Biuletyn WAT
Vol. LVIII, Nr 3, 2009

Numeryczna weryfikacja parametrów materiałowych ceramiki Al_2O_3

KAROL JACH, ROBERT ŚWIERCZYŃSKI, MARIUSZ MAGIER[1]

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2
[1]Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zakład Uzbrojenia Artyleryjskiego,
05-220 Zielonka, ul. Prymasa Stefana Wyszyńskiego 7

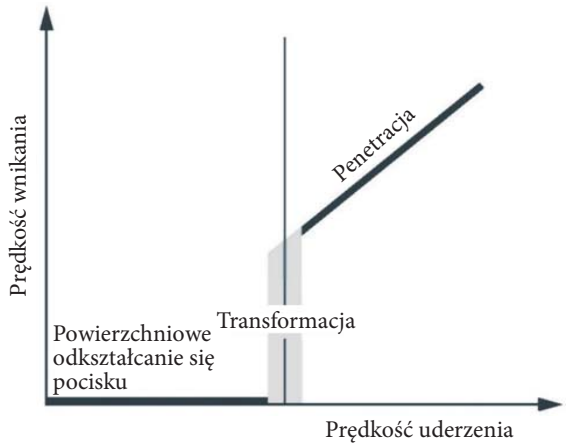
Streszczenie. W pracy przedstawiono porównanie wyników analiz numerycznych procesów penetracji pancerzy jednorodnych i kompozytowych pociskami kinetycznymi z wynikami przeprowadzonego eksperymentu, celem określenia i weryfikacji parametrów materiałowych Al_2O_3. Na podstawie niestacjonarnego, przestrzennie dwuwymiarowego (o symetrii osiowej), fizyczno-numerycznego modelu, umożliwiającego komputerową symulację procesu penetracji pancerza stalowego i kompozytowego przez kinetyczny pocisk, wykonano szereg obliczeń numerycznych, dotyczących modelowania procesu penetracji pancerzy. Modelowanie wykonano metodą punktów swobodnych. Uzyskano dużą zgodność wyników symulacji numerycznych z przytaczanymi wynikami eksperymentalnymi dobierając parametry opisujące zachowanie się ceramiki w warunkach silnych, dynamicznych obciążeń. Wyniki przeprowadzonych analiz posłużą (w kolejnych pracach) do opracowania modelu penetracji pancerza kompozytowego przez czołgowe pociski podkalibrowe z penetratorem segmentowym.
Słowa kluczowe: balistyka końcowa, penetracja, penetrator segmentowy, ceramika, pancerz kompozytowy
Symbole UKD: 623.52

1. Wprowadzenie

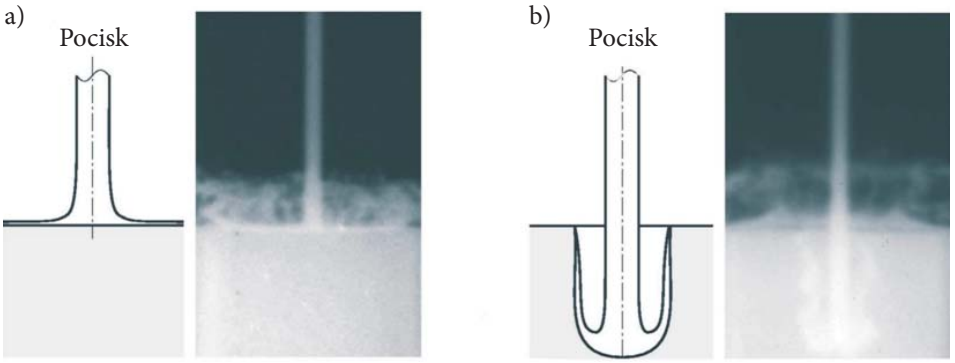
Materiały ceramiczne już od ponad 30 lat stanowią podstawowy materiał konstrukcyjny pancerzy kompozytowych wozów bojowych. Pomimo kruchości i niskiej odporności na rozciąganie wykazują wysoką odporność na ściskanie nawet po uszkodzeniu. Zarówno dla uszkodzonego, jak i nieuszkodzonego elementu

ceramicznego jego wytrzymałość rośnie wraz ze zwiększaniem się oddziałującego na element ciśnienia. Zjawisko to zostało udokumentowane w pracach [1, 2].

Podstawowymi typami materiałów ceramicznych używanych w pancerzach kompozytowych są: alumina (Al_2O_3), węglik boru (B_4C), węglik krzemu (SiC) oraz dwuborek tytanu (TiB_2) [3-9]. Wartości ich twardości i odporności na kruche pękanie mają bezpośredni wpływ na graniczną prędkość uderzenia pocisków kinetycznych, dla których zachodzi transformacja zjawiska powierzchniowego odkształcania się pocisku (*interface defeat*), skutkującego brakiem penetracji w pancerz (rys. 1.1 i 1.2) [10]. Szczególnie dzięki zdolności struktury materiałowej ceramiki do tłumienia propagacji i wzrostu szczelin w wyniku wzrostu oddziaływującego ciśnienia możliwym jest zwiększanie ww. granicznej prędkości uderzenia [11-13].



Rys. 1.1. Schemat procesów powierzchniowego odkształcania się pocisku i zjawiska penetracji, zależnych od prędkości uderzenia pocisku w pancerz [13]



Rys. 1.2. Symulacje i zdjęcia rentgenowskie z badań procesów: powierzchniowego odkształcania się pocisku (a) i zjawiska penetracji (b) [13]

Złożoność problematyki symulacji komputerowych procesów penetracji pancerzy kompozytowych wynika z konieczności uwzględnienia wielu zagadnień balistyki końcowej, a w tym takich parametrów pocisku i pancerza, jak: masa, prędkość uderzenia, kształt wierzchołka pocisku, powierzchnia kontaktu, warunki brzegowe oraz charakterystyki materiałowe [14, 15]. Wyznaczenie tych ostatnich wymaga przeprowadzenia szeregu badań teoretycznych i eksperymentalnych. Uzyskanie pakietu danych materiałowych (stałych, współczynników, charakterystyk itp.) pozwoli na przeprowadzenie procesów symulacyjnych mających na celu optymalizację konstrukcji np. pocisków kinetycznych, celem zwiększenia zdolności przebicia pancerzy stalowo-ceramicznych (kompozytowych). Dlatego też podjęto i przedstawiono w niniejszej pracy badania przedmiotowe, aby określić parametry materiałowe aluminy Al_2O_3, które wykorzystane zostaną w kolejnych pracach teoretyczno-eksperymentalnych dotyczących procesów penetracji pancerzy kompozytowych.

2. Model matematyczno-fizyczny — równania problemu

Do opisu zachowania się metali i ceramiki w warunkach silnych, dynamicznych obciążeń występujących przy penetracji pancerza przez pocisk zastosowano model ciała sprężysto-plastycznego. Przytoczymy go w pełnej, zwartej formie.

Układ równań wyrażający prawa zachowania (symetria osiowa) ma następującą postać [18, 19, 20, 21]:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{\mathrm{w}} = 0 \tag{2.1}$$

$$\rho \frac{d\vec{w}}{dt} = \nabla \cdot \hat{\sigma} \tag{2.2}$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \hat{\sigma} \cdot \nabla \vec{w} \tag{2.3}$$

$$\overset{\nabla}{S}_{ik} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ik} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{ii} \delta_{ik} \right). \tag{2.4}$$

Warunek plastycznego płynięcia dla metali przyjęto w postaci Miesesa:

$$S_{ij} S_{ij} \leq \frac{2}{3} Y^2. \tag{2.5}$$

Równanie stanu dla metali przyjęto w postaci:

$$p = k_1 x + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \gamma \rho e \tag{2.6}$$

$$x = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_S}, \quad k_2 = 0 \quad \text{dla} \quad x < 0. \tag{2.7}$$

Dla ceramiki równanie stanu ma postać:

$$p = k_1 x + \gamma \rho e. \tag{2.8}$$

Temperaturę metalu można wyznaczyć ze związku

$$T = 300 \frac{e_0 - e}{e_{00}} \tag{2.9}$$

$$e_0 = e_{00} + e_{01} x + e_{02} x^2 + e_{03} x^3 + e_{04} x^4. \tag{2.10}$$

Do opisu właściwości wytrzymałościowych stosowany był zmodyfikowany model wykorzystujący elementy modeli Steinberga-Guinana i Johnsona-Cooka [17, 21-23], który dla metali ma postać:

$$Y = \left[\mathrm{A} + \mathrm{B} \cdot \left(\varepsilon^p \right)^n \right] \cdot \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_*^{\,p} \right) \cdot \left(1 - T_*^m \right) \cdot F\left(\rho_S \right) \tag{2.11}$$

$$\left[\mathrm{A} + \mathrm{B} \cdot \left(\varepsilon^p \right)^n \right] \le Y_{\max} \tag{2.12}$$

$$Y = 0 \quad \text{dla} \quad T > T_m \tag{2.13}$$

$$\mu = \mu_0 \left(1 - T_*^m \right) \cdot F\left(\rho_S \right) \tag{2.14}$$

$$\varepsilon^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\left(\varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{zz}^p \right)^2 + \left(\varepsilon_{rr}^p - \varepsilon_{\varphi\varphi}^p \right)^2 + \left(\varepsilon_{zz}^p - \varepsilon_{\varphi\varphi}^p \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\varepsilon_{rz}^p \right)^2 \right]^{1/2} \tag{2.15}$$

$$F\left(\rho_S \right) = \begin{cases} 1 & \text{dla} \quad \rho_S \ge \rho_{S1} \\ \dfrac{\rho_S - \rho_{S2}}{\rho_{S1} - \rho_{S2}} & \text{dla} \quad \rho_{S2} \le \rho_S < \rho_{S1} \\ 0 & \text{dla} \quad \rho_S < \rho_{S2} \end{cases}. \tag{2.16}$$

Ograniczenie własności wytrzymałościowych przez powstające szczeliny modelowano, mnożąc Y, μ przez odpowiednią funkcję $G_1(V_c)$:

$$Y^T = Y \cdot G_1(V_c), \quad \mu^T = \mu \cdot G_1(V_c), \quad (k_1, k_2, k_3)^T = (k_1, k_2, k_3) \cdot G_1(V_c). \tag{2.17}$$

Funkcję $G_1(V_c)$ przyjmowano w postaci

$$G_1(V_c) = 1 - \rho V_c. \tag{2.18}$$

Jeśli chodzi o model wytrzymałościowy ceramiki, to zdecydowano się na zmodyfikowany model Mohra-Coulomba, który w zależności od przyjętych współczynników może opisywać procesy plastyczno-kruchego lub praktycznie czysto kruchego zniszczenia. Ma on następującą postać:

$$Y = (Y_0 + \alpha p)\frac{1}{1+\alpha_V V_c^*}\frac{1}{1+\alpha_Y \varepsilon^p} F(\rho_s) F_1(\sigma_{HEL,} p^*) \tag{2.19}$$

$$Y \le Y_{\max} \tag{2.20}$$

$$F_1(\sigma_{HEL,} p^*) = \begin{cases} 1 & \text{dla} \quad p^* < \sigma_{HEL} \\ 0 & \text{dla} \quad p^* \ge \sigma_{HEL} \end{cases} \tag{2.21}$$

$$\mu = \mu_0 F(\rho_s). \tag{2.22}$$

Układ równań opisujący dynamikę wzrostu objętości szczelin, zarówno dla metali, jak i dla ceramiki, przyjmowano tak jak w zmodyfikowanym modelu Fortowa [24, 25, 26]:

$$\frac{dV_c}{dt} = -k\,\mathrm{sign}(p) \cdot \left[|p| - \sigma_0\right](V_c + V_{c0}) \quad \text{dla} \quad |p| \ge \sigma_0 \tag{2.23}$$

$$\frac{dV_c}{dt} = 0 \quad \text{dla} \quad |p| < \sigma_0 \tag{2.24}$$

$$\frac{1}{\rho} = V_c + \frac{1}{\rho_s}, \tag{2.25}$$

gdzie dla metalu:

$$\sigma_0 = \sigma_{00} \cdot F(\rho_S) \cdot H(\varepsilon^p) \cdot (1 - T_*^m) G(V_c) \tag{2.26}$$

$$G\left(V_c\right)=\frac{V_{c1}}{V_{c1}+V_c} \tag{2.27}$$

$$H\left(\varepsilon^p\right)=\exp\left(-\psi\ \varepsilon^p\right), \tag{2.28}$$

a dla ceramiki odpowiednio

$$\sigma_0=\sigma_{00}\frac{1}{1+\beta_V V_c^*}\frac{1}{1+\beta_Y\varepsilon^p}F\left(\rho_s\right)F_1\left(\sigma_{HEL},p^*\right). \tag{2.29}$$

Oznaczenia wielkości występujących w równaniach: t — czas; ρ — gęstość; $\mathbf{w}$ — wektor prędkości masowej odpowiednio wzdłuż współrzędnych r,z; p — ciśnienie; e — energia wewnętrzna; T — temperatura; ρ_s — gęstość fazy ciałostałowej; $\hat{\sigma}$ — tensor naprężeń; S_{ik} — składowe dewiatora tensora naprężeń; $\overset{\nabla}{S}_{ik}$ — pochodna Jaumanna; Y — granica plastyczności; μ — moduł ścinania; ε_{ik}^p — składowe tensora deformacji plastycznej; $\dot{\varepsilon}_{ik}$ — składowe tensora prędkości deformacji; ε^p — ekwiwalentna deformacja plastyczna; V_c — objętość właściwa szczelin; $T_*=\left(T-T_0\right)/\left(T_m-T_0\right)$, T_0 oraz T_m — temperatura początkowa i temperatura topnienia; p^* — maksymalne ciśnienie jakie wystąpiło w wybranym elemencie ośrodka; V_c^* — maksymalna objętość szczelin jaka wystąpiła w wybranym elemencie ośrodka.

Występujące w równaniach (2.1-2.29): k_1, k_2, k_3, e_{00}, e_{01}, e_{02}, e_{03}, e_{04}, γ, ρ_0, ρ_{S1}, ρ_{S2}, n, m, A, B, C, μ_0, σ_{00}, Y_0, $Y_{\max}$, T_m, k, V_{c1}, V_{c0}, α, σ_{HEL}, ψ, a_v, a_y, β_v, β_y — stałe współczynniki.

Charakterystyki metali zastosowanych w obliczeniach

W tabelach 2.1 i 2.2 zamieszczono wartości współczynników występujących w modelu fizycznym dla elementów metalowych — wykorzystywanych przy modelowaniu zjawiska penetracji kompozytowego pancerza [16, 17, 21, 22, 23, 27, 28, 29].

Charakterystyki ceramiki zastosowanej w obliczeniach

Dużym problemem okazało się określenie współczynników w modelu wytrzymałościowym ceramiki. Brak danych dla aluminy Al_2O_3 w modelu Mohra-Coulomba stanowił trudność, którą autorzy postanowili przezwyciężyć poprzez weryfikację rozwiązań z eksperymentem. Wykorzystując omówiony wcześniej model matematyczno-fizyczny oraz kod komputerowy, zbudowany na podstawie

Tabela 2.1

Wartości współczynników występujących w równaniu stanu, modelu tworzenia się szczelin i modelu Johnsona-Cooka dla stali

Materiał — Stal									
Współczynnik	$\rho_0 \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	k_1 [GPa]	k_2 [GPa]	k_3 [GPa]	$e_{00} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{01} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{02} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{03} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{04} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$
Wartość	7,9	164,8	312,4	564,9	–1,34	–2,908	1,012	2,051	2,901
Współczynnik	γ_0	A [GPa]	B [GPa]	C [GPa]	m	n	$Y_{\max}$ [GPa]	T_{m0} [$10^3 K$]	$k \left[\frac{1}{\mathrm{Pa} \times \mathrm{s}}\right]$
Wartość	2,17	0,455	0,237	0,006	1	0,37	1,0	1,793	0,25
Współczynnik	σ_{00} [GPa]	$V_{C0} \left[10^{-5} \times \frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g}}\right]$	$V_{C1} \left[\frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g}}\right]$	μ_0 [GPa]	$\rho_{S1} \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	$\rho_{S2} \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	Ψ		
Wartość	2,0	1,27	0,01	77,0	6,87	5,84	1		

Tabela 2.2

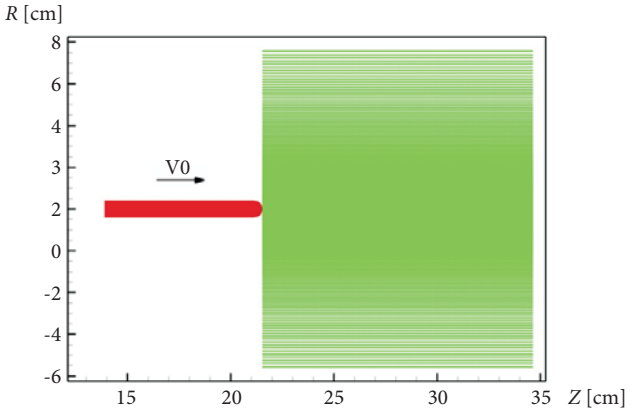
Wartości współczynników występujących w równaniu stanu, modelu tworzenia się szczelin i modelu Johnsona-Cooka dla stopu wolframowego

Materiał — Wolfram									
Współczynnik	$\rho_0 \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	k_1 [GPa]	k_2 [GPa]	k_3 [GPa]	$e_{00} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{01} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{02} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{03} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$	$e_{04} \left[10^2 \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$
Wartość	17,3	285,0	484,0	762,0	–0,407	–0,627	0,8068	1,336	1,604
Współczynnik	γ_0	A [GPa]	B [GPa]	C [GPa]	m	n	$Y_{\max}$ [GPa]	T_{m0} [$10^3 K$]	$k \left[\frac{1}{\mathrm{Pa} \times \mathrm{s}}\right]$
Wartość	1,54	1,506	0,177	0,016	1	0,12	2,0	1,723	0,25
Współczynnik	σ_{00} [GPa]	$V_{C0} \left[10^{-5} \times \frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g}}\right]$	$V_{C1} \left[\frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g}}\right]$	μ_0 [GPa]	$\rho_{S1} \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	$\rho_{S2} \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	Ψ		
Wartość	2,0	1,27	0,01	144,0	15,0	12,8	1		

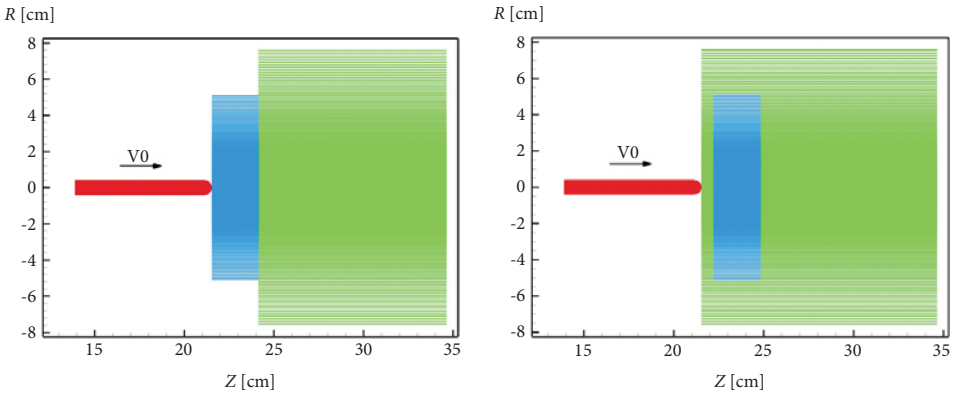
metody punktów swobodnych, wykonano szereg testowych obliczeń numerycznych dotyczących modelowania procesu penetracji kompozytowego pancerza przez kinetyczny pocisk wolframowy.

W testowych rozwiązaniach dobierano współczynniki, tak aby uzyskać najlepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Posłużono się wynikami pracy [30].

Wykonano kilkanaście testowych analiz numerycznych dla trzech konfiguracji wykorzystywanych w eksperymentach jak na rysunkach 2.1-2.2 oraz dwóch różnych prędkości penetratora: 1,52 km/s oraz 1,79 km/s. Pozwoliło to określić współczynniki występujące w modelu ceramiki tak, że uzyskano dużą zgodność



Rys. 2.1. Konfiguracja A, dla której przeprowadzono badania eksperymentalne w pracy [30]. Wolframowy pentrator o czole hemisferycznym uderza w blok stalowy. Promień penetratora — 0,381 cm, jego długość — 7,62 cm. Cylindryczny blok zrobiony ze stali 4340 ma średnicę 15,2 cm



Rys. 2.2. Konfiguracja B (lewy rysunek) i C (prawy rysunek), dla których przeprowadzono badania eksperymentalne w pracy [30]. Płytka z aluminy ma grubość 2,586 cm i średnicę 10,16 cm. Parametry penetratora i pancerza stalowego takie jak w konfiguracji A

z eksperymentem dotyczącym głębokości penetracji pancerza kompozytowego. Wartości ustalonych współczynników przedstawiono w tabeli 2.3.

Tabela 2.3

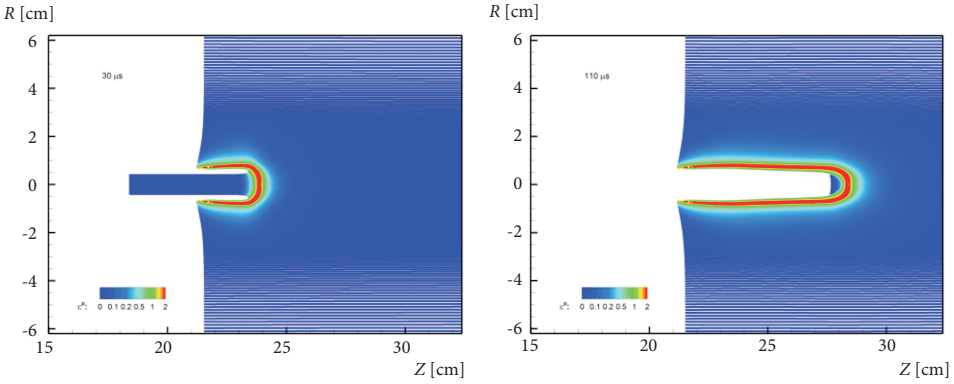
Parametry układu dla wybranych, testowych wariantów obliczeniowych

Numer wariantu	Parametry układu	P			Uwagi
		eksperyment [30]	analizy numeryczne [30]	analizy numeryczne autorów	
T1	konfiguracja A, prędkość pocisku 1,52 km/s	0,87	0,78	0,88	Rys. 2.3
T2	konfiguracja B, prędkość pocisku 1,52 km/s	0,93	0,85	0,94	Rys. 2.4
T3	konfiguracja B, prędkość pocisku 1,79 km/s	1,16	1,04	1,14	Rys. 2.5
T4	konfiguracja C, prędkość pocisku 1,52 km/s	0,87	0,84	0,93	Rys. 2.6 nie uwzględniono oddziaływania zniszczonych resztek pancerza na penetrator
T4A	konfiguracja C, prędkość pocisku 1,52 km/s	0,87	–	0,8	Rys. 2.7 uwzględniono ddziaływanie zniszczonych resztek pancerza na pocisk

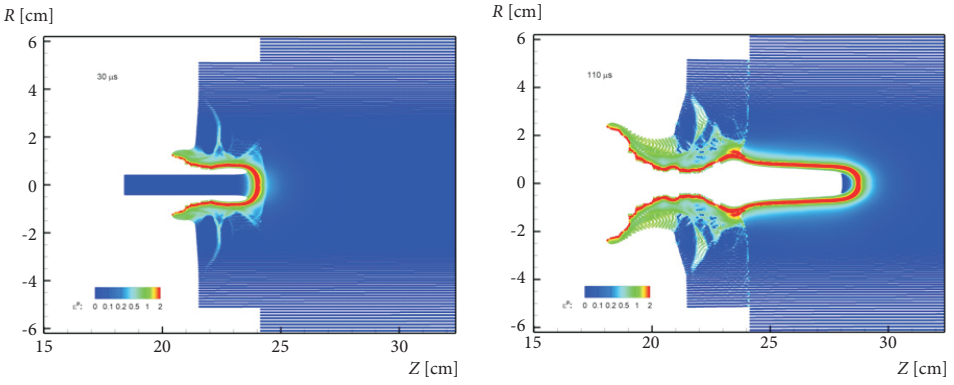
Przykładowe wyniki analiz numerycznych (warianty obliczeniowe T1-T4A), dla wybranych konfiguracji [30] i wyznaczonych współczynników w modelu ceramiki, przedstawiono na rysunkach 2.3-2.7. Dla każdego wariantu pokazano sekwencje czasowe rozkładu ekwiwalentnej deformacji plastycznej. Szczegółowe dane dotyczące parametrów przyjętych w testach obliczeniowych zaprezentowano w tabeli 2.3. Zamieszczono w niej również wartość przebicia P, zdefiniowanego w sposób następujący:

$$P = \frac{L_t}{L_p}, \tag{2.30}$$

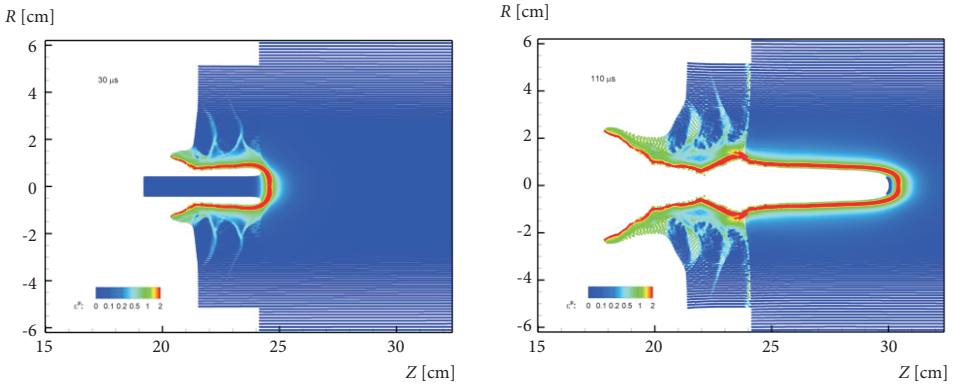
gdzie: L_t — całkowita głębokość penetracji; L_p — długość pocisku.



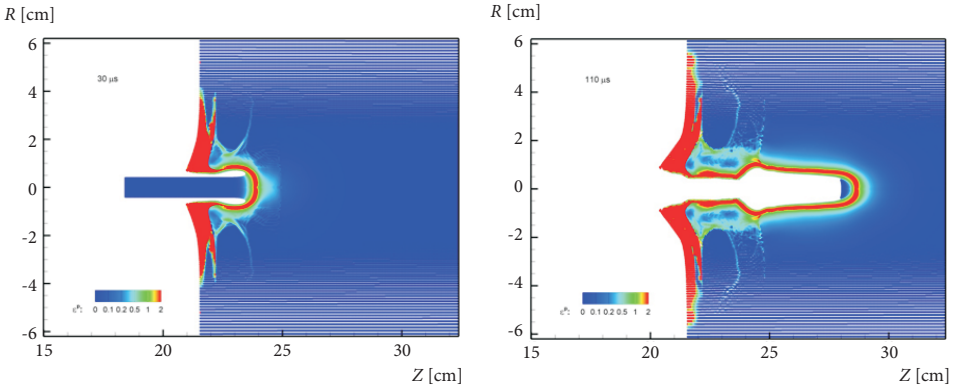
Rys. 2.3. Wyniki analizy numerycznej penetracji stalowego pancerza przez jednorodny pocisk wolframowy napędzony do prędkości 1520 m/s (wariant T1). Czasowa sekwencja rozkładu ekwiwalentnej deformacji plastycznej dla czasów 30 µs oraz 110 µs



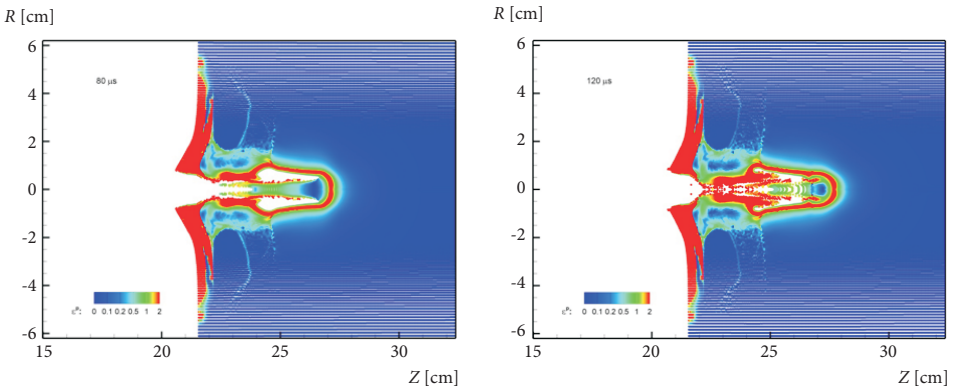
Rys. 2.4. Wyniki analizy numerycznej penetracji ceramiczno-stalowego pancerza przez jednorodny pocisk wolframowy napędzony do prędkości 1520 m/s (wariant T2). Płytka ceramiczna leży swobodnie na bloku stalowym. Czasowa sekwencja rozkładu ekwiwalentnej deformacji plastycznej dla czasów 30 µs oraz 110 µs



Rys. 2.5. Wyniki analizy numerycznej penetracji ceramiczno-stalowego pancerza przez jednorodny pocisk wolframowy napędzony do prędkości 1790 m/s (wariant T3). Płytka ceramiczna leży swobodnie na bloku stalowym. Czasowa sekwencja rozkładu ekwiwalentnej deformacji plastycznej dla czasów 30 µs oraz 110 µs



Rys. 2.6. Wyniki analizy numerycznej penetracji kompozytowego pancerza przez jednorodny pocisk wolframowy napędzony do prędkości 1520 m/s (wariant T4). W wariancie tym złożono, że nie zachodzi oddziaływanie fragmentów ceramiki, pocisku i stali z końcowym odcinkiem penetratora. Czasowa sekwencja rozkładu ekwiwalentnej deformacji plastycznej dla czasów 30 µs oraz 110 µs



Rys. 2.7. Wyniki analizy numerycznej penetracji kompozytowego pancerza przez jednorodny pocisk wolframowy napędzony do prędkości 1520 m/s (wariant T4A). W wariancie tym złożono, że zachodzi oddziaływanie fragmentów ceramiki, pocisku i stali z końcowym odcinkiem penetratora. Czasowa sekwencja rozkładu ekwiwalentnej deformacji plastycznej dla czasów 80 μs oraz 120 μs

Przebicie *P* określa zdolność pancerza do zatrzymania określonego pocisku kinetycznego. Mała wartość *P* — dobre własności ochronne pancerza, duża wartość *P* — słaba zdolność pancerza do wyhamowania penetratora. W przypadku pancerzy kompozytowych porównuje się najczęściej wartość *P* z wielkością, jaką uzyskuje się dla adekwatnego pancerza jednorodnego wykonanego ze stali RHA.

3. Wnioski

Z analizy uzyskanych rozwiązań testowych T1-T3 wynika, że wyznaczone współczynniki modelu fizycznego ceramiki (tab. 2.4) pozwalają na uzyskanie dobrej zgodności modelowania komputerowego z eksperymentem [30], jeśli chodzi o przebicie *P* (błąd około 1%). Nieco mniejszą dokładność uzyskano w przypadku wariantu T4(A). Uwzględnienie w obliczeniach oddziaływania resztek pancerza w obszarze ukształtowanego wcześniej krateru z końcową częścią pocisku obarczone jest pewnym błędem, wynikającym ze zbyt silnego numerycznego oddziaływania cząstek pancerza na pocisk (wariant T4A). Wynika to z tego, że numeryczny opis ośrodka mocno pofragmentowanego ma bardzo przybliżony charakter. Brak oddziaływania elementów pancerza modelowano, eliminując numerycznie elementy uderzające w pocisk, co powodowało uzyskanie większej od rzeczywistej głębokości penetracji.

Orientacyjny wynik symulacji dla wariantu T4 można oszacować jako średni pomiędzy wartościami 0,93 (T4) i 0,8 (T4A), czyli 0,865, co jest wartości zbliżoną do eksperymentalnej.

Tabela 2.4

Wartości wyznaczonych współczynników w równaniu stanu, modelu tworzenia się szczelin i modelu zniszczenia dla aluminy

Materiał — Alumina						
Współczynnik	$\rho_0 \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	$\alpha_\nu \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	α_y	$V_{c0} \left[\frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g}}\right]$	$K \left[\frac{1}{\mathrm{Pa{\times}s}}\right]$	Y_0 [GPa]
Wartość	3,98	1000	1000	0,003	0,05	3,73
Współczynnik	α	$\beta_V \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	β_Y	$\rho_{S1} \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	$\rho_{S2} \left[\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}\right]$	σ_{00} [GPa]
Wartość	0,2	1000	1000	3,9	0	0,3
Współczynnik	γ	$Y_{\max}$ [GPa]	σ_{HEL} [GPa]	k_1 [GPa]	μ_0 [GPa]	
Wartość	1,16	6,0	11,2	214,9	13,75	

Wyniki przeprowadzonych analiz posłużą (w kolejnych pracach) do opracowania modelu penetracji pancerza kompozytowego przez czołgowe pocisku podkalibrowe z penetratorem segmentowym.

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

Artykuł wpłynął do redakcji 13.03.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2009 r.

LITERATURA

[1] T. J. Holmuquist, G. R. Johnson, *Modelling Prestressed ceramic and its effect on Ballistic Performance*, Int. J. Impact Eng., 31, 2005, 113-127.

[2] K. Weber, M. El-Raheb, V. Hohler, *Experimental Investigation on The Ballistic Performance of Layered AIN Ceramic Stacks.*, Reinecke WG, editor. Proceedings of The 18th International Symposium On Ballistics, San Antonio, TX: Technomic, 1999, 1247-54.

[3] E. Medvedovski, *Alumina Ceramics for Ballistic Protection*, Am. Ceram. Soc. Bull, 81, 3, 2002, 27-32.

[4] E. Medvedovski, *Alumina Ceramics for Ballistic Protection*, Am. Ceram. Soc. Bull, 81, 4, 2002, 45-50.

[5] E. Chin, Army, *Focused Research Team on Functionally Graded Armor Composites*, Materials Science and Engineering, A259, 1999, 155-161.

[6] V. Parameswaran, et al, *New Approach for Improving Ballistic Performance of Composite Armor*, Experimental Mechanics, 39, 2, 1999, 103-110.

[7] P. Karandikar, M. Aghajanian, B. Morgan, *Complex Net-Shape Ceramic Components for Structural, Lithography Mirror and Armor Applications*, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 1994, 561-567.

[8] S. R. Skaggs, *A Brief History of Ceramic Armor Development*, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 24, 3, 2003, 337-349.

[9] D. Ray, et al., *Hardness/Toughness Relationship for SiC Armor*, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 24, 3, 2003, 401-410.

[10] M. Magier, *Metody oszacowania głębokości przebicia pancerza przez pociski kinetyczne*, Biul. PTU WITU, nr 1, 2007, z. 101, Zielonka, 2007.

[11] G. E. Hauver, P. H. Netherwood, R. F. Benck, L. J. Kecskes, *Ballistic Performance of Ceramic Targets*, Army Symposium on Solid Mechanics, USA, 1993.

[12] G. E. Hauver, P. H. Netherwood, R. F. Benck, L. J. Kecskes, *Enhanced Ballistic Performance of Ceramic Targets*, 19th Army Science Conference, USA, 1994.

[13] P. Lundberg, B. Lundberg, *Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials*, International Journal of Impact Engineering, 31, 2005, 781-792.

[14] P. D. Smith, J. G. Hetherinton, *Blast and Ballistic Loading of Structures*, London, Butterworth Heinemann Ltd, 1994.

[15] S. Abrate, *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press, 1998.

[16] K. Jach, *Modelowanie komputerowe zjawisk kumulacyjnych*, WAT, Warszawa, 1990.

[17] K. Jach, R. Świerczyński i in., *Modelowanie komputerowe dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 2001.

[18] S. Kaliski, Cz. Rymarz, K. Sobczyk, E. Włodarczyk, *Waves*, PWN, Warsaw & Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokio, 1992.

[19] W. K. Nowacki, *Zagadnienia falowe w teorii plastyczności*, PWN, Warszawa, 1974.

[20] P. Perzyna, *Teoria lepkoplastyczności*, PWN, Warszawa, 1966.

[21] M. L. Wilkins, *Modelling the behaviour of materials, Structural impact and crashworthiness*, 2, London and New York, 1984.

[22] D. J. Steinberg, S. G. Cochran, M. W. Guinan, *A constitutive model for metals applicableat high-strain rate*, J. Appl. Phys., 51, 1980, 1498.

[23] D. J. Steinberg, C. M. Lund, *A constitutive model for strain rates from 10^4 to $10^6 s^{-1}$*, J. Appl. Phys., 65, 1989, 1528.

[24] V. A. Agurejkin i in., *Teplofiziceskie i gazodinamiceskie problemy protivometeoritnoj zascity kosmiceskogo apparata „Vega"*, Teplofizika Vysokih Temperatur, 22, 5, 1984.

[25] G. I. Kanel, V. E. Fortov, *Mehaniceskie svoistva kondensirovannyh sred pri intensivnyh impulsnyh vozdejstviah*, Uspehi mehaniki, 10, 3, 1987.

[26] S. G. Sugak, G. I. Kanel, V. E. Fortov, A. L. Ni, B. G. Stelmah, *Cislennoe modelirovanie dejstvia vzryva na zeleznuju plitu*, FGV, 19, 20, 1983.

[27] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, *Determination of constans and comparison of results for various constitutive models*, J. Physique III, 1, 1991.

[28] P. D. Church, I. Cullis, *Development and application of high strain rate constitutive models in hydrocodes*, J. Physique III, 1, 1991.

[29] B. D. Goldthorpe, *Constitutive equations for annealed and explosively shocked iron for application to high strain rates and large strains*, J. Physique III, 1, 1991.

[30] C. E. Anderson Jr, J. D. Walker, J. Lankford, *Investigations of the ballistic response of brittle materials*, Technical Report Sw RI Project 06-5117/002, November 1995.

K. JACH, R. ŚWIERCZYŃSKI, M. MAGIER

Numerical verification of Al_2O_3 characteristics

Abstract. In this paper, we present the comparison between experimental and simulation results concerning the steel and ceramic armour penetrated by kinetic projectiles. On the base of these calculations, the Al_2O_3 characteristics were determined. It is shown that using this method (free particle method) we have obtained good consistency of the theoretical and experimental results. Determined Al_2O_3 characteristics will be used during the next investigations of the composite armour penetrated by kinetic projectiles.

Keywords: terminal ballistic, penetration, segmented penetrator, ceramic, composite armour
Universal Decimal Classification: 623.52