



Wpływ uproszczeń w badaniach symulacyjnych zderzeń pocisków z tarczą na dokładność wyników

SEBASTIAN STANISŁAWEK, ANDRZEJ MORKA,
TADEUSZ NIEZGODA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
sstanislawek@wat.edu.pl

Streszczenie. Artykuł omawia zagadnienie możliwości stosowania określonych uproszczeń w symulacji komputerowej. Stanowi on niezbędny warsztat dla każdego badacza stosującego opisane sposoby modelowania. Weryfikacja uproszczeń numerycznych polegała na przeprowadzeniu trzech testów zderzeniowych dla rdzenia pocisku $7,62 \times 51$ WC oraz czwartej symulacji polegającej na porównaniu efektów uderzenia pełnego modelu pocisku oraz jedynie jego rdzenia. Opracowane modele tarczy symulowały materiał stalowy z wprowadzonymi typowymi parametrami, natomiast pocisk był opisany modelem Johnsona-Cooka. Prędkość początkowa pocisku wynosiła 854 m/s, zaś tarcza pozostawała nieruchoma i zamocowana w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku lotu.

Opisane badania potwierdzają możliwość stosowania modelu materiału nieodkształcalnego oraz sprężystego do uproszczonego opisu ciał materialnych. Pozwala to na uproszczenie i przyspieszenie obliczeń numerycznych w sytuacjach, gdzie materiały zderzających się ciał mają znacznie różne właściwości mechaniczne. Z dużą ostrożnością powinno się odnosić do odczytywania sił rejestrowanych na ścianie nieodkształcalnej. Analiza sił oraz energii pokazuje natomiast, że sabot i płaszcz pocisku nie odgrywają zasadniczej roli przy uderzeniu w nieruchomą tarczę. Doznaje ona większego popędu, jednak nie jest to różnica zasadnicza.

Słowa kluczowe: mechanika komputerowa, symulacja

1. Wstęp

Obliczenia numeryczne zderzeń pocisków z opancerzeniem to modelowanie krótkotrwałych obciążeń o wysokiej intensywności. Właśnie ta krótkotrwałość bodźca przy jednoczesnym zaistnieniu dużych odkształceń zaprzęga do symulacji

modelowanie szeregu zjawisk niemających istotnego znaczenia dla typowych inżynierskich konstrukcji. Ponadto obciążenia te mimo swojego lokalnego charakteru na ogół wywołują duże deformacje elementów lub całości konstrukcji [1, 2]. Co więcej, maksymalne wartości odkształceń i przemieszczeń często decydują o bezpieczeństwie lub też o dalszej użyteczności badanego obiektu. To wszystko czyni ogólny model bardzo skomplikowanym, a często przy znacznych rozmiarach elementarnego wycinka pancerza niemożliwym do numerycznego zasymulowania w oparciu o typową bazę sprzętową. Powyższe czynniki skłaniają do dość powszechnego stosowania przeróżnych uproszczeń, często bez dokładnej analizy ich rzeczywistego wpływu na generowany błąd. Celem tego artykułu jest weryfikacja podstawowych uproszczeń modeli pocisków AP na wyniki uzyskane w oprogramowaniu LS-Dyna.

2. Model konstytutywny materiału rdzenia pocisku

Zastosowany model numeryczny wymagał przyjęcia zależności konstytutywnych dla rdzenia pocisku oraz tarczy. Materiał tarczy był opisywany modelem materiału sprężystego lub nieodkształcalnego bez stosowania modelu zniszczenia. Natomiast węgiel wolframu stanowiący rdzeń pocisku opisany został zaawansowanym modelem Johnsona-Cooka [5]. W modelu tym granica plastyczności opisana jest zależnością:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

gdzie: A, B, n, C, m — stałe materiałowe;

$\bar{\epsilon}_p^n$ — efektywne odkształcenie plastyczne

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}, \text{ gdzie } \dot{\epsilon}^* \text{ jest efektywną unormowaną prędkością odkształceń} \quad (2)$$

$$T^{*m} = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}, \quad (3)$$

T_m — temperatura topnienia;

T_r — temperatura odniesienia.

Pęknięcie materiału następuje, kiedy parametr zniszczenia osiąga wartość jeden, jest on opisany poniższym równaniem:

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}_p}{\epsilon^f}, \quad (4)$$

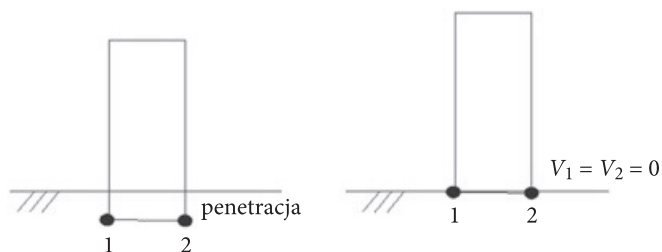
Wielkość odkształcenia powstałego przy pęknięciu opisana jest równaniem:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*], \quad (5)$$

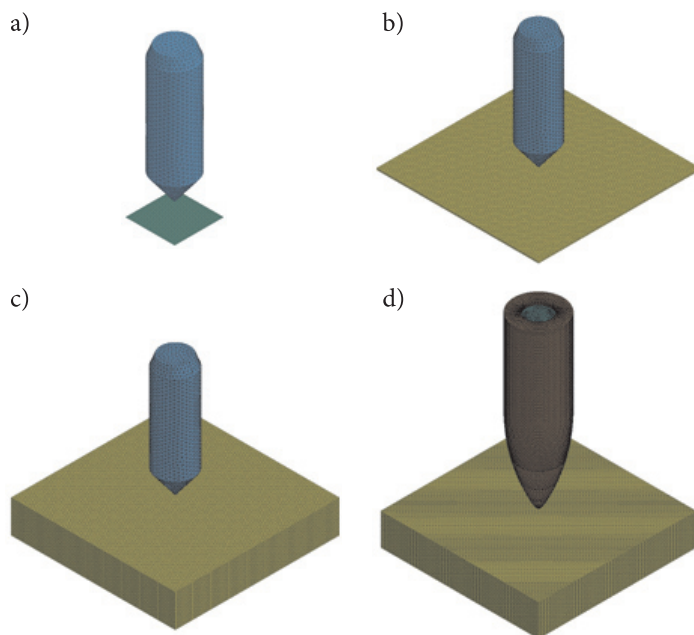
gdzie: D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 — współczynniki krzywej.

3. Opis problemu

Weryfikacja uproszczeń numerycznych polegała na przeprowadzeniu trzech testów zderzeniowych dla rdzenia pocisku $7,62 \times 51$ WC oraz dwóch symulacji polegających na porównaniu efektów uderzenia pełnego modelu pocisku oraz jedynie jego rdzenia. Stalowy materiał tarczy został opisany modelem materiału idealnie sprężystego, natomiast węgiel wolframu stanowiący pocisk modelem Johnsona-Cooka. Prędkość początkowa pocisku wynosiła 854 m/s, natomiast tarcza pozostawała nieruchoma i uwięziona w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przemieszczania się penetratora. W pierwszej próbie zderzeniu podlegał rdzeń oraz nieodkształcalna ścianka (NS). Definiowana jest ona jedynie poprzez podanie położenia i bez opisywania materiału tarczy za pomocą elementów skończonych. Przejście jakiegokolwiek węzła przez NS powoduje w kolejnym kroku czasowym wyzerowanie jego prędkości i przesunięcie go na powierzchnię. Schemat działania NS pokazano na rysunku 1, natomiast model numeryczny na rysunku 2a. Kolejny sposób symulacji przeszkody polegał na opisanu materiału jako ciała nieodkształcalnego zgodnie z rysunkiem 2b. Ostatni z uproszczonych modeli to płyta stalowa o znacznej grubości opisana materiałem izotropowym idealnie sprężystym, numeryczna implementacja zaprezentowana jest na rysunku 2c. W ostatniej z analiz badano wpływ uproszczania budowy pocisku, to jest symulowanie uderzenia samego rdzenia z pominięciem jego dodatkowych komponentów. W próbie zderzeniowej pocisk stanowiły odpowiednio rdzeń, sabot oraz płaszcz (rys. 2d) lub też jedynie rdzeń.



Rys. 1. Zasada działania ścianki nieodkształcalnej dla kolejnych kroków czasowych

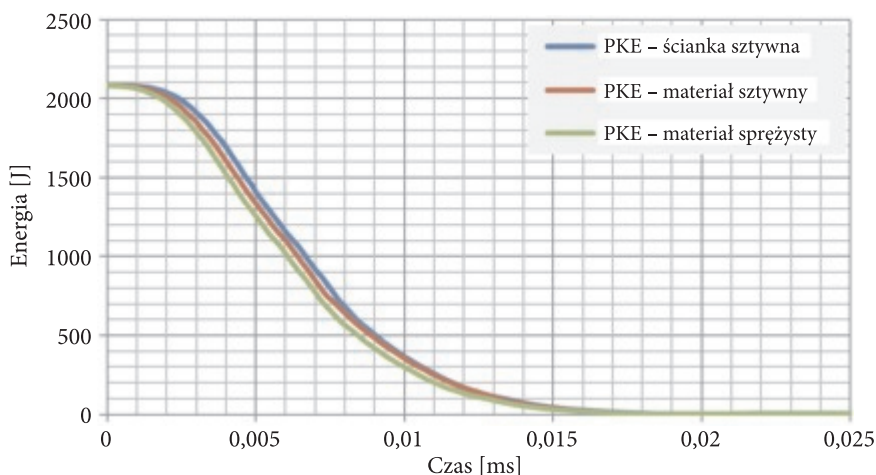


Rys. 2. Schemat problemu testu zderzeniowego: a) rdzeń — ścianka sztywna; b) rdzeń — materiał sztywny; c) rdzeń — materiał sprężysty; d) rdzeń, sabot, płaszcz — materiał sprężysty

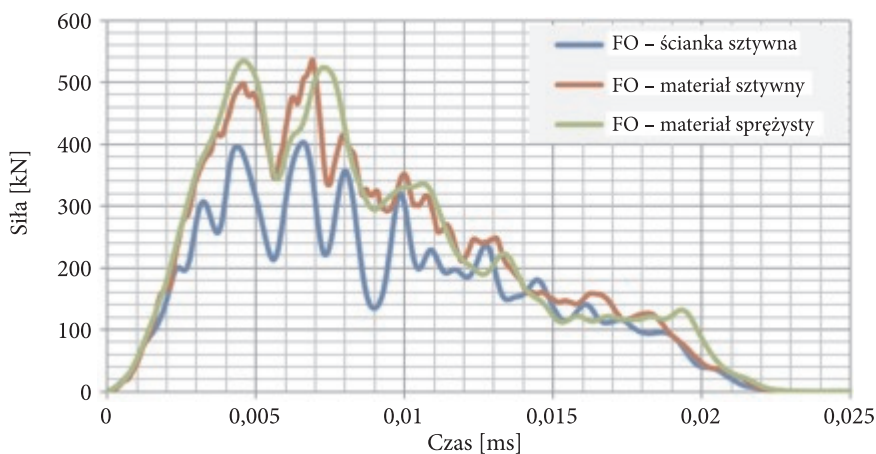
4. Rozwiązanie problemu i analiza rezultatów

Model rdzenia oraz mały fragment płaszczka wykonano z elementów skończonych czworościennych, natomiast w pozostałych przypadkach modele zostały zbudowane z przestrzennych ośmiowęzłowych elementów skończonych z jednym punktem całkowania. Do porównania stosowano parametry: PKE — energia kinetyczna niezniszczonej części pocisku, FO, siłę oddziaływania, która powstała przy kontakcie ciał, oraz RLP — długość resztkową pocisku. Wykres przedstawiony na rysunku 3 pokazuje dużą zbieżność wyników. Znacznie bardziej interesujące efekty widać na rysunku 4, gdzie przedstawiona jest siła wzajemnego oddziaływania w funkcji czasu, której pole definiuje impuls siły. Pomimo znacznych nieliniowości można z łatwością dostrzec znacznie mniejsze siły rejestrowane na NS. Ponieważ jest to uproszczony sposób modelowania, a ponadto dla dwóch pozostałych przypadków wspomniane siły są zbliżone, wskazuje to na niekorzystne zjawisko tłumienia numerycznego. Natomiast parametr RLP jest zbliżony dla każdego z wariantów.

Kolejnym etapem badań było porównanie zderzenia samego rdzenia oraz pełnego modelu pocisku (rdzeń, sabot, płaszcz) ze ścianką sprężystą. Uproszczenie to pozwala w dużym stopniu skrócić obliczenia, a co więcej eliminuje konieczność modelowania skomplikowanego geometrycznie płaszczka. Na rysunku 5 przedstawiono energię

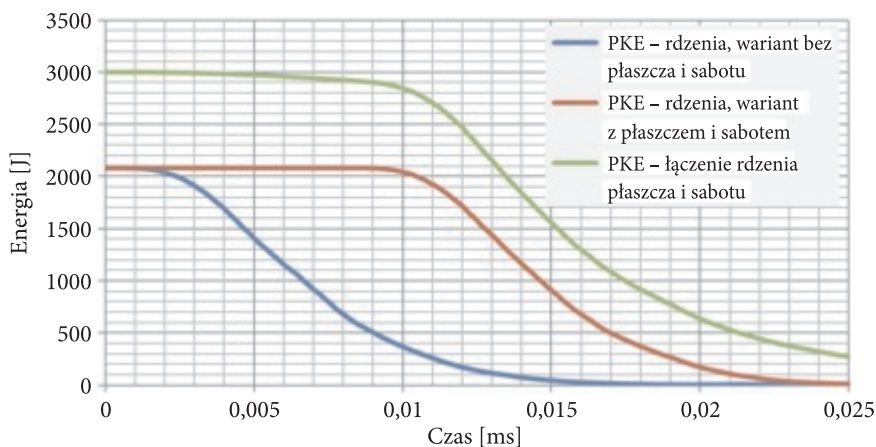


Rys. 3. Energia kinetyczna pocisków w funkcji czasu dla trzech sposobów modelowania tarczy

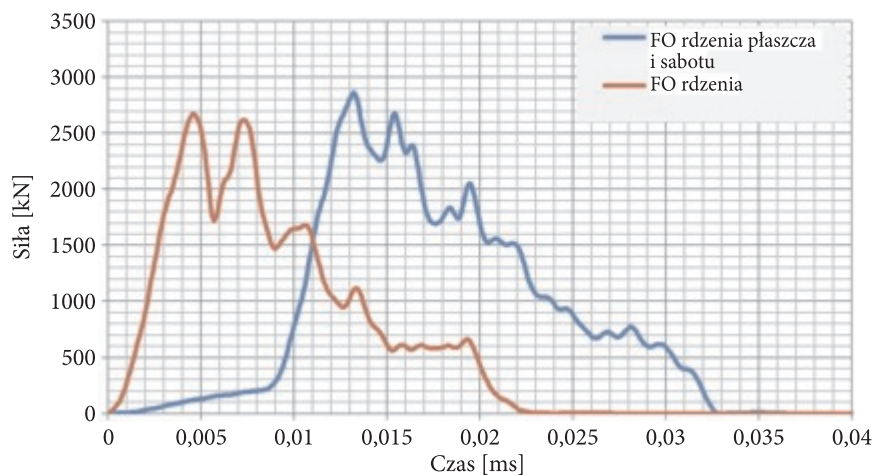


Rys. 4. Siła działająca na tarczę dla trzech sposobów jej modelowania

kinetyczną w funkcji czasu dla rdzenia w dwóch wariantach. W podstawowym teście jedynie rdzeniowi pocisku nadano prędkość początkową, natomiast w drugiej próbie rdzeń znajdował się w aluminiowym sabocie, a ten w miedzianym płaszczu. Utrata energii kinetycznej przebiega w bardzo podobny sposób, zaś w przypadku porównywania sił kontaktujących się ciał różnica jest obserwowalna. Wykresy przedstawione na rysunku 6 nie pozostawiają wątpliwości, iż dla pełnego rdzenia pocisku występuje większy impuls siły i różnica ta wynosi aż 23%. Jest to zjawisko zrozumiałe, gdyż rdzeń osadzony w sabocie oraz zamknięty płaszczem posiada większą masę, a przez to i energię kinetyczną. Jednak kontakt następuje w tym



Rys. 5. Energia kinetyczna rdzenia pocisku uderzającego w sprężystą ściankę



Rys. 6. Siła pocisku uderzającego w sprężystą ściankę

przypadku na większej powierzchni, więc nie przekłada się to bezpośrednio na zdolności penetracyjne pocisku. Ponadto właściwości wytrzymałościowe materiału płaszcza i sabotu są znikome w porównaniu z materiałem rdzenia.

5. Wnioski

Opisane badania potwierdzają możliwość stosowania modelu materiału nieodkształcalnego oraz sprężystego do uproszczonego opisu ciał materialnych. Pozwala

to na uproszczenie i przyspieszenie obliczeń numerycznych w sytuacjach, gdzie materiały zderzających się ciał mają znacznie różne właściwości mechaniczne. Z dużą ostrożnością powinno się natomiast odnosić do odczytywania sił rejestrowanych na ścianie nieodkształcalnej. Analiza sił oraz energii pokazuje natomiast, że sabot i płaszcz pocisku nie odgrywają zasadniczej roli przy uderzeniu w nieruchomą tarczę. Doznaje ona większego popędu, natomiast nie jest to różnica zasadnicza. W celu dokładnej weryfikacji wielkości tego wpływu powinny zostać wykonane dalsze badania z uwzględnieniem wszystkich zjawisk zachodzących w procesie penetracji i perforacji materiału tarczy.

LITERATURA

- [1] E. RUSIŃSKI, *Mikrokomputerowa analiza ram i nadwozi pojazdów i maszyn roboczych*, WKiŁ, Warszawa, 1994.
- [2] E. RUSIŃSKI, J. CZMOCHOWSKI, T. SMOLNICKI, *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
- [3] *Ls-Dyna Keyword User's Manual*, May 2010, Version 971/Rev 5.
- [4] M. NILSSON, *Constitutive model for ArmoX 500T and ArmoX 600T at low and medium strain rates*, Swedish Defence Research Agency, TR FOI-R-1068-SE, 2003.
- [5] G.R. JOHNSON, W.H. COOK, *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, April 1983.
- [6] PANOV VILI, *Modelling of behaviour of metals at high strain rates*, Cranfield University, PhD Thesis, 2005.

S. STANISŁAWEK, A. MORKA, T. NIEZGODA

Influence of simulation simplifications on results accuracy

Abstract. The paper presents the possibility of applying certain simplifications for computer simulations. It is the essential knowledge for each scientist employing the described methods of modelling. Verification of numerical simplifications consisted in conducting three impact tests for a 7.62×51 WC projectile core and a fourth one which referred to a comparison of a full model of the penetrator with its core only. The target was described with a simple steel material while the projectile with an advanced Johnson-Cook model. Projectile initial speed was 854 m/s while a target remained motionless and fixed in a plane perpendicular to the motion direction.

The performed tests confirm the possibility of using rigid and elastic materials for a simplified material body description. It allows simplification and shortening of computational time when materials are characterized by very different strength. However, a user should be very careful when analyzing the forces recorded on a rigid wall. Furthermore, analysis of the forces and energies shows that both a sabot and a jacket do not play a significant role during the impact into a motionless target. It registers a bigger force impulse but it is not a substantial difference.

Keywords: computational mechanics, simulation

