



## Badanie reakcji materiałów wysokoenergetycznych na uderzenie strumienia kumulacyjnego

WALDEMAR A. TRZCIŃSKI, JAKUB PIERGIES,  
ARTUR STECKIEWICZ<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Centrum Szkolenia Policji,  
05-119 Legionowo, ul. Zegrzyńska 121

**Streszczenie.** W pracy zbadano reakcję materiałów wysokoenergetycznych zamkniętych w ciężkich otoczkach na uderzenie strumienia kumulacyjnego. Do badań wytypowano nieidealne materiały wybuchowe, trotyl oraz środki bojowe zabezpieczone przez policję. Scharakteryzowano strumień generowany przez zastosowane ładunki kumulacyjne. Materiały wybuchowe zamykano w rurach stalowych i ich reakcję oceniano na podstawie ilości i wielkości odłamków. Próby przeprowadzono na specjalnie przygotowanym stanowisku umożliwiającym odzyskanie odłamków. Środki bojowe testowano w warunkach poligonowych.

**Słowa kluczowe:** materiały wysokoenergetyczne, strumień kumulacyjny, improwizowane urządzenia wybuchowe

### 1. Wstęp

Podczas rutynowych i operacyjnych działań policji zabezpieczone są często różnego rodzaju wojskowe urządzenia wybuchowe. W większości wypadków źródłem ich pozyskiwania są obszary dawnych pobojoisk lub opuszczone tereny wojskowe. Środki bojowe w postaci bomb, min, granatów i pocisków, oprócz środowiska kolekcjonerów militariów, pozostają w zainteresowaniu grup przestępczych jako materiał przeznaczony do wtórnego odzysku zawartego w nich materiału wybuchowego lub jako gotowe elementy stosowane w tzw. improwizowanych urządzeniach wybuchowych (*Improvised Explosive Devices* — IEDs). Jak wykazały

badania, materiały te, pomimo długiego leżakowania w niesprzyjających warunkach, utrzymują (w określonym stopniu) swoją wartość bojową i praktycznie nadają się do zastosowania. Dla uwiarygodnienia skali zjawiska w tabeli 1.1 przedstawiono trzyletnie zestawienie amunicji przekazanej do opiniowania przez jednego biegłego z zakresu środków i urządzeń wybuchowych.

TABELA 1.1

Zestawienie środków bojowych opiniowanych przez jednego biegłego w latach 2009-2011

Środki bojowe	2009 rok	2010 rok	2011 rok
Granaty ręczne różnych wzorów	95	8	73
Granaty nasadkowe karabinowe	173	10	20
Pociski odłamkowe różnego kalibru	92	1	105
Pociski ppanc. różnego kalibru	3	4	4
Pociski odłamkowe i ppanc. różnego kalibru	25	–	12
Granaty moździerzowe różnego kalibru	3	6	22
Pociski raketowe kumulacyjne 88 mm	13	–	–
Pociski burzące 122 mm	1	–	–
Miny ppanc. i ppiech.	–	4	–
Razem	405	33	236

Zabezpieczenie tego typu środków wiąże się z wyborem specjalisty mającego wydać o nich stosowną opinię. Ograniczone w swoich możliwościach laboratoria kryminalistyczne oraz związane procedurami jednostki wykonawcze w postaci wojskowych patroli rozminowania lub policyjnych sekcji pirotechnicznych odmawiają przeprowadzenia takich badań, tłumacząc się brakiem środków i technik badawczych pozwalających na bezpieczne ich przeprowadzenie. Jednym z najczęściej stosowanych w takim przypadku rozwiązań jest powołanie prywatnego biegłego lub specjalisty z zakresu środków i urządzeń wybuchowych.

Podstawowe pytania zawarte w treści postanowienia o powołaniu biegłego dotyczą potwierdzenia obecności materiału wybuchowego w danym urządzeniu, jego sprawności oraz stopnia zagrożenia wynikającego z wrażliwości na przypadkowe bodźce zewnętrzne, na przykład oddziaływanie mechaniczne lub termiczne. Udzielenie odpowiedzi na tak postawione pytania wymaga przeprowadzenia poligonowych badań polegających na częściowym lub całkowitym demontażu mechanicznym (np. wykręceniu zapalnika lub wkrętki głowicowej) albo zastosowaniu innych rozwiązań umożliwiających pobranie próbki wypełniacza z wnętrza skorupy, na przykład poprzez jej nawiercenie. Czynności takie należą do najbardziej niebezpiecznych w całym procesie badawczym i oprócz wynikającego z nich zagrożenia dla prowadzącego, w sposób zdecydowany podnoszą koszty wykonania ekspertyzy.

Poszukuje się więc innych, bezpieczniejszych sposobów rozszczelniania amunicji, gwarantujących, że możliwe będzie wydanie jednoznacznej opinii o obecności materiału wybuchowego. Autorzy prezentowanej pracy proponują zastosowanie do tego celu *ładunków kumulacyjnych o małym kalibrze*.

Problem odpowiedzi materiału wybuchowego na uderzenie strumienia kumulacyjnego był bardzo szeroko badany w ośrodkach naukowych na świecie i istnieje wiele publikacji poświęconych temu zagadnieniu (np. [1-15]). Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że zamknięte w metalowej osłonie materiały wybuchowe poddane działaniu strumienia kumulacyjnego wykazują różną podatność na zainicjowanie detonacji w zależności od konfiguracji układu. Na przykład materiały wybuchowe o wiele łatwiej ulegają detonacji w układach ze szczeliną powietrzną między metalową osłoną i testowanym ładunkiem niż w przypadku, gdy ładunki są w bezpośrednim kontakcie z osłoną. Przyczyną mniejszej wrażliwości materiału wybuchowego w drugim przypadku jest jego kompresja przez falę uderzeniową propagującą się w metalowej przegrodzie i w materiale wybuchowym przed strumieniem kumulacyjnym. Fala ta ma właściwości desensybilizujące materiał energetyczny. Wprowadzenie szczeliny powietrznej powoduje rozproszenie fali uderzeniowej po jej wyjściu z przegrody i czyni materiał wybuchowy bardziej podatny na zainicjowanie detonacji przez wnikający strumień. Na proces inicjowania wpływa również rodzaj materiału, z którego wykonana jest przegroda (zjawisko tzw. puchnięcia materiału). Znaczenie ma też fakt, czy ładunek materiału wybuchowego jest całkowicie zamknięty, czy tylko osłonięty. W obu przypadkach pod bezpośrednim oddziaływaniem strumienia o dużej prędkości materiał detonuje. Różnice pojawiają się, gdy strumień ma zredukowaną prędkość po przebicium osłony. Wówczas ładunek zamknięty ulega deflagracji, natomiast ładunek tylko osłonięty jest rozpraszany bez żadnej przemiany chemicznej.

Z dokładnej analizy zdjęć rentgenowskich badanych układów wynika, że po uderzeniu strumienia kumulacyjnego w ładunek zainicjowanie detonacji ma miejsce dopiero po pewnym czasie i w pewnej odległości od miejsca uderzenia. Zarówno czas indukcji reakcji chemicznych, jak i droga rozbiegu detonacji zależą od tego, czy strumień uderza bezpośrednio w materiał wybuchowy, czy poprzez warstwę materiału inercyjnego, np. stali. Występowanie drogi rozwoju detonacji może mieć znaczenie przy inicjowaniu detonacji przez strumień kumulacyjny w małych ładunkach.

Wymienione wyżej pozycje literatury dotyczą kruszących materiałów wybuchowych stosowanych w technice wojskowej. Brakuje natomiast w dostępnej literaturze danych odnoszących się do odpowiedzi na uderzenie strumienia kumulacyjnego innych wysokoenergetycznych materiałów, w tym nieidealnych materiałów wybuchowych. Problem staje się istotny, ponieważ tego typu materiały coraz częściej znajdują zastosowanie w improwizowanych ładunkach wybuchowych. Stwierdzenie, czy w danym urządzeniu wybuchowym o ciężkiej obudowie znajduje się materiał wysokoenergetyczny, wymaga rozebrania tego urządzenia, co wiąże się z dużym

niebezpieczeństwem wybuchu. Zastosowanie do ich zniszczenia silnego materiału wybuchowego (np. kostek trotylu) powoduje, że jednoznaczna ocena, czy wypełnienie stanowił materiał wysokoenergetyczny, jest trudna. Fakt ten wykorzystywany jest często przez prawników do kwestionowania zarzutów stawianych przez organy ścigania podejrzanym o posiadanie tego typu urządzeń lub starej amunicji pochodzenia wojskowego. Poznanie reakcji różnego rodzaju materiałów energetycznych na uderzenie strumienia oraz zastosowanie ładunku kumulacyjnego do zniszczenia improwizowanego urządzenia wybuchowego lub amunicji pozwoli na jednoznaczne stwierdzenie, czy ich wypełnienie stanowił materiał zdolny do deflagracji lub wybuchu, czy też jest materiałem nieenergetycznym.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie odpowiedzi ładunku materiału wysokoenergetycznego zamkniętego w ciężkiej obudowie na uderzenie strumienia kumulacyjnego. Do badań wytypowano nieidealne materiały wybuchowe i trotyl oraz różne rodzaje amunicji.

## 2. Badane materiały wybuchowe i układ badawczy

Po analizie prezentowanych w pracy [16] danych dotyczących materiałów energetycznych stosowanych w improwizowanych urządzeniach wybuchowych do badań wytypowano następujące nieidealne materiały wybuchowe: amonal ( $\alpha$ ) bazujący na mielonym proszku azotanu amonu (mielona saletra amonowa), amonal ( $\beta$ ) z rolniczej saletry amonowej (granulowanej), materiał wybuchowy emulsyjny MWE, ANFO ( $\alpha$ ) z porowatego azotanu amonu, ANFO ( $\beta$ ) z saletry granulowanej, mieszaninę prochu nitrocelulozowego z trotylem, mieszaninę MWE z heksogenem. Dla porównania badano również ładunki z trotylu sypkiego, prasowanego i odlewane. Trotyl i heksogen były fabrycznymi produktami krajowymi. MWE składał się z emulsji oraz mikrobalonów szklanych (0,8% wagowych). Do sporządzenia amonali użyty został pył glinowy firmy Benda Lutz o numerze katalogowym 3083. Proszek glinu przesiewany był na sicie 325 mesh (45  $\mu\text{m}$ ), zaś średni wymiar ziaren wynosił 12  $\mu\text{m}$ . W mieszaninie prochu z trotylem wykorzystano proch nitrocelulozowy P-200. Składy i gęstości przygotowanych ładunków przedstawiono w tabeli 2.1.

Ładunek badanego materiału wybuchowego umieszczano w stalowej, bezszwowej rurze, obustronnie zamkniętej (rys. 2.1). Rura miała długość 253 mm, grubość ścianki 6 mm i średnicę wewnętrzną 31 mm. Na środku rury, prostopadle do jej osi, mocowano ładunek kumulacyjny w odległości 70 mm od ścianki rury. Całość umieszczano najpierw w plastikowym pojemniku i następnie zasypywano piaskiem w stalowej rurze o średnicy 508 mm, grubości ścianki 11 mm i wysokości 500 mm (rys. 2.2).

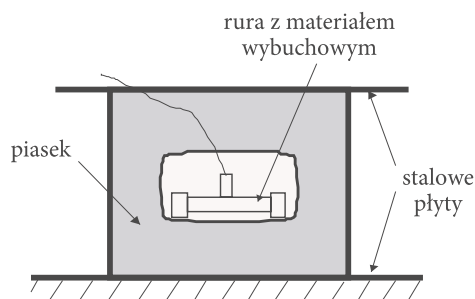
TABELA 2.1

## Charakterystyki badanych materiałów wybuchowych

Materiał wybuchowy	Skład	Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
ANFO $\alpha$	porowaty azotan amonu/olej 94/6	0,9
ANFO $\beta$	granulowany azotan amonu/olej 94/6	1,0
Amonal $\alpha$	mielony azotan amonu/glin 90/10	0,9
Amonal $\beta$	granulowany azotan amonu/glin 90/10	1,0
MWE	emulsja/mikrobalony szklane 99,2/0,8	0,9
MWE + RDX	emulsja/heksogen 70/30	1,4
TNT + proch	trotyl/proch 50/50	0,6
TNT sypki	trotyl 100	0,8
TNT lany	trotyl 100	1,57
TNT prasowany	trotyl 100	1,60



Rys. 2.1. Stalowa rura z ładunkiem materiału wybuchowego i ładunkiem kumulacyjnym



Rys. 2.2. Schemat układu badawczego

Odpowiedź materiału energetycznego oceniano na podstawie liczby odzyskanych odłamków stalowych. Po każdej wykonanej próbie odłamki w bunkrze były zbierane za pomocą magnesu neodymowego, liczone i następnie fotografowane. Do oceny odpowiedzi wojskowego materiału wysokoenergetycznego, na przykład trotylu, można wykorzystać kryteria zawarte w normie [17] dla tzw. testu rurowego, w którym materiał wybuchowy umieszcza się w identycznej rurze stalowej i pobudza do reakcji przez zapalenie podsypki prochu czarnego o masie 2 g. Kryteria te przedstawiono w tabeli 2.2.

TABELA 2.2

Kryteria oceny odpowiedzi na zapalenie wojskowych materiałów wybuchowych w tzw. teście rurowym

Poziom reakcji	Liczba odłamków	Typ reakcji
0	0	brak reakcji
1	0 (pęknięcie rury)	spalenie
2	2-9	deflagracja
3	10-100 (10-50*)	wybuch
4	powyżej 100 (powyżej 50*)	detonacja

\*dla nieidealnych materiałów wybuchowych

Należy jednak pamiętać, że materiały wybuchowe wojskowe są znacznie silniejsze niż materiały o przeznaczeniu cywilnym, które są materiałami nieidealnymi. Ciśnienie na froncie fali detonacyjnej w heksogenie czy oktogenie może być o rząd wielkości większe od ciśnienia detonacji nieidealnych materiałów wybuchowych. Ponieważ kruszące właściwości materiałów wybuchowych zależą przede wszystkim od tego ciśnienia, to ilość i wielkość odłamków z rury stalowej będą zdecydowanie różne po detonacji silnego i nieidealnego materiału wybuchowego. Dlatego w celu znalezienia kryterium detonacji dla nieidealnych materiałów detonacji wykonano dwa testy dla ANFO  $\alpha$  i amonalu  $\beta$ , w których zamknięty w rurze materiał wybuchowy pobudzano do detonacji w sposób klasyczny (zapalnik i detonator heksogenowy o masie 5 g). W celu stwierdzenia wystąpienia detonacji mierzono jej prędkość na dwóch bazach pomiarowych. Dla ładunku z ANFO  $\alpha$  zmierzono prędkości detonacji 2550 i 2580 m/s, a ilość odzyskanych odłamków wynosiła 61 (96,3% masy rury). Zdjęcie odłamków pokazano na rysunku 2.3. Dla amonalu  $\beta$  uzyskano prędkość 1930 m/s oraz 49 odłamków (98% masy rury). Prędkość ta została wyznaczona na podstawie wyników z jednej bazy pomiarowej (drugiego wyniku nie udało się



Rys. 2.3. Odłamki odzyskane po detonacji ANFO  $\alpha$



Rys. 2.4. Odłamki odzyskane po detonacji amonalu  $\beta$

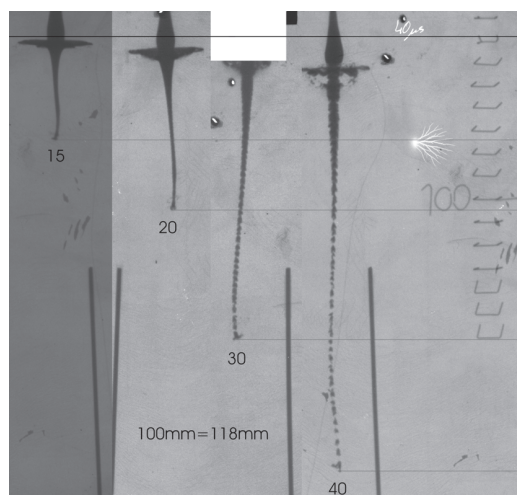


zarejestrować), ale jej wartość jest zbliżona do prędkości detonacji amonali bazujących na granulowanej saetrze amonowej [16]. Zdjęcie odłamków umieszczono na rysunku 2.4. Opierając się na tych wynikach badań, przyjęto, że kryterium wystąpienia detonacji dla nieidealnych materiałów wybuchowych wynosi powyżej 50 odłamków (nie wszystkie odłamki po detonacji amonalu  $\beta$  udało się odzyskać). Dla deflagracji (2-9 odłamków) i wybuchu (10-50 odłamków) dolne granice podane w tabeli 2.2 pozostawiono bez zmian.

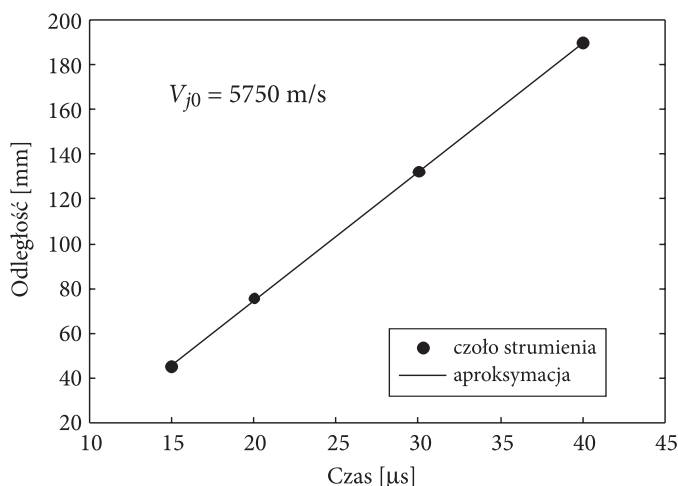
### 3. Charakterystyka strumienia kumulacyjnego

Przed rozpoczęciem badań głównych scharakteryzowano strumień kumulacyjny uderzający w ładunek materiału energetycznego zamknięty w rurze stalowej. Zastosowano ładunki kumulacyjne Łokt H-Pp-32-130 wyprodukowane w Instytucie Przemysłu Organicznego. Ładunek kumulacyjny zawierał 21,5 g oktoflenu (flegmatyzowanego oktogenu). Wkładka o masie 14 g, średnicy 32 mm i kącie rozwarcia  $60^\circ$  wykonana została z miedzi spiekanej ECu 160. Otoczkę ładunku stanowiła rura wytworzona z polipropylenu. Z badań przeprowadzonych przez producenta wynika, że strumień kumulacyjny przebija stos od 10 do 12 płytek stalowych (stal ST-3-5) o grubości 10 mm każda.

Prędkość strumienia wyznaczono na podstawie zdjęć wykonanych techniką rentgenografii impulsowej (rys. 3.1). Następnie za pomocą programu SigmaScan [18] odczytano współrzędne punktów odpowiadających położeniu czoła strumienia



Rys. 3.1. Zdjęcia strumienia kumulacyjnego wykonane w różnym czasie od zainicjowania detonacji ładunku



Rys. 3.2. Zależność położenia czoła strumienia od czasu

i na podstawie długości znacznika umieszczonego na każdym zdjęciu przeliczono współrzędne ze zdjęć na odległości rzeczywiste. Z wykresu zależności położenia czoła strumienia od czasu (rys. 3.2) wyznaczono prędkość czoła strumienia ( $V_{j0} = 5750$  m/s).

W literaturze stosuje się kryterium zainicjowania detonacji w danym materiale wybuchowym w postaci  $V^2 d = \text{const}$ , gdzie  $V$  jest prędkością krytyczną strumienia, a  $d$  jego średnicą. Strumienie, dla których iloczyn  $V^2 d$  jest większy od wartości krytycznej, pobudzają materiał wybuchowy do detonacji. W przypadku zastosowania metalowej osłony prędkość  $V$  musi odpowiadać prędkości czoła strumienia po przejściu przez osłonę.

W celu oszacowania prędkości strumienia uderzającego w osłonięty materiał wybuchowy wyprowadzono związki łączące głębokość penetracji stalowej osłony (przegrody) z prędkością strumienia. Wykorzystując równanie Bernoulliego, uzyskuje się następujący wzór wiążący prędkość penetracji przegrody  $U_p$  z prędkością strumienia kumulacyjnego  $V_j$  [13]:

$$\frac{dx_p}{dt} = U_p = \frac{V_j}{1+r}, \quad r = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_j}}, \quad (3.1)$$

gdzie  $x_p$  jest głębokością penetracji,  $\rho_p$  i  $\rho_j$  oznaczają gęstości przegrody i strumienia.

Na rysunku 3.3 pokazano diagram ilustrujący proces penetracji bariery przez strumień kumulacyjny. Z rysunku wynika, że kolejne cząstki strumienia docierają do przegrody w różnym czasie. Jeżeli  $x_0$  oznacza wirtualny początek strumienia, to czas dotarcia do przegrody czoła strumienia określa związek:

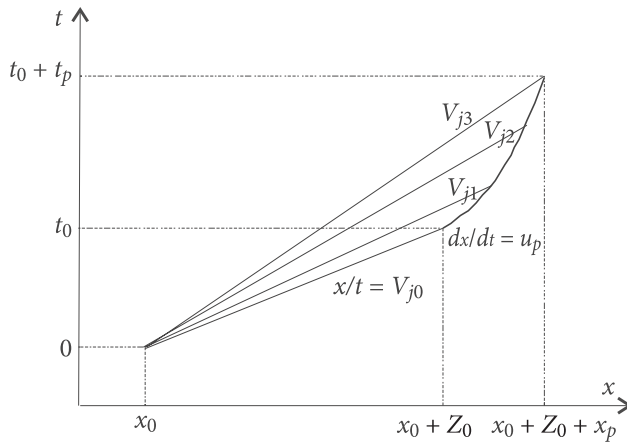


$$t_0 = \frac{Z_0}{V_{j0}}, \quad (3.2)$$

gdzie  $Z_0$  oznacza odległość początku strumienia od bariery. Prędkość kolejnych cząstek strumienia docierających do dna krateru wynika ze związku

$$V_j = \frac{x_p + Z_0}{t_p + t_0}, \quad (3.3)$$

gdzie  $x_p$  i  $t_p$  oznaczają odpowiednio głębokość i czas penetracji.



Rys. 3.3. Diagram ilustrujący proces penetracji bariery przez strumień

Podstawiając związek (3.3) do wzoru (3.2), otrzymuje się

$$\frac{dx_p}{dt_p} = \frac{1}{1+r} \frac{x_p + Z_0}{t_p + t_0}, \quad (3.4)$$

z warunkiem początkowym

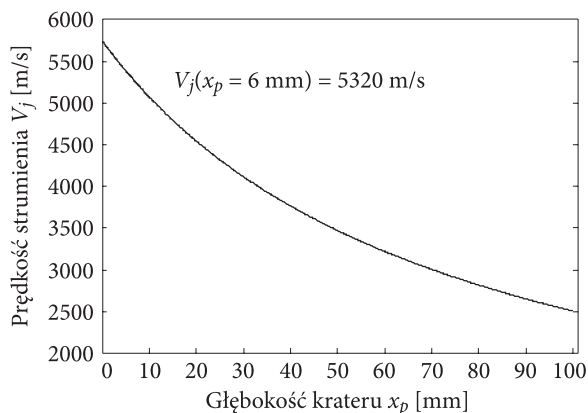
$$x_p(0) = 0. \quad (3.5)$$

Po rozwiązaniu równania (3.4) otrzymuje się następujące wyrażenie na czas penetracji

$$t_p = \frac{Z_0}{V_{j0}} \left[ \left( 1 + \frac{x_p}{Z_0} \right)^{1+r} - 1 \right], \quad (3.6)$$

a prędkość strumienia po przebicciu przegrody o grubości  $x_p$  określa wzór (3.3).

Dla strumienia uderzającego z prędkością  $V_{j0} = 5750$  m/s w barierę stalową policzono prędkość tego strumienia w funkcji głębokości penetracji. Założono, że wirtualny początek strumienia odpowiada płaszczyźnie podstawy stożka ładunku kumulacyjnego i jego odległość od przegrody wynosi 70 mm. Ze wzoru (3.6) obliczano czas penetracji do danej głębokości  $x_p$ , a ze wzoru (3.3) prędkość strumienia. Wyniki umieszczono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Zależność prędkości strumienia od głębokości penetracji bariery

Wyprowadzone związki wykorzystano do obliczenia prędkości strumienia uderzającego w badany materiał wybuchowy po przebicciu ścianki rury stalowej. Czas przebiccia  $t_p$  wyznaczono ze wzoru (3.6) po podstawieniu  $x_p = 6$  mm. Przyjęto następujące gęstości stali i miedzi:  $\rho_{st} = 7,8$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{Cu} = 8,9$  g/cm<sup>3</sup>. Obliczona prędkość strumienia wynosiła  $V_j = 5320$  m/s. Jest to prędkość strumienia uderzającego bezpośrednio w materiał wybuchowy zamknięty w zastosowanej rurze stalowej.

Do obliczenia wartości  $V_j^2 d$  potrzebna jest również średnica strumienia. Jej wielkość  $d = 1,2$  mm oszacowano, wykorzystując zdjęcie rentgenowskie wykonane dla czasu opóźnienia  $\tau = 20$   $\mu$ s. Z rysunku 3.4 wynika, że dla tego czasu długość strumienia odpowiada w przybliżeniu odległości podstawy stożka ładunku kumulacyjnego od ścianki rury stalowej.

Dla strumienia penetrującego materiały wysokoenergetyczne w zastosowanym układzie badawczym mamy więc  $V_j^2 d = 34$  mm<sup>3</sup>/μs<sup>2</sup>. Dla porównania w tabeli 3.1 zebrano przykładowe wartości krytyczne  $V^2 d$  dla wybranych materiałów wybuchowych stosowanych w technice wojskowej. Z porównania wyznaczonej wartości  $V_j^2 d$  z danymi podanymi w tabeli 3.1 wynika, że odpowiedzią większości z zebranych tam materiałów wybuchowych w badanym układzie byłyby detonacja. Jednakże część z nich prawdopodobnie uległaby tylko deflagracji. Przypadek trotylu prasowanego zostanie zweryfikowany w dalszej części pracy.

TABELA 3.1

Wartości krytyczne  $V^2d$  dla inicjowania detonacji materiałów wybuchowych stosowanych w technice wojskowej

Materiał wybuchowy	Skład	$V^2d$ [mm <sup>3</sup> /μs <sup>2</sup> ]	Źródło
LX-13	pentryt/sylgard 80/20	12	[4]
TNT prasowany	trotyl 100	13	[2]
PETN	pentryt 100	13	[4]
Kompozycja B	heksogen/trotyl/wosk 55/45/1	15	[2]
PBX 9404	oktogen/nitroceluloza/lepiszcze 94/3/3	16	[4]
Kompozycja B3	heksogen/trotyl 60/40	29	[4]
X2	oktogen/lepiszcze	32	[3]
Cyklitol 72/25	heksogen/trotyl 75/25	37	[4]
PBX 9407	heksogen/exon 94/6	41	[4]
Tetryl	tetryl 100	41	[4]
PBX 9502	TATB/Kel-F 95/5	41	[12]
T2	TATB/lepiszcze 97/3	62	[3]
C4	heksogen/wosk 91/9	64	[8]
Nitrometan	nitrometan 100	84	[12]

#### 4. Analiza wyników badań

Odłamki były zbierane, liczone i fotografowane. Zdjęcia odłamków powstałych po detonacji ładunków badanych materiałów wybuchowych przedstawiono na rysunkach 4.1-4.10, a informacje o liczbie odzyskanych odłamków zebrano w tabeli 4.1. Wszystkie zastosowane materiały wybuchowe zareagowały na uderzenie strumienia w taki sposób, że powstałe ciśnienie gazów spowodowało rozerwanie rury na kawałki. Stwierdzono, że jedynie w przypadku ANFO  $\beta$  i mieszaniny MWE z heksogenem doszło do zaniku reakcji wybuchowej, o czym świadczył pozostały w rurze materiał wybuchowy.



Rys. 4.1. Odłamki odzyskane po próbie z ANFO  $\alpha$



Rys. 4.2. Odłamki odzyskane po próbie z ANFO  $\beta$



Rys. 4.3. Odłamki odzyskane po próbie z amonalem  $\alpha$



Rys. 4.4. Odłamki odzyskane po próbie z amonalem  $\beta$



Rys. 4.5. Odłamki odzyskane po próbie z MWE



Rys. 4.6. Odłamki odzyskane po próbie z MWE + RDX



Rys. 4.7. Odłamki odzyskane po próbie z TNT + proch



Rys. 4.8. Odłamki odzyskane po próbie z sytkim TNT



Rys. 4.9. Odłamki odzyskane po próbie z odlewanym TNT



Rys. 4.10. Odłamki odzyskane po próbie z prasowanym TNT

TABELA 4.1

Masa i ilość odzyskanych odłamków oraz typ reakcji materiału wybuchowego po uderzeniu strumienia kumulacyjnego

Materiał wybuchowy	Masa odzyskanych odłamków [%]	Liczba odłamków	Typ reakcji
ANFO $\alpha$	99,1	40	wybuch
ANFO $\beta$	99,9	4	deflagracja
amonal $\alpha$	98,1	59	detonacja
amonal $\beta$	98,4	33	wybuch
MWE	96,7	80	detonacja
MWE + RDX	94,5	42	wybuch
TNT + proch	93,8	74	detonacja
TNT sypki	92,5	48	wybuch
TNT lany	97,8	19	wybuch
TNT prasowany	97,5	131	detonacja

Z danych zawartych w tabeli 4.1 wynika, że dla wszystkich badanych przypadków odpowiedzią materiału energetycznego na uderzenie strumienia była deflagracja, wybuch lub detonacja z wydzielaniem się gazowych produktów reakcji, których ciśnienie rozerwało stalową rurę na kawałki. W normie [17] podaje się, że proces powolnego palenia materiału wybuchowego może spowodować jedynie pęknięcie rury. Jednakże w przypadku uderzenia strumienia kumulacyjnego sam strumień może być przyczyną rozerwania rury. W celu sprawdzenia skutków działania strumienia na rurę wypełnioną obojętną chemicznie substancją w rurze umieszczono piasek i wodę. Wyniki testów pokazano na rysunkach 4.11 i 4.12. W przypadku zastosowania piasku doszło jedynie do przebicia rury bez żadnych pęknięć ani wydęć. Po uderzeniu strumienia w rurę wypełnioną wodą doszło do pęknięcia obudowy. W obu przypadkach miała miejsce zamiana energii kinetycznej strumienia

w energię potencjalną (sprężania) ośrodka wypełniającego rurę. Ze względu na dużą porowatość piasku, powstała fala uderzeniowa była stosunkowo słaba i była szybko tłumiona w czasie propagacji w ośrodku. Z kolei mała ściśliwość wody spowodowała wygenerowanie silnej fali uderzeniowej i jej szybkie rozprzestrzenianie się wzdłuż rury. W tym przypadku powstałe ciśnienie spowodowało pęknięcie rury. Tak więc samo pęknięcie rury nie świadczy, że w próbie ze strumieniem kumulacyjnym mamy do czynienia z reakcjami chemicznymi w wypełnieniu rury.



Rys. 4.11. Odłamki odzyskane po próbie z piaskiem



Rys. 4.12. Odłamki odzyskane po próbie z wodą

Ładunek trotylu prasowanego został pobudzony do detonacji przez strumień kumulacyjny, dla którego wyznaczona wartość  $V_j^2 d$  wynosi  $34 \text{ mm}^3/\mu\text{s}^2$  i znacznie przekracza wartość krytyczną podaną w tabeli 3.1. Brakuje w literaturze informacji o wielkości tego kryterium dla pobudzania trotylu o gęstości usypowej i trotylu lanego. Zaskakujący jest wynik uzyskany dla trotylu lanego (16 odłamków). Próbę dla tego materiału wykonano powtórnie, kierując strumień kumulacyjny wzdłuż ładunku (grubość stalowej osłony wynosiła w tym przypadku 9 mm). Wynik próby był diametralnie różny — ładunek zdetonował (159 odłamków). Oznacza to, że parametry zastosowanego strumienia kumulacyjnego przekraczają wartości krytyczne również dla trotylu lanego. Testy z trotylem odlewanym potwierdzają jednak tezę udowodnioną w literaturze [8], że w przypadku zastosowania osłony przylegającej do ładunku, inicjowanie detonacji ma miejsce w pewnej odległości od granicy obciążanego materiału wybuchowego. Najprawdopodobniej w przypadku bocznego ułożenia ładunku kumulacyjnego w stosunku do rury wypełnionej trotylem odlewanym dystans ok. 30 mm (średnica wewnętrzna rury) jest za krótki, aby detonacja została zainicjowana.

Na podstawie przeprowadzonych testów rurowych można stwierdzić, że wypełnienie stalowych rur badanymi materiałami energetycznymi i poddanie ich oddziaływaniu strumienia kumulacyjnego spowodowało we wszystkich przypadkach rozerwanie rur. Nie stwierdzono rozerwania rur po umieszczeniu w nich piasku i wody. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie testu ze strumieniem kumulacyjnym umożliwiłoby udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy zamkniętą, ciężką skorupę wypełnia materiał wysokoenergetyczny i czy zdolny jest on do deflagracji, wybuchu, czy detonacji.



## 5. Badanie reakcji środków wybuchowych (amunicji) na uderzenie strumienia kumulacyjnego

W celu praktycznego zastosowania zaproponowanej metody rozszczelniania amunicji i badania reakcji zamkniętego w niej materiału wybuchowego wykorzystano środki wybuchowe (amunicję) zabezpieczone w czasie działania operacyjnego policji. Rodzaje środków poddane działaniu strumienia kumulacyjnego przedstawiono w tabeli 5.1.

TABELA 5.1

Typy środków wybuchowych stosowanych w testach ze strumieniem kumulacyjnym

Rodzaj środka wybuchowego	Typ	Materiał wybuchowy	Masa całkowita [kg]	Masa MW [g]
Pocisk odłamkowy kaliber 45 mm	O-240	trotyl	2,14	118
Kasetowa bomba-mina lotnicza	SD-2	trotyl/azotan amonu 60/40	2,0	213
Pocisk przeciwpancerny 75 mm	PzGr 39 FES	heksogen/wosk 90/10	6,8	18
Granat moździerzowy 82 mm	O-832	trotyl/azotan amonu 50/50	3,1	400

Do badanego środka wybuchowego przyklejano winidurową rurkę dystansową z ładunkiem kumulacyjnym (rys. 5.1). Zastosowano ten sam rodzaj ładunku, jak w badaniach z rurami stalowymi. Układ umieszczano w ziemi na głębokości od 56 cm (rys. 5.2) do 80 cm i zasypywano piaskiem. W przypadku granatu moździerzowego ustawiono układ kumulacyjny za zgrubieniem prowadzącym pocisku w celu uniknięcia oddziaływania strumienia na detonator zapalnika.



Rys. 5.1. Pocisk przeciwpancerny 75 mm z ładunkiem kumulacyjnym



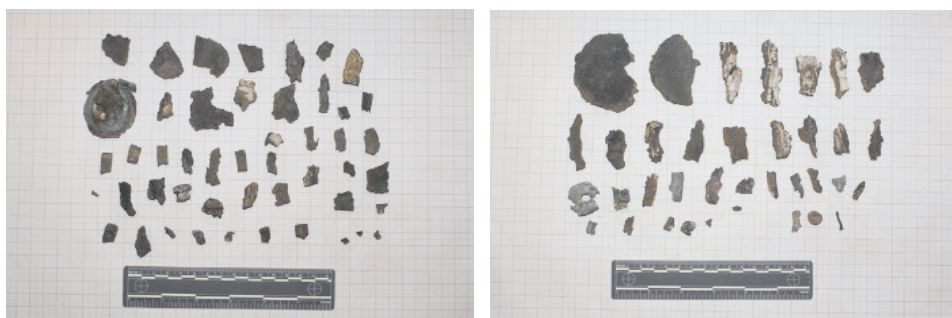
Rys. 5.2. Pocisk odłamkowy 45 mm przed zasypaniem piaskiem



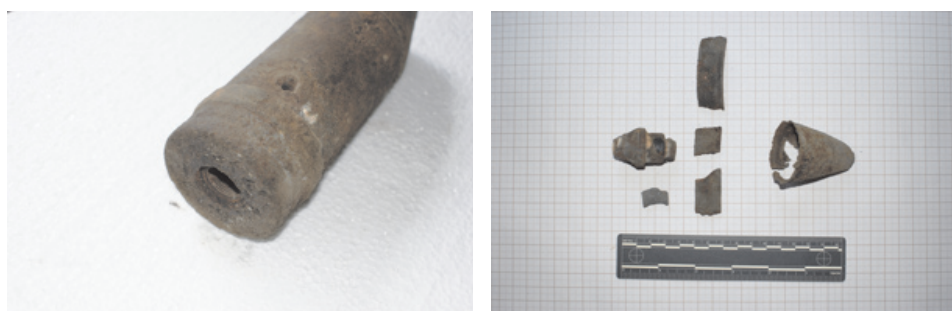
Dla każdego rodzaju środka wybuchowego wykonano dwie próby. Zdjęcia odzyskanych elementów pokazano na rysunkach 5.3-5.6. Opis wyników eksperymentu zamieszczono w tabeli 5.2.



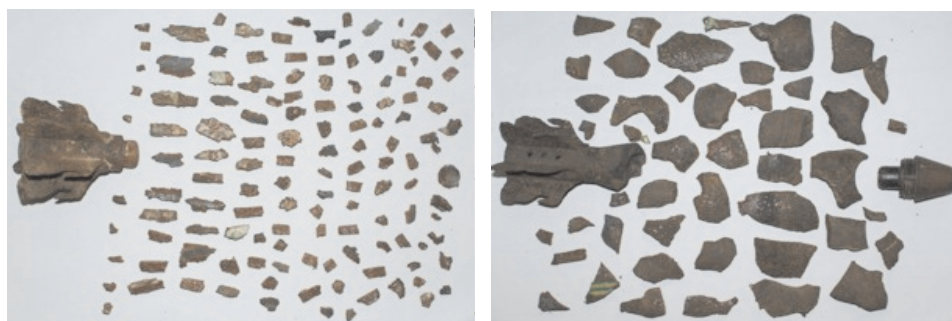
Rys. 5.3. Odłamki odzyskane po próbach z pociskami odłamkowymi



Rys. 5.4. Odłamki odzyskane po próbach z minami lotniczymi



Rys. 5.5. Pocisk przeciwpancerny po przestrzeleniu strumieniem kumulacyjnym — obok elementy zapalników



Rys. 5.6. Granat móżdżierzowy po przestrzeleniu strumieniem kumulacyjnym

TABELA 5.2

Opis wyników testów z amunicją

Rodzaj środka wybuchowego	Liczba odłamków	Masa odłamków [kg]	Reakcja MW
Pocisk odłamkowy kaliber 45 mm	14 13	0,44 0,54	detonacja/wybuch
Kasetowa bomba-mina lotnicza	48 35	0,41 0,49	detonacja/wybuch
Pocisk przeciwpancerny 75 mm	–	–	deflagracja
Granat móżdżierzowy 82 mm	133 49	1,01 2,45	detonacja wybuch

Dla wszystkich badanych środków wybuchowych stwierdzono gwałtowną reakcję materiału wybuchowego po uderzeniu strumienia. Trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy w przypadku pocisku odłamkowego i bomby kasetowej mamy do czynienia z detonacją, czy wybuchem, ponieważ odzyskano tylko część odłamków. Biorąc jednak pod uwagę wielkość odłamków, można przyjąć, że w pierwszym przypadku miał miejsce silny wybuch, zaś w drugim wystąpiła detonacja. Natomiast materiał wybuchowy zamknięty w skorupie pocisku przeciwpancernego uległ gwałtownemu spaleni (deflagracji), a ciśnienie produktów gazowych spowodowało rozcalenie pocisku i wyrwanie elementów zapalników. W skorupach nie stwierdzono obecności materiału wybuchowego. W czasie reakcji materiału wybuchowego zamkniętego w granatach móżdżierzowych efekt dźwiękowy był znacznie różnicowany — w przypadku prawdopodobnej detonacji był zdecydowanie głośniejszy. Różna odpowiedź mieszaniny trotylu i azotanu amonu na uderzenie strumienia kumulacyjnego może być w tym przypadku związana z różnym stopniem zawilgocenia materiału wybuchowego.

## 6. Podsumowanie

W pracy zbadano odpowiedź wybranych nieidealnych materiałów wybuchowych na przebicie strumieniem kumulacyjnym. Ładunki badanych materiałów zamykano w rurach stalowych i ich reakcję oceniano na podstawie ilości i wielkości odłamków. Zaproponowano nowe kryteria oceny reakcji nieidealnych materiałów wybuchowych na uderzenie strumienia i zastosowano je do opisu zachowania się badanych materiałów.

Próby obciążenia strumieniem kumulacyjnym przeprowadzono również dla ładunków trotylu w postaci sypkiej, odlewanej i prasowanej. Na podstawie wyników prób z trotylem w formie odlewanej stwierdzono, że zjawisko występowania drogi rozwoju detonacji ma znaczenie przy inicjowaniu detonacji przez strumień kumulacyjny uderzający w ładunki o małej średnicy.

Wypełnienie stalowych rur badanymi materiałami wysokoenergetycznymi i poddanie ich oddziaływaniu strumienia kumulacyjnego spowodowało we wszystkich przypadkach rozerwanie rur. Nie stwierdzono rozerwania rur po umieszczeniu w nich piasku i wody. Na podstawie otrzymanych wyników wykazano, że zastosowanie testu ze strumieniem kumulacyjnym umożliwia udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy zamkniętą, ciężką skorupę wypełnia materiał wysokoenergetyczny i czy zdolny jest on do deflagracji, wybuchu czy detonacji.

Zaproponowaną metodę badania reakcji materiałów wybuchowych zastosowano do oceny wypełnienia wybranych środków bojowych. Dla wszystkich wytypowanych środków stwierdzono gwałtowną reakcję materiału wybuchowego po uderzeniu strumienia kumulacyjnego. Odpowiedzią materiału na przebicie strumieniem była detonacja, wybuch lub deflagracja. Test ze strumieniem kumulacyjnym pozwala więc na ocenę zagrożenia dla otoczenia po incydentalnym zainicjowaniu reakcji materiału wybuchowego zastosowanego w badanym środku bojowym.

Artykuł wpłynął do redakcji 25.05.2012 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2012 r.

### LITERATURA

- [1] M.C. CHICK, D.J. HATT, *The mechanism of initiation of composition B by a metal jet*, Seventh Symposium (International) on Detonation, Annapolis, 1981, 352-361.
- [2] M.C. CHICK, J.B. MACINTYRE, *The jet initiation of solid explosives*, Eight Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, 1985, 318-329.
- [3] P. PIATAIS, J.P. PLOTARD, J.D. BRACONNIER, *Numerical simulation of jet penetration of HMX and TATB explosives*, Eight Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, 1985, 337-345.
- [4] M.G. VIGIL, *Explosive initiation by very small conical shaped charge jets*, Eight Symposium (International) on Detonation, 1985, Albuquerque, 1988, 1091-1101.
- [5] M. HELD, *Experiments of initiation of covered, but unconfined high explosive charges by means of shaped charge jets*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 12, 1987, 35-40.

- [6] M. HELD, *Experiments of initiation of covered, but unconfined HE charges under different test conditions by shaped charge jets*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 12, 1987, 97-100.
- [7] M. HELD, *Discussion of the experimental findings from the initiation of covered, but unconfined high explosive charges with shaped charge jets*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 12, 1987, 167-174.
- [8] M. HELD, *Jet initiation mechanisms and sensitivities of covered explosives*, Ninth Symposium (International) on Detonation, Portland, 1989, 1404-1415.
- [9] M. HELD, *Initiation phenomena with shaped charge jets*, Ninth Symposium (International) on Detonation, Portland, 1989, 1416-1426.
- [10] E.N. FERM, J.B. RAMSAY, *Jet penetration of surrogate steel-explosive system*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 16, 1991, 123-130.
- [11] M. HELD, *Diagnostic of the reaction behaviour of less sensitive high explosives under jet attack*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 16, 1991, 131-139.
- [12] B.W. ASAY, D.J. PAULEY, E.N. FERM, *Jet Initiation threshold of nitromethane*, Tenth Symposium (International) on Detonation, Boston, 1993, 104-112.
- [13] M. HELD, *Jet initiation of covered high explosive with different materials*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 27, 2002, 89-93.
- [14] W.A. TRZCIŃSKI, R. TRĘBIŃSKI, S. CUDZIŁO, *Badanie czasowo-przestrzennych charakterystyk reakcji panczerza reaktywnego na uderzenie penetratora*, Problemy Techniki Uzbrojenia, WITU, z. 83, 3, 2002.
- [15] M. HELD, *Time distance diagram of the jet initiation of covered high explosive charges*, International Journal of Impact Engineering, 34, 2007, 702-707.
- [16] A. STECKIEWICZ, W.A. TRZCIŃSKI, *Badanie reakcji na bodziec inicjujący oraz wyznaczanie zdolności miotających wypełnień improwizowanych urządzeń wybuchowych*, Biul. WAT, 56, 4, 2007, 223-242.
- [17] *Energetic materials testing and assessment policy committee — Manual of tests*, DOSG, 2005.
- [18] *SigmaScan Pro 5.0 — User's Guide*, SPSS Science, Chicago, 1999.

W.A. TRZCIŃSKI, J. PIERGIES, A. STECKIEWICZ

### Investigation of the reaction of energetic materials on jet impact

**Abstract.** In the paper, the reaction of energetic materials closed in heavy enclosures on jet impact was tested. Non-ideal explosives, TNT and munitions secured by the police were chosen for investigations. A cumulative jet generated by the applied shaped charges was characterized. Explosives were confined in steel tubes and their response was assessed by taking into account the number and size of fragments. Tests were carried out on a special set-up that allows for recovery of debris. Warfare agents were tested on the training range.

**Keywords:** energetic materials, cumulative jet, improvised explosive devices

