

Numeryczna ocena stosowalności i dokładności zależności Gurneya w przypadku układów o skończonych wymiarach

Robert Panowicz, Michał Trypolin

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: robert.panowicz@wat.edu.pl, michal.trypolin@wat.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono ocenę stosowalności i dokładności zależności Gurneya w przypadku układów o skończonych wymiarach dla różnych rodzajów warstw inercyjnych. Rozważano zarówno lite warstwy inercyjne jak i składające się z odłamków. Ocena została dokonana na podstawie analiz numerycznych z których wynika, że na uzyskane prędkości warstw inercyjnych znaczący wpływ ma wielkość rozpatrywanego układu (kilkadziesiąt procent). Natomiast minimalny wpływ ma rodzaj warstwy.

WSTĘP

Właściwości materiałów wybuchowych opisywane są przez szereg parametrów (gęstość, ciepło wybuchu, prędkość detonacji, parametry w punkcie Chapmana – Jougueta itd.) charakteryzujących ich zachowanie podczas procesu detonacji. Natomiast do opisu pracy wykonanej przez detonację materiałów wybuchowych będącej skutkiem zamiany energii wewnętrznej materiału i rozprężania się produktów detonacji wykorzystuje się energię, czy też prędkość Gurney'a [1]. Pojęcie energii Gurney'a wykorzystuje się również w badaniach eksperymentalnych do określenia równania stanu materiału wybuchowego [2].

W oparciu o prawo zachowania energii układu Gurney w 1943 r. określił maksymalną prędkość warstwy materiału inercyjnego napędzanego przez produkty detonacji w kilku przypadkach [1]. Prędkość ta w przypadku dwuwymiarowego, symetrycznego układu składającego się z dwóch identycznych płyt inercyjnych pomiędzy, którymi umieszczony jest materiał wybuchowy wyraża się zależnością:

$$\frac{V}{\sqrt{2E}} = \left(2 \frac{M}{C} + \frac{1}{3}\right)^{-1/2}$$

gdzie: V - prędkość warstwy inercyjnej, $\sqrt{2E}$ - energia Gurney'a rozważanego materiału wybuchowego, M - masa jednej warstwy inercyjnej w odniesieniu do jednostki powierzchni, C - masa ładunku wybuchowego w odniesieniu do jednostki powierzchni.

Natomiast w przypadku układu, w którym masa jednej płyty inercyjnej jest znacząco większa od masy drugiej płyty równanie to przyjmuje postać:

$$\frac{V}{\sqrt{2E}} = \left(\frac{M}{C} + \frac{1}{3}\right)^{-1/2}$$

Celem niniejszej pracy jest ocena stosowalności i dokładności przedstawionych zależności Gurneya w przypadku rozważania układów o skończonych wymiarach. W pracy przedstawiono wyniki analiz dotyczące zarówno litych warstw inercyjnych jak i warstw inercyjnych składających się z odłamków. Ocena została dokonana na podstawie porównania wyników analiz numerycznych z wykorzystaniem jawnej implementacji metody elementów skończonych.

MODEL NUMERYCZNY

Rozpatrywany układ składał się z powietrza, materiału wybuchowego i dwóch stalowych płyt inercyjnych. Proces detonacji opisano za pomocą przybliżenia optyki detonacyjnej [3, 4]. Metoda ta zakłada sferyczny kształt frontu fali detonacyjnej, który można określić za pomocą prędkość detonacji materiału wybuchowego oraz miejsce inicjacji detonacji. W metodzie tej zakłada się, że na froncie fali detonacyjnej produkty detonacji charakteryzującymi się parametrami w punkcie Chapmana – Jouguet. Natomiast zachowanie się produktów detonacji za frontem fali opisuje równanie stanu JWL (Jones, Wilkins, Lee) [3, 5]:

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

gdzie: p - ciśnienie, E - energia wewnętrzna właściwa, $V = \rho_0 / \rho$, ρ_0 - gęstość początkowa, ρ - gęstość produktów detonacji, A , B , R_1 , R_2 , ω - stałe.

Właściwości powietrza opisano za pomocą równania Mie-Gruneisena[5]:

$$p = p_0 + \gamma \rho E$$

gdzie: p_0 - ciśnienie początkowe, γ - współczynnik Gruneisena,.

W prowadzonych pracach dla obszaru powietrza przyjęto następujące parametry ośrodka: $\gamma = 1,4$; $\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$; $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ [5].

Do opisu metalowej płyty o wymiarach 20 cm na 20 cm i grubości 5mm wykorzystano model Johnsona - Cooka [4]. Użyto parametrów dla stali stopowej AISI 4340 zaczerpniętych z literatury [7].

Analizy numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem jawnej implementacji metody elementów skończonych [4], natomiast model przygotowano przy pomocy programu Altair Hypermesh [6]. W analizach wykorzystano podejście ALE oraz możliwość sprzężenia pomiędzy ośrodkami opisywanymi równaniami Lagrange'a oraz Eulera.

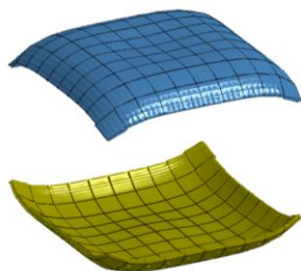
WYNIKI ANALIZ

W analizach numerycznych założono symetryczne, centralne pobudzenie materiału wybuchowego. Analizowano przebieg napędzania warstw inercyjnych. Przyjęto, że maksymalne, ustabilizowane prędkości odpowiadać będą prędkościom Gurney'a. rozpędzonych płyt w czasie, z którego wzięte zostały wartości maksymalne po ustabilizowaniu się prędkości.

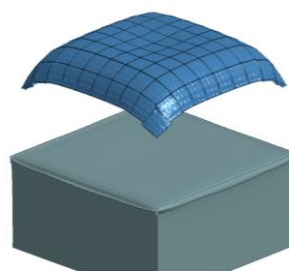
W tabeli 1 przedstawiono wyniki analiz numerycznych dla dwóch opisanych wcześniej przypadków, dla litej warstwy inercyjnej oraz składającej się z odłamków o wymiarze 2 cm na 2 cm, a na rysunku 1 i 2 napędzanie warstw inercyjnych dla wybranego typu warstwy inercyjnej.

Tabela 1. Wyniki analiz numerycznych

Wariant	Prędkość Gurney'a – zależności analityczne	Prędkość Gurney'a dla litych warstw inercyjnych, MES	Względna różnica prędkości	Prędkość Gurney'a dla odłamkowych warstw inercyjnych, MES	Względna różnica prędkości
Model I	778,5 m/s	637,9 m/s	18,1%	653,9 m/s	16%
Model II	1082,7 m/s	761 m/s	29,7%	787,2 m/s	27,3%



Rys. 1. Model I - napędzanie odłamkowych warstw inercyjnych w układzie symetrycznym



Rys. 2. Model II - napędzanie odłamkowej warstwy inercyjnej w układzie gdy masa drugiej, litej warstwy inercyjnej jest znacząco większa

WNIOSKI

Zauważono znaczne różnice pomiędzy wartościami obliczonymi z zależności Gurney'a, a wartościami uzyskanymi na drodze eksperymentu numerycznego, w przypadku warstw o skończonych wymiarach. Różnica wynika zarówno z przyjętego, modelu numerycznego o skończonych rozmiarach jak i z przyjęcia rzeczywistych właściwości mechanicznych warstw inercyjnych. Nie zaobserwowano z kolei znacznych różnic wynikających z zastosowanego rodzaju warstwy inercyjnej (model I oraz II). Błędy względne w obu przypadkach mają podobne wartości

Artykuł finansowany za środków MNiSW, Praca Badawcza Statutowa nr 23-937.

Literatura

- [1] Gurney R.W., The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Grenades, Ballistics Re-search Laboratories Report 405, 1943.
- [2] Trzciniński A. Waldemar, Cudziło Stanisław, Szymańczyk Leszek. 2001. Determination of the detonation pressure from a water test. Engineering Transactions 49(4) : 443-458.
- [3] K. Jach, R. Panowicz i inni, *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 2001.
- [4] J. O. Hallquist, *Ls-Dyna Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018
- [5] Włodarczyk E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [6] Altair Hypermesh, <https://www.altairhyper-works.com/product/HyperMesh>, 2018
- [7] Wuertemberger, Luke & Palazotto, Anthony. (2016). Evaluation of Flow and Failure Properties of Treated 4130 Steel. Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2. 10.1007/s40870-016-0059-1.