

Techniki komputerowe w badaniach nad poprawą ochrony balistycznej

Andrzej Morka¹

¹Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: andrzej.morka@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Praca dotyczy kwestii stosowania technik komputerowych w badaniach nad poprawą ochrony balistycznej. Przedstawiono krótki opis zagadnienia ochrony balistycznej. Dokonano przeglądu metod poprawy odporności balistycznej. Następnie scharakteryzowano zjawiska związane z odpornością balistyczną. W kolejnej części przybliżono znane metody modelowania numerycznego problemów związanych z badaniem odporności balistycznej. W ostatnim punkcie przedstawiono autorską implementację metody FVPM wraz z przykładowym rozwiązaniem zagadnienia Riemanna.

SŁOWA KLUCZOWE: odporność balistyczna, penetracja, perforacja, MES, FVPM

1. Opis zagadnienia ochrony balistycznej

Termin ochrona balistyczna obejmuje szeroki zakres zagadnień z obszaru fizyki i inżynierii mechanicznej. Mieszczą się w nim problemy ochrony ciała ludzkiego przed skutkami uderzenia pocisków pistoletowych i karabinowych, analiza odporności pojazdów i konstrukcji na ostrzał pociskami przeciwpancernymi (AP) i odłamki, ale również ochrona satelitów i instalacji kosmicznych przed mikrometeoritami, a kończąc na minimalizacji skutków uderzenia asteroid i komet w Ziemię. Zespół efektów fizycznych i zjawisk towarzyszących oddziaływaniu pocisku/impaktora i elementów tworzących konstrukcje ochronną nosi nazwę balistyki końcowej (ang. terminal ballistic).

2. Metody poprawy odporności balistycznej

Generalnie poprawa zdolności do ochrony balistycznej może być realizowana na dwa sposoby. Pierwszy z nich polega na stosowaniu zaawansowanych technik inżynierii materiałowej do wytworzenia nowych materiałów o unikalnych i zaprogramowanych właściwościach. Najczęściej są to struktury kompozytowe (CMC ang. Ceramic Matrix Composite, MMC ang. Metal Matrix Composite) lub o cechach nanostrukturalnych (nanostale, CNT ang. Carbon NanoTube). W drugim przypadku poszukuje się lepszych rozwiązań konstrukcyjnych bazując na dostępnych już materiałach. W grupie tej znajdują się: stal wysokiej jakości, stopy aluminium i tytanu, materiały ceramiczne Al_2O_3 i SiC. Szeroko stosowane są również materiały tekstylne zbudowane na bazie włókien aramidowych (Kevlar, Twaron) czy polietylenowych (Dyneema, Spectra). Badania w tym zakresie koncentrują się na doborze struktury warstwowej lub przestrzennej poszczególnych komponentów formujących panel ochronny.

3. Charakterystyka zjawisk związanych z odpornością balistyczną

Problem penetracji/perforacji panelu ochronnego przez konkretny rodzaj impaktora charakteryzuje się występowaniem specyficznych zjawisk i efektów fizycznych. Jednakże można wskazać wiele cech wspólnych dla tej grupy zagadnień.

W zasadzie we wszystkich przypadkach mówimy o zjawisku dynamicznym, szybkościennym o skali

czasowej rzędu mikrosekund. W tej sytuacji model procesu adiabatyicznego jest w pełni uzasadniony.

Gwałtowność obciążeń powoduje osiąganie dużych lokalnych szybkości odkształceń (rzędu 10^3 - 10^6 1/s) oraz znacznego przyrostu temperatury. Prowadzi to do potrzeby uwzględniania wrażliwości badanych materiałów na szybkość odkształceń i zmiany temperatury.

Kolejną konsekwencją impulsowego charakteru zjawiska jest duży udział mechanizmu falowego (fale uderzeniowe, sprężyste, plastyczne) w transmisji energii wewnątrz układu fizycznego. Zatem konieczne może być uwzględnienie specyficznych cech kompresji ośrodka poprzez wprowadzenie odpowiedniego równania stanu (wpływ gęstości i energii wewnętrznej na ciśnienie).

Największym wyzwaniem dla metod modelowania komputerowego zjawisk penetracji/perforacji jest właściwy opis problemu powstawania i rozwoju uszkodzeń, które mogą prowadzić do całkowitego zniszczenia materiału w obszarach lokalnego oddziaływania impaktora oraz w strefie odłamu.

4. Metody modelowania numerycznego problemów związanych z badaniem odporności balistycznej

Modelowanie komputerowe zagadnień zderzeń z dużymi prędkościami, które prowadzą do penetracji/perforacji początkiem sięga narodzin metod numerycznych oraz ich praktycznej implementacji. Na całym świecie w tej kwestii dominują instytucje prowadzące badania na rzecz wojska (np. ARL, AFRL, DARPA) oraz eksploracji kosmosu (np. NASA, ESA). Wykorzystują one własne autorskie kody (np. EPIC), ale również powszechnie dostępne komercyjne implementacje wielu metod i algorytmów (np. LS-Dyna, Autodyn, Dytran).

Generalnie do modelowania komputerowego zagadnień oceny oraz poprawy odporności balistycznej stosuje się metody należące do grupy metod siatkowych oraz bezsiatkowych. W pierwszym przypadku można wskazać wyspecjalizowane implementacje Metody Elementów Skończonych (MES), które zawarto w systemach obliczeniowych [1] (np. LS-Dyna, Autodyn). Do drugiej grupy należą metody EFG (ang. Element Free Galerkin), SPH (ang. Smooth Particle Hydrodynamics), MMALE (ang. Multi Material Arbitrary Lagrangian Eulerian) w wersjach implementacji komercyjnie dostępnych oraz autorski kod FPM (ang. Free Particle Method) zaproponowany przez Jacha w [2].

5. Implementacja metody FVPM

Metody analizy numerycznej zagadnień odporności balistycznej wymienione wyżej nie spełniają wszystkich oczekiwań w szczególności w kwestii dostępu do źródeł kodu oraz swobodnego rozwoju systemów w zakresie implementacji modeli konstytutywnych zaawansowanych materiałów. W związku z tym autor podjął prace w kierunku budowy autorskiego kodu będącego implementacją metody FVPM (ang. Finite Volume Particle Method), czyli metody cząstek o skończonej objętości [3]. Jest to metoda należąca do grupy metod bezsiatkowych będąca uogólnieniem znanej z analiz CFD siatkowej metody FVM (ang. Finite Volume Method) – metody objętości skończonych. Sformułowano następujący zbiór założeń ogólnych:

- opis geometrii problemu: 3D,
- typowa wielkość modelu: 1 milion cząstek @ 500k cykli czasowych,
- zgodność we/wy z systemem LS-Dyna,
- ujęcie problemu: Lagrange'a, Eulera, ALE,
- podstawowe modele konstytutywne stosowane do analiz penetracji/perforacji,
- podstawowe rodzaje warunków brzegowych,
- kodowanie w języku Fortran 90/95 dla systemu Linux,
- kod równoległy skalowany liniowo (!),
- narzędzia o licencji otwartej GPL.

Punkt wyjścia dla metody stanowi układ równań mechaniki ośrodków ciągłych zapisany dla ujęcia ALE w formie zachowawczej:

$$\rho_{,t} + [\rho(v_k - w_k)]_k = 0, \quad (1.1)$$

$$(\rho v_i)_{,t} + [(\rho v_i)(v_k - w_k) - \sigma_{ki}]_k = \rho f_i, \quad (1.2)$$

$$E_{,t} + [E(v_k - w_k) - \sigma_{ki} v_i]_k = \rho f_i v_i, \quad (1.3)$$

gdzie

$$\sigma_{ki} = -p + s_{ki}, \quad (1.4)$$

$$E = \rho(e + v_k v_k / 2). \quad (1.5)$$

Sformułowany układ równań zostaje domknięty poprzez model konstytutywny materiału określający jego specyficzne właściwości. W praktyce sprowadza się on do zdefiniowania składowych tensora naprężeń, σ_{ij} , a więc poprzez relację (1.4) do określenia równania stanu pozwalającego znaleźć wartość ciśnienia, $p(\rho, e)$, jako funkcji zmiennych stanu, ρ , e oraz składowych dewiatora tensora naprężeń, s_{ij} . Przedstawiony układ równań zawiera 14 niewiadomych. W formie macierzowej:

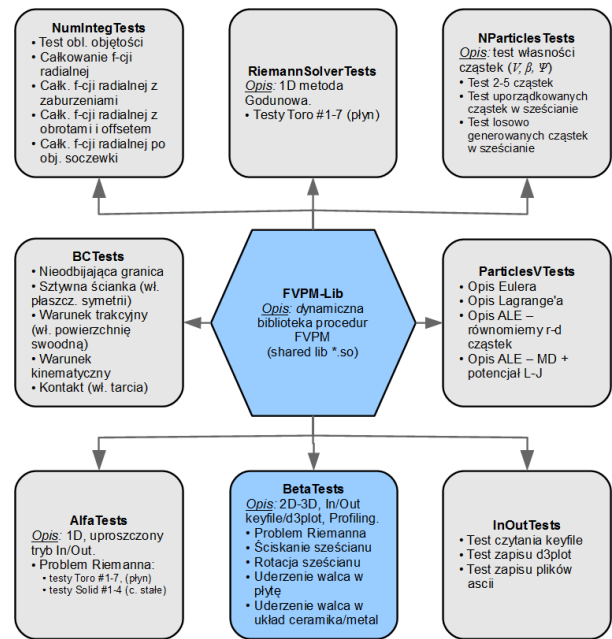
$$\mathbf{U}_{,t} + \nabla \mathbf{G}(\mathbf{U}, \mathbf{w}) = \mathbf{M}, \quad (1.6)$$

gdzie uogólniony strumień Lagrange'a:

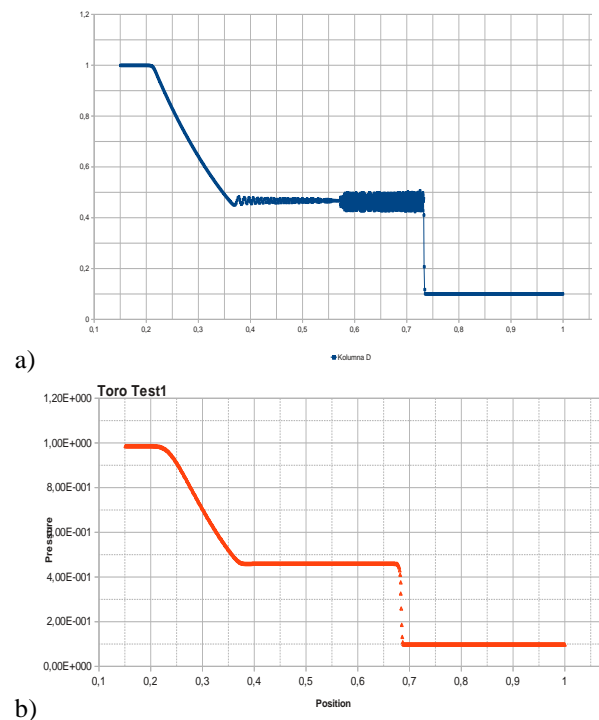
$$\mathbf{G}(\mathbf{U}, \mathbf{w}) = \mathbf{F}(\mathbf{U}) - \mathbf{U} \otimes \mathbf{w}. \quad (1.7)$$

Schemat zarządzania projektem zamieszczono na rys. 1, gdzie przedstawiono podstawowe bloki funkcjonalne oraz procedury testowe. Przykładowe rozwiązanie zagadnienia Riemanna dla przypadku 1D w postaci profilu ciśnienia

pokazano na rys. 2 jednocześnie odnosząc je do rezultatu uzyskanego w LS-Dyna.



Rys. 1. Schemat zarządzania projektem



Rys. 2. Rozwiązanie zagadnienia Riemanna (a) LS-Dyna, (b) FVPM

Literatura

- [1] Hallquist J. O., *LS-DYNA. Keyword User's Manual*, V971 R4 Beta, LSTC Co., CA, USA 2009.
- [2] Jach K. i inni: *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
- [3] Hietel D., Steiner K., Struckmeier J., *A Finite-Volume Particle Method for Compressible Flows*, Math. Models Methods Appl. Sci., 10, No.9, 1363-1382 (2000).