

WSTĘPNA ANALIZA NUMERYCZNA ODDZIAŁYWANIA ODŁAMKA I WYBUCHU IED NA PŁYTĘ STALOWĄ

WIESŁAW BARNAT, ROBERT PANOWICZ, TADEUSZ NIEZGODA,
GRZEGORZ SŁAWIŃSKI

*Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna
e-mail: wbarnat@wat.edu.pl, rpanowicz@wat.edu.pl, tniezgoda@wat.edu.pl, gslawinski@wat.edu.pl*

Streszczenie. W pracy opisano wstępne wyniki symulacji numerycznej zjawiska sprzężonego oddziaływania wybuchu i odłamka na płytę stalową. Kształt odłamka przyjęto na podstawie STANAGu 4569. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) zaimplementowaną w programie MSC Dytran. Obliczenia numeryczne wykonano w opcji *explicit* na wieloprocessorowym klastrze obliczeniowym. Niezbędne do budowy modelu dane materiałowe zaczerpnięto z dostępnej literatury.

1. WSTĘP

Odporność konstrukcji na uderzenie odłamkiem jest szeroko omawiana w wielu artykułach. Współczesne konflikty zbrojne potwierdzają, że rzeczywiste zagrożenia żołnierzy na obecnych teatrach działań związane są w dużym stopniu z oddziaływaniem improwizowanych ładunków wybuchowych, tzw. IEDs ze szczególnym uwzględnieniem ich odłamków.

W pracy opisano wyniki symulacji numerycznej zjawiska sprzężonego oddziaływania wybuchu i odłamka na płytę stalową. Kształt odłamka przyjęto na podstawie normy STANAG 4569. Odłamki testowe wykonywane są ze stalowych kulek o masie 0,4 g. Ładunek wybuchowy oddziaływający na płytę posiadał masę 0,3 kg.

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano metodę elementów skończonych zaimplementowaną w programie MSC Dytran. Obliczenia numeryczne wykonano w opcji *explicit*. Niezbędne dane materiałowe zaczerpnięto z dostępnej literatury oraz na podstawie eksperymentów wykonanych w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej WAT.

Zjawisko sprzężone oddziaływania wybuchu i odłamka na przeszkodę jest dość skomplikowanym zagadnieniem. Problem natury fizycznej polega na tym, że pierwszy (przed kulką) do przeszkody dociera impuls ciśnienia (poruszający się w powietrzu z prędkością większa od prędkości dźwięku). Impuls ten powoduje odkształcenia zachodzące z dużymi prędkościami. W wyniku dużych prędkości odkształcenia zmienia się charakterystyka materiału (ze względu na dynamiczne wzmocnienie). W takim przypadku odłamek uderza w całkiem inny materiał niż założony wstępnie. Z tego względu istnieje konieczność użycia równań konstytutywnych opisujących materiał, które uwzględniłyby wzmocnienie dynamiczne. Do opisu materiału blachy zastosowano model wzmocnienia kinematycznego Johnsona Cooka. Model Johnson-Cook'a (YLDJC) [1] opisuje granicę plastyczności.

Stosowany jest przy dużych prędkościach odkształcenia. Naprężenie uplastyczniające uzależnione jest w tym równaniu od odkształcenia, prędkości odkształcenia oraz temperatury.

σ - granica plastyczności

ε_p - intensywność deformacji plastycznej (odkształcenia)

$\dot{\varepsilon}$ - szybkość zmian intensywności deformacji plastycznej (prędkość odkształceń)

$\dot{\varepsilon}_0$ - prędkość odkształceń (odniesienia)

T - temperatura

T_r - temperatura pokojowa

T_m - temperatura topnienia (melt temperature)

A, B, n, C, m - stałe

$$\sigma_y = \left(A + \varepsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - T^{*m} \right) \quad (1.1)$$

$$T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \quad (1.2)$$

Warunki dla elementów eulerowskich modelujące ładunek określały gęstość, energię wewnętrzną oraz kształt. Dla materiału wybuchowego przyjęto gęstość 1600 kg/m^3 , gęstość energii wewnętrznej $4,2 \text{ MJ/kg}$ oraz objętość odpowiadającą masie 300 g ładunku TNT.

Obszar eulerowski był prostopadłością. Powietrze było opisane równaniem stanu [5]

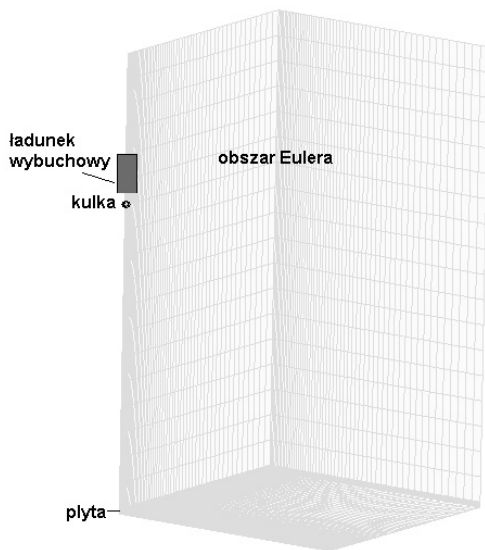
$$P = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu) E_0, \quad (1.3)$$

gdzie: $c_0 = 5,4855E-5$; $c_1 = 0,0002$; $c_2 = -4,6904E-6$; $c_3 = 1,3457E-7$; $c_4 = 0,2057$; $c_5 = 0,0015$; $c_6 = -2,822E-5$; $E_0 = 0,000271 \text{ GPa}$. Gęstość powietrza $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

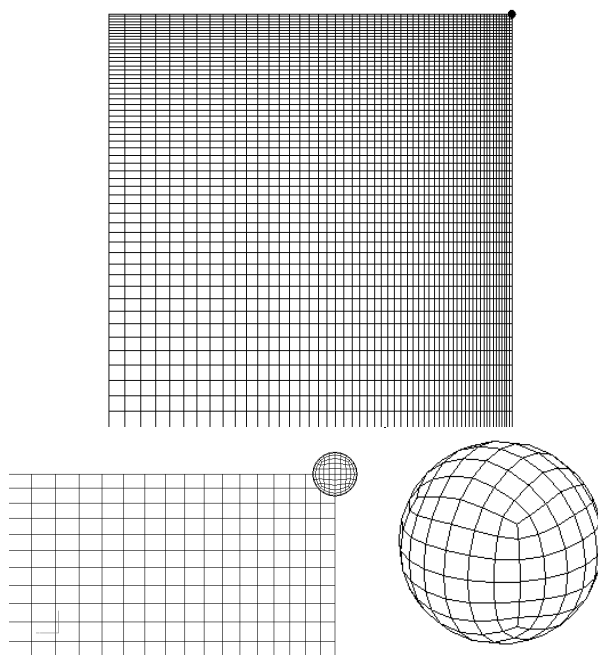
2. MODEL NUMERYCZNY UKŁADU SPRZĘŻONEGO

Jak już wspomniano, analizę numeryczną przeprowadzono za pomocą oprogramowania MSC Dytran z wykorzystaniem całkowania jawnego po czasie - explicite. Analizowany model, przedstawiony na rys. 1, składał się z obszaru Eulera opisującego powietrze oraz płyty stalowej o wymiarach $0,5 \times 0,5 \text{ m}$ i grubości 5 mm . Płytę wykonaną ze stali St3S opisano, wykorzystując model materiałowy Johnsona-Cooka z kinematycznym modelem wzmocnienia materiału uwzględniającego zmianę wartości granicy plastyczności.

Walcowy ładunek wybuchowy o masie $0,3 \text{ kg}$ umieszczono w odległości $0,3 \text{ m}$ od płyty. Materiał wybuchowy miał odpowiednio dobrany kształt i wartości [3]. Kulka opisująca odłamek poruszała się z prędkością początkową 1200 m/s i również znajdowała się w odległości 3 m od badanej płyty. Do połączenia obszarów Eulera i Lagrange'a wykorzystano sprzężenie ALE. Schemat umieszczenia kulki oraz dyskretyzacji płyty i kulki przedstawiono na rys.2.



Rys. 1. Schemat modelu numerycznego



Rys. 2. Dyskretyzacja płyty i kulki

3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

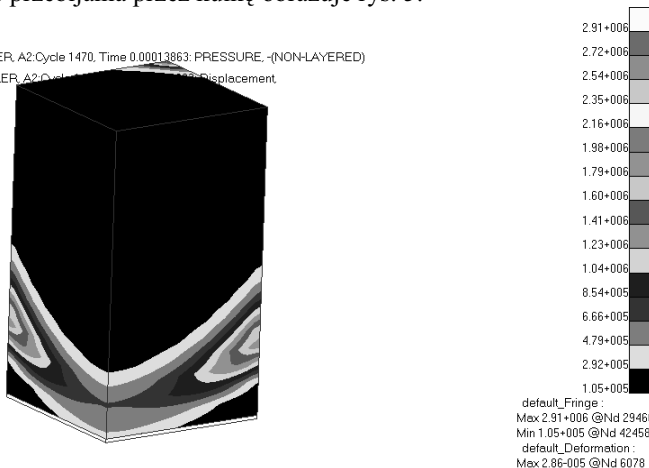
W wyniku analizy numerycznej opisanego układu stwierdzono, że nastąpiło przebicie (penetracja) badanej płyty. Interesujące jest to, że w pierwszej kolejności do płyty dotarła fala ciśnienia (dla chwili czasu $1,38E-4$), a następnie odłamek. Rozprzestrzenianie się fali ciśnienia dla chwili czasu $1,38E-4$ przedstawiono na rys. 3.

Innym istotnym parametrem jest zmiana prędkości. Dla chwili czasu około $0,00025$ s nastąpiła zmiana prędkości kulki z 1240 m/s na 630 m/s. Zjawisko wytracenia prędkości nastąpiło w wyniku przebijania płyty. Zmianę prędkości kulki przedstawiono na rys. 4. Odształcenie płyty w trakcie przebijania przez kulkę obrazuje rys. 5.

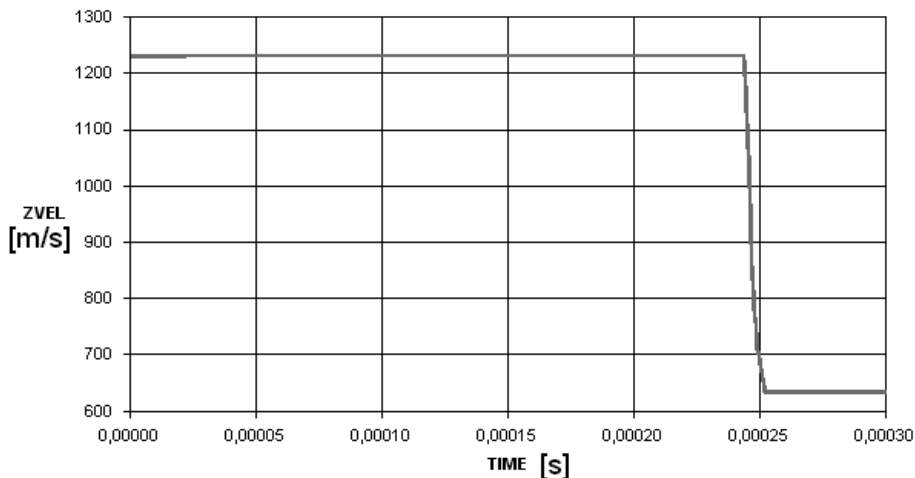
MSC.Patran 12.0044 07-Feb-11 21:36:36

Fringe1_ODLAMEK3D_KULA_GESTY_JC1_4MM_EULER_A2:Cycle 1470, Time 0.00013863: PRESSURE, -(NON-LAYERED)

Deform:1_ODLAMEK3D_KULA_GESTY_JC1_4MM_EULER_A2:Cycle 1470, Time 0.00013863: Displacement

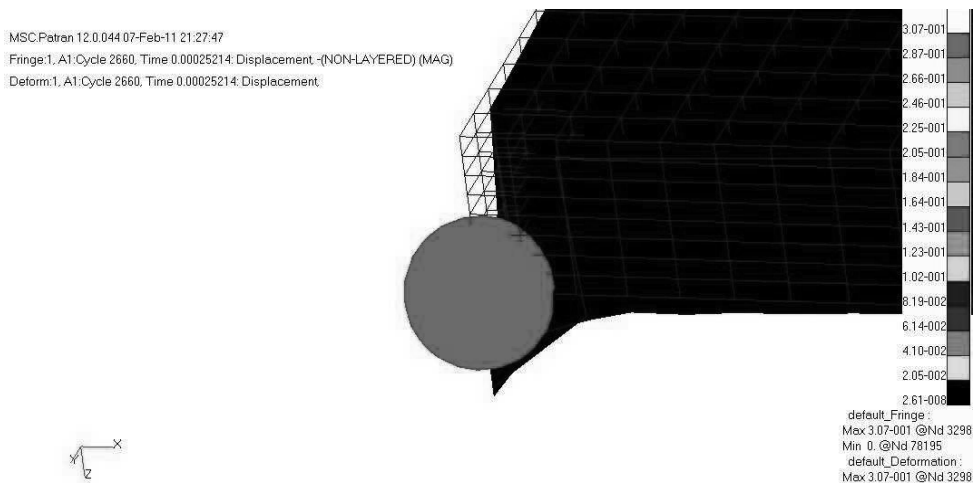


Rys. 3. Rozchodzenie się fali ciśnienia (czas 0.000138 s)

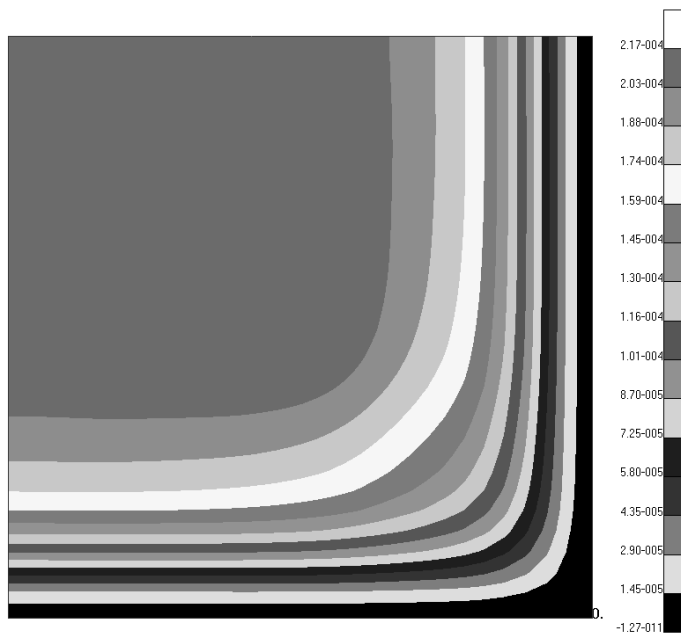


Rys. 4. Zmiana prędkości kulki symulującej odłamek

Zgodnie z przewidywaniami i badaniami literaturowymi, przedstawiona płyta wykonana ze stali St3S (o granicy plastyczności $Re = 220 \text{ MPa}$ [4]) nie była w stanie zatrzymać kulki. W wyniku oddziaływania kulki (symulującej odłamek) na płytę nastąpiła penetracja płyty. Na rys. 6 przedstawiono deformację płyty wynikłą z oddziaływania wybuchu. Warto zaznaczyć, iż impuls ciśnienia dotarł do płyty przed kulką. W wyniku oddziaływania tego impulsu ciśnienia płyta odkształciła się trwale o $2,17E-4 \text{ m}$ w chwili czasu $t = 0,000238 \text{ s}$. Powstały impuls ciśnienia pochodził od detonacji około $0,3 \text{ kg}$ trotylu. Zmianę prędkości wężła znajdującego się na płycie przedstawia rys. 7.

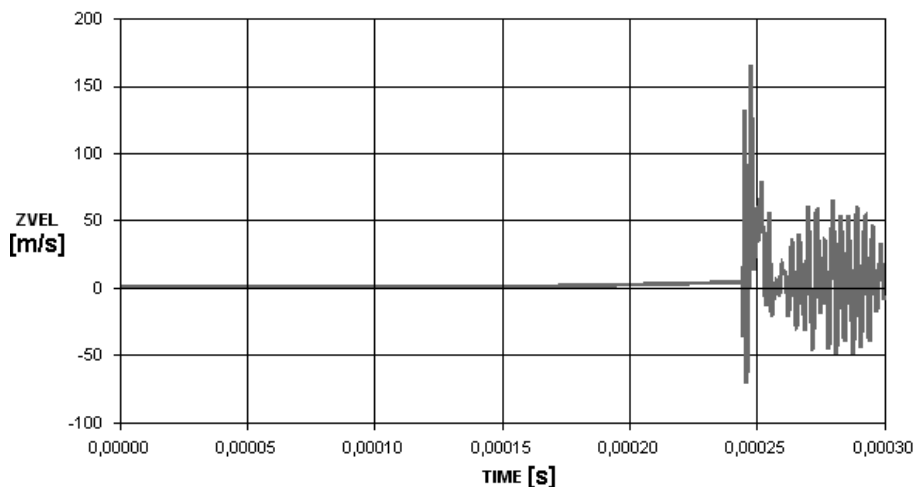


Rys. 5. Przykład przebicia płyty przez odłamek

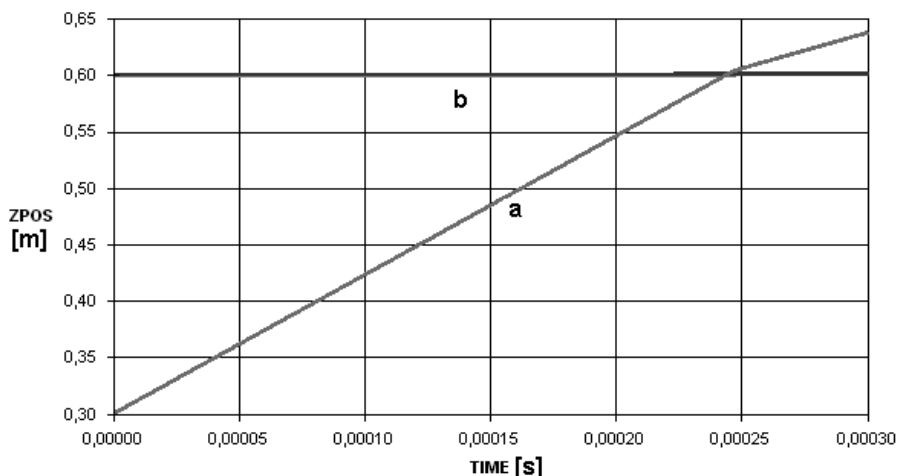


Rys. 6. Deformacja płyty stalowej [m] dla czasu $0,000238 \text{ s}$, pod wpływem impulsu ciśnienia

Dla chwili czasu 0,000225 s nastąpił gwałtowny wzrost prędkości węzła znajdującego się na płycie. Jest to spowodowane uderzeniem kulki. Następnie węzeł na płycie drgał. Rys. 8 przedstawia przemieszczenie punktów charakterystycznych znajdujących się na kulce (a) i płycie (b).



Rys 7. Wykres zmiany prędkości płyty



Rys. 8. Przemieszczenie punktów charakterystycznych

Na wykresie widać także jak w pierwszej fazie oddziaływania układu trotyl – odłamek na płytę następuje przemieszczenie węzłów płyty dla czasu 0,000225 s (krzywa b). Przemieszczenie to jest spowodowane oddziaływaniem impulsu ciśnienia na płytę. W chwili czasu 0,00024 s nastąpiło uderzenie kulki w płytę. Zmianą położenia kulki przedstawia krzywa a. W następnych chwilach czasowych analizy następuje penetracja płyty stalowej przez kulkę. Przecięcie dwóch krzywych (a i b na rys. 8) wyraźnie potwierdza przebicie płyty przez kulkę.

4. ZAKOŃCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki prac nad zjawiskiem sprzężonym opisującym działanie kulki (odłamka IED) na płytę stalową. Badania te mają na celu zwiększenie poziomu ochrony żołnierzy przed IED powszechnie stosowanymi w konfliktach asymetrycznych. Opisane zjawisko ma złożony charakter. Dotychczasowe prace numeryczne traktowały je jako oddzielne zagadnienia. Takie podejście jest łatwiejsze, niemniej jednak powoduje pewnego rodzaju zafałszowanie wyników. Nieścisłość spowodowana jest nieuwzględnieniem zmiany granicy plastyczności pod wpływem dużej prędkości odkształcenia

Eksperymentalne połączenie oddziaływania wybuchu i odłamka będzie kolejnym wyzwaniem w prowadzonych badaniach odłamkoodporności. Będzie to także walidacja metody rozwiązania przedstawionego problemu.

LITERATURA

1. MSC Dytran Theory Manual, MSC.Software C.O. 2005.
2. Hallquist JO.: LS-Dyna. Theoretical manual. California Livermore Software Technology Corporation 1998.
3. Barnat W.: (2010), Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu. Warszawa: BEL Studio, 2010.
4. Poradnik mechanika. Warszawa: WNT, 1982.
5. Włodarczyk E.: Wstęp do mechaniki wybuchu. Warszawa: Wyd. Nauk. PWN, 1994.

NUMERICAL ANALYSIS OF IED DETONATION EFFECT ON A STEEL PLATE

Summary. Impact resistance of material structure and standardizations issues, concerning armoured objects, are discussed in many articles. Recent military conflicts show that the Improvised Explosive Devices are the most dangerous threats to the soldiers. In this article an analysis of simultaneous impact of steel ball and blast wave on an armour plate is presented. The simulation was conducted using FE method implemented in MSC Dytran. As a result, stress maps, displacement and energy graphs were obtained. The data was later used to adjust the numerical model. Such an analysis is important in the modern armour design process as it allows investigation in many cases without excessive costs.

