

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Zastosowanie penetratora formowanego wybuchowo do rażenia celów w bliskim dystansie

Sebastian Stanisławek<sup>1</sup>, Grzegorz Sławiński<sup>1</sup>, Karolina Pęcherzewska<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna

<sup>2</sup>Ministerstwo Obrony Narodowej

email: sebastian.stanislawek@wat.edu.pl, grzegorz.slawinski@wat.edu.pl, kpecherzewska@ron.mil.pl

**STRESZCZENIE:** Referat podejmuje tematykę numerycznego modelowania penetratora formowanego wybuchowo (EFP) oraz penetracji płyty pancernej. Proces formowania jest bardzo wrażliwy na nawet niewielkie niejednorodności materiałów konstrukcyjnych. Jeżeli wykorzystuje się jedynie badania eksperymentalne, opracowanie prototypu ładunku jest dosyć trudne. Z uwagi na tę okoliczność zastosowano analizę numeryczną. Wykorzystano oprogramowanie LS-DYNA, które stanowi bardzo rozbudowaną implementację metody elementów skończonych z jawnym całkowaniem równań ruchu, dedykowaną dla zagadnień dynamicznych. Opracowany model osiowo symetryczny pozwolił znacznie ograniczyć ilość elementów skończonych. Do opisu materiału wkładki oraz płyty stalowej posłużył model Johnsona-Cooka z równaniem stanu. Z kolei materiał wybuchowy symulowano za pomocą MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN i równania stanu JWL. Badanie wpływu odległości pomiędzy ładunkiem (wyrażone w średnicy  $D$  ładunku) a celem wykazały, że EFP jest w stanie rażać cele w odległości odpowiadającej ( $1xD$ ) średnicy ładunku. Ponadto stwierdzono prawie całkowite uformowanie się pocisku w odległości  $3xD$  i brak istotnych zmian w zakresie geometrii krateru oraz zdolności perforacyjnych pocisku dla większych dystansów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** mechanika komputerowa, symulacja, pocisk formowany wybuchowo, EFP

#### 1. Wprowadzenie

Zastosowanie pocisków formowanych wybuchowo (EFP) opisano po raz pierwszy w opracowaniu [1]. Znaczący wzrost liczby publikacji z tego zakresu nastąpił w latach siedemdziesiątych, kiedy pojawiły się także opisy symulacji numerycznych. Obecnie zagadnienie jest przedmiotem wielu prac, w których analizowane są zagadnienia dyskretyzacji, intensywności fali wybuchowej, modeli konstytutywnych i zastosowanie alternatywnych metod obliczeniowych [2-4]. Część badań dotyczy wpływu geometrii ładunku, zwłaszcza kształtu wkładki, na formowanie się pocisku [5]. Istotną kwestią jest przy tym zdolność rażenia EFP w zależności od materiału pancerza i konstrukcji ładunku [6-7].

W literaturze rzadko rozważa się [8] zdolności penetracyjne EFP w przypadku małej odległości pomiędzy umiejscowieniem ładunku a punktem uderzenia. Zgodnie z wynikami zarówno symulacji jak i obserwacji eksperymentalnych, czas niezbędny do całkowitego uformowania się pocisku mieści się w zakresie 140-200  $\mu$ s. Jednak już we wcześniejszym momencie formuje się pocisk o pewnej zdolności penetracyjnej. Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu odległości zamocowania ładunku na zdolność penetracyjną dla wybranej konstrukcji ładunku EFP.

#### 2. Model numeryczny

Przedmiotem analizy jest ładunek EFP z wkładką miedzianą, o średnicy  $D = 65$  mm i grubości 2 mm. Materiał wybuchowy to plastyczny Composition 4 o masie

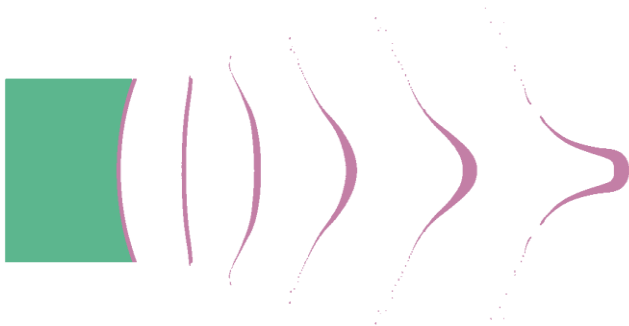
0,3 kg, z zapalnikiem umieszczonym w osi symetrii ładunku. Ze względu na niewielki wpływ obudowy, wykonanej z tworzywa sztucznego o małej wytrzymałości mechanicznej, została ona pominięta w dalszych rozważaniach. Celem dla pocisku jest płyta pancerna wykonana z ARMOX 500T.

Do analiz wykorzystano oprogramowanie LS-DYNA, które stanowi bardzo rozbudowaną implementację metody elementów skończonych z jawnym całkowaniem równań ruchu, dedykowaną dla zagadnień dynamicznych. Zastosowano model osiowo symetryczny, co pozwoliło na znaczne zagęszczenie siatki MÉS. Do modelowania materiału wkładki oraz płyty stalowej wykorzystano model Johnson-Cook (JC) z równaniem stanu Gruneisen, natomiast materiał wybuchowy zamodelowano za pomocą materiału MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN i równania stanu JWL. Parametry materiałowe pozyskano z literatury [9-10]. Inicjacja detonacji ma charakter punktowy. Miejsce inicjacji zostało ustalone w górnej części ładunku, w osi symetrii. Wstępnie wykonano analizę wrażliwości modelu na gęstość siatki oraz określono wpływ warunków brzegowych na rozkład ciśnienia. Płytę pancerną umieszczono w różnych odległościach w zakresie  $1\div 3$  średnic ładunku – tak by można było zbadać głębokość penetracji.

#### 3. Proces formowania pocisku

Proces wybuchowego formowania penetratora dla wybranego wariantu pokazano na rys. 1 (zastosowano model osiowo symetryczny: kształty zaprezentowane na

rysunku przedstawiają przekrój dwuwymiarowy). Centralna część materiału wkładki przemieszcza się najszybciej i formuje część frontową. Fragmenty, znajdujące się dalej od osi symetrii, tworzą tylną część pocisku. W trakcie omawianego zjawiska następuje również defragmentacja części wkładki, która poprzez zastosowany model zniszczenia, symuluje ograniczoną wytrzymałość miedzi na wyężenie. EFP powinien zawierać praktycznie całą masę wkładki, jednak opisany ubytek jest nieznaczny.

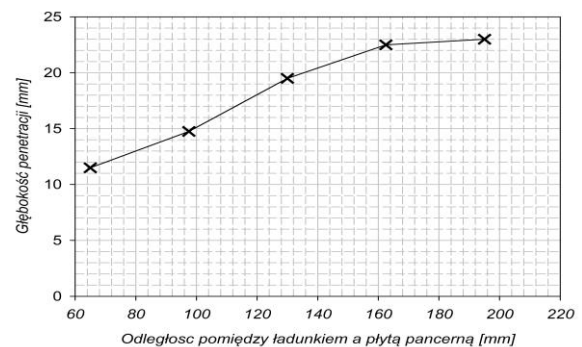


Rys. 1. Sekwencja napędzania wkładki dla czasu 0, 10, 20, 30, 40, 70  $\mu$ s

#### 4. Penetracja płyty pancerniej

W momencie uderzenia pocisku w płytę stalową następuje znaczna deformacja ich materiałów. Powstaje krater o nieregularnym kształcie, różny dla każdego z wariantów. Odmienności wiążą się z występowaniem gradientów prędkości w penetratorze, który wciąż jest na etapie kształtowania. Średnica powstałego otworu wynosi 28÷35 mm, co odpowiada 43÷53% rozmiarowi wkładki. Są to typowe efekty zastosowania ładunków z penetratorami formowanymi wybuchowo (EFP). Są one odmienne od efektów działania klasycznych ładunków kumulacyjnych, które dla uzyskania optymalnych efektów penetracji przeszkody wymagają odsunięcia podstawy wkładki od niszczonej powierzchni na ściśle określonej odległości (równą ogniskowej ładunku), drażąc wąski krater w niszczonej przeszkodzie. Z tych powodów proces wybuchowego formowania pocisków nazywany jest także kumulacją odwrotną. W końcowym etapie symulacji materiał wkładki podlega częściowemu odbiciu, a zdeformowana plastycznie płyta nie zmienia swojej geometrii.

W celu ilościowego określenia wpływu odległości płyty od ładunku, zastosowano kryterium maksymalnej głębokości penetracji płyty pancerniej. Wskazuje ono na zdolność pocisku do perforacji, a więc rażenia celu znajdującego się za chroniącym go pancernem. Na wykresie zaprezentowanym na rys. 2 widać nieliniowe narastanie zdolności penetracyjnych. Dla odległości 65 mm uzyskano 11,5 mm, a dla odległości 195 mm aż 23 mm. Różnica pomiędzy skrajnymi wariantami jest więc dwukrotna. Na podstawie zależności ukazanej na wykresie można wnioskować, że głębokość otworu w płycie nie wzrasta istotnie przy dalszym zwiększaniu odległości postawy ładunku od niszczonej przeszkody.



Rys. 2. Wpływ odległości ładunku EFP od przeszkody na głębokość penetracji

#### 5. Podsumowanie

Proces wybuchowego formowania pocisków jest bardzo wrażliwy na nawet niewielkie niejednorodności materiałów konstrukcyjnych. Z tego powodu opracowanie prototypu ładunku w sposób eksperymentalny jest trudne, a przy tym dość kosztowne. Dzięki zastosowaniu w prezentowanej pracy komputerowej metody symulacji, przeanalizowano zarówno proces formowania się penetratora, jak i jego zdolności penetracyjne. Wykorzystanie modelu osiowo symetrycznego pozwoliło zbudować dokładny model obliczeniowy, o relatywnie małej ilości elementów skończonych, a to z kolei zwiększyło efektywność obliczeń. Badanie wpływu odległości pomiędzy podstawą ładunku (wyrażonej w średnicy  $D$  ładunku) a celem na zdolność penetracyjną dla wybranej konstrukcji wykazały, że:

- 1) EFP posiada zdolność rażenia celów w bliskiej odległości ( $1xD$ ),
- 2) zasadnicze uformowanie się pocisku następuje dla odległości  $3xD$ ,
- 3) brak istotnych zmian w zakresie geometrii krateru oraz zdolności perforacyjnych pocisku dla odległości powyżej  $3xD$ .

*Artykuł powstał w ramach realizacji uczelnianego grantu badawczego wspartego przez Wojskową Akademię Techniczną (nr UGB 22-766/2022).*

#### Literatura

- [1] Payman W. i in., Explosion waves and shock waves, Part II – The shock waves and explosion products sent out by blasting detonators, Proc. Roy. Soc., Vol. 148, pp. 604-22, 1935.
- [2] Taylor E.A., Simulation of hollow shaped charge jet impacts onto aluminium whipple bumpers at 11 km/s, Int J Impact Eng, Vol. 26, pp. 773-84, 2001.
- [3] Nyström U., Gylltoft K., Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading, Int J Impact Eng, Vol.36, pp. 995-1005, 2009.
- [4] Molinari J.F., Finite element simulation of shaped charges, Finite Elem Anal Des, Vol. 38, pp. 921-36, 2002.
- [5] Li R., Li W.B., Wang X.M., Effects of control parameters of three-point initiation on the formation of an explosively formed projectile with fins, Shock Waves, Vol. 28, pp. 1-14, 2018.
- [6] Weickert C.A., Gallagher P.J., Penetration of explosively formed projectiles, Int J Impact Eng, Vol. 14, pp. 809-18, 1993.
- [7] Hu F. I in., Impact performance of explosively formed projectile (EFP) into concrete targets, Int J Impact Eng, Vol.109, pp. 150-166, 2017.
- [8] Malesa P. i in., Numerical Analysis and Experimental Test for the Development of a Small Shaped Charge, Appl. Sci., Vol. 11, 2021.
- [9] Kłasztorny M., Numerical modelling and design of alfc shield loaded by 20 mm fsp fragment, J. KONEX, Vol. 19, No. 4, pp. 301-313, 2012.
- [10] Włodarczyk E., Wstęp do mechaniki wybuchu, PWN, Warszawa 1994.