



## OSŁONY ANTYUDAROWE NA BAZIE PERFOROWANYCH BLACH ZE STALI BAINITYCZNEJ O STRUKTURZE NANOKRYSTALICZNEJ

### ANTI-IMPACT PROTECTING PLATES OF BAINITIC STEEL WITH NANO- CRYSTALLINE STRUCTURE

Wojciech BURIAN, Jarosław MARCISZ

Instytut Metalurgii Żelaza, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Polska  
*Institute of Iron Metallurgy, 12-14 K. Miarki Str., 44-100 Gliwice, Poland*

Lech STARCZEWSKI

Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej, Sulejówek, Polska  
*Military Institute of Armour and Vehicle Technology, Sulejówek, Poland*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wstępne wyniki prac zmierzających do opracowania konstrukcji przestrzennej lub warstwowej na bazie perforowanych blach ze stali bainitycznej o strukturze nanokryystalicznej, która będzie się charakteryzowała podwyższoną skutecznością ochronną i niższą masą własną układu w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań kompozytowych. Blachy perforowane o grubości 8 mm w wariacie wyso-kowytrzymałym (obróbka cieplna: 210°C/120 godzin R<sub>m</sub> min. 2000 MPa) powinny spełnić wymagania drugiego poziomu STANAG 4569. Obserwacje miejsc ostrzału potwierdziły wysoką skuteczność ochronną oraz wystąpienie efektu krawędziowego. Przeprowadzono analizę wpływu zmiennych parametrów perforacji (R, T) na prawdopodobieństwo wystąpienia fragmentacji i/lub zmiany toru lotu pocisku.

**Słowa kluczowe:** osłony antyudarowe, nanostrukturalna stal bainityczna, blachy perforowane

### 1. Wstęp

Stosowanie dopancerzenia pojazdów bojowych jest jedyną możliwością podwyższenia stopnia ochrony załogi i sprzętu. Przyczynia się ono jednak do wzrostu masy własnej, co obniża właściwości jezdne i jest efektem niepożądanym. Z tego powodu dodatkowe opancerzenie powinno się charakteryzować możliwie jak najniższą masą własną, aby zapewnić

**Abstract:** Preliminary results of works aimed to develop a spatial or layered design based on perforated bainitic steel plates of nanocrystalline structure, that is characterized by increased efficiency of protection and lower weight than currently used solutions, are presented in the paper. The perforated plates of 8 mm thickness and high strength class (isothermal heat treatment at 210°C for 120 hours, UTS min. 2000 MPa) have met the second level of Stanag 4569 requirements. The observation of hitting spots has confirmed the high efficiency of protection and the presence of the edge effect. The analysis of dependence between the changing parameters of perforation (R,T), and the probability of fragmentation, and/or declining the path of projectile is included.

**Keywords:** anti-impact protecting plates, nano-structured bainitic steel, perforated plates

### 1. Introduction

The use of add-on armour is the only way of increasing the level of protection of the crew and equipment in combat vehicles. But it also increases their weight what worsens the driving properties and is not a desirable effect. For this reason the add-on armour has to be characterised by possibly low own weight to provide the maximal mobility.

maksymalną mobilność. Pojazdy bojowe są często narażone na ostrzał z broni maszynowej, podczas którego ostrzeliwany jest intensywnie stosunkowo niewielki fragment powierzchni pancerza. Wymusza to na konstrukcji opancerzenia posiadanie odpowiedniej skuteczności ochronnej oraz zachowanie tej odporności podczas ostrzału wielokrotnego. Problem ten szczególnie dotyczy pancerzy o dużej twardości, które często charakteryzują się skłonnością do kruchego pęknięcia. Do takich należą pancerze zawierające ceramikę balistyczną [1, 2]. Problemy z kruchością pojawiają się również przy zastosowaniu stali wysokowytrzymałych pomimo, że ich ciągliwość jest znacznie wyższa od materiałów ceramicznych. Z tego powodu zastosowanie stalowych płyt perforowanych wydaje się być bardziej efektywnym rozwiązaniem niż konstrukcje oparte na blachach monolitycznych. Perforowane płyty z wysokowytrzymałych stali są od wielu lat stosowane jako elementy (warstwy) w systemach opancerzenia, aby zapewnić odpowiedni stopień ochrony. W zależności od grubości i właściwości mechanicznych materiału blachy stosowane są różne systemy perforacji, najczęściej okrągłe i owalne, o parametrach dostosowanych do najbardziej prawdopodobnego rodzaju zagrożenia (typu pocisku). Otwory są zróżnicowane co do średnicy, a ich rozkład może być regularny lub nieregularny [3÷9]. Pomimo faktu, że idea wykorzystująca różne geometrie i układy perforacji jest przedmiotem wielu patentów, wciąż brak jest wystarczającej ilości danych doświadczalnych czy też teoretyczno-numerycznych opisujących mechanizmy zachodzące podczas oddziaływania pocisku z płytą perforowaną [10÷14]. Dotychczasowe eksperymenty wykazały, że najlepsze efekty przynosi zastosowanie regularnego rozkładu perforacji na płycie [15]. Teoretycznie, w momencie uderzenia pocisku w krawędź otworu, w materiale rdzenia pocisku powstaje złożony stan naprężeń z dominującymi naprężeniami zginającymi. Taki stan wytworzenia materiału sprzyja pękaniu rdzenia i zmianie trajektorii lotu, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia jego zdolności penetracyjnych. Rdzenie stalowe lub ze stopów wolframu cechują się dużą wytrzymałością i możliwie dużą twardością powyżej

Combat vehicles are often subjected to firing by machine guns when a relatively small part of armour surface is intensively hit. It enforces on the design of the armour the possession of relevant protecting efficiency and the preservation of this protection at multi-hitting firing. This question refers particularly to armours with the high level of hardness which often show a tendency for fragile cracking. The armours with ballistic ceramics belong to this category [1,2]. The problems of fragility appear also at using hard-strength steels even if their ductility is significantly higher than for ceramic materials. For this reason the application of steel perforated plates seems to be a more effective solution than the designs based on monolithic plates. The perforated plates of high-strength steel have been used for many years as the components (layers) in the armour systems to provide the relevant level of protection. Depending on the thickness and mechanical properties of the plate material there are used different types of perforation such as mostly used round and oval ones with the characteristics matched to the most probable type of the threat (type of projectile). The holes have different diameters and their distribution may be regular or irregular [3-9]. In spite of the fact that the idea of using different geometries and structures of perforation has become the subject of many patents there are still shortages of experimental or theoretical-numerical data, describing the mechanisms occurring at interaction of the projectile with a perforated plate [10-14]. The experiments which have been carried out up to now indicate that the best effects are provided by the application of a regular distribution of perforation on the plate [15]. From theoretical point of view in the moment when a projectile hits the edge of the hole, in the material of projectile core is created a complicated pattern of stresses with domination of bending stresses. This type of material straining makes the core crack and deflect the path of flying what finally leads to the reduction of its penetrating capacities. The cores made from the steel or the tungsten alloys are characterised by the high strength and relatively high hardness above 65HRC. In order to ob-

65HRC. Uzyskanie wysokiej twardości jest możliwe w wyniku wytworzenia podczas obróbki cieplnej w materiale rdzenia węglików lub innych twardych cząstek umacniających, które generują wysoki poziom naprężeń wewnętrznych. Taki stan wyężenia materiału czyni go podatnym na pękanie w momencie wystąpienia naprężeń zginających, szczególnie pochodzenia udarowego. Z symulacji numerycznych [16], wynika, że uderzenie pocisku w krawędź otworu skutkuje powstaniem dużego momentu gnącego, który wywołuje znaczne naprężenie zginające, co skutkuje utratą spójności materiału rdzenia i jego złamaniem lub rozkruszeniem. W obecnie stosowanych konstrukcjach opancerzenia, płyty perforowane mają m.in. za zadanie zdestabilizować trajektorię rdzenia pocisku i ewentualnie doprowadzić do jego częściowego uszkodzenia, aby kolejne warstwy osłony mogły go zatrzymać. Płyty perforowane są obecnie wykonywane ze stali o wytrzymałości z zakresu 1700-1900 MPa. Perforacja tych płyt umożliwia zredukowanie masy własnej systemu opancerzenia przy zachowaniu jego skuteczności ochronnej. Systemy takie stosuje się w osłonach, dla których ze względu na cenę nie stosuje się zabezpieczeń wykonanych na bazie ceramiki, laminatów i włókien. W przypadku nowego gatunku stali, szczególnie bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej, charakteryzującej się wytrzymałością powyżej 2000 MPa, zaobserwowano efekt przekoszenia pocisku nawet przy ostrzale pod kątem  $0^\circ$  do normalnej. Zaobserwowany efekt przebiegał inaczej niż przewidują to symulacje numeryczne oraz opisywane eksperymenty, w których przekoszenie (zniszczenie) pocisku występowało po pochyleniu płyty perforowanej [15]. Stal bainityczna o strukturze nanokrystalicznej [17] charakteryzuje się korzystną kombinacją właściwości mechanicznych, nieosiągalnych w przypadku innych gatunków stali stosowanych w opancerzeniu. Czynnikiem decydującym o właściwościach tej stali jest skład chemiczny oraz odpowiednio dobrany proces obróbki cieplnej, w wyniku, której powstaje unikalny typ nanostruktury. Obecnie prowadzone badania mają na celu opracowanie technologii wytwarzania wyrobów ze stali bainitycznej o właściwościach pozwalających

maintain the high hardness the carbides or other types of hard strengthening particles, which generate the high level of internal stresses, have to be created in the material of the core at thermal treatment. Such conditions of material straining make it susceptible to cracking in the moment of appearing the bending stresses, especially of impact character. According to numerical simulations [16] the hitting of the projectile into the edge of the opening results in creation of a great bending moment, that causes significant bending stresses, what finally leads to losing the integrity of the core material and its breaking or crushing. In currently used designs of armours the perforated plates are used to destabilise the trajectory of projectile's core, and finally cause its partial damage to provide its arresting by the consecutive layers of the shield. The perforated plates are now made from the steel grades of 1700-1900 MPa strength. The perforation of these plates reduces the own weight of the armour system at maintaining its protecting effectiveness. Such systems are used for shields when it does not pay to apply the protections made on the base of ceramics, laminates and fibres. In case of the new grade of the steel, especially for the bainitic steel with nano-crystalline structure that is characterised by the strength values above 2000 MPa, it has been observed the effect of complete tilting (damage) of the projectile even for hitting angle of  $0^\circ$  against to normal. The observed phenomenon was different than predicted by numerical simulations and described in experiments where the complete tilting (damage) of the projectile happened after the perforated plate was declined [15]. The bainitic steel with nano-crystalline structure [17] has a favourable combination of mechanical properties which are beyond the capacities of other steel grades used for armours. The factor that decides about the properties of this steel is the chemical composition and a suitably matched thermal treatment, resulting in the creation of a unique type of nano-structure. There have been studies currently carried out on the development of technology for manufacturing the goods from the bainitic steel, possessing the properties suitable for

na zastosowanie do wytwarzania osłon balistycznych oraz wyrobów o bardzo wysokiej twardości i odporności na ścieranie, przy jednocześnie dobrej odporności na pęknięcie w obecności obciążeń uderzeniowych [18-25].

W artykule przedstawiono wstępne wyniki prac zmierzających do opracowania konstrukcji przestrzennej lub warstwowej osłony antyuderowej na bazie perforowanych blach wykonanych ze stali bainitycznej o strukturze nanokryształicznej, która będzie się charakteryzowała wyższą skutecznością ochronną i niższą masą własną w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań. Przeprowadzono obliczenia prawdopodobieństwa zniszczenia rdzenia pocisku przeciwpancernego w zależności od parametrów perforacji otworami okrągłymi. Za zmienne przyjęto promień otworu perforacji ( $R/2$ ), odległość pomiędzy środkami otworów ( $T$ ) oraz szerokość pasa trafienia ( $P_t$ ) (Rys.1).

## 2. Materiał i metody badań

Materiał badań stanowiły blachy perforowane wykonane z opracowanej w IMŻ stali bainitycznej o strukturze nanokryształicznej NANOS-BA<sup>®</sup>. Blachy arkuszowe o grubości 3÷8 mm poddano obróbce cieplnej kształtującej właściwości mechaniczne. Właściwości mechaniczne stali wyznaczono w statycznej próbie rozciągania na próbkach płaskich z blach o grubości 3÷6 mm. Udarność badano metodą Charpy-V na próbkach standardowych o przekroju 10x10 mm w temperaturze pokojowej i w -40°C. Nanostrukturalna stal bainityczna uzyskuje finalne właściwości użytkowe w wyniku obróbki cieplnej polegającej na austenitowaniu, regulowanym chłodzeniu i wygrzewaniu w temperaturze przemiany izotermicznej [17-25]. W przypadku badanego gatunku stali można uzyskać następujące właściwości mechaniczne:  $R_{0,2}$  od 1000 do 1400 MPa,  $R_m$  od 1600 do 2100 MPa i wydłużenie odpowiednio od 12 do 25 %. Dla badanych blach perforowanych wytrzymałość, granica plastyczności, wydłużenie oraz udarność wynosiły odpowiednio 2021 MPa, 1243 MPa, 13% oraz 12 J (w temperaturze -40°C). Po obróbce cieplnej blachy zostały perforowane metodą wier-

manufacture of ballistic shields and articles with a high level of hardness and resistance against abrasion, and moreover with a significant level of resistance against breaking under the impact loads [18-25].

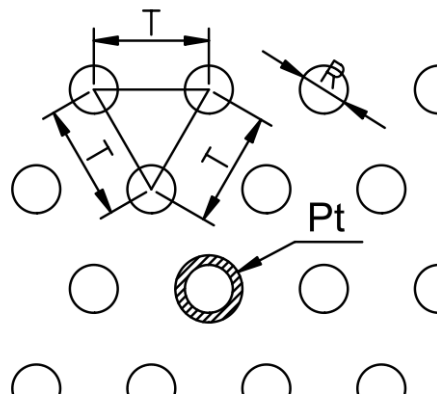
In the paper are presented initial results of work, aimed to develop a spatial or layered design of anti-impact shield, based on perforated plates made from the bainitic steel with the nano-crystalline structure, that has to be characterised by the higher efficiency of protection and the lower own mass than the existing solutions. There were carried out calculations for the probability of damaging the core of armour piercing projectile depending on round hole perforation characteristics. As the variables were taken the radius of the perforating hole ( $R/2$ ), distance between the centres of holes ( $T$ ) and the width of the hitting strip ( $P_t$ ) (Figure1).

## 2. Material and testing methods

The perforated plates made from the bainitic steel with the nano-crystalline structure NANOS-BA<sup>®</sup>, developed in the IIM, were used as tested material. The sheeted plates of thickness between 3 mm to 8 mm were subjected to thermal treatment to form the mechanical properties. The mechanical properties of the steel were determined in the static tension test by using flat samples obtained from the plates of 3-6 mm thickness. The impact strength has been tested by Charpy-V method using standard samples with the cross-section 10x10 mm in the ambient room temperature and in -40°C. Nanostructural bainitic steel acquires the final design properties in the result of thermal treatment consisting of austenitisation, controlled cooling and heating in temperature of isothermal transition [17-25]. Following mechanical properties may be received for the tested grade of steel:  $R_{0,2}$  from 1000 to 1400 MPa,  $R_m$  from 1600 to 2100 MPa and elongation respectively from 12 to 25 %. For the perforated plates the strength, limit of plasticity, elongation and the impact strength were respectively 2021 MPa, 1243 MPa, 13% and 12 J (in temperature -40°C). After the thermal treatment the plates were perfo-

czenia. Na rys. 1 przedstawiono schemat perforacji blach typu R5T12. Badania balistyczne zostały wykonane na próbkach o wymiarach 400x400 mm według metodyk badawczych obowiązujących w akredytowanym przez PCA Laboratorium Inżynierii Materiałowej WITPiS (AB083) i zgodnych z wymaganiami odpowiednich krajowych i międzynarodowych norm przedmiotowych lub dokumentów odniesienia (wg PN-EN 1522 oraz NATO-STANAG 4569). W testach balistycznych stosowano następujące typy amunicji wg Stanag 4569 A: kal. 7,62x39mm API BZ oraz kal. 7,62x54 mm R API B-32.

rated by drilling. Plate perforation diagram for R5T12 pattern is presented in figure 1. The ballistic tests were carried out on samples with dimensions of 400x400 mm according to testing methodologies, binding in the Laboratory of Material Engineering of WITPiS accredited by PCA (AB083), and in compliance with the relevant country and international objective standards or reference documents (acc. PN-EN 1522 and NATO-STANAG 4569). For the ballistic tests the following types of ammunition were used according to Stanag 4569 A: cal. 7.62x39mm API BZ and cal. 7.62x54 mm R API B-32.



Rys 1. Schemat perforacji otworami okrągłymi w geometrii naprzemiennej  
Figure 1. Diagram of perforation by round holes at alternating geometry

### 3. Wyniki badań i dyskusja

Przedmiotem badań była ocena zachowania się blachy perforowanej wykonanej ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej NANOS-BA<sup>®</sup> podczas ostrzału pociskami o dużej energii i zdolności penetracyjnej. Uzyskane dotychczas wyniki badań [18, 19, 21÷25] wykazały, że nanokrystaliczna stal bainityczna charakteryzuje się wysoką skutecznością ochronną, także w porównaniu do szeroko stosowanych rozwiązań opartych na stalach martenzytycznych. Zastosowanie perforacji ma na celu poprawę odporności na pękanie blachy, szczególnie podczas ostrzału wielokrotnego oraz obniżenia masy własnej. Do badań przygotowano blachy perforowane o grubościach 3 mm i 8 mm. Blachy o grubości 8 mm zostały ostrzelane pociskami kal. 7,62x39mm API BZ i kal. 7,62x54 mm R API

### 3. Results of tests and discussion

The objective of tests was to evaluate the behaviour of the perforated plate, made from the bainitic steel with the nano-crystalline structure NANOS-BA<sup>®</sup>, at firing by projectiles of high energy and penetrating capacity. The results which were received up to now [18, 19, 21÷25] have indicated that nano-crystalline bainitic steel is characterised by a high protecting efficiency, that may be also compared with the widely used solutions based on martensite steels. The application of perforation is aimed to improve the resistance of the plate against cracking, especially at multi-hitting fire and to reduce its own mass. The perforated plates with thicknesses of 3 mm and 8 mm were prepared for tests. The plates of 8 mm thickness were fired by rounds API BZ of 7.62x39mm calibre and R

B-32 (nie stosowano naważek w celu regulacji prędkości pocisków, dlatego prędkości pocisków były wyższe niż wymagane w normie). Przygotowano również konstrukcję warstwową zawierającą blachy perforowane o grubości 3 mm (zewnętrzna) i 8 mm. W tabeli 1 przedstawiono wyniki prób ostrzałem badanych blach. W przypadku pocisku kal. 7,62x39mm API BZ wykonano sześć strzałów i dla wszystkich uzyskano efekt pozytywny (brak przebiccia blachy). W przypadku pocisku kal. 7,62x54 mm R API B-32 oddano cztery strzały, z których jeden był pozytywny, a trzy negatywne (przebiccie blachy).

API B-32 of 7.62x54 mm calibre (the weight batching was not applied to regulate the velocities of projectiles). There was also prepared a layered design of perforated plates with 3 mm (external) and 8 mm thickness. Table 1 includes the results of firing tests for these plates. In case of the round API BZ calibre 7.62x39mm six shots were delivered and for each of them the positive result was received (no penetration of plate). In case of the round R B-32 calibre 7.62x54 mm four shots were delivered and one of them was positive and three negative (penetration of the plate).

Tabela 1. Wyniki prób ostrzałem blach perforowanych wykonanych ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej

Table 2. Results of firing tests for perforated plates made from the bainitic steel with the nano-crystalline structure

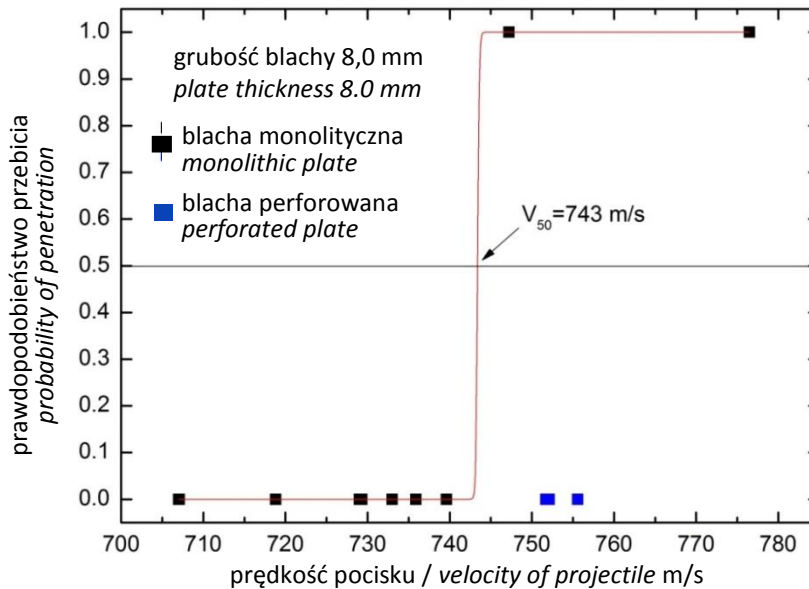
Grubość płyty <i>Plate thickness</i> (mm)	Rodzaj pocisku <i>Type of round</i>	Prędkość pocisku <i>Velocity of round</i> (m/s)	Wynik próby <i>Test result</i>
8	7,62x39mm API BZ	751,7	Pozytywny / <i>Positive</i>
		752,1	Pozytywny / <i>Positive</i>
		755,6	Pozytywny / <i>Positive</i>
		760,0	Pozytywny / <i>Positive</i>
		751,0	Pozytywny / <i>Positive</i>
		752,5	Pozytywny / <i>Positive</i>
8	7,62x54 mm R B-32	843,0	Pozytywny / <i>Positive</i>
		836,7	Negatywny / <i>Negative</i>
		821,0	Negatywny / <i>Negative</i>
		819,0	Negatywny / <i>Negative</i>
3+8	7,62x54 mm R B-32	862,5	Pozytywny / <i>Positive</i>
		832,8	Pozytywny / <i>Positive</i>
		820,6	Pozytywny / <i>Positive</i>

Wyniki wcześniejszych badań [21] wykazały, że blachy o grubości 8 mm ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej spełniły wymagania 2 poziomu ochrony wg. STANAG 4569. W przypadku blachy perforowanej o grubości 8 mm otrzymano wszystkie rezultaty pozytywne, co w połączeniu ze znacznie wyższą prędkością pocisków niż wymagana w normie pozwala stwierdzić, że wymagania 2 poziomu ochrony również powinny zostać spełnione. Wyniki prób ostrzałem naniesiono na diagramy przedstawiające prawdopodobieństwo przebiccia w zależności od prędkości pocisku (rys. 2) oraz przebiccie w funkcji prędkości pocisku i grubości blachy (rys. 3). W tabeli

The results of earlier tests [21] have proved that the plates with the thickness of 8 mm made from the bainitic steel of nano-crystalline structure have met the requirements for 2-nd level of protection according to STANAG 4569. In case of perforated plate with 8 mm thickness all obtained results were positive what in connection with significantly greater velocities of rounds gives the reason for stating that the requirements of the 2-nd level of protection should also be met. Results of firing tests were put into the diagrams which represent the probability of penetration depending on the velocity of the projectile (Figure 2), and the penetration in the function of round velocity and the plate thickness (Figure 3).

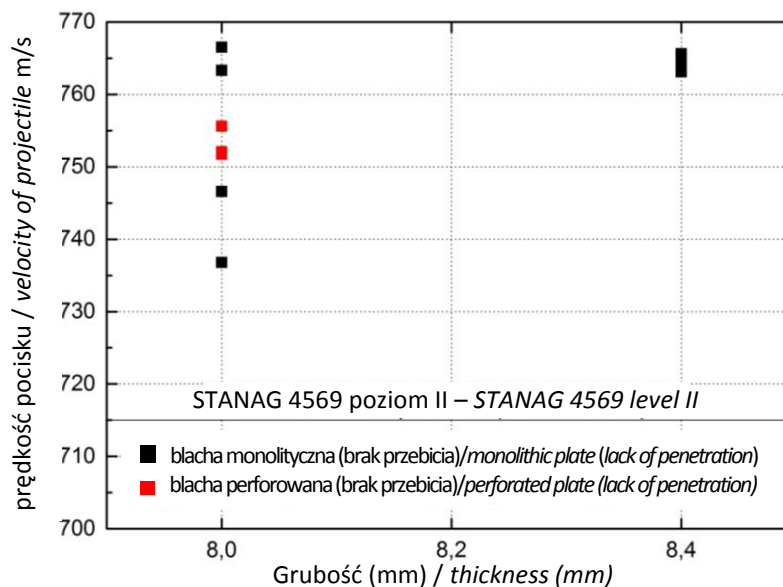
2 przedstawiono właściwości mechaniczne stali bainitycznej dla różnych wariantów obróbki cieplnej. Analiza wyników wykazała, że zastosowanie perforacji pozwoliło zachować skuteczność ochronną spełniającą wymagania poziomu 2 wg. STANAG 4569 przy zredukowaniu masy własnej osłony o 15,7 %.

Table 2 includes the mechanical properties of the bainitic steel for different options of thermal treatment. The analysis of results has proved that the use of perforation provides the protecting efficiency that meets the requirements of the 2-nd level according to STANAG 4569 at reduction of the shield own mass by 15.7 %.



**Rys. 2. Wyniki testów ostrzałem blachy monolitycznej i blachy perforowanej o grubości 8 mm wykonanej ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej: blacha monolityczna – 225°C/120 godz., blacha perforowana – 210°C/120 godz.**

**Figure 2. Results of firing tests for monolithic and perforated plates of 8 mm thickness made from the bainitic steel with nano-crystalline structure: monolithic plate – 225°C/120 hours, perforated plate – 210°C/120 hours**



**Rys. 3. Wyniki testów ostrzałem blachy monolitycznej i blachy perforowanej o grubości 8 mm wykonanej ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej w wariantcie 210°C/120 godz.**

**Figure 3. Results of firing tests for monolithic and perforated plates of 8 mm thickness made from bainitic steel with nano-crystalline structure and treatment option 210°C/120 hours**

Na rys. 4 przedstawiono fotografię blachy perforowanej o grubości 8 mm po ostrzale pociskiem kal. 7,62x39mm API BZ i kal. 7,62x54 mm R API B-32. Wyniki prób ostrzałem pociskiem kal. 7,62x39mm API BZ wykazały, że pomimo zastosowania wariantu obróbki cieplnej zapewniającego wyższy poziom wytrzymałości (patrz tabela 2), nie otrzymano efektu kruchego pęknięcia materiału przy ostrzale wielokrotnym.

The photograph of perforated plate with 8 mm thickness after firing by the round API BZ of 7.62x39mm calibre and the round R API B-32 of 7.62x54mm calibre is presented in figure 4. The results of tests by firing the API BZ round of 7.62x39mm calibre have proved that in spite of using the option of thermal treatment, that provides the higher level of the strength (see table 2), the effect of crushed breaking of the material at multi-hitting was not observed.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne stali bainitycznej

Table 2. Mechanical properties of bainitic steel

Parametry obróbki cieplnej <i>Parameters of thermal treatment</i>	R <sub>0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%)
225°C/120 godzin / <i>hours</i>	1368,0	1892,5	16,3
210°C/120 godzin / <i>hours</i>	1317,0	2031,5	13,4

Obserwacje śladów ostrzału blach perforowanych oboma rodzajami pocisków przeciwpancernych wykazały, że w przypadku trafienia pocisku w krawędź perforacji (w pobliżu otworu), nastąpiło całkowite zniszczenie rdzenia pocisku, a blachy nie zostały przebite (rys. 4).

W przypadku osłon konstruowanych na bazie monolitycznych blach ze stali martenzytycznych klasy 500, grubość blachy chroniącej przed pociskiem kal. 7,62x54 mm R API B-32 wynosi 15 mm, a masa powierzchniowa wynosi 117 kg/m<sup>2</sup> [26]. Po modyfikacji układu [1] i zastosowaniu konstrukcji przestrzennej złożonej z blachy monolitycznej o grubości 9 mm i perforowanej o grubości 6 mm, wykonanych z tego samego gatunku stali, zredukowano masę powierzchniową do 86 kg/m<sup>2</sup>.

W niniejszej pracy zastosowano złożenie blach perforowanych, wykonanych z bainitycznej stali o strukturze nanokrystalicznej, o grubościach 8 mm (płyta bazowa) i 3 mm (płyta zewnętrzna) (rys. 5). Podczas ostrzału tego zestawu blach pociskiem kal. 7,62x54 mm R API B-32 przebita została tylko przednia o grubości 3 mm, natomiast na tylnej zaobserwowano niewielkie kraterki (rys. 6). Masa powierzchniowa badanego układu wynosi 72 kg/m<sup>2</sup>, zatem uzyskano 17% redukcji masy własnej opancerzenia. Ocena

The observation of hitting traces on perforated plates, after firing by two types of armour piercing projectiles, has proved that in case of hitting into the edge of perforation (in the vicinity of the hole) the complete damage of the round core has happened whereas the plates were not penetrated (Figure 4).

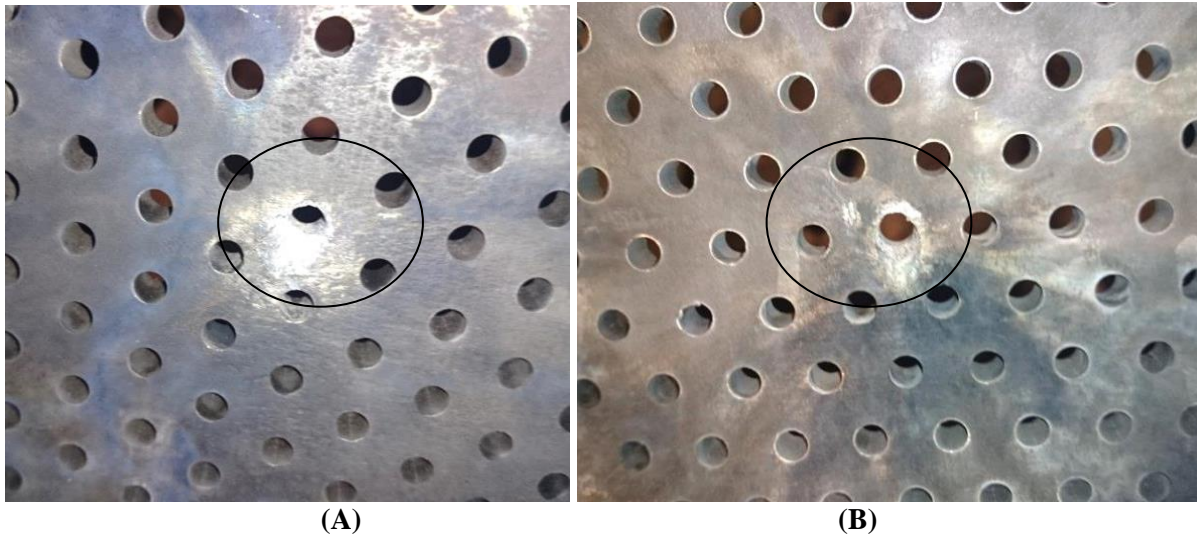
In case of shields designed on the base of monolithic plates from the martensite steel of grade 500 the thickness of the plate that protects against the bullet R API B-32 calibre 7.62x54 mm is 15 mm and the surface density is 117 kg/m<sup>2</sup> [26]. After the modification of the system [1] and application of a space design composed of the monolithic plate with 9 mm thickness and perforated plate of 6 mm thickness made from the same grade of steel the surface density has been reduced to 86 kg/m<sup>2</sup>.

The present work describes the composition of perforated plates made from the bainitic steel of nano-crystalline structure with thickness of 8 mm (base plate) and 3 mm (external plate) (Figure 5). At firing against this combination of plates by R API B-32 bullet of 7.62x54 mm calibre only the front plate of 3mm thickness was pierced and small craters were observed on the rear plate (Figure 6). The surface density of tested combination is 72 kg/m<sup>2</sup>, thus 17% reduction of armour own mass has been achieved. The



skutków uderzenia odłamkami z płyty 3 mm oraz fragmentami rdzenia pocisku, pozwala stwierdzić, że możliwe jest skonstruowanie osłony o grubości blachy podkładowej mniejszej niż 8 mm. Wyniki prób ostrzałem układu warstwowego zamieszczono w tabeli 1.

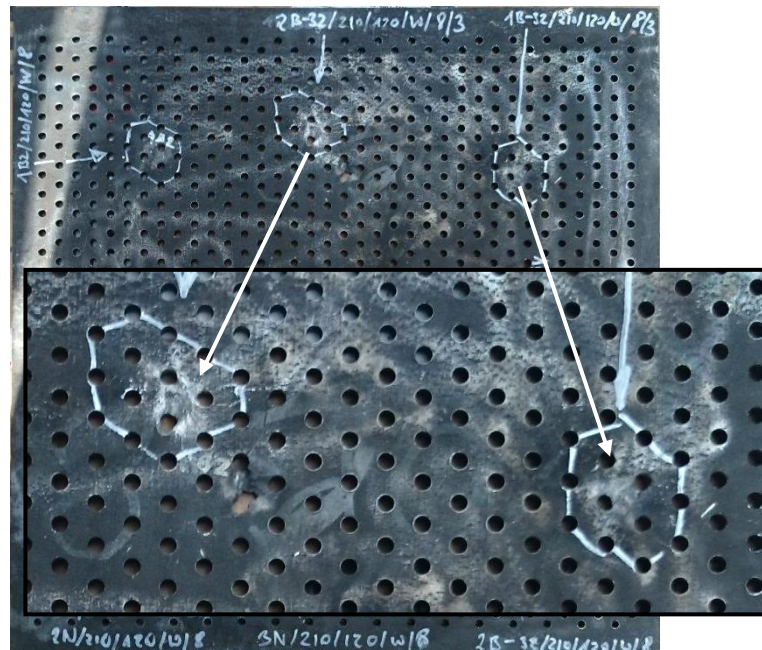
evaluation of hitting effects by the fragments of 3 mm plate and the bullet's core leads to a conclusion that it is possible to design the shield with the base plate of less thickness than 8 mm. The results of firing tests for the layered system are presented in table 1.



**Rys 4. Przykładowe fotografie blach perforowanych o grubości 8 mm po ostrzale pociskiem kal. 7,62x39mm API BZ (A) i kal. 7,62x54 mm R API B-32 (B), testy pozytywne – brak przebicia**  
**Figure 4. Exemplary photographs of perforated plates with 8 mm thickness after firing by API BZ (A) bullet of 7.62x39mm and R API B-32 (B) bullet of 7.62x54 mm calibre, positive results – no penetration**



**Rys. 5. Fotografia układu blach perforowanych 3mm+8mm po ostrzale pociskiem kal. 7,62x54 mm R API B-32**  
**Figure 5. Photograph of a combination of perforated plates 3mm+8mm after firing by the round R API B-32 of 7.62x54 mm calibre**



**Rys. 6. Fotografia blachy 8 mm (z układu blach perforowanych 3mm+8mm) po ostrzale pociskiem kal. 7,62x54mm R API B-32**

**Figure 6. Photograph of the plate 8 mm (from the combination of perforated plates 3mm+8mm) after firing by R API B-32 bullet of 7.62x54mm calibre**

Wyniki badań ostrzałem oraz symulacji numerycznych wykazały, że fragmentacja rdzenia pocisku kal. 7,62x54 mm R API B-32, w przypadku zastosowania osłon z obecnie stosowanych gatunków stali pancernych, zachodzi przy kącie ostrzału między  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , natomiast pełne przekoszenie (zniszczenie lub zrykoszetowanie) w zakresie kątów większych niż  $45^\circ$  [1, 27]. W przypadku perforowanej blachy o grubości 8 mm, którą wykonano z nowego gatunku stali bainitycznej NANOS-BA<sup>®</sup>, zaobserwowano, że fragmentacja i przekoszenie rdzenia może nastąpić przy ostrzale pod kątem  $0^\circ$  do normalnej. Zaobserwowany efekt przekoszenia (zniszczenia) rdzenia pocisków przeciwpancernych na krawędziach otworów perforacji blach wykonanych ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej oraz dane literaturowe odnośnie oddziaływania pocisku z blachą perforowaną [1, 3, 10] prowadzą do wniosku, że stosując wysokowytrzymałą stal bainityczną oraz odpowiednio dobrany układ perforacji można zaprojektować opancerzenie warstwowe, które będzie się charakteryzowało niższą masą własną w porównaniu do obecnie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

W płytach monolitycznych, głównym me-

The results of firing tests and numerical simulations have proved that the fragmentation of the core of R API B-32 projectile of 7.62x54 mm calibre, in case of application of shields made from currently used grades of armour steels, happens for firing angles between  $20^\circ$  and  $30^\circ$ , whereas the complete tilting (destroying or ricocheting) occurs for the angles greater than  $45^\circ$  [1, 27]. In case of the perforated plate with 8 mm thickness, that is made of the new grade of bainitic steel NANOS-BA<sup>®</sup>, it has been observed that the fragmentation and tilting of the core may take place at firing under the angle of  $0^\circ$  against the normal. The observed effect of complete tilting (damage) of the cores of armour piercing bullets on the edges of perforations in plates made from the bainitic steel with nano-crystalline structure, and the literature information concerning the interaction between the bullet and perforated plate [1, 3, 10], lead to the conclusion that a layered armour may be designed, with the lower own mass than currently used in designing solutions, by using the high-strength bainitic steel and suitably matched system of perforation.

In the monolithic plates the main mecha-

chanizmem zapobiegającym penetracji pancerza stalowego przez pocisk przeciwpancerny jest absorpcja i rozproszenie energii pocisku m.in. w wyniku odkształcenia plastycznego. W przypadku blach perforowanych dodatkowe znaczenie ma odpowiednia wytrzymałość na zginanie, wynikająca z asymetrycznie działającej siły na rdzeń pocisku w przypadku trafienia w pobliżu obszaru otworu perforacji. W rezultacie zachodzi destabilizacja pocisku oraz fragmentacja rdzenia, prowadzące do jego zniszczenia.

Przeprowadzono obliczenia prawdopodobieństwa całkowitego zniszczenia rdzenia pocisku przeciwpancernego dla różnych układów perforacji regularnej otworami okrągłymi. Podczas rozważań uwzględniono tzw. efekt krawędziowy „Z” jako iloraz różnicy średnicy rdzenia pocisku i średnicy otworu perforacji oraz promienia rdzenia pocisku (1). Wartość parametru „Z” jest istotna z uwagi na poziom naprężeń zginających działających na rdzeń pocisku [28, 29]. Stwierdzono eksperymentalnie [29], że dla wywołania w rdzeniu pocisku odpowiedniego poziomu naprężeń zginających, należy spełnić zależność  $Z \geq 0,35$ .

$$Z = h/r \geq 0,35 \quad (1)$$

$$h = D - R, \quad r = D/2,$$

gdzie:  $D$  – średnica rdzenia pocisku [mm],  
 $R$  – średnica perforacji [mm],  
 $h$  – obszar nakładania [mm],  
 $r$  – promień rdzenia pocisku [mm].

Określona powyższą zależnością geometria styku rdzenia z otworem perforacji spowoduje powstanie warunków sprzyjających zmianie trajektorii lotu, wystąpienie znacznych naprężeń zginających, a w konsekwencji jego fragmentację lub zniszczenie. Dla amunicji kal.7,62x54 mm R API B-32, średnica rdzenia wynosi  $D=6,2$  mm, a więc przy średnicy perforacji  $R=5$  mm,  $h/r=0,39$ , a obszar nakładania  $h=1,2$  mm (odpowiednik użytego w obliczeniach parametru  $P_t$  – szerokości pasa trafienia), zatem spełniona jest zależność (1). Na rys. 7 przedstawiono wyniki obliczeń redukcji masy własnej blachy (prześwit) przy

nism that prevents the piercing of the steel armour by the armour piercing bullet is among others the absorption and dissipation of bullet's energy by plastic deformation. In the case of perforated plates some additional meaning has a relevant resistance against the bending that results from the asymmetrically acting force onto the core of the bullet when it hits the area near the perforated hole. Finally it leads to destabilisation of the projectile and fragmentation of its core and its damaging.

The calculations of probability of complete destruction of the armour piercing bullet core were carried out for different patterns of regular perforation by round holes. So called edge effect „Z” determined as the quotient of the difference between diameters of the hole and the bullet core, and the radius of the bullet core (1) has been considered. The value of parameter „Z” is important from the point of bending stresses acting into the core of the bullet [28, 29]. It has been stated experimentally [29] that in order to cause a relevant level of bending stresses in the bullet core the following dependence has to be met:  $Z \geq 0.35$ .

where:  $D$  – diameter of bullet core [mm],  
 $R$  – diameter of perforation [mm],  
 $h$  – area of hitting [mm],  
 $r$  – radius of bullet core [mm].

The geometry of the contact between the core and the hole of perforation, described by the above formula, creates the favourable conditions for changing the trajectory of the flight, for occurring the significant bending stresses, and in consequence for its fragmentation or destruction. For ammunition R API B-32 of 7.62x54 mm calibre the diameter of the core is  $D=6.2$  mm, thus at the diameter of perforation  $R=5$  mm,  $h/r=0.39$  and the area of coincidence  $h=1.2$  mm (the equivalent of parameter  $P_t$  – the width of hitting strip used in calculations) the dependence (1) is met. Figure 7 presents the results of calculations

zastosowaniu perforacji otworami okrągłymi o zmiennej średnicy  $R$  i odległości pomiędzy środkami otworów  $T$ . Na rys. 8 i 9 przedstawiono wyniki obliczeń prawdopodobieństwa przekoszenia rdzenia pocisku dla perforacji otworami okrągłymi w geometrii naprzemiennej dla zmiennych  $R$ ,  $T$  i  $P_t$ . Obliczenia prawdopodobieństwa przekoszenia rdzenia pocisku (zniszczenia) wykonano przy założeniu, że trafienie nastąpiło w określonej odległości ( $P_t$ ) od krawędzi otworu, dla której zgodnie z efektem krawędziowym i zależnością (1) następuje całkowite przekoszenie rdzenia pocisku zapobiegające przebiciu blachy. Prawdopodobieństwo wyrażono jako stosunek pola otworu powiększonego o obszar  $P_t$  (rys. 1) do pola całkowitego blachy perforowanej, gdzie  $S_o$  – pole otworu perforacji,  $S_{P_{t(+)}}$  – pole otworu perforacji powiększone o pas powodujący przekoszenie rdzenia pocisku,  $S_{P_{t(-)}}$  – pole otworu pomniejszone o pas powodujący przekoszenie rdzenia pocisku,  $S_{P_{(+,-)}}$  – pole trafień powodujące przekoszenie rdzenia pocisku, zakładając symetrię zjawiska przekoszenia pocisku przy trafieniu na zewnątrz jak i wewnątrz krawędzi otworu perforacji,  $P$  – prześwit w %,  $P_{(+)}$  – prawdopodobieństwo przekoszenia rdzenia pocisku w %, przy trafieniu w pas o szerokości  $P_t$  na zewnętrznej krawędzi otworu perforacji,  $P_{(+,-)}$  – prawdopodobieństwo przekoszenia rdzenia pocisku w %, przy założeniu symetrii zjawiska przekoszenia w przypadku trafienia w zewnętrzną jak i wewnętrzną krawędź perforacji o szerokości  $P_t$ .

on the reduction of the plate own mass (transparency) when the perforation of round holes, with changing diameters  $R$  and distances  $T$  between the centres of holes, is applied. Figures 8 and 9 present the results of calculations on the probability of tilting the bullet core for round hole perforation at alternating geometry for variables  $R$ ,  $T$  and  $P_t$ . The calculations of the probability of bullet core tilting (damaging) have been carried out at the assumption that the hitting took place at a specified distance ( $P_t$ ) from the edge of the hole, for which according to the edge effect and dependence (1), the complete tilting of the bullet core occurs what prevents the plate penetration. The probability is expressed as the quotient of the area of the hole increased by the area of  $P_t$  (Figure 1) to the entire area of the perforated plate, where  $S_o$  – area of perforation hole,  $S_{P_{t(+)}}$  – area of the perforation hole increased by a strip causing the tilting of the bullet core,  $S_{P_{t(-)}}$  – area of hole decreased by a strip causing the tilting of the bullet core,  $S_{P_{(+,-)}}$  – area of hitting causing the tilting of the bullet core, assuming the symmetry of bullet tilting phenomenon at hitting both outside and inside the edge of the perforation hole,  $P$  – transparency in %,  $P_{(+)}$  – probability of the bullet core tilting in % at hitting into the strip of width  $P_t$  on the external edge of perforation hole,  $P_{(+,-)}$  – probability of the bullet core tilting in % assuming the symmetry of tilting phenomenon in case of hitting into both the external and internal edge of perforation with the width  $P_t$ .

$$S_o = \pi \cdot (R/2)^2 \quad (2)$$

$$S_{P_{t(+)}} = \pi \cdot (R/2 + P_t)^2 \quad (3)$$

$$S_{P_{t(-)}} = \pi \cdot (R/2 - P_t)^2 \quad (4)$$

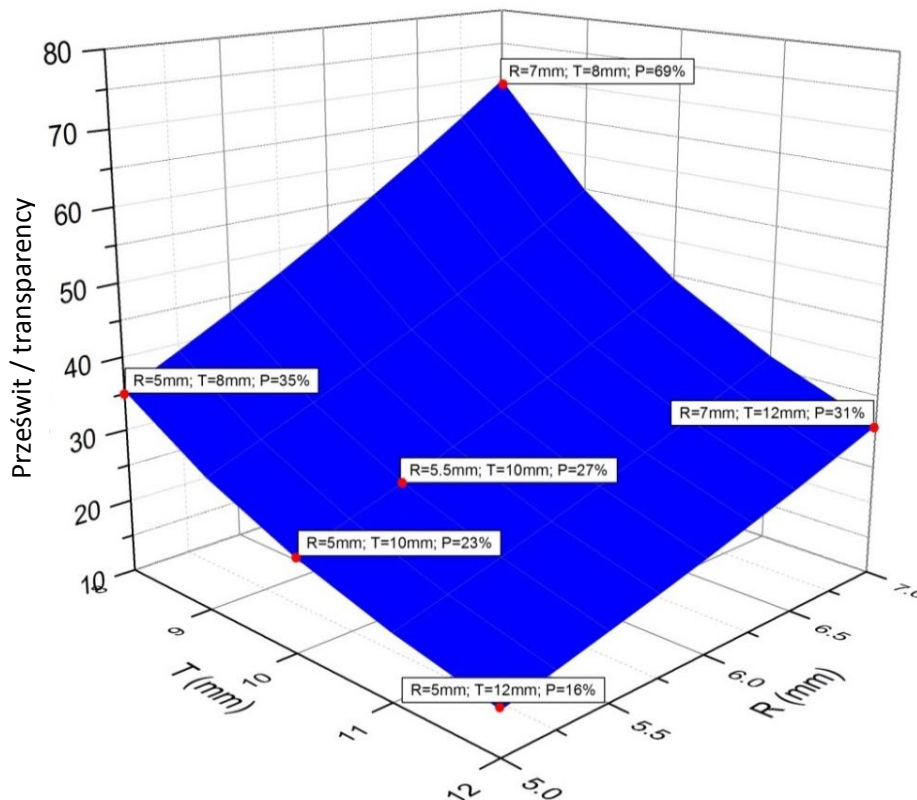
$$S_{P_{(+)}} = S_{P_{t(+)}} - S_o \quad (5)$$

$$S_{P_{(+,-)}} = S_{P_{t(+)}} - S_{P_{t(-)}} \quad (6)$$

$$P = \frac{\pi \cdot R^2}{2 \cdot T^2 \cdot \sqrt{3}} \quad (7)$$

$$P_{(+)} = \frac{2\pi \cdot (R \cdot P_t + P_t^2)}{T^2 \cdot \sqrt{3}} \quad (8)$$

$$P_{(+,-)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot P_t}{T^2 \cdot \sqrt{3}} \quad (9)$$



Rys. 7. Prześwit blachy perforowanej w zależności od konfiguracji perforacji otworami okrągłymi  $P=f(T,R)$

Figure 7. The transparency of perforated plate depending on the configuration of the round hole perforation  $P=f(T,R)$

Na rys. 7 zaznaczono punkty charakteryzujące zmiany masy blachy przy zastosowaniu perforacji o różnych parametrach. W przypadku badanych blach zastosowano perforację R5T12, która umożliwiła redukcję masy własnej blachy o 16 %. Wykres wskazuje, że możliwa jest redukcja masy w zakresie od 23 % do około 35 % przy zachowaniu odległości pomiędzy krawędziami otworów w zakresie 5÷6 mm, która zapewni odpowiednią wytrzymałość i sztywność układu umożliwiającą wystąpienie efektu krawędziowego. W celu wyznaczenia minimalnego obszaru pomiędzy krawędziami otworów przy zastosowaniu perforacji otworami okrągłymi w geometrii naprzemiennej, konieczne jest wykona-

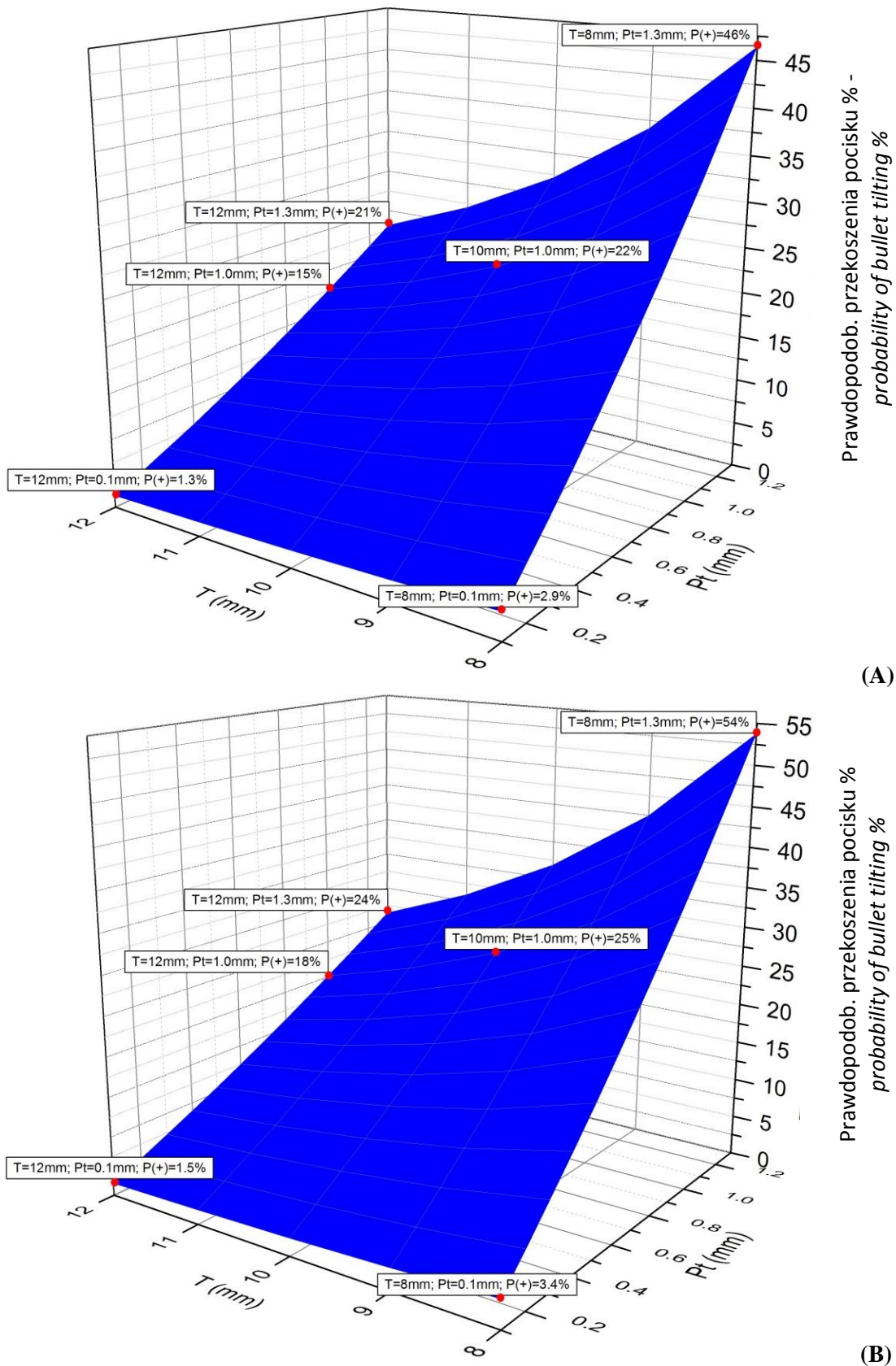
The points characterising the change of plate mass at using different parameters of perforation are marked in figure 7. In case of tested plates the perforation R5T12 was used that provided the reduction of own plate's mass by 16 %. The graph indicates that there are possibilities for reduction of the mass in the range between 23 % to ca. 35 % at keeping the value of the distance between the edges of holes in the range 5 - 6 mm which provides the relevant strength and rigidity of the system, required for occurrence of the edge effect. In order to determine the minimal area between the edges of the holes at using the round holes in alternating geometry it is necessary to prepare

nie kilku wariantów perforacji, zgodnie z wynikami obliczeń oraz przygotowanie blach o różnych grubościach i opracowanie zależności pomiędzy właściwościami wytrzymałościowymi materiału, a polem powierzchni obszaru na którym zachodzi efekt krawędziowy. Na rys. 8 i 9 przedstawiono wyniki obliczeń prawdopodobieństwa przekoszenia pocisku na krawędzi otworu perforacji dla średnicy otworów  $R$  wynoszącej 5 mm (rys. 8A, rys. 9A) i 6 mm (rys. 8B, rys. 9B) w zależności od rastra perforacji  $T$  oraz szerokości pasa trafienia  $P_t$ , w którym następuje przekoszenie przy założeniu, że zachodzi ono tylko przy uderzeniu pocisku na zewnątrz otworu perforowanego. Zmienny zakres parametru  $P_t$  pokazuje zasady doboru średnicy otworu perforacji w stosunku do średnicy rdzenia pocisku (patrz równanie (1), parametr  $h$ ). Uwzględniając dobór parametrów perforacji zgodnie z rys. 7, przekoszenie pocisku zachodzi z prawdopodobieństwem  $18 \div 30 \%$ , dla rastra  $T$  z zakresu  $10 \div 11$  mm oraz wartości  $P_t$  z zakresu  $1,0 \div 1,2$  mm, przy  $R$  wynoszącym 5 mm. Zwiększenie średnicy otworów perforowanych do 6 mm, spowoduje, że prawdopodobieństwo przekoszenia będzie wynosić odpowiednio  $21 \div 34 \%$ .

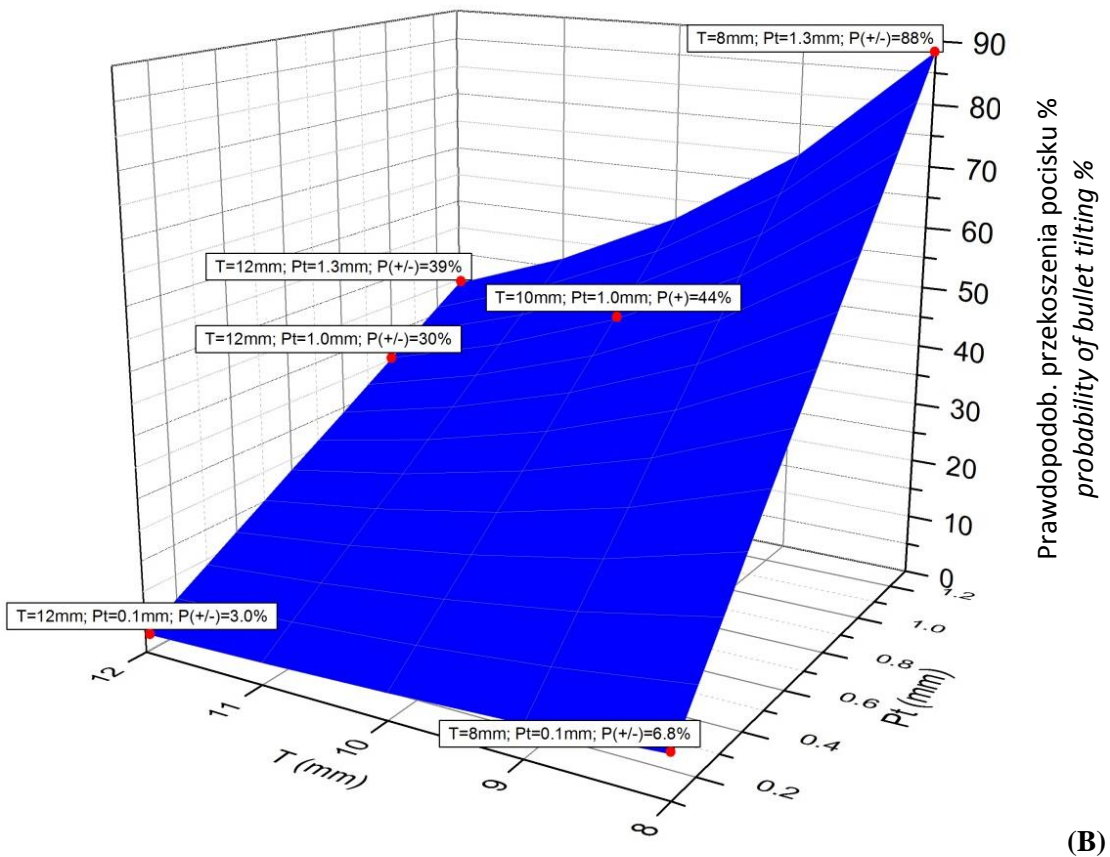
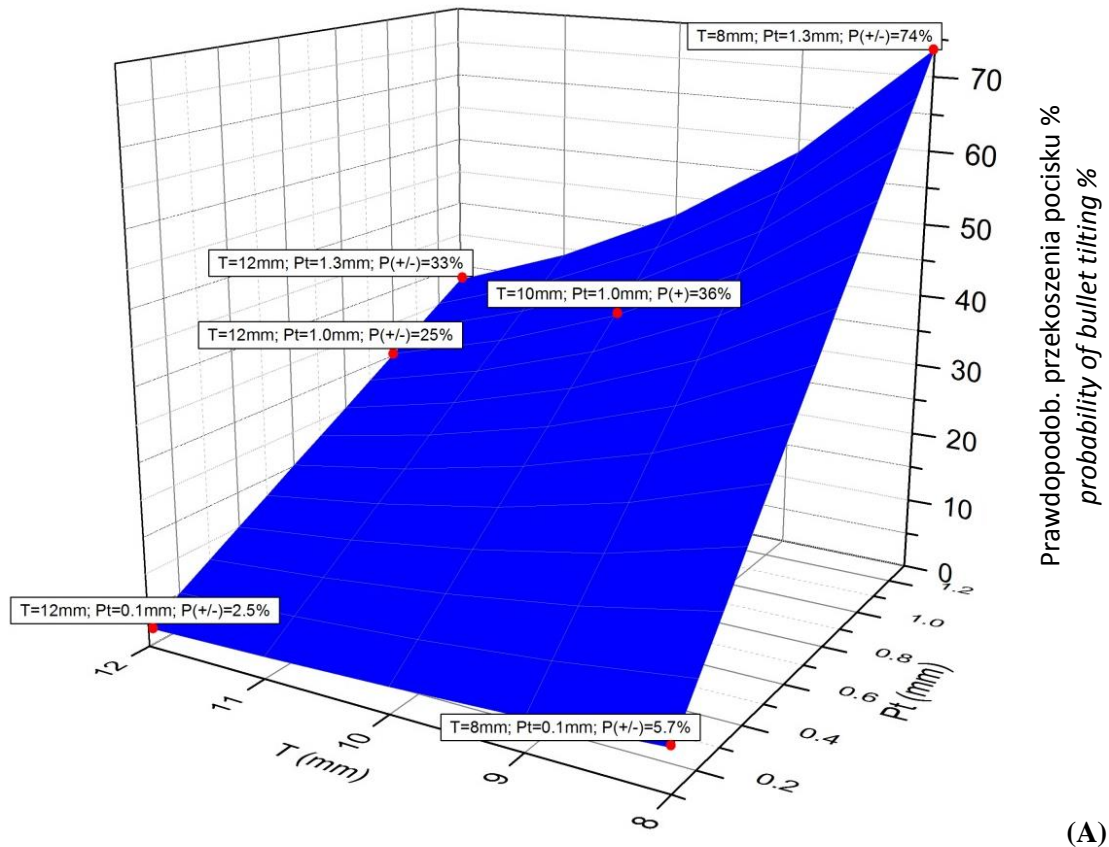
Przyjmując założenie, że efekt przekoszenia rdzenia pocisku zachodzi również przy uderzeniu w strefę wewnętrzną otworu perforacji, prawdopodobieństwo dla analogicznych parametrów perforacji zwiększy się niemal dwukrotnie, co obrazuje rys. 8B i rys. 9B. Prawdopodobieństwo przekoszenia rdzenia pocisku będzie się zawierać w przedziale  $30 \div 47 \%$ , dla otworów o średnicy 5 mm, natomiast dla otworów o średnicy 6 mm, będzie wynosić  $36 \div 57 \%$ . Przedstawione wyniki obliczeń stanowią rozważania teoretyczne i zostaną zweryfikowane eksperymentalnie, jednakże wskazują, że stosując nowy gatunek stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej jest możliwe skonstruowanie osłon na bazie blach perforowanych o masie własnej zredukowanej o minimum 35 % w stosunku do analogicznych konstrukcji z blach monolitycznych. Przywołując wyniki prób ostrzałem pociskiem kal. 7,62x54 mm R API B-32 dla układu blach perforowanych o grubości 8 mm + 3 mm, można oszacować, że finalna kon-

a few options of perforation, according to results of calculations, and the plates of different thickness, to find out the dependence between material strength characteristics and the surface of the area where the edge effect happens. Figures 8 and 9 include the results of calculations for the probability of bullet tilting against the edge of the perforation hole for the diameters of the holes  $R$  equal to 5 mm (Figure 8A, Figure 9A) and 6 mm (Figure 8B, Figure 9B) depending on the raster of perforation  $T$  and the width of hitting strip  $P_t$  where the tilting takes place, at the assumption that it only happens when the bullet hits in the outside area of the perforated hole. The variable range of parameter  $P_t$  shows the rules governing the selection of the diameter of perforation hole in reference to the diameter of the bullet core (see the equation (1) parameter  $h$ ). Taking into account the selection of perforating parameters according to figure 7 the tilting of the bullet occurs with the probability  $18 - 30 \%$  for the raster  $T$  values of  $10 - 11$  mm and the value  $P_t$  within the range  $1.0 - 1.2$  mm and the value of  $R$  equal to 5 mm. The increase of perforated hole diameters to 6 mm results in probabilities of tilting respectively equal to  $21 - 34 \%$ .

Taking the assumption that the bullet core tilting effect happens also at hitting into the internal zone of the perforating hole the probability for the same parameters of perforation increases almost twice, what is illustrated in figures 8B and 9B. The probability of bullet core tilting is in the range  $30 - 47 \%$  for the holes of 5 mm diameter whereas for the holes with 6 mm diameter it is  $36 - 57 \%$ . Presented results of calculation are based on theoretical considerations and have to be subjected to experimental verification but nevertheless they indicate that the use of the new grade of bainitic steel with nano-crystalline structure gives the possibilities for designing the shields on the base of perforated plates at the own mass reduced minimum by 35 % against the analogical designs from monolithic plates. Referring to the results of firing tests by the bullet R API B-32 of 7.62x54 mm calibre for the combination



Rys. 8. Wyniki obliczeń prawdopodobieństwa przekoszenia pocisku ( $P_{(+)}=f(T,P_t)$ ) dla różnych konfiguracji perforacji otworami okrągłymi o średnicy (A) –  $R=5$  mm, (B) –  $R=6$  mm  
 Figure 8. Calculation results for probability of bullet tilting ( $P_{(+)}=f(T,P_t)$ ) for different configurations of perforation by the round holes of diameters (A) –  $R=5$  mm, (B) –  $R=6$  mm



Rys. 9. Wyniki obliczeń prawdopodobieństwa przekoszenia pocisku ( $P_{(+,-)}=f(T,P_t)$ ) dla różnych konfiguracji perforacji otworami okrągłymi o średnicy (A) –  $R=5$  mm, (B) –  $R=6$  mm

Figure 9. Calculation results for probability of bullet tilting ( $P_{(+,-)}=f(T,P_t)$ ) for different configurations of perforation by the round holes of diameters (A) –  $R=5$  mm, (B) –  $R=6$  mm



strucja będzie się charakteryzowała masą powierzchniową na poziomie  $56 \text{ kg/m}^2$ , co umożliwi zastosowanie jej w miejscach, gdzie nie jest zasadne stosowanie kosztownych konstrukcji na bazie ceramiki. Ponadto wyniki prób ostrzałem wykazały, że w przypadku blach perforowanych ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej możliwe jest wykonanie osłony bez dylatacji, w odróżnieniu od obecnie stosowanych układów opancerzenia przestrzennego bazujących na płytach perforowanych posiadających dylatacje powietrzne w celu zwiększenia efektu zmiany trajektorii lotu pocisku [28]. Zastosowanie blach z nowych gatunków wysokowytrzymałych stali bainitycznych o strukturze nanokrystalicznej oraz perforacja tych blach pozwoli na opracowanie konstrukcji osłon warstwowych, które umożliwią obniżenie nie tylko masy własnej układu, ale także jego wymiarów.

#### **4. Podsumowanie**

W artykule przedstawiono wyniki prób ostrzałem blach perforowanych wykonanych ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej NANOS-BA<sup>®</sup>. Zaobserwowany efekt przekoszenia (zniszczenia) rdzenia pocisków przeciwpancernych w obszarach krawędzi otworów perforacji prowadzi do wniosku, że stosując blachę perforowaną ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej, można zaprojektować opancerzenie warstwowe o niższej masie własnej o około 25÷40% od obecnie stosowanych rozwiązań. Odpowiednio dobrany układ perforacji w połączeniu z wysoką wytrzymałością innowacyjnego gatunku stali zapewnią wystąpienie z wymaganym prawdopodobieństwem (>50%) korzystnego efektu krawędziowego, który skutecznie przyczynia się do fragmentacji rdzenia i zmiany toru lotu. Należy nadmienić, że badana stal nanostrukturalna charakteryzuje się wysoką zdolnością do pochłaniania i rozpraszania energii uderzeniowej oraz wykazuje odporność na pękanie w warunkach wysokoenergetycznych oddziaływań punktowych wielokrotnych, a zastosowanie perforacji podwyższa dodatkowo odporność na pękanie w ww. warunkach użytkowania.

of perforated plates with thicknesses  $8 \text{ mm} + 3 \text{ mm}$  it may be estimated that the final design may be characterised by the surface density level on  $56 \text{ kg/m}^2$  what makes it can be used in the places where the use of expensive designs based on ceramics is not justified. Moreover the results of firing tests have proved that in case of perforated plates from the bainitic steel with the nano-crystalline structure it is possible to make the shield without dilatation in opposition to currently existing systems of spaced systems of armours with the air dilatations increasing the effect of changing the trajectory of bullet [28]. The application of plates made from the new grades of high strength bainitic steels with the nanocrystalline structure and the perforation of these plates may help to develop the designs of layered shields with not only reduced own mass of the system but the size as well.

#### **4. Summary**

The paper presents the results of firing tests for the perforated plates made from the bainitic steel of nano-crystalline structure NANOS-BA<sup>®</sup>. The observed effect of tilting (destruction) of armour piercing bullet cores in the zones of edges of perforating holes leads to the conclusion that the use of perforated plate made from the bainitic steel of nano-crystalline structure enables the designing of the layered armours with the own mass lower by 25÷40% than in currently used solutions. Suitably matched system of perforation, in connection with the high strength of the new innovative grade of steel, provide the occurrence of beneficial edge effect with the relevant probability (>50%), that effectively contributes to the fragmentation of the core and deviation of the bullet flying path. It is worth to mention that tested nano-structural steel is characterised by a high capacity of absorbing and dissipating the impact energy, and shows the resistance against breaking at conditions of high energetic multiple point interactions, and the use of perforation additionally increases the resistance against breaking at above mentioned conditions of operation.

Przedstawione w artykule wyniki badań i obliczeń stanowią wstępny etap przed planowanymi badaniami zmierzającymi do optymalizacji konstrukcji opancerzenia opartego na blachach perforowanych wykonanych z nowych gatunków wysokowytrzymałych stali bainitycznych o strukturze nanokrystalicznej.

The results of tests and calculations presented in the paper create a preliminary stage before the planned investigations, aimed to optimise the armour design based on perforated plates made from the new grades of high strength bainitic steel with nano-crystalline structure.

## Literatura / Literature

- [1] Hazell Paul J, Roberson Colin J, Mauricio Moutinho, The design of mosaic armour: the influence of tile size on ballistic performance, *Mater Design*, Nr 29, str.1497-503, 2008.
- [2] Bless SJ, Jurick DL, Design for multi-hit capability, *Int. J Impact Eng.*, Nr 21, str. 905-8, 1998.
- [3] N. Kiliciinni, Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile, *Materials and Design*, Nr 63, str. 427-438, 2014.
- [4] Haque BZ, Kearney MM, Gillespie Jr JW, Advances in protective personnel and vehicle armors, *Recent Pat Mater Sci.*, Nr 5, str. 103-34, 2012.
- [5] Ben-Moshe D. Patent Nr EP 0 209 221 A1. An armor assembly for armored vehicles; 1986.
- [6] Auyer RA, Buccellato RJ, Gidynski AJ, Ingersol RM, Sridharan S. Patent No.: 5,014,593. Perforatedplatearmor; 1991.
- [7] Ravid M, Hirschberg Y. Patent No.: 7,513,186 B2. Ballisticarmor; 2009.
- [8] Norris WJ, Smith CA. Patent No.: WO 21010/036411 A2. Perforated armor with geometry modified for lighter weight; 2010.
- [9] Madhu V, Bhat TB, Armour protection and affordable protection for futuristic combat vehicles, *DefenceSci J*, Nr 61, str. 394-402, 2011.
- [10] Balos S, Grabulov V, Sidjanin L, Pantic M, Radisavljevic I, Geometry mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application, *Mater Des*, Nr 31, str. 2916-24, 2009.
- [11] Radisavljevic I, Balos S, Nikacevic M, Sidjanin L, Optimization of geometrical characteristics of perforated plates, *Mater Des*, Nr 49, str. 81-9, 2013.
- [12] Mishra B, Jena PK, Ramankrishna B, Mahdu V, Bhat TB, Gupta NK, Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel, *Int J Impact Eng*, Nr 44, str. 17-28, 2012.
- [13] Mishra B, Ramankrishna B, Jena PK, Kumar SV, Mahdu V, Gupta NK, Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact, *Mater Des*, Nr 43, str. 17-24, 2013.
- [14] Howel R, Montgomery JS, Van Aken DC, Advancements in steel for weight reduction of P900 armor plate, In: Proceedings of 26th army science conference Orlando, 2008.
- [15] Chocron S, Anderson CE, Grosch D, Popelar CH, Impact of the 7.62 mm APM2 projectile against the edge of a metallic target, *Int J Impact Eng*, Nr 25, str. 423-37, 2001.
- [16] Rosenberg Z, Ashuach Y, Yeshurun Y, Dekel E, On the main mechanism for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets, *Int. J Impact Eng.*, Nr 36, str. 588-96, 2009.
- [17] Bhadeshia H., *Hard bainite*, *TMS-The Minerals, Metals and Materials Society*, Nr. 1, str. 469-484, 2005.
- [18] Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Adamczyk M., Wiśniewski A., New Generation Maraging Steel and High-Carbon Bainitic Steel for Armours, Proc. of 26th Interna-

- tional Symposium on Ballistics, Miami, USA, 2011, str. 1595-1606.
- [19] Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Stępień J. and Starczewski L., Ballistic testing of nano-precipitation hardened and nano-duplex steels, 27<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, 22-26 April 2013, Freiburg, Germany, str. 1834-1845.
- [20] Patent UP RP Nr P394037, 20.05.2014, Zgłoszenie w UP RP Nr P396431/2011r.
- [21] W. Burian, J. Marcisz, B. Garbarz, L. Starczewski, Nanostructured bainite-austenite steel for armours construction, *Archives of Metallurgy and Materials*, t. 59, Nr 3, s. 1211-1216, 2014.
- [22] J. Marcisz, B. Garbarz, W. Burian, J. Stępień, L. Starczewski, R. Nyc. Badania balistyczne blach wykonanych z innowacyjnego gatunku stali bainitycznej NANOS-BA®. Materiały XIX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: Problemy Rozwoju, Produkcji i Eksploatacji Techniki Uzbrojenia, UZBROJENIE'2013, Jachranka, 11-14.06.2013, str. 84.
- [23] B. Garbarz, W. Burian, *Steel Research International*, t. 85, Nr. 12, str.1620-1628, 2014.
- [24] J. Marcisz, W. Burian, J. Stępień, L. Starczewski, M. Wnuk, Stalowo-kompozytowe panele ochronne przeciw pociskom kumulacyjnym (PG) z zastosowaniem blach z nanokrystalicznej stali bainityczno-austenitycznej, X Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, 15-18 września, Ryn, 2014.
- [25] J. Marcisz, W. Burian, J. Stępień, L. Starczewski, M. Wnuk, J. Janiszewski, Static, dynamic and ballistic properties of bainite-austenite steel for armours, 28th International Symposium on Ballistics, 22-26 wrzesień, Atlanta, USA, 2014.
- [26] Kilic N, Ekici B, Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition, *Mater Des*, Nr 44, str. 35–48, 2013.
- [27] Rosenberg Z, Dekel E, Terminal ballistics, Springer, 2012.
- [28] I. Radisavljevic, S. Balos, M. Nikacevic, L. Sidjanin, *Mater Des*, Nr 49, str. 81-89, 2013.
- [29] Balos S, Grabulov V, Sidjanin L, Pantic M, Radisavljevic I, Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application, *Mater Des*, Nr 31, str. 2916-24, 2010.

*Praca dofinansowana ze środków NCBiR w ramach programu  
„INNOTECH” w ścieżce programowej IN-TECH  
(projekt nr INNOTECH-K1/IN1/27/150443/NCBR/12  
pt.: „Opracowanie nowoczesnej konstrukcji modułu pancerza odpornego na  
udarowe oddziaływanie strumienia kumulacyjnego i pocisków”)*



*The project is partly funded by the NCBiR (National Centre of Research and Development) under the program „INNOTECH” within the program path IN-TECH (Project No INNOTECH-K1/IN1/27/150443/NCBR/12 and titled: „Development of Modern Design of an Armour Module Resistant Against Impact Action of Cumulative Stream and Projectiles”)*

