



## ROLA CERAMIKI SPECJALNEJ W WIELOWARSTWOWEJ OSŁONIE BALISTYCZNEJ

### *SPECIAL CERAMICS IN MULTILAYER BALLISTIC PROTECTION SYSTEMS*

Marcin CEGŁA

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka  
*Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyński St., 05-220 Zielonka, Poland*  
*Auhtor's e-mail address: ceglam@witu.mil.pl*

DOI 10.5604/01.3001.0012.8312

**Streszczenie:** Artykuł porusza problematykę związaną z projektowaniem i badaniem nowoczesnych osłon balistycznych oraz materiałów stosowanych do ich budowy, ze szczególnym naciskiem na materiały ceramiczne. Ciągły rozwój współczesnych balistycznych materiałów kompozytowych wymusza potrzebę optymalizacji istniejących rozwiązań osłon balistycznych pod względem masy, grubości oraz kosztów materiałowych. W dobie technologicznego wyścigu zbrojeniowego, osiągnięcie 5 % redukcji masy pancerza można uznać za sukces. Aby to jednak osiągnąć istnieje potrzeba opracowania nowych rozwiązań pancerzy z uwzględnieniem postępu w dziedzinie nowoczesnych materiałów. Dzięki doskonałym właściwościom mechanicznym, niskiej gęstości, wysokiej twardości oraz zdolności do rozpraszania energii poprzez mechanizm kruchego pęknięcia, ceramika balistyczna pozwala na zwiększenie odporności pancerza na działanie pocisków przeciwpancernych przy jednoczesnym obniżeniu jego masy powierzchniowej w porównaniu z tradycyjnymi osłonami stalowymi. Przedstawiono rozwój pancerzy na bazie ceramiki, budowę wielowarstwowej osłony balistycznej oraz rolę poszczególnych warstw osłony balistycznej w zatrzymaniu pocisku. Omówione zostały także właściwości mechaniczne wybranych materiałów ceramicznych oraz ich wpływ na odporność balistyczną skonstruowanej na ich bazie osłony.

**Słowa kluczowe:** ceramika balistyczna, pancerz kompozytowy, ochrona balistyczna

**Abstract:** The paper presents some questions of designing and testing for modern ballistic protecting screens and applied materials especially such as ceramics. Continuous development of present ballistic composite materials enforces the optimisation of existing solutions for ballistic protections in respect to the mass, thickness and costs of material. In times of technological arm race a reduction of armour weight by 5% is a success. It may be achieved by development of new solutions of armour systems applying the newest materials. Ballistic ceramics both enhances the resistance of the armour against armour piercing projectiles and reduces its areal density in relation to traditional steel armours due to high mechanical properties, low density, high hardness and dissipation of energy at the mechanism of breaking. The paper illustrates the development of ceramic based armours and the structure of a multi-layer ballistic protection, and finally the meaning of its particular layers in fighting the projectile. Moreover the impact of mechanical properties of some ceramic materials used for designing a protection system into its ballistic resistance is discussed.

**Keywords:** Ballistic ceramics, composite armour, ballistic protection

## 1. Wstęp

### 1.1. Rozwój pancerzy ceramiczno-kompozytowych

Od kilkudziesięciu lat, wraz ze wzrostem wymagań dotyczących poziomu ochrony balistycznej, materiały ceramiczne znalazły szczególne miejsce jako elementy kompozytowych systemów opancerzenia wojskowych jak i cywilnych. Do zastosowań wojskowych należą: opancerzenie pojazdów kołowych, czołgów, wozów bojowych, środków latających, schronów, okrętów oraz konstrukcje osobistych osłon balistycznych. Ponadto ceramika stosowana jest w kamizelkach użytkowanych przez policję oraz agencje ochrony. Pojawienie się, na współczesnym polu walki, nowoczesnej broni przeciwpancernej zaowocowało potrzebą lepszej ochrony sprzętu, pojazdów oraz pojedynczych żołnierzy. Stosowane tradycyjne pancerze stalowe osiągnęły granicę swoich możliwości ochronnych, ze względu na dużą masę [1]. Konieczne stało się znalezienie materiałów, które przy zwiększeniu zdolności ochronnych pozwolą na istotne obniżenie masy pancerza. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie jest połączenie materiałów ceramicznych oraz nowoczesnych kompozytów włóknistych.

Pierwsze próby z ceramiką, jako materiałem balistycznym, prowadzono podczas wojny w Wietnamie. Pojawiła się konieczność lepszej ochrony żołnierzy, przed ogniem snajperów. Jako pierwsza zastosowana została ceramika  $\text{Al}_2\text{O}_3$  połączona z podłożem z aluminium oraz kompozytem zawierającym włókno szklane. Mimo dobrej zdolności ochronnej, kamizelki zawierające dwie płyty ceramiczne, były wciąż zbyt ciężkie aby używać ich na polu walki, a ich zastosowanie zostało ograniczone do służby wartowniczej. Kolejnym materiałem, który wzbudził zainteresowanie kręgów wojskowych był węgiel boru  $\text{B}_4\text{C}$  ze względu na gęstość wynoszącą  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , co w porównaniu z gęstością  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wynoszącą  $3,9 \text{ g/cm}^3$ , pozwalało na istotne ograniczenie masy pancerza. Do innych materiałów ceramicznych o potencjalnych właściwościach balistycznych zaliczyć można: węgiel krzemu ( $\text{SiC}$ ), borek tytanu ( $\text{TiB}_2$ ), azotek glinu ( $\text{AlN}$ ) oraz azotek krzemu ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

## 1. Introduction

### 1.1. Development of Ceramic-composite Armours

Ceramic materials have been used for recent decades as specific components of both military and civilian composite armour systems due to increased requirements for the level of ballistic protection. The military applications concern the armour systems of wheeled vehicles, tanks, combat vehicles, flying platforms, shelters, ships, and designs of individual ballistic protections. Moreover the ceramics are deployed in jackets used by police and security agencies. The appearance of modern antitank weapons on the battlefield of today has triggered a need for better protection of equipment, vehicles and individual soldiers. Traditional steel armours used up to now have reached a limit of protection capacities due to excessive weight [1]. The materials which could provide better protective performance at reduced weight of the armour were searched. The demand was met by a combination of ceramic materials and modern fibrous composites.

First trials for using the ceramics in ballistic protection were made at the Vietnam war. A better protection against snipers was needed. Firstly the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics was bonded with an aluminium baking and a fibreglass composite. The protective capacities were satisfactory but the jackets with two ceramic plates were still too heavy to be used in battlefield and their deployment was limited to the guard duty. Boron carbide  $\text{B}_4\text{C}$  arose an interest of military circles because its density of  $2.5 \text{ g/cm}^3$  compared with density of  $3.9 \text{ g/cm}^3$  for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  allowed for a significant reduction of armour weight. Following ceramic materials may be counted into a group of potential ballistic applications: silicon carbide ( $\text{SiC}$ ), titanium boride ( $\text{TiB}_2$ ), aluminium nitride ( $\text{AlN}$ ) and silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). When new ceramic materials were successfully

Wraz z testowaniem i użytkowaniem nowych materiałów ceramicznych, pojawiły się pierwsze teoretyczne założenia do konstrukcji pancerzy. Uznano że, pancerz powinien być przynajmniej tak twardy jak pocisk, a jego grubość, dla skutecznego zapobieżenia penetracji powinna wynosić przynajmniej 1/2 kalibru pocisku. Przednia warstwa ceramiki powinna stanowić około 1/3 grubości całego pancerza, natomiast grubość podłoża około 2/3. Wreszcie, rolą ceramicznej warstwy przedniej jest stępienie ostrza pocisku i jego fragmentacja, rolą podłoża zaś, odkształcenie sprężyste i wychwycenie odłamków [2]. Jednocześnie pojawiła się potrzeba szerszego udziału przemysłu w rozwoju opancerzenia oraz zastosowanie w większym zakresie, metod modelowania matematycznego do opisu zjawisk towarzyszącym wnikaniu pocisku w pancerz. Ostatecznie, najszersze zastosowanie w konstrukcji osłon balistycznych znalazły: tlenek glinu i węgiel krzemu z powodu względnie niskich kosztów wynikających z bardzo szerokiego zastosowania wspomnianych materiałów w różnych dziedzinach techniki. Trzecim materiałem ceramicznym stosowanym w osłonach balistycznych jest węgiel boru, jednak koszty jego wytworzenia ograniczają szerokie zastosowanie. W czasie trwania operacji „Pustynna Burza” w Iraku koszt wytworzenia pojedynczej płytki węgla boru wielokrotnie przekraczał koszty wytworzenia tej samej wielkości płytek z tlenku glinu lub węgla krzemu. W ostatnich latach ta różnica uległa zmniejszeniu, jednak węgiel boru pozostaje materiałem droгим, dlatego jego zastosowanie w osłonach balistycznych ogranicza się głównie do osłon kabiny i foteli samolotów oraz w kamizelkach osobistych [1, 2].

## **1.2. Ceramiczne materiały balistyczne i ich właściwości**

Najważniejsze właściwości mechaniczne ceramiki, determinujące odporność balistyczną pancerza, to twardość oraz odporność na kruche pękanie. Wartość twardości ceramicznej osłony balistycznej powinna przewyższać twardość rdzenia pocisku przeciwpancernego, aby skutecznie stępić jego wierzchołek. Pożądana wartość odporności na kruche pękanie ceramiki nie jest już jednak tak łatwa do określenia. Niska

tested and started to be used the first theoretical assumptions for armour designs were prepared. It was accepted that the armour has to have at least the hardness of projectile's level and minimal thickness of 1/2 projectile's calibre to prevent the penetration efficiently. A front ceramic layer has to amount ca. 1/3 and the backing ca. 2/3 of the whole armour thickness. Finally the frontal ceramic layer is designated for fracturing a projectile and blunting its sharp point whereas the base is for elastic deformation and arresting the fragments [2]. At the same time a demand was observed for greater engagement of industry in development of armour systems and of mathematic modelling for description of effects accompanying the penetration of armour by projectile. At the end the aluminium oxide and silicon carbide are used in the widest degree in designs of ballistic protections as they are relatively cheap for their common applications in various technologies. Boron carbide is third ceramic material used in ballistic protections but the manufacture costs limit its wider applications. In times of "Desert Storm" operation in Iraq the manufacture cost of a single boron carbide plate exceeded by many times the costs of production for the same size plates of aluminium oxide or silicon carbide. In recent years this difference has been reduced but boron carbide is still expensive and is mainly used for protection of plane cabins and seats, and for personal jackets [1, 2].

## **1.2. Properties of Ceramic Armour Materials**

The most important mechanical properties of ceramics, determining the ballistic resistance of the armour, are hardness and fracture toughness. The value of the hardness of the ceramic ballistic material should exceed the hardness of the armour piercing projectile to effectively blunt its tip. The desired value of fracture toughness of ceramics is not as easy to define. The low value of

wartość współczynnika  $K_{IC}$  skutkuje lepszym pochłanianiem energii kinetycznej pocisku na drodze pęknięcia (spiaskowania) płyty ceramicznej. Jednak w celu ograniczenia obszaru zniszczenia ceramiki, a co za tym idzie zwiększenia odporności osłony na trafienie wielokrotne, wartość odporności na kruche pęknięcie powinna być wysoka. [3,4,5]. Polepszeniu właściwości balistycznych ceramiki służą także wysokie wartości modułu Younga oraz prędkości propagacji fali dźwiękowej [6]. Mechanizm pęknięcia ceramiki powiązany jest z wielkością ziaren w mikrostrukturze. Materiały o ziarnach większych preferują mechanizm pęknięcia po granicach ziaren, natomiast te o ziarnach mniejszych w poprzek ziaren. Podczas pęknięcia po granicach ziaren, pęknięcie pokonuje większą drogę niż podczas pęknięcia w poprzek ziaren, co ma odzwierciedlenie w większej zdolności do pochłaniania energii [6]. Ponadto większe ziarna posiadają większe zdolności ścierające, dzięki czemu mogą spowodować większe tarcie podczas przemieszczania się pocisku przez pancerz, a co za tym idzie większą utratę jego prędkości [3]. Gęstość ceramiki, wraz z gęstością pozostałych materiałów, determinuje masę powierzchniową wielowarstwowej osłony balistycznej. Pojęcie masy powierzchniowej informuje o tym, ile ważył będzie  $1 \text{ m}^2$  osłony balistycznej i jest podstawowym parametrem służącym do porównywania osłon w tej samej klasie kuloodporności. Wpływ wybranych właściwości materiałów ceramicznych na odporność balistyczną osłony pokazano w tabeli 1.

Spośród balistycznych materiałów ceramicznych największą twardość wykazują węgiel boru i węgiel krzemu i jednocześnie obydwa te materiały mają mniejszą gęstość w stosunku do tlenku glinu. Węgiel boru jest szczególnie atrakcyjnym materiałem ze względu na najniższą wśród ceramicznych materiałów balistycznych gęstość i jednocześnie najwyższą twardość. Koszty jego produkcji przewyższają jednak koszty węgla krzemu. Jest to związane z koniecznością zastosowania metody prasowania na gorąco do formowania produktów o wysokich właściwościach mechanicznych oraz niewielkiego, w stosunku do węgla krzemu, zapotrzebowania w innych gałęziach gospodarki [3, 8, 9]. Wartości podstawowych właściwości mechanicznych ceramiki balistycznej pokazano

the  $K_{IC}$  coefficient results in a better absorption of the kinetic energy of the projectile through fragmentation of the ceramic plate. The smaller the fragments are, the more energy is absorbed. However, in order to limit the area of destroyed ceramic front layer and hence increase the resistance of the armour to multiple hits, the value of fracture toughness should be high. [3,4,5]. The high values of the Young's modulus and the speed of sound wave propagation also improve the ballistic properties of ceramics [6]. The fracture mechanism of the ceramic materials is related to the grain size and microstructure. Materials with larger grains prefer the mechanism of cracking at grain boundaries, while those with smaller grains break across the grains. During cracking at the grain boundaries, the occurring crack travels a greater distance than when fracturing across the grains, which is reflected in the greater ability to absorb energy [6]. In addition, abrasive abilities of larger grains, can cause greater friction when the projectile moves through the armour, and hence increased loss of its velocity [3]. The density of ceramics, together with the density of other components, determines the areal density of a multi-layer armour system. The value of areal density equals the weight  $1 \text{ m}^2$  of armour and is the basic parameter used to compare different armours in the same bulletproof class. The influence of selected properties of ceramic materials on the ballistic resistance is shown in Table 1.

Among the ceramic ballistic materials boron carbide and silicon carbide have the highest hardness and both of them have the lower density than aluminium oxide. Boron carbide is especially important material as it has the lowest density and the highest hardness between ceramic ballistic materials. But the costs of its manufacture are greater than for the silicon carbide. It is connected with a need for using a hot pressing method at processing the products with high mechanical performance and with a lower demand than for the silicon carbide in other branches of economy [3, 8, 9]. Values of basic mechanical characteristics for ballistic ceramics are presented

w tabeli 2.

in Table 2.

Tabela 1. Wpływ wybranych właściwości ceramiki na odporność balistyczną [3]

| Właściwości  | Wpływ na odporność balistyczną              |
|--|---|
| Mikrostruktura: wielkość ziaren, obecność wtrąceń, porowatość. | Wpływa na pozostałe właściwości mechaniczne |
| Gęstość  | Masa powierzchniowa pancerza                |
| Twardość   | Erozja rdzenia pocisku                      |
| Odporność na kruche pękanie                                    | Odporność na trafienie wielokrotne          |
| Moduł Younga   | Pochłanianie energii                        |
| Prędkość propagacji fali dźwiękowej                            |   |
| Mechanizm pękania  |   |

Table 1. Influence of selected material properties on ballistic protection [3]

| Characteristics   | Influence on the ballistic resistance       |
|---|---|
| Microstructure: size of grains, presence of inclusions, porosity. | Affects the remaining mechanical properties |
| Density   | Armour weight                               |
| Hardness  | Erosion of the projectile's core            |
| Resistance against fragile cracking                               | Resistance against multiple hitting         |
| Young module  | Absorption of energy                        |
| Acoustic wave propagation velocity                                |   |
| Mechanism of cracking   |   |

Tabela 2. Podstawowe właściwości mechaniczne ceramiki balistycznej [7]

Table 2. Basic mechanical characteristics of ballistic ceramics [7]

| Materiał/<br>Material              | $\rho$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | HV<br>[GPa] | K <sub>IC</sub><br>[MPa <sup>m</sup> <sup>1/2</sup> ] | E<br>[GPa] | V <sub>s</sub><br>[km/s] | $\sigma_{zg}$<br>[MPa] |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------|---|------------|--------------------------|------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (S) | 3,60 – 3,95                    | 12 – 18     | 3,0 – 4,5   | 300-450    | 9,5-11,6                 | 200-400                |
| SiC (S)                            | 3,10 – 3,20                    | 22 – 23     | 3,0 – 4,0   | 400-420    | 11,0-11,4                | 300-340                |
| B <sub>4</sub> C (HP)              | 2,45 - 2,52                    | 29 – 35     | 2,0 – 4,7   | 440-470    | 13,0-13,7                | 200-360                |

$\rho$  – gęstość/ *Density*, HV – Twardość Vickersa/ *Vicker's hardness*, K<sub>IC</sub> – Odporność na kruche pękanie/ *Resistance to fragile cracking*, E – Moduł Younga/ *Young module*, V<sub>s</sub> – Prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej/ *Acoustic wave propagation velocity*,  $\sigma_{zg}$  – Wytrzymałość na zginanie/ *Bending strength*, S – spiekany swobodnie/ *Free sintering*, HP – prasowany na gorąco/ *Hot pressing*

### 1.3. Konstrukcja nowoczesnych osłon balistycznych

Typowy pancerz warstwowy zbudowany jest z płyty ceramicznej połączonej z kompozytem włóknistym o osnowie polimerowej

### 1.3. Designs of Modern Ballistic Protections

A typical multi-layered armour consists of a ceramic plate placed on a polymer matrix, fiber-based composite, or in

oraz w wybranych przypadkach umieszczonym na stalowym pancerczu bazowym. Każda z warstw posiada określone zadanie w procesie zatrzymania pocisku. Rolą ceramiki jest stępienie ostrza pocisku, rozbicie go na mniejsze fragmenty oraz absorpcja części jego energii poprzez kruche pęknięcie. Rolą podłoża włóknistego jest zatrzymanie fragmentów rdzenia pocisku poprzez sprężyste odkształcenie i absorpcję energii kinetycznej. Pochłonięcie energii odbywa się poprzez kombinacje odkształcenia, wyciągania włókien i delaminacji kompozytu [10]. W chwili uderzenia pocisku, warstwa ceramiki narażona jest na bardzo silne działanie naprężeń ściskających. Fala naprężeń przesuwa się przez materiał, by po dotarciu do warstwy adhezyjnej, zostać odbita, jako fala naprężeń rozciągających. Wzajemne oddziaływanie tych dwóch fal prowadzi do pęknięcia i zniszczenia przedniej osłony ceramicznej pancerza. Zanim to jednak nastąpi, wierzchołek pocisku zostaje stępiony lub ulega on rozbiciu na mniejsze fragmenty. Dlatego ważne jest, aby przednia warstwa ceramiki była jak najtwardsza [10, 11]. W konstrukcji pancerza warstwowego bardzo ważną rolę odgrywa warstwa adhezyjna pomiędzy ceramiką, a podłożem włóknistym, która musi być dość mocna, aby po trafieniu, niezniszczone obszary warstwy ceramiki oraz podłoże pozostały związane ze sobą. Skuteczność ceramicznych osłon balistycznych może być także zwiększona poprzez odpowiednie zabezpieczenie powierzchni bocznych panelu pancerza tak, aby ceramika była sztywno podparta, a płytki ceramiczne nie miały możliwości przesuwania się względem siebie [12, 13].

W celu stworzenia osłony odpornej na trafienie wielokrotne, najczęściej stosuje się ceramikę segmentową w postaci płytek o podstawie kwadratu lub sześciokąta foremnego. Wielkość płytek ceramicznych dobiera się tak, aby zminimalizować ryzyko ponownego trafienia w tą samą płytkę. Istnieją również rozwiązania opierające się na większych płytach ceramicznych o podwyższonej odporności na kruche pęknięcie, co pozwala na ograniczenie obszaru zniszczenia pancerza. Wybrane rozwiązania pancerzy ceramicznych pokazano na fotografii 1.

selected applications, on a steel plate armour. Each layer has a specific task in the process of stopping the projectile. The role of ceramics is blunt the projectile and cause its fragmentation as well as absorb some of its kinetic energy through brittle cracking. The role of the fiber-based composite material is to retain fragments of the projectile through elastic deformation and absorption of residual kinetic energy. The absorption of energy takes place through the combination of deformation, fiber pull-out and delamination of the composite [10]. At the moment of impact of the projectile, the ceramic layer is exposed to high compressive stress. The stress wave travels through the material and is reflected as a wave of tensile stress after reaching the adhesive layer. The interaction of these two waves leads to the cracking and destruction of the ceramic front layer. However, before this occurs, the top of the projectile is blunted or fractured into smaller fragments. Therefore, it is important for the ceramic front to have the highest possible hardness [10, 11]. The adhesive layer between the ceramic and composite backing plays an important role in the construction and effectiveness of the multi-layered armour system. The bonding must be strong enough to ensure that the undamaged areas of the ceramic layer and the backing remain attached upon impact. The effectiveness of ceramic ballistic protection can also be increased by securing the side surfaces of the armour panel, to achieve rigid support and prevent mutual displacement of ceramic tiles [12, 13].

The segmented ceramics in form of plates with square or hexagonal base is usually used to build a protection system resistant against multiple hitting. The size of ceramic tiles is matched to minimise the risk of secondary hitting into the same tile. There are also solutions based on larger ceramic plates with enhanced resistance to fragile breaking to limit the zone of armour destruction. Some solutions of ceramic armours are shown in picture 1.



a



b

Fot. 1. Panczerze ceramiczne: a – układ segmentowej ceramiki  $Al_2O_3$ , b – lita płyta ceramiczna do kamizelki kuloodpornej (zdjęcia własne autora)

Photo. 1. Ceramic armours: a – Panel of segmented  $Al_2O_3$  ceramics, b – Single piece ceramic plate for bulletproof vest (Photos taken by the author)

## 2. Badanie odporności balistycznej panczerzy

### 2.1. Badania balistyczne

Pod pojęciem badań balistycznych rozumiemy wszelkiego rodzaju badania polegające na ostrzale próbek panczerzy, kamizelek kuloodpornych lub opancerzonych pojazdów w warunkach laboratoryjnych lub poligonowych. Ostrzał prowadzony może być za pomocą różnych typów amunicji lub odłamków standardowych w oparciu o wytyczne zawarte w wybranej normie. Przykładem takiej normy jest STANAG 4569 podający jednolite, dla państw Paktu Północnoatlantyckiego, wytyczne do badań balistycznych, wozów bojowych. Norma STANAG opisuje warunki badania zarówno próbek panczerzy jak i całych wozów bojowych, podając zakres prędkości uderzenia pocisków, kąty ostrzału ilość trafień itp. [14].

Z punktu widzenia projektowania wielowarstwowej osłony balistycznej, której przednią warstwę stanowi ceramika, kluczowe znaczenie mają wytyczne normy, dotyczące odporności na trafienie wielokrotne. O ile w przypadku osłon stalowych lub kompozytowych, znaczenie ma wyłącznie rodzaj i grubość zastosowanego materiału, to w przypadku materiałów ceramicznych znaczenia nabiera wiel-

## 2. Testing the Ballistic Resistance of Armours

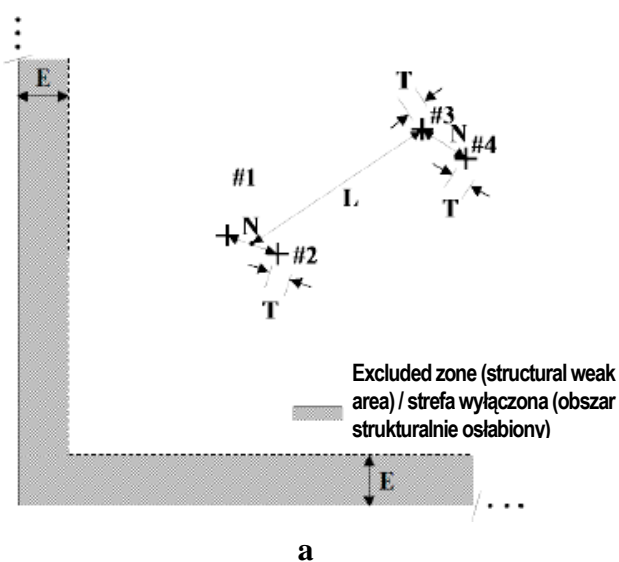
### 2.1. Ballistic Protection Tests

A term of ballistic tests comprises any testing of samples of armours, bulletproof jackets or armoured vehicles when fired at laboratory or range conditions. The firing may be conducted by using various types of ammunition or standard fragments according to guidelines included in a specific standard. STANAG 4569 is an example of such standard used by countries of the North-Atlantic Treaty as it provides coherent guidelines for ballistic tests of combat vehicles. The STANAG describes both the testing conditions for the samples of armours and for the whole combat vehicles by giving the interval of projectiles hitting velocities, the angles of firing, the number of hitting points, etc. [14].

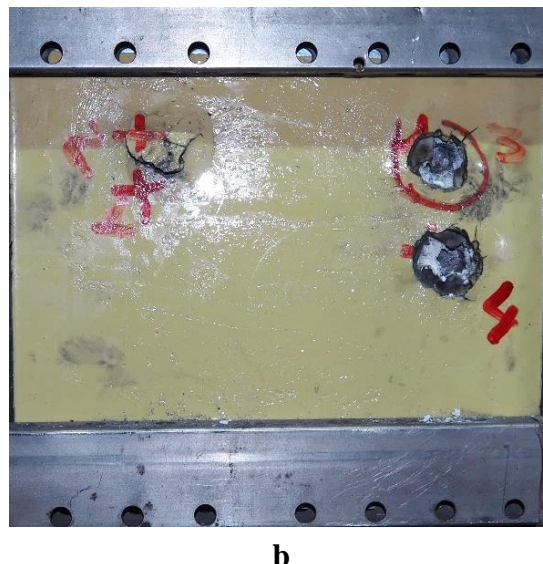
Considering a designing process for a multilayer ballistic protection system with the frontal ceramic layer the provisions of the standard are essential for questions of resistance to multiple hitting. Whereas in case of steel or composite protection systems only the type and thickness of used material usually matter, in the case of ceramic mate-



kość użytych płytek. Schemat ostrzału wymagany do sprawdzenia odporności balistycznej na trafienie wielokrotne, w oparciu o porozumienie normalizacyjne STANAG 4569 pokazano na rysunku 1.



rials the size of deployed tiles becomes also important. A schematic of the firing required for examining the ballistic resistance against the multiple hitting and based on STANAG 4569 is shown in Fig. 1.



**Rys. 1. Badanie odporności na trafienie wielokrotne: a - procedura ostrzału wielokrotnego zgodna ze STANAG 4569, b – ostrzelana próbka pancerza [14]**

**Fig. 1. Testing the resistance to multiple hitting: a - Procedure of firing by multiple shots according to STANAG 4569, b – Armour sample after firing [14]**

Procedura ostrzału wielokrotnego odzwierciedla sytuację, w której opancerzony wóz bojowy zostaje ostrzelany z ręcznej broni maszynowej. Zgodnie z normą minimalna ilość stanowią cztery trafienia w próbkę w dwóch parach. Po oddaniu pierwszego strzału, kolejny odmierza się na próbce o odległość  $T$  wynosząca minimum 25 mm. Druga para trafień oddalona jest od pierwszej o odległość  $L$  wynoszącą 100 mm w kierunku prostym do osi łączącej punkt trafienia 1 i 2. Dla ceramicznej warstwy przedniej pancerza, największe zagrożenie stanowi najczęściej drugi strzał z każdej pary, ponieważ punkt uderzenia umiejscowiony jest w obszarze potencjalnie osłabionym. Jeżeli zastosowane płytki ceramiczne będą zbyt duże, istnieje ryzyko uderzenia dwóch lub więcej pocisków w tę samą płytkę, a co za tym idzie znacznie wzrasta ryzyko perforacji całej osłony balistycznej. Stosowanie zbyt małych płytek ceramicznych, obok problemów technologicznych, może spowodować, że spadek energii kinetycznej pocisku spowodowany fragmentacją ceramiki, będzie niewystarczają-

The procedure of multiple shooting corresponds to a situation where an armoured combat vehicle is fired with a handheld machinegun. According to the standard a minimal number of four hitting points occurring in two pairs is demanded for a sample. After the first shot the next one is shifted by distance  $T$  equal minimum to 25 mm. The second pair of hitting points is shifted from the first one by 100 mm distance  $L$  in perpendicular direction to the line connecting points 1 and 2. The second shot of each pair is usually the greatest threat for the armour frontal ceramic layer as the hitting point is placed within a potentially weak area. If the deployed ceramic tiles are too big then there is a risk that two or more bullets hit the same tile which increases significantly the risk for perforating the whole ballistic protection system. The use of too small ceramic tiles beside technological problems may also reduce the loss of projectile's kinetic energy at fragmentation of ceramics to a level allowing the penetration of the



cy i nastąpi przebicie osłony [15].

## 2.2. Ocena zdolności ochronnej pancerza

Podstawową metodą oceny czy pancerz uległ perforacji są oględziny tzw. „płyty świadek” czyli cienkiej aluminiowej blachy umieszczonej za ostrzeliwanym celem. Uzyskana w ten sposób informacja o przebicciu, wraz z wizualnymi oględzinami obszaru zniszczeń czołowej warstwy ceramicznej, stanowi podstawę oceny zdolności ochronnej pancerza.

protection [15].

## 2.2. Evaluation of Armour Protective Capacities

A basic method evaluating the armour perforation uses the visual inspection of a witness plate made of a thin aluminium sheet placed behind the shot target. The information about penetration received in this way together with visual inspection of damaged area on the frontal ceramic layer is fundamental for assessment of armour protective capacities.



a



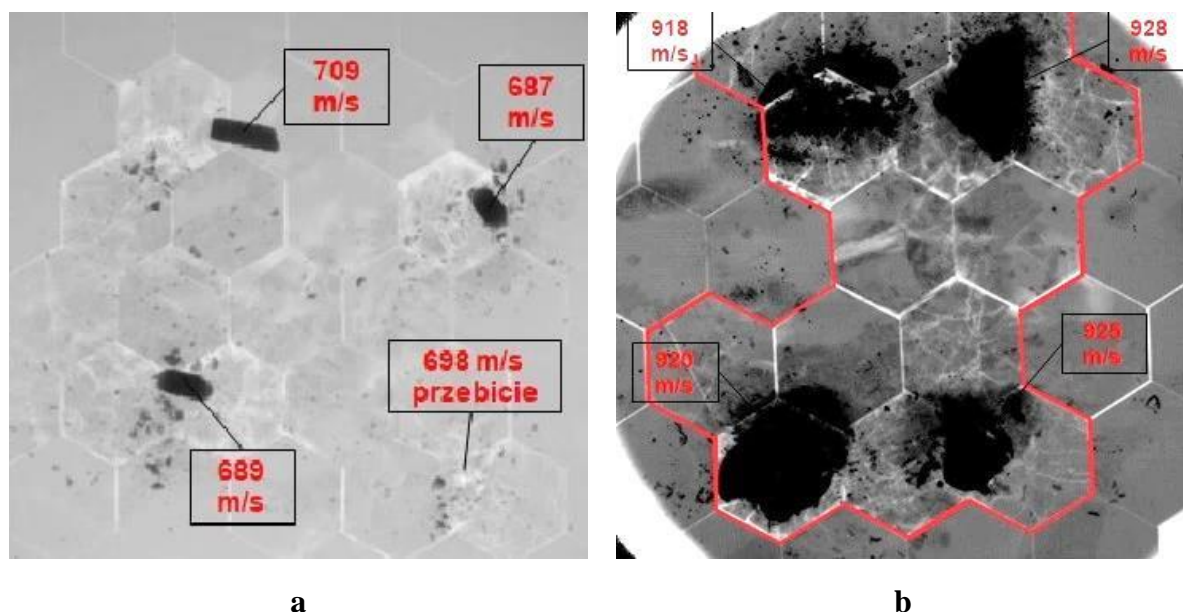
b

Fot. 2. Czołowa warstwa ceramiczna po ostrzale: a – płytki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , b – płytki SiC.

Photo 2. Front ceramic layer after firing: a –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tiles, b – SiC tiles

Pomocną techniką oceny zdolności ochronnej pancerza jest analiza rentgenograficzna. Wykonane przed oraz po ostrzale zdjęcia RTG wielowarstwowych osłon balistycznych, umożliwiają ocenę właściwego wykonania pancerza (ułożenie płytek ceramicznych), oddziaływanie pocisku i pancerza oraz wstępną ocenę obszaru zniszczenia czołowej warstwy ceramicznej. Dobrą, lecz pracochłonną praktyką jest wykonywanie zdjęć rentgenowskich po każdym strzale podczas procedury badania odporności pancerza na trafienie wielokrotne [15]. Bardziej szczegółowo zagadnienia te opisane będą w osobnej publikacji. Przykładowe zdjęcia RTG próbek pancerzy po ostrzale pokazano na fotografii 3.

X-ray analysis is a supporting technique for evaluation of armour protection capacities. X-ray pictures of multilayer protecting systems taken before and after firing may be used to assess the quality of armour workmanship (arrangement of ceramic plates), interaction between the projectile and armour, and provisional assessment of damaged area on the frontal ceramic layer. Taking X-ray pictures after each shot is a good but time consuming practice at testing procedure for armour resistance to multiple hitting [15]. These questions will be discussed in a more detailed way in a separate publication. Exemplary X-ray pictures of armour samples after firing are shown in picture 3.



**Fot. 3. Panczerze na bazie segmentowej ceramiki SiC – zdjęcia rentgenowskie**  
**Photo 3. Armours prepared on the basis of SiC segmented ceramics – X-ray picture**  
 Przebicie / penetration

Na fotografii 3a. pokazano wynik ostrzału wielowarstwowej osłony balistycznej za pomocą amunicji pistoletowej 4,6x30 mm DM31 o zwiększonej zdolnościach do penetracji. Wykonane zdjęcie pozwala zaobserwować korzystne z punktu widzenia osłony balistycznej oddziaływanie ceramicznej warstwy czołowej na pocisk przeciwpancerny. W trzech przypadkach nastąpiło stępienie ostrza pocisku oraz jego wybicie z osi uderzenia w pancerz, w wyniku czego mógł on zostać zatrzymany przez podłoże kompozytowe włókniste. W przypadku jednego z trafień, ceramiczna warstwa czołowa okazała się niewystarczająca i pocisk przebił kompozytowe podłoże. Fotografia 3b ukazuje próbkę pancerza ceramika/kompozyt, poddanego badaniu odporności balistycznej na trafienie wielokrotne w oparciu o normę STANAG 4569 za pomocą amunicji 7,62x51 mm APWC. W obydwu przypadkach ostrzału, zdjęcia RTG pozwalają na oszacowanie obszaru zniszczenia czołowej warstwy ceramicznej.

### 3. Podsumowanie

Współczesne asymetryczne konflikty zbrojne spowodowały wzrost zapotrzebowania służb cywilnych oraz wojska na skuteczniejsze osłony balistyczne. W sytuacji, w której utrud-

Photo 3a shows the results of firing at a multilayer ballistic protection with pistol ammunition 4.6x30 mm DM31 of enhanced penetration. The picture illustrates a beneficial reaction of the ballistic protection frontal ceramic layer against the armour piercing bullet. In three cases the point of the bullet was blunted and the bullet itself was knocked off the axis of incidence at the armour to be stopped by the fibre base. But for one hitting the frontal ceramic layer was insufficient and the bullet has pierced through the composite backing. Photo 3b shows a sample of ceramic/composite armour subjected to the ballistic resistance multiple hitting test according to STANAG 4569 with ammunition 7.62x51 mm APWC. For the both cases of firing the X-ray pictures are useful at the assessment of destruction zones for the frontal ceramic layer.

### 3. Summary

Present military asymmetric conflicts have increased the demand of civilian services and armed forces for more effective ballistic protections. For the cases when the

nione jest odróżnienie wroga od osoby cywilnej, pancerz musi zapewnić ochronę w sytuacji niespodziewanego ostrzału, w szczególności odporność na trafienie wielokrotne. Spośród materiałów stosowanych do konstrukcji opancerzenia, jedną z najważniejszych grup stanowi ceramika specjalna. Dzięki unikalnym właściwościom mechanicznym, takim jak wysoka twardość oraz zdolność do pochłaniania energii na drodze kruchego pęknięcia, materiały ceramiczne stanowią nieodłączny element pancerzy chroniących przed działaniem pocisków przeciwpancernych. Twarda płyta czołowa zbudowana z ceramiki tępi lub całkowicie niszczy rdzeń pocisku przeciwpancernego oraz redukuje jego energię kinetyczną, poprzez pęknięcie na bardzo małe fragmenty, w wyniku czego może on być zatrzymany przez kompozytowe podłoże. Najszersze zastosowanie w konstrukcji osłon balistycznych znalazły tlenek glinu oraz węgiel krzemu, ze względu na najkorzystniejszą kombinację właściwości mechanicznych oraz kosztów produkcji. Atrakcyjnym, z powodu niskiej gęstości i wysokiej twardości, ceramicznym materiałem balistycznym jest węgiel boru. Pomimo ciągłego rozwoju w dziedzinie kompozytów włóknistych, czy rozpowszechniania nowych lekkich i wytrzymałych materiałów węglowych, ceramika będzie nadal odgrywać kluczową rolę w konstrukcji nowoczesnych osłon balistycznych.

recognition between the enemy and civilian person is difficult the armour has to provide the protection at unexpected firing, and especially the resistance against multiple hitting. Special ceramics are one of most important groups of materials used in designs of armours. Due to unique mechanical properties such as the high hardness and ability for absorption of energy at fragile breaking the ceramic materials are commonly used as components of armours protecting against the action of armour piercing bullets. A hard frontal plate made from ceramics blunts or completely destroys the core of the armour piercing bullet and reduces its kinetic energy at breaking into small size fragments and finally enables the backing to stop the bullet. The aluminium oxide and silicon carbide have found the widest application at the designs of ballistic protection systems because of a preferential combination of mechanical properties and costs of manufacture. Boron carbide is an interesting ceramic ballistic material due to its low density and high hardness. Despite continuous progress in development of fibrous composites or common use of new light and strong carbon based materials the ceramics still will maintain its crucial position in designs of modern ballistic protection systems.

## **Literatura / Literature**

- [1] Wiśniewski A., *Pancerze; budowa, projektowanie i badanie; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa 2001.
- [2] Skaggs S.R., *A Brief History of Ceramic Armor Development; Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 24/2003.
- [3] Karandikar P.G., Evans G., Wong S., *A Review of Ceramics for Armor Applications, Ceramics Engineering and Science Proceedings*, 29, no. 6, 2008.
- [4] Olszyna A. R., *Twardość a kruchość tworzyw ceramicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
- [5] Pampuch R., Lis J., Stobierski L., *Pęknięcie dynamiczne materiałów ceramicznych; Szkło i Ceramika* 6/95.
- [6] Medvedovski E., *Armor Silicon Carbide-Based Ceramics, Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2003, vol. 24 no.3.
- [7] Medvedovski E., *Alumina Ceramics for Ballistic Protection, Part 2, American Ceramic Society Bulletin*, 2002, 81 no. 4

- 
- [8] Stobierski L., Węglik krzemu, budowa, właściwości i otrzymywanie, *Prace Komisji Nauk Ceramicznych*, PAN, Kraków, Ceramika 48, 1996.
- [9] Thevenot F. Boron Carbide – A comprehensive review, *Journal of the European Ceramic Society*, 1990/6.
- [10] Grujicic M., Pandurangani B., Zecevic U., Ballistic Performance of Alumina/S-2 Glassreinforced Polymer-Matrix Composite Hybrid Lightweight Armor Against Armor Piercing (AP) and Non-AP Projectiles, *Multidisciplin Modeling in Mat. And Str.*, Vol. XX, No. XX; 2006.
- [11] Demir T., Ubeyli M., Yildirim R., Investigation on the Ballistic Performance of Alumina/4340 Steel Laminated Composite Armor Against 7.62mm Armor Piercing Projectiles; *Metal* 2008.
- [12] Sujirote K., Dateraksa K., Chollacoop N., Some Practical Requirements for Alumina Armor Systems, *Advanced in Ceramic Armor III*; Daytona Beach Florida 2007.
- [13] Cegła M., Habaj W., Composite Deformable Armor Systems Based on Small Size Ceramics Resistant to 5.7x28 mm SS190 Projectiles for Personal and Vehicle Armor Applications, *Problemy Techniki Uzbrojenia* 1/2013.
- [14] STANAG 4569, AEP -55 vol. 1. Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles - Kinetic Energy and Artillery Threat.

