



Modelowanie głowicy odłamkowej z wykorzystaniem sprzężenia ALE

Marcin KONARZEWSKI, Robert PANOWICZ*

*Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

** autor korespondencyjny, e-mail: robert.panowicz@wat.edu.pl*

Artykuł wpłynął do redakcji 02.11.2015. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 04.12.2015

DOI 10.5604/20815891.1203125

Streszczenie. W artykule zaprezentowano metodykę numerycznego modelowania głowic odłamkowych wraz z przyjętymi założeniami oraz wstępne wyniki analiz numerycznych otrzymanych na jej podstawie. Istnieje kilka metod numerycznego modelowania zjawisk fragmentacji. Jedną z najpopularniejszych, wykorzystaną w poniższej pracy, jest zastosowanie metody ALE wraz ze sprzężeniem płyn – ciało stałe. Analizie poddano głowicę odłamkową w formie walca o długości 100 i średnicy 80 mm, składającą się z czterech podstawowych elementów: obudowy zewnętrznej, obudowy wewnętrznej, materiału wybuchowego oraz warstwy odłamkującej. Warstwa odłamkująca zbudowana jest z żywicy wraz z zanurzonymi w niej metalowymi kulkami, których celem jest stworzenie chmury odłamków po detonacji głowicy. Rozlot odłamków jest charakteryzowany przez kilka kluczowych wartości, takich jak prędkość odłamków czy ich rozkład w przestrzeni. Przygotowano trójwymiarowy model głowicy odłamkowej, wykorzystując oprogramowanie Hypermesh, a następnie przeprowadzono analizy numeryczne z wykorzystaniem programu LS-Dyna. W wyniku przeprowadzonych analiz określono maksymalną prędkość uzyskiwaną przez odłamki oraz ich rozkład przestrzenny.



Słowa kluczowe: mechanika, metoda elementów skończonych, dynamika, głowica odłamkowa

1. WSTĘP

Współczesny teatr działań wojennych niesie ze sobą wiele zagrożeń dla pojazdów wojskowych. Do najczęściej spotykanych możemy zaliczyć:

- pociski kinetyczne,
- pociski z głowicami kumulacyjnymi,
- miny oraz improwizowane ładunki wybuchowe.

Ze względu na wysoką dostępność, niską cenę i łatwość w użytkowaniu jednym z najczęściej występujących zagrożeń są ręczne granatniki przeciwpancerne wykorzystujące pociski z głowicami kumulacyjnymi. W pociskach tego typu do przebicia pancerza pojazdu wykorzystywany jest strumień kumulacyjny. Powstaje on w wyniku dynamicznego oddziaływania ładunku wybuchowego na wkładkę kumulacyjną, wykonaną zazwyczaj z miedzi, o kształcie cienkościennego stożka. Strumień kumulacyjny ma postać cienkiej nici o grubości 1-3 mm, która porusza się z prędkością rzędu kilku km/s i jest w stanie przebić od 300 do 900 mm stali Rolled Homogeneous Armour (RHA). Do najpopularniejszych pocisków z głowicami kumulacyjnymi należą niekierowane pociski raketowe używane w ręcznych granatnikach przeciwpancernych RPG-7 (rys. 1).

Przez lata opracowano wiele metod ochrony przed tego typu pociskami. Najprostszym rozwiązaniem jest wykorzystanie pasywnego systemu obrony w formie siatek bądź specjalnie przygotowanych, dodatkowych panczerzy w formie różnego rodzaju prętów [2]. Zabezpieczenie tego typu pomimo wielu zalet posiada również wady – ogranicza zdolności manewrowe pojazdu, pogarsza widoczność oraz nie zapewnia pełnej ochrony pojazdu. Drugim najpopularniejszym rozwiązaniem, szeroko stosowanym na świecie, są panczerze reaktywne. Zawierają one w swojej budowie materiał wybuchowy pobudzany przez przebijający go strumień kumulacyjny. Coraz większą popularność zyskują jednak pociski tandemowe, tj. składające się z dwóch głowic kumulacyjnych, co sprawia, że panczerze reaktywne są nieskuteczne.

Obecnie we wszystkich znaczących krajach świata prowadzone są badania nad aktywnymi systemami obrony. Systemy tego typu wykrywają i niszczą (lub uszkodzają) zbliżające się zagrożenie jeszcze zanim dojdzie do jego kontaktu z broniowanym pojazdem. Ze względu na sposób działania oraz efekty, systemy aktywne mogą być podzielone na dwie główne grupy [3-5]:

- systemy softkill – ich celem jest wpłynięcie na systemy elektroniczne nadlatującego pocisku,
- systemy hardkill – ich celem jest fizyczne uszkodzenie bądź zniszczenie zbliżającego się pocisku. Zazwyczaj jest to wykonywane poprzez



zniszczenie struktury pocisku lub fizyczne zakłócenie inicjacji strumienia kumulacyjnego poprzez uszkodzenie wkładki kumulacyjnej.



Rys. 1. Granatnik przeciwpancerny RPG-7 wraz z granatem PG-7 [1]

Fig. 1. RPG-7 anti-tank grenade launcher with PG-7 grenade [1]

W niniejszej pracy zaprezentowano metodykę modelowania głowicy odłamkowej, której celem jest fizyczne niszczenie lub uszkodzanie zbliżającego się pocisku. W tym celu wykorzystana została metoda Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) [6, 7]. Utworzono trójwymiarowy model badanego obiektu, a następnie przeprowadzono analizy numeryczne. W ich wyniku uzyskano maksymalne wartości prędkości odłamków oraz ich rozkład w przestrzeni.

2. MODEL GŁOWICY ODŁAMKOWEJ

Przedmiotem badań jest głowica odłamkowa w formie walca o długości 100 mm i średnicy 80 mm. Model numeryczny głowicy odłamkowej składa się z czterech podstawowych elementów: obudowy zewnętrznej, obudowy wewnętrznej, części odłamkowej oraz ładunku wybuchowego (rys. 2). Ponieważ do modelowania zastosowano metodę ALE wraz z FSI (ang. *fluid-structure interaction*), konieczna była również reprezentacja numeryczna otaczającego układu powietrza [8, 9]. W celu utworzenia modelu numerycznego wykorzystano oprogramowanie Hypermesh.

Część rażąca składa się z żywicy wraz z zatopionymi w niej 1296 stalowymi sferami o średnicy 5 mm. Do dyskretyzacji sfer użyto 54432 bryłowych elementów skończonych. Do opisu ich właściwości wykorzystano biliniowy model materiałowy o parametrach odpowiadających stali. W modelu tym zachowanie się materiału jest definiowane poprzez punkty określające naprężenie i odpowiadające mu odkształcenie (ES, EPS). Przyjmuje się, że punkt startowy odpowiada zerowemu odkształceniu. Zachowanie się materiału pomiędzy kolejnymi punktami jest liniowe. Jako kryterium zniszczenia zastosowano maksymalne odkształcenie przy zniszczeniu – ε_f . Stałe materiałowe użyte w analizach numerycznych zostały zaprezentowane w tabeli 1.



Tabela 1. Stałe materiałowe dla materiału biliniowego

Table 1. Material constants for bilinear material model

Parametr	Jednostka	Wartość
ρ	kg/mm ³	7,89E-6
E	GPa	210
ν	–	0,3
ε_f	–	0,2
EPS1	–	0,02
EPS2	–	0,4
ES1	GPa	0,21
ES2	GPa	0,218

Do opisu żywicy, z racji jej pomijalnej wytrzymałości na obciążenia dynamiczne w porównaniu do innych materiałów, zastosowano równanie Mie–Gruneisena [10, 11]. W ten sam sposób zamodelowano powietrze.

$$p = p_0 + \gamma \rho E_w \quad (1)$$

gdzie:

p – ciśnienie,

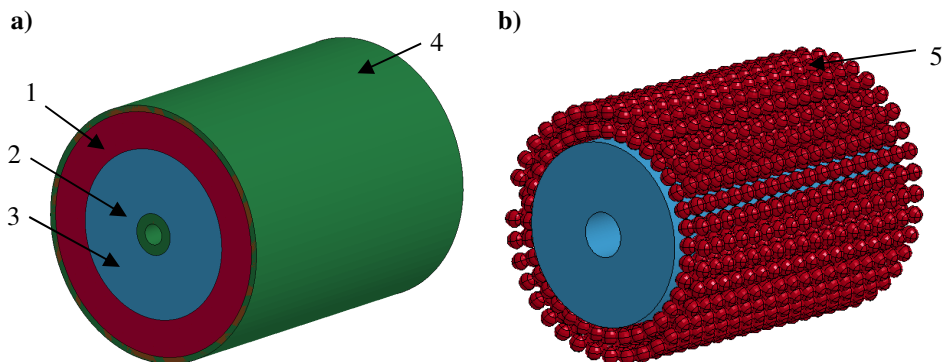
p_0 – ciśnienie początkowe,

γ – współczynnik Gruneisena,

ρ – gęstość,

E_w – energia wewnętrzna.

Odpowiednie parametry materiałowe zostały zaczerpnięte z literatury [12] i wynosiły: $\gamma = 1,4$; $\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$; $p_0 = 1013 \text{ hPa}$.



Rys. 2. Model numeryczny głowicy odłamkowej: a) cały model; 1 – element odłamkowy, 2 – obudowa wewnętrzna, 3 – materiał wybuchowy, 4 – obudowa zewnętrzna, 5 – kulki; b) sferyczne odłamki

Fig. 2. Numerical model of fragmentation warhead: a) whole model; 1 – fragmentation liner, 2 – outer casing, 3 – explosive material, 4 – inner casing, 5 – spheres; b) spherical fragments

Stalowa obudowa (zarówno zewnętrzna, jak i wewnętrzna) została opisana z wykorzystaniem uproszczonego modelu Johnsona–Cooka [13]. Model ten poprawnie opisuje zachowanie się materiałów poddanych dużym szybkościom odkształceń oraz dużym odkształceniom. W tym modelu przejście w stan plastyczny zależy od iloczynu funkcji zależnej od odkształceń i szybkości odkształceń [14]. Wpływ szybkości odkształceń jest taki sam jak w klasycznym modelu Johnsona–Cooka (J–C). Uproszczony schemat nie uwzględnia jednak wpływu efektów termicznych na zachowanie się materiału.

$$\sigma_{flow} = [A + B(\varepsilon^p)^n](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^{p*}) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_{p0} \quad (3)$$

gdzie:

A, B, C, n, m – stałe materiałowe,

$\dot{\varepsilon}_p$ – szybkość odkształceń,

$\dot{\varepsilon}_{p0}$ – referencyjna szybkość odkształceń.

Tabela 2. Stałe materiałowe do modelu J–C dla stali [13]

Table 2. Material constants of J–C steel model [13]

Parametr	Jednostka	Wartość
ρ	kg/mm ³	7,89E-6
E	GPa	210
ν	–	0,3
A	GPa	0,365
B	GPa	0,51
n	–	0,9
C	–	0,0936
ε_f	–	0,3

Do napędzenia warstwy odłamkującej wykorzystano plastyczny materiał wybuchowy C4. Ze względu na swoje cechy fizyczno-chemiczne materiał ten często wykorzystywany jest do napędzania odłamków. Proces detonacji został zamodelowany w przybliżeniu optyki geometrycznej [10, 11], a do opisu równania stanu produktów detonacji wykorzystano równanie JWL (Jones, Wilkins, Lee) [12, 13].

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)^{-R_2 V} + \omega \rho E_w \quad (4)$$

gdzie:

E_w – energia wewnętrzna,

$V = \rho_0 / \rho$,

ρ_0 – gęstość początkowa,

ρ – gęstość produktów detonacji,

A, B, R_1, R_2, ω – parametry materiałowe.

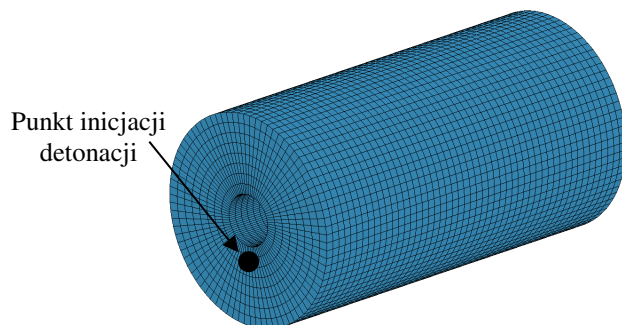


3. ANALIZY NUMERYCZNE

Analizy numeryczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem metody Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) oraz sprzężenia płyn – ciało stałe (ang. *fluid – structure interaction* – FSI) i zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania LS-Dyna. Metoda ALE zakłada, że w ramach jednego modelu numerycznego zostaną wykorzystane dwa sformułowania: Lagrange’a oraz Eulera. W opisie Lagrange’a siatka elementów skończonych ulega odkształceniu wraz z opisywanym obiektem. W sformułowaniu Eulera ciało przemieszcza się na tle siatki elementów skończonych, którą został opisany dany obszar. W prezentowanym modelu głowicy odłamkowej poszczególne elementy odłamkowe modelowane są za pomocą równań mechaniki ośrodków ciągłych w opisie Lagrange’a. Natomiast lepiszcze – tymi samymi równaniami, ale w opisie Eulera.

W analizach numerycznych przyjęto punkt inicjacji detonacji położony na jednym z końców głowicy odłamkowej w miejscu styku materiału wybuchowego z obudową wewnętrzną (rys. 3). Analizowano jedynie pierwszą milisekundę zdarzenia, ponieważ powyżej tego czasu ciśnienie produktów detonacyjnych jest na tyle małe, że praktycznie nie wpływa na zwiększanie prędkości odłamków.

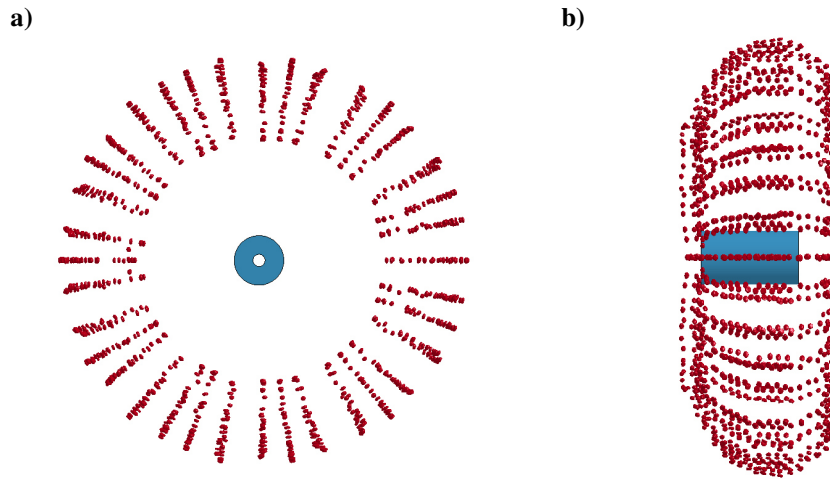
Na rysunkach 4-6 został zaprezentowany rozlot odłamków powstających w wyniku detonacji części odłamkowej głowicy, gdzie kolorem niebieskim oznaczono pierwotne położenie głowicy. Natomiast rysunki 7-9 przedstawiają wykresy prędkości średnich uzyskiwanych przez elementy odłamkowe pochodzące z trzech miejsc głowicy: obydwu końców oraz części środkowej.



Rys. 3. Położenie punktu inicjacji detonacji

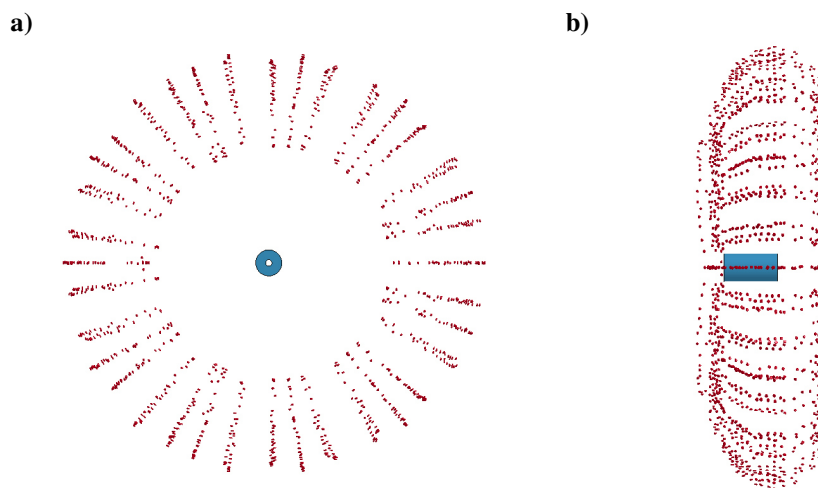
Fig. 3. Position of the detonation initiation point





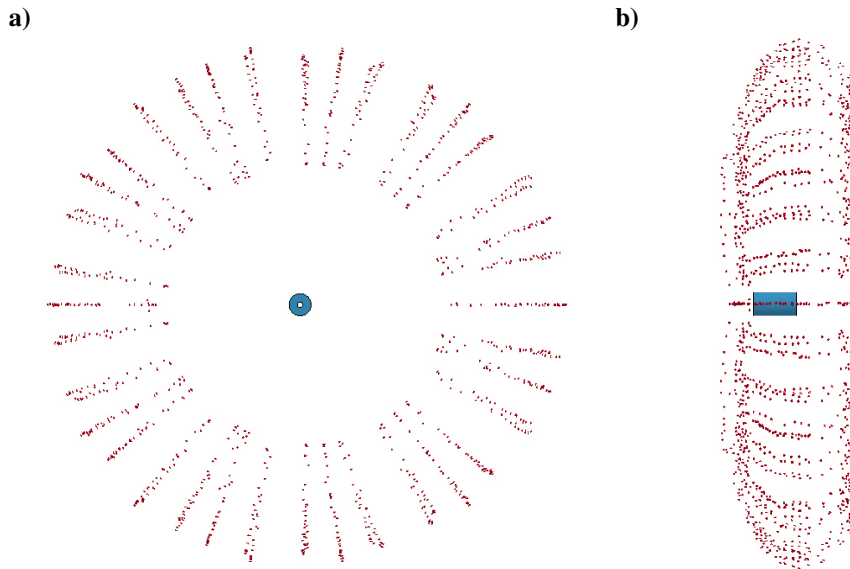
Rys. 4. Rozlot odłamków w czasie $t = 0,25$ ms

Fig. 4. Fragments spatial distribution in time $t = 0,25$ ms



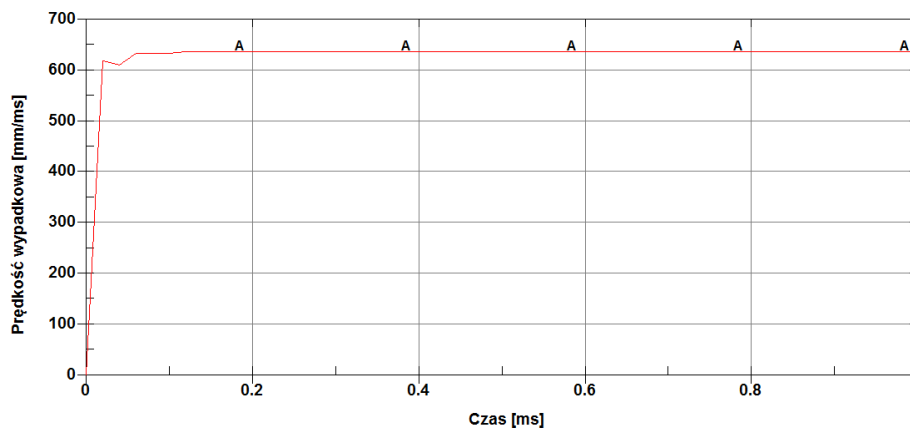
Rys. 5. Rozlot odłamków w czasie $t = 0,5$ ms

Fig. 5. Fragments spatial distribution in time $t = 0,5$ ms



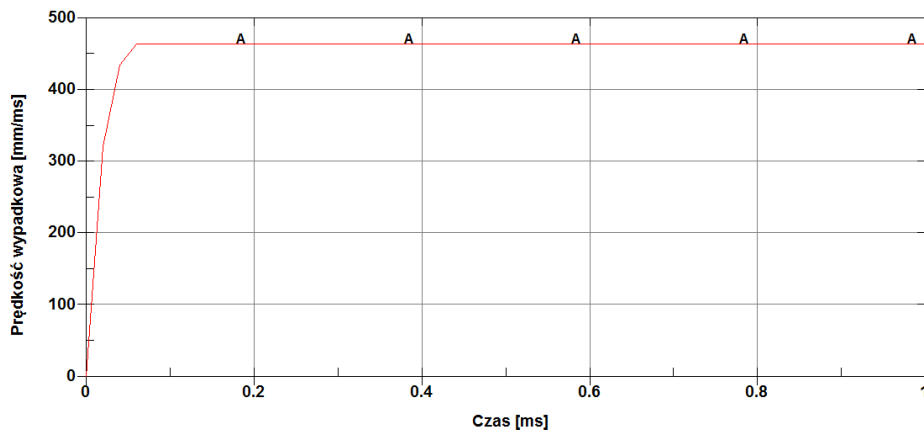
Rys. 6. Rozlot odłamków w czasie $t = 0,75$ ms

Fig. 6. Fragments spatial distribution in time $t = 0,75$ ms



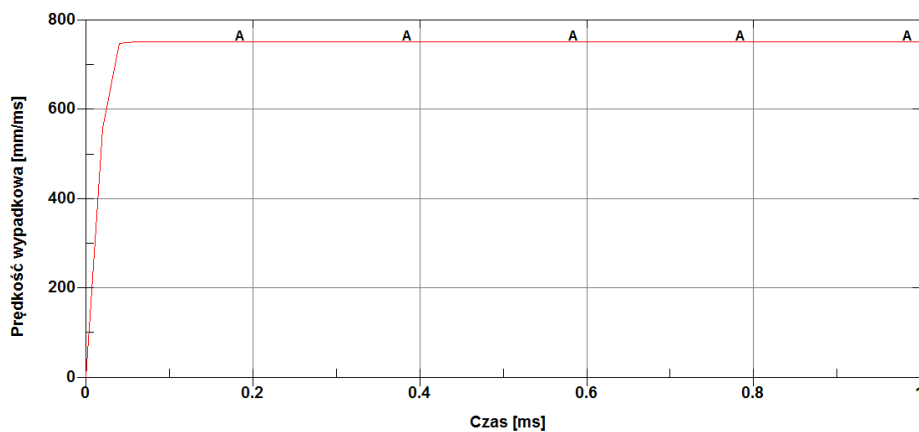
Rys. 7. Wykres prędkości w funkcji czasu dla odłamków pochodzących z lewego końca głowicy odłamkowej (na wysokości miejsca detonacji)

Fig. 7. Resultant velocity versus time graph for the fragments originating from the left side of the fragmentation warhead (side where detonation point is located)



Rys. 8. Wykres prędkości w funkcji czasu dla odłamków pochodzących z prawego końca głowicy odłamkowej

Fig. 8. Resultant velocity versus time graph for the fragments originating from the right side of the fragmentation warhead



Rys. 9. Wykres prędkości w funkcji czasu dla odłamków pochodzących ze środkowej części głowicy odłamkowej

Fig. 9. Resultant velocity versus time graph for the fragments originating from the central part of the fragmentation warhead

Maksymalna prędkość została uzyskana dla odłamków pochodzących ze środkowej części głowicy odłamkowej i wyniosła około 770 mm/ms. Minimalna prędkość, zgodnie z oczekiwaniami, została zaobserwowana dla odłamków położonych najdalej od punktu detonacji i wyniosła około 460 mm/ms, tj. o 44% mniej niż maksymalna wartość.



4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie metody ALE wraz ze sprzężeniem FSI pozwoliło na przeprowadzenie analiz numerycznych tak skomplikowanego zagadnienia, jakim jest analiza rozlotu odłamków powstających w wyniku detonacji głowicy odłamkowej. Analizy takiej można również dokonać z wykorzystaniem tradycyjnych metod mechaniki w przybliżeniu ośrodków ciągłych, jednakże analiza literaturowa wskazuje na mniejszą dokładność takiego podejścia w porównaniu do metody ALE połączonej ze sprzężeniem ciecz – ciało stałe.

Poprawność zaprezentowanych w artykule wyników musi jeszcze zostać poddana procesowi walidacji i weryfikacji w oparciu o badania eksperymentalne.

W dalszym toku prac niezbędne jest określenie wpływu takich czynników, jak położenie punktu detonacji, rodzaj zastosowanego materiału pędnego czy grubość obudowy wewnętrznej wraz z materiałem, z jakiego jest wykonana na działanie głowicy odłamkowej oraz na parametry uzyskiwane przez odłamki.

Artykuł zawiera wyniki pracy współfinansowanej przez NCBiR ze środków na naukę w latach 2013-2016 jako projekt rozwojowy nr DOBR-BIO4/031/13249/2013.

LITERATURA

- [1] <http://world.guns.ru/grenade/rus/rpg-7-e.html/2015>.
- [2] Panowicz Robert, Kamil Sybilski, Roman Gieleta, Przemysław Kupidura, Rafał Bazela, Mariusz Magier. 2011. „Badania eksperymentalne wybranego typu pancerza prętowego”. *Problemy Techniki Uzbrojenia*, tom 40, zeszyt 118, s. 51-56.
- [3] <http://www.defense-update.com/features/du-1-04/soft-kill-west.htm/2015>.
- [4] <http://www.defense-update.com/features/du-1-04/Hard-kill.htm/2015>.
- [5] Vivek R., J. Roopchand. 2012. „Active Protection System for AFV application – Current trends and future requirement – A study report”. *International Journal of Computer Technology and Applications* 3 (4) : 1450-1454.
- [6] Nowak Jacek, Robert Panowicz, Marcin Konarzewski. 2014. „Influence of destructor case type on behaviour of fragments in military vehicles active protection system”. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 21 (1) : 183-187.
- [7] Panowicz Robert, Jacek Nowak, Marcin Konarzewski, Tadeusz Niezgoda. 2015. „Parameter study of directed fragmentation warhead used for combat shaped charges”. *Engineering Transaction* 63 (2) : 181-190.



- [8] Panowicz Robert, Wiesław Barnat, Tadeusz Niezgoda, Leszek Szymańczyk, Julian Grzymkowski. 2012. „Numerical-experimental investigation of squared-based metal pyramids loaded with blast wave from a small explosives charge”. *Acta Mechanica et Automatica* 6 (1) : 49-52.
- [9] Barnat Wiesław, Robert Panowicz, Tadeusz Niezgoda. 2012. „Numerical and experimental comparison of combined multilayer protective panels”. *Acta Mechanica et Automatica* 6 (1) : 13-16.
- [10] Hallquist O. John. 2005. *Ls-Dyna Theory Manual*. Livermore: Livermore Software Technology Corporation.
- [11] Jach Karol i inni. 2001. *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań metodą punktów swobodnych*. Warszawa: PWN.
- [12] Kapila, K. Ashwani, John Bohdan Bdzil, Donald Scott Stewart. 2006. „On the structure and accuracy of programmed burn”. *Combustion Theory and Modelling* 10 (2) : 289-321.
- [13] Bdzil John Bohdan, Donald Scott Stewart, Thomas L. Jackson. 2001. „Program burn algorithms based on detonation shock dynamics: discrete approximations of detonation flows with discontinuous front models”. *Journal of Computational Physics* 174 : 870-902.
- [14] Panowicz Robert, Jacek Nowak, Marcin Konarzewski, Tadeusz Niezgoda. 2013. „Introduction to numerical analysis of directed fragmentation warheads”. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 20 (4) : 319-235.



Numerical Modeling of Fragmentation Warhead Using ALE Feedback

Marcin KONARZEWSKI, Robert PANOWICZ

Abstract. The article presents introduction to numerical simulation of directed fragmentation warheads used for destroying projectiles with shaped charges. There are several methods for numerical modelling of such a phenomenon. One of the most common methods is to use Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method alongside with fluid-structure interaction (FSI). Fragmentation warhead, in the form of 100 mm length cylinder with 80 mm diameter, consists of four main parts: internal and external case, explosive material, and fragmentation liner. Fragmentation liner is built from resin with submerged metallic spheres. After detonation, the liner fragments into many parts. Flight of the debris is characterized by a number of key values such as speed of the debris or their distribution in space. A three-dimensional model of a fragmentation warhead was prepared using Hypermesh software and numerical analyses were performed using LS-Dyna software. As a result of numerical analyses, the maximum velocity of the fragmentation liner and spatial distribution of fragments were determined.

Keywords: mechanics, finite elements method, dynamics, directed fragmentation warhead

