

prof. dr hab. inż. Karol JACH
dr inż. Krzysztof RUTYNA
dr inż. Robert ŚWIERCZYŃSKI
Jerzy ŻUK
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

TEORETYCZNO-EKSPERYMENTALNE BADANIA PENETRACJI PANCERZA RHA LITEGO I WARSTWOWEGO POCISKIEM EFP

W pracy przedstawiono wyniki prac teoretyczno-eksperymentalnych dotyczące przebijania litych i wielowarstwowych tarcz ze stali RHA. Ciałem przebijającym był pocisk typu EFP z żelaza ARMCO. Zaprezentowano wyniki symulacji komputerowych procesu napędzania oraz deformacji sferycznej wkładki kumulacyjnej przez produkty detonacji aż do momentu uformowania pocisku EFP typu powłokowego - dla oceny jego kształtów i parametrów. W oparciu o uzyskane dane przyjęto zastępczy model pocisku do symulacji procesu zderzenia. Przedstawiono wyniki modelowania komputerowego procesu penetracji pancerza litego i warstwowego przez tego typu pocisk oraz wyniki eksperymentu poligonowego penetracji tarczy RHA 70 mm.

1. Wstęp

W nowoczesnej technice często występuje potrzeba numerycznego modelowania przebiegu pewnych procesów fizycznych, zwłaszcza gdy ich obserwacja i badanie jest utrudnione przez różne czynniki. Klasycznym przykładem są tu różnego rodzaju zastosowania metod wybuchowych. Aparatura pomiarowa umieszczona w pobliżu detonującego ładunku jest narażona na zniszczenie przez falę uderzeniową, odłamki, podmuch, piach, kurz itp. Innym powodem, dla którego metody komputerowe są coraz szerzej stosowane, są względy ekonomiczne. Modelowanie komputerowe jest zwykle znacznie tańsze niż odpowiedni eksperyment.

Opracowanie zoptymalizowanej konstrukcji ładunku EFP (Explosively Formed Projectile) osiągającego przebicie od 0.7 do 1 średnicy wkładki z odległości rzędu kilkudziesięciu metrów jest sprawą wyjątkowo trudną. Jest to bowiem zagadnienie interdyscyplinarne obejmujące trzy obszary wiedzy. Pierwszy z nich to analizy teoretyczne i symulacje komputerowe umożliwiające wstępne zaprojektowanie ładunku, a następnie kolejne cykle badań teoretycznych i eksperymentalnych ułatwiające zoptymalizowanie konstrukcji. Drugi obejmuje technikę i technologię wytwarzania ładunków zapewniającą wysoką precyzję ich wykonania i maksymalne wykorzystanie energii materiału wybuchowego. Trzeci związany jest

z wykorzystaniem w pracach eksperymentalnych skomplikowanych systemów diagnostycznych.

W pracy przedstawiono wyniki modelowania komputerowego procesu formowania pocisku EFP typu powłokowego oraz procesu penetracji pancerza przez tego typu pocisk, a także wyniki eksperymentu poligonowego penetracji tarczy RHA 70 mm.

Impulsem do przeprowadzenia symulacji komputerowej była chęć zweryfikowania wyników eksperymentalnych dotyczących przebijania tarcz litych i warstwowych pociskiem EFP. Otóż w przypadku zastosowania litego pancerza uzyskuje się jego pełną penetrację. Wielowarstwowy pancerz natomiast nie jest w pełni przebijany mimo iż sumaryczna grubość wszystkich warstw jest identyczna jak grubość litej płyty pancernej.

2. Zastosowanie metod symulacji komputerowej w projektowaniu i ocenie parametrów ładunków EFP

Od około 25 lat rozwijane są w WAT metody symulacji komputerowej do modelowania dynamicznych oddziaływań ciał [1-2]. Badania te obejmują między innymi zjawisko wybuchowego formowania pocisków i ich oddziaływanie na pancerze. W wyniku dotychczasowych prac dysponujemy zestawem modeli matematyczno-fizycznych oraz kodów komputerowych, które mogą być na bieżąco adaptowane do badań, optymalizacji i oceny parametrów różnych typów ładunków. Modele matematyczno-fizyczne opisujące zachowanie się metalowych elementów ładunku tj. wkładki kumulacyjnej i obudowy oparte są na teorii sprężysto-plastyczności uzupełnionej o półempiryczne równania stanu oraz zależności opisujące zmiany granicy plastycznego płynięcia w funkcji temperatury, ciśnienia, gęstości, deformacji plastycznej i prędkości deformacji plastycznej (modele Steinberga i Johnsona-Cooka) [3-9]. Ponadto w obszarach niszczenia struktury metali korzystamy z fenomenologicznego modelu opisującego powstawanie i wzrost objętości szczelin oraz ich wpływ na charakterystyki wytrzymałościowe [10-12]. Procesy detonacji opisywane są klasycznymi równaniami gazodynamiki i półempirycznymi równaniami stanu np. JWL. Front fali detonacyjnej aproksymuje się powierzchnią silnej nieciągłości, a jej propagację modeluje się metodą optyki detonacyjnej.

Od strony matematycznej modele powyższe tworzą układy kilkudziesięciu nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych w przybliżeniu dwu lub trójwymiarowym przestrzennie, uzupełnionych związkami algebraicznymi opisującymi własności materiałów oraz odpowiednimi warunkami początkowo-brzegowymi. Do numerycznego rozwiązania tak sformułowanego problemu wykorzystujemy oryginalną metodę symulacji komputerowej zwaną metodą punktów swobodnych, przetestowaną z pozytywnymi rezultatami na rozlicznych zagadnieniach z zakresu mechaniki ośrodków ciągłych [2].

Metoda umożliwia:

- prowadzenie obliczeń w warunkach skrajnie dużych deformacji (łącznie z fragmentacją ciał),
- stawianie warunków brzegowych na swobodnych i krzywoliniowych powierzchniach,
- zszywanie rozwiązań na kontaktach różnych ciał itp.

Na bazie metody punktów swobodnych zbudowano szereg programów, które służą do modelowania konkretnych zjawisk fizycznych.

Wykorzystując opracowane kody komputerowe można modelować różne zjawiska kumulacyjne. W szczególności nadają się one do modelowania zjawiska wybuchowego formowania pocisków. Uwzględnia się przy tym konstrukcję rzeczywistego ładunku EFP, a więc modeluje go razem z obudową (dowolne kształty i materiały) wypełnioną materiałem wybuchowym o zadanych właściwościach (półempiryczne równanie stanu), przesłoną i wkładką wykonaną z wybranego materiału o zadanym kształcie. W wyniku przeprowadzenia symulacji dostajemy pełny obraz czasowo-przestrzennej ewolucji zjawiska wybuchowego formowania pocisków i zmian wszystkich parametrów poszczególnych ośrodków (ciśnienia, gęstości, prędkości masowe, temperatury itd.). Analogiczne uwagi dotyczą również modelowania zjawiska przebijania pancerzy różnego typu pociskami.

W niniejszej pracy zastosowano nową w stosunku do np. [2] metodę modelowania warunków brzegowych, tak aby można było prowadzić obliczenia bez ingerencji zewnętrznych, w warunkach istnienia licznych dynamicznie zmieniających się granic różnych faz ośrodka i obszarów próżni.

Bardzo skomplikowane kształty i zmienna ilość niezależnych linii brzegowych stawały się istotnym ograniczeniem metody punktów swobodnych w jej klasycznym sformułowaniu [2]. Aby efektywnie przezwyciężyć te trudności zaproponowano nową wersję metody symulacji komputerowej zwaną „metodą znaczników”, której ideę zaprezentowano szczegółowo w pracy [17].

W „metodzie znaczników” zaproponowano nowy sposób modelowania warunków brzegowych. Zakłada się w nim, że cały rozważany obszar pokrywamy regularną siecią znaczników. Badany obiekt przemieszcza się i deformuje na tle tej siatki znaczników. Znaczniki dzieli się na dwie klasy, to jest takie, które są przykryte badanym obszarem obiektu i te, które są na zewnątrz obiektu. Każdy punkt ośrodka, którego sąsiadem jest znacznik zewnętrzny jest automatycznie punktem brzegowym. Warunek brzegowy realizowany jest przez przyjęcie, że znacznik zewnętrzny zawiera informację o warunkach brzegowych problemu.

3. Równania problemu

Przyjęto, że modelem opisującym zachowanie się metali w warunkach silnych dynamicznych obciążeń jest model ciała sprężysto-plastycznego. Układ równań wyrażający prawa zachowania i związki konstytutywne dla tego modelu ma następującą postać [1-2, 8-9, 12-13, 16-17]:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \bar{w} = 0 \quad (1) \quad \rho \frac{d\bar{w}}{dt} = \nabla \cdot \bar{\sigma} \quad (2) \quad \rho \frac{de}{dt} = \bar{\sigma} \cdot \nabla \bar{w} \quad (3)$$

$$\overset{\nabla}{S}_{ik} = 2\mu \left(\dot{\epsilon}_{ik} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_{ii} \delta_{ik} \right) \quad (4) \quad S_{lk} S_{lk} \leq \frac{2}{3} Y^2 \quad (5) \quad p = p(\rho, e, V_c) \quad (6)$$

Dla metali przyjmowano model wytrzymałościowy Johnsona-Cooka:

$$Y = \left[A + B \cdot (\epsilon^p)^n \right] \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}_*^p) \cdot (1 - T_*^m) \quad (7)$$

oraz następujący model powstawania i wzrostu szczelin:

$$\frac{dV_c}{dt} = -k \operatorname{sign}(p) \cdot [|p| - \sigma_0 G(V_c)] (V_c + V_{c0}) \quad \text{dla } |p| \geq \sigma_0 G(V_c) \quad (8),$$

$$\frac{dV_c}{dt} = 0 \quad \text{dla } |p| < \sigma_0 G(V_c) \quad (9)$$

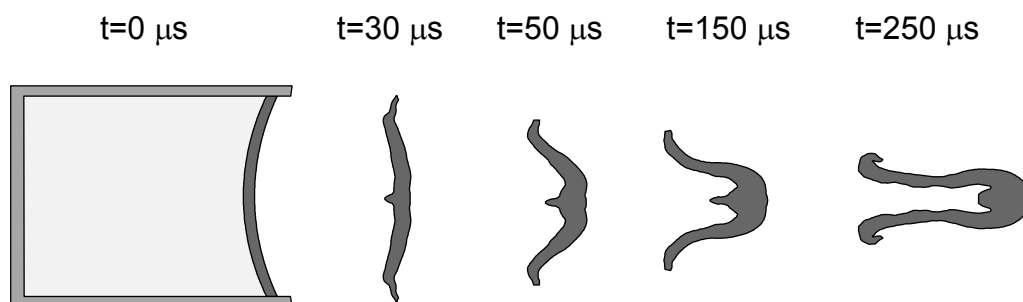
Przyjmowano, że granica plastyczności i modułu ścinania wskutek powstałych szczelin są ograniczane zgodnie z formułami:

$$Y^T = Y \cdot G(V_c), \quad \mu^T = \mu \cdot G(V_c) \quad (10) \quad \text{gdzie } G(V_c) = 1 - \rho V_c \quad (11)$$

Oznaczenia: ρ - gęstość, p - ciśnienie, e - energia wewnętrzna na jednostkę masy, S_{ij} - składowe dewiatora tensora naprężeń, Y - dynamiczna granica plastycznego płynięcia, μ - moduł ścinania, V_c - objętość szczelin w jednostce masy ośrodka, \vec{w} - wektor prędkości masowej.

4. Ilustracja procesu formowania pocisku efp penetracji pancerza litego i warstwowego oraz wyniki badań eksperymentalnych

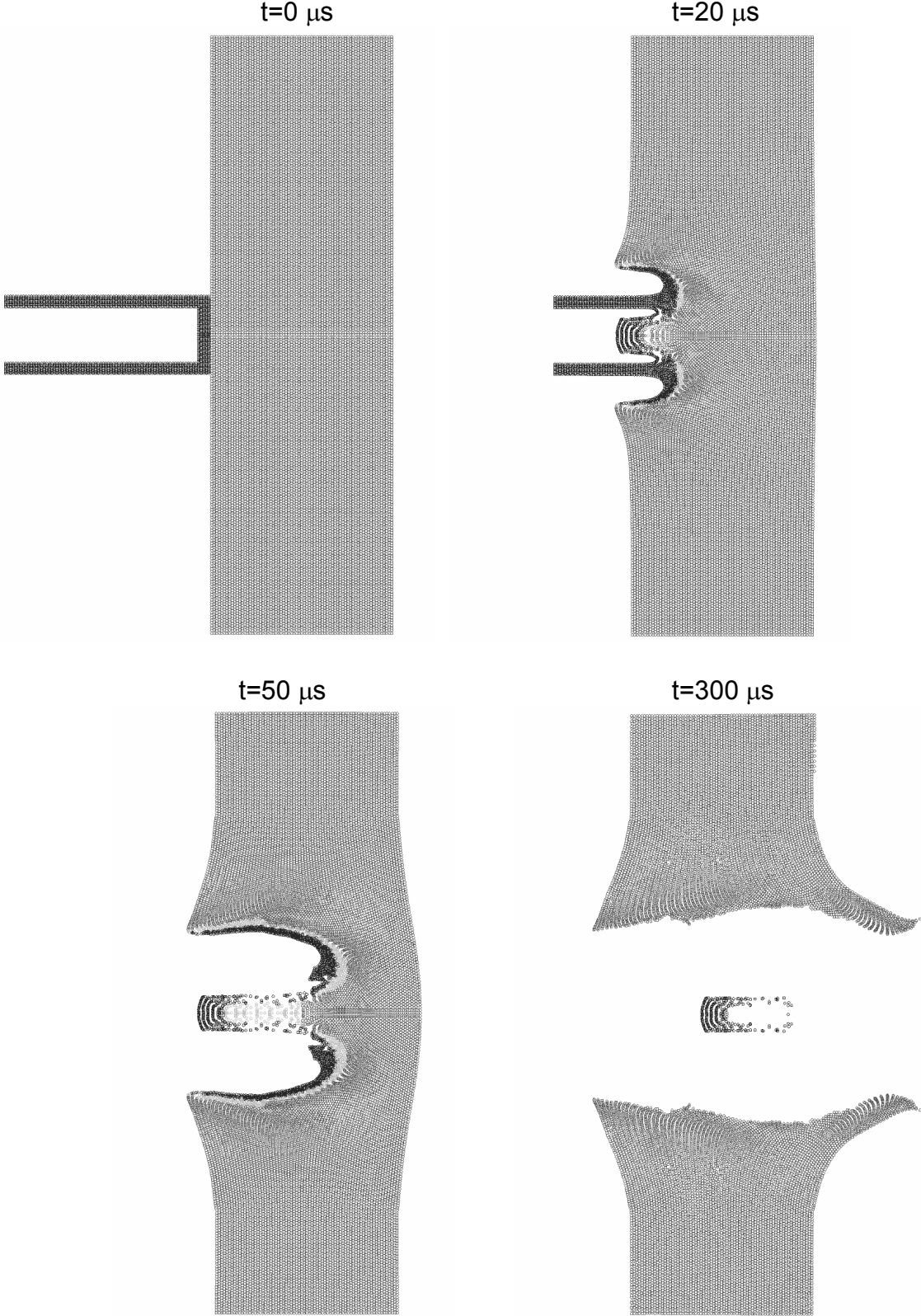
Podczas wybuchowego formowania pocisku mamy do czynienia z napędzaniem i deformacją wkładki kumulacyjnej. Materiał wkładki może być poddany mniejszej bądź większej deformacji plastycznej, a tworzący się pocisk może przybrać formę powłoki lub rdzenia. Tworzeniu się powłoki towarzyszą stosunkowo niewielkie deformacje plastyczne. Przy tworzeniu rdzenia zachodzi silna deformacja plastyczna materiału wkładki. Pocisk powstający w ten sposób ma nawet specjalną nazwę „selfforging projectile” [7], co można przetłumaczyć jako „pocisk samoprzekuwalny”. Poniżej zilustrowano cztery fazy tworzenia się pocisku typu powłokowego (rys. 5.1).



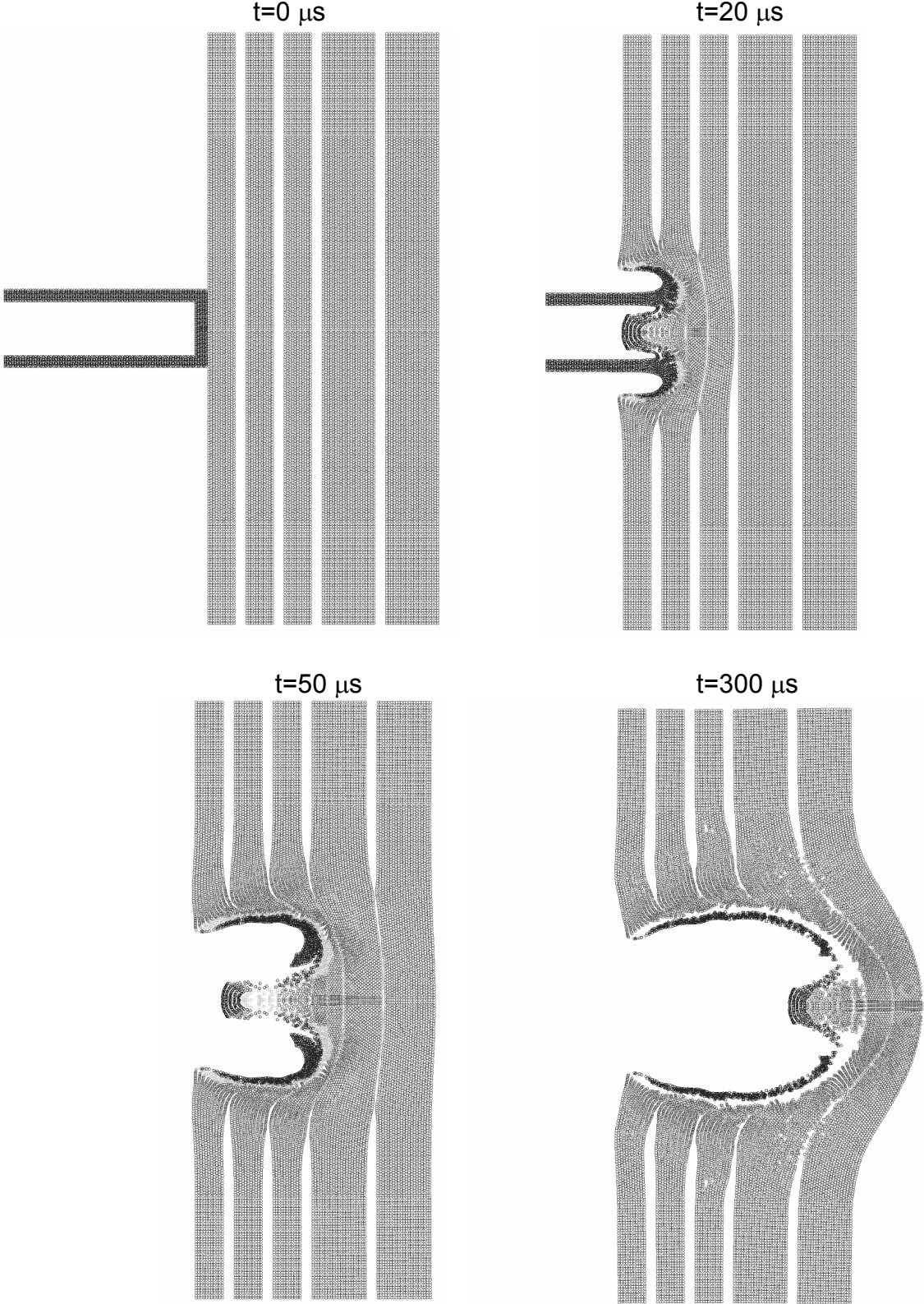
Rysunek 5.1. Zobrazowanie procesu formowania pocisku EFP typu powłokowego

Na kolejnych rysunkach zilustrowano proces penetracji pancerza RHA (stal pancerna) powłokowym pociskiem walcowym o kształcie zbliżonym do pocisków uzyskiwanych w eksperymentach. Rysunek 5.2 przedstawia wyniki symulacji

komputerowych przebijania litej tarczy, natomiast rysunek 5.3 pięciowarstwowego pancerza przez tego typu pociski.

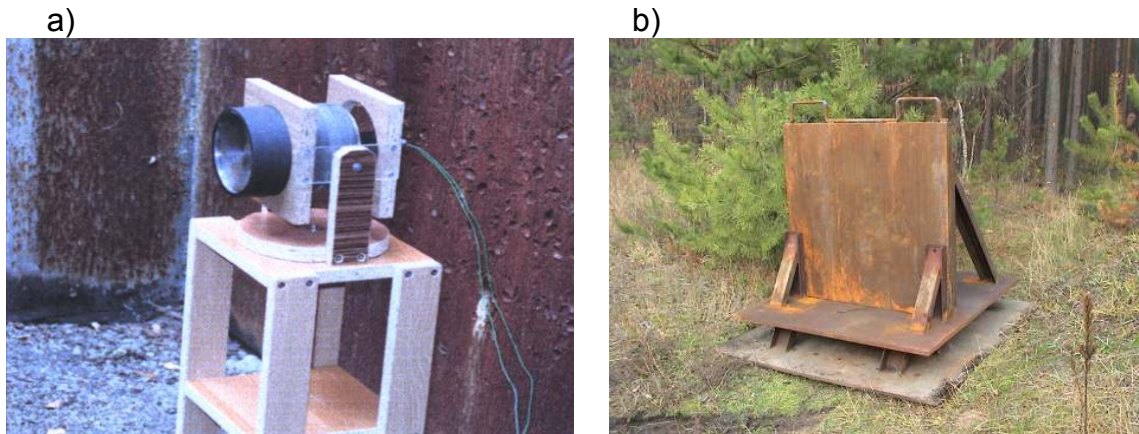


Rysunek 5.2 Wynik symulacji komputerowych procesu przebijania litej tarczy RHA pociskiem powłokowym



Rysunek 5.3 Wynik symulacji komputerowych procesu przebijania pancerza pięciowarstwowego pociskiem powłokowym

Weryfikację eksperymentalną badań dotyczących EFP prowadzono w warunkach poligonowych. Widok ogólny stanowiska badawczego pokazano na rysunku 5.4.



Rysunek 5.4. Widok ogólny poligonowego stanowiska badawczego a) ładunek w miejscu detonacji, b) tarcza przed strzałem ustawiona w odległości 33 m od punktu celowania

Badaniom eksperymentalnym na przebicie poddano pancerz z litej stali RHA o grubości 70 mm oraz pancerz pięciowarstwowy o tej samej grubości. Tarcza ustawiona została w odległości 33 m od punktu celowania.

Na rysunku 5.5 przedstawiono widok kraterów pozostawionych w pięciowarstwowej tarczy RHA po uderzeniu pociskami EFP. W żadnym z eksperymentów nie zarejestrowano całkowitego przebicia tarczy.



Rysunek 5.5. Widok kraterów pozostawionych w warstwowej tarczy pancernej (grubość tarczy 70 mm, dystans 33 m, ładunek kaliber 100 mm), po strzale pociskiem EFP.

Przykładowy widok kraterów pozostawionych w litej tarczy RHA 70 mm przedstawiono na rysunku 5.6.



Rysunek 5.6. Widok krateru w tarczy pancernej po strzale pociskiem o stabilnym locie (grubość tarczy 70 mm, dystans 33 m, ładunek kaliber 100 mm).

Wyniki eksperymentalne zostały potwierdzone analizami teoretycznymi. Z przeprowadzonych badań wynika, że pancerz warstwowy jest bardziej skuteczną ochroną niż tej samej grubości lity pancerz ze stali RHA. Na styku złożonych warstw następuje rozproszenie energii a co za tym idzie ograniczenie całkowitej głębokości przebicia.

5. Uwagi i wnioski

1. Opracowano, w przybliżeniu osiowosymetrycznym, model matematyczno-fizyczny dla opisu procesu wybuchowego formowania pocisku w ładunku kumulacyjnym i jego oddziaływania z tarczą litą i wielowarstwową. Do rozwiązania problemu zastosowano wersję metody punktów swobodnych zwaną „metodą znaczników”.
2. Wykazano dużą przydatność i poprawność wyników uzyskiwanych „metodą znaczników” w zagadnieniach z zakresu wybuchowego formowania pocisków oraz penetracji tarcz wielowarstwowych.
3. Wyniki symulacji komputerowych potwierdzają – obserwowany w eksperymentach - fakt uzyskiwania mniejszej głębokości przebicia pancerza warstwowego niż w przypadku tarczy z litego materiału.

4. Porównanie wyników teoretycznych z eksperymentem pozwala stwierdzić, że uzyskiwane rozwiązania są poprawne pod względem fizycznym (jakościowym) i osiągają dokładność rzędu kilku do kilkunastu procent.
5. Uzyskiwane wyniki są wystarczająco dokładne z punktu widzenia praktyki inżynierskiej i mogą być z powodzeniem wykorzystywane w konstrukcjach i optymalizacjach konkretnych układów kumulacyjnych i opancerzenia.

Literatura

1. Jach K. , *Modelowanie komputerowe zjawisk kumulacyjnych*, WAT-rozprawa habilitacyjna, Warszawa, 1991.
2. Jach K., Morka A., Mroczkowski M., Panowicz R., Sarzyński A., Stępniewski W., Świerczyński R., Tyl J., *Modelowanie komputerowe dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, Monografia pod redakcją prof. dr. hab. inż. Karola Jacha, PWN, Warszawa 2001 r.
3. Johnson G. R., Cook W. H. *A constitutive model and data for metals subjected to large strains and high temperatures*, Proc. in: 7th Int. Symposium on Ballistics, The Netherlands, 1983., Hague. (1983),
4. Steinberg D. J., *Equation of state and strength properties of selected materials*, Lawrence Livermore Nat. Lab. February 1991, UCRL-MA-106439 .
5. Steinberg D. J., Cochran S. G., Guinan M.W., *A constitutive model for metals applicable at high-strain rate*, J. Appl. Phys. 51, 1980, str. 1498.
6. Steinberg D. J., Lund C. M., *A constitutive model for strain rates from 10 to 10 s*, J. Appl. Phys. 65, 1989, str. 1528 .
7. Walters W.P., Zukas J.A., *Fundamentals of shaped charges*, Wiley&Sons, 1989.
8. Wilkins M.L., *Mechanics of penetration and perforation*, Int. J. Engng Sci., vol. 16, 1978, str. 793.
9. Wilkins M.L., *Modelling the behaviour of materials, Structural impact and crashworthiness*: Proc. Intern. Conf., London 1984, New York 1984 , vol.2.
10. Agurejkin V.A., Anisimov S. I., Busman A. V., Kanel G. I., Karjagin V. P., Konstantinov A. B., Krjukov B. P., Minin V. F., Razorenov S.V., Sagdeev R. Z., Sugak S. G., Fortov V. E., *Teplofiziceskie i gazodinamiceskie problemy protivometeoritnoj zascity kosmiceskogo apparata "Vega"*, *Teplofizika Vysokih Temperatur*, 1984, 22, 5.
11. Barbee T.W., Seaman Jr., L., Crewdson R., Curran D. R., *Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals*, J. Mater.,7, 1972, str. 393.
12. Sugak S. G., Kanel G. I., Fortov V. E., Ni A. L., Stelmah B. G., *Cislennoe modelirovanie dejstvia vzryva na zeleznuju plitu*, FGV, 1983, 19, 20, str. 541.
13. Jach K., Włodarczyk E., *Solutions of the initial-value problems of the viscoplastic - nonstationary theory for the description shaped charge jet formation and target penetration*, Ballistics' 92, Proceedings of 13th International Symposium on Ballistics, Stockholm, Sweden, June 1992.
14. Johnson G.R., Lindholm U.S., *Strain-rate effects in metals at large shear strains, Material behavior under high stress and ultrahigh loading rates*: Proc.29th Sagamore Army Mater. Res. Conf. Lake Placid 1982, New York 1983.

15. Johnson J. N., *Dynamic fracture and spallation in ductile solids*, J. Appl. Phys. 52, 1981, str. 2812.
16. Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R., *Impact dynamics*, A Wiley - Interscience Publication, New York, 1982
17. Jach K., Świerczyński R., Wilk Z. *Modelowanie działania ładunków kumulacyjnych w odwiertach geologicznych*, J. Techn. Phys., I 2004