



EKSPERYMENTALNA OCENA KONSTRUKCJI ŁADUNKU 100 MM DO WYBUCHOWEGO FORMOWANIA POCISKU

EXPERIMENTAL EVALUATION OF 100 MM CHARGE FOR EXPLOSIVELY FORMED PROJECTILE

Jacek BORKOWSKI, jacek.borkowski@witu.mil.pl, ORCID: 0000-0001-8412-6003

Eugeniusz MILEWSKI, milewskie@witu.mil.pl, ORCID: 000-001-8142-4902

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Pr. St. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyńskiego St., 05-220 Zielonka, Poland

DOI 10.5604/01.3001.0016.3023

Streszczenie: W artykule zaproponowano konstrukcję ładunku do wybuchowego formowania pocisku kalibru 100 mm. Dokonano oceny konstrukcji ładunku w badaniach poligonowych. Zaprezentowano wyniki badań poligonowych pocisku uformowanego wybuchowo o oczekiwanych parametrach konstrukcyjnych. Określono celność pocisków w trafieniach do tarczy na odległości 750 kalibrów. Przebiecie pocisków przedstawiono na przykładach oddziaływania na tarczę ze stali pancerniej o grubości 30 mm. Przedstawiono przykładowe kształty pocisku uformowanego wybuchowo na torze lotu w postaci odcisków w tarczy papierowej. Opracowano również wyniki odłamkowania obudowy ładunku.

Słowa kluczowe: badania poligonowe, pocisk formowany wybuchowo, celność, odłamkowość obudowy

1. Wstęp

Zjawisko wybuchowego formowania pocisków jest powszechnie wykorzystywane w technice wojskowej. Stosuje się je w wielu rodzajach amunicji, przede wszystkim do zwalczania pojazdów opancerzonych (np. przeciwpancerne pociski kierowane, miny przeciwpancerne) (Wolski, 2018).

Zjawisko formowania pocisku w wyniku wybuchu kruszącego materiału wybuchowe-

Abstract: The construction of 100 mm charge for explosively formed projectile was proposed in the article. The construction of charge was tested on the range. The results of field tests of an explosively formed projectile with the expected design parameters are presented. The accuracy of projectiles hitting the target at 750 calibre distance was determined. The penetration of projectiles was shown on the examples of impact on a 30 mm thick target from rolled homogenous steel. Exemplary shapes of explosively formed projectiles on the flight path in the form of imprints in a paper target are presented. The results of fragmentation of the charge casing were also analysed.

Keywords: field tests, explosively formed projectile, accuracy, fragmentation of casing

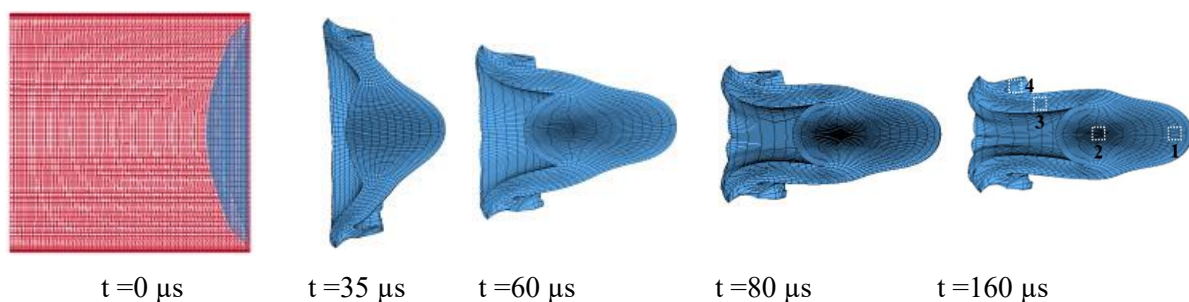
1. Introduction

The effect of explosive forming of projectiles is widely used in military technology. It is used in many types of ammunition, especially for fighting the armoured vehicles (e.g. antitank guided missiles, antitank mines) (Wolski, 2018).

The effect of projectile forming as a result of an explosion of high explosive material is based on interaction between high ex-

go polega na oddziaływaniu produktów detonacji kruszącego materiału wybuchowego na sferyczną wkładkę. Wkładka (stalowa, miedziana lub tantalowa) (Hussain i in., 2013) zostaje napędzona wzdłuż swojej osi do prędkości 2500-3000 m/s (Guangsong i in., 2021) ulegając charakterystycznej deformacji w trakcie lotu (rys. 1). Tak ukształtowana wkładka nazywana jest **pociskiem uformowanym wybuchowo** (EFP - *Explosively Formed Projectile*) (Jach i in., 2001).

plosive material detonation products and a spherical liner. The liner (made of steel, copper, or tantalum) (Hussain and others, 2013) is propelled along its axis to the velocity 2500-3000 m/s (Guangsong and others, 2021) being deformed in a characteristic way during the flight (Fig. 1). The liner shaped in such way is named as **explosively formed projectile (EFP)** (Jach and others, 2001).



Rys. 1. Schemat wybuchowego formowania pocisku
Zaprezentowano przekrój kształtu pocisku w kolejnych odstępach czasu
(JianFeng Liu i in., 2017)

Fig. 1. Scheme of explosive formation of projectile
Cross-sections of the projectile for consecutive instants of time are shown
(JianFeng Liu and others, 2017)

Z eksperymentów numerycznych wynika, iż proces formowania następuje w początkowej fazie lotu (Gold, 2001). Cykl dynamicznego kształtowania pocisku pod wpływem produktów wybuchu materiału wybuchowego trwa do ok. 300 μ s (Mulligan, 2011). Uformowany pocisk uzyskuje prędkość teoretyczną 2,5-3,0 km/s. Pocisk przybiera formę powłoki z rozszerzającą się częścią tylną i środkiem ciężkości przesuniętym do przodu (Riad i in., 2006). Po przebyciu odległości około 8-10 kalibrów, licząc od miejsca detonacji, pocisk jest w pełni uformowany i posiada największą energię (maksymalną prędkość pocisku) (Cardoso and Teixeira-Dias, 2016). Stosunek długości pocisku L do jego średnicy D, z punktu widzenia parametrów balistycznych i maksy-

Numerical experiments show that the process of formation takes place in the initial phase of the flight (Gold, 2001). The cycle of the dynamic formation of the projectile under the influence of the explosive material explosion products lasts to ca. 300 μ s (Mulligan, 2011). The formed projectile moves at theoretical velocity of 2.5-3.0 km/s. The projectile takes a form of a cover with extending tail part and the centre of gravity shifted forward (Riad and others, 2006). After travelling the distance of ca. 8-10 calibres, counting from the place of detonation, the projectile is completely formed and has the greatest energy (maximal velocity of projectile) (Cardoso and Teixeira-Dias, 2016). Proportion of projectile's length L to its diameter D has to be ca. 3.0 regarding

malnego oddziaływania na tarczę, optymalnie powinien wynosić około 3,0 (Bo-yang i in., 2017). Znaczne wydłużenie pocisku oraz jego aerodynamiczne kształty powodują, że może on efektywnie zwalczać cel na odległości około 1000 kalibrów. Oddziaływanie pocisku na cel przedstawiono w pracy (Dong i Jiajian, 2021) oraz w pracy (Mulligan i in. 2012).

Dynamiczne kształtowanie pocisków EFP o symetrii osiowej i aerodynamicznych kształtach wymaga zastosowania określonej konstrukcji ładunku. Ładunek do wybuchowego formowania pocisków wymaga zachowania wysokiej precyzji wykonania ładunków materiałów wybuchowych i innych elementów składowych, przede wszystkim wkładek, z których zostanie uformowany pocisk. W artykule przedstawiono koncepcję ładunku zaproponowaną w pracy (E. Milewski, 1997) a rozwiniętą w niniejszej pracy. Wyniki badań zostały wykorzystane w pracy (J Borkowski, 2007) do analizy porównawczej z innym ładunkiem do wybuchowego formowania pocisku. Podobne ładunki przedstawiono w pracy (Ng, 2006).

Cel pracy, czyli opracowanie efektywnego ładunku do wybuchowego formowania pocisków kalibru 100 mm osiągnięto poprzez proces optymalizacji teoretyczno-eksperymentalnej, uwzględniającej poniżej wymienione aspekty:

- uformowanie pocisku z całej masy wkładki,
- stabilny lot pocisku na odległość 750 kalibrów,
- całkowite przebicie pancerza o grubości minimum 30 mm w odległości 75 m od miejsca detonacji ładunku,
- uzyskanie odpowiedniej celności na badanej odległości 75 m: ułożenie pocisków w okręgu o max. średnicy 1 m.

ballistic parameters and most efficient interaction with the target (Bo-yang and others, 2017). Significant elongation of the projectile and its aerodynamic shape causes that it can hit the target efficiently on the range up to ca. 1000 calibres. Interaction of the projectile with the target was presented in the work (Dong and Jiajian, 2021), and in (Mulligan and others 2012).

Dynamic formation of EFP with axial symmetry, and aerodynamically shaped, demands application of a charge with specific design. The charge for explosive formation of projectiles requires a high precision workmanship for preparation of explosive charges and other components, most of all the liners which are transformed into projectiles. The paper present a concept of the charge proposed in the work (E. Milewski, 1997) and developed in present paper. Results of investigations were used in the work (J Borkowski, 2007) for comparative studies over another charge for explosive formation of projectiles. Similar charges were presented in the work (Ng, 2006).

The objective of the work, i.e. development of the efficient charge for explosive formation of projectiles with 100 mm calibre, was achieved by the process of theoretical-experimental optimisation regarding the following aspects:

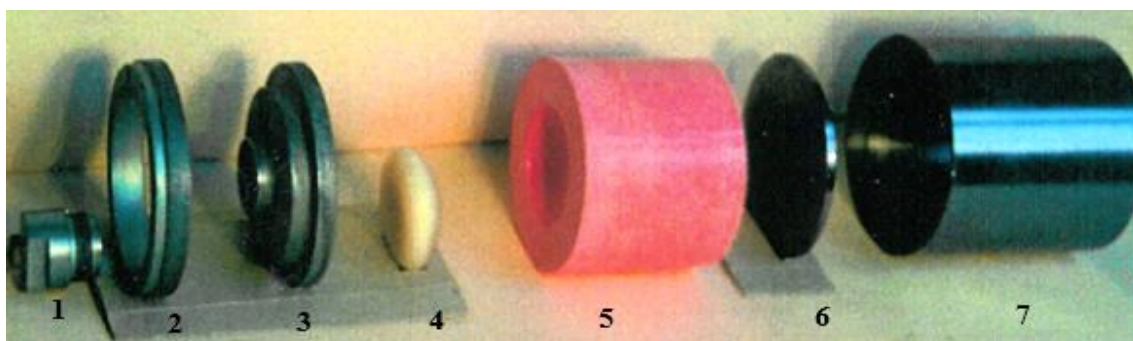
- formation of projectile from the whole mass of the liner,
- stable flight of projectile to the range of 750 calibres,
- complete penetration of minimum 30 mm thick armour on the range 75 m from the place of charge detonation,
- provision of required accuracy on the investigated distance of 75 m: pattern inside the circle with max. diameter of 1 m.

2. Konstrukcja ładunku do wybuchowego formowania pocisku

Do weryfikacji eksperymentalnej założonych celów zaproponowano konstrukcję ładunku składającego się z elementów zaprezentowanych na fot. 2. i oznaczono ją G.

2. Design of Charge for Explosive Formation of Projectile

The design of charge consisting of components presented in Photo 2, and marked by G, was used for experimental verification of accepted objectives.

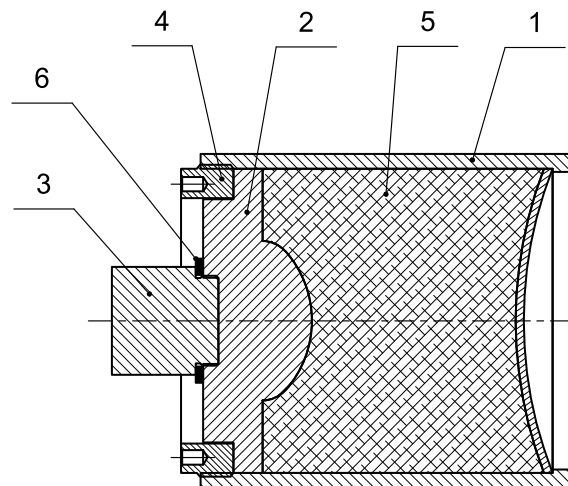


Fot. 2. Elementy ładunku G do wybuchowego formowania pocisku:
1 - detonator, 2 – pierścień, 3 - detonator obwodowy, 4 - przesłona, 5 – ładunek materiału wybuchowego, 6 - wkładka, 7 – obudowa

Photo 2. Components of charge G for explosive forming of projectile:
1 - detonator, 2 - ring, 3 - circumferential detonator, 4 - diaphragm,
5 - charge of explosive material, 6 - liner, 7 - case

Do badań użyto ładunki materiału wybuchowego kruszącego wykonane z oktogenu flegmatyzowanego o gęstości zaprasowania $1,76 \div 1,78 \text{ g/cm}^3$, pobudzone detonatorami wykonanymi z MW o wysokiej wrażliwości. Detonacja była przenoszona na zasadniczy ładunek za pomocą detonatora obwodowego z zastosowaniem przesłony wykonanej z tworzywa sztucznego. Celem zastosowania detonatora obwodowego z przesłoną jest nadanie odpowiedniego kształtu fali detonacyjnej rozchodzącej się w materiale wybuchowym kruszącym. Wkładki wykonano z żelaza stosując wykończeniową obróbkę cieplną w celu uzyskania właściwego rozkładu ziarna. Obudowy wykonano ze stali. Na rys. 3 zilustrowano przekrój układu do wybuchowego formowania pocisku. W tabeli 1 zebrano parametry konstrukcyjne zaproponowanego ładunku do wybuchowego formowania pocisków.

Charges for the testing were prepared from high explosive material, made of pressed phlegmatized octogen with density $1.76 \div 1.78 \text{ g/cm}^3$, and were initiated by detonators made of high sensitivity explosives. Detonation is transferred into the main charge by a circumferential detonator and by using a diaphragm made of plastic. The purpose for using the circumferential detonator with the diaphragm is to give a suitable shape for detonating wave propagating in the high explosive material. The liners were made of iron after the heat treatment to get a required pattern of grains. The case was made of steel. Fig. 3 illustrates the cross-section of the system for explosive formation of projectile. Designing parameters of the charge proposed for explosive formation of projectiles are collected in table 1.



Rys. 3. Przekrój ładunku do wybuchowego formowania pocisku:

1 – obudowa ładunku, 2 – zespół detonatora obwodowego, 3 – zespół detonatora punktowego, 4 – wkrętka dociskowa, 5 – ładunek zasadniczy materiału wybuchowego, 6 - podkładka

Fig. 3. Cross-section of the charge to explosive formation of projectile:

1 – case of charge, 2 – unit of circumferential detonator, 3 – unit of central detonator, 4 – pressing screw, 5 – main charge of explosive material, 6 - washer

Tab. 1. Parametry ładunków do wybuchowego formowania pocisków

Table 1. Parameters of charges for explosive formation of projectiles

Lp. #	Parametr /Parameter	Ładunek G1/ Charge G1
1.	Grubość obudowy/ thickness of case	$6 \pm 0,2$ mm
2.	Długość obudowy/ length of case	$120 \pm 0,2$ mm
3.	Materiał obudowy/ material of case	Stal / steel
4.	Średnica wkładki/ diameter of liner	$100 \pm 0,1$ mm
5.	Materiał wkładki/ material of liner	Żelazo / iron
6.	Masa wkładki/ mass of liner	$270 \pm 0,1$ g
7.	Materiał przesłony/ material of diaphragm	Tarnamid / tarnamide
8.	Masa ładunku MW/ mass of explosive charge	1105 ± 2 g
9.	Gęstość MW/ density of explosive material	$1,72 \pm 0,02$ g/cm ³

3. Badania poligonowe ładunku do wybuchowego formowania pocisku

Badania różnych wariantów ładunków do wybuchowego formowania pocisków przeprowadzono wg planu przedstawionego w tab. 2. Strzelanie przeprowadzono z odległości 75 m do tarczy ze stali pancerniej (RHA) o grubości 30 mm i wymiarach 3 x 4 m.

3. Range Tests of the Charge for Explosive Formation of Projectile

Different versions of charges for explosive formation of projectiles were tested according to schedule shown in table 2. Shooting was carried out at the distance of 75 m to the target made of armour steel (RHA) with thickness 30 mm and size 3.0 m

Poligonowe stanowisko badawcze przedstawiono na fot. 4. Wariant G2 różnił się od wariantu G1 parametrami wkładki. W Wariacie G2 zastosowano wkładkę o innych promieniach (zewnętrznym i wewnętrznym) w stosunku do wkładki z wariantu G1. Dwa ładunki w przypadku obu wariantów wyposażono w dodatkową obudowę wykonaną z włókien aramidowych i oznaczono odpowiednio G1A i G2A. W przypadku wariantu G1 zastosowano dwa rodzaje wkładek wykonanych dwoma różnymi technologiami T1 i T2. W T1 nie zastosowano obróbki termicznej materiału, z którego została wykonana wkładka a w T2 zastosowano dodatkową obróbkę termiczną żelaza, z którego wykonano wkładkę. Obróbka termiczna materiału wkładki powoduje zmianę właściwości materiału zarówno, pod względem wytrzymałości jak i pod względem właściwości dynamicznych. (Borkowski i in., 2018).

x 4.0 m.

The testing setup on the proving range is presented in Photo 4. Version G2 differs from version G1 by parameters of the liner. Version G2 employs the liner with different radiuses (external and internal) than in the liner of G1 version. The two charges of both versions were equipped with an additional case made of aramid fibres, and marked respectively as G1A and G2A. For version G1 there were used two types of liners prepared with different technologies T1 and T2. Technology T1 does not employ any thermal treatment of the material, and T2 employs additional thermal treatment of iron used for preparation of the liner. Thermal treatment of liner's material changes the properties of the material regarding both the strength and the dynamic performance. (Borkowski and others, 2018).

Tabela 2. Plan badań poligonowych ładunków EFP

Table 2. Plan of range tests for charges EFP

Wstępna weryfikacja <i>Initial verification</i>	Wariant G1 - 2 strzały <i>Version G1 - 2 shots</i>	Wariant G2 - 2 strzały <i>Version G2 - 2 shots</i>
I etap / I stage	Wariant G1 - 2 strzały <i>Version G1 - 2 shots</i>	Wariant G2 - 2 strzały <i>Version G2 - 2 shots</i>
	Wariant G1A - 1 strzał <i>Version G1A - 1 shot</i>	Wariant G2A - 1 strzał <i>Version G2A - 2 shots</i>
II etap / II stage	Wariant G1 - 2 strzały <i>Version G1 - 2 shots</i>	Wariant G2 - 2 strzały <i>Version G2 - 2 shots</i>
	Wariant G1A - 1 strzał <i>Version G1A - 1 shot</i>	Wariant G2A - 1 strzał <i>Version G2A - 1 shot</i>

W ramach prac przygotowawczych wykonano również odpowiednie stojaki do ładunków EFP o konstrukcji pozwalającej na wyeliminowanie wpływu mocowania ładunku na proces formowania pocisku. Przygotowano również przesłony papierowe ustawiane na torze lotu do badania kształtu pocisku i stabilności jego lotu oraz statywy wraz z osłonami z blachy stalowej do badania odłamkowości obudowy ła-

Special racks were made at preparation work to fix the charges of EFP and eliminate the influence of the charge fixing into the process of projectile formation. Moreover there were prepared paper screens to be set on the flight path to investigate projectile's shape and stability of flight, and the screens made of steel sheet to investigate the fragmentation of the charge case. The fragmen-

dunków. Przygotowano także stanowisko do badań odłamkowości: w tym celu 3 metry od ładunku EFP, równoległe do osi strzelania umieszczono tarczę do badań odłamkowości. Stanowiła ją płyta z blachy o wymiarach 2000 mm x 1000 mm x 2 mm rozpięta na drewnianym stelażu.

tation testing screen was placed parallelly to the firing axis at the distance of 3 m from the EFP charge. It was made of a sheet with the size 2000 mm x 1000 mm x 2 mm fixed to a wooden frame.



Fot. 4. Widok ogólny stanowiska do badań poligonowych EFP:

- 1 – pojedynczy ładunek EFP na stanowisku, 2 – tarcze do oceny stabilności na torze lotu,
3 – tarcza stalowa o wymiarach 3000 mm x 4000 mm x 30 mm

Photo. 4. General view of the setup for range tests of EFP:

- 1 – individual charge of EFP on the stand, 2 – screens for evaluation of stability at the flight,
3 – steel target with dimensions 3000 mm x 4000 mm x 30 mm*

Podczas badań poligonowych oceniano kształt pocisku, stabilność jego lotu, punkty trafień w tarczę (a po ich analizie celność pocisków) oraz przebicie pancernej tarczy. Stabilność lotu i kształt pocisków rejestrowano na systemie przesłon papierowych (z wyznaczoną teoretycznie osią strzału) ustawionych w osi strzału prostopadle do kierunku lotu pocisku, w odległości 25 i 50 m od miejsca ustawienia ładunków. Parametry przebicia określano analizując kratery wydrążone w tarczy pancerniej, a celność wyznaczano mierząc odległość środka krateru od punktu celowania.

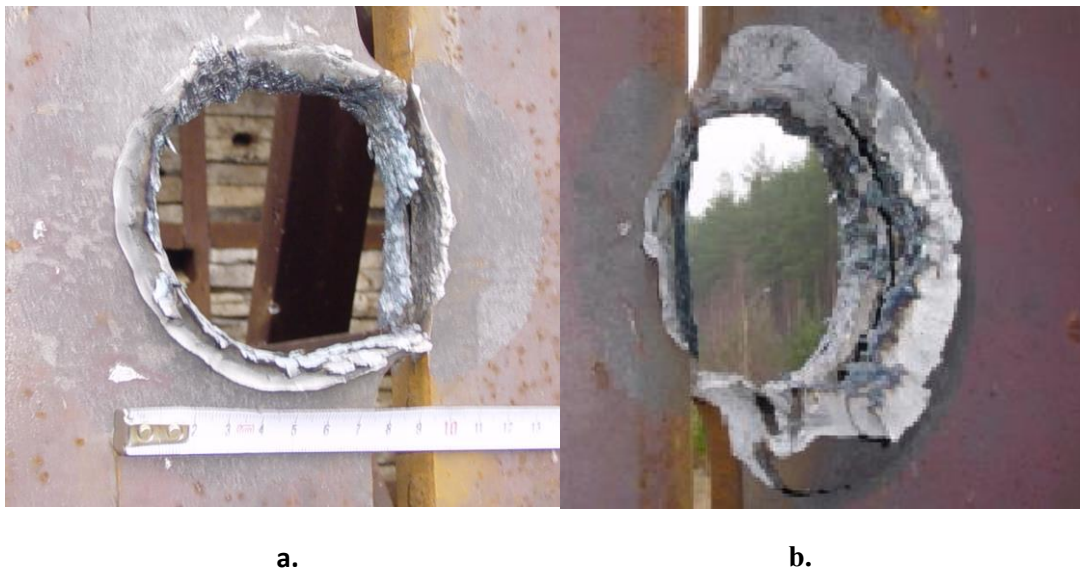
Projectile shape, stability of its flight, the pattern of hits in the target (and accuracy after analysis), and penetration of the armour target was evaluated at the range tests. The stability of flight and the shape of projectiles were recorded by a system of paper screens (for theoretic axis of shot) set perpendicularly to projectile flight direction and along to the axis of shot at distances 25 and 50 m from the place of charges. Parameters of penetration were established by analysis of craters left in the armour target, and the accuracy was established by distance between centre of a crater and the point of aiming.

3.1. Badania przebicia tarczy przez pocisk uformowany wybuchowo

Na fot. 5 przedstawiono przykładowe wyniki badań przebicia celu – tarczy wykonanej ze stali pancerniej (RHA) o grubości 30 mm przez ładunki uformowane wybuchowo.

3.1. Investigations of Target Penetration by Explosively Formed Projectile

Photo 5 shows exemplary results of penetration of target made of armour steel plate (RHA) with thickness of 30 mm by explosively formed projectiles.



Fot. 5. Przykład przebicia tarczy 30 mm RHA przez pocisk uformowany wybuchowo (a. przód tarczy, b. tył tarczy; strzał nr 10)

Photo 5. Example of penetration of 30 mm RHA target by explosively formed projectile (a. front of the plate, b. back of the plate; shot nr 10)

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań ładunków EFP dotyczące przebicia tarczy oraz ocenę stabilności pocisku na torze lotu. Średnica otworu podana w tabeli 3 dotyczy otworu wlotowego w tarczę.

Na fot. 6 przedstawiono wyniki strzelania do tarczy wraz z oznaczeniem punktu celowania w postaci dwóch białych linii o szerokości 5 cm przecinających się pod kątem 90 stopni. Na tarczę naniesiono siatkę o wymiarach 100 x 100 mm z linii o grubości 1,5 cm.

Badane wybuchowo formowane pociski, zarówno w wariantach G1 jak i G2, posiadały energię kinetyczną przewyższającą energię potrzebną do przebicia pancerza ze stali RHA grubości 30 mm ustawionego w odległości 75 m. Wskazuje na to efekt uzyskany podczas strzału nr 3, podczas którego przebiciu uległ

Table 3 presents results of investigations over EFP charges concerning the penetration of the plate and the evaluation of projectile's stability in the flying path. Diameter of the hole given in table 3 refers to its inlet.

Photo 6 shows results of firing at the target with the marking of the aiming point in the crossing of two white perpendicular lines of 5 cm thickness. The target is covered by a net with size 100 x 100 mm with the lines 1.5 cm thick.

Explosively formed projectiles which were tested in versions G1 and G2 had the higher kinetic energy than required for penetration of 30 mm thick steel RHA placed 75 m away. It is indicated by the result of shot nr 3 where the target support-

również wspornik stelaża tarczy o grubości ok. 5 mm. Również efekt uzyskany w strzale 2 wskazuje na wysoką energię kinetyczną pocisku; pocisk nie wykazał tendencji do rykoszetowania podczas trafienia w brzeg tarczy.

Na dwanaście oddanych strzałów dwa okazały się nieudane. Pociski uległy fragmentacji i uderzyły w ziemię przed tarczą. Na tarczy nie zaobserwowano żadnych śladów po fragmentach wkładek. Oba nieudane strzały to zmodyfikowane warianty G2. Również pozostałe dwa strzały w wariacie G2 charakteryzowały się niekorzystnymi właściwościami. Stwierdzono „koziółkowanie” obu pocisków na torze lotu oraz mniejsze przebicie niż w przypadku obu pozostałych wariantów (0,7 kal. wkładki). Wybrana wkładka o określonej średnicy zewnętrznej i wewnętrznej nie formowała się w pocisk o właściwym kształcie. Otrzymane wyniki spowodowały, iż zrezygnowano z kontynuacji badań wariantu G2.

W przypadku wariantu G1 oddano 8 strzałów. Etap formowania pocisku przebiegał prawidłowo, co świadczy o poprawnym doborze głównych parametrów konstrukcyjnych. Również średnica otworu w tarczy: $0,75 \div 0,94$ kalibru ładunku świadczy o poprawności konstrukcji, dokładności wykonania poszczególnych elementów oraz właściwej elaboracji ładunku. W wariacie G1 zastosowano wkładkę wykonaną technologiami T1 i T2. Wyniki badań wskazują, iż lepsze rezultaty uzyskano stosując technologię T2. Strzały oddane z ładunków elaborowanych wkładkami wykonanymi w technologii T2 charakteryzują się większymi rozmiarami otworów w tarczy (do 0,94 kalibra) oraz regularnym kształtem. W przypadku wkładek wykonanych technologią T1 otrzymywano nieregularne otwory oraz mniejsze średnice otworów w tarczy.

ing member, ca. 5 mm thick, was also pierced. Moreover the result received in shot nr 2 indicates on a high kinetic energy of the projectile as it has not showed any tendency of ricocheting after hitting the edge of the target.

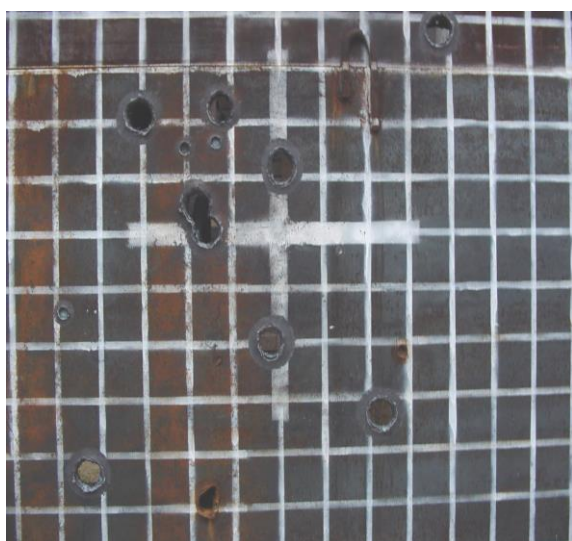
Two shots among all twelve were unsuccessful. The projectiles fell apart and hit the ground before the target. Any traces of fragments of liners were not noticed in the target. Both failed shots were the modified versions G2. Two remaining shots of version G2 were also characterised by bad performance. The two projectiles turned over on the flight path and had a lower penetration than the other versions (0.7 liner's calibre). The selected liner with a specific external and internal diameter has not shaped itself into the projectile of proper form. The received results caused that tests on version G2 were halted.

The 8 shots were fired in version G1. The stage of projectile formation run correctly what proves that designing parameters were well matched. The diameter of the hole in target equal to $0.75 \div 0.94$ of charge calibre confirms that particular components were made precisely and the charge was properly elaborated. Version G1 employs the liner prepared according to technologies T1 and T2. The results of tests indicate that better effects were received using technology T2. Shots delivered with charges elaborated from liners made in technology T2 are characterised by greater diameters of holes in the target (to 0.94 calibre) and a regular shape. In the case of liners made in technology T1 the holes are irregular and have lower diameters.

Tabela 3. Wyniki badań przebicia tarczy 30 mm RHA przez EFP

Table 3. Results of investigations on penetration of 30 mm RHA by EFP

Lp. #	Wariant EFP Version	Wariant wkładki Version of liner	Przebiecie Penetration	Średnica otworu Diameter of hole [mm]	Uwagi Notes
1	G1	T1	Pełne Complete	85	otwór zbliżony do okręgu hole similar to circle
2	G1	T1	Pełne Complete	75	pocisk fragmentował projectile has fragmented
3	G2	T1	Pełne Complete	70	pocisk koziołkował projectile turned over
4	G2	T1	Pełne Complete	70	pocisk koziołkował projectile turned over
5	G1	T2	Pełne Complete	75	otwór regularny regular hole
6	G1	T2	Pełne Complete	83	otwór regularny regular hole
7	G1A	T2	Pełne Complete	94	pocisk leciał w całości, projectile has flown as complete one
8	G2	T1	Brak trafienia No hit	-	pocisk uderzył przed tarczą projectile hit before target
9	G2	T1	Brak trafienia No hit	-	pocisk uderzył przed tarczą projectile hit before target
10	G1	T2	Pełne Complete	89	pocisk leciał w całości projectile has flown as complete one
11	G1	T2	Pełne Complete	90	pocisk leciał w całości projectile has flown as complete one
12	G1A	T2	Pełne Complete	93	pocisk leciał w całości projectile has flown as complete one



**Fot. 6. Wyniki trafień pociskami
formowanymi wybuchowo w tarczę**

**Photo 6. Pattern of target hits by explosively
formed projectiles**

W ramach badań wariantu G1 dwa strzały (strzał nr 7 oraz strzał nr 12) oddano stosując wzmocnioną obudowę. Obudowa składała się z dwóch warstw: stali i tkaniny aramidowej. Z pomiarów wynika, iż średnica otworu w tych dwóch strzałach jest większa od średniej z pozostałych pięciu strzałów o kilka procent.

Two shots were fired (shot nr 7 and shot nr 12) in the frame of version G1 tests using the strengthened case. The case consisted of two layers: steel and aramid fabric. The measurements show that diameter of hole in these two shots is greater by a few percent than in the five remaining shots.



a



b

Fot. 7. Nieefektywne trafienia pocisków w tarczę:

- a) przebicie tarczy pociskiem nr 4. Uderzenie w tarczę bokiem,
- b) przebicie tarczy pociskiem nr 2. Fragmentowanie pocisku na torze lotu

Photo 7. Inefficient hits of projectiles into the target:

- a) penetration of target by projectile nr 4. A sideways hit into target,
- b) penetration of target by projectile nr 2. The projectile has fragmented on the flight path

Na fot. 7a przedstawiono nieefektywne trafienie w tarczę pociskiem uformowanym z wkładki T1 - nieregularny kształt otworu po pocisku, który trafił bokiem w tarczę.

Na fot. 7b przedstawiono również wyniki uzyskane w strzale 2. Podczas lotu pocisku uformowanego wybuchowo oddzieliły się dwa większe fragmenty pocisku i wraz z nim trafiły w tarczę. Świadczy to najprawdopodobniej o dużych wadach materiału wkładki. Naprężenia podczas dynamicznego formowania pocisku najpewniej przewyższyły miejscowo wytrzymałość materiału i doprowadziły do oderwania się fragmentów wkładki. Wady te są przypadkowe – podobny wynik nie powtórzył się podczas badań.

Photo 7a shows an inefficient hit of projectile formed from the liner T1 into the target – the irregular shape of the hole left by projectile hitting the target sideways.

Photo 7b also shows results received in shot 2. Two larger fragments were separated from the explosively formed projectile during its flight and hit the target together. It probably indicates on significant liner material faults. Stresses existing at the dynamical formation of projectile probably exceeded the local strength of material and made the fragments of the liner separate. These faults have a casual character – similar result was not repeated at the tests.

3.2. Badania stabilności pocisku na torze lotu

Oceny stabilności pocisku na torze lotu dokonano za pomocą tarcz papierowych ustawionych na torze lotu pocisków. Ustawiono dwie tarcze na 1/3 (25 metrach) i 2/3 (50 metrach) odległości ustawienia ładunku EFP od tarczy pancernej (fot. 8).



3.2. Testing Projectile Stability on Flight Path

Evaluation of projectile stability on the flight path was made by paper screens set on the projectile flight path. Two screens were put at 1/3 (25 metres) and 2/3 (50 metres) of the distance between EFP and the armour target (Photo 8).

Fot. 8. Stanowisko do badań stabilności pocisku EFP na torze lotu (strzał 4)

Photo 8. A stand for testing the stability of EFP on the flight path (shot 4)

Tarcza ustawiona bliżej pocisku miała wymiary 1 x 1 m, zaś ustawiona dalej od pocisku miała wymiary 2 x 2 m. Przykładowe kształty pocisków na torze lotu przebijających papierowe tarcze przedstawiono na fotografiach 9 i 10.

The screen set closer to the charge had size 1 x 1 m, and that one set further from the charge 2 x 2 m. The exemplary shapes of projectiles on the flight path left after passing through paper screens are shown in photos 9 and 10.



a.



b.

Fot. 9. Przykłady przebicia tarczy papierowej przez „koziolkujący” pocisk uformowany wybuchowo podczas strzału nr 4: (a. tarcza na 1/3 odległości od celu, b. tarcza na odległości 2/3 od celu)

Photo 9. Examples of punctures in paper screens left by “tipping” explosively formed projectile at shot nr 4: (a. screen at 1/3 distance to the target, b. screen at 2/3 distance to the target)

Na fot. 9 przedstawiono przebicia tarcz papierowych uzyskane w strzale 4. Pocisk poruszał się „koziółkując”; pozostawił w przesłonach otwory o nieregularnym kształcie, co świadczy o uderzeniu pocisków w tarcze papierowe pod różnymi kątami.

Z kształtu przestrzelin koziółkujących pocisków wyznaczono jeden z najważniejszych parametrów charakteryzujących pociski uformowane wybuchowo: L/D (stosunek długości pocisku do jego średnicy). Parametr ten kształtował się w granicach $2,3 \div 2,5$.

Photo 9 shows punctures of the paper screens received after shot 4. The projectile was turning over during the flight leaving in the screens the openings with irregular shapes what proves that the projectiles hit the paper screens under different angles.

The shapes of punctures of tipping projectiles were used to identify one of the most important parameters for the explosively formed projectiles: L/D (proportion of projectile's length to its diameter). The parameter was within limits $2.3 \div 2.5$.



Fot. 10. Przykłady przebicia tarczy papierowej przez pociski uformowane wybuchowo
Photo 10. Examples of paper screen punctures by explosively formed projectiles

Na fot. 10 przedstawiono wyniki przebicia tarczy papierowej przez pocisk uderzający prawidłowo w tarczę papierową. Na obu zdjęciach widać nieregularny kształt „ogona” prawidłowo uformowanego pocisku.

3.3. Badania celności pocisków

Badania celności zrealizowano podczas wykonywania strzałów nr 5–12 w wariacie G1 i G1A. Wyniki tych badań zamieszczono w tabeli 4: przedstawiono współrzędne punktu trafienia w tarczę w stosunku do punktu celowania.

Photo 10 shows results of punctures of the paper screens by the projectile hitting the screen in proper way. Two pictures show an irregular shape of the tail of properly formed projectile.

3.3. Testing the Accuracy of Projectiles

Tests of accuracy were performed at execution of shots nr 5–12 in versions G1 and G1A. Results of these tests are presented in Table 4: the coordinates of hitting point in the target are related to the aiming point.

Tabela 4. Wyniki badań celności ładunków w wariancie G1

Table 4. Results of accuracy tests for charges in version G1

Lp. #	Numer strzału – wariant <i>Number of shot – version</i>	Współrzędna X [m] <i>Coordinate X [m]</i>	Współrzędna Y [m] <i>Coordinate Y [m]</i>
1	5 - G1	- 0,30	0,15
2	6 – G1	0,00	0,10
3	7 – G1A	0,55	0,65
4	10- G1	- 0,15	0,35
5	11 - G1	- 0,25	0,05
6	12 – G1A	- 0,55	- 0,55

Celowano za pomocą dwóch celowników: optycznego oraz przeziernikowego, aby wyeliminować wpływ niedokładności celowania na otrzymywane wyniki. Warunki strzelań dla obu wariantów były porównywalne. Strzelano do tej samej tarczy, na stojakach o tej samej konstrukcji i z tej samej odległości. Celowano za pomocą tych samych celowników. Celowały niezależnie dwie osoby, wzajemnie się korygując. Dokładność celowania wyniosła średnio 15 minut kątowych. Na zakładanej odległości 150 m do celu promień rozrzutu powinien być nie większy niż 1,5 m. Założenie to zweryfikowano podczas wyników eksperymentów opisanych w tabeli 4. Środki wszystkich otworów w tarczy mieszczą się w promieniu o średnicy 0,80 m.

3.4. Badania odłamkowości obudowy

Badania odłamkowości ładunków przeprowadzono w celu określenia względnej oceny oddziaływania obudów ładunków na otoczenie. Ma to zasadnicze znaczenie w ocenie stref bezpieczeństwa miny na polu walki oraz interakcji pomiędzy jednym ładunkiem a drugim w układzie dubletu. W celu zbadania odłamkowości względnej dwóch rodzajów obudów (dla wariantów G1 i G1A), zaproponowano stanowisko przedstawione na rys. 11. Konstrukcja stanowiska była następująca: 3 metry od ładunku EFP, równoległe do

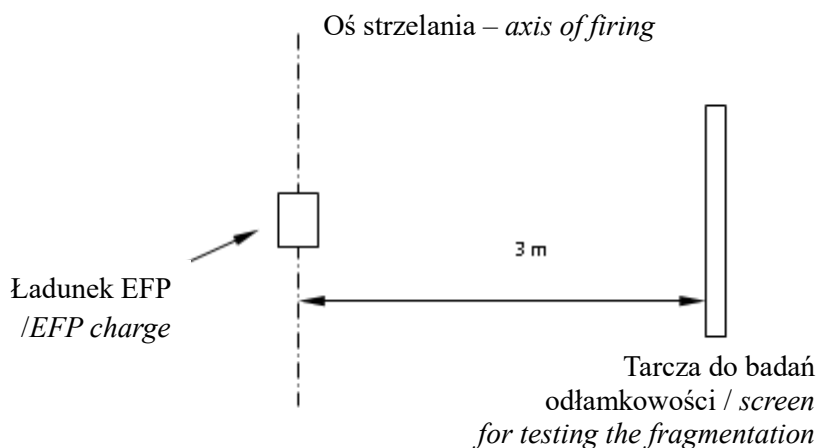
The aiming was conducted by two sights: the optical one and the sights, in order to eliminate the error of aiming on received results. Conditions of shooting for two versions were comparable. The firing was conducted to the same target and from identical distance. The aiming was made by the same sights. The aiming was carried out by two persons for correcting it. The average accuracy of aiming was 15 angular minutes. For the assumed distance of 150 m to the target the radius of scattering has to be below 1.5 m. The assumption was verified by the results of experiments described in Table 4. The centres of all holes in the target are placed within the radius of 0.80 m.

3.4. Testing the Fragmentation of Case

The fragmentation of charges was tested to get a relative assessment of the impact of cases of charges into the environment. It is of a key meaning for establishing the safety zones in the battlefield, and the interaction between two charges in a double configuration. A stand presented in Fig. 11 was proposed to investigate the relative fragmentation of two types of cases (for versions G1 and G1A). The stand was built in following way: 3 metres from EFP charge a screen was placed for testing the

osi strzelania umieszczono tarczę do badań odłamkowości. Stanowiła ją płyta z blachy o wymiarach 2000 mm x 1000 mm x 2 mm rozpięta na drewnianym stelażu.

fragmentation. It was a metal sheet with dimensions 2000 mm x 1000 mm x 2 mm fixed to a wooden frame.



Rys. 11. Stanowisko do badania odłamkowości względnej (na ładunku widoczny jest celownik przeziernikowy)

Fig. 11. Stand for testing the relative fragmentation (The sights is mounted on the charge)

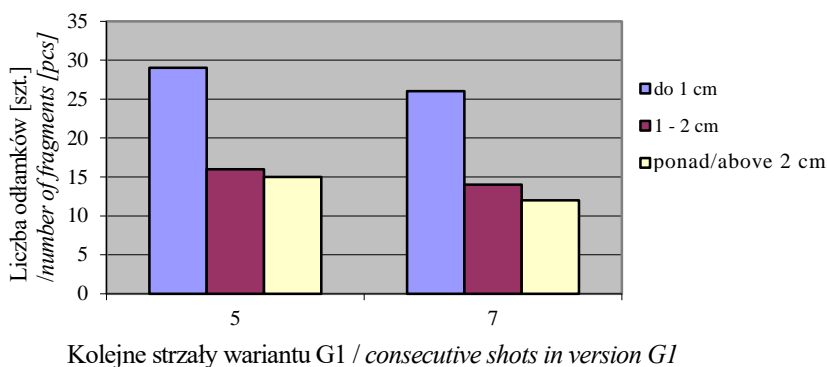
Na fot. 12 przedstawiono przykładowe wyniki badań wariantów G1 oraz G1A. Tarcza z blachy została poddana analizie – policzono poszczególne otwory i podzielono je na trzy klasy. Pod uwagę wzięto największy wymiar śladu po odłamku w tarczy. Pozwoliło to wydzielić klasę I śladów, gdzie największy wymiar był mniejszy niż 1 cm. W drugiej klasie znalazły się odłamki o największym wymiarze pomiędzy 1 a 2 cm. Trzecia klasa obejmowała odłamki o największym wymiarze większym niż 2 cm. Jako wynik badań odłamkowości względnej przedstawiono wykresy ilości śladów po odłamkach w trzech grupach uzyskane w poszczególnych strzałach.

Photo 12 shows some exemplary results of tests for versions G1 and G1A. The metallic sheet was examined – the holes were counted and divided into three groups. The greatest dimension of a trace left by a fragment was noted. It allowed for creation of the I group traces with the greatest dimensions below 1 cm. In the second group were fragments with the greatest dimension between 1 and 2 cm. The third group included fragments with the greatest dimension exceeding 2 cm. The graphs representing numbers of traces in three groups were used as results of testing the relative fragmentation for particular shots.

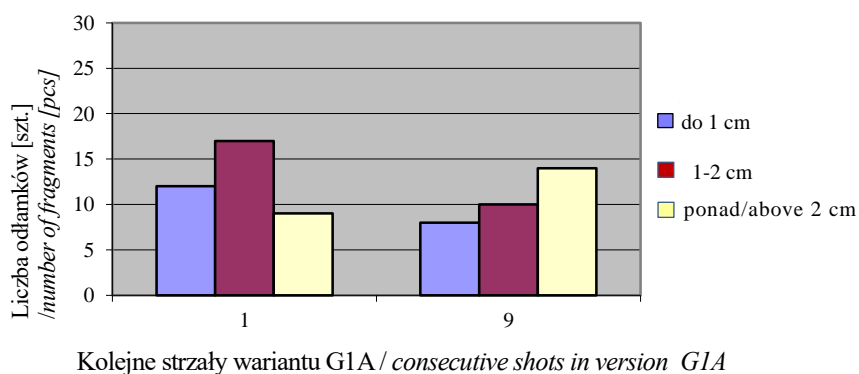


Fot. 12. Przykładowe wyniki badań odłamkowości względnej ładunków EFP wariant G1 – z lewej, wariant G1A - z prawej

Photo 12. Exemplary results of tests on relative fragmentation for EFP charges version G1 – on the left, version G1A – on the right



Rys. 13. Wyniki badań odłamkowości względnej EFP wariant G1
Fig. 13. Results of tests on relative fragmentation for EFP, version G1



Rys. 14. Wyniki badań odłamkowości względnej EFP wariant G1A
Fig. 14. Results of tests on relative fragmentation for EFP, version G1A

Na rysunku 13 przedstawiono wyniki badań odłamkowości względnej uzyskane w dwóch strzałach w wariant G1, a na rys. 14

Fig. 13 shows results of tests on relative fragmentation received in two shots in version G1, and Fig.14 shows results of tests

przedstawiono wyniki badań odłamkowości względnej dla wariantu G1A z dodatkową powłoką z tkaniny aramidowej.

Z przedstawionych wykresów wynika, iż w przypadku wariantu G1 około 75% to odłamki małe i średnie.

W przypadku wariantu G z dodatkową osłoną aramidową stwierdzono obecność większej ilości odłamków z III grupy czyli większych niż 2 cm. Stanowiły one około 35% ilości wszystkich odłamków. Całkowita ilość odłamków wygenerowanych przez wariant GA w mierzonym sektorze była mniejsza o 40% w stosunku do wariantu G1 – bez osłony aramidowej.

4. Podsumowanie

Analiza rezultatów pozwala na stwierdzenie, iż zaproponowana konstrukcja ładunku do wybuchowego formowania pocisków kalibru 100 mm w wersji G1 zapewnia uzyskanie stabilnego pocisku uformowanego wybuchowo z całej masy wkładki. W wyniku badań ustalono, iż pocisk poruszał się stabilnie na odległość 750 kalibrów. Energia kinetyczna była wystarczająca do przebicia tarczy wykonanej ze stali pancerniej o grubości 30 mm. Otrzymane wyniki przebicia tarczy pozwoliły ocenić średnicę przebicia tarczy na 0,75-0,94 kalibra. Dla wkładek wykonanych w technologii T2 (po zastosowaniu obróbki termicznej żelaza) wartość średnia krateru tarczy, po odrzuceniu dwóch skrajnych wyników, wyniosła 0,9 kalibra wkładki.

W wybranym do badań wariantcie ładunku G2 z wkładką o określonym promieniu wewnętrznym i promieniu zewnętrznym nie uzyskano efektywnego pocisku. Na wykonane 4 strzały w wariantcie G2 uformowały się dwa pociski. Ich lot nie był stabilny, zaś oddziaływanie na tarczę było mniej efektywne niż wariantu G1. Przebicie wyniosło 0,7 kalibra przy zakładanym 0,9 kalibra.

on relative fragmentation for version G1A with additional covering of aramid fabric.

Presented graphs show that in version G1 ca. 75% of fragments belong to group of small and medium ones.

In the case of version G, with added aramid cover, a greater number of fragments belonging to the III group, i.e. greater than 2 cm, was noticed. They created ca. 35% of all fragments. Total number of fragments produced by version GA in the measurement sector was lower by 40% than in version G1 – without aramid cover.

4. Summary

The analysis of results shows that proposed design of the charge for explosive formation of projectiles of 100 mm calibre in version G1 provides a stable projectile formed explosively from the whole mass of the liner. The tests proved the stability of projectile flight to the distance of 750 calibres. The kinetic energy was sufficient for piercing the armour steel target with thickness of 30 mm. Received results of target penetration estimate the diameter of target puncture on 0.75-0.94 calibre. For liners fabricated in technology T2 (after thermal treatment) the average value of crater in the target, after rejection of two extreme results, was equal to 0.9 liner calibre.

No efficient projectile was produced for the version of G2 charge taken to tests for specific internal radius and external radius of the liner. Two projectiles were formed after firing 4 shots in version G2. Their flight was not stable and interaction with the target was less efficient than for version G1. The puncture was of 0.7 calibre, comparing to expected 0.9 calibre.

Results of stability tests on the flight

Wyniki badań stabilności pocisku na torze lotu pozwoliły zaobserwować, iż pociski w wariacie G1 w większości przypadków lecą stabilnie. W kilku przypadkach pociski „koziółkowały” na torze lotu. Objawy „koziółkowania” umożliwiły zaobserwowanie na tarczach kształtu lecących pocisków uformowanych wybuchowo. Pozwoliło to stwierdzić, iż w wariacie G1 otrzymano pociski o stosunku długości do średnicy (L/D) około $2,3 \div 2,5$.

Celność pocisków uformowanych wybuchowo jest zgodna z oczekiwaniami. Promień rozrzutu w przypadku wariantu G1 wyniósł 0,8 m na badanej odległości 75 m. Pozwala to wywnioskować, iż na 150 m odległości do celu promień rozrzutu powinien być nie większy niż 1,6 m.

W przypadku oceny względnej odłamkowości stwierdzono, iż generowanie odłamków jest o połowę mniejsze w przypadku wariantu G1A w stosunku do ocenianego G1. Dodanie dodatkowej osłony aramidowej zmniejszyło sumaryczną ilość odłamków w badanym sektorze.

Wyniki badań wskazują, iż zaproponowano konstrukcję ładunku do wybuchowego formowania pocisku, która może znaleźć zastosowanie w amunicji do zwalczania celów opancerzonych.

path showed that in most cases the projectiles of version G1 flew in a stable way. In some cases the projectiles “tipped” on the flight path. Effects of “tipping” helped to observe on the screens the shapes of explosively formed projectiles in the flight. It led to estimation that in version G1 the projectiles had the proportion of length to diameter (L/D) ca. $2.3 \div 2.5$.

Accuracy of explosively formed projectiles complies with the expectations. The radius of scattering is 0.8 m for version G1 at investigated distance 75 m. It can be then concluded that at distance of 150 m to the target the radius of scattering could be below 1.6 m.

In the case of estimation of the relative fragmentation it was stated that the number of produced fragments is two times lower in the case of version G1A than in G1. Addition of extra aramid cover reduced total number of fragments in the investigated sector.

Results of investigations show that the proposed design of the charge for explosive formation of projectile can be applied in ammunition fighting the armoured targets.

Literatura / Literature

- [1] Borkowski, J., Wilk, Z., Koślik, P., Szymańczyk, L., Zygmunt, B., (2018) Application of sintered liners for explosively formed projectile charges, *International Journal of Impact Engineering* 118 (2018) 91–97, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.04.009>.
- [2] Borkowski, J., *Konstrukcja i badania układu do wybuchowego formowania pocisków dla miny przeciwmięłkowej*, Rozprawa doktorska. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2007.
- [3] Bo-yang, X., Rong-zhong, L., Rui, G., Liang, Ch., Hao, Z. Yong-liang, Y., Lei, L. (2017) Influence of the embedded structure on the EFP formation of compact terminal sensitive projectile, *Defence Technology* 13 (2017), p. 310-315, doi.org/10.1016/j.dt.2017.05.006
- [4] Cardoso, D., Teixeira-Dias, (2016), F., Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP), *International Journal of Impact Engineering* 93 (2016), p. 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.02.014>.
- [5] Dong, Y., Jiajian, L., (2021) Numerical Investigation on the Formation and Penetration Behavior of Explosively Formed Projectile (EFP) with Variable Thickness Liner, *Symmetry* 2021, 13, 1342. <https://doi.org/10.3390/sym13081342>.

- [6] Jach, K., (red.), (2001) *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2001.
- [7] Gold, V., (2001) *An explosive charge with complex liner profile*, Technical Report ARWEC-TR- 01005, August 2001, US Army.
- [8] Guangsong, M., Guanglin, H., Yukuan, L., Yulong, Z.,(2021) Numerical Simulation of Multiple Explosively Formed Projectile Warhead Forming Characteristics considering Various Materials, *Hindawi Shock and Vibration*, Volume 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/5589031>
- [9] Hussain, G., Hameedb, A. J., Hetheringtonb, G., Malika, A. Q., Sanaulaha K., (2013) Analytical performance study of explosively formed projectiles, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 54, No. 1, pp. 10–20, 2013, DOI: 10.1134/S0021894413010021.
- [10] Liu, J., Long, Y., Ji, Ch., Xu, D., Xiang D., Song, G., (2017), Dynamic Response and Microstructure Evolution of Oxygen-Free High-Conductivity Copper Liner in Explosively Formed Projectile, *Latin American Journal of Solids and Structures* 14 (2017) 2089-2106. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253958>
- [11] Milewski, E., (1997) *Eksperymentalno-teoretyczna optymalizacja ładunków do wybuchowego formowania pocisków*, Rozprawa doktorska. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1997.
- [12] Mulligan, Ph., Baird, J., Hoffman, J., (2012), The effects of the flyer plate's radius of curvature on the performance of an explosively formed projectile, *AIP Conference Proceedings* 1426, 1023 (2012); <https://doi.org/10.1063/1.3686452>
- [13] Mulligan, Ph., (2011) *The effects select physical parameters have on an explosively formed projectile's performance*, Master Theses, Missouri University of Science and Technology 2011.
- [14] Ng, W., (2006) New Multi-purpose Warhead Designs with Novel and Insensitive Explosives, *Proceeding of the 2006 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium*.
- [15] Riad, A. M., Ismail, M.M., Ibrahim, E.A., (2006) Design of an explosively formed penetrator capable of defeating a specific metallic target, *Proceeding of the 12th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (AMME)*, May 16-18, 2006.
- [16] Wolski, J., (2018) *Penetratory Formowane Wybuchowo (EFP). Stan obecny oraz tendencje rozwojowe*, Nowa Technika Wojskowa 5/2018.

***Autorzy dziękują serdecznie Panu Tadeuszowi Pielach
za pomoc przy edycji rysunków.***

***Authors express their thanks to Mr Tadeusz Pielach
for assistance at edition of figures.***

