

Leszek Flis
Marek Sperski
Akademia Marynarki Wojennej

OCENA WPŁYWU KSZTAŁTU WIERZCHOŁKA POCISKU NA PROCES PRZEBIJANIA PANCERZY STALOWYCH

STRESZCZENIE

Posługując się licencjonowanymi programami komputerowymi, opartymi na metodzie elementów skończonych, przeprowadzono symulacje numeryczne procesu przebijania odkształcalnego pancerza przez sztywne pociski o takich samych masach i średnicach, lecz różnych kształtach wierzchołków. Przyjęto, że pancerz jest zbudowany z materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem nieliniowym według modelu Johnsona-Cooka. Rezultaty obliczeń przebijania pancerzy o różnych grubościach pociskami fabrycznymi o obłym kształcie wierzchołka potwierdzono eksperymentalnie. Na podstawie symulacji numerycznych wyznaczono wartości liczbowe współczynników oporu występujących w równaniach ruchu pocisku bazujących na kilku odmiennych modelach analitycznych.

Słowa kluczowe:

balistyka, pancerze, metody analityczne, symulacja komputerowa, eksperyment.

WSTĘP

W równaniach ruchu sztywnego pocisku wnikającego prostopadle w odkształcalną półprzestrzeń wpływ kształtu pocisku na przebieg wnikania uwzględniany jest zazwyczaj poprzez wprowadzenie odpowiedniego współczynnika oporu [2, 4, 8, 9]. Często stosowany model obliczeniowy oparty jest na założeniu, że wypadkowa siła działająca na pocisk o kształcie obrotowo-symetrycznym, przeciwna do kierunku ruchu, składa się z części stałej F_0 i z części F_2 , zależnej od prędkości v pocisku oraz gęstości ρ materiału pancerza:

$$F_2 = k \frac{\rho v^2}{2} \pi R^2, \quad (1)$$

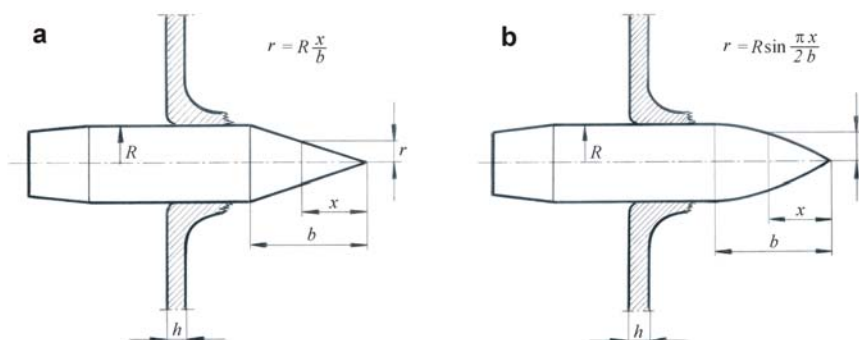
gdzie:

R — promień największego przekroju poprzecznego pocisku;

k — bezwymiarowy współczynnik oporu kształtu.

Równanie (1) przedstawia znany z mechaniki płynów wzór do obliczenia siły oporu czołowego ciała stałego przemieszczającego się w płynie lepkim. Liczni autorzy prac z zakresu balistyki końcowej zalecają przyjmowanie wartości liczbowych współczynnika k , wyznaczonych na podstawie pomiarów oporu ciał o różnych kształtach, umieszczonych w przepływach wody lub powietrza [7] bądź też za pomocą empirycznych wzorów opartych na takich pomiarach [8]. Jednak bezpośrednie wprowadzenie określonych w ten sposób współczynników oporu do obliczeń przebijania tarcz stalowych o skończonych grubościach (rzędu 1–4 średnicy pocisku), nie znalazło potwierdzenia eksperymentalnego [4].

Z połowy XX wieku pochodzi model obliczeniowy stworzony do opisu przebijania cienkich panczerzy zbudowanych z materiału idealnie sprężysto-plastycznego, ostrzeliwanych przez sztywne pociski o kształtach i wymiarach wierzchołków przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Kształty i wymiary pocisków przebijających cienkie panczerze:
a — pocisk z wierzchołkiem stożkowym; b — z wierzchołkiem owalnym

Źródło: opracowanie własne.

Określenie cienki pancierz oznacza, że jego grubość jest znacznie mniejsza od promienia pocisku. Założenie, że praca W , wykonana przez pocisk uderzający o pancierz z prędkością początkową v_p , podczas wybijania w panczerzu otworu

o objętości $\pi R^2 h$, składa się z pracy potrzebnej do uplastycznienia tej objętości materiału oraz z pracy sił bezwładności na przemieszczeniu uplastycznionego materiału o gęstości ρ , w kierunku normalnym do powierzchni pocisku, prowadzi do wzoru [2, 8]:

$$W = \pi R^2 h \left[\frac{R_e}{2} + k_1 \rho \left(\frac{R}{b} v_p \right)^2 \right] \quad (2)$$

gdzie:

k_1 — bezwymiarowy współczynnik kształtu;

R_e — granica plastyczności materiału.

Współczynnik k_1 przyjmuje wartość 1, gdy wierzchołek pocisku ma kształt stożka obrotowego (rys. 1a) oraz wartość 1,86, gdy ma on kształt owalny o przekroju pokazanym na rysunku 1b. Poprzez przyrównanie przyrostu energii kinetycznej pocisku o masie m do wyznaczonej w ten sposób pracy można obliczyć prędkość v_k pocisku po przebiciu pancerza:

$$v_k^2 = v_p^2 - \frac{2W}{m} \quad (3)$$

oraz największą prędkość v_B , zwaną granicą balistyczną, przy której pocisk ten zostanie przez pancerz zatrzymany:

$$v_B = \sqrt{\frac{2W}{m}}. \quad (4)$$

Porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych za pomocą wzorów (2), (3) przebijania pancerzy stalowych o grubościach 8–32 mm pociskami fabrycznymi kalibru 12,7 mm z rezultatami eksperymentu [3] wykazało różnice sięgające kilkudziesięciu procent w ocenie prędkości końcowych v_k pocisku oraz różnice przekraczające 250% w ocenie grubości pancerza odpornego na przebicie. Ujawnione rozbieżności skłaniają do podjęcia badań nad bliższym rozpoznaniem zjawisk towarzyszących przebiciu pancerzy o skończonych grubościach, najczęściej stosowanych w praktyce. Narzędziem do takiego rozpoznania może się okazać metoda elementów skończonych, rozwijana od kilkudziesięciu lat w licznych ośrodkach badawczych na świecie.

SYMULACJE KOMPUTEROWE

W obliczeniach opartych na metodzie elementów skończonych (MES) posłużono się dwoma licencjonowanymi programami komputerowymi: LS-DYNA opracowanym w kalifornijskim ośrodku firmy Livermore Software Technology Corporation [5] oraz ANSYS AUTODYNA rozwijanym przez międzynarodową fundację Century Dynamics (od 2005 ANSYS) z główną siedzibą w podlondyńskim Horsham [1]. Przyjęto, że pancierz ostrzeliwany prostopadle przez nieodkształcalne pociski jest zbudowany z materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem nieliniowym według modelu Johnsona i Cooka:

$$\sigma_{pl} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right), \quad (5)$$

gdzie

σ_{pl} , ε , $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\varepsilon}_0$ — odpowiednio: zredukowane (wg hipotezy Hubera-Misesa) naprężenia plastycznego płynięcia, zredukowane odkształcenia plastyczne oraz zredukowane prędkości odkształcenia plastycznego;

A , B , C , n — stałe współczynniki wyznaczane za pomocą eksperymentów.

Zastosowane w programie kryterium zniszczenia wiąże się z potrzebą doświadczalnego określenia kolejnych stałych materiałowych: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , występujących we wzorze na zredukowane odkształcenie zniszczenia. Przyjmuje się, że materiał nie ulega zniszczeniu, dopóki wartość $D = 1.0$ wg kryterium:

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^f},$$

przy czym ε^f określone jest jako:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma}) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right), \quad (6)$$

gdzie

$\sigma = \sigma_m / \sigma_{red}$ — bezwymiarowy iloraz, w którym σ_m oznacza naprężenie hydrostatyczne, a σ_{red} naprężenia zredukowane wg hipotezy Hubera-Misesa.

Wartości liczbowe wymienionych współczynników, charakteryzujących właściwości fizyczne materiału pancierza, wyznaczono na podstawie pomiarów

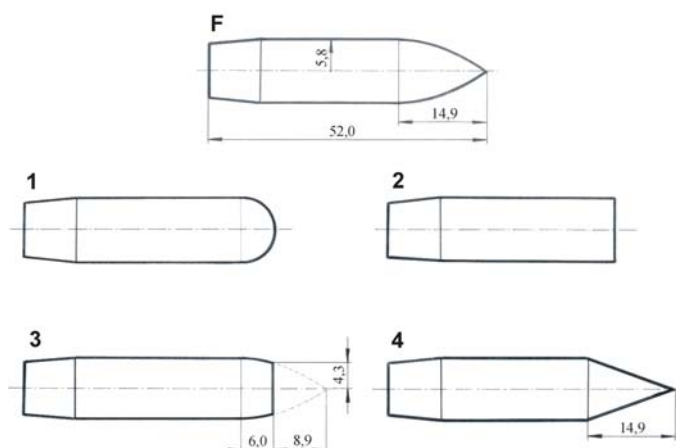
przeprowadzonych w laboratorium wytrzymałościowym Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn przy Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni oraz na podstawie serii eksperymentów połączonych z przestrzeliwaniem stalowych próbek zamontowanych na wahadle balistycznym, wyposażonym w odpowiednie przyrządy pomiarowe [7]. Istota eksperymentu sprowadzała się do przestrzeliwania fabrycznymi pociskami karabinowymi 12,7 mm stalowych próbek o grubościach zmieniających się (co 2 mm) od 8 do 32 mm oraz pomiarów prędkości pocisku przed i za przestrzeloną próbką. Szczegóły dotyczące kształtu, budowy i wymiarów pocisku (o masie $m = 4,96 \cdot 10^{-2}$ kg) podano w pracy [3].

Próbki, w postaci krążków o średnicy 120 mm, wspartych w wahadle balistycznym na tulei o średnicy wewnętrznej 100 mm, wykonano z okrętowej stali konstrukcyjnej o symbolu 10GHMBA, gęstości $\rho = 7830 \text{ kg/m}^3$, module sprężystości $E = 2,09 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, współczynnika Poissona $\nu = 0,3$, granicy plastyczności $R_e = 695 \text{ MPa}$, statycznej wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 758,5 \text{ MPa}$ oraz statycznej wytrzymałości na ścinanie $R_r = 438 \text{ MPa}$.

Modele obliczeniowe przestrzeliwanych krążków podzielono, zależnie od grubości próbek, na 3194–5732 ośmiowęzłowych bryłowych elementów skończonych. Liczba węzłów przy takim podziale wyniosła odpowiednio od 3792 do 6654. Obliczenia, wykonane odrębnie za pomocą wymienionych wyżej programów, wykazały dobrą zgodność z eksperymentem [3] po wprowadzeniu następujących stałych materiałowych: $A = R_e = 695 \text{ MPa}$; $B = 510 \text{ MPa}$; $C = 0,014$; $n = 0,26$; $D_1 = 0,05$; $D_2 = 3,44$; $D_3 = -2,12$; $D_4 = 0,002$. Symulacje komputerowe ujawniły ponadto znacznie większe obszary uplastycznienia materiału podczas przebijania pancerzy (rys. 3–5), niż przyjęto w modelu analitycznym prowadzącym do wzoru (2).

Wyznaczone w powyższy sposób wartości liczbowe współczynników określających właściwości materiału pancerza przyjęto za podstawę komputerowych symulacji procesu przebijania tarcz sztywnymi pociskami o innych kształtach wierzchołków, lecz takich samych masach i średnicach jak opisane pociski fabryczne. Badaniom poddano modele pocisków o kształtach i wymiarach pokazanych na rysunku 2. Wyniki obliczeń prędkości pocisków po przebiciu pancerzy o różnych grubościach, uzyskane za pomocą programów komputerowych LS-DYNA i ANSYS-AUTODYNA, przedstawiono w tabeli 1.

Na rysunkach 3–5 pokazano rozkłady naprężeń zredukowanych w materiale pancerza w trzech wybranych chwilach procesu wnikania sztywnego pocisku w odkształcalny pancerz. W obszarach uplastycznienia materiału wartości naprężeń zredukowanych przekraczają 695 MPa.



Rys. 2. Kształty i wymiary pocisków poddanych badaniom:
 F — fabryczny; 1 — z wierzchołkiem półkulistym; 2 — walcowy;
 3 — z wierzchołkiem ściętym; 4 — z wierzchołkiem stożkowym

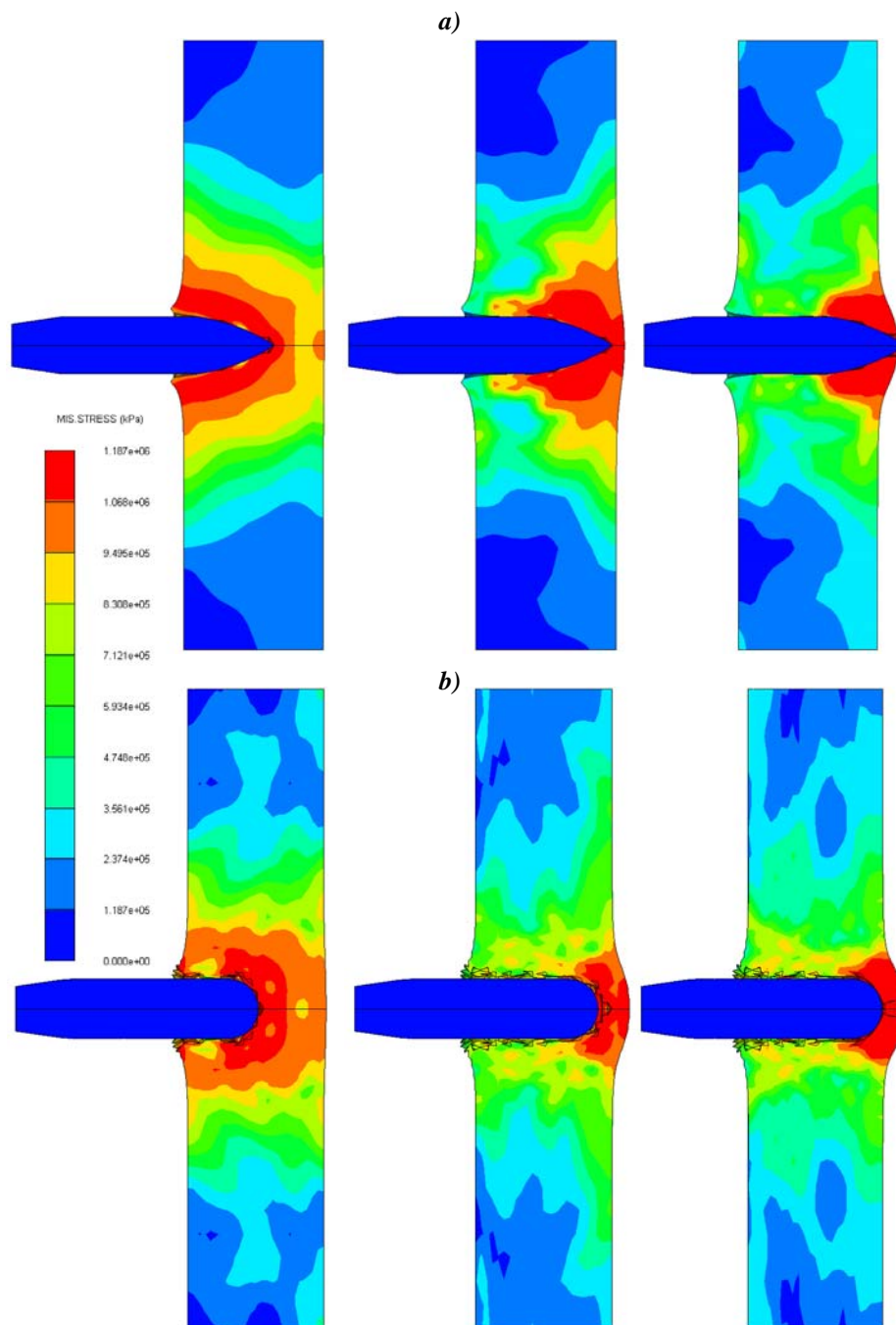
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Rezultaty pomiarów oraz obliczeń MES prędkości pocisków o różnych kształtach wierzchołków po przebiciu stalowych pancerzy o różnych grubościach

Grubość próbki h [mm]	Prędkość początkowa pocisku v_p [m/s]	Prędkość końcowa (pomiar)	Prędkość końcowa (MES)	Prędkość końcowa (MES)	Prędkość końcowa (MES)	Prędkość końcowa (MES)	Prędkość końcowa (MES)
		v_k [m/s]	v_k [m/s]	v_k [m/s]	v_k [m/s]	v_k [m/s]	v_k [m/s]
		F	F	1	2	3	4
8	825,3	704	723	721	653	713	729
10	823,7	605	690	702	607	679	709
12	826,0	575	655	675	562	647	686
14	822,3	547	618	641	520	612	657
16	825,0	535	578	605	469	577	625
18	823,0	517	540	567	421	535	595
20	822,3	504	415	510	336	490	560
22	825,3	478	452	426	165	443	519
24	824,7	402	393	324	0	369	479
26	823,7	350	316	220	–	249	427
28	824,7	221	227	108	–	0	379
30	822,7	116	131	0	–	–	330
31	822,7	–	0	–	–	–	298
32	824,7	0	–	–	–	–	270
34	824,7	–	–	–	–	–	200
36	824,7	–	–	–	–	–	100
37	824,7	–	–	–	–	–	0

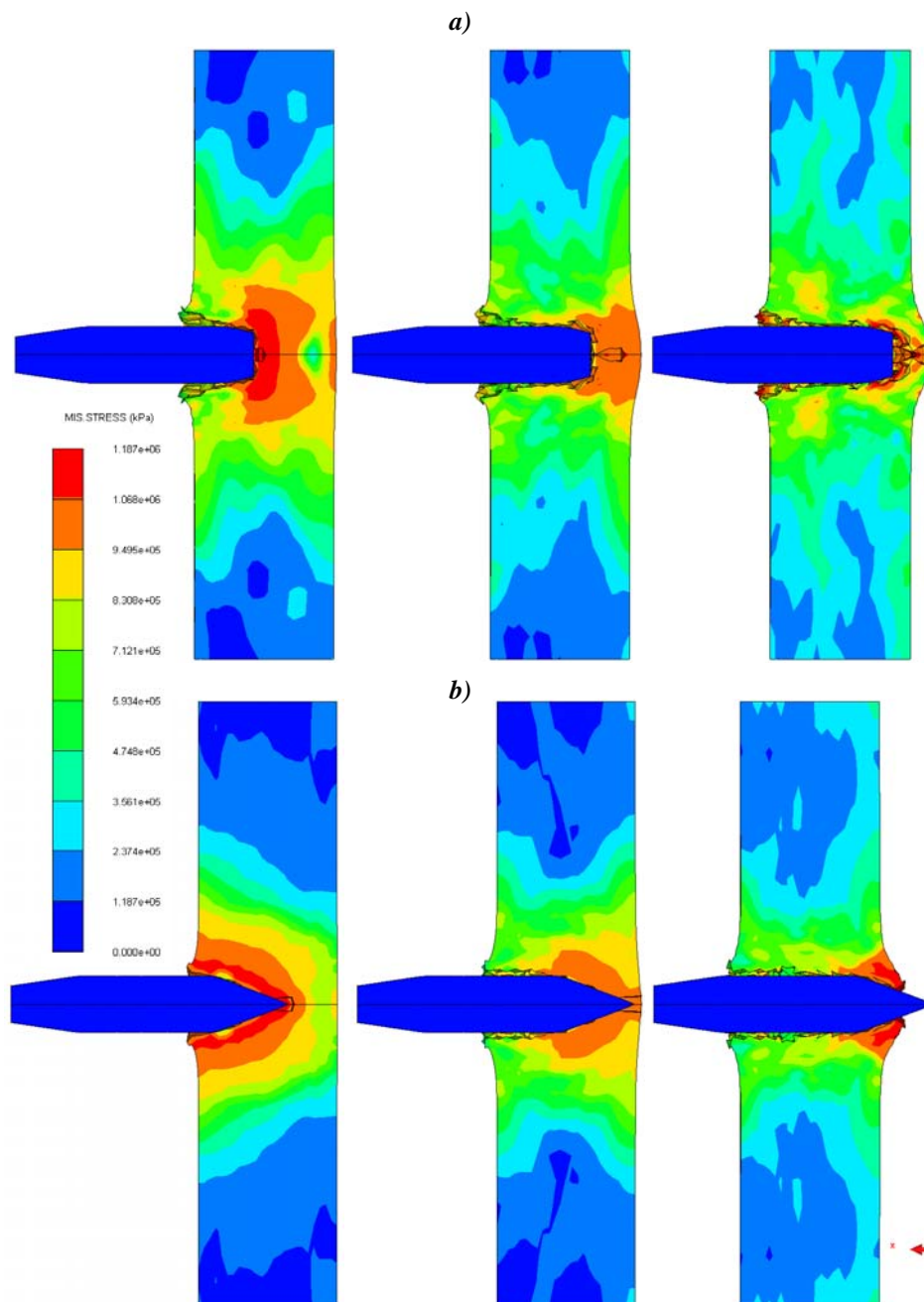
F — pocisk fabryczny; 1 — pocisk z wierzchołkiem półkulistym; 2 — pocisk walcowy; 3 — pocisk z wierzchołkiem płasko ściętym; 4 — pocisk z wierzchołkiem stożkowym.

Źródło: opracowanie własne.



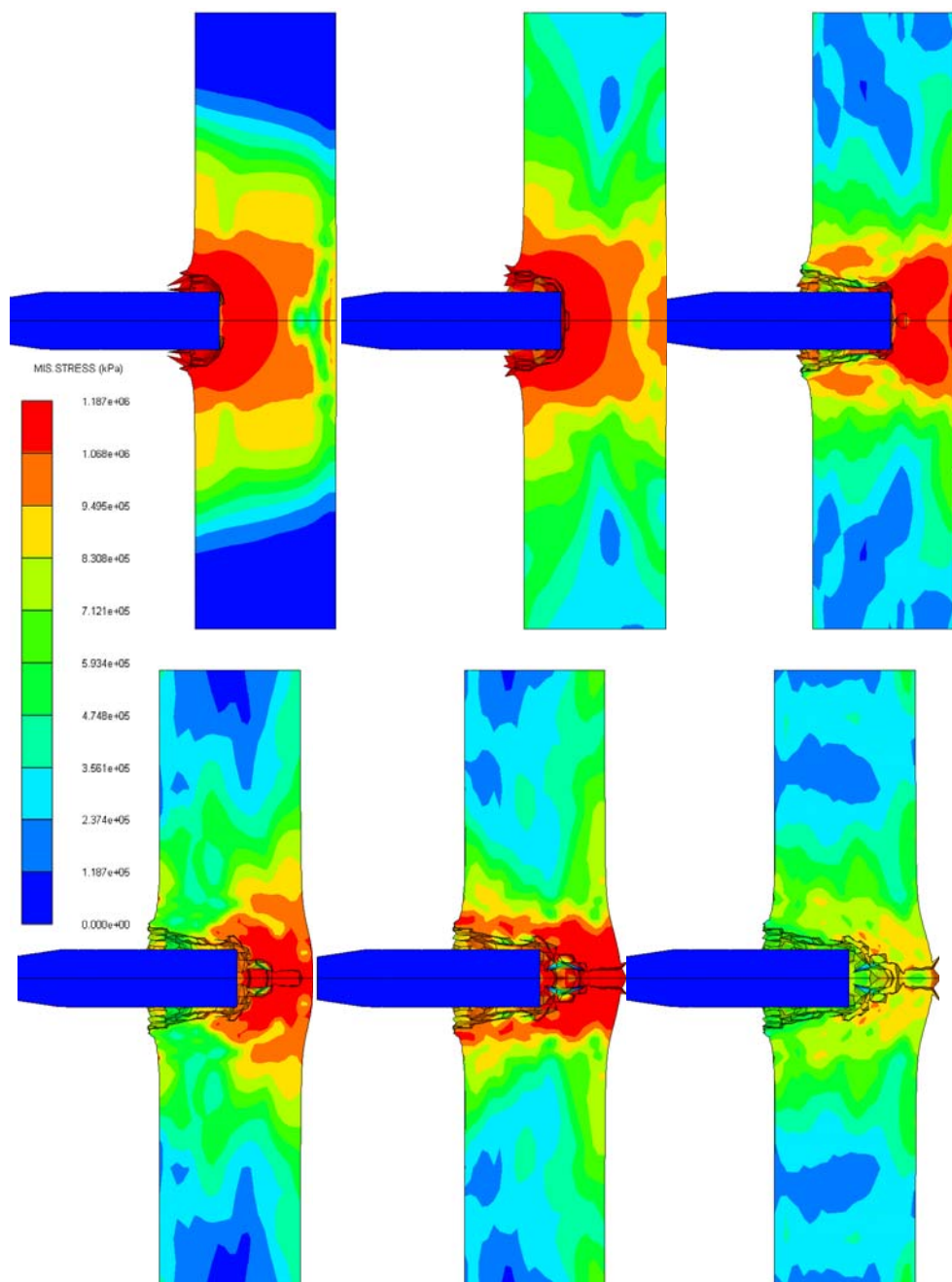
Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych w materiale tarczy podczas penetracji pociskiem o kształcie wierzchołka: a) fabrycznym; b) półkulistym

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych w materiale tarczy podczas penetracji pociskiem:
a) płasko ściętym; b) z wierzchołkiem stożkowym

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych w materiale tarczy podczas penetracji pociskiem walcowym

Źródło: opracowanie własne.

MODELE ANALITYCZNE

Rezultaty obliczeń przeprowadzonych metodą elementów skończonych mogą posłużyć do wyznaczenia współczynników oporu kształtu występujących w przydatnych do projektowania wzorach opartych na prostszych modelach fizycznych. Należą do nich wzory umożliwiające obliczenie prędkości końcowej v_k pocisku o masie m i średnicy d po przebiciu pancerza o grubości h zbudowanego z materiału o gęstości ρ (omówione w pracach [3, 4]):

$$v_k^2 = v_0^2 - \frac{2\pi h^2 d}{m + m_1} R_\tau \alpha, \quad (7)$$

gdzie:

$$m_1 = \rho \frac{\pi d^2}{4} h; \quad ; \quad v_0 = \frac{m}{m + m_1} v_p,$$

v_p — prędkość początkowa pocisku w chwili uderzenia o pancerz;

$R_\tau = 0,577R_m$ — wytrzymałość na ścinanie materiału pancerza, wyznaczona z próby statycznego rozciągania,

α — współczynnik kształtu wierzchołka pocisku;

$$v_k^2 = \left(v_p^2 + \frac{F_0}{F_2} \right) e^{-\frac{2hF_2}{m}} - \frac{F_0}{F_2}, \quad (8)$$

gdzie:

e — podstawa logarytmu naturalnego;

F_0, F_2 — stałe współczynniki;

$$v_k^2 = v_p^2 - \frac{Q}{m} \left(\frac{h}{d} \right)^n, \quad (9)$$

ze współczynnikami Q, m , wyznaczanymi eksperymentalnie.

Wzory (7), (8) są rozwiązaniem różniczkowego równania ruchu sztywnego pocisku: $m \frac{dv}{dt} = F_2 v^2 + F_0$ (pierwszy przy założeniu $F_2 = 0$). Równanie (9) przedstawia tzw. wzór de Marre'a z końca XIX wieku, oparty na założeniu, że siła działająca na pocisk podczas przebijania pancerza składa się ze stałego oporu czołowego oraz stałego oporu tarcia na powierzchni bocznej pocisku.

Wartości liczbowe bezwymiarowego współczynnika α we wzorze (7), zależnego od kształtu wierzchołka pocisku, można wyznaczyć, znając minimalną grubość h pancerza (o gęstości ρ i wytrzymałości na ścinanie R_t) odpornego na przebicie pociskiem o masie m i średnicy d , uderzającym w pancerz z prędkością początkową v_p . W trzeciej kolumnie tabeli 2. przedstawiono wartości współczynników α , dla różnych kształtów wierzchołków pocisku, otrzymane poprzez podstawienie do wzoru (7) wartości h i v_p , odpowiadających prędkościom $v_k = 0$ z tabeli 1.

Tabela 2. Współczynniki kształtu wierzchołków pocisków 12,7 mm przebijających pancerze ze stali 10GHMBA

	Kształt wierzchołka pocisku	α	F_0 [N]	F_2 [N(m/s) ²]	Q [GPa]	n
F	fabryczny	0,630	519271	0,066512	6,98580	-0,04444
1	półkulisty	0,664	535833	0,071	6,44839	0,08514
2	płaski	1,250	651624	0,250	9,48558	-0,06860
3	ścięty	0,786	562614	0,120	7,14872	0,05540
4	stożkowy	0,406	440260	0,040	5,72306	-0,11550

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Prędkości pocisków z wierzchołkiem półkulistym (1) oraz walcowych (2) po przebicciu pancerzy o różnych grubościach, obliczone za pomocą wzorów (7), (8), (9)

Grubość pancerza h [mm]	Prędkość początkowa pocisku v_p [m/s]	Prędkość końcowa wzór (7) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (8) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (9) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (7) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (8) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (9) v_k [m/s]
		1	1	1	2	2	2
8	825,3	693	703	721	676	653	653
10	823,7	657	668	688	631	603	604
12	826,0	624	636	657	584	555	557
14	822,3	595	594	617	549	494	497
16	825,0	547	559	582	468	437	441
18	823,0	504	514	537	394	364	368
20	822,3	459	468	490	304	277	280
22	825,3	413	423	445	176	165	166
24	824,7	357	366	386	0	0	0
26	823,7	291	297	315			
28	824,7	208	215	228			
30	822,7	8	0	1			

Źródło: opracowanie własne.

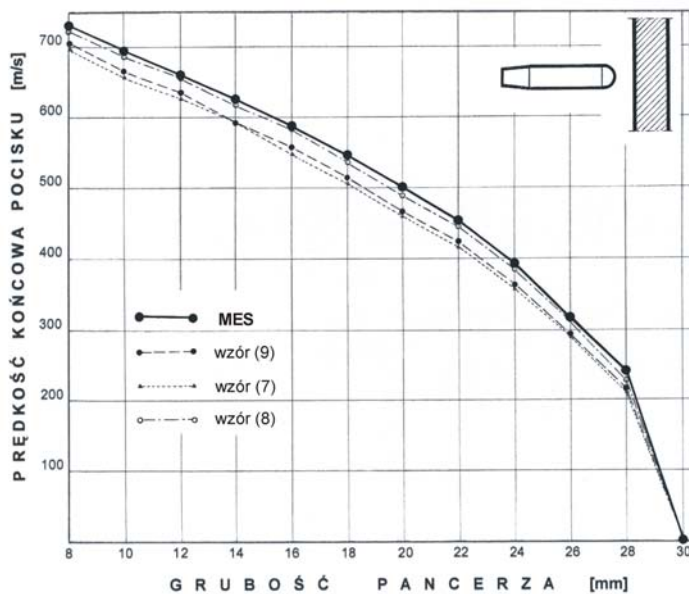
Tabela 4. Prędkości pocisków z wierzchołkiem płasko ściętym (3) oraz stożkowym (4) po przebiciu pancerzy o różnych grubościach, obliczone za pomocą wzorów (7), (8), (9)

Grubość pancerza h [mm]	Prędkość początkowa pocisku v_p [m/s]	Prędkość końcowa wzór (7) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (8) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (9) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (7) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (8) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (9) v_k [m/s]
		3	3	3	4	4	4
8	825,3	690	691	707	700	729	729
10	823,7	652	651	670	660	701	701
12	826,0	616	616	636	641	677	677
14	822,3	585	570	591	614	644	645
16	825,0	532	530	551	580	619	619
18	823,0	483	479	501	546	586	586
20	822,3	431	425	448	513	553	553
22	825,3	376	373	392	483	523	524
24	824,7	307	303	320	446	486	487
26	823,7	215	210	228	408	446	446
28	824,7	0	1	10	368	405	405
30	822,7				332	354	352
32	824,7				273	299	302
34	824,7				210	231	234
36	824,7				120	133	135
37	824,7				0	0	0

Źródło: opracowanie własne.

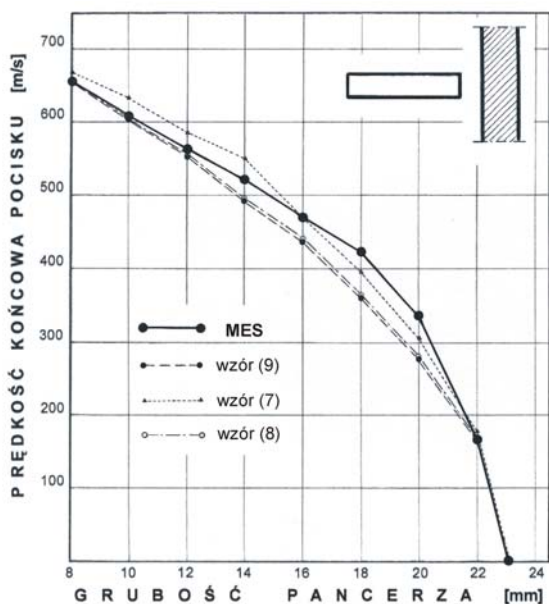
We wzorach (8), (9) występują po dwa nieznanne współczynniki. Można je wyznaczyć, podstawiając do tych równań wartości liczbowe h , v_p , odpowiadające prędkości $v_k = 0$ oraz wartości v_p , $v_k \neq 0$, odpowiadające znanej grubości h przebitego pancerza. W obu przypadkach otrzymuje się po takim podstawieniu układ dwóch równań algebraicznych z dwiema niewiadomymi. W czterech ostatnich kolumnach tabeli 2. podano wartości współczynników F_0, F_2, Q, n oporu pocisków o różnych kształtach wierzchołków, otrzymane w wyniku podstawienia do wzorów (8), (9) prędkości v_p, v_k , odpowiadających grubości przebitego pancerza $h = 8$ mm, uwidocznionych w tabeli 1.

Porównanie rezultatów obliczeń prędkości sztywnych pocisków o różnych kształtach wierzchołków, po przebiciu odkształcalnych pancerzy o różnych grubościach, przeprowadzonych metodą elementów skończonych, z wynikami obliczeń otrzymanych za pomocą wzorów (7), (8), (9) pokazano na rysunkach 6–9.



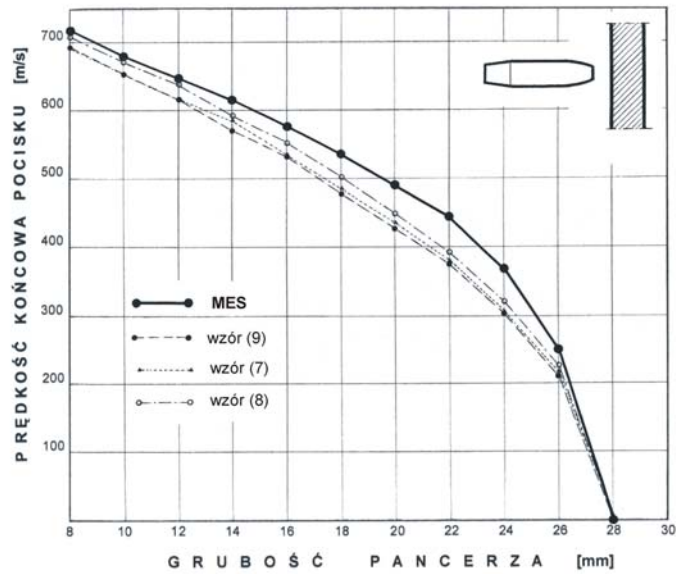
Rys. 6. Porównanie wyników obliczeń prędkości pocisku o półkulistym kształcie wierzchołka po przebiciu stalowych pancerzy o różnych grubościach

Źródło: opracowanie własne.



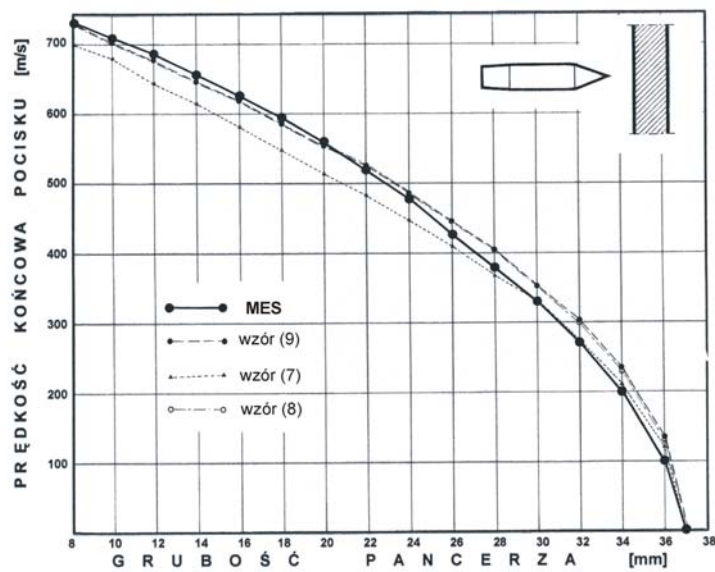
Rys. 7. Porównanie wyników obliczeń prędkości pocisku o kształcie walca kołowego po przebiciu pancerzy stalowych o różnych grubościach

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Porównanie wyników obliczeń prędkości pocisku z wierzchołkiem płasko ściętym po przebiciu pancerzy stalowych o różnych grubościach

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Porównanie wyników obliczeń prędkości pocisku z wierzchołkiem stożkowym po przebiciu pancerzy stalowych o różnych grubościach

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

Spośród badanych rodzajów sztywnych pocisków przebijających odkształcalne pancerze najbardziej skuteczny, z uwagi na możliwość przebicia pancerza, okazał się pocisk z wierzchołkiem o kształcie stożka obrotowego. Potwierdza tę właściwość cytowana we wstępie teoria dotycząca przebijania cienkich tarcz z materiału sztywno-plastycznego oraz badania eksperymentalne zespołu kanadyjskiego nad przebiciem płyt laminowanych przez stalowe bijaki [6].

Wpływ smukłości wierzchołka pocisku o kształcie owalnym (ilorazu R/b we wzorze (2)) na zdolność przebijania pancerzy stalowych o grubościach przekraczających wymiar średnicy pocisku, okazał się znacznie mniejszy niż wynikający z teorii przebijania pancerzy cienkich (2). Minimalne grubości pancerza odpornego na przebicie, zbudowanego ze stali o symbolu 10GHMBA, ostrzeliwanego prostopadle pociskiem fabrycznym ze smukłym wierzchołkiem owalnym (rys. 2.), a następnie pociskiem o takiej samej masie z wierzchołkiem półkulistym, obliczone metodą elementów skończonych, wyniosły odpowiednio 31 i 30 mm (tabela 1.).

Do wstępnego oszacowania odporności balistycznej pancerzy stalowych ostrzeliwanych prostopadle sztywnymi pociskami o różnych kształtach wierzchołków można się posłużyć prostymi modelami analitycznymi balistyki końcowej, po uprzednim wyznaczeniu występujących w tych modelach współczynników charakteryzujących kształt wierzchołka.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (Calculations were carried out at the Academic Computer Center in Gdańsk).

BIBLIOGRAFIA

- [1] *AUTODYN. Explicit Software for Nonlinear Dynamics, Theory Manual, Revision 4.3.*, Century Dynamics, Horsham, U.K. 2005.
- [2] Backman M. E., Goldsmith W., *The mechanics of penetration of projectiles into targets*, 'International Journal of Engineering Science', 1978, Vol. 16, No 1, pp. 1–99.
- [3] Flis L., Sperski M., *Badania odporności balistycznej pancerzy ze stali 10GHMBA na ostrzał pociskami 12,7 mm*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2011, nr 3, s. 27–42.

- [4] Flis L., Sperski M., *Eksperymentalna weryfikacja wybranych modeli obliczeniowych balistyki końcowej*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2011, nr 4, s. 35–44.
- [5] Hallquist J. O., *LS-DYNA Theory Manual*, LSTC 2006.
- [6] Pierson M. O., Delfosse D., Vaziri R., Poursartip A., *Penetration of laminated composite plates due to impact*, 14th International Symposium on Ballistics, Québec, Canada, 26–29 September 1993.
- [7] Szturomski B., *Badania odporności na ostrzał pociskami kalibru 12,7 mm stali 10GHMBA z wykorzystaniem wahadła balistycznego*, „Biuletyn WAT”, 2010, nr 4, s. 411–422.
- [8] Szuladzinski G., *Formulas for Mechanical and Structural Shock and Impact*, Taylor & Francis Group 2010.
- [9] Włodarczyk E., *Balistyka końcowa pocisków amunicji strzeleckiej*, t. 1, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.

ASSESSMENT OF EFFECT OF ROUND SHAPE MEPLAT ON STEEL ARMOR PEARCING

ABSTRACT

Licensed computer programs based on the finite element method were used to carry out numerical simulations of pearcing deformable armor with rigid projectiles of the same mass and diameter but different shapes of meplats. It was assumed that the armor was made of elastic-plastic material with non-linear strengthening following the Johnson-Cook model. The results of calculations of different thicknesses armor penetrating by factory-made rounds with oval-shaped meplat, were confirmed experimentally. The numerical simulations were used to determine the values of strength coefficients occurring in the equations of projectile motion, based on several different analytical models.

Keywords:

final ballistics, steel armor, analytical methods, computer simulation, experiment.