawsze, szybko bądź z opóźnieniem. Zaobserwowano trochę inne reżimy reakcji w porównaniu do tych opisanych w artykule [28], a mianowicie: i) obojętne rozproszenie cząstek, po którym ma miejsce spalanie cząstek z opóźnieniem kilku milisekund, fala deflagracji rozchodzi się powoli w całej reszcie cząstek w czasie 10 ms, (ii) szybkie reakcje cząstek zachodzące w wyznaczonych miejscach lub paskach wewnątrz zdyspergowanej chmury cząstek, gdzie 10-90% cząstek zaczyna reagować już w pierwszej milisekundzie, oraz (iii) szybką reakcją jednorodną zewnętrznej warstwy zdyspergowanej chmury cząstek (cząstki w środku chmury są niewidzialne i mogą, ale nie muszą podlegać jednorodnemu spalaniu). Z obliczeń termodynamicznych wykonanych przez autorów pracy [29] wynika, że całkowite utlenienie aluminium w produktach detonacji w czasie ich adiabatycznej ekspansji zachodziło jedynie w przypadku początkowego udziału masowego aluminium mniejszego niż 30%.

Dla zakresu udziału masowego aluminium w doświadczeniach w granicach 65-80%, masa tego metalu, która może teoretycznie reagować z produktami detonacji, zmienia się odpowiednio od ok. 30 do 13%. Tak więc w miarę wzrostu udziału początkowego Al rola jego spalania w powietrzu zdecydowanie rośnie.

W podsumowaniu autorzy pracy [29] stwierdzili, że wyniki eksperymentalne wskazują, że w przypadku cząstek magnezu istnieje pewien krytyczny rozmiar ładunku dla ich szybkiego spalania. Powyżej tego rozmiaru parametry fali podmucha, skalowane we współrzędnych energetycznych, znacznie spadają, ponieważ chociaż cząstki metalu zapalają się szybko, to większość z nich pozostaje daleko

w tyle za falą uderzeniową w powietrzu. W przypadku cząstek aluminium, stopień ich palenia wewnątrz rozproszonej chmury ma większy wpływ na skalowane parametry podmuchowe.

Uproszczone, jednowymiarowe modelowanie generowania i propagacji fali podmuchowej wskazuje na to, że przemiana energii chemicznej na podmuchową jest maksymalna, jeśli palące się cząstki pozostają z tyłu, ale blisko fali podmuchowej [30]. W przypadku ładunków o średnicy 12,3 cm cząstki magnezu o wielkości 85 μm podążają za czołową falą uderzeniową. Z obliczeń wynika również, że dla ładunków większych cząstki pozostają daleko w tyle za falą podmuchową i z tego powodu wzrost parametrów fali może być mniejszy. Stąd dla cząstek 85 μm optymalna średnica ładunku wynosi poniżej 12 cm (ok. 1 kg Mg). Cząstki o średnicy 240 μm przenikają bardzo szybko front fali uderzeniowej generowanej przez ładunek o średnicy 12,3 cm. Aby cząstki o tej wielkości pozostawały za falą podmuchową, potrzebny jest ładunek o średnicy przynajmniej 35 cm. Oszacowanie to dobrze koreluje z wynikami eksperymentalnymi, że dla cząstek magnezu o średnicy 240 μm optymalna wielkość ładunku jest większa niż 28,5 cm (ok. 12 kg Mg).

W pracy [31] zajęto się wyznaczeniem przebiegu ciśnienia wywieranego na pojedynczą ścianę w trakcie odbicia się fali podmuchowej po wybuchu heterogenicznego, sferycznego ładunku zawierającego upakowane złoża cząstek metali, nasycone ciekłym nitrometanem uwrażliwionym trietyloaminą (10% wag.). W badaniach używano cząstek metali aktywnych oraz obojętnych, jednakże w pracy [31] zawarto jedynie wyniki doświadczeń z aluminium o trzech różnych wielkościach (H-30, H-50 i H-95 o średnicach odpowiednio 36, 54 i 114 μm) oraz aktywnym metalem o nieregularnym kształcie i wysokiej gęstości zwanym HDRM. Masy ładunków wynosiły dla NM/HDRM ok. 2,6 kg, a dla NM/Al ok. 1,8 kg. Wyniki dla tych kompozycji porównano z wynikami otrzymanymi po wybuchu sferycznego ładunku homogenicznego C4 o masie 1 kg. Testowany ładunek umieszczano w odległości ok. 10 średnic ładunku, liczonej od środka pionowo ustawionej płyty. Na płycie zamontowano 6 czujników piezoelektrycznych, osłoniętych powłoką silikonową chroniącą je przed oddziaływaniem gorących produktów wybuchu. Rozłot cząstek rejestrowany był za pomocą kamery wideo z szybkością 31 007 klatek na sekundę. We wszystkich przypadkach oddziaływanie fali odbitej od ziemi z falą padającą generowało powstanie fali Macha, która oddziaływała bezpośrednio na pionową ścianę.

Wyniki pomiarów pozwoliły sformułować kilka wniosków. Proces detonacji metalizowanych materiałów wybuchowych realizowany blisko twardej ściany może prowadzić do wzmocnienia siły działającej na powierzchnię tej ściany, w porównaniu do homogenicznych materiałów wybuchowych. Dzieje się tak w wyniku oddziaływania cząstek z powierzchnią lub też wzajemnej interakcji pomiędzy cząstkami a falami odbitymi, co prowadzi do wzrostu uwalnianej energii i wytworzenia się lokalnego ciśnienia wywieranego na ścianę. W przypadku aluminiowanych materiałów wybuchowych umieszczonych w odległości ok. 10 średnic ładunku od ściany

wartości ciśnienia i impulsu fali odbitej odniesione do wartości fali padającej były mniejsze (dla ciśnienia) bądź równe (dla impulsu) odpowiednim wartościom otrzymanym dla homogenicznego materiału wybuchowego (po ich przeskalowaniu do tej samej masy ładunku). Dla kontrastu mieszaniny NM/HDRM generowały znacznie wyższe wartości impulsu. Stwierdzono, że o ile materiały homogeniczne i ładunki aluminizowane są skuteczne na otwartej przestrzeni, o tyle mieszaniny NM/HDRM uzyskują lepsze parametry podmuchowe w całkowicie lub częściowo zamkniętych pomieszczeniach.

Otrzymane wyniki pozwalają autorom pracy [31] przypuszczać, że w przypadku małych cząstek znajdujących się w stanie ciekłym w produktach wybuchu, o temperaturze topnienia poniżej ich adiabatycznej temperatury spalania, oddziaływanie kropli cieczy ze ścianą daje niewielki wzrost lokalnego działania ciśnienia i impulsu na tę ścianę. Może to być spowodowane rozproszeniem kropli cieczy na powierzchni płyty, a następnie szybkim transportem ciepła do ściany, oziębieniem i zamrożeniem procesu spalania kropli cieczy. Natomiast w przypadku dużych cząstek metali, których jądro w procesie rozlotu i dopalania pozostaje raczej w stanie stałym niż ciekłym, szybki kontakt ze ścianą może prowadzić do gwałtownej fragmentacji tych cząstek i odbicia się ich od powierzchni ściany. Powoduje to zwiększenie powierzchni palenia cząstek metalu i w rezultacie zwiększa się lokalnie ciśnienie gazu i impulsu całkowitego działającego na ścianę.

Przestawiony scenariusz spalania cząstek metali dotyczy jednak pojedynczego odbicia fali podmuchowej. Natomiast w przypadku wybuchu w przestrzeniach zamkniętych, gdzie mamy do czynienia z wielokrotnym odbiciem fal uderzeniowych od ścian i ich oddziaływaniem z reagującą mieszaniną gazów, fragmentacja cząstek przy odbiciu od ścian może być bardziej efektywna, gdy cząstki metali są w stanie ciekłym, a nie stałym. Stąd hipoteza, że spalanie cząstek metali w stanie ciekłym jest bardziej skuteczne, gdy podwyższymy quasi-statyczne ciśnienie w przestrzeniach zamkniętych, podczas gdy spalanie cząstek w stanie stałym jest bardziej efektywne, gdy obciążenie działające na pojedynczą ścianę będzie zwiększone.

Prace nad badaniem parametrów detonacji i charakterystyk fal podmuchowych dla ciekłych mieszanin wybuchowych prowadzone były również w WAT, w Zakładzie Materiałów Wybuchowych. W pracy [32] badano mieszaniny składające się z nitrometanu z dodatkiem PMMA (4% masy) i PAM (stopu magnezu i glinu) pełniącego rolę paliwa. Kompozycję przygotowano, mieszając proszek stopu glinu i magnezu z jednorodną, lepką mieszaniną NM/PMMA przynajmniej na dwie godziny przed wykonaniem strzału.

W badaniach mierzono prędkość detonacji ładunków o masie 200 g za pomocą czujników zwarciovych, umieszczonych w otworach rury winidurowej. Wykonano również test cylindryczny w rurkach miedzianych dla samego nitrometanu z PMMA oraz dla mieszanin zawierających 15, 30, 45 i 60% PAM. Oprócz tego mierzono charakterystyki fal podmuchowych generowanych przez testowane ładunki. W celu oszaco-

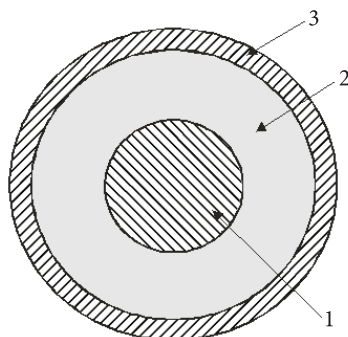
wania stopnia przereagowania metali w strefie reakcyjnej oraz w trakcie rozprężania się produktów detonacji wykonano obliczenia gazodynamiczne oraz termochemiczne.

Na podstawie uzyskanych wyników autorzy pracy [32] stwierdzili, że prędkość detonacji testowanych mieszanin NM/PMMA/PAM jest mniejsza niż prędkość detonacji zagęszczonego nitrometanu. Z porównania obliczonych i eksperymentalnych prędkości detonacji wynika, że dodatki są inercyjne chemicznie w strefie reakcji fali detonacyjnej oraz nie ma jest równowagi termicznej między cząstkami PAM i produktami gazowymi. Wyznaczone z danych z testu cylindrycznego zdolności miotające mieszanin z metalicznym dodatkiem (15 i 30% PAM) są porównywalne, a nawet większe niż samego nitrometanu. Z porównania eksperymentalnych i obliczonych prędkości miotanych rurek miedzianych wynika, że w fazie napędzania rurek cząstki metaliczne reagują w dużym stopniu z produktami detonacji niezależnie od ich zawartości w mieszaninie. Dane literaturowe dowodzą, że aluminium nie reaguje w pierwszej fazie z produktami detonacji nitrometanu. Stąd wniosek, że dodatek magnezu przyspiesza reakcje spalania cząstek stopu. Autorzy badali również charakterystyki fal podmuchowych generowanych przez testowane ładunki. Maksymalne nadciśnienie i impuls fali podmuchowej dla mieszanin zagęszczonego nitrometanu z PAM były większe niż dla czystego zagęszczonego nitrometanu. Największy wzrost parametrów fali podmuchowej zaobserwowano dla zawartości 30 i 45% stopu w mieszaninie. Otrzymane wyniki świadczą jednoznacznie o tym, że spalanie cząstek PAM zachodzi również po detonacji ładunków bez metalowej otoczki.

4. Kompozytowe materiały i warstwowe materiały wybuchowe

Oddzielną grupę materiałów o podwyższonych parametrach podmuchowych stanowią materiały kompozytowe i warstwowe materiały wybuchowe. Materiały kompozytowe składają się z wybuchowej osnowy i dużych, makroskopowych wtrąceń niewybuchowych, zaś w warstwowych materiałach składniki te występują w postaci cylindrycznych warstw.

Patenty [33-34] dotyczą materiałów wybuchowych o podwyższonym efekcie cieplnym wybuchu, zdolnych do podtrzymywania ciśnienia w wydłużonym czasie w zamkniętych przestrzeniach, takich jak wypełnione powietrzem pokoje, jaskinie itp. Zastrzeżeniem patentowym objęto metalizowane kompozycje zawierające lepiszcze, reaktywny metal i utleniacz oraz opcjonalnie plastyfikator i katalizator. Opatentowano również ładunki materiału wybuchowego typu paliwo stałe — powietrze (SFAE — *Solid Fuel — Air Explosive*) o konstrukcji pierścieniowej. Typowy ładunek składa się z cylindrycznej warstwy (powłoki) zbudowanej z metalizowanej kompozycji 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 HMX, RDX lub 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. Reaktywny metal może reagować z produktami reakcji materiału wybuchowego i utleniacza niezależnie od stężenia tlenu.

Jedna z opatentowanych kompozycji metalizowanych może składać się z ok. 60-96% wag. proszku reaktywnego metalu, 4-10% lepiszcza i 0-36% utleniacza.

Opatentowane kompozycje wybuchowe, w zależności od składu i geometrii ładunku, mogą posiadać 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,
- 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 takimi kompozycjami jak tritonal (trotyl/aluminium 80/20).

W skład ładunku SFAE mogą wchodzić:

- a) proszki metali — ok. 50-80%
 - nanostrukturalne cząstki Al, B, Ti, Mg (rozmiar cząstek 20-500 nm),

- metastabilne mechanicznie stopy Al-Mg, Al-Mg-H, B-Mg, Al-B, Ti-B (1-50 μm),
- sferyczne cząstki Al (H-2 (2 μm) i H-5 (5 μm)), Ti, B, Mg lub ich kombinacje z nanocząstkami i cząstkami stopów,
- b) materiały wybuchowe — 30-60% (CL-20, RDX, HMX),
- c) utleniacze — ok. 12-36% (nadchloran amonu, sól amonowa dinitroaminy, azotan amonu, azotan baru),
- d) lepiszcza w kompozycjach metalizowanych — polimery zdolne do aktywnego wiązania metalu — 4-6% (Viton — kopolimer teflonu, NC — nitroceluloza, GAP — poliazcydek glicydu, Zeon — polimer estru kwasu akrylowego i inne),
- e) lepiszcza w materiałach typu PBX — 5-7% (HTPB, PCP, poliestry, GAP i inne),
- f) plastyfikatory — ok. 4% (FEFO, TEGDN, Bu-NENA, TMETN i inne),
- g) katalizatory przyspieszające reakcje — ok. 1% (nanostrukturalny lub rozdrobiony Fe_2O_3 , Cr_2O_3 i inne).

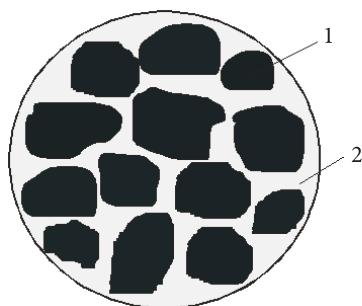
Patent [35] dotyczy prasowanych, aluminizowanych kompozycji wybuchowych i metod ich otrzymywania. Zainteresowanie nimi wynika z faktu, że zalicza się je do materiałów generujących podwyższony impuls ciśnienia (tak zwane materiały wybuchowe o zwiększonych parametrach podmuchowych lub termobaryczne materiały wybuchowe). Jednocześnie zaproponowane w patencie aluminowane kompozycje wybuchowe należą do materiałów o obniżonej wrażliwości.

Opisano metody otrzymywania kompozycji wybuchowej w postaci granulatu, przy czym aluminium i materiał wybuchowy są jednorodnie wymieszane w każdej granuli. W celu pasywacji aluminium pokrywane jest kwasem izostearydowym (0,3%) bądź woskiem. Prasowana kompozycja może zawierać od 5 do 55% aluminium, 45-95% RDX lub HMX oraz lepiszcze, którym jest mieszanina elastomeru poliakrylowego HyTemp 4454 z plastyfikatorem DOA (adypinian dioktylu). Zaproponowane lepiszcze umożliwia spełnienie przez otrzymane kompozycje wymagań stawianych materiałom wybuchowym przeznaczonym do zastosowania w mało wrażliwej amunicji.

Kompozycje wybuchowe wytwarzane są w procesie zawiesinowym. Kryształy materiału wybuchowego i pasywowane cząstki aluminium zalewane są wodą i podgrzewane, zanim zostanie dodany roztwór lepiszcza. Cała mieszanina ogrzewana jest do temperatury 100°C. W tej temperaturze rozpuszczalnik odparowuje z lepiszcza, które wiąże materiał wybuchowy i aluminium, tworząc granule. Na koniec granulaty jest odfiltrowywane. Tak otrzymana mieszanina jest bardziej jednorodna niż w przypadku mechanicznego mieszania. Ponadto wyjściowy materiał wybuchowy może być wilgotny, co zwiększa bezpieczeństwo procesu technologicznego.

Przedmiotem zainteresowania autorów patentu [36] 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)

Autorzy patentu dzielą składniki kompozycji w sposób następujący:

- materiał wrażliwy na falę uderzeniową — materiał detonujący po obciążeniu falą uderzeniową o amplitudzie co najmniej 5 kbar,
- materiał niewrażliwy na falę uderzeniową — materiał niedetonujący po obciążeniu falą uderzeniową o amplitudzie 25 kbar lub słabszą,
- materiał wrażliwy na ciepło — materiał zostanie zainicjowany i pali się gwałtownie przy normalnym ciśnieniu (1 atm), jeśli temperatura osiągnie wartość 600°C lub mniejszą,
- materiał niewrażliwy na ciepło — spalanie materiału nie zostanie zainicjowane w warunkach normalnego ciśnienia, jeśli temperatura nie osiągnie wartości co najmniej 1200°C.

Autorzy wyróżniają również dwa typy bodźców uderzeniowych i odpowiadające im odpowiedzi kompozycji wybuchowych:

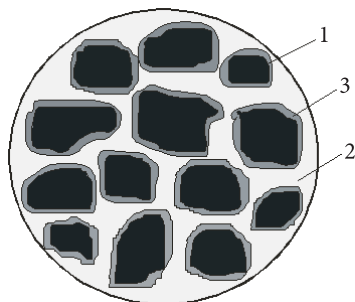
- słaby bodziec oznacza ciśnienie 10 kbar lub mniejsze, cząstki kompozycji nie zostaną pobudzone do detonacji, ale spalają się gwałtownie do wewnątrz,
- silny bodziec to ciśnienie minimum 30 kbar, cząstki wybuchają.

Makroskopowe granule (1) mają wymiary co najmniej 2 mm, są niewrażliwe na falę uderzeniową oraz wrażliwe lub nie na ciepło. Mogą składać się z:

- materiału wybuchowego (np. oktogen) i lepiszcza (np. HTPB),
- materiału wybuchowego (np. heksogen), mikroskopowych cząstek aluminium lub pyłu miedzi i lepiszcza,
- nadchloranu amonu, cząstek aluminium i lepiszcza,
- reaktywnego materiału (np. proszek Al i teflon),

- nitrocelulozy, hafnu (Hf) i lepszczca,
- paliwa raketowego (gdy przy paleniu potrzebne jest wydzielanie kwasu).

Granule (1) mogą być wytwarzane na różne znane sposoby. Materiał może być odlewany lub wyciskany i cięty do pożądanych rozmiarów. Po wysuszeniu makrocząstki można również pokryć materiałem, który w przypadku słabego impulsu ciśnienia spowoduje zapalenie ich powierzchni (rys. 3).



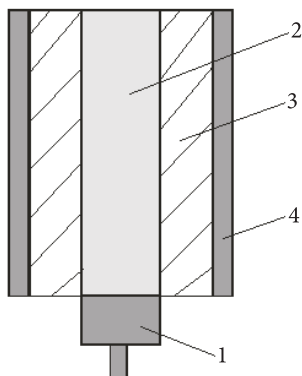
Rys. 3. Kompozycja wybuchowa: 1 — niewrażliwy składnik kompozycji; 2 — materiał bazowy (materiał wybuchowy lub lepszczce); 3 — materiał zapalający się pod wpływem słabego impulsu

Składnik bazowy (2) to materiał wrażliwy na bodźce (20-30% wag.), np. pentolit tworzony przez odlewanie mieszaniny pentrytu i trotylu, lub materiał obojętny (lepszczce) mający za zadanie scalanie mikrocząstek składnika (1) (do 10%).

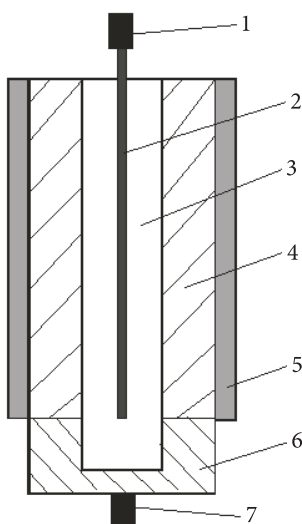
Przedmiotem patentu są również ładunki bojowe zawierające fragmentujące się kompozycje, w szczególności ładunki termobaryczne. Rosyjski ładunek termobaryczny zawiera proszek aluminium i cząstki heksogenu w żelowanym azotanie izopropylu (IPN). Po detonacji ładunku IPN jest rozpraszany w powietrzu i podgrzewany przez falę uderzeniową. Dodatkowe ciepło uwalniane z rozkładu IPN pomaga zainicjować spalanie cząstek aluminium wymieszanych z powietrzem za czołem fali podmuchowej (falą uderzeniową). Ale ze względów bezpieczeństwa, regulacje stosowane w USA zabraniają wykorzystywania w głowicach bojowych ciekłych materiałów. Dlatego autorzy patentu proponują konstrukcje ładunków termobarycznych, w których zastosowano stałą kompozycję wybuchową opisaną wcześniej.

Pierwszy z nich pokazany jest na rysunku 4. Cylindryczny ładunek materiału wybuchowego (2) generuje po detonacji słabą falę uderzeniową w warstwie cylindrycznej (3), składającej się z kompozycji wybuchowej pokazanej na rysunku 2 lub 3. 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 falę podmuchową w powietrzu.

Bardziej złożony ładunek termobaryczny pokazano na rysunku 5. Jeśli inicjacja rozpoczyna się od detonatora (7), to kruszący, silny materiał wybuchowy wywołuje w kompozycji (4) detonację i fragmenty obudowy napędzane są do dużej prędkości.



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



Rys. 5. Ładunek termobaryczny: 1 — detonator; 2 — lont detonujący; 3 — kompozycja zawierająca proszek aluminium i lepiszcze; 4 — fragmentująca się kompozycja wybuchowa; 5 — metalowa obudowa; 6 — ładunek kruszącego materiału wybuchowego; 7 — detonator

Jeśli natomiast zapalany jest lont detonujący (2) poprzez detonator (1), to w kompozycji generowana jest (4) słaba fala uderzeniowa, która zapala ją i rozprasza, ale nie powoduje jej detonacji. Fragmentacji ulega również metalowa obudowa (6), ale prędkość powstałych odłamków jest bardzo mała. Jeżeli oba detonatory są odpalane, ale w sposób sekwencyjny, najpierw detonator (1), a później (7), to prędkość odłamków będzie zależała od czasu opóźnienia odpalenia tego ostatniego — im opóźnienie będzie większe, tym prędkość fragmentów będzie mniejsza.

Autorzy artykułu [37] testowali cylindryczne, warstwowe ładunki wybuchowe z umieszczonym centralnie ładunkiem kruszącego materiału wybuchowego i zewnętrznej warstwy z proszkiem paliwa — ładunki SDF (*Shock-Disperse-Fuel* — paliwo rozproszone wybuchowo). Wybrane zostały trzy układy, w których stosunek ilości substancji niewybuchowej do ładunku kruszącego wynosił 100/1, 100/2 i 100/3. W dwóch przypadkach w układach był taki sam stosunek, natomiast inna była ich skala — masa substancji niewybuchowej wynosiła 4,05 lub 6,75 kg. Jako paliwo wybrano proszek aluminium (18 μm), a jako ładunek wybuchowy — sprasowany TNT. Stosunek wysokości obudowy do średnicy całego ładunku wynosił 1,5. Na dolnej i górnej podstawie tej obudowy umieszczono dwie grube płyty z aluminium i mosiądzu, które zapobiegały rozrzuconiu cząstek paliwa w kierunku osiowym, a wspomagały dyspersję promieniową. Paliwo było umieszczone pomiędzy ściankami obudowy a rurą z ładunkiem wybuchowym. W każdym z testów rejestrowano ekspansję chmury pyłu za pomocą kamery cyfrowej (1000-8000 klatek/sekundę). Testowany ładunek umieszczono na wysokości metra nad powierzchnią ziemi. Do wyznaczenia parametrów chmury pyłu w powietrzu ustawiono cztery wskaźniki odległości, po dwa z każdej strony ładunku. Pierwszy umieszczono w odległości 2 m, a drugi 4 m.

Autorzy pracy [37] uznali, że proces rozrzuconia sproszkowanej substancji w powietrzu przez detonację ładunku kruszącego może być podzielony na trzy etapy: i) rozpędzenie cząstek, ii) wyhamowanie cząstek oraz iii) przypadkowe rozproszenie cząstek. Fala detonacyjna i ciśnienie powstające w produktach detonacji rozpędzają promieniowo cząstki paliwa i rozrywają ścianki cylindrycznej obudowy. Czas trwania tego etapu jest bardzo krótki, około 2 ms. Cząstki paliwa osiągają swoją prędkość maksymalną pod koniec pierwszego etapu. W drugim etapie cząstki paliwa poruszają się promieniowo, jednakże ich prędkość maleje na skutek oporów powietrza i w konsekwencji zostają wyhamowane. Na tym etapie rośnie promień chmury. W trzecim etapie cząstki paliwa kontynuują swój ruch w przypadkowym kierunku i w ten sposób uzyskiwana jest jednorodność chmury pyłu w powietrzu. W przypadku gdy stężenie paliwa jest bliskie stężeniu stechiometrycznemu, siła wybuchu chmury paliwowo-powietrznej może osiągnąć najwyższy poziom. Im bardziej zawartość paliwa odbiega od stężeń stechiometrycznych, tym słabszy jest wybuch. W przypadku gdy stężenie paliwa przekracza górną lub dolną granicę wybuchowości, wówczas chmura nie jest zdolna do wybuchu. Zatem czas zwłoki między detonacją ładunku rozpraszającego stałe paliwo a wybuchem ładunku wtórnego jest bardzo istotny. W momencie, gdy ładunek wtórny zostaje zdetonowany, wówczas stężenie paliwa w powietrzu powinno być bliskie ilościom stechiometrycznym.

Dane eksperymentalne oraz zdjęcia z testów pokazały, że stosunek masy paliwa do masy ładunku rozpraszającego powinien wynosić 100/1, jednakże autorzy sugerują, że optymalny stosunek dla małych ładunków wynosi od 150/1 do 200/1. Powodem tego jest fakt, że w przypadku dużej skali wzrasta nie tylko ilość rozpra-

szanego paliwa, ale zwiększa się również średnia odległość, jaką pokonują cząstki paliwa. Dlatego też w miarę wzrostu skali ładunków stosunek wypełniacz/materiał wybuchowy maleje.

W pracy [38] poddano badaniu ładunki SDF o masie ok. 3 kg. Zawierały one ok. 1 kg kulistego ładunku wewnętrznego C4 otoczonego ok. 2 kg płatkowanego aluminium (2 μm) o gęstości upakowania ok. 0,35 g/cm³. Badania miały na celu pomiar charakterystyk podmuchowych w dwóch częściowo zamkniętych pomieszczeniach, weryfikację kodu komputerowego SHAMRC do modelowania dynamiki płynów oraz oszacowanie ilości wydzielającej się energii w procesie dopalania.

Zastosowane w badaniach pomieszczenia były ze sobą połączone. Jedno z nich nazwano pomieszczeniem głównym, a drugie przylegającym. Oba miały objętość po ok. 50 m³. Ładunki umieszczono na środku pomieszczenia głównego, a czujniki ciśnienia na ścianach i suficie w obydwu pomieszczeniach. Skoncentrowano się na analizie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia, a nie na wyznaczaniu ciśnienia quasi-statycznego, ponieważ pomieszczenia były częściowo otwarte. Oprócz tego wykonano pomiary temperatury.

Wyniki pomiarów ciśnienia wskazują na istnienie trzech faz na czasowym przebiegu ciśnienia. Na czujniku umieszczonym na ścianie w pierwszym pomieszczeniu pierwszy pik pojawia się po 3 ms od zainicjowania wybuchu, a zaraz za nim, po 5 ms pojawia się silniejszy pik fali uderzeniowej odbitej od najbliższej ściany. Druga i trzecia faza przebiegu zaczyna się odpowiednio po ok. 11 ms i 17 ms i są to już piki fali podmuchowej odbitej od pozostałych ścian pomieszczenia. Okazuje się, że siła uderzeniowa fali podmuchowej maleje w czasie, mimo że aluminium nadal się spala. Po ok. 20 ms, czyli po trzeciej fazie, obserwuje się już tylko przypadkowe, małe skoki ciśnienia na poziomie szumów. Dlatego też, jeśli tylko pierwsza i druga faza nie spowodują zniszczeń w obiekcie, to na pewno trzecia faza podmuchu tego nie dokona. Innymi słowy reakcje dopalania mające miejsce w czasie pierwszych 15-20 ms są zdecydowanie bardziej istotne z punktu widzenia zdolności burzących niż te zachodzące później.

Porównanie wyników otrzymanych za pomocą kodu numerycznego SHAMRC z wynikami eksperymentalnymi pomiarów ciśnienia i impulsu, wykazało generalnie wyjątkową zgodność, zarówno jeśli chodzi o amplitudę i przebieg ciśnienia w czasie, jak również w przypadku strat energii i masy ośrodka gazowego, powodujących powolne zanikanie nadciśnienia. Po głębszej analizie stwierdzono jednak, że występują pewne różnice w przebiegach, które mogą być efektem założenia w obliczeniach większego stopnia przereagowania aluminium, niż to ma miejsce w rzeczywistości. Z obliczeń wynika, że w czasie 20 ms od wybuchu ładunku uwalniane jest ok. 79% dostępnej energii i 97% w czasie 75 ms. Prawdopodobnie za względnie długi czas reakcji odpowiedzialne jest słabe mieszanie cząstek aluminium z tlenem z powietrza. Wyniki pomiarów sugerują, że właściwości podmuchowe tego typu mieszanin SDF nie są aż tak dobre, jak przypuszczano i nie są dużo lepsze od właściwości

typowych termobarycznych materiałów wybuchowych, jak na przykład TBX A (nie podano składu tego materiału). Wprawdzie zdolności podmuchowe badanych ładunków SDF są o ok. 10% wyższe po czasie 50 ms niż ładunków TBX A, ale w czasie pierwszych 15 ms, gdy efekty podmuchowe są najważniejsze, ładunek SDF jest w rzeczywistości o ok. 10% mniej efektywny niż ładunek TBX A o tej samej masie. Prawdopodobnie spowodowane to jest faktem, że proporcjonalnie więcej energii jest uwalniane przez ładunek SDF w późniejszej fazie rozlotu, mieszania i spalania cząstek metalu.

5. Podsumowanie

Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że materiały wybuchowe termobaryczne i o podwyższonej zdolności podmuchowej są w ostatnich latach intensywnie badane w wielu ośrodkach naukowych na świecie. Prowadzone prace dotyczą optymalizacji składów kompozycji wybuchowych i badania ich charakterystyk detonacyjnych i podmuchowych. Poznanie zjawisk towarzyszących wybuchowi tego typu materiałów umożliwia ich praktyczne zastosowanie w amunicji termobarycznej.

Wyniki badań dowodzą, że skład chemiczny kompozycji stanowi jedynie punkt wyjściowy do prognozowania jej właściwości wybuchowych. Zarówno stopień bezpieczeństwa jak i parametry podmuchowe zależą również od czystości składników kompozycji, morfologii cząstek, gęstości materiału oraz wyboru lepszycza i metod wytwarzania. Szerokie badania parametryczne konkretnych kompozycji są niezbędne do scharakteryzowania struktury obłoku powybuchowego i optymalizacji zdolności podmuchowych układów termobarycznych. Do prowadzenia takich badań nie wystarczają tradycyjne metody oceny materiałów wybuchowych, takie jak pomiar prędkości czy ciśnienia detonacji. Parametry detonacji materiałów termobarycznych są stosunkowo niskie i nie odzwierciedlają ich możliwości niszczących. Poszukuje się więc nowych sposobów oceny zdolności podmuchowych kompozycji o podwyższonych zdolnościach podmuchowych w przestrzeni otwartej lub w obiektach zamkniętych. Niektóre z nich zostały omówione w prezentowanym przeglądzie literatury.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2009 r.

LITERATURA

- [1] A. A. HOPKINS-BROWN, A. BAILEY, *AASTP-4 Chapter 2 (Explosion Effects)*, Part 1 (Blast), Cranfield University, 1998.
- [2] <http://www.nap.edu/openbook/0309091608/html/16.html>, 3. *Thermobaric Explosives*, Advanced Energetic Materials, 2004.
- [3] R. SCHAEFER, *Development and Evaluation of New High Blast Explosives*, 36th International Conference of ICT, Karlsruhe, 2005.

- [4] KI-BONG LEE, KEUN-DEUK LEE, JEONG-KOOK KIM, *Relationship between Combustion Heat and Blast Performance of Aluminized Explosives*, 36th International Conference of ICT, Karlsruhe, 2005.
- [5] KEUN-DEUK LEE, KI-BONG LEE, JEONG-KOOK KIM, JIN RAI CHO, *A New Oxidant for Blasting Explosive Formulations*, 37th International Conference of ICT, Karlsruhe, 2006.
- [6] KI BONG LEE, KEUN DEUK LEE, JEONG KOOK KIM, KYO TAE KIM, *Design of Insensitive Cratering Explosive*, TEDC-519-051555 ADD Report, Korea, 2005.12.
- [7] K. L. MESBY, B. E. HOMAN, R. E. LOTTERO, *High Brightness Imaging for Real Time Measurement of Shock, Particle, and Combustion Fronts Produced By Enhanced Blast Explosives*, 24th Army Science Conference, Orlando, 2005.
- [8] W. A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, L. SZYMAŃCZYK, *Studies of Detonation Characteristics of Aluminium Enriched RDX Compositions*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 32, 5, 2007, 392.
- [9] W. A. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, J. PASZULA, *Studies of Free Field and Confined Explosions of Aluminium Enriched RDX Compositions*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 32, 6, 2007, 502.
- [10] W. TRZCIŃSKI, S. CUDZIŁO, J. PASZULA, J. CALLAWAY, *Study of the Effect of Additive Particle Size on Non-Ideal Explosive Performance*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 33, 3, 2008, 227.
- [11] W. KICIŃSKI, W. A. TRZCIŃSKI, *Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 96, 2, 2009, 623-630.
- [12] J. PASZULA, W. TRZCIŃSKI, K. SPRZĄTCZAK, *Detonation Performance of Aluminium-Ammonium Nitrate Explosives*, Central European Journal of Energetic Materials, 5, 1, 2008, 3-11.
- [13] W. TRZCIŃSKI, J. PASZULA, *Detonation Performance of Al_3Mg_4 Enriched Explosives and Afterburning of the Detonation Products*, Archivum Combustionis, 27, 3-4, 2007, 81-89.
- [14] A. HAHMA, K. PALOVUORI, Y. SOLOMON, *TNT-Equivalency of Thermobaric Explosives*, 36th International Conference of ICT, Karlsruhe, 2005.
- [15] A. HAHMA, Interntional Patent WO 2004/048295 A1, 2004.
- [16] A. HAHMA, Swedish Patent Application 0401456-9, 2004.
- [17] M. HELD, *Improved momentum method*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 26, 6, 2001, 290-295.
- [18] M. HELD, *Blast efficiency measurements*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 24, 5, 1999, 286-290.
- [19] M. HELD, *Impulse method for the blast contour of cylindrical high explosive*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 24, 1, 1999, 17-26.
- [20] B. E. GELFAND, S. P. MEDVEDEV, S. V. KHOMIK, M. V. SILNIKOV, *Comparative study of pressure-temperature effects from TNT and RDX-IPN-Al explosives*, Military Aspects of Blast and Shock — MABS20, Oslo, 2008, 1-8.
- [21] L. D. FROST, F. ZHANG, S. B. MURRAY, S. MCCAHAN, *Critical Conditions for Ignition of Metal Particles in a Condensed Explosive*, 12th International Detonation Symposium, San Diego, 2002.
- [22] I. GLASSMAN, *Combustion*, 3rd Edition, Academic Press, Orlando, Ch. 9, 1996.
- [23] F. A. WILLIAMS, *Combustion Theory*, Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1985.
- [24] F. A. WILLIAMS, *Some Aspects of Metal Particle Combustion*, [in:] Physical and Chemical Aspects of Combustion: A Tribute to Irv Glassman (F. L. Dryer and R. F. Sawyer, Eds.), Gordon and Breach, The Netherlands, 1997, 267-289.
- [25] R. A. YETTER, F. L. DRYER, *Metal Particle Combustion and Classification*, [in:] Microgravity Combustion: Fire in Free Fall, Academic Pressure, 2001, 419-478.

- [26] V. A. FEDOSEEV, *Evaporation and Combustion Kinetics of Fine Drops and Particles*, Fizika Aerodispersnykh Sistem, 1, 1969, 98-114.
- [27] F. ZHANG, D. L. FROST, P. A. THIBAUT, S. B. MURRAY, *Explosive Dispersal of Solid Particles*, Shock Waves, 10, 2001, 431-443.
- [28] F. ZHANG, A. YOSHINAKA, D. FROST, R. RIPLEY, K. KIM, W. WILSON, *Casing Influence on Ignition and Reaction of Aluminium Particles in an Explosive*, 13th International Detonation Symposium, Norfolk, 2006.
- [29] D. L. FROST, S. GOROSHIN, R. RIPLEY, F. ZHANG, *Effect of Scale on the Blast Wave from a Metalized Explosive*, 13th International Detonation Symposium, Norfolk, 2006.
- [30] Z. ZAREI, D. L. FROST, L. DONAHUE, D. R. WHITEHOUSE, *Simplified Modeling of Non-Ideal Blast Waves from Metallized Heterogeneous Explosives*, 20th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Montreal, 2005.
- [31] D. L. FROST, M. CAIRNS, S. GOROSHIN, J. LEADBETTER, R. RIPLEY, F. ZHANG, *Reflected heterogeneous blast*, Military Aspects of Blast and Shock — MABS20, Oslo, 2008, 1-20.
- [32] W. A. TRZCIŃSKI, J. PASZULA, S. GRYS, *Badanie parametrów detonacji i charakterystyk fal podmuchowych dla mieszanin nitrometanu z cząstkami stopu glinu i magnezu*, Biul. WAT, 56, 4, 2007, 243-256.
- [33] M. L. CHAN, G. W. MEYERS, *Advanced thermobaric explosive compositions*, Patent US 6,955,732 B1, Oct. 18, 2005.
- [34] M. L. CHAN, D. T. BUI, G. MEYERS, A. TURNER, *Castable thermobaric explosive formulations*, Patent US 6,969,434 B1, Nov. 29, 2005.
- [35] K. T. SMITH, *Presable explosive composition*, Patent US 2006/0060273 A1, Mar. 23, 2006.
- [36] R. H. GUIRGUIS, *Reactively induced fragmenting explosives*, Patent US 6,846,372 B1, Jan. 25, 2005.
- [37] BAZRAFSHAN ESMAEIL, POURMORTAZAVI SEYED MAHDI, *Fuel Dispersion in Air by Detonation Wave*, New Trends in Research of Energetic Matreials, Pardubice, 2006.
- [38] K. KIN et al., *Blast performance of shock dispersed fuel*, Military Aspects of Blast and Shock — MABS20, Oslo, 2008, 1-13.

K. BARCZ, W. A. TRZCIŃSKI

Thermobaric and enhanced blast explosives

Abstract. In this work the review has been presented of papers devoted to thermobaric explosives (TBX) and enhanced blast explosives (EBX). The explosives are divided to liquid and solid mixtures, and advanced compositions including layer charges. The explosive formulations are characterized in details and the methods used for determination of explosion parameters as well as the results of experiments and computer simulations are presented. The attention is paid to the physical phenomena accompanying the detonation process in such heterogeneous compositions with a significant surplus of fuel.

Keywords: thermobaric explosives, enhanced blast explosives, blast waves

Universal Decimal Classification: 662.1/.4

