

Leszek Flis
Marek Sperski
Akademia Marynarki Wojennej

BADANIA ODPORNOŚCI BALISTYCZNEJ PANCERZY ZE STALI 10GHMBA NA OSTRZAŁ POCISKAMI 12,7 mm

STRESZCZENIE

W artykule omówiono podstawowe metody obliczeń odporności balistycznej metalowych osłon ostrzeliwanych przez sztywne pociski z prędkościami do 1200 m/s. Rezultaty obliczeń opartych na omówionych metodach oraz na symulacji komputerowej porównano z wynikami eksperymentów przeprowadzonych przy użyciu stalowych tarcz o różnych grubościach za pomocą aparatury pomiarowej zbudowanej i uruchomionej w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn AMW.

Słowa kluczowe:

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

WSTĘP

W Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni od lat dziewięćdziesiątych XX wieku prowadzone są badania nad budową i projektowaniem okrętowych osłon balistycznych chroniących wybrane obszary i pomieszczenia na okrętach oraz statkach handlowych przed ostrzałem. Po serii prac nad tworzeniem osłon odpornych na ostrzał pociskami karabinowymi kalibru 7,62 mm [16] przystąpiono do badań tarcz stalowych ostrzeliwanych pociskami o kalibrze 12,7 mm [7, 9, 10]. Przedmiotem prac omówionych w niniejszym artykule jest wstępne rozpoznanie procesu przebijania przez te pociski pancerzy wykonanych ze stali konstrukcyjnej o symbolu 10GHMBA, znajdującej zastosowanie w polskim przemyśle okrętowym, a także wskazanie metod obliczeniowych umożliwiających projektowanie osłon z badanej stali.

Prace badawcze nad odpornością balistyczną osłon pancernych prowadzone są w wielu ośrodkach na świecie od ponad 140 lat. Stworzono w tym celu co najmniej kilkadziesiąt modeli obliczeniowych opartych na różnorodnych hipotezach i znanych twierdzeniach mechaniki ośrodków ciągłych, mechaniki pęknięcia oraz metodach rozwiązywania równań ruchu bazujących na technice komputerowej. Zwięzłe omówienie większości z nich można znaleźć w pracach [2, 7, 12, 14, 15] i cytowanej w nich literaturze. Pomimo wielu badań problem przebijania pancerza przez pocisk nie został dotąd rozwiązany w sposób zapewniający wymagany margines bezpieczeństwa.

Powszechnym problemem współczesnych metod obliczeniowych oraz komercyjnych programów komputerowych oferowanych do obliczeń balistycznych są trudności w pozyskaniu liczbowych współczynników charakteryzujących dynamiczne właściwości materiałów przeznaczonych na projektowane pancerze oraz na pociski. Wyznaczenie takich współczynników wiąże się z potrzebą zastosowania kosztownej aparatury pomiarowej oraz przeprowadzenia skomplikowanych eksperymentów, a właściciele ośrodków wyposażonych w odpowiednią aparaturę na ogół nie publikują wyników swoich badań.

Tarcza i pocisk są zawsze zbudowane z materiałów odkształcalnych. Zależnie od właściwości wytrzymałościowych i fizycznych tych materiałów oraz od prędkości zderzenia procesy wnikania pocisku w pancerz różnią się pomiędzy sobą i są opisywane za pomocą różnorodnych modeli obliczeniowych. Z licznych badań wynika, że w praktycznym zakresie prędkości od 400 do 1200 m/s, gdy pociski i tarcze są metalowe, dobrą zgodność obliczeń z eksperymentem wykazują teorie, w których modelem pocisku jest ciało sztywne [2, 14, 15]. W niniejszej pracy ograniczamy się do omówienia modeli obliczeniowych opisujących przebijanie odkształcalnego pancerza przez nieodkształcalny pocisk.

METODY ANALITYCZNE

Najstarszy i najprostszy sposób oceny odporności balistycznej pancerzy, powszechnie stosowany w drugiej połowie XIX wieku, oparto na założeniu, że na sztywny pocisk o masie m i kalibrze d podczas prostopadłego przebijania pancerza działa stała siła proporcjonalna do pola powierzchni bocznej walca o średnicy d i wysokości h , równej grubości pancerza. Przyrównanie energii kinetycznej pocisku do pracy tej siły na drodze h prowadzi do wzoru umożliwiającego obliczenie minimalnej

grubości h_{\min} pancerza odpornego na przebicie, gdy znana jest prędkość v_p pocisku w chwili zderzenia [6]:

$$h_{\min} = v_p \sqrt{\frac{m}{K d}}. \quad (1)$$

Współczynnik proporcjonalności K , zależny od właściwości wytrzymałościowych materiału pancerza oraz od kształtu wierzchołka pocisku, wyznaczano doświadczalnie. Jeżeli współczynnik K jest znany, można — posługując się twierdzeniem o przyroście energii kinetycznej układu materialnego — obliczyć prędkość v_k pocisku, bezpośrednio po przebicciu pancerza o grubości $h < h_{\min}$:

$$v_k = \sqrt{v_p^2 - K \frac{h^2 d}{m}}. \quad (2)$$

Powyższe wzory prowadzą do wyników różniących się zwykle od kilkunastu do kilkudziesięciu procent od pomiarów z eksperymentu.

Jacob de Marre w pracy opublikowanej w 1866 roku założył, że siła oporu stawiana sztywnemu pociskowi przez materiał pancerza jest podczas przebijania stała i składa się z oporu tarcia na powierzchni bocznej pocisku oraz oporu czołowego [4]:

$$R = k \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{h}{d}\right)^n, \quad (3)$$

gdzie:

k, n — współczynniki stałe (n jest współczynnikiem bezwymiarowym, k ma wymiar naprężenia).

Z równania Newtona:

$$m \frac{dv}{dt} = -k \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{h}{d}\right)^n \quad (4)$$

po podstawieniu $\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$ (gdzie x jest drogą przebytą od chwili zderzenia przez środek masy pocisku) otrzymuje się wzór na obliczenie końcowej prędkości v_k pocisku po przebicciu pancerza o grubości h :

$$v_k = \sqrt{v_p^2 - \frac{Q}{m} d^2 \left(\frac{h}{d}\right)^n} h, \quad (5)$$

przy czym $Q = \frac{k\pi}{4}$.

Podstawienie $v_k = 0$ i $h = h_{\min}$ prowadzi do związku między początkową prędkością v_p pocisku a minimalną grubością h_{\min} pancerza odpornego na przebicie:

$$v_p = d \sqrt{\frac{Q}{m} \left(\frac{h_{\min}}{d}\right)^n} h_{\min}. \quad (6)$$

Posługując się wzorem (5), można obliczyć wartości współczynników Q i n , gdy znane są prędkości v_p , v_k dla dwóch różnych grubości h pancerza, pomierzonych eksperymentalnie. Pomimo daleko idących uproszczeń model de Marre'a znajduje potwierdzenie eksperymentalne, nie wyjaśnia jednak zjawisk fizycznych zachodzących podczas przebijania pancerza przez pocisk.

Rozwijany w XX wieku przez licznych badaczy model prostopadłego wnikania sztywnego pocisku w metalową półprzestrzeń bazuje na założeniu, że średnia wartość siły oporu p , z jaką uplastyczniony materiał osłony oddziałuje na pocisk, przypadająca na jednostkę powierzchni pola największego poprzecznego przekroju pocisku składa się z trzech członów [2]:

$$p = k_1 \frac{\rho v^2}{2} + k_2 v + H, \quad (7)$$

gdzie:

v — chwilowa prędkość pocisku;

ρ — gęstość materiału tarczy;

k_1, k_2, H — współczynniki równania.

Pierwszy człon prawej strony równania nawiązuje do znanego z mechaniki płynów wzoru na wartość czołowego oporu ciała stałego przemieszczającego się w płynie lepkim, drugi — oporu tarcia proporcjonalnego do prędkości, trzeci zaś, nazywany dynamiczną twardością materiału tarczy, utożsamiany jest czasem z dynamiczną granicą plastyczności, w większości prac przyjmowany jest jako stały.

Znane są cztery podstawowe postacie analitycznych rozwiązań równania ruchu sztywnego pocisku pod wpływem takiej siły:

$$m \frac{4}{\pi d^2} \frac{dv}{dt} = - \left(k_1 \frac{\rho v^2}{2} \right) + k_2 v + H \quad (8)$$

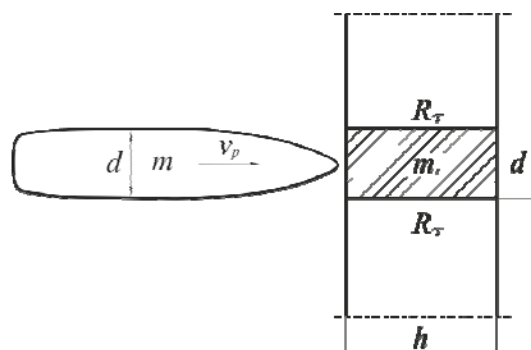
oraz wstępne analizy wpływu wartości poszczególnych współczynników na przebieg i głębokość wnikania [14]. Analizy te mają jednak charakter teoretyczny. Do praktycznych zastosowań omawianego modelu w projektowaniu pancerzy potrzebne są badania eksperymentalne.

Model wnikania sztywnego pocisku w metalową półprzestrzeń nie obejmuje efektów rozchodzenia się fal sprężystych w materiale tarczy oraz kilkakrotnego odbicia tych fal od ścian tarczy i czoła fali plastycznej, istotnych, gdy grubość tarczy nie przekracza kilkakrotnego wymiaru średnicy pocisku.

Analitycznych rozwiązań z uwzględnieniem zjawiska rozchodzenia się fal sprężystych i plastycznych w odkształcalnym pocisku doczekał się natomiast problem uderzenia płasko zakończony pręta w nieodkształcalną przegrodę. W pracy [14] przedstawiono takie rozwiązania dla przypadków, w których pocisk o kształcie walca jest zbudowany z materiału liniowo-sprężystego, sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem liniowym oraz idealnie plastycznego ze wzmocnieniem liniowym. Uproszczone rozwiązanie równania ruchu pocisku zbudowanego z materiału idealnie plastycznego, przedstawione w 1948 roku przez G. Taylora [11], oraz modyfikacje tego rozwiązania z lat późniejszych [13] dają możliwość doświadczalnego wyznaczenia dynamicznej granicy plastyczności materiału na podstawie pomiarów części pocisku trwale odkształconej w wyniku zderzenia z przegrodą. W praktyce jednak granicę tę wyznacza się przy prędkościach znacznie niższych niż rzeczywiste prędkości zderzenia z tarczą pocisków karabinowych.

Dynamiczna granica plastyczności oraz dynamiczna wytrzymałość materiału, ujawniające się pod obciążeniami udarowymi, przyjmują wartości większe od granicy plastyczności i wytrzymałości materiału na rozciąganie lub ściskanie, wyznaczonych podczas prób statycznych [10]. Uplastycznienie, a następnie zniszczenie materiału pod obciążeniem statycznym sprowadza się do przekroczenia granicznych wartości sił spójności między atomami, charakterystycznych dla badanego materiału. Obciążenie udarowe powoduje dodatkowo wprawienie w ruch cząstek materiału, stąd maksymalna siła niszcząca próbkę jest większa niż podczas pomiarów statycznych.

Model umożliwiający wstępną ocenę odporności balistycznej pancerzy stalowych, zaproponowany w pracy [8], oparty został na następujących założeniach (rys. 1.):



Rys. 1. Założenia dla modelu umożliwiającego wstępną ocenę odporności balistycznej pancerzy stalowych

Źródło: opracowanie własne.

Walcowy pocisk o masie m i średnicy d , uderzający z prędkością v_p w pancerz o grubości h , wprawia w ruch fragment materiału pancerza o masie:

$$m_1 = \rho \frac{\pi d^2}{4} h \quad (9)$$

wypełniającej walec o średnicy d i wysokości h , gdzie ρ jest gęstością materiału osłony. W myśl twierdzenia o pędzie środka masy układu materialnego, bezpośrednio po zderzeniu prędkość pocisku zmniejszy się do wartości:

$$v_0 = \frac{m}{m + m_1} v_p \quad (10)$$

Średnia wartość siły oporu działającej na pocisk wraz z wypychanym materiałem pancerza:

$$R = \pi d h R_\tau, \quad (11)$$

gdzie

R_τ — statyczna wytrzymałość materiału na ścinanie, równa $0,58 \cdot R_m$ wytrzymałości materiału pancerza wyznaczonej z próby statycznego rozciągania.

Z równania Newtona:

$$(m + m_1) \frac{dv}{dt} = -\pi d h R_\tau \quad (12)$$

otrzymuje się wzory na obliczenie:

— końcowej prędkości v_k pocisku bezpośrednio po przebicium osłony

$$v_k = \sqrt{v_0^2 - \frac{2\pi d h^2}{m + m_1} R_\tau}; \quad (13)$$

— czasu t_k przebijania pancerza przez pocisk

$$t_k = \frac{m + m_1}{\pi d h R_\tau} (v_0 - v_k); \quad (14)$$

— wyrażający związek między początkową prędkością v_p pocisku a minimalną grubością h_{\min} osłony odpornej na przebicie

$$v_p = \sqrt{(A h_{\min}^2 + B h_{\min}^3) R_\tau}, \quad (15)$$

przy czym $A = \frac{2\pi d}{m}$; $B = \frac{\rho \pi^2 d^3}{2m^2}$.

Przystosowanie wzorów (13), (14), (15) do opisu ruchu pocisku karabinowego polega na wprowadzeniu w miejsce uśrednionych naprężeń stycznych R_τ na powierzchni bocznej pocisku skorygowanej wartości $R'_\tau = \alpha R_\tau$, gdzie α jest współczynnikiem wyznaczanym doświadczalnie, charakteryzującym kształt wierzchołka pocisku.

METODY NUMERYCZNE

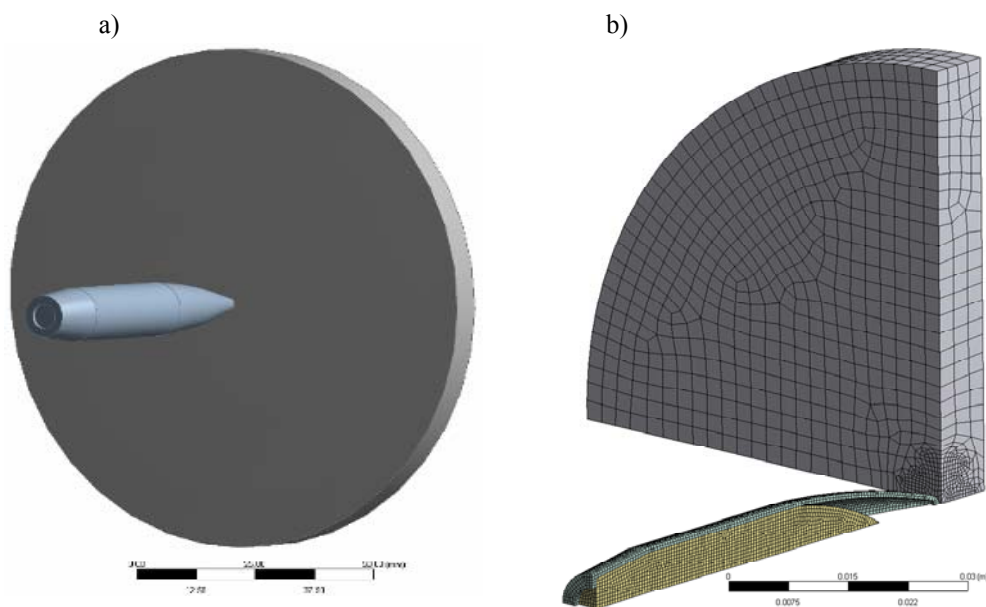
Ruch cząstek uplastycznionego materiału w pancerzu przebijanym przez pocisk odbywa się w trójwymiarowej przestrzeni. Zastosowanie praw Newtona do opisu tego ruchu prowadzi do sformułowania złożonych układów równań różniczkowych cząstkowych. Próby analitycznego całkowania tych równań kończą się niepowodzeniem [12]. Rozwój techniki komputerowej w drugiej połowie XX wieku przyczynił się do rozpowszechnienia przybliżonych metod numerycznych, których zasadniczą cechą jest zastąpienie w procesie obliczeniowym równania różniczkowego lub układu równań różniczkowych opisujących fizyczne zjawisko układem równań algebraicznych o skończonej liczbie niewiadomych. W praktycznych obliczeniach z zakresu mechaniki konstrukcji największą popularność pośród tych metod zyskała

metoda elementów skończonych (MES) [3]. Jej użycie do opisanego procesu przebijania pancerza przez pocisk wiąże się zwykle z potrzebą rozwiązania układu równań algebraicznych z kilkudziesięcioma tysiącami niewiadomych.

Efektorem prac nad rozwojem metody elementów skończonych było pojawienie się licznych użytkowych programów służących do inżynierskich obliczeń, opracowanych przez zespoły skupione w specjalistycznych ośrodkach. Część tych programów, stale rozwijanych i wzbogacanych o nowe możliwości, została również przystosowana do pracy na komputerach osobistych.

W ramach niniejszej pracy symulację komputerową zjawiska przebijania pancerza przez sztywny pocisk przeprowadzono za pomocą dwóch programów, a mianowicie: LSDYNA firmy Livermore Software Technology Corporation USA oraz ANSYS AUTODYNA[®], opracowanego i rozwijanego od 1986 roku przez fundację Century Dynamics (od 2005 r. ANSYS USA z główną siedzibą w Horsham, UK [1]).

Model przestrzeliwanej próbki (krążek o średnicy 120 mm oparty krawędzią na sztywnej tulei o średnicy wewnętrznej 100 mm) podzielono, zależnie od grubości próbki, na 3194–5732 ośmiościennych elementów skończonych z węzłami w narożach i sześcioma stopniami swobody w każdym węźle (rys. 2.). Liczba węzłów przy takim podziale wyniosła odpowiednio od 3792 do 6554.



Rys. 2. Model dyskretny pocisku i przestrzeliwanej próbki

Źródło: opracowanie własne.

Przyjęto model materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem nieliniowym zależnym od prędkości odkształcenia, zaproponowany w 1983 roku przez Johnsona i Cooka w postaci:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)], \quad (16)$$

gdzie:

- σ — naprężenie efektywne plastycznego płynięcia;
- A — granica plastyczności materiału;
- B — parametr umocnienia;
- ε — zredukowane odkształcenie plastyczne;
- n — wykładnik umocnienia;
- C — współczynnik wrażliwości materiału na prędkość odkształcenia;
- $\dot{\varepsilon}$ — zredukowana prędkość odkształcenia plastycznego, przy czym dla stali przyjęto $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$.

Zastosowane w programie kryterium zniszczenia materiału sprowadza się do eliminowania z układu elementów skończonych, dla których parametr

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\varepsilon_f} \quad (17)$$

przekroczy wartość 1, przy czym $\Delta\varepsilon$ oznacza przyrost odkształcenia plastycznego, natomiast ε_f odkształcenie zniszczenia, obliczane według wzoru:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) [1 + D_4 \ln|\dot{\varepsilon}|], \quad (18)$$

gdzie

- $\sigma^* = \sigma_m / \bar{\sigma}$ — jest bezwymiarowym ilorazem, w którym:
- σ_m — naprężenie hydrostatyczne;
- $\bar{\sigma}$ — naprężenia zredukowane wg hipotezy Hubera-Misesa;
- D_1, D_2, D_3, D_4 — stałe materiałowe wyznaczone doświadczalnie.

PORÓWNANIE METOD OBLICZENIOWYCH Z EKSPERYMENTEM

W 2009 roku zespół pracowników Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni przeprowadził serię eksperymentalnych

badania nad odpornością balistyczną pancerzy wykonanych ze stali konstrukcyjnej o symbolu 10GHMBA, ostrzeliwanych pociskami karabinowymi serii 12,7 mm. Budowę stanowiska badawczego oraz sposób przeprowadzenia pomiarów opisano w pracy [9]. Szczegóły dotyczące składu chemicznego, technologii wytwarzania, obróbki cieplnej i charakterystyk materiałowych badanej stali podano w [16]. Właściwości fizyczne i wytrzymałościowe materiału pancerza określono na podstawie pomiarów dokonanych w laboratorium Instytutu.

Tabela 1. Własności mechaniczne stali 10GHMBA [5]

Moduł Younga E [MPa]	Gęstość ρ [kg/m ³]	Współczynnik Poissona ν	Granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]
$2,09 \cdot 10^5$	7830	0,3	695,0	758,5

Istota eksperymentu sprowadza się do przestrzeliwania pociskami stalowych krążków o grubościach zmieniających się (co 2 mm) od 8 do 32 mm i średnicy 120 mm, wspartych na tulei o średnicy 100 mm zamontowanej na wahadle balistycznym oraz pomiaru prędkości pocisku przed i za przestrzeloną próbką (rys. 3. [10]).



Rys. 3. Widok wahadła balistycznego z zamontowaną próbką [10]

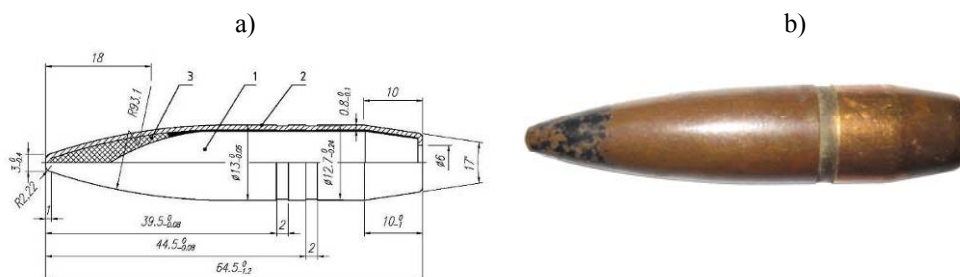
Źródło: zdjęcie wykonane przez autorów.

W tabeli 2. w kolumnach 2. i 3. podano wartości średnie z trzech kolejnych pomiarów przestrzelonych próbek o takiej samej grubości.

Tabela 2. Porównanie wyników obliczeń prędkości pocisku po przebiciu pancerza z rezultatami eksperymentu [10]

Grubość próbki h [mm]	Prędkość początkowa pocisku v_p [m/s]	Prędkość końcowa (pomiar) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (2) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (5) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wzór (13) v_k [m/s]	Prędkość końcowa wg MES v_k [m/s]
8	825,3	704	798	704	694	722
10	823,7	605	780	670	659	695
12	826,0	575	762	640	626	657
14	822,3	547	734	600	597	628
16	825,0	535	707	566	552	578
18	823,0	517	670	524	510	537
20	822,3	504	628	486	467	484
22	825,3	478	583	439	423	422
24	824,7	402	524	378	370	393
26	823,7	350	450	326	309	326
28	824,7	221	358	257	235	227
30	822,7	116	207	145	117	131
31	822,7	0	0	0	0	0
32	824,7	0	0	0	0	0

Szczegółowe wymiary oraz ogólny widok pocisków użytych do badań przedstawiono na rysunku 4. Pocisk o masie $4,96 \cdot 10^{-2}$ kg i objętości $6,02 \text{ cm}^3$ składa się z mosiężnego płaszcza o grubości 0,8 mm oraz stalowego rdzenia o długości 52 mm i masie $3,014 \cdot 10^{-2}$ kg oraz objętości $3,83 \text{ cm}^3$. Podczas przebijania mosiężny płaszcz pocisku ulegał całkowitemu zniszczeniu i zatrzymaniu w obrębie osłony. Za tarczę przedostawał się stalowy rdzeń pocisku wraz z odłamkami pancerza.



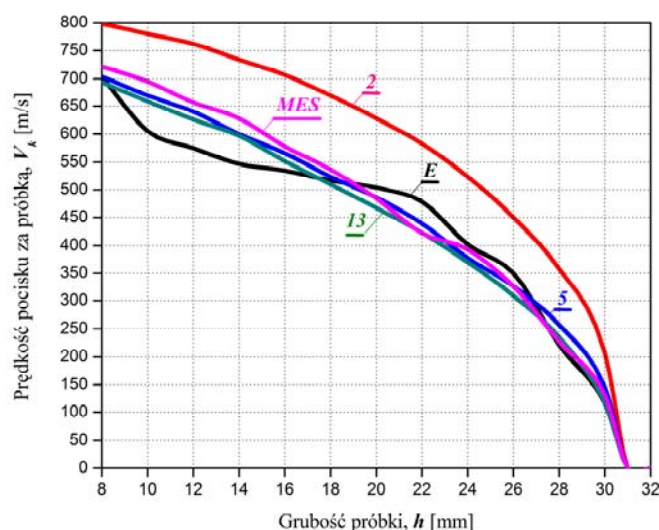
Rys. 4. Wymiary i widok pocisku użytego do badań

Źródło: opracowanie własne.

Współczynnik $K = 2,75$ GPa, charakteryzujący odporność balistyczną pancerza we wzorach (1), (2) oraz współczynnik kształtu wierzchołka pocisku $\alpha = 0,63$, korygujący wartość R_τ we wzorach (13), (14) wyznaczono na podstawie pomiarów uzyskanych z eksperymentu gdzie: minimalna grubość osłony odpornej na przebicie pociskiem o masie $m = 4,96 \cdot 10^{-2}$ kg, średnicy $d = 1,27 \cdot 10^{-2}$ m, uderzającym z prędkością 822,7 m/s w pancerz o gęstości $\rho = 7830$ kg/m³ i wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 758,5$ MPa wynosi $h_{\min} = 3,1 \cdot 10^{-2}$ m (tabela 2).

W metodach numerycznych dobór stałych materiałowych występujących w większej liczbie polega na powtarzaniu obliczeń z różnymi wartościami współczynników, aż do uzyskania zgodności z eksperymentem [12]. Pomocne w doborze tych stałych mogą być informacje opublikowane przez innych autorów. W symulacji komputerowej opartej na wzorach (16), (18), przeprowadzonej w ramach tej pracy, znana na wstępie jest tylko wartość współczynnika $A = 695$ MPa, jako granicy plastyczności wyznaczonej z próby statycznego rozciągania. Obliczenia wykonane z poniższymi wartościami pozostałych współczynników: $B = 510$ MPa; $C = 0,014$; $n = 0,26$; $D_1 = 0,05$; $D_2 = 3,44$; $D_3 = -2,12$; $D_4 = 0,002$ wykazały dobrą zgodność z eksperymentem.

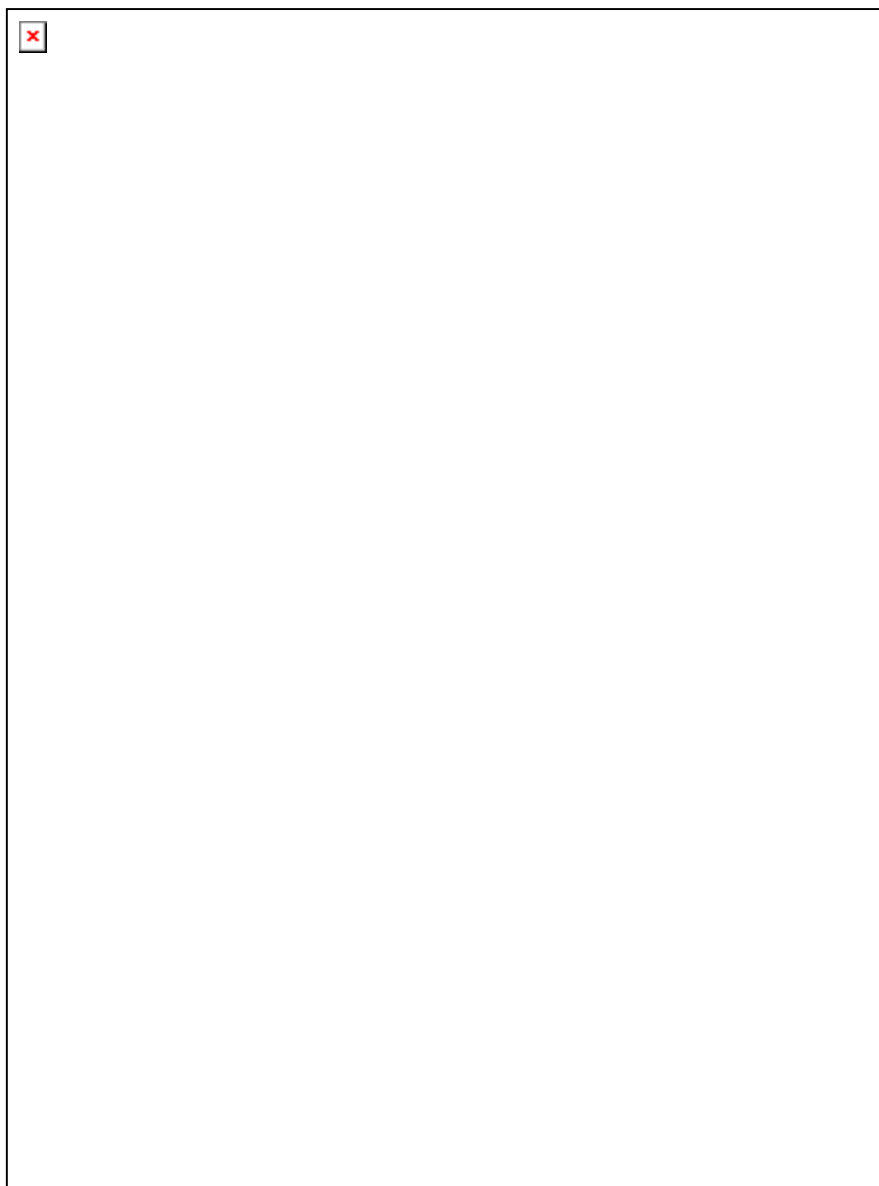
W tabeli 2. oraz w formie wykresów uwidocznionych na rysunku 5. pokazano porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych za pomocą modeli omówionych w artykule z rezultatami pomiarów eksperymentalnych.



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń prędkości końcowych pocisku po przebicciu tarcz o różnych grubościach z rezultatami eksperymentu: **E** — eksperyment, **MES** — symulacja komputerowa, **2** — według wzoru (2), **5** — według wzoru (5), **13** — według wzoru (13)

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6. przedstawia wybrane fragmenty przestrzelonych próbek oraz rozkład naprężeń zredukowanych w materiale tarczy w końcowej fazie przebijania, wyznaczony jako efekt symulacji komputerowej.



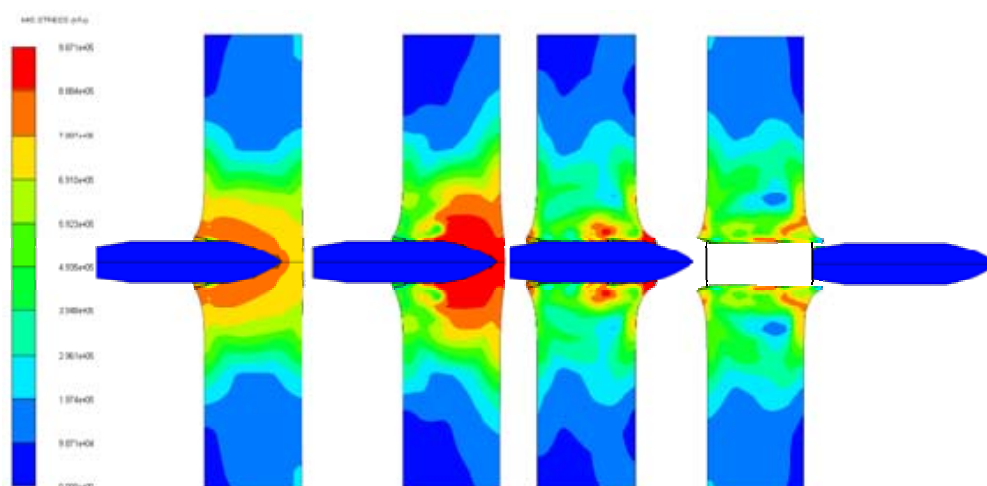
Rys. 6. Fotografie przestrzelonych próbek i rozkład naprężeń zredukowanych w końcowej fazie przebijania tarczy, wyznaczony za pomocą symulacji komputerowej
Źródło: opracowanie własne.

Obliczenia metodą elementów skończonych z zastosowaniem uproszczonego modelu materiału sprężysto-plastycznego Johnsona-Cooka prowadzą do wyników zbliżonych z prostymi modelami analitycznymi, wyrażonymi w formie wzorów (5), (13). Symulacja komputerowa dostarcza jednak dalszych informacji o odkształceniach i naprężeniach w materiale tarczy, pojawiających się w trakcie przebijania.

Sięgające kilkunastu procent różnice pomiędzy wynikami obliczeń i eksperymentu w ocenie prędkości pocisku po przebiciu tarcz o mniejszych grubościach (10–16 i 20–22 mm) mogą być spowodowane niedokładnością pomiaru zakłócanego odłamkami z przebitej tarczy oraz rozrzutem punktów trafień pocisków w tarczę (rys. 5).

Potwierdzona eksperymentalnie symulacja komputerowa oparta na metodzie elementów skończonych z zastosowaniem modelu materiału zaproponowanego przez Johnsona i Cooka stwarza możliwości dokładniejszego poznania zjawisk fizycznych towarzyszących przebijaniu odkształcalnego pancerza przez sztywny pocisk i powinna być przedmiotem dalszych badań.

Rysunek 7., również będący wynikiem komputerowej symulacji, ilustruje zmianę rozkładu naprężeń w materiale osłony w wybranych chwilach przebijania odkształcalnej tarczy przez sztywny pocisk.



Rys. 7. Zmiany rozkładu naprężeń zredukowanych w materiale tarczy podczas przebijania przez pocisk, wyznaczone za pomocą symulacji komputerowej

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

Najstarszy model obliczeniowy balistyki końcowej, oparty na przyrównaniu energii kinetycznej pocisku do pracy sił tarcia na powierzchni bocznej walca wypychanego przez pocisk (wzory 1 i 2), prowadzi do wyników znacznie odbiegających od rzeczywistości i wobec istnienia dokładniejszych, równie nieskomplikowanych modeli, nie powinien być stosowany.

Pomimo znacznych uproszczeń modele prowadzące do wzorów (5), (6), (13), (14) znajdują potwierdzenie eksperymentalne i mogą służyć do wstępnej oceny odporności balistycznej pancerzy stalowych oraz do potwierdzenia poprawności obliczeń wykonanych bardziej złożonymi metodami. Użycie wzorów (5), (6) wymaga znajomości dwóch współczynników materiałowych, wyznaczonych doświadczalnie. Do stosowania wzorów (13), (14) wystarcza znajomość jednego współczynnika, gdy znane są właściwości materiału tarczy wyznaczone z próby statycznego rozciągania. Omawiane w tym miejscu modele nie wyjaśniają szczegółów zjawiska przebijania pancerza przez pocisk.

Bliższych informacji o procesie przebijania pancerza dostarczają metody analityczne oparte na całkowaniu równania (8) oraz opisywane w literaturze metody numeryczne. Stosowanie tych metod w praktyce projektowej wymaga jednak równoległego prowadzenia badań eksperymentalnych i doświadczalnego wyznaczania większej liczby stałych materiałowych niż w przypadku posługiwania się prostszymi modelami.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AUTODYN® Explicit Software for Nonlinear Dynamics, Century Dynamics 2006.
- [2] Backman M. E., Goldsmith W., *The mechanics of penetration of projectile into targets*, International Journal of Engineering Science, 1978, Vol. 16, No 1, pp. 1–99.
- [3] Bathe K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, New Jersey 1996.
- [4] Cranz C., *Lehrbuch der Ballistik*, Band IV, Leipzig 1910.
- [5] Flis L., *Numerical simulation of ballistic impact on 10GHMBA steel armor*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2010, nr 1, s. 23–32.
- [6] Krieger E., *Johows Hilfsbuch für den Schiffbau*, Dritte, neubearbeitete und ergänzte Auflage, Verlag von Julius Springer, Berlin 1910.
- [7] Kyzioł L., Świątek K., *Modelowanie i weryfikacja doświadczalna przebijalności tarczy pociskami*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2009, nr 2, s. 71–90.
- [8] Sperski M., *Model obliczeniowy do oszacowania odporności balistycznej pancerzy stalowych*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2009, nr 4, s. 51–59.

- [9] Świątek K., Szturomski B., *Zastosowanie zmodernizowanego wahadła balistycznego do prób przebicia pociskiem 12,7 mm materiałów stosowanych na osłony antyterrorystyczne*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2009, nr 2, s. 91–106.
- [10] Szturomski B. i inni, *Charakterystyki dynamiczne do symulacji numerycznej materiałów stosowanych na osłony antyterrorystyczne na jednostkach pływających*, raport z pracy badawczej pk. „Powój”, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2009.
- [11] Taylor G., *The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress*, Proceedings of Royal Society, 1948, Series A, 194, pp. 289–299.
- [12] Wiśniewski A., Żurowski W., *Amunicja i panczerze*, Politechnika Radomska, Radom 2002.
- [13] Włodarczyk E. i inni, *Oszacowanie dynamicznej granicy plastyczności wybranych stali luskowych za pomocą testu Taylora*, „Biuletyn” WAT, 2007, Vol. LVI, nr 1, s. 113–126.
- [14] Włodarczyk E., *Balistyka końcowa pocisków amunicji strzeleckiej*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.
- [15] Włodarczyk E., Jackowski A., *Balistyka końcowa pocisków szybkich*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008.
- [16] Zatorski Z., *Teoretyczne i technologiczne podstawy projektowania okrętowych osłon balistycznych*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2009, nr 177A.

IMPACT STRENGTH OF 10GHMBA STEEL ARMOR HIT BY 12.7 MM PROJECTILE

ABSTRACT

The article discusses the basic methods of calculating impact strength of steel armor hit by rigid projectiles with velocity up to 1200 m/s. The results of calculations based on the methods discussed and computer simulation are compared with the experiments carried out on the steel plates of different thicknesses by means of the test rig designed and built at the Institute of Machine Design of Naval Academy in Gdynia.

Keywords:

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