

Leszek Flis¹⁾, Marek Sperski¹⁾

BADANIA ODPORNOŚCI OSŁON WARSTWOWYCH ZBUDOWANYCH ZE STALI KADŁUBOWYCH NA OSTRZAŁ POCISKAMI 12,7 mm

AN INVESTIGATION OF THE RESISTANCE OF MULTI-LAYERED SHIPS STEEL SHIELDS TO 12.7 mm PROJECTILES

STRESZCZENIE Posługując się licencjonowanymi programami komputerowymi opartymi na metodzie elementów skończonych przeprowadzono symulacje procesu przebijania okrętowych osłon balistycznych pociskami karabinowymi 12,7 mm. Badaniom poddano osłony złożone z jednej do sześciu warstw o grubościach 24 mm i 30 mm, wykonanych ze stali kadłubowej o zwykłej i podwyższonej wytrzymałości. Rezultaty badań mogą być pomocne w projektowaniu okrętowych osłon balistycznych narażonych na ostrzał pociskami karabinowymi.

Słowa kluczowe:

kuloodporność, pancerze, symulacja komputerowa, eksperyment.

ABSTRACT Licensed computer software based on the final element method was used to carry out a simulation process for penetrating ship ballistic shields with 12.7 mm ammunition. The investigations included shields consisting of one to six layers of ships steel of both standard and enhanced strength 24 mm and 30 mm thick. The results obtained can be useful in designing ballistic shields for protection against small arms fire.

Keywords:

projectile resistance, armor, computer-based simulation, experiment.

DOI: 10.5604/0860889X/1097962

¹⁾ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, 81-103 Gdynia, ul. J. Śmiedowicza 69; e-mail: {l.flis; m.sperski}@amw.gdynia.pl

WSTĘP

Problem budowy wielowarstwowych osłon balistycznych chroniących wybrane obszary i pomieszczenia na statkach przed atakami terrorystycznymi stał się szczególnie aktualny pod koniec XX wieku. Większość prac nad tym problemem, bliskich praktycznym zastosowaniom, zawiera rezultaty pomiarów lub nawiązuje do eksperymentów przeprowadzonych z użyciem pocisków 7,62 mm. Wyniki badań eksperymentalnych A. Almondhansa, M. Abdel-Kadera i A. Eleiche'a [1] stały się podstawą do potwierdzenia nieskomplikowanej teorii procesu udarowego wycinania korka w wielowarstwowych osłonach balistycznych na okrętach, przedstawionej przez C. Lianga, M. Yanga i W. Wu [2]. Do tych wyników nawiązują również G. Ben-Dor, A. Dubinsky i T. Elperin prezentujący model obliczeniowy przebijania przez sztywne pociski osłon zbudowanych z materiałów ciągliwych, przedzielonych warstwami powietrza [3]. Odmienny od poprzednich model analityczny, zilustrowany liczbowymi przykładami przebijania przez sztywne pociski o średnicy 11,3 mm dwuwarstwowych osłon ze stali i stopów aluminiowych, opublikowali G. Yossifon, A. Yarin i M. Rubin [4]. Wyniki własnych obliczeń porównali z rezultatami symulacji komputerowych przeprowadzonych metodą elementów skończonych, za pomocą komercyjnego programu Autodyn2D.

INTRODUCTION

The issue of building multi-layered ballistic shields protecting selected areas and compartments aboard ships against terrorist attacks became especially topical at the end of the 20th century. Most publications dealing with this problem and seeking practical applications, include results of measurements and focus on experiments conducted with 7.62 ammunition. The results of experimental investigations carried out by A. Almondhans, M. Abdel-Kader i A. Eleiche [1] were used to prove an uncomplicated theory, presented by C. Liang, M. Yang and W. Wu [2], of a process of blanking plugs in multi-layered ballistic shields in ships. G. Ben-Dor, A. Dubinsky and T. Elperin also refer to these results when they present a model for calculating penetration of shields made from ductile materials, separated by air layers, with rigid projectiles [3]. The analytical model different from the previous ones, illustrated with examples using numerical data related to penetration of two-layered shields, made from steel and aluminum alloys, with 11.3 mm rigid projectiles was published by G. Yossifon, A. Yarin i M. Rubin [4]. They used commercially available software Autodyn2D to compare the results of their own calculations with the results of computer based simulations performed with the finite element method.

Podstawowy analityczny model, rozwijany w późniejszych latach przez innych autorów, wraz z badaniami odporności na przebicie wielowarstwowych tarcz o grubościach 1,4–6,4 mm pociskami o spłaszczonych i stożkowych wierzchołkach przedstawili w 1988 r. J. Radin i W. Goldsmith [5]. Praca M. Huanga [6] zawiera wyniki obliczeń metodą elementów skończonych, procesu przebijania stalowych tarcz jedno- i dwuwarstwowych ośmioma rodzajami sztywnych pocisków o różnych masach, średnicach i kształtach wierzchołków.

Serię eksperymentów związanych z przebijaniem dwuwarstwowych tarcz ze stali kadłubowej i stopu aluminiowego pociskami karabinowymi 7,62 mm przeprowadzili S. Dobrociński, W. Jurczak i J. Kolenda [7]. Problemami odporności balistycznej dwuwarstwowych osłon okrętowych zbudowanych ze stali o odmiennych właściwościach wytrzymałościowych ostrzeliwanych pociskami 7,62 mm zajmował się Z. Zatorski [8], a pociskami 12,6 mm — B. Szturomski [11].

W kraju zespół Wojskowej Akademii Technicznej (T. Niezgodą, A. Morka i in.) prowadzi badania eksperymentalno-numeryczne w bardzo szerokim zakresie, między innymi w temacie zderzeń pocisków z tarczą, czego przykładem mogą być publikacje [14, 15].

In 1988 r. J. Radin and W. Goldsmith [5] presented the basic analytical model, improved in later years by other authors, along with investigations into resistance penetration of multi-layered shields 1.4–1.6 mm thick with both flattened and pointed nose projectiles. The work by M. Huan [6] includes calculation results, performed with the final element method, of the penetration process of one and two-layered steel targets with eight types of rigid projectiles of varied weight, diameter and nose shape.

S. Dobrociński, W. Jurczak i J. Kolenda [7] have conducted a series of experiments focused on penetration of two-layered targets, made from hull steel and aluminum alloy, with 7.62mm rifle bullets. Z. Zatorski [8] has investigated problems related to ballistic resistance of two-layered ship shields made from steel of varied resistance properties hit by 7.62 mm projectiles, whereas B. Szturomski [11] has focused on 12.6 mm projectiles.

In Poland a team from the Defense University of Technology (T. Niezgodą, A. Morka and others) have carried out experimental-numerical investigations on a very wide scale. They have dealt, among others, with issues relating to projectile-target collision, which is exemplified in publications [14, 15].

Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy cytowanych prac formułują wnioski zmierzające do ustalenia najkorzystniejszych, z uwagi na odporność balistyczną, właściwości materiałowych, grubości i usytuowania poszczególnych warstw osłony. Przy różnych kształtach wierzchołków, masach, średnicach i prędkościach pocisków te wnioski bywają jednak odmienne. Wynika stąd potrzeba bliższego rozpoznania odporności okrętowych osłon balistycznych złożonych z warstw na ostrzał pociskami karabinowymi większego kalibru.

METODA BADAŃ

Narzędziem do badań opisanych w niniejszym artykule było licencjonowane oprogramowanie komputerowe oparte na metodzie elementów skończonych: ANSYS AUTODYNA rozwijany przez międzynarodową fundację Century Dynamics (od 2005 r. ANSYS) z główną siedzibą w podlondyńskim Horsham [10]. Przyjęto, że pancierz ostrzeliwany prostopadle przez nieodkształcalne pociski jest zbudowany z materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem nieliniowym według uproszczonego modelu Johnsona i Cooka, gdzie pomija się człon wpływu temperatury i rezygnuje z równania stanu. Uproszczenia powyższe są uprawnione, a nawet zalecane [14]:

The authors of the publications referred to, use the investigation results to formulate conclusions aimed at determining the most favorable choice, with regard to ballistic resistance, material properties, and thickness and layout of particular layers of a shield. Yet, the conclusions differ depending on differences in projectile tip, weight, diameter and velocity. Thus there is a need to study more closely the resistance of ships ballistic shields made of layers to the fire of small arms of higher caliber.

THE METHODS OF INVESTIGATION

The tool used in the investigations described in this paper is the licensed software ANSYS AUTODYNA based on the finite element method. It has been developed by the international foundation Century Dynamics (ANSYS since 2005) whose main office is in Horsham near London [10]. It was assumed that armor hit at a right angle with non-deformed projectiles was built of elastic-plastic material with nonlinear strengthening in accordance with the simplified Johnson and Cook model, where temperature effect is neglected and state equation is dropped. The simplifications above are acceptable, even recommended [14]:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^p)^n (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*), \quad (1)$$

gdzie σ_y , $\bar{\epsilon}^p$, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\text{EPS0}$ oznaczają odpowiednio: obliczone naprężenie podczas symulacji zgodnie z formułą, efektywne odkształcenie plastyczne oraz znormalizowane efektywne prędkości odkształcenia, gdzie:

where σ_y , $\bar{\epsilon}^p$, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\text{EPS0}$ refer to respectively: the stress calculated during the simulation in accordance with the formula, effective plastic deformation and standardized effective deformation velocities, where:

- $\dot{\epsilon}$ — efektywna prędkość odkształcenia / effective deformation velocity;
 EPS0 — quasi-statyczny próg prędkości odkształcania / quasi-statistical deformation velocity threshold;
 A, B, C, n — stałe współczynniki wyznaczone eksperymentalnie (A to granica plastyczności materiału) / constant ratios determined experimentally (A is the boundary of material elasticity) [1].

Zastosowane w modelu kryterium zniszczenia to wartość efektywnego odkształcenia plastycznego określana jako:

The destruction criterion used in the model is the effective plastic deformation magnitude defined as:

$$\bar{\epsilon}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} D_{ij}^p D_{ij}^p \right)^{1/2} dt, \quad (2)$$

gdzie:

where:

D_{ij}^p — komponent plastyczny (dewiator) tensora odkształcenia / plastic component (deviator) of deformation tensor.

Wartości liczbowe wymienionych współczynników we wzorze (1), charakteryzujących właściwości fizyczne materiału pancerza, wyznaczono na podstawie pomiarów przeprowadzonych w laboratorium wytrzymałościowym Instytutu Podstaw Konstrukcji

The values of the ratios mentioned in the formula (1), characterizing physical properties of armor material, were determined based on the measurements done in the strength laboratory of the Institute of Machinery Construction Fundamentals,

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. 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. Bliższy opis eksperymentu przedstawił B. Szturomski w pracy [11]. Szczegóły dotyczące kształtu, budowy i wymiarów pocisku (o masie $m = 4,96 \cdot 10^{-2}$ kg) podano w pracy [12].

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 $\rho = 7830$ kg/m³, module sprężystości $E = 2,09 \cdot 10^5$ MPa, współczynnika Poissona $\nu = 0,3$, granicy plastyczności $R_e = 695$ MPa, statycznej wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 758,5$ MPa oraz statycznej wytrzymałości na ścinanie $R_\tau = 438$ MPa.

Modele obliczeniowe przestrzeliwanych krążków podzielono, zależnie od grubości próbek, na 3194–5732

Naval Academy Gdynia, as well as on a series of experiments combined with firing through steel test pieces installed on a ballistic pendulum equipped with appropriate measuring instruments. The purpose of the experiment was to shoot factory made 12.7 mm projectiles through steel test pieces 8 to 32 mm thick (changing every 2 mm) and to measure bullet velocity magnitudes in front of and behind the test piece shot through. A more detailed account of the experiment is presented by B. Szturomski [11]. Details related to the shape, structure and dimensions of the bullet (weighing $m = 4,96 \cdot 10^{-2}$ kg) is given in [12].

The test pieces in the form of disks 120mm in diameter, supported in a ballistic pendulum on a tube blank having 100mm inside diameter, were made of shipbuilding steel 10GHMBA, having: density $\rho = 7830$ kg/m, elasticity module $E = 2,09 \cdot 10^5$ MPa, Poisson's ratio $\nu = 0,3$, g, plasticity border MPa, static resistance to tension $R_m = 758,5$ MPa and static resistance to shearing $R_\tau = 438$ MPa.

The calculation models of the shot through test pieces were divided, depending on the thickness of the test pieces, into 3194–5732 octahedral final elements with nodes in corners and six degrees of freedom

ośmiościennych elementów skończonych z węzłami w narożach i sześcioma stopniami swobody w każdym węźle. Liczba węzłów przy tym podziale wyniosła odpowiednio od 3792 do 6654. Obliczenia, wykonane za pomocą programu LS-DYNA, wykazały dobrą zgodność z eksperymentem po wprowadzeniu następujących wartości stałych materiałowych: $A = R_e = 695$ MPa; $B = 510$ MPa; $n = 0,26$; $C = 0,014$.

Do obliczeń przebijania krążków ze stali o symbolu St41, statycznej wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 410$ MPa i granicy plastyczności $R_e = 350$ MPa wprowadzono następujące stałe materiałowe: $A = 350$ MPa, $B = 275$ MPa, $C = 0,022$, $n = 0,36$. Za kryterium zniszczenia elementu z tej stali przyjęto przekroczenie maksymalnej wartości efektywnego odkształcenia plastycznego.

Posługując się stałymi materiałowymi, wyznaczonymi na próbkach jednowarstwowych w sposób opisany powyżej, przeprowadzono symulacje komputerowe (rys. 2. i 4.) procesu przebijania próbek wielowarstwowych o takich samych grubościach całkowitych, lecz różnych grubościach i konfiguracjach poszczególnych warstw.

in each node. With this division, the number of nodes was respectively from 3792 to 6654. The calculations, performed with the software LS-DYNA, showed good conformity with the experiment when the following constant material magnitudes were introduced: $A = R_e = 695$ MPa; $B = 510$ MPa; $n = 0,26$; $C = 0,014$.

To calculate penetration of the steel disks made of St41 steel, static resistance to elasticity $R_m = 410$ MPa and plasticity border $R_e = 350$ MPa, the following material constants were introduced: $A = 350$ MPa, $B = 275$ MPa, $C = 0,022$, $n = 0,36$. Exceeding the maximum value of effective plastic deformation was adopted as the destruction criterion for an element made of this steel.

Using the material constants, determined on one-layer test pieces in the way described above, computer based simulations (fig. 2 and 4) were made of the penetration of multi-layered test pieces having the same total thicknesses but different thicknesses and configurations in particular layers.

REZULTATY OBLICZEŃ

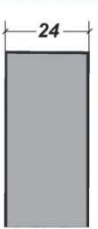
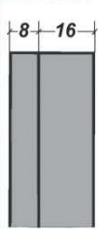

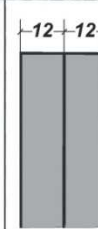

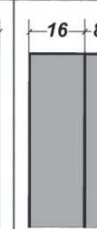
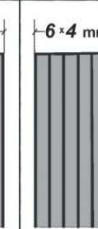

W tabeli 1. zestawiono wyniki obliczeń prędkości końcowych sztywnego pocisku po prostopadłym przebicciu tarcz o łącznej grubości 24 mm, złożonych z 1–6 krążków (rys. 1.) o różnych grubościach i średnicy 120 mm. Przyjęto w tej serii badań, że wszystkie krążki są zbudowane ze stali kadłubowej o podwyższonej wytrzymałości (symbolu 10GHBMA), a pociski uderzają w tarcze z lewej strony ze średnią prędkością początkową równą 786 m/s. Wynik w ostatniej kolumnie tabeli odnosi się do przypadku sztywnego zamocowania brzegów tarczy w tulei; w pozostałych przypadkach krążki tarcz zamocowano sztywno na wszystkich krawędziach. Ze względów technicznych nie realizowano pomiarów prędkości pocisku tuż przed uderzeniem w tarczę.

THE RESULTS OF CALCULATIONS

Table 1 presents the results of the calculations relative to the rigid projectile final velocities following the right angle penetration of targets whose total thickness was 24 mm, and which were composed of 1–6 disks (fig. 1) with different thicknesses, and a diameter of 120 mm. In this series of investigations it was assumed that all the disks were built of ships steel of enhanced strength (10GHBMA) and the projectiles hit the targets from the left side at an average velocity equal to 786 m/s. The result in the final column refers to the case where the edges of the target were rigidly fitted in the tube blank. For some technical reasons the projectile velocity was not measured just before hitting the target.

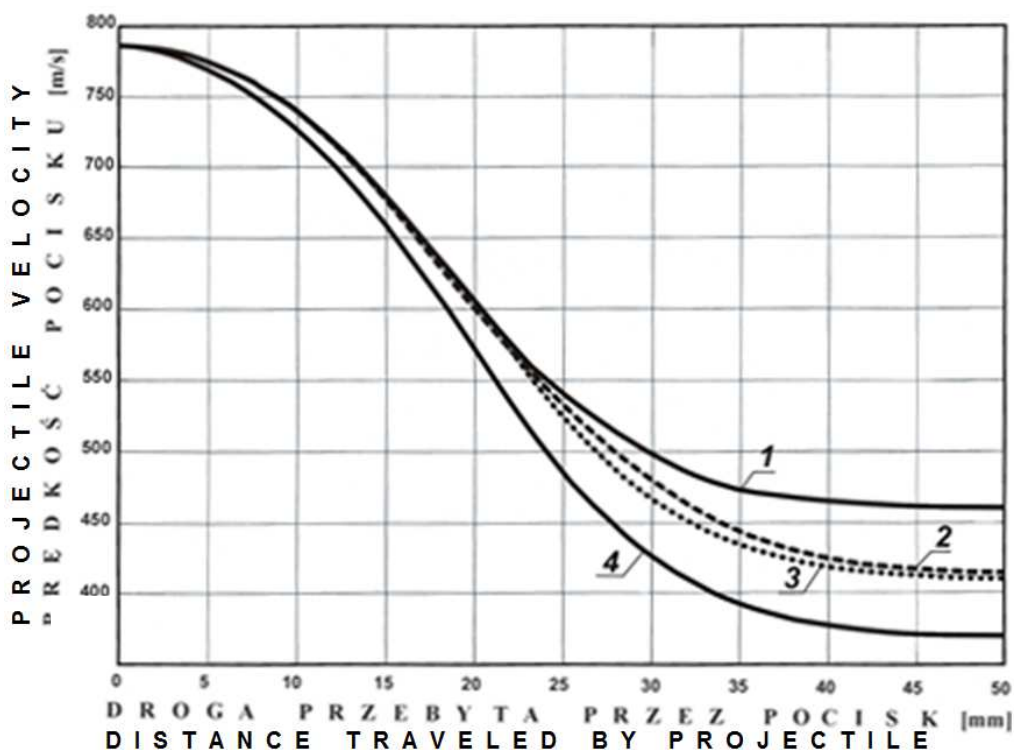
Tabela 1. Wyniki obliczeń prędkości końcowych pocisku [m/s] po prostopadłym przebicciu tarcz zbudowanych ze stalowych (10GHMBA) krążków o różnych grubościach (prędkość początkowa pocisku: 786 m/s)

Table 1. The calculation results of the projectile final velocity [m/s] following the perpendicular penetration of a target made of steel (10GHMBA) disks of varied thickness (projectile initial velocity: 786m/s)

							
371	375	388	411	413	416	461	454

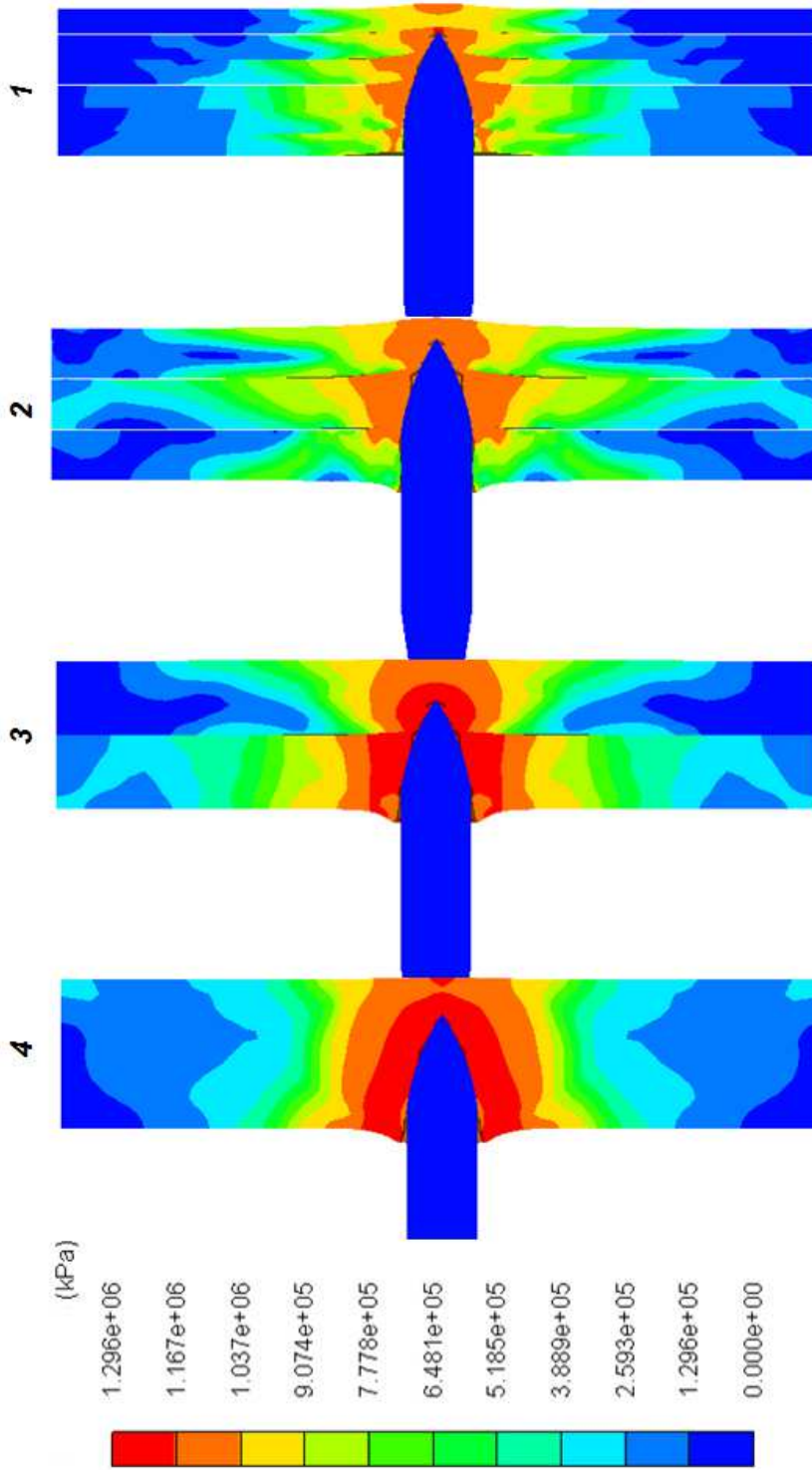
Największą kuloodporność spośród rozpatrywanych przykładów wykazała tarcza monolityczna, najmniejszą zaś tarcza zbudowana z sześciu warstw sztywno utwierdzonych na krawędziach.

The highest projectile resistance of the cases considered was demonstrated by a monolithic target, whereas the least resistance was demonstrated by a target made of six layers rigidly fitted on the edges.



Rys. 1. Zmiana prędkości pocisku podczas przebijania tarcz o grubości 24 mm wykonanych ze stali 10GHMBA: 1 — tarcza sześciowarstwowa (6x4 mm), 2 — tarcza trójwarstwowa (3x8 mm), 3 — tarcza dwuwarstwowa (2x12 mm), 4 — tarcza monolityczna (24 mm)

Fig. 1. Change in projectile velocity at the moment of penetrating targets 24 mm thick, made of 10GHMBA steel: 1 — six-layered target (6x4 mm), 2 — three-layered target (3x8 mm), 3 — two-layered target (2x12 mm), 4 — monolithic target (24 mm)



Rys. 2. Rozkład naprężenia zredukowanego wg hipotezy Hubera w tej samej chwili czasowej przebijania tarcz, oznaczonych na rysunku 1. odpowiednio numerami: 1, 2, 3, 4

Fig. 2. Stress distribution reduced, in accordance with Huber hypothesis, at the same time moment of target penetration, marked in the figure with respective numbers: 1, 2, 3, 4

Na rysunku 1. pokazano przebieg zmian prędkości pocisku jako funkcję drogi przebytej przez pocisk od chwili uderzenia w tarcze o łącznych grubościach 24 mm, złożonych odpowiednio z sześciu, trzech i dwóch przylegających do siebie warstw, oraz w tarczę jednowarstwową (monolityczną). Droga przebyta przez pocisk do chwili całkowitego przebiccia tarczy (47–50 mm) jest większa od grubości tarczy (24 mm) z racji rozszerzającego się ku końcowi wierzchołka pocisku oraz odkształcenia materiału pancerza. W obliczeniach przyjęto, że wszystkie krążki tarcz są sztywno zamocowane na krawędziach. Całkowity czas przebijania tarczy monolitycznej wyniósł 101,2 μ s, a tarczy sześciowarstwowej 88,8 μ s.

Rysunek 3. przedstawia przebieg zmiany wypadkowych sił oporu, z jakimi materiał tarcz oddziałuje na przebijający je prostopadle sztywny pocisk 12,7 mm uderzający z prędkością początkową 786 m/s.

Średnia wartość siły oporu P_{sr} obliczona z twierdzenia o przyroście energii kinetycznej:

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv_k^2}{2} = P_{sr} s, \quad (3)$$

gdzie:

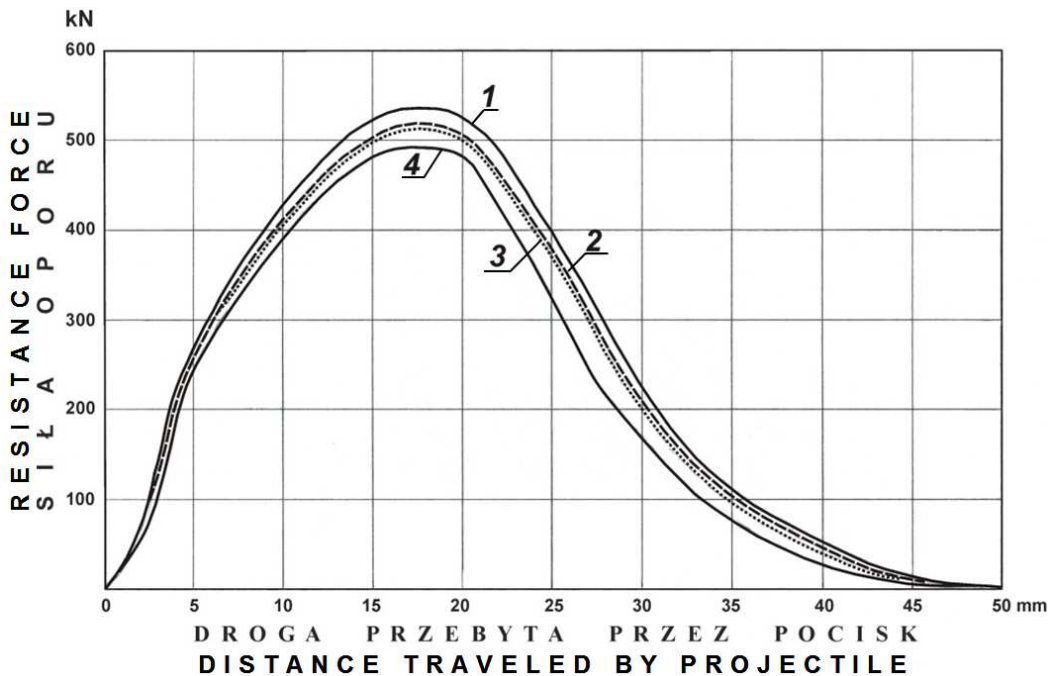
Figure 1 shows the distribution of changes in projectile velocity as a function of distance travelled by the projectile from the moment of hitting targets having the total thickness 24 mm, composed respectively of six, three and two layers adjacent to each other, and one, one-layer (monolithic) target. The distance travelled by the projectile up to the moment of complete target penetration (47–50 mm) is larger than the target thickness (24 mm) due to expansion of the projectile top towards its end as well as deformations in the armor material. In these calculations it was adopted that all the target disks are rigidly fitted on the edges. The total monolithic target penetration time was 101.2 μ s, and it was 88.8 μ s in the case of the six-layered target.

Figure 3 presents distribution of change in the resultant resistance force values with which the target material affects the 12.7mm rigid projectile penetrating the targets at an initial velocity of 786 m/s.

The average value of resistance force P_{sr} calculated from the gain in kinetic energy theorem:

where:

- m — masa pocisku / projectile weight;
- v_0, v_k — prędkość początkowa i końcowa / initial and final;
- s — droga przebyta przez pocisk: 238 kN podczas przebijania tarczy monolitycznej, 223 kN podczas przebijania tarczy dwuwarstwowej (2×12 mm), 222 kN podczas przebijania tarczy trójwarstwowej (3×8 mm), 201 kN w przypadku przebijania tarczy sześciowarstwowej (6×4 mm), gdy wszystkie tarcze zbudowane są ze stali o symbolu 10GHMBA /
distance travelled by the projectile: 238kN at the time of penetrating a monolithic target , 223kN at the time of penetrating a two-layered target (2x12mm), 222kN at the time of penetrating a three-layered target (3x8mm), 201kN at the time of penetrating a four-layered target (4x6mm), when all the target are made of 10GHMBA steel.



Rys. 3. Zmiany wartości sił oporu działających na pocisk 12,7 mm podczas przebijania tarcz o grubości 24 mm zbudowanych ze stali 10GHMBA: 1 — tarcza monolityczna (24 mm), 2 — tarcza dwuwarstwowa (2x12 mm), 3 — tarcza trójwarstwowa (3x8 mm), 4 — tarcza sześciowarstwowa (6x4 mm)






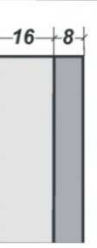

Fig. 3. Changes in values of resistance force affecting the 12.7 mm projectile at the moment of penetrating targets 24 mm thick, made of 10GHMBA steel: 1 — monolithic target (24 mm), 2 — two-layered target (2x12 mm), 3 — three-layered target (3x8 mm), 4 — four-layered target (4x6 mm)

W tabeli 2. zestawiono wyniki obliczeń prędkości końcowych sztywnego pocisku po prostym przebiciu tarcz o grubości 24 mm, zbudowanych z dwóch warstw o różnych właściwościach wytrzymałościowych: stali kadłubowej St41 (o wytrzymałości na rozciąganie 410 MPa) oraz stali o symbolu 10GHMBA (o wytrzymałości na rozciąganie 758,5 MPa). We wszystkich przypadkach przyjęto sztywne zamocowanie krawędzi krążków tarczy oraz prędkość początkową pocisku w chwili uderzenia o tarczę równą 786 m/s.

Table 2 presents the calculation results of the final velocity of a rigid projectile following the right angle penetration of targets 24 mm thick, made of two layers of varied resistance property: St41 ships steel (tensile strength- 410MPa) and 10GHMBA steel (tensile strength-758.6 MPa). In all the cases it was adopted that target disk edges were rigidly fitted and the initial projectile velocity at the moment of hitting the target equaled 786 m/s.

Tabela 2. Wyniki obliczeń prędkości (m/s) pocisku po prostym przebiciu tarcz dwuwarstwowych o grubości 24 mm zbudowanych ze stali o niższej (St41) i podwyższonej (10GHMBA) wytrzymałości (prędkość początkowa pocisku: 786 m/s)

Table 2. The calculation results of the projectile velocity (m/s) following the perpendicular penetration of a two-layered target 24mm thick, made of steel of lower than (St41) and enhanced (10GHMBA) resistance (the projectile initial velocity: 786 m/s)

						
437	455	484	504	510	522	547

Gdy grubość obu warstw była jednokrotna, a warstwa o niższej wytrzymałości cieńsza, nieco korzystniejszy z uwagi na kuloodporność osłony okazał się układ z warstwą czołową o niższej wytrzymałości. Gdy jednak warstwa o niższej wytrzymałości była dwukrotnie grubsza od pozostałej

When the thickness of both layers were the same, and the layer of lower strength was thinner, the arrangement with the frontal layer of lower strength proved a little better due to shield projectile resistance. When, however, the layer of lower strength was twice as thick as the other layers

warstwy, tarcza z warstwą czołową o podwyższonej wytrzymałości wykazała nieco większą odporność na ostrzał pociskami 12,7 mm.



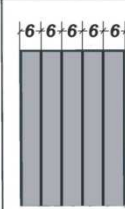
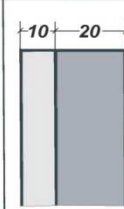
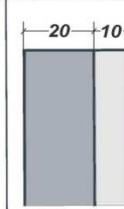
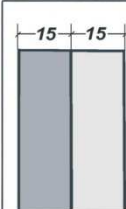

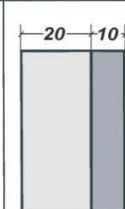
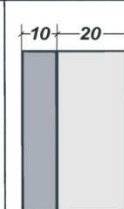
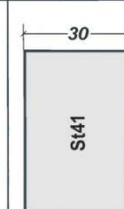
Wyniki obliczeń prędkości końcowych sztywnego pocisku 12,7 mm po prostokątnym przebiciu tarcz o grubości 30 mm, złożonych z warstw stalowych o podwyższonej (10GHMBA) i niższej (St41) wytrzymałości, zestawiono w tabeli 3. Eksperymenty opisane w pracach [11, 12] pokazały, że minimalna grubość monolitycznego (jednowarstwowego) pancerza ze stali 10GHMBA potrzebna do zatrzymania pocisku 12,7 mm uderzającego o pancerz z prędkością bliską 800 m/s wynosi 31 mm.

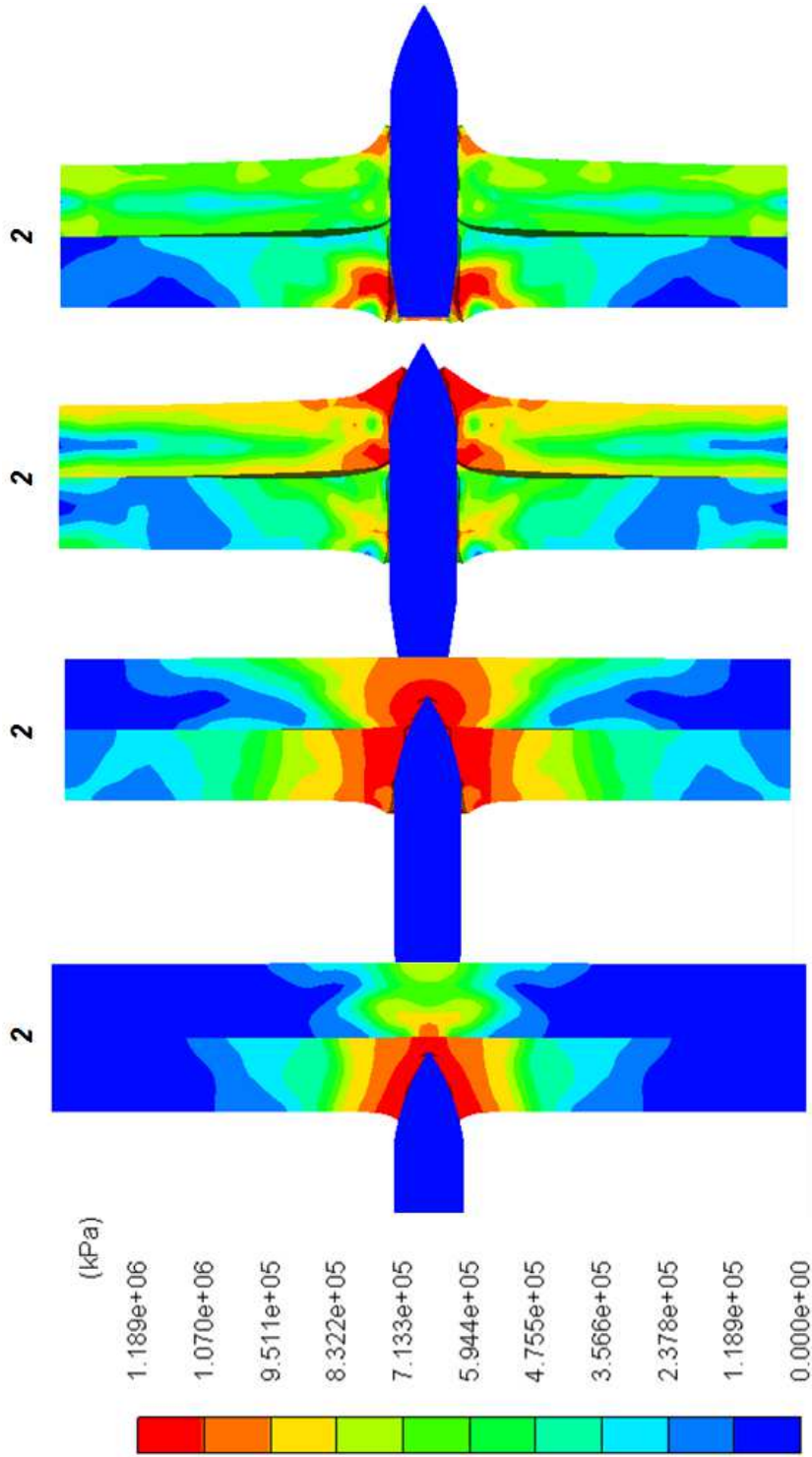
the target with the head layer of enhanced strength demonstrated a little higher resistance to 12.7 mm projectiles.

The calculation results of 12.7 mm rigid projectile final velocity values following the perpendicular penetration of targets 30 mm thick, made from steel layers of enhanced (10GHMBA) and lower (St41) strength, are shown in table 3. The experiments described in publications [11, 12] showed that the minimum thickness of monolithic armor (one-layer) made of (10GHMBA) steel was needed to stop a 12.7 mm projectile hitting the armor with the velocity close to 800 m/s is 31 mm.

Tabela 3. Prędkości końcowe (m/s) sztywnego pocisku 12,7 mm po prostokątnym przebiciu tarcz o grubości 30 mm złożonych z krążków stalowych o podwyższonej (10GHMBA) i niższej (St41) wytrzymałości (prędkość początkowa pocisku: 786 m/s)

Table 3. The final velocity values (m/s) of a rigid 12.7mm projectile following the perpendicular penetration of a target 30mm thick, made from steel disks of enhanced (10GHMBA) and lower (St41) strength (projectile initial velocity: 786m/s)

				
113	204	283	315	338
				
373	369	419	429	488



Rys. 4. Zmiany rozkładu naprężenia zredukowanego wg hipotezy Hubera podczas przebijania tarczy dwuwarstwowej, oznaczonej na rysunku 1. numerem 2 w różnych chwilach czasowych

Fig. 4. Changes in stress distribution, reduced in accordance with Huber hypothesis, at the time of penetrating a two-layered target marked in the figure with numbers 1 and 2 at different time moments

Podobnie jak w przypadku ostrzału tarcz warstwowych o grubości 24 mm, najbardziej odporna na przebicie wśród tarcz o grubości 30 mm okazała się tarcza monolityczna, wykonana ze stali o podwyższonej wytrzymałości. Zwiększenie liczby warstw bez zmiany całkowitej grubości tarczy doprowadziło do osłabienia odporności balistycznej osłony.

Kolejność ustawienia warstw o jednakowych grubościach (15+15 mm) wykonanych ze stali o odmiennych właściwościach wytrzymałościowych nie wpłynęła na kuloodporność osłony w sposób istotny. Natomiast w przypadku jednoczesnego zróżnicowania grubości i właściwości wytrzymałościowych poszczególnych warstw korzystniejsze okazało się umieszczenie warstwy o niższej wytrzymałości od strony uderzenia pocisku.

WNIOSKI

Wyniki omówionych obliczeń, w zestawieniu z rezultatami prac cytowanych we wstępie, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

Stalowe osłony monolityczne (jednowarstwowe) ostrzeliwane typowymi pociskami 12,7 mm z prędkościami ostrzału bliskimi 800 m/s są bardziej odporne na przebicie niż osłony złożone z większej liczby warstw wykonanych z tego samego

As in the case of firing at a layered target 24 mm thick, the monolithic target of enhanced strength proved the most resistant to penetration of all the targets 30 mm thick. Increasing the number of layers without a change in the total thickness of a target led to weakening of the ballistic shield resistance.

The order of placing layers of the same thickness (15+15 mm) made of steel of different strength properties did not significantly affect shield projectile resistance. On the other hand, in the case of simultaneous differentiation of thickness and strength properties of the particular layers, placing the layer of lower stress at the side of projectile hit proved a little more advantageous.

CONCLUSIONS

The calculation results compared with the results in the publications cited in the introduction allow formulating the following conclusions.

Steel monolithic (one-layer) shields fired at with standard 12.7 mm projectiles at the fire velocity close to 800m/s are more resistant to penetration than the shields composed of a larger number of layers made of the same material, when the layer thickness remains unchanged. It follows from the literature review that this conclusion can be generalized

materiału, gdy grubość osłony pozostaje niezmienną. Z przeglądu literatury wynika, że wniosek ten można uogólnić na wszelkie osłony stalowe ostrzeliwane pociskami karabinowymi o obłych i płaskich wierzchołkach.

Stosowanie osłon warstwowych w okrętownictwie jest uzasadnione w przypadkach potrzeby wzmocnienia kuloodporności oraz wytrzymałości konstrukcji istniejących. Może być też korzystne z uwagi na możliwości naprawy uszkodzeń. Wprowadzenie odstępów między warstwami obniża odporność balistyczną osłony ostrzeliwanej pociskami o wierzchołkach owalnym i stożkowym [3, 6].

Kolejność ustawienia warstw w osłonach dwuwarstwowych zbudowanych z gatunków stali o różnych właściwościach wytrzymałościowych nie wpływa w sposób istotny na kuloodporność osłony ostrzeliwanej pociskami 12,7 mm, pod warunkiem że grubości obu warstw są zbliżone. Na podstawie prac [4, 7] taki sam wniosek można odnieść do osłon stalowo-aluminiowych ostrzeliwanych pociskami o średnicach 11,3 i 7,62 mm.

Jeżeli grubości warstw dwuwarstwowej osłony zbudowanej z różnych rodzajów stali różniły się znacznie, nieco wyższą odporność na ostrzał pociskami 12,7 mm wykazywała osłona z warstwą o niższej wytrzymałości od strony uderzenia pocisku.

across all steel shields fired at with small arms projectiles having flat or cylindrical tops.

Using layered shields in shipbuilding is justified in cases when there is a need to enhance the projectile resistance as well as the strength of existing structures. This can also prove beneficial due to possibility of repairing damage. Introducing gaps between layers lowers ballistic resistance of shields fired at with projectiles having oval or conical tops [3, 6].

The order of placing the layers in two-layered shields made of steel of different strength properties does not significantly affect projectile resistance of shields fired at with 12.7 mm projectiles, on the condition that the thickness of both layers is similar. Following the publications [4, 7] the same conclusion can be applied to steel-aluminum shields fired at with 11.3 and 7.62 mm projectiles.

If the thickness of a two-layered shield built from different kinds of steel varied significantly, the shield with a layer of lower resistance on the side hit by the projectile demonstrated a little higher resistance to fire with 12,7 mm projectiles.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Almohandes A. A., Abdel-Kader M. S., Eleiche A. M., *Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates*, Composites, Part B: 'Engineering', 1996, 27 (5), pp. 447-458.
- [2] Liang C. C., Yang M. F., Wu W., *Resistant performance of perforation of multi-layered targets using an estimation procedure with marine application*, 'Ocean Engineering', 2005, 32 (3-4), pp. 441-468.
- [3] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T., *On the ballistic resistance of multi-layered targets with air gaps*, 'International Journal of Solid Structures', 1998, 35 (23), pp. 3097-3103.
- [4] Yossifon G., Yarin A. L., Rubin M. B., *Penetration of a rigid projectile into a multi-layered target: theory and numerical computations*, 'International Journal of Engineering Science', 2002, 40, pp. 1381-1401.
- [5] Radin J., Goldsmith W., *Normal projectile penetration and perforation of layered targets*, 'International Journal of Impact Engineering', 1988, 17 (2), pp. 229-259.
- [6] Huang M., *Ballistic resistance of multi-layered steel shields*, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [7] Dobrociński S., Jurczak W., Kolenka J., *Porównawcze badania odporności balistycznej jedno- i dwuwarstwowych próbek ze stopu AlZn5Mg2CrZr i stali kadłubowej kategorii A*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 2001, No 2, pp. 27-40 (*Comparative investigations into ballistic resistance of one and two-layered test pieces made of AlZn5Mg2CrZr alloy and hull steel category A — available only in Polish*).
- [8] Zatorski Z., *Teoretyczne i technologiczne podstawy projektowania okrętowych osłon balistycznych*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 2009, No 177 A (*Theoretical and technological fundamentals of designing ship ballistic shields — available only in Polish*).
- [9] Halliquist J. O., *LS-DYNA Theory Manual*, LSTC, 2006.
- [10] AUTODYN. *Explicit Software for Nonlinear Dynamics*, Theory Manual, Revision 4.3. Century Dynamics, Horsham, U.K., 2005.
- [11] Szturomski B., *Badania odporności na ostrzał pociskami kalibru 12,7 mm stali 10GHMBA z wykorzystaniem wahadła balistycznego*, 'Biuletyn WAT', 2010, No 4, pp. 411-422 (*Investigations into resistance of 10GHMBA steel to fire with 12.7 mm — available only in Polish, using ballistic pendulum*).
- [12] Flis L., Sperski M., *Badania odporności balistycznej panczerzy ze stali 10GHMBA na ostrzał pociskami 12,7 mm*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 2011, No 3, pp. 27-42. (*Investigations into resistance of armor made of 10GHMBA steel to fire with 12.7 mm projectiles — available only in Polish*).
- [13] LSTC, LS-DYNA® *Keyword user's manual volume II*, LS-DYNA Dev., November 2013.

- [14] Stanisławek S., Morka A., Niezgoda T., *Wpływ uproszczeń w badaniach symulacyjnych zderzeń pocisków z tarczą na dokładność wyników*, 'Biuletyn WAT', 2013, No 3, pp. 137–143 (*The effect of simplification in simulation investigations into collision of projectiles with shield on the accuracy of the results — available only in Polish*).
- [15] Morka A., Niezgoda T., Nowak J., *Sprężona eksperymentalno-numeryczna analiza przebiccia konstrukcji wielowarstwowej przez pocisk 7,62×54R typu B32*, 'Biuletyn WAT', 2012, No 3, pp. 83–96 (*Conjugated experimental-numerical analysis of penetrating multi-layered structure by projectile 7,62×54R type B32 — available only in Polish*).