

## METODY OSZACOWANIA GŁĘBOKOŚCI PRZEBICIA PANCERZA PRZEZ POCISKI KINETYCZNE

*Przedstawiono mechanizmy penetracji pancerzy stalowych i ceramicznych oraz podstawy teoretyczne i przykłady zastosowania wybranych metod szacowania głębokości przebicia pancerzy przez pociski kinetyczne. Poddano ocenie możliwości aplikacji tych metod do szacowania głębokości przebicia pancerzy stalowo-ceramicznych przez nowoczesne pociski podkalibrowe. Wykazano także potrzebę podjęcia prac naukowo-badawczych nad opracowaniem nowego modelu przebicia pancerza współczesnego czołgu przez pocisku podkalibrowe o konstrukcji segmentowej.*

### 1. Wstęp

Mechanizm przebijania pancerza możemy ogólnie podzielić na dwa zjawiska:

- wnikanie pocisku bez przejścia przez pancerz,
- perforacja czyli całkowite przebicie pancerza przez pocisk.

Pierwsze zjawisko dzieli się na cztery etapy:

- a) zderzenie pocisku z pancerzem,
- b) początkowe stacjonarne wnikanie pocisku w pancerz ze stałą prędkością,
- c) hamowanie pocisku przez siły inercyjne i wytrzymałościowe materiału pancerza,
- d) końcowe kształtowanie się krateru.

Dokładny opis zjawisk fizycznych towarzyszących w/w etapom wnikania pocisku w pancerz przedstawiono w pracy [1].

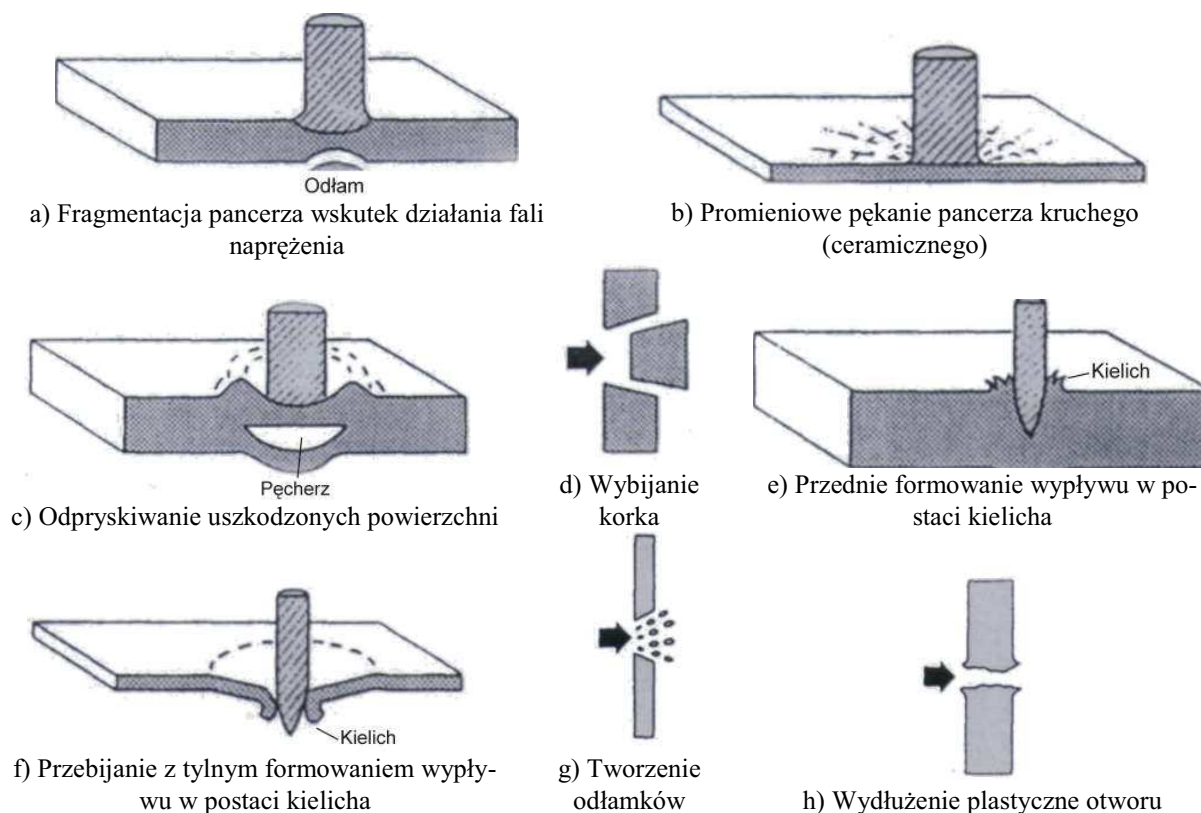
Pierwszy etap - uderzenie jest szczególnie istotnym dla wytrzymałości konstrukcji pocisku. Powstająca w chwili uderzenia fala rozchodzi się od wierzchołka pocisku po jego koniec generując naprężenia wielokrotnie przekraczające statyczną granicę wytrzymałości materiału  $R_m$ . Pod wpływem oddziaływania fali uderzeniowej odkształceniom plastycznym ulega wierzchołek pocisku, jednocześnie fala uderzeniowa przemieszczająca się do końca pocisku powoduje powstawanie naprężeń, które mogą powodować początkowe osiowe pękanie na jego obrzeżach. Następnie w miarę przemieszczania się fali odkształceń wzdłuż pocisku (penetratora) mogą pojawiać się pęknięcia korpusu (lub penetratora). Podobne zjawiska zachodzą w pancerzu. Podczas uderzenia powstające naprężenia i ciśnienie powodują lokalne przejście materiałów pancerza pocisku w stan ciekły i w efekcie powstanie krateru.

Drugi etap ma charakter stacjonarny, gdzie pocisk wnika w pancerz ze stałą prędkością. Krater ulega powiększeniu w wyniku wypływu na boki płynnych faz pocisku i pancerza. Tył pocisku porusza się szybciej niż ulegający erozji wierzchołek.

W trzecim etapie porównywanym do zjawiska kawitacji po zużyciu pocisku (penetratora) w procesie wnikania następuje zanikanie pola wysokiego ciśnienia i stopniowe wytracanie prędkości pocisku penetrującego pancerz.

W czwartym etapie następuje skurcz krateru pod wpływem przede wszystkim rekrystalizacji i wyzarczenia się materiału pancerza.

Drugie zjawisko - perforacja - nie jest teoretycznie do końca wyjaśnione. Wiadomym jest, że czynnikami decydującymi o zdolności perforacji pancerza są kształt pocisku i jego prędkość uderzenia w pancerz oraz właściwości fizyczne i wytrzymałościowe materiałów konstrukcyjnych pocisku i pancerza. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie kilka mechanizmów przebijania pancerza przez pocisk.



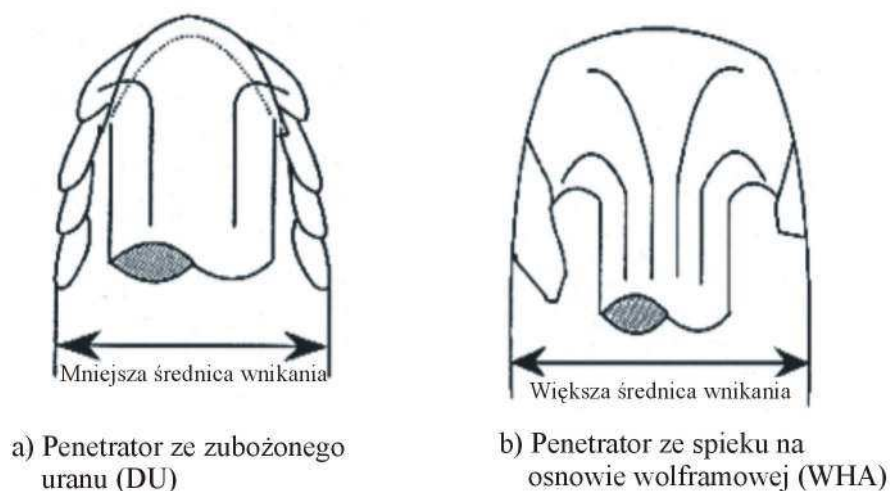
**Rys. 1. Mechanizmy penetracji pancerzy**

Rysunek 1a ilustruje zjawiska przebijania pancerzy o małej i średniej grubości lub wykonanych z materiału o niskich właściwościach wytrzymałościowych. Na rysunku 1b przedstawiono promieniowy mechanizm pękania pancerza wykonanego z materiału kruchego (np. ceramiki). Odpryskiwanie materiału pancerza (rys. 1c) ma miejsce w rezultacie odbicia się fali sprężystej (generowanej w pancerzu na skutek uderzenia pocisku) od jego powierzchni bocznych. Tego typu zjawiska obserwuje się podczas strzelania pociskami elaborowanymi materiałem kruszącym (np. pocisku z plastycznym materiałem wybuchowym typu HESH).

Wybijanie korka (rys. 1d) zachodzi najczęściej podczas strzelania pociskami przeciwpancernymi tępgłowicowymi w pancerze jednolite o wysokich właściwościach mechanicznych (szczególnie twardości i udarności). Wybijany korek ma w przybliżeniu średnicę równą średnicy pocisku. Na przebieg tego zjawiska mają wpływ także prędkość i kąt uderzenia pocisku w pancerz. Mechanizmy perforacji pancerza przedstawione na rysunku 1e, f występują w przypadku przebijania pancerzy o małej grubości pociskami ostrogłowicowymi o stosunkowo małej prędkości uderzenia lub pociskami tępgłowicowymi o prędkości uderzenia zbliżonej do granicznej. Tworzenie się odłamków za pancerzem (rys. 1g) zachodzi podczas przebijania pancerza wykonanego z materiału kruchego. Ostatni rodzaj perforacji (rys. 1h) jest związany ze zjawiskiem najbardziej interesującym z punktu widzenia konstruowania nowoczesnej kinetycznej amunicji przeciwpancernej, a mianowicie z mechanizmem przebijania pancerza o dużej grubości przez wydłużone penetratory pocisków typu APFSDS.

Od kilkunastu lat prowadzone są w świecie intensywne prace nad zwiększaniem zdolności przebicia pancerza przez pociski podkalibrowe. Głębokość penetracji pociskami kinetycznymi zależy przede wszystkim od: dynamicznych twardości  $H_p$  i gęstości  $\rho_p$  materiału pocisku oraz dynamicznych twardości  $H_t$  i gęstości  $\rho_t$  materiału pancerza, jednostkowej masy pocisku odniesionej do pola maksymalnego jego przekroju poprzecznego  $\rho_p L$  ( $L$  – długość penetratora) oraz prędkości uderzenia  $V_p$ . W celu uzyskania możliwie dużych wartości parametrów  $\rho_p L$  i  $H_p$ , rdzenie wykonuje się najczęściej z wysokowytrzymałych stopów ciężkich: spieki z osnową wolframową *WHA* o gęstości  $\rho \approx 17500 \text{ kg/m}^3$  oraz zubożony uran *DU* o gęstości  $\rho \approx 19000 \text{ kg/m}^3$ .

Penetratory wykonane ze zubożonego uranu mają szczególną właściwość, polegającą na ich samoostrzeniu się (*self-sharpening effect*) podczas penetracji pancerza (rys. 2a). Występowanie tego efektu wpływa na zwiększenie głębokości przebicia w stosunku do penetratorów wykonanych ze spieku na osnowie wolframowej (rys. 2b), mających tendencję do „grzybkowania” w pancerzu. Zjawisko samoostrzenia się penetratora podczas wnikania w pancerz jest skutkiem występowania procesu formowania się płaszczyzn adiabatycznego ścinania, będącego wynikiem zastosowania odpowiedniego procesu technologicznego odkuwania prętów uranowych oraz niskiej przewodności cieplnej zubożonego uranu. Obecnie prowadzone są m.in. w Korei Płd. prace nad modyfikacją mikrostruktury oraz procesów obróbki cieplnej spieków na osnowie wolframowej w celu eliminacji efektu „grzybkowania” i jednoczesnego uzyskania efektu „samoostrzenia się” penetratora w pancerzu [2].



**Rys. 2. Porównanie mechanizmów odkształcania się wierzchołka penetratora wykonanego ze zubożonego uranu (DU) i spieku na osnowie wolframowej (WHA)**

Innym sposobem zwiększenia głębokości przebicia pancerza przez pociski kinetyczne jest zastosowanie penetratorów o budowie segmentowej (rys. 3). W pocisku takim segmenty penetratora zachowując wzajemne liniowe położenie względem punktu uderzenia kolejno penetrują pancerz. Taki sposób dostarczania energii kinetycznej do „układu penetracji” skutkuje mniejszymi stratami energii związanymi z inercyjnym hamowaniem penetratora w materiale pancerza, a w efekcie końcowym zwiększeniem głębokości przebicia przez penetrator segmentowy w porównaniu do jednorodnego penetratora o tej samej masie i wymiarach.



**Rys. 3. Schemat konstrukcji penetratora jednorodnego i segmentowego**

Przykładem pocisku segmentowego jest model pocisku APFSDS konstrukcji Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, w którym penetrator (rys. 4) składa się z dwóch segmentów wykonanych ze spieku na osnowie wolframowej połączonych tuleją wykonaną z materiału o wysokiej wytrzymałości. Obecnie pociski te znajdują się w fazie badań modeli [3].



**Rys. 4. Model pocisku podkalibrowego APFSDS o konstrukcji segmentowej opracowany w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia**

## 2. Metody szacowania głębokości przebicia pancerzy

### 2.1. Metody analityczne

Balistyka końcowa w zakresie techniki badań zjawiska uderzenia pocisku w twardą przeszkodę wykorzystywała dotychczas zależności analityczne wyprowadzone na podstawie wyników badań dynamicznych. Podczas ich opracowywania posługiwano się najczęściej wartościami: granicznej prędkości balistycznej pocisku  $V_{50}$ , prędkości uderzenia pocisku w przeszkodę  $V_p$ , masy pocisku na torze lotu  $m$ , średnicy pocisku  $d$ , kąta uderzenia w przeszkodę  $\theta$  (kąt zawarty między styczną do toru lotu pocisku, a płaszczyzną normalną do pancerza w punkcie uderzenia - podczas badań głębokości przebicia przez pociski kinetyczne kąt ten wynosi najczęściej  $60^\circ$ ), parametrami wytrzymałościowymi materiału przeszkody i jej grubością. W przeszłości posługiwano się kilkoma zależnościami służącymi do oszacowania głębokości przebicia jednorodnych pancerzy stalowych

$$a. \quad \text{ogólny} \quad \frac{P}{d} = \frac{a_0 m V_p^2}{d^3}, \quad (1)$$

$$b. \quad \text{Milne-de-Marre} \quad \frac{P}{d} = \frac{a_1}{m V_p^2 d^{0,7}}, \quad (2)$$

$$c. \quad \text{Morri'a} \quad \frac{P}{d} = \frac{2m V_p^2}{a_2 \pi^2 d^3}, \quad (3)$$

$$d. \quad \text{Dideona} \quad \frac{P}{d} = a_3 \rho_t \ln(1 + a_4 V_p^2), \quad (4)$$

$$e. \quad \text{J. de Marre'a} \quad \frac{m V_p^2}{d^3} = C \left( \frac{P}{d} \right)^n, \quad (5)$$

gdzie:  $P$  - głębokość przebicia pancerza,  $C$ ,  $n$  - stałe zależne od rodzaju pocisku i charakteru wnikania pocisku,  $a_0 \div a_3$  - współczynniki doświadczalne.

Na podstawie porównania wyników badań strzelaniem i obliczeń teoretycznych największą dokładnością w ocenie zdolności przebicia pociskiem pełnokalibrowym i podkalibrowym o stosunku długości  $l$  do średnicy  $d$  ( $l/d \leq 15$ ), uzyskuje się z zależności (5). Różnice w szacowanej i rzeczywistej głębokości przebicia nie przekraczają 15%. Jednakże wraz ze wzrostem

w/w parametru  $l/d$  błąd w szacowaniu przebicia znacznie wzrasta. Wiąże się to ze złożonością zjawiska wnikania długiego penetratora w pancerz. Zwykle rozwiązania analityczne w/w problemu upraszcza się poprzez przyjmowanie założeń ograniczających, np. przyjęcie konstrukcji pocisku jako ciała idealnie sztywnego i użycie współczynników doświadczalnych, które nie uwzględniają procesów fizycznych towarzyszących zjawisku dynamicznego wnikania pocisku w przeszkodę.

Eksperymentalną analizę zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi wnikania nieodkształcalnych pocisków małego kalibru (o prędkościach uderzenia  $100 \div 1000$  m/s) w metalowe przeszkody zaprezentowano w pracy [4]. Dzięki przeprowadzonym analizom i badaniom zweryfikowano inną zależność na określenie głębokości przebicia przedstawioną w pracy [5] oraz zidentyfikowano czynniki wpływające w sposób zasadniczy na wielkość przebicia

$$DP = \frac{L}{2k} \frac{\rho_p}{\rho_t} \ln \left( 1 + k \frac{\rho_t V_p^2}{H_t} \right), \quad (6)$$

gdzie:  $DP$  - głębokość penetracji,  $L$  - początkowa długość pocisku,  $k$  - współczynnik kształtu wierzchołka pocisku,  $\rho_p$  - gęstość materiału pocisku,  $\rho_t$  - gęstość materiału pancerza,  $V_p$  - prędkość uderzenia pocisku w pancerz,  $H_t$  - dynamiczna twardość materiału pancerza. Wartość współczynnika kształtu pocisku  $k$  wyraża się wzorem

$$k = 1 - \frac{1}{8} \left( \frac{d}{R} \right)^2, \quad (7)$$

gdzie:  $d$  - średnica największego przekroju poprzecznego pocisku,  $R$  - promień części sfery aproksymującej powierzchnię kontaktu pocisku z półprzestrzenią.

Zawężając problematykę do zjawisk przebijania pancerzy przez pociski podkalibrowe typu APFSDS, ze względu na znaczne prędkości uderzenia ( $1500 \div 1700$  m/s), generowany stan naprężeń pozwala pominąć sztywność i ściśliwość penetratora pocisku podkalibrowego i rozpatrywać je jako ruch cieczy (model przepływu wg Bernouli'ego). Tego rodzaju modele stosuje się także w badaniach przebicia pociskami kumulacyjnymi

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t}}. \quad (8)$$

Głębokość penetracji  $P$  jest proporcjonalna do początkowej długości penetratora  $L$ , a dla tego samego materiału penetratora i pancerza (np. stal-stal) głębokość penetracji jest równa długości penetratora.

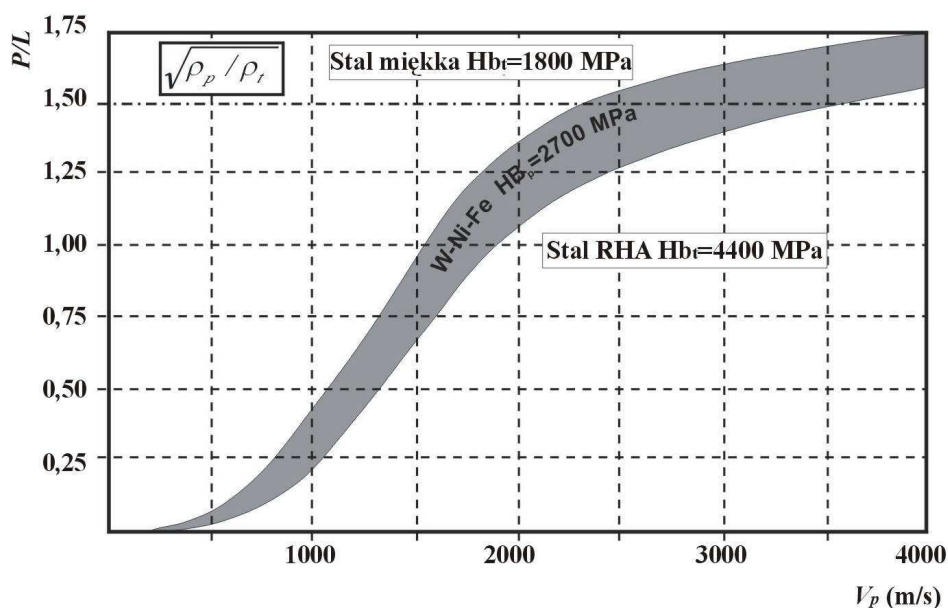
Klasyczna teoria hydrodynamiczna nie uwzględnia zaobserwowanego w praktyce zjawiska hamowania penetratora podczas wnikania w pancerz.

Przebieg tego zjawiska uzależniony jest przede wszystkim od prędkości uderzenia pocisku w pancerz oraz dynamicznych parametrów wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych pocisku i pancerza. Aby uwzględnić to zjawisko stosuje się m.in. współczynniki eksperymentalne. Na przykład do oszacowania głębokości przebicia czołgowych pocisków typu APFSDS-T osiągających prędkości uderzenia w cel rzędu  $1500 \div 1700$  m/s najczęściej stosuje się wzór Helda oparty na modelu hydrodynamicznym, w postaci

$$P = \eta L \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t}}, \quad (9)$$

gdzie:  $\rho_p$  - gęstość materiału rdzenia (penetratora),  $\rho_t$  - gęstość materiału pancerza,  $L$  - początkowa długość rdzenia (penetratora) pocisku,  $\eta$  - współczynnik efektywności zależny od prędkości uderzenia pocisku  $V_p$  i dynamicznej twardości materiału pancerza  $HB_t$ .

Charakter zmian wartości współczynnika  $\eta$  w funkcji prędkości uderzenia  $V_p$  dla pocisku wykonanego ze spieku W-Ni-Fe wnikającego w pancerze o dynamicznej twardości Brinella od 1800 MPa (stal miękka) do 4400 MPa (stal pancerna RHA - Rolled Homogenous Armour) przedstawiono na rysunku 5 [6].



**Rys. 5. Charakter zmian głębokości penetracji  $P$  odniesionej do długości pocisku  $L$  w funkcji prędkości uderzenia pocisku  $V_p$  w dwa rodzaje pancerza**

Zastosowanie wzoru (9) obarczone jest małymi błędami (do 10%) w przypadku szacowania głębokości przebiccia jednorodnych pancerzy stalowych przez pociski podkalibrowe o stosunku  $(l/d) = 15 \div 25$ . Dla pocisków nowych generacji z penetratorami o stosunku  $(l/d) > 25$  różnice pomiędzy wynikami badań a teoretycznymi obliczeniami z zastosowaniem wzoru (9) wzrastają.

Niestety żadne z wyżej wymienionych zależności nie pozwalają na szacowanie głębokości przebiccia pancerzy warstwowych przez podkalibrowe pociski APFSDS z penetratorami o budowie jednorodnej i segmentowej.

## 2.2. Metody numeryczne

Szczególnie w szacowaniu możliwości przebiccia pancerza przez pocisk bardzo przydatne są nowoczesne metody numeryczne, uwzględniające m.in. siły oporu pocisku w pancerzu, wytrzymałość dynamiczną pocisku i pancerza, przyjęcie określonego modelu deformacji, niszczenia, itp. W celu uzyskania dokładnej symulacji procesu penetracji w metodach tych stosuje się modele konstytutywne, umożliwiające opis zachowania się materiałów penetratora i pancerza podczas zderzenia dla wysokich wartości odkształceń  $\varepsilon$ , prędkości odkształceń  $\dot{\varepsilon}$ ,

temperatury  $T$ . W dostępnej literaturze potwierdzono dużą zgodność numerycznych symulacji przebiecia z wynikami eksperymentalnymi.

Ze względu na dużą ilość istniejących aplikacji komputerowych, stosowanych do symulacji procesów przebiecia, przedstawiono poniżej kilka wybranych programów, wykorzystujących najczęściej stosowane kody numeryczne (zwane hydrokodami) *Lagrange'a* i *Euler'a* oraz modele konstytutywne materiałów konstrukcyjnych pocisków i elementów pancerzy współczesnych czołgów.

### 2.2.1. Program *QinetiQ*

W pracy [7] przedstawiono porównanie wyników komputerowego modelowania procesu penetracji pociskami kinetycznymi ( $l/d > 25$ ) wykonanymi ze spieku na osnowie wolframowej w pancerz RHA z wynikami badań dynamicznych strzelaniem. W procesie symulacji penetracji posłużono się opracowanym w firmie *QinetiQ* programem z użyciem zmodyfikowanego modelu konstytutywnego Armstronga-Zerilli'ego (A-Z), zakładającego budowę krystaliczną analizowanego materiału w postaci regularnej struktury przestrzennie centrowanej (ang. *body centred cubic*). Wartości stałe dla tego modelu określono poprzez wyznaczenie dynamicznym parametrów wytrzymałościowych materiałów za pomocą testów *Hopkinsona* lub *Taylor'a*. Równanie podstawowe modelu A-Z przyjmuje postać

$$\sigma = (C_1 + C_5 \varepsilon^n) \frac{\mu_T}{\mu_{293}} + C_2 \exp[(C_3 + C_4 \ln \dot{\varepsilon})T], \quad (10)$$

gdzie:  $C_1 \div C_5$ ,  $n$  - stałe (tabela 1),  $\sigma$  - naprężenie,  $\varepsilon$  - odkształcenie,  $\dot{\varepsilon}$  - szybkość odkształceń,  $T$  - temperatura [K],  $\mu_T$  - moduł sprężystości poprzecznej dla danej temperatury,  $\mu_{293}$  - moduł sprężystości poprzecznej dla temperatury 293 K.

Tabela 1. Stałe Armstronga-Zerilli'ego dla stali niklowej i spieku wolframu

	Stal niklowa (pancerz)	Spiek na osnowie wolframowej (pocisk)
C1	1800 MPa	600 MPa
C2	500 MPa	2697 MPa
C3	-0.006	-0.0043
C4	0.00015	0.00017
C5	700 MPa	750 MPa
n	0.5	0.65

Do oszacowania kryterium niszczenia materiału użyto modelu Goldthorpe'a [8] (*PDF-Path Dependent Fracture*), opracowanego w celu symulacji procesów powstawania przełomów plastycznych, poślizgowych oraz wzrostu i zarodkowania przestrzeni międzykrystalicznych pod wpływem różnego typu naprężeń. Zgodnie z tym modelem uszkodzenie (pęknięcie) materiału opisuje równanie

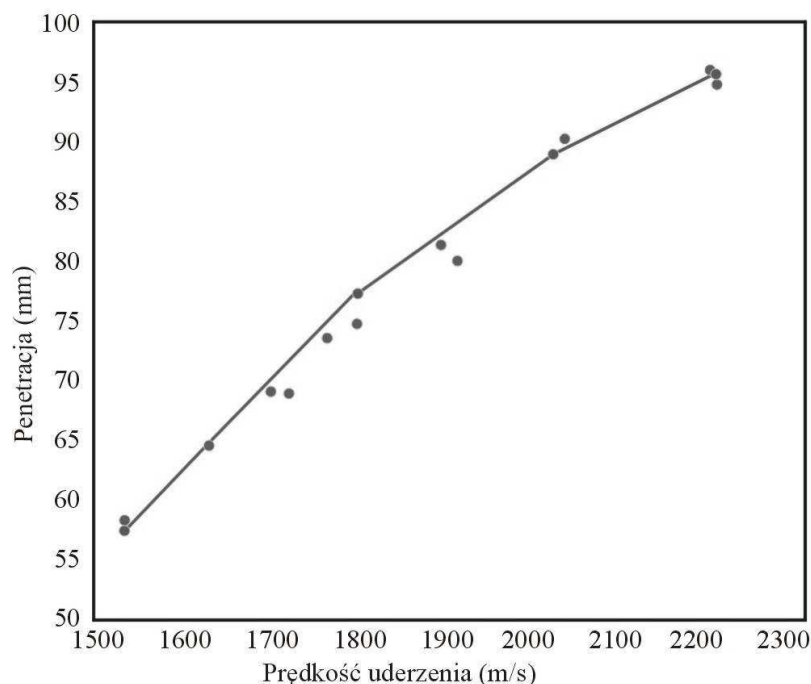
$$dS = 0,67 \exp[1.5\sigma_n - 0.04\sigma_n^{-1.5}] d\varepsilon + A\varepsilon_s, \quad (11)$$

gdzie:  $\sigma_n$  - naprężenia zredukowane (lub charakterystyka ciśnienie/plastyczność),  $d\varepsilon$  - efektywne odkształcenia plastyczne,  $\varepsilon_s$  - maksymalne odkształcenia styczne (poślizgowe),  $A$  - stała określana w badaniach materiałowych odporności na skręcanie (określenie odkształceń przy ścinaniu i powstawaniu przełomu poślizgowego),  $S$  - uszkodzenie (pęknięcie) materiału.



Wartość  $S$ , dla której zachodzi pęknięcie materiału oznacza się jako  $S_c$ . Można ją określić poprzez przeprowadzenie statycznego badania odporności próbki materiału na rozciąganie analizując przewężenie rozciąganej próbki.

Ostateczną weryfikacją modelu *QinetiQ* było porównanie wyników obliczeń teoretycznych z wynikami badań dynamicznych penetracji pancerzy przez pociski. Porównanie wyników symulacji i badań penetracji stali pancerniej RHA przez penetratory wykonane ze spieku na osnowie wolframowej przedstawiono na rysunku 6. Zaobserwować można dużą zgodność wyników symulacji przebicia z wynikami badań.



Rys. 6. Wyniki symulacji kodem *GRIM* (linia) i wyniki badań penetracji (punkty)

### 2.2.2. Program AUTODYN

W pracy [9] autor wykorzystał w symulacjach numerycznych procesów penetracji elementów ceramicznych przez pociski podkalibrowe ( $l/d > 25$ ) wykonane ze spieków na osnowie wolframowej program AUTODYN-2D w wersjach 2.6, 4,1 i 4.3, wykorzystujący kody *Lagrange'a* i *Euler'a*. W celu opisanie zachowania się pocisków wykonanych ze spieku na osnowie wolframowej zastosowano model konstytutywny Johnsona-Cooka [10] w postaci

$$\sigma = \left[ A + B(\bar{\epsilon}_p)^n \right] \left( 1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*) \right) \left( 1 - (T^*)^m \right), \quad (12)$$

gdzie:  $A$  - statyczna granica plastyczności materiału,  $B$  - moduł wzmocnienia,  $n$  - wykładnik wzmocnienia,  $C$  - współczynnik szybkości odkształceń,  $m$  - wykładnik uplastycznienia termicznego,  $T^*$  - wartość bezwymiarowa temperatury

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}, \quad (13)$$

gdzie:  $T$  - temperatura bieżąca,  $T_{room}$  - temperatura pokojowa,  $T_{melt}$  - temperatura topnienia.



Przyjmując dla warunków przemiany adiabatycznej cała wewnętrzna praca układu zamieniona zostanie na przyrost temperatury

$$\Delta T = \frac{\overline{\sigma \varepsilon}_p}{\rho C_v}, \quad (14)$$

gdzie:  $\overline{\sigma}$  - naprężenia rzeczywiste,  $\overline{\varepsilon}_p$  - odkształcenia plastyczne rzeczywiste,  $\rho$  - gęstość materiału,  $C_v$  - izochoryczne ciepło właściwe.  
Odkształcenia plastyczne zredukowane definiuje zależność

$$\overline{\varepsilon}_p = \int_0^{\varepsilon} d\overline{\varepsilon}_p, \quad (15)$$

gdzie:  $d\overline{\varepsilon}_p$  - przyrost odkształcenia definiowany jest przez tensor odkształcenia w postaci

$$d\overline{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}. \quad (16)$$

Naprężenia rzeczywiste  $\overline{\sigma}$  definiuje wzór

$$\overline{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_{ij} \sigma_{ij}. \quad (17)$$

Bezwymiarowa szybkość odkształceń  $\dot{\varepsilon}^*$  jest stosunkiem szybkości odkształceń plastycznych rzeczywistych  $\dot{\overline{\varepsilon}}_p$  do granicznej szybkości odkształceń  $\dot{\varepsilon}_0$

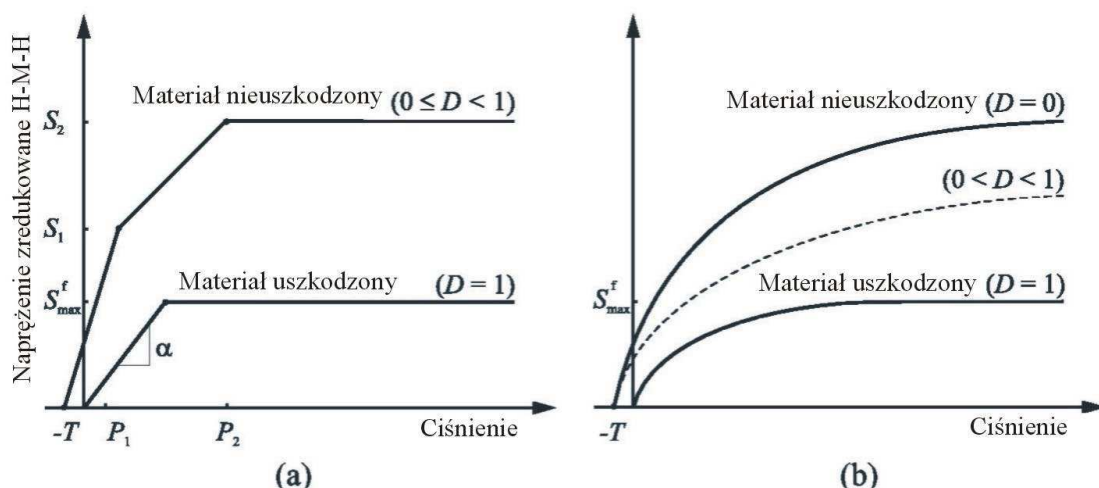
$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\overline{\varepsilon}}_p}{\dot{\varepsilon}_0}. \quad (18)$$

Jako równanie stanu (EOS – *Equation of State*) dla spieku na podstawie wolframowej zastosowano równanie EOS Mie-Grüneisena z częścią sprężystą w postaci wielomianowej

$$p = k_1 x + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \gamma_0 \rho_0 E, \quad (19)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie,  $k_1, k_2, k_3$  - współczynniki;  $k_2=0$  dla  $x < 0$ ,  $x = 1 - \rho_0 / \rho_s$  - deformacja,  $\gamma_0$  - parametr Mie-Grüneisena,  $\rho_0$  - gęstość początkowa,  $\rho_s$  - gęstość fazy ciała stałego,  $E$  - energia wewnętrzna na jednostkę masy.

Do opisu materiału ceramicznego SiC pancerza zastosowano model konstytutywny Johnsona- Holmquista JH1, szerzej opisany w pracy [11]. Szczególną właściwością modelu JH1 jest wykorzystanie w nim dwóch granic wytrzymałości materiału:  $S$  – granicy wytrzymałości dla materiału nieuszkodzonego ( $0 \leq D < 1$ ;  $D$  - uszkodzenie) i  $S^f$  – granicy wytrzymałości dla materiału uszkodzonego ( $D=1$ ). Obie wartości determinowane są przez ciśnienie  $p$  i szybkość odkształceń  $\dot{\varepsilon}$ . Na rysunku 7 przedstawiono zależności naprężeń zredukowanych w funkcji ciśnienia dla materiałów nieuszkodzonego i uszkodzonego w modelach JH1 i JH2.



Rys. 7. Wykres zależności naprężen zredukowanych od ciśnienia w modelach konstytutywnych JH1 (a) i JH2 (b)

Zmienna  $D$  - uszkodzenie materiału - charakteryzuje zależność

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}, \quad (20)$$

gdzie:  $\Delta \varepsilon_p$  - przyrost odkształcenia plastycznego,  $\varepsilon_p^f = \phi(P + T)$  - odkształcenia niszczące zależne od ciśnienia,  $\phi$ ,  $P$  - współczynniki uszkodzenia,  $T$  - wytrzymałość na rozciąganie. Jako równanie stanu zastosowano równanie EOS Mie-Grüneisena (19).

Do opisu ceramiki  $Al_2O_3$  i  $B_4C$  zastosowano model JH2, szerzej przedstawiony w pracy [12]. Podobnie, jak w przedstawionym powyżej modelu JH1, model ten posługuje się dwiema granicznymi wartościami wytrzymałości materiału ( $\sigma_i$  - nienaruszonego i  $\sigma_f$  - uszkodzonego), jednakże wyrażone są one w postaci analitycznej:

- dla materiału nieuszkodzonego

$$\sigma_i(p, \dot{\varepsilon}) = A \sigma_{HEL} \left( \frac{T + p}{p_{HEL}} \right)^N \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right), \quad (21)$$

- dla materiału uszkodzonego

$$\sigma_f(p, \dot{\varepsilon}) = B \sigma_{HEL} \left( \frac{p}{p_{HEL}} \right)^M \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right), \quad (22)$$

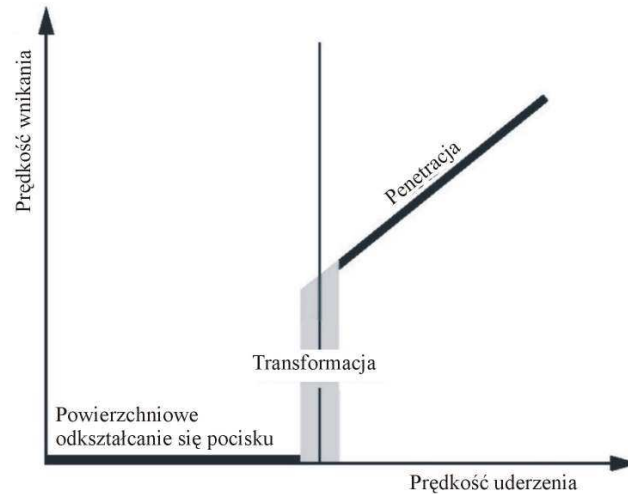
gdzie:  $A$  - współczynnik wytrzymałości materiału nienaruszonego,  $B$  - współczynnik wytrzymałości materiału uszkodzonego,  $N$  - wykładnik wytrzymałości materiału nienaruszonego,  $M$  - wykładnik wytrzymałości materiału uszkodzonego,  $C$  - współczynnik prędkości odkształceń,  $\dot{\varepsilon}_0$  - graniczna prędkość odkształceń,  $p_{HEL}$  - ciśnienie dla granicy plastyczności Hugoniota,  $\sigma_{HEL}$  - napężenia rzeczywiste dla granicy plastyczności Hugoniota.

Uszkodzenie materiału  $D$  definiowane jest równaniem (20), zaś odkształcenia niszczące  $\varepsilon_p^f$  przyjmują postać

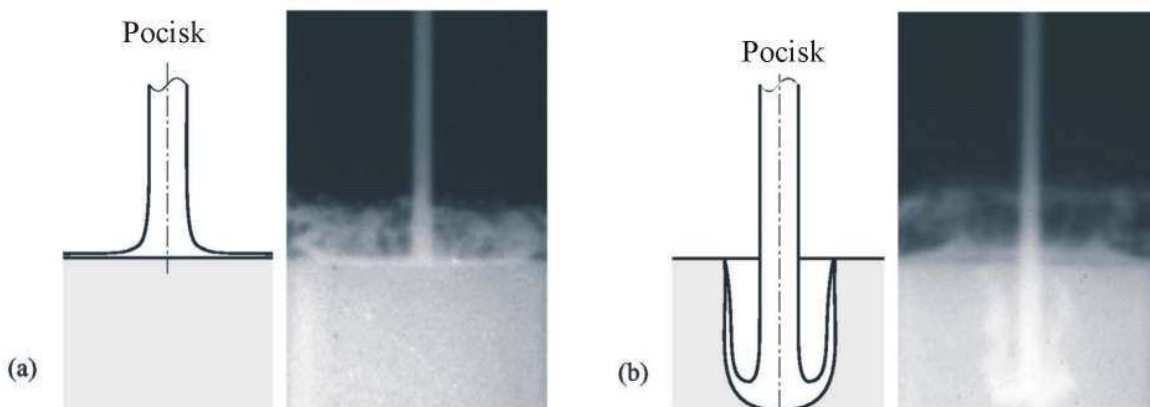
$$\varepsilon_p^f(p) = D_1 \left( \frac{T+p}{p_{HEL}} \right)^{D_2}, \quad (23)$$

gdzie:  $D_1, D_2$  - kolejno współczynnik i wykładnik uszkodzenia.

Podobnie jak dla modelu JH1 jako równanie stanu zastosowano równanie EOS Mie-Grüneisena (19). Przeprowadzone w pracy [9] symulacje i badania miały na celu m.in. identyfikację wartości progowych prędkości uderzenia pocisku w pancerz ceramiczny, dla których zachodzi jeszcze zjawisko powierzchniowego odkształcania się pocisku (*interface defeat*), skutkującego brakiem penetracji, a prędkościami uderzenia, dla których następuje przejście procesu powierzchniowego odkształcania się pocisku w proces penetracji (rys. 8, 9).



**Rys. 8. Schemat procesów powierzchniowego odkształcania się pocisku i zjawiska penetracji, zależnych od prędkości uderzenia pocisku w pancerz**



**Rys. 9. Symulacje i zdjęcia rentgenowskie z badań procesów: powierzchniowego odkształcania się pocisku (a) i zjawiska penetracji (b)**

### 2.2.3. Metoda punktów swobodnych i metoda znaczników

Inną numeryczną metodą symulacji ostrzału pancerzy opracowaną w kraju przez zespół naukowców WAT jest metoda punktów swobodnych [13]. Metodę tę w swojej pierwotnej postaci (warunki brzegowe realizowane za pomocą tzw. siatki punktów fikcyjnych) wykorzystywano do około 2001 roku. Wobec złożoności problemów wymagających przestrzennego modelowania o bardzo skomplikowanych warunkach brzegowych, metoda punktów swobod-

nych w pierwotnej wersji nie odpowiadała ich wymaganiom przede wszystkim z powodu niemożliwych do pokonania technicznych problemów związanych ze stawianiem warunków brzegowych, wyznaczaniem linii brzegów, itp. W szczególności trudności takie pojawiły się podczas próby budowy kodu komputerowego do modelowania trójwymiarowego.

W celu rozwiązania tego problemu rozpoczęto w 2001 roku próby zbudowania nowej wersji metody punktów swobodnych tak, aby można ją było efektywnie, bez ingerencji programisty, zastosować do analizy dynamicznych oddziaływań wielu ciał i obiektów wielofazowych o złożonym kształcie [13]. Nową wersję metody nazwano „metodą znaczników” [14,15]. W chwili obecnej, autorzy metody dysponują zestawem modeli i kodów 2D i 3D umożliwiających wszechstronne badanie dynamicznych oddziaływań ciał, a w szczególności wnikania strumieni kumulacyjnych i penetratorów pocisków podkalibrowych w pancerze oraz zjawiska wybuchowego formowania pocisków. Do analiz numerycznych przyjmuje się m.in. model Johnsona-Cooka. Przykładowe wyniki symulacji przebicia pancerza warstwowego 125 mm pociskiem podkalibrowym typu APFSDS z zastosowaniem metody punktów swobodnych przedstawiono w pracy [16].

Przedstawione powyżej metody numeryczne pozwalają na szacowanie głębokości przebicia pancerzy warstwowych przez podkalibrowe pociski APFSDS z penetratorami o budowie jednorodnej z dużą dokładnością (błąd nie przekracza 7%).

### 3. Wnioski

Na podstawie przedstawionego powyżej opisu wybranych metod szacowania głębokości przebicia pancerzy przez pociski kinetyczne można sformułować następujące wnioski:

1. Do oszacowania głębokości przebicia pancerza stalowego przez kinetyczne pociski pełnokalibrowe i podkalibrowe o wartości stosunku  $(l/d) \leq 15$  z błędem obliczeń nieprzekraczającym 15% można stosować analityczny wzór J. de Marre'a (5).
2. Do oszacowania głębokości przebicia pancerza stalowego przez kinetyczne pociski pełnokalibrowe i pociski podkalibrowe o wartości stosunku  $(l/d) = 15 \div 25$  z błędem obliczeń nieprzekraczającym 10% można stosować, oparty na modelu przepływu wg Bernoulli'ego, wzór Helda (9).
3. W przypadku potrzeby dokładnego oszacowania głębokości przebicia pancerza stalowego przez pociski podkalibrowe o wartości stosunku  $(l/d) > 25$  (z błędem obliczeń nieprzekraczającym 7%) należy zastosować zaawansowane oprogramowanie zawierające odpowiednie modele konstytutywne zachowania się materiałów penetratora i pancerza (np. Armstronga-Zerilli'ego lub Johnsona-Cooka) z uwzględnieniem kryteriów niszczenia materiału.
4. W celu określenia zdolności przebicia pancerza jednorodnego (stal) i warstwowego (stal-ceramika) przez segmentowe penetratory pocisków podkalibrowych należy opracować nowy analityczny model przebijania, uwzględniający przede wszystkim nieciągłość dostarczania energii kinetycznej penetratora segmentowego do układu penetracji. Opracowany model mógłby być zweryfikowany poprzez symulacje numeryczne z zastosowaniem odpowiedniego oprogramowania (np. AUTODYN, LS-DYNA, program Metody Punktów Swobodnych) z uwzględnieniem modeli konstytutywnych zachowania się materiałów penetratora (spieki wolframu) oraz pancerza (stal-ceramika) i kryteriów niszczenia tych materiałów. Dokładność opracowanej metody zostałaby określona na podstawie badań dynamicznych.

## Literatura

- [1] Włodarczyk E.: Hydrodynamiczne modele wnikania długiego pręta w tarczę, materiały z III Konferencji Naukowo-Technicznej „Odporność Udarowa Konstrukcji”, 2001, s. 285÷316.
- [2] Joon-Woong N., Eun-Pyo K., Heung-Sub S., Woon-Hyung B., Kil-Sung Ch.: Matrix Penetration of W/W Grain Boundaries and Its Effect on Mechanical Properties of 93W-5.6Ni-1.4Fe Heavy Alloy, Metallurgical Transactions A. 24A, (1993) pp. 2411÷2416.
- [3] Kuśnierz T., Pankowski Z., Magier M.: Przeciwpancerne pocisk podkalibrowy. Patent – Polska, nr P 371649, 2004.
- [4] Włodarczyk E., Jackowski A., Michalowski J., Piętaszewski J.: Analiza parametrów materiałowych i technologicznych determinujących właściwości spiekanych penetratorów z osnową wolframową, Biul. WAT, Vol. XLVII, Nr. 5, 1998, s. 63÷78.
- [5] Витман Ф. Ф., Златин Н. А.: О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании (Состояние и теория вопроса), Журнал Технической Физики (ЖТФ), 33, 8, 1963.
- [6] Hohler, V., Stilp, A.J.: Aeroballistic and Impact Physics Research at EMI: An Historical Overview, International Journal of Impact Engineering, Vol.17 (1995), pp. 785÷805.
- [7] Church P., Davies A.: Development and validation of model for penetration in hydrocodes, VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII, CIMNE, Barcelona, 2005.
- [8] Goldthorpe B.: A Path Dependent Model of Ductile Fracture, Jnl de Physique IV 7: (C3), 1997, pp. 705÷710.
- [9] Lundberg P.: Interface Defeat and Penetration Two Modes of Interaction between Metallic Projectiles and Ceramic Targets, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, 2004.
- [10] Johnson G.R., Cook W.H.: A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. Proc. 7<sup>th</sup>. Int. Symp. Ballistics, 1983, pp. 541÷547.
- [11] Holmquist T.J., Johnson G.R.: Response of silicon carbide to high velocity impact. J. Appl. Phys. **91**(9), 2002, pp. 5858÷5866.
- [12] Johnson G.R., Holmquist T.J.: Response of boron carbide to high velocity impact. J. Appl. Phys. **85**(12), 1999, pp. 8060÷8073.
- [13] Jach K., Owsik J., Świerczyński R.: Modelowanie trójwymiarowych efektów towarzyszących zjawisku wybuchowego formowania pocisków, Materiały z VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej, Waplewo, 2006, s. 392÷408.
- [14] Jach K, Świerczyński R., Wilk Z.: Modelling of perforation process of wellbore pipes of geological Wells Using shaped charge, Journal of Technical Physics, 45, 1, 2004, pp. 31÷54.
- [15] Jach K, Świerczyński R., Wiśniewski A.: Computer simulation of catching of explosively propelling metal fragments by protective casing, Journal of theoretical and Applied Mechanics, No.1, Vol. 42, 2004.
- [16] Wiśniewski A.: Pancerze. Budowa, projektowanie i badanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.

*Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006-2008 jako projekt badawczy rozwojowy nr R 00 018 02.*