ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK XLX NR 4 (179) 2009

Marek Sperski
Akademia Marynarki Wojennej

MODEL OBLICZENIOWY DO OSZACOWANIA ODPORNOŚCI BALISTYCZNEJ PANCERZY STALOWYCH

STRESZCZENIE

Przedstawiono nieskomplikowany model obliczeniowy do oszacowania zdolności na przebicie pociskami karabinowymi osłon pancernych zbudowanych z materiałów ciągliwych. Metoda umożliwia wyznaczenie minimalnej grubości pancerza odpornego na ostrzał, gdy znane są masa, prędkość i kaliber pocisku oraz wytrzymałość na rozciąganie materiału, z którego wykonano pancerz. Jeżeli pocisk przebija osłonę, możliwe jest obliczenie prędkości końcowej pocisku, a także czasu przebijania.

Słowa kluczowe:
odporność balistyczna, osłony pancerne, model obliczeniowy.

WSTĘP

Przez odporność balistyczną, zwaną też kuloodpornością, rozumie się zdolność ochronną pancerza przed przebiciem pociskami niezawierającymi materiałów wybuchowych, biorącymi udział w niszczeniu osłony. Klasyczne metody obliczania odporności na ostrzał osłon pancernych oparte są na równaniu [1]:

$$\frac{m v_p^2}{2} = k \pi d h \cdot h, \tag{1}$$

gdzie:
m — masa pocisku;
v_p — prędkość pocisku;
d — kaliber;

h — grubość osłony;
k — średnia wartość naprężeń stycznych na powierzchni bocznej walca kołowego o średnicy podstawy d i wysokości h (rys. 1.).

Lewa strona równania przedstawia energię kinetyczną pocisku, prawa zaś pracę sił tnących na powierzchni bocznej walca kołowego, „wyciskanego" przez pocisk przebijający pancerz. Po wprowadzeniu oznaczenia:

$$K = 2 k \pi \tag{2}$$

otrzymuje się prosty wzór na obliczenie minimalnej grubości osłony, gdy znana jest prędkość pocisku:

$$h = v_p \sqrt{\frac{m}{K d}} \tag{3}$$

lub na obliczenie prędkości pocisku, przy której nastąpi przebicie osłony o znanej grubości h:

$$v_p = \sqrt{\frac{K d}{m}}\, h\,. \tag{4}$$

Współczynnik K wyznaczano doświadczalnie dla różnych rodzajów stali i różnych rodzajów pocisków. Według badań włoskich, opublikowanych w periodyku „La Spezia", w latach 1876 i 1882, gdy wymiary h i d podane są w centymetrach, masa w kilogramach, a prędkość w metrach na sekundę, współczynnik $K = 1024$ dla osłon wykonanych ze zwykłej stali walcowanej, ostrzelanych stalowymi granatami artyleryjskimi lub $K = 2500$ dla takich samych osłon pod ostrzałem granatów artyleryjskich ze stali hartowanej. Jeżeli pancerz jest wykonany ze stali o podwyższonej wytrzymałości, współczynnik ten przyjmuje odpowiednio wartości $K = 1600$ i $K = 3600$. Na przełomie XIX i XX wieku w niemieckich zakładach Kruppa produkowano osłony pancerne o grubościach 80–150 mm z „hartowanej stali niklowej" o odporności $K = 5800$ [1].

Według przedstawionej teorii związek między pożądaną grubością osłony a prędkością przebijającego ją pocisku jest liniowy, jeżeli masa i kaliber pocisku pozostają niezmienione. Ponieważ związku takiego nie potwierdziły eksperymenty, w 1886 roku Francuz Jacob de Marre skorygował ostatni z podanych wyżej wzorów do postaci [2]:

$$\frac{m v_p^2}{d^3} = C\left(\frac{s}{d}\right)^n, \tag{5}$$

gdzie:

s — głębokość penetracji pocisku zatrzymanego przez pancerz;

C i n — stałe zależne od rodzaju pocisku i charakteru wnikania w osłonę.

Przyjęcie n = 2 odpowiada założeniu, że ruchowi pocisku przeciwstawiają się naprężenia styczne o stałej wartości, równomiernie rozłożone na powierzchni bocznej wypychanego walca. Przy n = 1 ruch pocisku w pancerzu odbywa się pod działaniem stałych naprężeń normalnych, równomiernie rozłożonych na powierzchni czołowej tego walca. W praktyce współczynnik n przyjmuje wartości pośrednie, pomiędzy 1 i 2.

Na podstawie eksperymentów przeprowadzonych na kilkunastu rodzajach pocisków artyleryjskich o średnicach zmieniających się od 8,7 cm do 30,5 cm i masach od 8,3 do 455 kg, wypełnionych materiałami wybuchowymi, Jacob de Marre sformułował wzór [1]:

$$v_p = K_1 \frac{d^{0,75}}{m^{0,5}} h^{0,7} \tag{6}$$

ze współczynnikami: K_1 = 1280; K_1 = 1530; K_1 = 2040, wyznaczonymi doświadczalnie dla trzech różnych gatunków stali pancerza. Zaznaczył przy tym, że wymiary d i h należy podać w decymetrach, masę zaś w kilogramach, aby otrzymać prędkość w metrach na sekundę.

Adam Wiśniewski [2], po wprowadzeniu do ogólnego wzoru (5) de Marre'a średnicy d pocisku i głębokości penetracji s w milimetrach, masy m w kilogramach oraz prędkości v_p w metrach na sekundę, wyznaczył eksperymentalnie wartości współczynników: C = 9,5 i n = 1,3 dla stalowego pancerza ostrzelanego pociskami wolframowymi o masie m = 4,1 kg i kalibrze d = 125 mm.

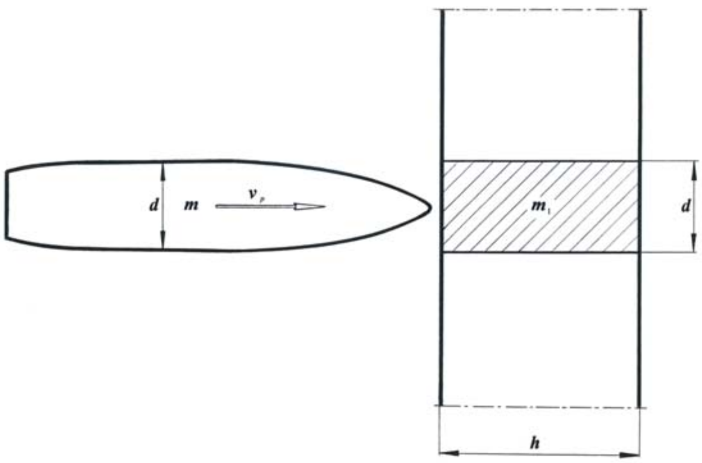
Zastosowanie przytoczonych wzorów do obliczania grubości osłon ostrzeliwanych pociskami małokalibrowymi wymagałoby doświadczalnej weryfikacji wyznaczonych współczynników. Przyjmując dla przykładu: K = 3200, kaliber d = 1,27 cm masę m = 0,05 kg oraz prędkość pocisku v_p = 800 m/s, otrzymamy — według podanej na wstępie teorii (3) — potrzebną grubość pancerza h = 2,81 cm. Osłona z takiej samej stali ostrzeliwana pociskiem o kalibrze d = 0,762 cm i masie m = 0,01 kg z prędkością 800 m/s powinna mieć, w myśl tej teorii, grubość 1,62 cm. Natomiast według wzoru de Marre'a (6) pancerz ze stali o współczynniku K_1 = 2040 ostrzeliwany pociskami o kalibrze d = 1,27 cm z prędkością v_p = 800 m/s powinien mieć grubość h = 2,82 cm, a pancerz ostrzeliwany pociskami o kalibrze d = 0,762 cm z taką samą prędkością osiągnąć odporność na przebicie przy grubości h = 1,545 cm. Przy prędkości v = 600 m/s minimalne grubości omawianych pancerzy ostrzeliwanych pociskami o kalibrze d = 1,27 cm wynoszą według wzoru (3): h = 2,1 cm lub h =1,87 cm według wzoru de Marre'a (6), a w przypadku ostrzału pociskami o kalibrze d = 0,762 cm odpowiednio: h = 1,21 cm i h = 1,03 cm.

PODSTAWY TEORII

Wykazane rozbieżności skłaniają do bliższego przyjrzenia się zjawisku przebijania osłony przez pocisk. W wyniku zderzenia pocisku z osłoną, przy dostatecznie dużej prędkości, następuje gwałtowne uplastycznienie materiału w obrębie czołowej części pocisku oraz fragmentu osłony stykającego się z pociskiem. Maksymalne naprężenia w materiale osłony w bardzo krótkim czasie osiągają wartości równe granicy wytrzymałości tego materiału. Założenie, że podczas przebijania przemieszcza się wraz z pociskiem tyle materiału osłony, ile mieści się we wnętrzu walca kołowego o średnicy podstawy d (równej średnicy pocisku), wysokości h (równej grubości osłony) i masie

$$m_1 = \rho \frac{\pi d^2}{4} h , \tag{7}$$

gdzie ρ jest gęstością materiału osłony (dla stali równą $7{,}86 \cdot 10^3$ kg/m^3), prowadzi do sformułowania modelu fizycznego, którego schemat przedstawiono poniżej.



Na podstawie twierdzenia o pędzie środka masy układu materialnego

$$(m + m_1)\,v_0 = m\,v_p + m_1 \cdot 0 \tag{8}$$

początkowa prędkość v_0 środka masy połączonego i odkształcającego się układu, złożonego z pocisku o masie *m* oraz fragmentu osłony o masie m_1, wynosi:

$$v_0 = \frac{m}{m + m_1}\,v_p\,, \tag{9}$$

przy czym v_p jest prędkością pocisku w chwili zderzenia. Równanie ruchu środka masy omawianego układu ma postać:

$$(m + m_1)\frac{dv}{dt} = -\pi\,d\,h\,R_\tau\,, \tag{10}$$

w której R_τ oznacza wytrzymałość materiału na ścinanie. W myśl hipotezy Hubera $R_\tau = 0{,}58 R_m$, gdzie R_m jest wytrzymałością materiału na rozciąganie. Po podstawieniu:

$$v = \frac{dx}{dt} \qquad \Rightarrow \qquad dt = \frac{dx}{v}\,,$$

gdzie *x* jest przemieszczeniem środka masy, a *t* czasem, mierzonymi od chwili zderzenia, otrzymuje się równanie:

$$(m + m_1)\int_{v_0}^{0} v\,dv = -\pi\,d\,h\,R_\tau \int_0^s dx\,, \tag{11}$$

w którym *s* oznacza drogą hamowania. W wyniku całkowania

$$s = \frac{(m + m_1)}{2\pi\,d\,h\,R_\tau}\,v_0^2\,. \tag{12}$$

Zakładając dalej, że pocisk nie przebije osłony, jeżeli długość *s* drogi hamowania nie przekroczy grubości *h* pancerza, można wstępnie ocenić odporność osłony na ostrzał pociskami niezawierającymi materiałów wybuchowych, mającymi udział w niszczeniu pancerza.

Przykład

Jeżeli R_m = 500 MPa; R_τ = 0,58 R_m = 290 MPa; $\rho = 7{,}86 \cdot 10^3$ kg/m^3; *m* = 10^{-2} kg; *d* = 7,62 mm = 7,62·10^{-3} m; v_p = 700 m/s oraz *h* = 1,6 cm = 1,6·10^{-2} m, obliczona długość drogi hamowania wyniesie s = 1,404 cm < h = 1,6 cm, a zatem pocisk nie powinien przebić pancerza. Natomiast przy grubości osłony h = 1,5 cm i takich samych pozostałych wartościach otrzymamy: s = 1,53 cm > h = 1,5 cm, skąd wniosek, że pocisk może przebić osłonę. Przy h = 1 cm przebije ją tym bardziej, gdyż wtedy droga hamowania wyniesie s = 2,6 cm.

Gdy $s > h$ otrzymany wzór na obliczenie drogi hamowania traci sens fizyczny, ponieważ z chwilą przebicia osłona już nie stanowi przeszkody dla pocisku. Zmieniając jednak granice całkowania w równaniu różniczkowym (11)

$$(m + m_1)\int_{v_0}^{v_k} v\,dv = -\pi\, d\, h\, R_\tau \int_0^h dx\,, \tag{13}$$

otrzymamy nieskomplikowany wzór na obliczenie końcowej prędkości v_k pocisku, bezpośrednio po przebiciu osłony:

$$v_k = \sqrt{v_0^2 - \frac{2\pi\, d\, h^2}{m + m_1} R_\tau}\ . \tag{14}$$

Przy grubości osłony h = 1 cm i takich samych pozostałych danych jak w powyższym przykładzie prędkość ta wyniesie v_k = 404 m/s, a przy grubości h = 1,5 cm — v_k = 64 m/s.

Gdy prędkość końcowa środka masy układu jest znana, można — powracając do pierwszego z różniczkowych równań (10) — obliczyć czas t_k przebijania pancerza przez pocisk. Całkując to równanie, po przekształceniu do postaci

$$\int_0^{t_k} dt = \frac{m + m_1}{\pi\, d\, h\, R_\tau} \int_{v_k}^{v_0} dv\,, \tag{15}$$

otrzymamy:

$$t_k = \frac{m + m_1}{\pi\, d\, h\, R_\tau}\left(v_0 - v_k\right). \tag{16}$$

Przy grubości osłony h = 1 cm z ostatniego przykładu t_k = 2,18 $\cdot 10^{-5}$ s, przy h = 1,5 cm t_k = 6,67 $\cdot$ 10^{-5} s, a przy h = 1,6 cm pocisk zostanie zatrzymany po czasie t_k = 7,3 $\cdot$ 10^{-5} s od chwili uderzenia w osłonę.

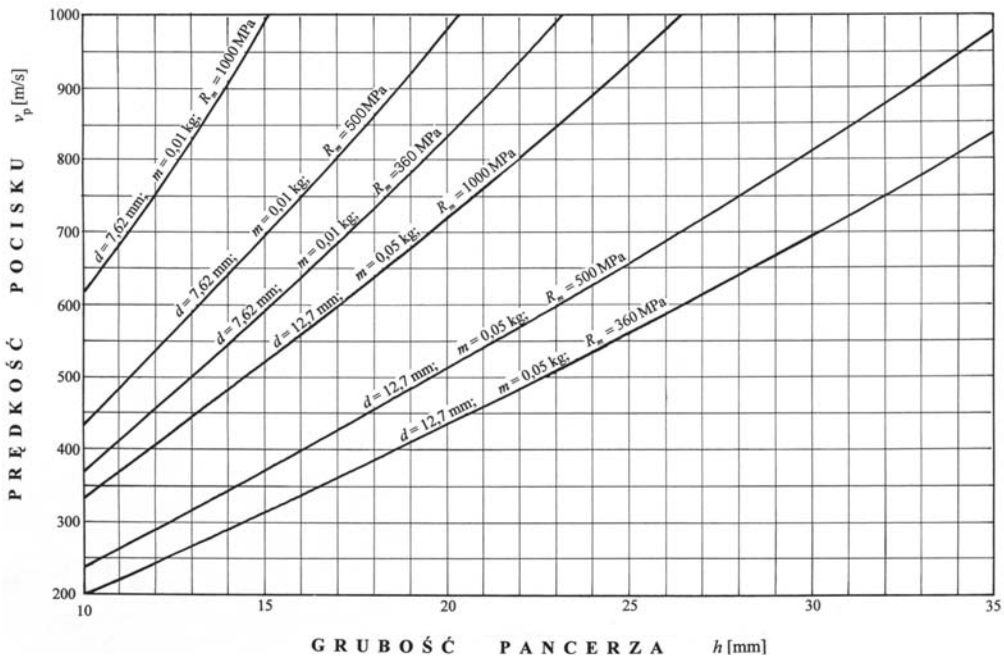
Przyjęcie na koniec $v_k = 0$, przy $s = h$, prowadzi po przekształceniach do wzoru wyrażającego związek między początkową prędkością v_p pocisku a minimalną grubością h osłony odpornej na przebicie:

$$v_p = \sqrt{(Ah^2 + Bh^3)R_\tau}\ , \tag{17}$$

przy czym

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

Relacja odwrotna przedstawia równanie trzeciego stopnia z niewiadomą h. W praktycznych obliczeniach równanie to ma trzy pierwiastki rzeczywiste (jeden dodatni i dwa ujemne), z których dodatni jest poszukiwaną grubością osłony. Związki liczbowe między minimalną grubością osłon wykonanych z trzech różnych gatunków stali (o wytrzymałości na rozciąganie R_m równej 360 MPa, 500 MPa i 1000 MPa) a prędkościami pocisków o kalibrze 7,62 mm i 12,7 mm, obliczone za pomocą ostatniego z podanych wzorów, przedstawiono na poniższych wykresach.



WNIOSKI

Omówiony model obliczeniowy stanowi rozszerzenie założeń teorii klasycznej (1). Polega na wprowadzaniu do równania ruchu masy fragmentu pancerza przemieszczającego się wraz z pociskiem podczas przebijania osłony. Podstawowym celem stworzenia takiego modelu jest umożliwienie wstępnego oszacowania odporności balistycznej pancerzy na podstawie charakterystyk wytrzymałościowych materiału wyznaczonych za pomocą próby statycznego rozciągania. Otrzymane wzory mogą okazać się przydatne do obliczania osłon wykonanych z materiałów ciągliwych, do których należą stale konstrukcyjne.

Założenia do przedstawionej teorii budzą jednak szereg zastrzeżeń. Wytężenie materiału do granic wytrzymałości następuje w bardzo krótkim czasie po uderzeniu pocisku w osłonę i utrzymuje się na zbliżonym poziomie przez cały czas przebijania pancerza tylko wtedy, gdy pocisk przebije pancerz i opuści go z dostatecznie dużą prędkością [5]. Gdy pocisk utkwi w pancerzu, końcowa faza hamowania odbywa się przy niepełnym i malejącym wytężeniu [4]. Pozostaje zatem do rozwiązania problem oceny niedokładności metody wynikającej z uśrednienia naprężeń.

Kolejnym niewyjaśnionym problemem jest ustalenie bliższej relacji między długością drogi przebytej przez środek masy odkształconego pocisku z częścią materiału osłony a grubością pancerza. Podstawą do ustalenia takiego związku mogą być różnice między własnościami wytrzymałościowymi (w pierwszym przybliżeniu granicami plastyczności i wytrzymałości oraz twardościami) materiałów, z których wykonano pocisk i osłonę. Wymienione zagadnienia powinny być przedmiotem dalszych opracowań.

Od kilkudziesięciu lat w wielu ośrodkach na świecie prowadzone są szczegółowe badania podstawowe nad odpornością balistyczną osłon pancernych, oparte na znanych twierdzeniach mechaniki ośrodków ciągłych, mechaniki pękania oraz rozwiązaniach różniczkowych równań ruchu bazujących na technice komputerowej. Jak dotąd badania te, choć wartościowe ze względów poznawczych, nie doprowadziły do stworzenia praktycznej metody pozwalającej na nieskomplikowane i bezpieczne projektowanie osłon [2], [3], [4], [5]. Z tego względu równoległe rozwijanie prostych, praktycznych metod obliczeniowych, polegających na wybraniu i uwzględnieniu najbardziej istotnych cech zjawiska przebijania pancerza przez pocisk, wydaje się celowe.

Eksperymentalna weryfikacja modelu omówionego w niniejszym artykule zostanie przedstawiona w odrębnym opracowaniu.

BIBLIOGRAFIA

[1] Krieger E., *Johows Hilfsbuch für den Schiffbau*, Dritte, neubearbeitete und ergänzte Auflage, Verlag von Julius Springer, Berlin 1910.

[2] Wiśniewki A., *Pancerze — budowa, projektowanie i badanie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.

[3] Włodarczyk E., Jackowski A., *Balistyka końcowa pocisków szybkich*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008.

[4] Wolsky S. P., Czanderna A. W., *Ballistic materials and penetration mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York 1980.

[5] Zukas J. A., *High velocity impact dynamics*, John Wiley & Sons, New York 1990.

A CALCULATION MODEL FOR ESTIMATION OF BALLISTIC RESISTANCE OF STEEL ARMOUR PLATES

ABSTRACT

The paper presents a simple calculation model for assessment of a possibility to pierce armor plates made of ductile materials with riffle bullets. The method makes it possible to determine the plate thickness if the weight, caliber and speed of the bullet as well as the ultimate tensile strength of the plate material are known. If the bullet penetrates the armour the calculation of final velocity of bullet and the time of piercing is possible.

Keywords:
ballistic resistance, armour plates, calculation model.

Recenzent dr hab. inż. Henryk Bugłacki