

Rozwój konstrukcji nowoczesnego ładunku EFP

Construction development of modern EFP charge

Michał Ludas, Janusz Śliwiński, Andrzej Wojciechowski

Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, PL
 Autor do korespondencji: ludas@witi.wroc.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki projektu rozwojowego związanego z opracowaniem nowego ładunku EFP.

We wstępie zaprezentowano podstawowe informacje dotyczące ładunków generujących pociski formowane wybuchowo. Dokonano porównania ich parametrów rażenia z klasycznymi ładunkami kumulacyjnymi, w których czynnikiem rażenia jest strumień kumulacyjny.

W części zasadniczej artykułu omówiono etapy pracy związanej z opracowaniem ładunku EFP do nowej miny przeciwburtowej. Polegały one na przeprowadzeniu szeregu procesów: opracowaniu koncepcji konstrukcji, analizie symulacji komputerowych, optymalizacji konstrukcji ładunku, fizycznym wykonaniu ładunków do prób oraz wykonaniu badań laboratoryjnych i poligonowych.

Abstract: The paper presents the results of a development project dedicated to devising a new type of an EFP charge.

The introduction includes basic information on charges which generate explosively formed projectiles. EFP explosive power was compared to the one exhibited by typical shaped charges focusing their power via a jet.

The main part of the text is a description of individual stages of the project whose goal was to develop an new EFP charge for an off-route mine. The stages involved a number of processes: from developing the initial concept for the structure of the charge, through analysis of digital simulation, optimization of the construction and fabrication of physical models for the tests to the tests themselves. Both the laboratory and field tests have been conducted.

Słowa kluczowe: ładunek EFP, zjawisko kumulacji, projektowanie amunicji, badania sprzętu wojskowego
Keywords: EFP charge, hollow charge effect, ammunition design, tests of military equipment

1. Wstęp

Ładunki kumulacyjne [1] są to ładunki materiału wybuchowego (MW) charakteryzujące się specjalnym kształtem i konstrukcją, które zapewniają odpowiednie skoncentrowanie fali detonacyjnej (FD) w celu wytworzenia strumienia kumulacyjnego lub pocisku (penetratora). Zasadnicze elementy ładunku kumulacyjnego, które mają znaczący wpływ na zdolność przebicia przegrody, to:

- wkładka: wykonana z metalu (najczęściej jest to miedź lub żelazo Armco), o kształcie stożkowym lub sferycznym umieszczona w kadłubie ładunku,
- materiał wybuchowy: o dużej prędkości detonacji (rzędu $7 \div 8 \text{ km s}^{-1}$) i dużej jednorodności,
- inicjator: zapewniający odpowiednie pobudzenie ładunku MW i rozpoczęcie procesu formowania frontu fali detonacyjnej.

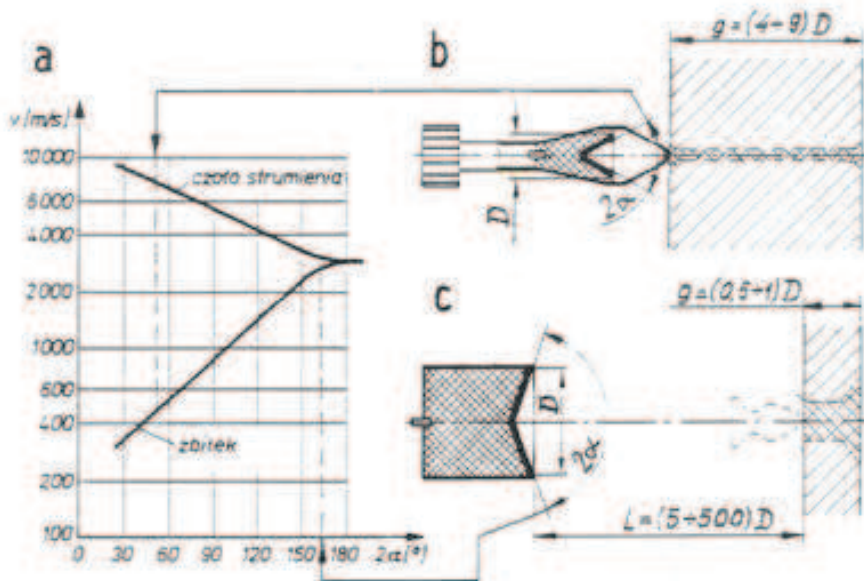
Innymi ważnymi czynnikami, które mają również wpływ na efektywność działania ładunku kumulacyjnego są:

- średnica ładunku (kaliber),
- odległość ładunku od przegrody.

Ładunki kumulacyjne dzielimy na dwie podstawowe grupy:

- klasyczne ładunki kumulacyjne (KŁK),
- ładunki generujące pocisk formowany wybuchowo, tzw. ładunki EFP (ang. Explosively Formed Projectile).

O tym, do jakiej grupy należy ładunek, decyduje kształt wkładki, co przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Proces formowania się elementów rażących różnych ładunków kumulacyjnych [3]

Przy małym kącie rozwarcia wkładki $2\alpha = (30 \div 60)^\circ$ następuje zjawisko kumulacji klasycznej, które poprzez dynamiczne obciskanie wkładki powoduje wygenerowanie strumienia kumulacyjnego oraz zbitki. Strumień jest czynnikiem rażącym charakteryzującym się dużą prędkością (do 10 km s^{-1}) i małą masą (około 20% masy wkładki). Z kolei zbitka posiada stosunkowo małą prędkość (około $0,5 \text{ km s}^{-1}$) i zawiera pozostały materiał wkładki.

Przy kącie rozwarcia wkładki $2\alpha > 120^\circ$ uzyskuje się efekt wybuchowego formowania pocisku, zwany niekiedy kumulacją odwrotną. Energia FD powoduje ukształtowanie materiału wkładki w jednolity wydłużony pocisk poruszający się z prędkościami rzędu 2 km s^{-1} i niosący ponad 90 % początkowej masy wkładki [2]. Podczas tego procesu powstawać może również szczątkowy strumień kumulacyjny, który traktowany jest jednak jako szkodliwe zaburzenie.

Powstałe w obu procesach czynniki rażące charakteryzują się odmiennymi cechami:

Tab. 1. Cechy ładunków kumulacyjnych

Parametr	Zdolność przebicia [średnica ładunku]	Średnica otworu [średnica ładunku]	Optymalna odległość od przeszkody	Podatność na zakłócenia	Oddziaływanie na przegrodę
KŁK	20 ÷ 30	0,1	ogniskowa	bardzo duża	strumień rozgrzanego metalu, naciśnienie
EFP	0,6 ÷ 0,8	0,5 ÷ 1	do 500 średnic ładunku	mała	wybity czop, rozgrzany metal, naciśnienie, impuls mechaniczny

Ze względu na powszechne stosowanie osłon przed oddziaływaniem broni przeciwpancernej opartej o KŁK (pancerze wielowarstwowe, osłony drutowe), ogólna skuteczność takiej broni spada. Alternatywą są systemy oparte o ładunki EFP, które ze względu na olbrzymią energię kinetyczną (rzędu 4 MJ), nawet w przypadku braku przebicia pancerza, są w stanie spowodować uszkodzenia trafionego pojazdu. Ładunki EFP stosowane są nie tylko do niszczenia celów opancerzonych (czołgi, BWP, KTO), ale też śmigłowców, okrętów oraz do niszczenia elementów infrastruktury (np. schronów) [4].

Skuteczność oddziaływania ładunku EFP na przeszkodę związana jest ściśle z parametrami elementu rażącego,

czyli pocisku formowanego wybuchowo, który powinien się charakteryzować następującymi cechami [5]:

- *maksymalną masą*: prawie cała wkładka powinna przekształcić się w pocisk, który nie powinien fragmentować w czasie lotu,
- *aerodynamicznym kształtem*,
- *stabilnym torem lotu*: w żadnej z osi nie powinny nastąpić „bicia” oraz obroty,
- *jak największą prędkością lotu*.

Wszystkie powyższe cechy uzależnione są od parametrów konstrukcyjnych i technologicznych wykonanego ładunku, do których należą:

- *własności wkładki*: materiał wkładki powinien być jednorodny i posiadać odpowiednie własności plastyczne podczas dynamicznych odkształceń – najczęściej stosowanymi materiałami są miedź oraz żelazo Armco,
- *własności MW*: ładunek powinien być jednorodny w całej objętości i posiadać wysoką prędkość detonacji – najczęściej stosuje się topliwe mieszaniny o dużej zawartości procentowej heksogenu lub oktogenu,
- *własności obudowy*: materiał obudowy powinien być jak najbardziej odporny na odkształcenia dynamiczne – najczęściej stosuje się rury o dużej wytrzymałości wykonane ze stali R45 lub 18G2A,
- *geometria ładunku*: musi być zapewniona symetria ładunku oraz współosiowość jego wszystkich elementów (obudowy, inicjatora, ładunku MW, wkładki).

2. Założenia

Wymagania, jakie musiał spełniać ładunek, zostały wyszczególnione w przez instytucje Sił Zbrojnych w tzw. Założeniach Taktyczno – Technicznych, które opisują wszelkie cechy, jakimi musi się charakteryzować sprzęt (urządzenia, broń czy amunicja) opracowywany od podstaw lub wprowadzany na wyposażenie wojska. Ładunek miał stanowić część ukończenia nowej miny przeciwpancernej.

W przypadku ładunku EFP były to przede wszystkim:

- *możliwość rażenia celów znajdujących się w odległościach od 2 m do 80 m od ustawionej miny*,
- *możliwość niszczenia celów posiadających pancierz będący ekwiwalentem płyty pancерnej o grubości 100 mm*,
- *rozrzut miejsca trafienia od punktu celowania nie większy niż 0,5 m*.

Dodatkowo zespół projektowy przyjął kolejne założenia związane z samą konstrukcją:

- *kaliber nie większy niż 200 mm*,
- *wykorzystanie ładunku wykonanego z mało wrażliwego materiału wybuchowego*.

3. Projektowanie

Biorąc pod uwagę przyjęte założenia oraz doświadczenia uzyskane podczas poprzednich prac związanych z projektowaniem ładunków EFP, opracowano kilka wstępnych koncepcji konstrukcji ładunku. Różniły się one między sobą:

- *materiałem wkładki*: po analizach parametrów fizykochemicznych oraz aspektów ekonomicznych wybrano miedź i żelazo Armco,
- *kształtem wkładki*: określono dwa podstawowe kształty: stożek i sfera,
- *parametrami geometrycznymi wkładki*: wkładki różniły się między sobą: kątem rozwarcia, grubością oraz zmianą grubości w funkcji promienia.

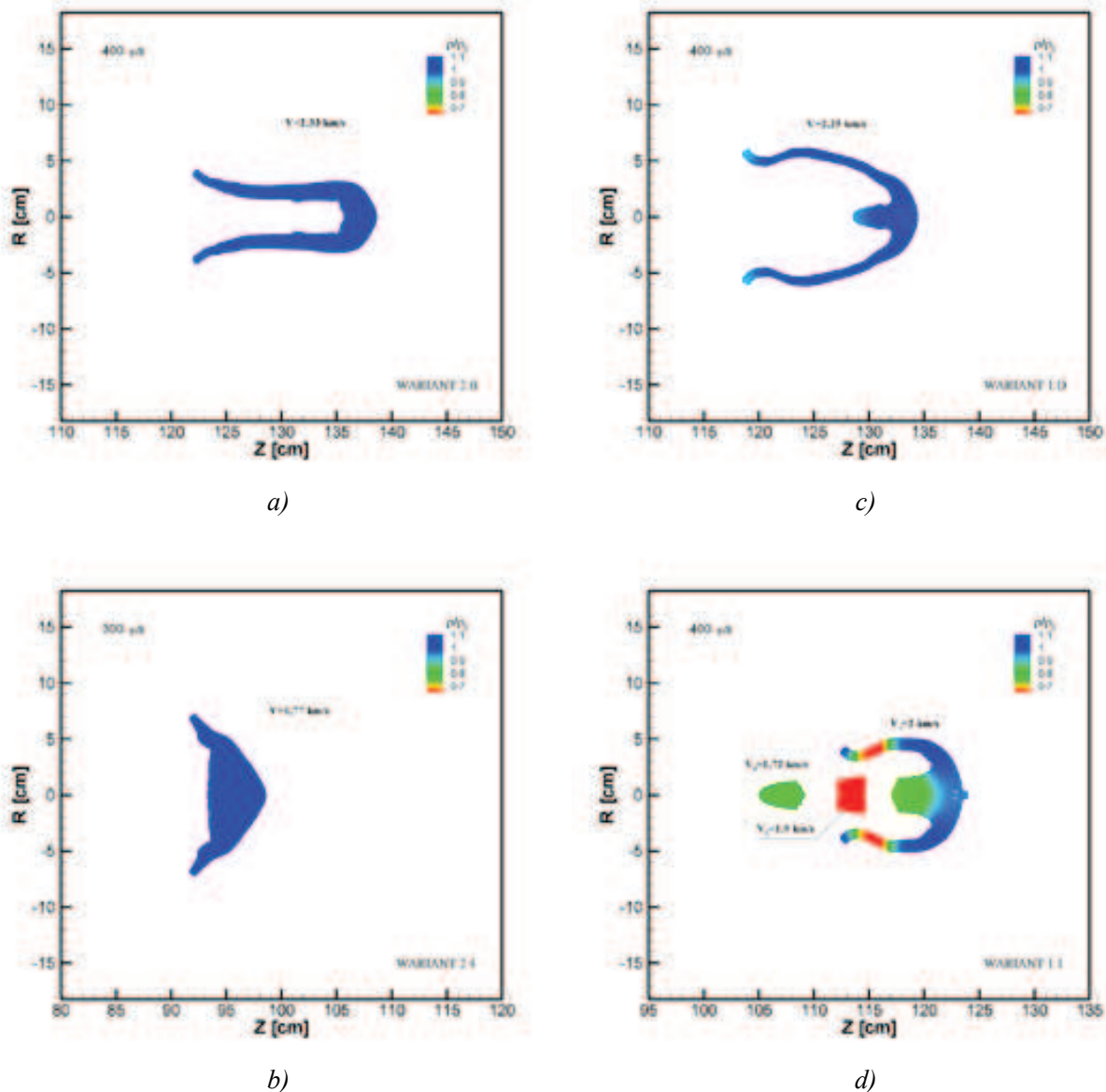
Producent materiałów wybuchowych – firma Eurengo – zaproponował zaelaborowanie kadłuba opartym na heksogenie mało wrażliwym materiałem wybuchowym (I-PBX) o prędkości detonacji 8,25 km s⁻¹ i gęstości 1,65 g cm⁻³.

Spośród wszystkich opracowanych koncepcji wybrano 24 – 12 stożkowych i 12 sferycznych, z których połowa wykorzystywała wkładki z miedzi, a połowa – z żelaza Armco.

W celu wstępnego zweryfikowania procesu formowania się pocisku po detonacji ładunku MW, zlecono przeprowadzenie symulacji komputerowych zespołowi pod kierownictwem prof. Karola Jacha z Instytutu Optoelektroniki WAT. Dla każdego ładunku określono jego kształt, gęstość względną oraz prędkość. Przykłady

symulacji przedstawiono na rysunku 2.

Specjaliści z WAT po wykonaniu symulacji według przekazanych założeń konstrukcyjnych, zaproponowali jeszcze po 4 ładunki ze zmienionymi charakterystykami dla każdego rodzaju wkładki (stożek, sfera). Otrzymano zatem 28 symulacji, z czego 8 wykazywało cechy przydatne do dalszego wykorzystania (duża prędkość, aerodynamiczny kształt, brak oznak fragmentacji podczas dalszego lotu).



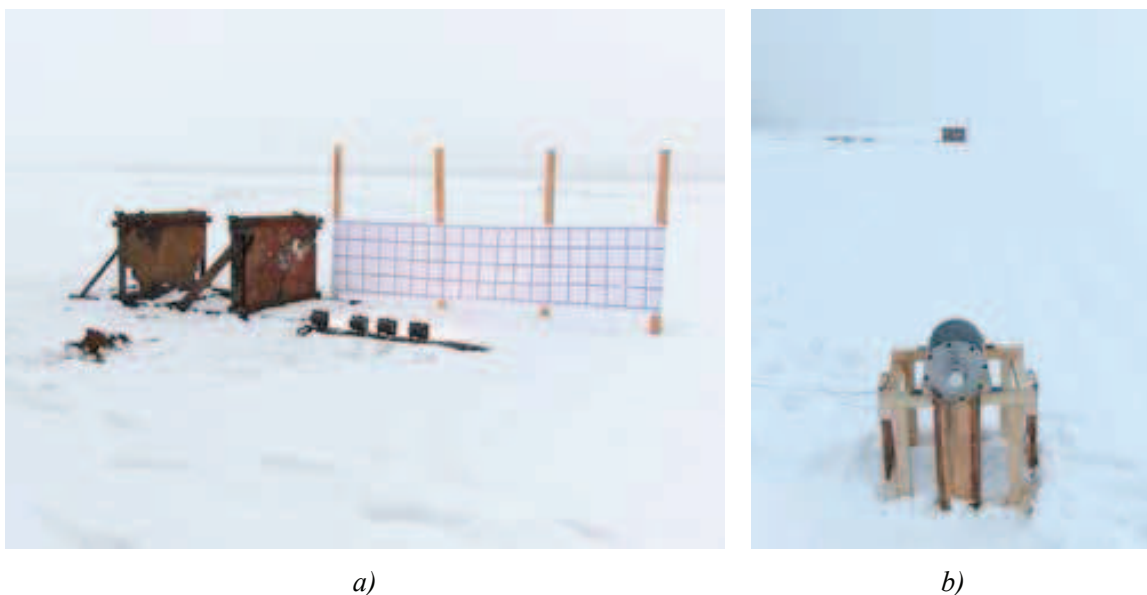
Rys. 2. Symulacja pocisków formowanych wybuchowo: a, b) prawidłowych, c, d) wadliwych

4. Opracowanie modelu

Przeprowadzona pogłębiona analiza 8 symulacji posiadających najbardziej obiecujące kształty wygenerowanych pocisków pozwoliła na wybór 4, które zostały zlecone do fizycznego wykonania. Pierwsza partia ładunków składająca się z czterech ładunków z wkładkami z żelaza Armco (3 stożkowe i 1 sferyczna) i czterech z wkładkami miedzianymi (2 sferyczne i 2 stożkowe) została zaelaborowana plastycznym materiałem wybuchowym MWP-14 (prędkość detonacji $7,4 \text{ km s}^{-1}$, gęstość $1,45 \text{ g cm}^{-3}$).

Badania ładunków przeprowadzono na stanowisku poligonowym, które składało się ze stojaka, w którym mocowano płytę pancerną o grubości 100 mm. W celu zaobserwowania skutków oddziaływania produktów przebiecia badanej płyty, za stojakiem ustawiono dodatkowy stojak z kontrolną płytą stalową zwykłej jakości

o grubości 60 mm. Obok ustawionych płyt mocowano plansze pomiarowe ułatwiające pomiary parametrów lecącego pocisku. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Stanowisko do badania skuteczności ładunku EFP: a) płyty pancerne, b) widok ogólny

Ładunki ustawiano w odległości 40 m od płyty, uzbrajano centralnie umieszczanym zapalnikiem elektrycznym ERG i odpalano za pomocą zapalarki elektrycznej.

Każda próba była rejestrowana za pomocą ustawionej w pewnej odległości od toru lotu pocisku ultraszybkiej kamery Phantom V5.1, obejmującej swoim polem widzenia badane płyty oraz rozstawione plansze pomiarowe. Plansze te umożliwiały pomiar prędkości lotu pocisku oraz jego parametry geometryczne. Przykładowe klatki z rejestracji momentu przebijania płyty pancernej przedstawiono na rysunku 4.

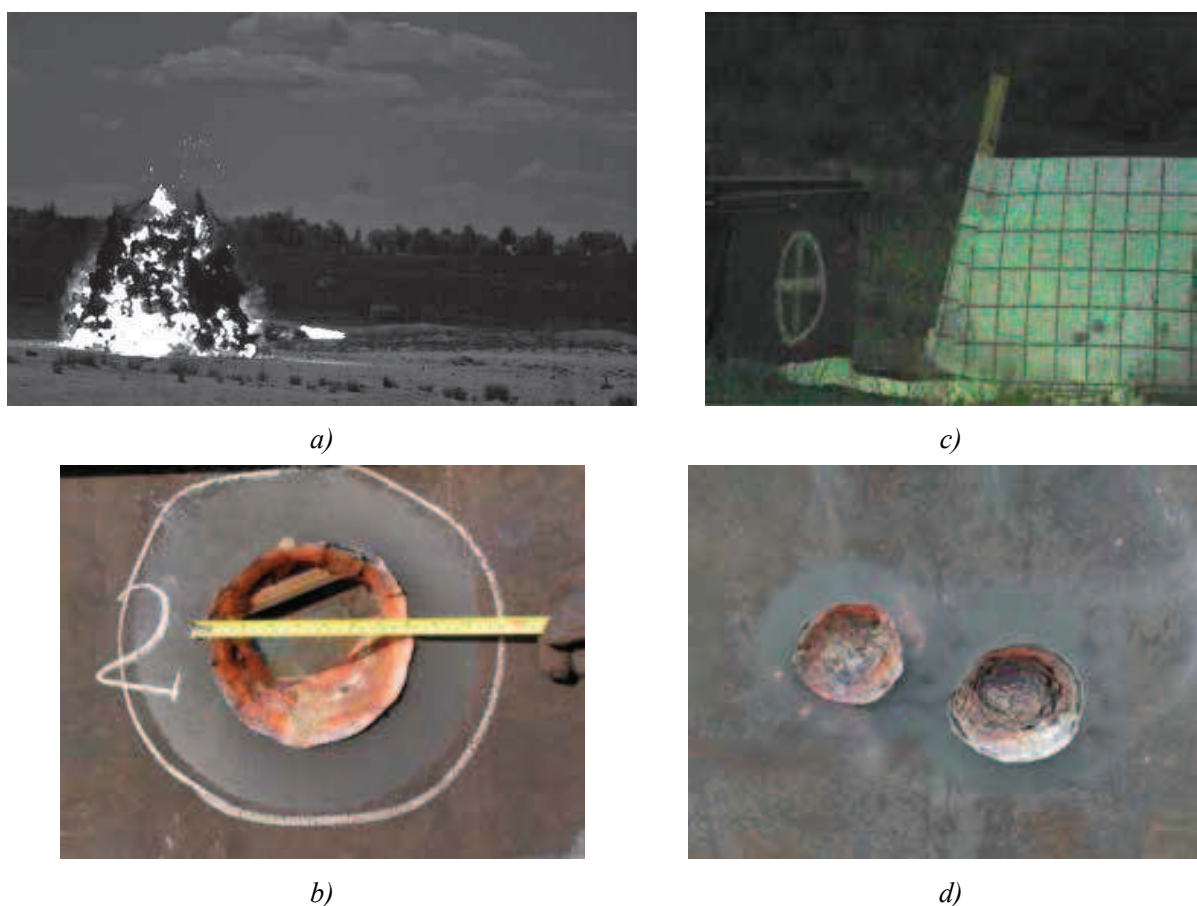


Rys. 4. Moment uderzenia pocisku o płytę pancerną

Przeprowadzone próby pozwoliły na uzyskanie rezultatów pozytywnych (pełne przebicie płyty, jednolity pocisk, prostoliniowy lot) i negatywnych (brak przebicia, fragmentacja w locie, odchylenie toru lotu), których przykłady przedstawiono na rysunku 5.

Przeprowadzone badania pozwoliły na weryfikację symulacji komputerowych i analizę wpływu zmian zależności geometrycznych wkładki na skuteczność przebicia przeszkody. Postanowiono prowadzić niewielkie

zmiany w konstrukcji pokrywy kadłuba (wzmocnienie) oraz ukształtowaniu czterech rodzajów wkładek: jednej z żelaza Armco (stożkowej) i trzech miedzianych (dwóch stożkowych i jednej sferycznej). Dla każdej wersji wykonano po dwa ładunki. Ładunki te zostały zaelaborowane materiałem typu PBX (gęstość $1,65 \text{ g cm}^{-3}$, prędkość detonacji $8,25 \text{ km s}^{-1}$), który był pobudzany zapalaniem elektrycznym ZE i detonatorem pośrednim wklejanym częściowo w ładunek zasadniczy. W celu poprawnego napełniania kadłuba materiałem wybuchowym podczas elaboracji, jego powierzchnie wewnętrzne zostały pokryte warstwą materiału antyadhezyjnego – politetrafluoroetylenem (PTFE).



Rys. 5. Efekty działania ładunków EFP: a) pocisk w locie, b) przebita płyta pancerna, c) dwa fragmenty wkładki w locie, d) ślady trafień fragmentów pocisku

Badania kolejnej partii modelowej wykonano na stanowisku wykorzystywanym podczas badań pierwszej partii. Zmieniona została odległość ładunku od przeszkody – została zwiększona do 80 m, czyli maksymalnego założonego zasięgu działania ładunku.

Wyniki kolejnej serii badań pozwoliły ponownie na zawężenie wersji ładunków do dwóch posiadających stożkowe miedziane wkładki, różniące się między sobą nieznacznie tylko grubością wkładki i jej rozkładem w funkcji promienia. Wersje te stały się podstawą konstrukcji ładunków przeznaczonych do wykonania ostatecznej partii modelowej (składającej się z ośmiu ładunków) i wykonania badań modelu miny.

Ponownie ładunki zostały przebadane na poligonowym stanowisku badania skuteczności rażenia. Wykonano próby przebitcia płyty z odległości 2 m (jeden ładunek) oraz 40 m i 80m (po dwa ładunki). Dodatkowo przeprowadzono sprawdzenia wykraczające poza wymagany zakres:

- *przebitcie płyty pancernej o grubości 120 mm z odległości 80 m (dwa ładunki): dla 80 m nie uzyskano przebitcia, po zmniejszeniu dystansu do 40 m uzyskano przebitcie,*
- *przebitcie płyty pancernej o grubości 100 mm z odległości 100 m (jeden ładunek): nie uzyskano przebitcia – pocisk nie trafił w płytę.*

Efekty próby przebitcia dla płyty 120 mm przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Płyta pancerna o grubości 120 mm po próbach przebicia: a) nieudanej, b) udanej

5. Opracowanie prototypu

Przeprowadzona po badaniach modelu kolejna analiza wyników, w tym: średnic otworów, rozrzutu miejsca trafienia, kształtu pocisku podczas lotu, i wpływu parametrów konstrukcyjnych na efektywność ładunków, umożliwiła określenie docelowego kształtu ładunku, przeznaczonego do wykonania partii prototypowej i poddania jej badaniom kwalifikacyjnym.

Kadłuby 15 ładunków wykonane zostały w Wojskowych Zakładach Łączności nr 2 w Czernicy, tłoczenie wkładki i jej obróbka po tłoczeniu przeprowadzone zostały w WITI, zaś elaboracja małowrażliwym MW w zakładach firmy Eurengo w Sorgues.

Kadłuby po wytoczeniu i zamocowaniu pokrywy tylnej, zostały wyposażone we wszelkie konieczne elementy mocujące służące do zamontowania wyposażenia, np. czujnika termalnego czy zapalnika oraz zamontowania gotowego ładunku do podstawy. Wszystkie kadłuby zostały całkowicie (zewnątrz i wewnątrz) pokryte warstwą PTFE, co zostało pokazane na rysunku 7. PTFE, oprócz podstawowej funkcji związanej z ułatwieniem elaboracji, zabezpiecza również stalowy kadłub przed korozją.



Rys. 7. Kadłub ładunku EFP po teflonowaniu

6. Badania

Partia prototypowa została poddana ciągłemu badaniu kwalifikacyjnym podzielonym na część laboratoryjną i poligonową [6].

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono badania odporności i wytrzymałości na czynniki mechaniczne i klimatyczne, w tym między innymi sprawdzenia wpływu:

- *udarów mechanicznych,*
- *obniżonej i podwyższonej temperatury oraz jej zmian,*
- *podwyższonej wilgotności,*
- *obniżonego ciśnienia.*

Przykładowe zdjęcia z badań laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Ładunki EFP podczas sprawdzeń laboratoryjnych: a) odporność na obniżoną temperaturę, b) odporność udary mechaniczne

Ładunki poddane badaniom laboratoryjnym podlegały w późniejszym czasie serii badań poligonowych. Badania te obejmowały między innymi sprawdzenia:

- *celności,*
- *skuteczności rażenia,*
- *odporności na przestrzelenie pociskami z broni strzeleckiej.*

Badania mające na celu sprawdzenie celności i skuteczności rażenia przeprowadzono na standardowym stanowisku poligonowym. Ładunki ustawiano kolejno w odległościach 2 m (dwa ładunki), 40 m (trzy ładunki) i 80 m (cztery ładunki) od płyty pancernej o grubości 100 mm. Za pomocą umieszczonego na ładunku celownika optycznego celowano w punkt zaznaczony na płycie, a następnie detonowano za pomocą zapalnika zawierającego zapał elektryczny ZE. Po odpaleniu każdego z ładunków mierzono parametry wykonanych otworów, w tym średnicę i rozrzut miejsca trafienia. Poszczególne fazy badania przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Badania poligonowe ładunku EFP: a) celowanie, b) przebicie płyty pancernej

Dla wszystkich 9 badanych ładunków uzyskano pełne przebicia (otwory o świetle rzędu 10 cm), których rozrzut od miejsca celowania nie był większy niż 0,4 m. Wszystkie trafienia mieściły się (przy różnych miejscach celowania) na płycie o wymiarach 1 m na 1,5 m, co przedstawiono na rysunku 10.

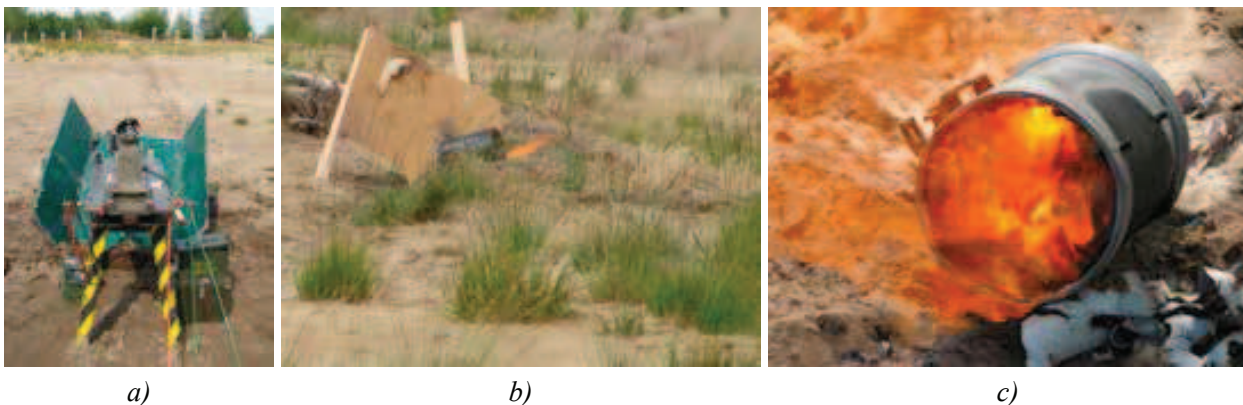


Rys. 10. Płyta pancerna po dniu badania skuteczności i celności ładunków EFP

Wykonano jeden strzał kontrolny do płyty oddalonej o 100 m, zakończony przebiciem płyty bez zauważalnej różnicy w parametrach otworu w stosunku do uzyskiwanych z odległości mniejszych.

Dzięki wykonanej za pomocą oprogramowania Phantom Camera Control analizie obrazów zarejestrowanych przez ultraszybką kamerę Phantom (V5.1, V12 i V711) w ciągu całej pracy rozwojowej możliwe było określenie szybkości poruszania się oraz kształtu i rozmiarów pocisków. W początkowym okresie badań uzyskiwane prędkości pocisków zbliżone były do opisanych w literaturze – około $2,3 \text{ km s}^{-1}$ w odległości 5 m od ładunku i $2,0 \text{ km s}^{-1}$ w odległości 40 m. Przeprowadzona optymalizacja ładunku (modyfikacje konstrukcji obudowy i wkładki oraz zmiana MW) pozwoliła na uzyskanie prędkości pocisku rzędu $2,4 \text{ km s}^{-1}$ w odległości 40 m od ładunku.

W celu określenia odporności na oddziaływanie szybko poruszających się obiektów (pocisków, odłamków), podczas sesji badań poligonowych przeprowadzono próby ostrzału ładunków amunicją o kalibrach od 7,63 mm (w tym zapalającą) do 14,5 mm. Żaden z 4 przestrzelonych ładunków nie doznał przemiany wybuchowej. Dwa (jeden trafiony pociskiem zapalającym 7,62 mm i jeden pociskiem 14,5 mm) zapaliły się i wypaliły całkowicie bez przemiany wybuchowej. Stanowisko badawcze oraz palące się ładunki podczas sprawdzenia przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Próba przestrzelenia ładunku EFP: a) stanowisko badawcze; b), c) płonące ładunki MW

7. Wnioski

Realizacja projektu związanego z projektowaniem, wykonywaniem i oraz badaniami nowego ładunku EFP pozwala stwierdzić:

- 7.1. Skuteczność rażenia ładunków EFP uwarunkowana jest uzyskaniem optymalnych parametrów wybuchowo formowanego pocisku.
- 7.2. Opracowanie ładunków EFP wymaga wspomaganie prac konstrukcyjnych pracami teoretycznymi tj. modelowaniem procesu wybuchowego formowania pocisku dla różnych parametrów geometrycznych, masowych, wybuchowych itp. oraz inicjowania detonacji MW ładunku.
- 7.3. Analiza wyników badań przebiccia przegrody oraz analiza dynamiki oddziaływania na przegrodę wybuchowo formowanego pocisku, umożliwi weryfikację parametrów konstrukcyjnych badanych ładunków oraz poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych zwiększających skuteczność ich rażenia.
- 7.4. Prawidłowo zaprojektowany i wykonany z odpowiednim poziomem dokładności ładunek EFP zapewnia brak wpływu czynników zewnętrznych (mechanicznych, klimatycznych) na procesy formowania się pocisku oraz parametry rażenia celu.

Literatura

- [1] Opracowanie zbiorowe pod redakcją naukową Woźniaka R., *Encyklopedia najnowszej broni palnej*. Dom wydawniczy Bellona, Warszawa 2001.
- [2] Milewski E., *Eksperymentalno-teoretyczna optymalizacja ładunków do wybuchowego formowania pocisków*. Rozprawa doktorska, WAT Warszawa 1997.
- [3] Śliwiński J, Wysocki T., *Efektywność min przeciwburtowych*. Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: Problemy rozwoju produkcji i eksploatacji uzbrojenia, Rynia 1996.
- [4] Borkowski J., *Konstrukcja i badania układu do wybuchowego formowania pocisków dla miny przeciwśmigłowcowe*. Rozprawa doktorska, WAT Warszawa 2007.
- [5] Praca zbiorowa pod redakcją Jacha K., *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [6] Opracowanie zbiorowe, *Sprawozdanie z badań „Systemu kierowanych min przeciwpancernych Jarzębina K”*, Archiwum WITI, Wrocław 2013.