



Badanie wybuchu ładunków warstwowych w przestrzeniach zamkniętych

WALDEMAR A. TRZCIŃSKI, KATARZYNA BARCZ,
STANISŁAW CUDZIŁO, JÓZEF PASZULA

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

Streszczenie. W pracy badano wybuch w przestrzeniach zamkniętych cylindrycznych, warstwowych ładunków termobarycznych, składających się z heksogenu flegmatyzowanego jako rdzenia i zewnętrznej warstwy, którą stanowił czysty proszek glinu (Al) lub mieszanina nadchloranu amonu z proszkiem glinu (AP/Al). Badania prowadzono w komorze wybuchowej o objętości $0,15 \text{ m}^3$ oraz w bunkrze o objętości ok. 40 m^3 . W obu przypadkach stosowano takie same składki mieszaniny AP/Al i dwa rodzaje proszku glinu różniące się wielkością ziaren. W betonowym bunkrze mierzono zmiany ciśnienia oraz czas świecenia obłoku. Na tej podstawie podjęto próbę określenia wpływu wielkości ładunku rdzenia i rozmiarów cząstek glinu na parametry fali podmuchowej. W komorze wybuchowej rejestrowano również przebiegi ciśnienia i badano wpływ zawartości glinu oraz wielkości jego cząstek na tzw. ciśnienie quasi-statyczne. Oprócz tego poddano analizie TG/DTA stałe produkty każdego z testowanych ładunków warstwowych odzyskane po wybuchu w komorze.

Słowa kluczowe: termobaryczne ładunki wybuchowe, fale podmuchowe, wybuch w zamkniętej objętości

1. Wstęp

Warstwowe ładunki wybuchowe składają się z cylindrycznie ułożonych warstw [1], w których najczęściej rdzeń stanowi klasyczny, wojskowy materiał wybuchowy, natomiast warstwy zewnętrzne składają się z mieszaniny paliwa i utleniacza lub też samego paliwa. Takie materiały klasyfikuje się jako materiały o podwyższonej zdolności podmuchowej (*Enhanced Blast Explosives* — EBX) lub też termobaryczne materiały wybuchowe (*Thermobaric Explosives* — TBX). Zawarte w nich

paliwo, spalając się w produktach detonacji materiału wybuchowego lub w tlenie z powietrza, powoduje wzrost temperatury obłoku gazowych produktów i wzmocnienie fal podmuchowych. Różnice pomiędzy skutkami wybuchu TBX a EBX są zazwyczaj niewielkie i dlatego często nazwy te używane są zamiennie. Ponieważ jednak charakterystyką wyróżniającą materiały typu EBX jest przede wszystkim wzmocnienie fali podmuchowej w powietrzu, zaś w przypadku TBX wzrost temperatury i ciśnienia produktów wybuchu, zakwalifikowanie ładunków do określonego rodzaju zależy od tego, w jaki sposób spalane jest paliwo zawarte w ładunku po zakończeniu procesu detonacji. W materiałach typu EBX mówi się o anaerobowych reakcjach spalania, czyli spalania bez dostępu tlenu z powietrza. Oznacza to, że po przejściu fali detonacyjnej pozostałe w mieszaninie paliwo spala się w większości w produktach detonacji. W materiałach typu TBX dominują reakcje paliwa i tlenu z powietrza. Proces taki nazywany jest spalaniem aerobowym.

Pierwszy raz warstwowe ładunki wybuchowe zostały opisane w patentach amerykańskich [2-3], gdzie zastrzeżeniem patentowym objęto również metalizowane kompozycje zawierające reaktywny metal, utleniacz i lepiszcze oraz opcjonalnie plastyfikator i katalizator. Opatentowano tzw. ładunki SFAE (*Solid Fuel — Air Explosives*), czyli ładunki paliwo stałe-powietrze o konstrukcji pierścieniowej i zwrócono uwagę na ich nowe właściwości wybuchowe. Tego typu ładunki charakteryzują się podwyższonym efektem cieplnym wybuchu i są zdolne do wytworzenia względnie wysokiego nadciśnienia (30-60 psi) trwającego dłużej niż 50 ms w otoczeniu sprzyjającym szybkiemu spadkowi temperatury (wybuch swobodny). Są również zdolne do podtrzymania wysokiego nadciśnienia w długim czasie w zamkniętej objętości z ograniczoną ilością tlenu. Metalizowane kompozycje stosowane w ładunkach SFAE charakteryzują się podwyższoną reaktywnością, wyższym efektem termicznym oraz obniżoną temperaturą zapłonu.

W patencie [4] przedmiotem zastrzeżenia stały się kompozycje wybuchowe, które poddane działaniu słabej fali uderzeniowej ulegały fragmentacji i spalaniu, natomiast w przypadku obciążenia silną falą uderzeniową w całości detonowały. Obiektem zastrzeżenia patentowego były również zbudowane z tych materiałów ładunki bojowe, w tym w szczególności ładunki termobaryczne. Scharakteryzowano specyficzną konstrukcję i skład takich ładunków.

Wyniki badań parametrów podmuchowych mieszanin materiału wybuchowego z utleniaczem i paliwem przedstawiono w pracy [5]. Wyznaczono charakterystyki fal podmuchowych generowanych przez ładunki zawierające mieszaninę heksogenu flegmatyzowanego oraz azotanu amonu (*saletra amonowa — SA*) i proszku glinu (Al). Zastosowano opcjonalnie glin płatkowany lub proszek glinu w ilości 10 i 40%. Stwierdzono, że o ile amplituda fal podmuchowych zmierzona dla ładunków zawierających warstwę SA/Al jest niższa od amplitudy fali wytwarzanej detonacją ładunku samego heksogenu flegmatyzowanego o tej samej masie, to impulsy ciśnienia są porównywalne, a nawet większe.

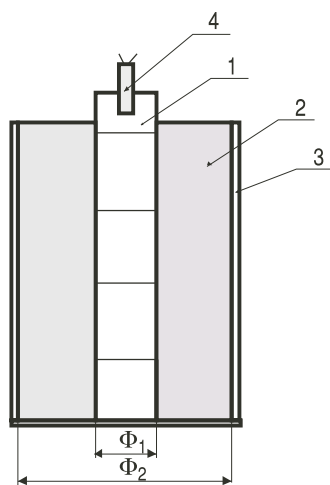
W pracy [6] zajmowano się badaniem ładunków warstwowych zawierających składniki stosowane w pracy [5]. Do testów wytypowano ładunki składające się z rdzenia z heksogenu flegmatyzowanego, jako warstwy rozpraszającej, oraz z warstwy zewnętrznej zawierającej mieszaninę azotanu amonu i glinu. Zastosowano rdzenie heksogenowe o różnej masie oraz trzy składy mieszaniny zewnętrznej SA/Al 25/75, SA/Al 50/50 i SA/Al 75/25. Podjęto próbę oceny możliwości zastosowania azotanu amonu jako utleniacza w mieszaninie zewnętrznej oraz wpływu ilości paliwa w tej warstwie na charakterystyki fal podmuchowych. Do rejestracji układu falowego występującego w trakcie trwania detonacji ładunków wewnętrznych posłużono się techniką rentgenografii impulsowej. Przebiegi ciśnienia w fali podmuchowej i czasy świecenia obłoku produktów detonacji rejestrowano w dwóch bunkrach różniących się objętością i stopniem zamknięcia. Przedmiotem analizy były amplitudy i impulsy nadciśnienia w fali padającej oraz impulsy całkowite nadciśnienia rejestrowane w czasie 10 ms. Stwierdzono, że wpływ wielkości zastosowanego ładunku heksogenu flegmatyzowanego na mierzone charakterystyki można zaobserwować w przypadku ładunków z największą zawartością proszku glinu. Stwierdzono, że tlen z powietrza jest niewątpliwie wykorzystywany do spalania glinu w dłuższym przedziale czasu.

W prezentowanej pracy jako utleniacza w ładunkach warstwowych użyto nadchloranu amonu (*ammonium perchlorate* — AP) i podjęto próbę oceny wpływu ilości i rodzaju glinu oraz wielkości ładunku na parametry podmuchowe. Badania przeprowadzono w częściowo zamkniętym bunkrze. Wykonano również pomiary nadciśnienia w całkowicie zamkniętej komorze stalowej i wyznaczono tzw. ciśnienie quasi-statyczne. Określono zawartość glinu w stałych produktach wybuchu odzyskanych z komory, stosując technikę termogravimetrii oraz morfologię ziaren tlenku glinu, wykorzystując zdjęcia wykonane za pomocą mikroskopu elektronowego.

2. Część eksperymentalna

2.1. Charakterystyka ładunków warstwowych

Na rysunku 1 przedstawiono przekrój cylindrycznego ładunku warstwowego stosowanego w badaniach. W ładunkach stosowanych w bunkrze walec wewnętrzny o średnicy $\Phi_1 = 25$ lub 30 mm stanowiły sklezione wypraski heksogenu flegmatyzowanego (RDXfl) o gęstości $1,67$ - $1,68$ g/cm^3 . Masa heksogenu wynosiła ok. 110 g i ok. 190 g odpowiednio dla mniejszej i większej średnicy walca. W skład ładunku zewnętrznego wchodziła mieszanina chloranu (VII) amonu (AP) i proszku glinu (Al). Zastosowano krystaliczny chloran amonu o rozmiarze cząstek poniżej $0,8$ mm oraz dwa typy proszku glinu. Jeden o rozmiarze cząstek poniżej 44 μm (do 325 Mesh), oznaczony jako Al1, oraz drugi o rozmiarze cząstek między 44



Rys. 1. Przekrój ładunku warstwowego: 1 — heksogen flegmatyzowany; 2 — mieszanina zewnętrzna; 3 — rurka papierowa; 4 — zapalnik; Φ_1 — średnica ładunku wewnętrznego (16, 25 lub 30 mm); Φ_2 — średnica wewnętrzna rurki papierowej (30, 40 lub 50 mm)

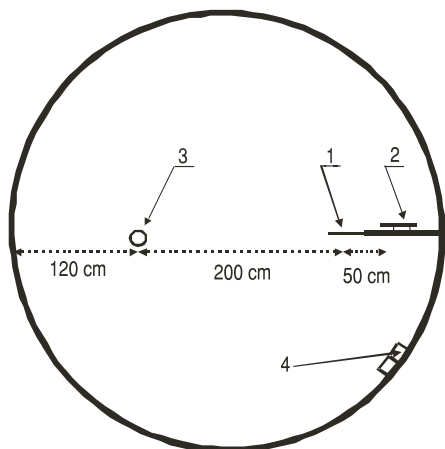
a 149 μm (325-100 Mesh) oznaczony jako Al2. Mieszaninę przygotowano przez długotrwałe mieszanie. Cały ładunek znajdował się w rurce z tektury. Średnica zewnętrzna Φ_2 wynosiła 40 mm dla mniejszego ładunku i 50 mm dla ładunku większego. Masa warstwy zewnętrznej w pierwszym przypadku wynosiła ok. 135 g, zaś w drugim ok. 270 g. W ładunkach stosowanych w komorze wybuchowej masa heksogenu wynosiła ok. 21 g, wypraski miały średnicę 16 mm, a mieszanina w warstwie zewnętrznej o średnicy 30 mm miała masę ok. 40 g. Detonację wewnętrznego rdzenia inicjowano za pomocą standardowego zapalnika elektrycznego. Dla porównania przeprowadzono zarówno w bunkrze jak i w komorze również testy dla ładunków utworzonych jedynie z RDXfl o tej samej masie i średnicy, co rdzenie heksogenowe. Ponadto w bunkrze zdetonowano ładunki z heksogenu flegmatyzowanego oraz trotylu (TNT) o masie zbliżonej do mały całkowitej mniejszych ładunków warstwowych ($\Phi_2 = 40$ mm)

Ponieważ w ładunkach termobarycznych powinien być wykorzystywany przede wszystkim tlen z powietrza, do badań wytypowano składy bogate w paliwo. Badano układy z mieszaniną AP/Al o stosunku wagowym 50/50 i 25/75. Oprócz tego w warstwie zewnętrznej zastosowano czysty proszek glinu. Należy podkreślić, że testy przeprowadzono dla składów zawierających jeden lub drugi rodzaj proszku glinu.

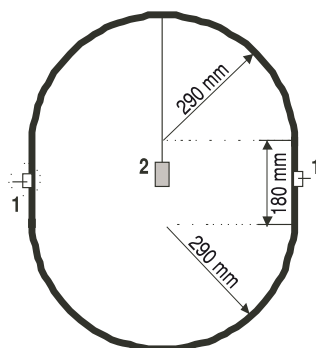
2.2. Układy badawcze

Badania prowadzone były w przestrzeniach częściowo lub całkowicie zamkniętych. Pierwszym z nich był betonowy bunkier, drugim komora wybuchowa.

Schematy bunkra i komory oraz rozmieszczenie czujników przedstawiono na rysunkach 2-3.



Rys. 2. Przekrój bunkra: 1, 2 — czujniki ciśnienia odpowiednio w odległości 2 i 2,5 m od ładunku; 3 — badany ładunek wybuchowy; 4 — fotodioda



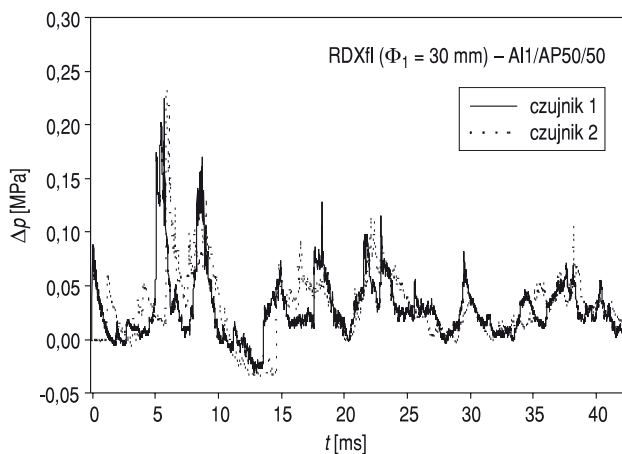
Rys. 3. Schemat komory wybuchowej: 1 — czujniki ciśnienia; 2 — ładunek warstwowy

Bunkier ma objętość ok. 40 m^3 , w górnej części posiada 4 małe otwory o powierzchni ok. $0,05 \text{ m}^2$ każdy i otwór wejściowy o powierzchni ok. $1,3 \text{ m}^2$. Przebieg ciśnienia w bunkrze mierzono przy użyciu czujników piezoelektrycznych PCB. Zostały one tak umieszczone, aby mogły zarejestrować początkowy profil ciśnienia w fali padającej, co oznacza, że powierzchnia czujnika ustawiona była równolegle do kierunku propagacji fali. Czas świecenia obłoku produktów wybuchu mierzono, stosując fotodiodę BPDP35.

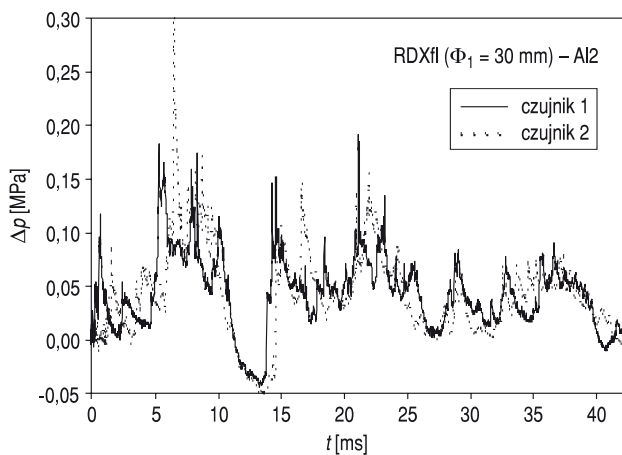
Stalowa komora miała pojemność 150 dm^3 i wypełniona była powietrzem. Została zaopatrzona w zamykany szczelnie włącz, uniemożliwiający wymianę gazu z otoczeniem w trakcie wybuchu ładunku. W ścianie komory zainstalowano czujniki ciśnienia, dzięki którym rejestrowano przebieg nadciśnienia panującego w komorze.

2.3. Przykładowe wyniki pomiarów

Dla każdego zestawu wybuchowego (wielkość ładunku, zawartość i rodzaj glinu) wykonano co najmniej dwie próby. Na rysunkach 4 i 5 pokazano przykładowe przebiegi ciśnienia w fali podmuchowej zarejestrowane po wybuchu w bunkrze. Zarówno w przypadku czujnika 1 jak i czujnika 2 zarejestrowano praktycznie całe profile fal padających, a wysokie nadciśnienia pojawiające się po czasie ok. 3 ms są wynikiem zaburzeń, jakie występują na skutek oddziaływania fal odbitych od ścian bunkra i ziemi.



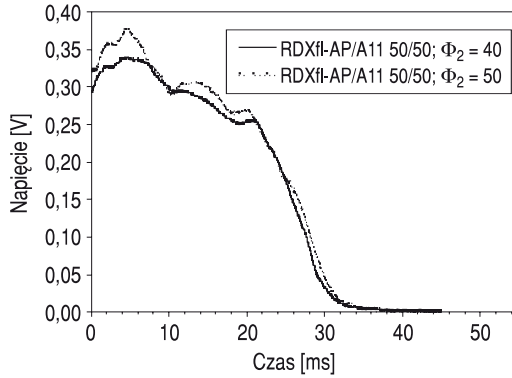
Rys. 4. Przebieg ciśnienia w fali podmuchowej generowanej w bunkrze po wybuchu ładunku warstwowego: RDXfl i mieszaniny AP/Al1 50/50



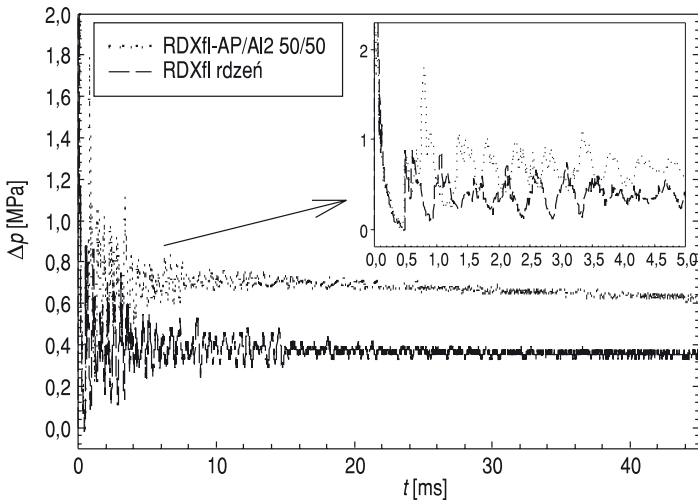
Rys. 5. Przebieg ciśnienia w fali podmuchowej generowanej w bunkrze po wybuchu ładunku warstwowego: RDXfl i proszku glinu Al2

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi sygnału z fotodiody zarejestrowane w bunkrze po detonacji ładunków warstwowych.

Na rysunku 7 pokazano przykładowe przebiegi nadciśnienia w komorze wybuchowej po detonacji ładunku warstwowego i ładunku heksogenowego.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi sygnału z fotodiody po wybuchu w bunkrze ładunku warstwowego

Rys. 7. Przebieg nadciśnienia w komorze po wybuchu ładunku warstwowego: RDXfl i mieszaniny AP/AI ($\Phi_2 = 30$ mm) oraz ładunku RDXfl ($\Phi_1 = 16$ mm)

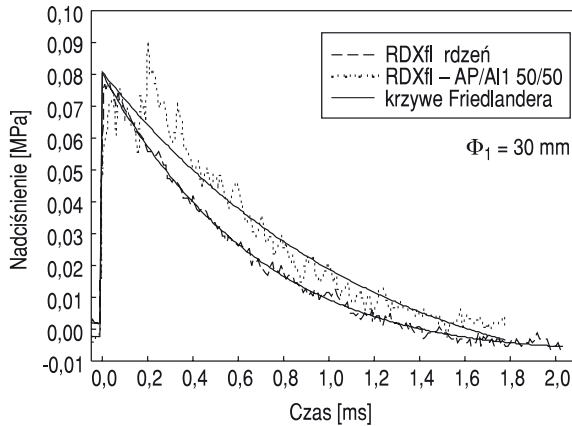
3. Analiza wyników pomiarów

3.1. Pomiary w betonowym bunkrze

Czasowe przebiegi ciśnienia zmierzone w bunkrze umożliwiają wyznaczenie charakterystyk fal podmuchowych generowanych wybuchem ładunków warstwowych. Przebieg ciśnienia w padającej fali podmuchowej można aproksymować zmodyfikowanym równaniem Friedlandera [7]:

$$P = P_s e^{-at} \left(1 - \frac{t}{\tau} \right), \quad (1)$$

gdzie P oznacza nadciśnienie na powierzchni czujnika, P_s — amplitudę nadciśnienia na froncie fali uderzeniowej, t — czas mierzony od chwili dotarcia fali do czujnika, τ jest czasem trwania fazy dodatniej nadciśnienia, a α współczynnikiem. Na rysunku 8 pokazano próbę zastosowania równania (1) do aproksymacji przebiegów ciśnienia zmierzonych po detonacji ładunku heksogenu flegmatyzowanego (rdzenia) oraz ładunku warstwowego z mieszaniną AP/Al 25/75. Należy zauważyć, że równanie Friedlandera dobrze przybliża przebieg nadciśnienia w fali padającej dla ładunków klasycznych materiałów wybuchowych (RDXfl, TNT), zdecydowanie gorzej dla ładunków warstwowych. Jednakże aproksymacja umożliwia wyeliminowanie pików nadciśnienia związanych z niedoskonałością układu pomiarowego i dokładniejsze wyznaczenie amplitudy fali podmuchowej.



Rys. 8. Przykłady aproksymacji czasowych przebiegów nadciśnienia za pomocą równania Friedlandera

Najważniejszymi parametrami fali podmuchowej są amplituda P_s i impuls fali padającej wyznaczony z zależności:

$$I_s = \int_0^{\tau} \Delta p(t) dt, \quad (2)$$

gdzie $\Delta p(t)$ jest przebiegiem nadciśnienia. W przypadku gdy nadciśnienie opisuje równanie Friedlandera, wartość impulsu I_s można wyznaczyć z zależności:

$$I_s = \frac{P_s \tau}{\alpha} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha} \right). \quad (3)$$

Wartości piku nadciśnienia i impulsu fali padającej przedstawiono w tabeli 1 i 2 dla ładunków o średnicy Φ_2 równej odpowiednio 40 i 50 mm. Dodatkowo w tabeli 1

umieszczono wartości parametrów uzyskanych dla ładunków z RDXfl i TNT o masach zbliżonych do masy ładunków warstwowych. Dla porównania w tabelach 1 i 2 pokazano także parametry otrzymane dla samych rdzeni heksogenowych.

TABELA 1
Charakterystyki fali podmuchowej dla ładunków o średnicy $\Phi_2 = 40$ mm ($\Phi_1 = 25$ mm)

Materiał wybuchowy	Amplituda P_s [kPa]		Impuls I_s [Pa s]	
	odległość 2 m	odległość 2,5 m	odległość 2 m	odległość 2,5 m
RDXfl rdzeń	56	38	25	19
AP/Al1 50/50	66	45	34	26
AP/Al1 25/75	65	44	39	27
Al1 100	89	53	43	30
AP/Al2 50/50	73	49	42	28
AP/Al2 25/75	60	38	32	27
Al2 100	71	44	45	32
RDXfl	96	55	41	30
TNT	81	50	36	26

TABELA 2
Charakterystyki fali podmuchowej dla ładunków o średnicy $\Phi_2 = 50$ mm ($\Phi_1 = 30$ mm)

Materiał wybuchowy	Amplituda P_s [kPa]		Impuls I_s [Pa s]	
	odległość 2 m	odległość 2,5 m	odległość 2 m	odległość 2,5 m
RDXfl rdzeń	79	49	37	26
AP/Al1 50/50	84	59	45	36
AP/Al1 25/75	91	63	48	40
Al1 100	121	75	61	53
AP/Al2 50/50	106	67	47	40
AP/Al2 25/75	106	73	61	46
Al2 100	99	64	49	43

Z analizy danych zebranych w tabelach 1 i 2 wynika, że wzrost parametrów padającej fali podmuchowej określonych dla ładunków warstwowych o mniejszej i większej średnicy wynosi jedynie 25-30%, pomimo tego że masy ładunków różnią się niemal dwukrotnie. Zaobserwowano również, że praktycznie we wszystkich przypadkach wraz ze wzrostem zawartości glinu w ładunkach rosną parametry fali podmuchowej, a jest to szczególnie widoczne w przypadku ładunków o większej średnicy. Oznacza to, że już w pierwszej fazie rozlotu produktów detonacji glin reaguje

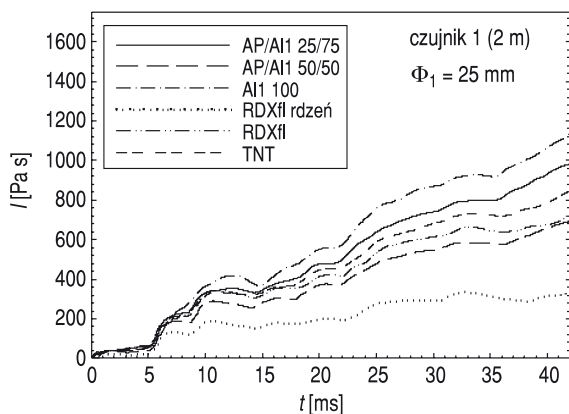
z produktami detonacji heksogenu, produktami reakcji rozkładu AP i z tlenem z powietrza. O tej ostatniej reakcji świadczą wysokie parametry fali podmuchowej zarejestrowane dla ładunków warstwowych RDXfl-Al (bez utleniacza AP).

Z tabel 1 i 2 wynika również, że nie uzyskano jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, który z proszków glinu zastosowany w testowanych ładunkach gwarantuje wyższe parametry fali podmuchowej. Przyczyną może być fakt, że pomiary gwałtownych zmian ciśnienia w padającej fali podmuchowej za pomocą użytych czujników piezoelektrycznych obarczone są pewnym błędem i że wykonano tylko dwie próby dla każdego układu wybuchowego.

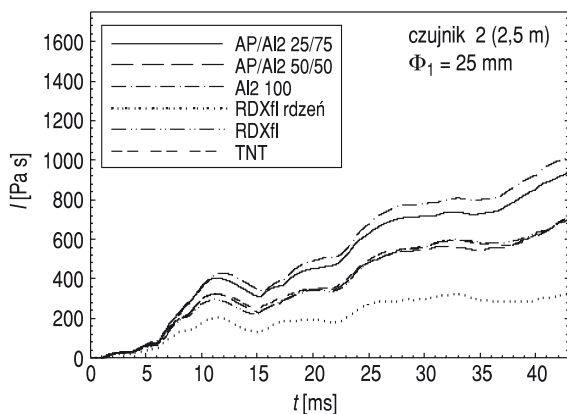
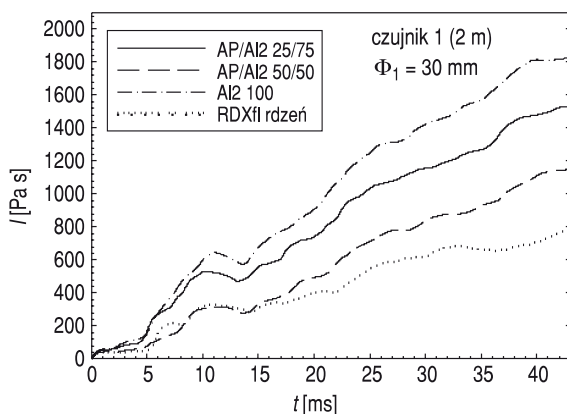
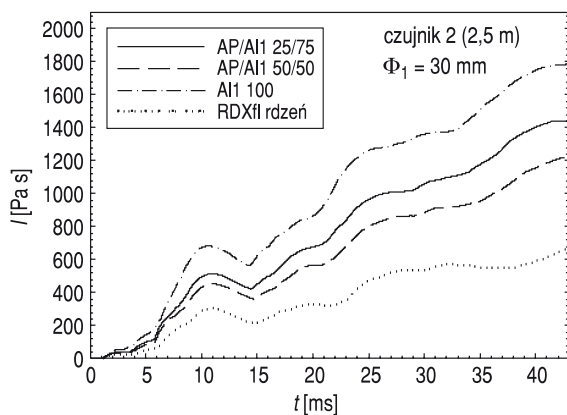
Po wykonaniu całkowania numerycznego według wzoru (1) dla czasów większych od czasu trwania fazy dodatniej uzyskuje się wartości impulsu ciśnienia działającego na czujniki w wyniku odbicia fal podmuchowych od ścian bunkra. Są one miarą zdolności burzącej ładunków wybuchowych w obiekcie częściowo zamkniętym. Zmiany impulsu całkowitego dla ładunków reprezentujących wszystkie badane układy pokazano na rysunkach 9-12.

W tabeli 3 zebrano impulsy ciśnienia obliczone dla czasu $t = 40$ ms. Wiadoczną jest wyraźna tendencja wzrostowa w ich wartościach wraz ze zwiększaniem zawartości glinu w mieszaninie zewnętrznej, zarówno dla pierwszego jak i dla drugiego czujnika. Dla ładunków o prawie dwukrotnie większej masie ($\Phi_2 = 50$ mm) widać zdecydowany wzrost impulsu ciśnienia określonego dla czasu $t = 40$ ms. Dla większości badanych układów wybuchowych wynosi on 80-100%. Największe wartości impulsu uzyskano dla ładunków warstwowych RDXfl-proszek glinu. Dokładna analiza wyników przedstawionych na rysunkach 9-12 i w tabeli 3 nie pozwala jednoznacznie ocenić wpływu rodzaju proszku glinu na całkowity impuls ciśnienia.

W tabeli 4 przedstawiono średnie wartości czasu świecenia obłoku produktów detonacji zarejestrowanego podczas prób w betonowym bunkrze. Dla ładunków



Rys. 9. Zmiana impulsu ciśnienia w odległości 2 m dla ładunków o średnicy $\Phi_2 = 40$ mm

Rys. 10. Zmiana impulsu ciśnienia w odległości 2,5 m dla ładunków o średnicy $\Phi_2 = 40$ mmRys. 11. Zmiana impulsu ciśnienia w odległości 2 m dla ładunków o średnicy $\Phi_2 = 50$ mmRys. 12. Zmiana impulsu ciśnienia w odległości 2,5 m dla ładunków o średnicy $\Phi_2 = 50$ mm

warstwowych czas świecenia produktów wybuchu jest podobny. Jednak w porównaniu z ładunkami zawierającymi czysty RDXfl (rdzeń) ten czas wydłuża się 3-4-krotnie, co potwierdza, że proszek glinu spala się w procesie wybuchu.

TABELA 3

Wartości impulsu ciśnienia dla czasu $t = 40$ ms

Materiał wybuchowy	Impuls I [Pa s]			
	$\Phi_2 = 40$ mm		$\Phi_2 = 50$ mm	
	odległość 2 m	odległość 2,5 m	odległość 2 m	odległość 2,5 m
RDXfl rdzeń	368	366	775	664
AP/Al1 50/50	734	689	1228	1208
AP/Al1 25/75	1031	867	1513	1446
Al1 100	1170	1031	2032	1786
AP/Al2 50/50	869	726	1155	1182
AP/Al2 25/75	1017	947	1612	1387
Al2 100	1130	1035	1831	1770
RDXfl	791	705	-	-
TNT	901	730	-	-

TABELA 4

Czas świecenia obłoku produktów wybuchu badanych ładunków

Ładunek wybuchowy	Czas świecenia obłoku [ms]	
	$\Phi_1 = 25$ mm	$\Phi_1 = 30$ mm
RDXfl rdzeń	8	11
AP/Al1 50/50	32	31
AP/Al1 25/75	30	29
Al1 100	-	26
AP/Al2 50/50	26	27
AP/Al2 25/75	27	26
Al2 100	23	27

3.2. Pomiary w komorze wybuchowej

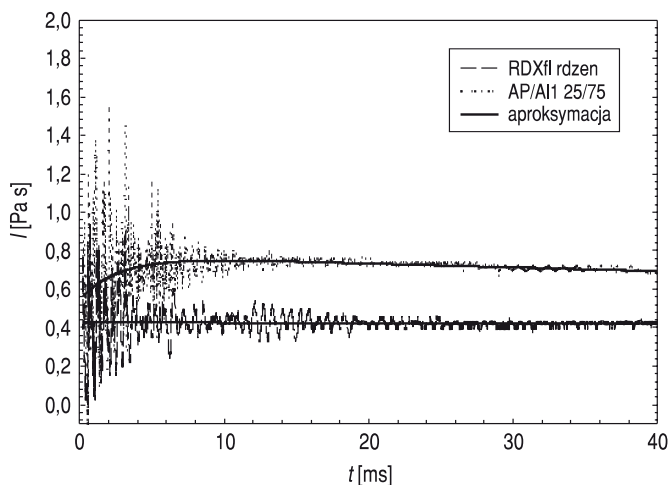
Przebieg nadciśnienia w komorze wybuchowej aproksymowano za pomocą funkcji:

$$\Delta p_{\text{apr}} = a(1 - e^{-bt}) + ce^{-dt}, \quad (4)$$

gdzie a , b , c i d oznaczają stałe. Pierwszy człon funkcji opisuje wzrost średniego ciśnienia w komorze na skutek spalania w powietrzu cząstek aluminium i produktów detonacji, człon drugi odpowiada za spadek ciśnienia spowodowany przekazywaniem ciepła z ośrodka gazowego do ścianki stalowej komory. Funkcja (4) osiąga wartość maksymalną Δp_{maks} dla czasu:

$$t_{maks} = \ln\left(\frac{ab}{cd}\right) \frac{1}{b-d}. \quad (5)$$

Przykład aproksymacji nadciśnienia w komorze wybuchowej pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Aproksymacja przebiegu ciśnienia w komorze wybuchowej po detonacji ładunku warstwowego RDXfl-AP/Al1 25/75 oraz ładunku heksogenowego

Wartości Δp_{maks} oszacowane na podstawie co najmniej sześciu przebiegów nadciśnienia w komorze zebrano w tabeli 5. Tak określone wartości nadciśnienia można traktować jako ciśnienie quasi-statyczne (QSP). W tabeli zamieszczono również wartości nadciśnienia Δp_{teor} obliczone dla wybuchu badanych ładunków w objętości komory wypełnionej powietrzem (bez wymiany ciepła ze ścianką komory). Obliczenia wykonano za pomocą kodu CHEETAH [8].

Z danych prezentowanych w tabeli wynika, że zastosowanie warstwy zewnętrznej w ładunku z rdzeniem heksogenowym powoduje dwukrotny wzrost ciśnienia quasi-statycznego. Jednakże zmierzone wartości tego ciśnienia są znacznie niższe niż średnie nadciśnienie obliczone przy założeniu pełnej równowagi termodynamicznej w komorze. Stosunek tych ciśnień maleje ze wzrostem zawartości proszku glinu w ładunku. Ponieważ z obliczeń termochemicznych wynika, że cała ilość glinu

spala się podczas wybuchu w komorze, oznacza to, że w rzeczywistych warunkach tylko część glinu reaguje z tlenem zawartym w ładunku i w powietrzu w czasie trwania pomiaru nadciśnienia (ok. 40 ms). Zwraca uwagę fakt, że dla ładunków zawierających glin bez dodatkowego utleniacza (AP) uzyskano wartość QSP tylko nieznacznie niższą niż w przypadku ładunków z warstwą AP/Al. Biorąc dodatkowo pod uwagę wyniki uzyskane w bunkrze, możemy stwierdzić, że w przypadku badanych ładunków warstwowych najlepsze właściwości podmuchowe (burzące) mają ładunki z warstwą zewnętrzną zawierającą czysty proszek glinu.

TABELA 5

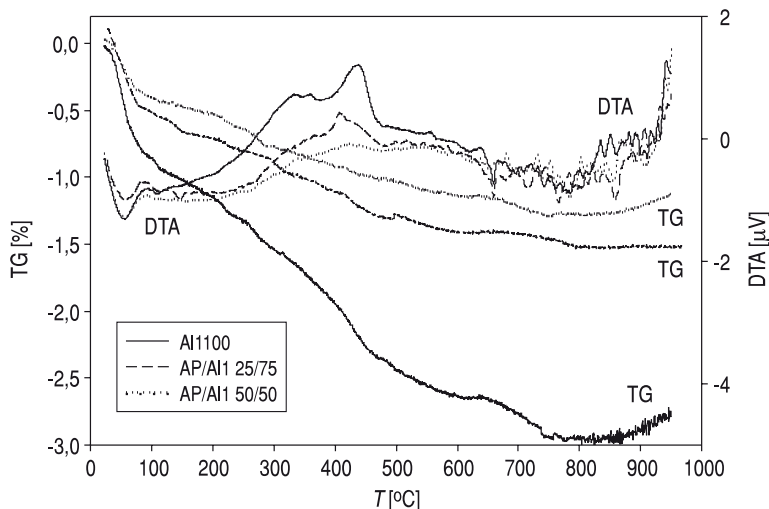
Wartości Δp_{maks} otrzymane na podstawie przebiegów nadciśnienia w komorze wybuchowej zarejestrowanych podczas detonacji testowanych ładunków

Ładunek wybuchowy	Δp_{maks} [MPa]	Δp_{teor} [MPa]	$\frac{\Delta p_{\text{maks}}}{\Delta p_{\text{teor}}} \cdot 100\%$
RDXfl rdzeń	0,42 ± 0,02	0,54	77,8
AP/AlI 50/50	0,78 ± 0,07	1,17	66,7
AP/Al2 50/50	0,78 ± 0,05	1,17	66,7
AP/AlI 25/75	0,81 ± 0,07	1,27	63,8
AP/Al2 25/75	0,79 ± 0,04	1,27	62,2
AlI 100	0,75 ± 0,07	1,33	56,4
Al2 100	0,73 ± 0,05	1,33	54,9

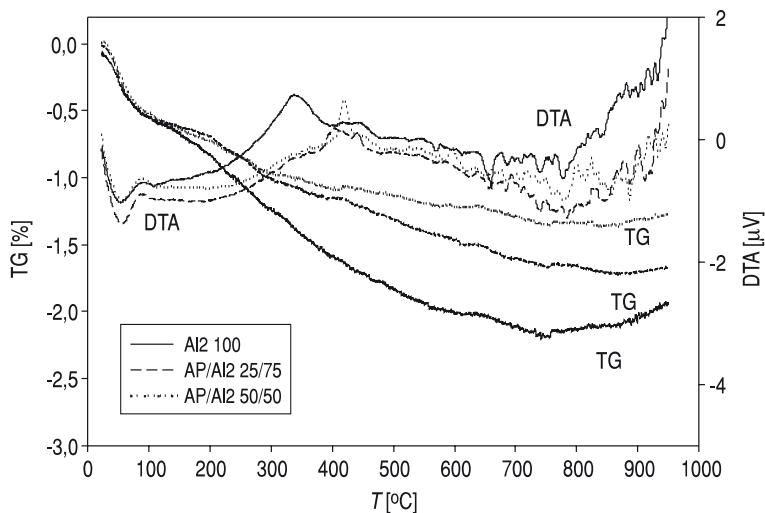
4. Analiza produktów wybuchu

Analizę stałych produktów wybuchu przeprowadzono, wykorzystując pozostałości wybuchowe zebrane po detonacji testowanych ładunków w komorze wybuchowej. Dokonano analizy termicznej w celu sprawdzenia, czy w produktach wybuchu obecny jest niespalony glin. Analizę przeprowadzono połączonymi technikami termograwimetrii i różnicowej analizy termicznej (TG/DTA). Zastosowano aparat Labsys-TG/DTA firmy SETARAM. Uzyskane termogramy zebrano na rysunkach 14 i 15.

Analiza przebiegu krzywych termograwimetrycznych (TG) wskazuje, że podczas ogrzewania w obecności tlenu, próbki produktów wybuchu systematycznie tracą masę. W zakresie temperatur od 20 do ok. 120°C ubytek masy wynosi 0,5-1% i jest spowodowany odparowaniem zaadsorbowanych gazów i wody. Ten etap procesu ma charakter endotermiczny (na krzywych DTA widoczne są minima). Powyżej 200°C rozpoczynają się reakcje utlenienia substancji organicznych i sadzy (tzn. produktów niepełnego utlenienia materiałów wybuchowych). Świadczy o tym powolne zmniejszanie masy próbek oraz obecność szerokich, egzotermicznych



Rys. 14. Krzywe TG i DTA ogrzewania próbek z pozostałości po wybuchu ładunków warstwowych zawierających proszek glinu Al1 (masa 33-39 mg, szybkość ogrzewania 10°C/min)



Rys. 15. Krzywe TG i DTA ogrzewania próbek z pozostałości po wybuchu ładunków warstwowych zawierających proszek glinu Al2 (masa 28-37 mg, szybkość ogrzewania 10°C/min)

pików na krzywych DTA. Reakcje utleniania zachodzą powoli (szerokie piki DTA), ponieważ substancje palne wymieszane są z tlenkiem glinu, co utrudnia ich kontakt z tlenem atmosferycznym (tzw. spalanie filtracyjne).

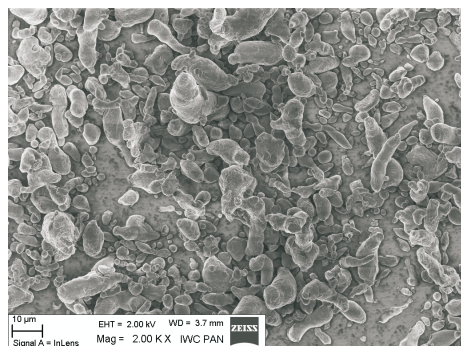
Największy ubytek masy zarejestrowano w przypadku produktów wybuchu ładunku, w którego otocze był wyłącznie proszek glinu (Al1 lub Al2). Wymieszanie glinu z chloranem (VII) amonu (AP) skutkuje poprawą bilansu tlenowego

w obłoku powybuchowym i w produktach wybuchu jest mniej substancji palnych (o 1-2 punkty procentowe). Im więcej dodatkowego utleniacza w otoczce (25 lub 50%), tym mniej produktów nie w pełni utlenionych. Fakt ten potwierdza słuszność niniejszych rozważań.

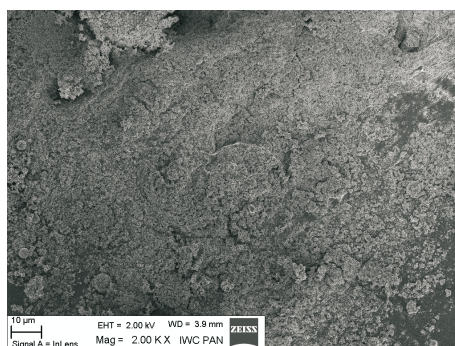
We wnętrzu cząstek tlenku glinu powstałych w wyniku wybuchu ładunków niezawierających AP pozostała także pewna ilość metalicznego glinu. Świadczy o tym obecność pików na krzywych DTA, których minima położone są w temperaturze ok. 660°C. Przebieg krzywych TG powyżej temperatury topnienia glinu (660,35°C) nie wskazuje na wzrost masy próbki, a zatem glin nie ulega utlenieniu bezpośrednio po stopieniu. Jest to skutek obecności grubej warstwy tlenku glinu, która uniemożliwia kontakt pozostałego glinu z tlenem atmosferycznym. Niewielka intensywność pików będących wynikiem topnienia glinu oraz brak wyraźnego wzrostu masy próbek nawet po ich ogrzaniu do 1000°C wskazują, że zawartość metalicznego glinu w produktach wybuchu jest bardzo mała.

Z obliczeń termochemicznych wykonanych za pomocą kodu CHEETAH wynika, że temperatura produktów idealnego wybuchu w komorze wynosi 1639, 3104, 3539 i 3915 K odpowiednio dla ładunku z czystego RDXf1 oraz dla ładunków z mieszaninami AP/Al 50/50, AP/Al 25/75 i z proszkiem glinu w warstwie zewnętrznej. Należy jednak pamiętać, że parametry wybuchu obliczane są dla idealnego wymieszania reagentów. Zakładając, że tylko część glinu spali się w początkowej fazie mieszania się produktów wybuchu i powietrza, można przyjąć, że w przypadku ładunków warstwowych średnia temperatura reaktywnej mieszaniny w komorze jest wyższa niż 1600 K, a więc wyższa od temperatury topnienia glinu. Tak więc proszek glinu powinien spalić się w tlenie z powietrza zamkniętego w komorze. Potwierdzają to wyniki analizy TG/DTA prezentowane wyżej.

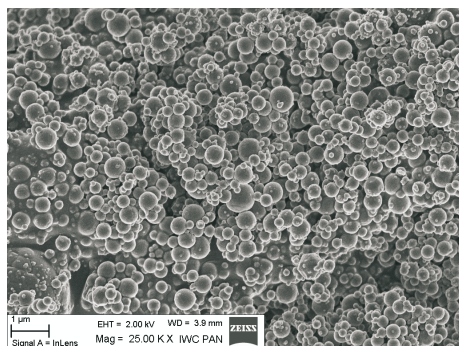
O wysokiej temperaturze panującej w komorze świadczą również zdjęcia stałych produktów wybuchu wykonane techniką mikroskopii elektronowej. Na rysunku 16 pokazano zdjęcie proszku glinu Al1, zaś na rysunkach 17-21 zdjęcia produktów



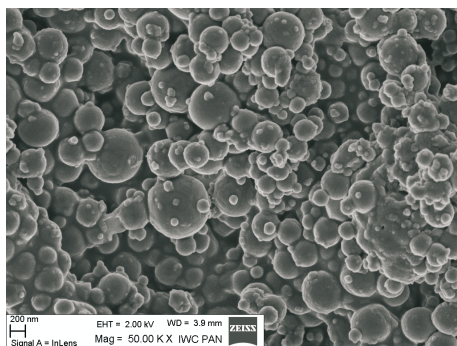
Rys. 16. Zdjęcie proszku glinu Al1 (×2000)



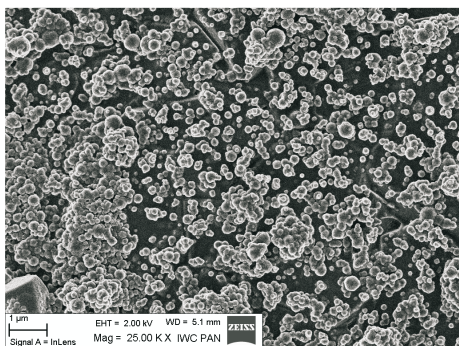
Rys. 17. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXf1-Al1 (×2000)



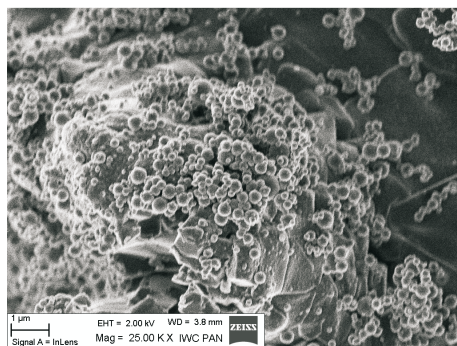
Rys. 18. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-Al11 (×20000)



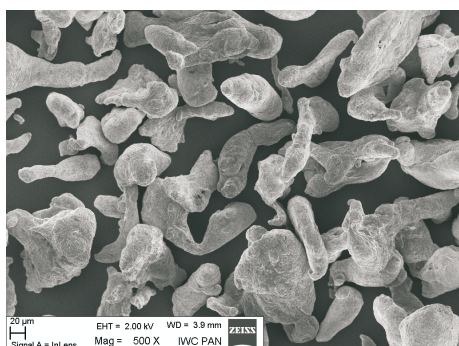
Rys. 19. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-Al11 (×50000)



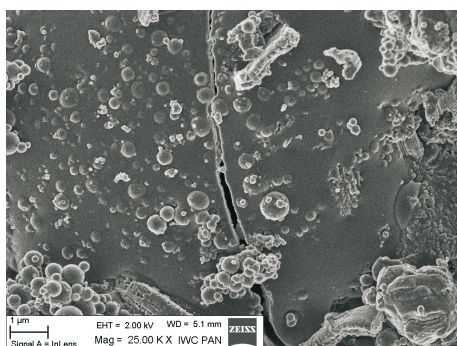
Rys. 20. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-AP/Al1 25/75 (×20000)



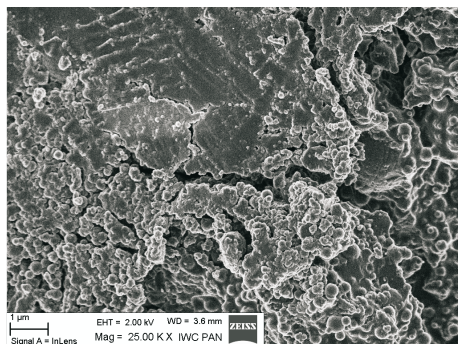
Rys. 21. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-AP/Al1 50/50 (×20000)



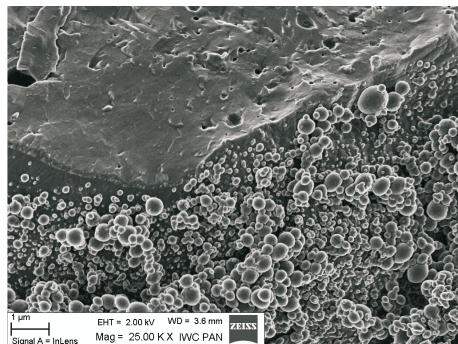
Rys. 22. Zdjęcie proszku glinu Al2 (×500)



Rys. 23. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-Al12 (×25000)



Rys. 24. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-AP/Al₂ 25/75 (×25000)



Rys. 25. Zdjęcie produktów wybuchu po detonacji ładunku RDXfl-AP/Al₂ 50/50 (×25000)

wybuchu po detonacji ładunków warstwowych zawierających Al₁. Zdjęcia grubszego proszku glinu Al₂ oraz produktów wybuchu ładunków z tym proszkiem pokazano na rysunkach 22-25.

Obecność na zdjęciach produktu stałego w kształcie kulistych cząstek o rozmiarze nanometrów świadczy o tym, że powstał on z materiału w postaci ciekłej. Ponieważ wcześniejsza analiza wykazała, że jest to tlenek glinu, więc temperatura produktów wybuchu w komorze z pewnością przekroczyła 1000 K (temperatura topnienia glinu ~930 K).

5. Podsumowanie

Analiza wyników uzyskanych w pracy pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Po wybuchu w bunkrze ładunków warstwowych o różnej średnicy zaobserwowano wzrost parametrów padającej fali podmuchowej jedynie o 25-30%, pomimo tego że masa ładunków różni się niemal dwukrotnie.
2. Ze wzrostem zawartości glinu w ładunkach rosną parametry fali podmuchowej, szczególnie w przypadku ładunków o większej średnicy rdzenia. Oznacza to, że już w fazie rozlotu produktów detonacji glin spala się i dodatkowe ciepło wzmacnia falę podmuchową.
3. Wzrost impulsu całkowitego ciśnienia w bunkrze, określonego dla czasu ok. 40 ms, dla prawie wszystkich dużych ładunków wynosi 80-100% w stosunku do ładunków o masie dwukrotnie mniejszej. Największe wartości impulsu uzyskano dla ładunków z warstwą zewnętrzną z czystego proszku glinu.
4. Ze względu na dynamiczne zmiany nadciśnienia i stosunkowo duży błąd metody jego pomiaru nie rozstrzygnięto, w jaki sposób rozmiary cząstek glinu wpływają na parametry fali podmuchowej w testowanych ładunkach.

5. Czas świecenia produktów wybuchu ładunków warstwowych jest 3-4-krotnie dłuższy w porównaniu z ładunkami zawierającymi czysty RDXfl.
6. Zastosowanie warstwy zewnętrznej w ładunku z rdzeniem heksogenowym powoduje dwukrotny wzrost ciśnienia quasi-statycznego w komorze wybuchowej.
7. Z wartości stosunku ciśnienia quasi-statycznego do średniego ciśnienia w komorze uzyskanego z obliczeń termochemicznych wynika, że w rzeczywistych warunkach panujących w komorze tylko część glinu spala się w czasie trwania pomiaru nadciśnienia (ok. 40 ms).
8. Z analizy TG/DTA stałych produktów wybuchu wynika, że proszek glinu spala się całkowicie po detonacji badanych ładunków warstwowych w komorze.
9. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w bunkrze i w komorze, można stwierdzić, że z badanych ładunków warstwowych najlepszymi właściwościami podmuchowymi (burzącymi) charakteryzują się ładunki warstwowe z czystym glinem w warstwie zewnętrznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 4.02.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2011 r.

LITERATURA

- [1] K. BARCZ, W.A. TRZCIŃSKI, *Materiały wybuchowe termobaryczne i o podwyższonej zdolności podmuchowej*, Biul. WAT, 3, 2010.
- [2] M.L. CHAN, G.W. MEYERS, *Advanced thermobaric explosive compositions*, Patent US 6,955,732 B1, Oct. 18, 2005.
- [3] M.L. CHAN, D.T. BUI, G. MEYERS, A. TURNER, *Castable thermobaric explosive formulations*, Patent US 6,969,434 B1, Nov. 29, 2005.
- [4] R.H. GUIRGUIS, *Reactively induced fragmenting explosives*, Patent US 6,846,372 B1, Jan. 25, 2005.
- [5] J. PASZULA, W.A. TRZCIŃSKI, K. SPRZĄTCZAK, *Detonation performance of aluminium-ammonium nitrate explosives*, Central European Journal of Energetic Materials, 5, 1, 2008, 3-12.
- [6] K. GĄSIOR, W.A. TRZCIŃSKI, *Badanie charakterystyk fal podmuchowych generowanych przez ładunki warstwowe*, Biul. WAT, 2, 2009, 231-249.
- [7] J.M. DEWEY, *The shape of the blast wave: studies of the Friedlander equation*, International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock, Jeruzalem, Israel, 2010.
- [8] L.E. FRIED, *CHEETAH 1.39 — User's manual*, LLNL, 1996.

W.A. TRZCIŃSKI, K. BARCZ, S. CUDZIŁO, J. PASZULA

Investigation of confined explosion of layered charges

Abstract. The confined explosion of an annular layered charges composed of a phlegmatized hexogen (RDXph) core and an external layer consisting of aluminium powder (Al) or a mixture of ammonium perchlorate (AP) and aluminium powder was studied. Experiments were carried out in fully and partially closed structures, i.e., in the explosion chamber of 150 dm³ in volume and in the 40 m³ volume bunker with four small holes and a doorway. Two types of aluminium powder were used in the mixtures. Signals of overpressure from two piezoelectric gauges located at the chamber's wall were

recorded and the influence of aluminium contents and particle size on a quasi-static pressure (QSP) was studied. Moreover, the solid residues from the chamber were analyzed to determine their composition. A TG/DTA/DSC analyzer was used. Pressure and light histories recorded in the bunker enable us to determine blast wave characteristics and time-duration of light output. The effect of a dimension of RDXph core and aluminium particle size on blast wave parameters was also investigated.

Keywords: thermobaric explosive charges, blast waves, confined explosion