



MATERIAŁY CERAMICZNE STOSOWANE W OSŁONACH BALISTYCZNYCH

Marcin CEGŁA
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozwój pancerzy ceramicznych oraz rolę ceramiki w nowoczesnym pancerzu kompozytowym. Materiały ceramiczne posiadają wyjątkowe właściwości, dzięki którym są z powodzeniem stosowane jako elementy pancerza. Są to niska gęstość, wysoka twardość oraz zdolność do rozpraszania energii poprzez mechanizm kruchego pęknięcia. Pozwala to na zwiększenie odporności pancerza na działanie pocisków przeciwpancernych przy jednoczesnym obniżeniu jego masy powierzchniowej w porównaniu z tradycyjnymi osłonami stalowymi. W artykule omówiono i porównano główne materiały ceramiczne stosowane na osłony balistyczne; tlenek glinu, węgiel krzemu, węgiel boru oraz kilka innych. Wymieniono i opisano właściwości tych materiałów oraz ich wpływ na odporność balistyczną.

Słowa kluczowe: pancerz ceramiczny, tlenek glinu, węgiel krzemu, węgiel boru, twardość, odporność na kruche pęknięcie

CERAMIC MATERIALS FOR ARMOR APPLICATIONS

Marcin CEGŁA
Military Institute of Armament Technology

Abstract: This overview briefly discusses the development of ceramic armor and the role of ceramic materials in modern composite armor systems. Ceramics possess exceptional characteristics such as low density, high hardness and good ability to dissipate energy through fracture, which make them suitable for defeating armor piercing projectiles and at the same time reducing the areal density of the armor system, comparing to traditional steel armors. Due to high penetrating capabilities of modern AP projectiles, ceramic materials will continue to play a significant role in ballistic protection. Main materials such as Alumina, Silicon Carbide, Boron Carbide and few others are characterized and compared. Properties of ceramic materials and their influence on ballistic performance are listed and described.

Keywords: ceramic armor, alumina, silicon carbide, boron carbide, hardness, fracture toughness

1. Wstęp

Od kilkudziesięciu lat, wraz ze wzrostem zapotrzebowania na ochronę balistyczną, materiały ceramiczne stosowane są z powodzeniem, jako elementy kompozytowych osłon pancernych. Wymaga się, aby płyta ceramiczna zapewniała jak najlepszą ochronę przy jednoczesnej minimalizacji masy i grubości. Materiały takie jak tlenek glinu (Al_2O_3), węgiel krzemu (SiC) i węgiel boru (B_4C), są z powodzeniem stosowane zarówno jako opancerzenie

pojazdów i statków powietrznych jak i w kamizelkach osobistych. Ponadto stosowane są również inne materiały takie jak borek tytanu (TiB_2), azotek glinu (AlN), azotek krzemu (Si_3N_4) oraz kompozyty o osnowie ceramicznej Al_2O_3/TiB_2 czy ZTA (tlenek glinu wzmocniony cząstkami tlenku cyrkonu) [1,2]. Innym możliwym zastosowaniem ceramiki są pancerze przezroczyste. Monokrystaliczny tlenek glinu (szafir) posiada wysoką wytrzymałość, twardość i doskonałe właściwości optyczne umożliwiające stosowanie zamiast obecnie używanych laminatów szklanych [3]. Ceramika ma wiele właściwości, które uzasadniają użycie jej jako elementu pancerza kompozytowego. Należą do nich wysoka twardość oraz zdolność do pochłaniania energii pocisku poprzez mechanizm kruchego pęknięcia. Istotne jest, że ceramika nie tworzy pancerza samodzielnie, ale w połączeniu z innymi materiałami takimi jak stal, aluminium lub kompozyty włókniste. Zadaniem ceramiki jest stępienie i rozbitcie rdzenia pocisku przeciwpancernego, dlatego stosowana jest, jako warstwa przednia pancerza. Uderzenie pocisku w pancerz i jego penetracja jest zjawiskiem zachodzącym w bardzo krótkim czasie, dlatego nie można powiązać odporności balistycznej z tylko jedną cechą materiałową. W celu oceny możliwości ochronnych pancerza ceramicznego należy brać pod uwagę wszystkie jego właściwości mechaniczne oraz budowę mikrostrukturalną [4].

2. Rozwój pancerzy ceramicznych, typowe zastosowania, rola ceramiki we współczesnych pancerzach

2.1. Rozwój pancerzy ceramicznych. Podstawy konstrukcji pancerza

Materiały ceramiczne mają wyjątkowe właściwości, dzięki którym mogą być z powodzeniem stosowane jako elementy wojskowych i cywilnych systemów opancerzenia. Do zastosowań wojskowych należy opancerzenie: pojazdów kołowych, czołgów, bojowych wozów piechoty, środków latających, schronów, okrętów oraz osobiste osłony balistyczne. Ceramika stosowana jest także w kamizelkach kulo- i odłamkooodpornych, użytkowanych przez policję oraz agencje ochrony. Zagrożenie ze strony nowoczesnej amunicji przeciwpancernej spowodowało wzrost zapotrzebowania na lepszą ochronę pojazdów, wyposażenia, ale przede wszystkim personelu. Tradycyjnie stosowane pancerze stalowe (RHA z ang. rolled homogeneous armour) osiągnęły granice stosowalności ze względu na masę. Koniecznym stało się opracowanie nowych materiałów, które przy tej samej lub niższej masie powierzchniowej wykazywać będą wyższą odporność balistyczną.

Pierwsze próby z ceramiką jako materiałem balistycznym prowadzone były podczas wojny w Wietnamie. Pojawiła się tam potrzeba lepszej ochrony żołnierzy, w szczególności zagrożonych działaniem snajperów. Pierwszym zastosowanym materiałem był tlenek glinu połączony z kompozytem wzmocnianym włóknem szklanym (GFRC). Pomimo dobrych zdolności ochronnych, kamizelki wyposażone w dwie płyty balistyczne okazały się zbyt ciężkie i ich użycie zostało ograniczone do służby wartowniczej. Kolejnym materiałem był węgiel boru. Jego gęstość, wynosząca $2,5 \text{ g/cm}^3$ w porównaniu z gęstością tlenku glinu równą $3,9 \text{ g/cm}^3$, dawała możliwość znacznego obniżenia masy pancerza. Jednocześnie odkryto właściwości balistyczne borku berylu, jednak ze względu na toksyczne właściwości berylu nie znalazł on dalszego zastosowania w osłonach balistycznych. Wraz z badaniem i stosowaniem nowych materiałów ceramicznych powstały pierwsze teoretyczne założenia do konstrukcji pancerzy. Uznano, że materiał pancerza musi być przynajmniej tak twardy jak materiał pocisku, a jego grubość, dla skutecznego zapobieżenia perforacji, musi wynosić co najmniej 0,5 kalibru pocisku. Przednia warstwa ceramiki musi stanowić około 1/3 grubości całego pancerza, natomiast grubość podłoża około 2/3. Rolą ceramicznej warstwy przedniej jest stępienie ostrza pocisku i jego fragmentacja, rolą zaś podłoża, odkształcenie sprężyste i wychwycenie odłamków [1].

Konieczny stał się wzrost aktywności przemysłu zbrojeniowego w procesie powstawania pancerzy oraz zwiększenie udziału metod modelowania komputerowego w opisie zjawiska wnikania pocisku w pancerz. Kolejnym krokiem było wytypowanie materiałów o najlepszych właściwościach balistycznych. Tlenek glinu, węgiel krzemu oraz węgiel boru stanowią grupę najczęściej stosowanych materiałów, rzadziej stosowane są: borek tytanu, azotek glinu, azotek krzemu. Do grupy ceramicznych materiałów transparentnych o właściwościach balistycznych należy monokrystaliczny tlenek glinu. Potencjalne zastosowanie w osłonach balistycznych mają także kompozyty o osnowie ceramicznej takie jak ZTA (tlenek glinu wzmocniony tlenkiem cyrkonu).

Powszechność zastosowań tlenku glinu oraz węgla krzemu jest spowodowana stosunkowo niewielkimi kosztami produkcji. Materiały te posiadają wiele zastosowań, a wielkość ich produkcji liczona jest w milionach ton rocznie. Dalsze polepszenie właściwości balistycznych pancerza oraz obniżenie jego masy jest możliwe przy zastosowaniu węgla boru. Masa kompozytowego pancerza zawierającego węgiel boru będzie niższa o ok 30 % w stosunku do konstrukcji bazującej na tlenku glinu. Jego zastosowanie ograniczone jest wysokimi kosztami produkcji. Pomimo działań podjętych w celu obniżenia kosztów produkcji, węgiel boru pozostaje materiałem drogim. Stosowany jest głównie w technice lotniczej oraz do konstrukcji osobistych osłon balistycznych [1,5].

2.2. Budowa współczesnej osłony balistycznej, rola ceramiki

Wspólną cechą pancerzy na bazie ceramiki jest budowa warstwowa. Najczęściej spotykane jest rozwiązanie dwuwarstwowe. Przednią część stanowi twarda, sztywna warstwa ceramiki wsparta na miękkim, odkształcalnym podłożu wykonanym z materiału na bazie włókien. Kompozyty włókniste posiadają doskonałe właściwości ochronne przeciwko miękkim, ołowianym rdzeniom, nie są jednak w stanie skutecznie przeciwdziałać twardym penetratorom przeciwpancernym, gdyż osnowa kompozytu oraz włókna wzmocniające nie posiadają wystarczającej twardości by spowodować stępienie i fragmentację rdzenia. Typowy pocisk przeciwpancerny składa się z twardego, najczęściej stalowego rdzenia w płaszczu z miękkiego metalu. Na skutek uderzenia pocisku w pancerz, zewnątrz płaszcz jest niszczone, a penetracja pancerza odbywa się w wyniku działania twardego rdzenia. Skutki oddziaływania pocisku oraz pancerza ceramicznego pokazano na fot. 1.



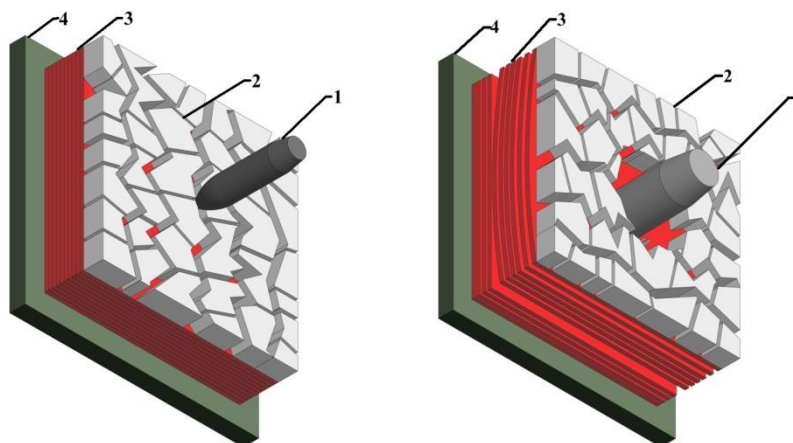
Fot. 1. Zniszczony element pancerza ceramicznego oraz pocisk przeciwpancerny przed i po uderzeniu w pancerz

Każdy element pancerza odgrywa rolę w zatrzymaniu pocisku. Zadaniem ceramiki jest stępienie i fragmentacja rdzenia pocisku oraz pochłonięcie części jego energii kinetycznej. Podłoże włókniste pełni rolę sieci do wychwytywania odłamków i pochłaniania pozostałej energii poprzez odkształcenie plastyczne, delaminacje oraz wyciąganie włókien. Ceramika

może być zastosowana jako jednolita płyta lub sklejone ze sobą płytki. Podczas uderzenia pocisku płytki ceramiczne poddane są wysokim naprężeniom ściskającym. Ze względu na wysoką odporność ceramiki na ściskanie zniszczenie nie następuje od razu, jest natomiast wynikiem połączonego działania fali uderzeniowej oraz fali odbitej powodującej naprężenia rozciągające. Na tym etapie jednak, w wyniku oddziaływania z twardą warstwą ceramiki, wierzchołek pocisku ulega stępieniu, a część jego energii kinetycznej zostaje pochłonięta w procesie kruchej pęknięcia. Stępiony rdzeń pocisku jest mniej skuteczny w procesie penetracji włóknistego podłoża. Na właściwości balistyczne pancerza wpływ ma twardość ceramiki, grubość, ułożenie płytek, a także wytrzymałość warstwy adhezyjnej pomiędzy ceramiką

a podłożem. Warstwa ta zapobiega wypadaniu płytek i fragmentów ceramiki po uderzeniu pocisku oraz rozprasza energię pocisku na granicy warstw pancerza. Projektowanie nowoczesnych osłon balistycznych wymaga rozpatrzenia właściwości wszystkich jego elementów oraz charakteru oddziaływań między nimi. Projektanci muszą także zachować równowagę pomiędzy dobrymi właściwościami balistycznymi osłony oraz jej masą [5,6,7].
Działanie pancerza

i rolę poszczególnych elementów podczas penetracji pociskiem pokazano na rys. 1.



Kruche pęknięcie warstwy ceramiki Odkształcenie plastyczne podłoża

Rys. 1. Działanie pancerza o budowie warstwowej. 1 - rdzeń pocisku, 2 - spękana płyta ceramiczna, 3 - kompozytowe podłoże, 4 - pancerz rodzimy

3. Właściwości materiałów ceramicznych

Ceramika tlenkowa łączy dobre właściwości balistyczne ze stosunkowo niewielkimi kosztami surowców i produkcji. Jedynym ograniczeniem dla tlenku glinu jest względnie wysoka gęstość, a co za tym idzie masa powierzchniowa osłony. Ceramika węglkowa ma jeszcze lepsze właściwości mechaniczne i balistyczne oraz gęstość mniejszą niż tlenek glinu. Węgliki krzemu i boru należą do najtwardszych znanych materiałów, ustępują jedynie diamentowi oraz azotkowi boru o strukturze regularnej. Zarówno węgiel krzemu jak i węgiel boru są szeroko stosowane w konstrukcji osłon balistycznych. 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 wytwarzania zarówno tlenku glinu jak i węgliku krzemu. Dla ceramiki węglkowej osiągnięcie wysokich wartości właściwości mechanicznych wymaga zastosowania metody prasowania na gorąco. W przypadku ceramiki tlenkowej wystarczający jest proces swobodnego spiekania bez konieczności stosowania atmosfery ochronnej [8,9,10].

Kompozyty o osnowie ceramicznej reprezentowane przez ZTA (tlenek glinu wzmocniony tlenkiem cyrkonu) wydają się być bardzo dobrym materiałem balistycznym ze względu na podwyższoną odporność na kruche pękanie. Podobnie jednak jak w przypadku ceramiki węglkowej koszty produkcji są wysokie [2]. Borek tytanu, azotek glinu oraz azotek krzemu, ze

względu na swoje właściwości mechaniczne, mogą również być stosowane w osłonach balistycznych [11,12]. Właściwości mechaniczne wybranych materiałów ceramicznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości ceramiki balistycznej [4]

Materiał	Gęstość [g/cm ³]	HV [GPa]	K _{IC} [MPa m ^{1/2}]	E [GPa]	V _s [km/s]	σ _{zg} [MPa]
Al ₂ O ₃ (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
SiC (HP)	3,21	-	5,0 – 5,5	440-450	11,2-12,0	600-730
B ₄ C (HP)	2,45 - 2,52	29 – 35	2,0 – 4,7	440-470	13,0-13,7	200-360
TiB ₂ (S)	4,55	21 – 23	8,0	550	-	350
TiB ₂ (HP)	4,48 – 4,51	22 – 25	6,7 – 6,95	550	11,0-11,3	270-400
AlN (HP)	3,26	-	2,5	330	-	350

HV-twardość Vikersa, K_{IC} - odporność na kruche pękanie, E - moduł Younga, V_s - prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej, σ_{zg} - wytrzymałość na zginanie

4. Wpływ właściwości ceramiki na odporność balistyczną

4.1. Właściwości mechaniczne wpływające na odporność balistyczną

Właściwości mechaniczne ceramiki, a w szczególności twardość oraz odporność na kruche pękanie, mają istotny wpływ na jej właściwości balistyczne. Twardość odpowiada zdolności materiału do przeciwstawienia się zewnętrznemu oddziaływaniu mechanicznemu takiemu jak zarysowanie lub zgniecenie. Pośród balistycznych materiałów ceramicznych największą twardość wykazują węgliki boru i krzemu. Kruche pękanie jest nieodłączną cechą materiałów ceramicznych. Pękanie ceramiki następuje pod niższymi, niż wynikałoby to z budowy chemicznej, obciążeniami. Spowodowane jest to występowaniem defektów mikrostruktury, stanowiących źródło koncentracji naprężeń. Prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej odpowiada zdolności materiału do rozpraszania energii. Wysoka wartość prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej świadczy o osiągnięciu wysokiej gęstości i niskiej porowatości. Mikrostruktura oraz wielkość ziaren materiału mają wpływ na wszystkie wymienione wcześniej właściwości mechaniczne ceramiki balistycznej [2,4,13]. Wpływ wybranych właściwości fizycznych na odporność balistyczną przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 [14]

Właściwości	Wpływ na odporność balistyczną
Mikrostruktura: wielkość ziaren, obecność wtrąceń, porowatość.	Wpływa na pozostałe właściwości mechaniczne
Gęstość	Masa pancerza
Twardość	Zniszczenie rdzenia pocisku
Moduł Younga	Rozpraszanie energii
Wytrzymałość	Odporność na trafienie wielokrotne
Odporność na kruche pękanie	Odporność na trafienie wielokrotne
Sposób pękania	Pochłanianie energii

4.2. Zależność twardości i odporności na kruche pękanie dla ceramiki balistycznej

Twardość oraz odporność na kruche pękanie materiałów ceramicznych to dwie najważniejsze właściwości mechaniczne determinujące ich odporność balistyczną. Twardość ceramicznej osłony balistycznej powinna przewyższać twardość pocisku przeciwpancernego, aby skutecznie stępić jego wierzchołek. Pożądana wartość odporności na kruche pękanie ceramiki

nie jest łatwa do określenia. Niska wartość współczynnika K_{IC} oznacza lepsze pochłanianie energii kinetycznej pocisku na drodze pękania (spiaskowanie) płyty ceramicznej. Jednak w celu uzyskania odporności osłony na trafienie wielokrotne wartość odporności na kruche pękanie powinna być wysoka. Niestety twardość oraz odporność na kruche pękanie materiałów ceramicznych łączy zależność odwrotnie-proporcjonalna. Zarówno twardość jak i odporność na kruche pękanie powiązana jest ściśle z budową mikrostrukturalną materiału. Twardość materiału maleje wraz ze wzrostem wielkości ziaren, która z kolei ma wpływ na mechanizm pękania. Obecność większych ziaren powoduje zwiększenie drogi jaką pokonuje przemieszczające się w materiale pęknięcie. Rośnie zatem energia pękania i w konsekwencji odporność na kruche pękanie [4,14,15].

5. Podsumowanie

Materiały ceramiczne stanowią jeden z głównych składników wielowarstwowych osłon balistycznych stosowanych na opancerzenia pojazdów lądowych, środków latających oraz jako elementy osobistych osłon balistycznych. Tlenek glinu jest materiałem najszerszej stosowanym ze względu na względnie niskie koszty produkcji. Najlepsze relacje zależności właściwości mechanicznych oraz masy powierzchniowej osiągają pancerze na bazie węgla białego, ich zastosowanie ograniczone jest przez wysokie koszty materiałowe. Projektowanie pancerzy powinno uwzględniać zachowanie równowagi pomiędzy twardością, a odpornością na kruche pękanie ceramicznych materiałów balistycznych, w celu uzyskania najwyższej odporności na działanie nowoczesnych pocisków przeciwpancernych.

Literatura

- [1] S. R. SKAGGS, *A Brief History of Ceramic Armor Development*, Ceramic Engineering and Science Proceedings 24, 2003
- [2] E. MEDVEDOVSKI, *Alumina Ceramics for Ballistic Protection, Part 1* American Ceramic Society Bulletin 2002, 81 no. 3
- [3] C.D. JONES, J.B. RIOUX, J.W. LOCHER, *Large Area EFGTM Sapphire for Transparent Armor*, Ceramic Engineering and Science Proceedings 2003, 24, no. 3
- [4] E. MEDVEDOVSKI, *Alumina Ceramics for Ballistic Protection, Part 2*, American Ceramic Society Bulletin 2002, 81 no. 4
- [5] B. MATCHEN, *Applications of Ceramics in Armor Products*, Key Engineering Materials, 122-124, 1996, 333-344
- [6] M. GRUJICICL, B. PANDURANGANI, U. ZECEVICL, *Ballistic Performance of Alumina/S-2 Glassreinforced Polymer-Matrix Composite Hybrid Lightweight Armor Against Armor Piercing (AP) and Non-AP Projectiles*, Multidiscipline Modeling in Mat. And Str., Vol. XX, No. XX 2006
- [7] K. SUJIROTE, K. DATERAKSA, N. CHOLLACOOOP, *Some Practical Requirements for Alumina Armor Systems*, Advanced in Ceramic Armor III, Daytona Beach Florida, 2007

-
- [8] P. AUERKARI, *Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics*, Technical Research Center of Finland, ESPOO 1996
- [9] L. STOBIEŃSKI, *Węgiel krzemu, budowa, właściwości i otrzymywanie*, Prace Komisji Nauk Ceramicznych, PAN, Kraków, Ceramika 48, 1996
- [10] F. THEVOT, *Boron Carbide - A Comprehensive Review*, Journal of the European Ceramic Society, 1990/6
- [11] B. BASU, G.B. RAJU, A.K. SURI, *Processing and Properties of Monolithic TiB₂ Based Materials*, International Materials Reviews, 50, no. 6
- [12] B.H. MUSSLER, *Aluminum Nitride*, Advanced Material and Powders Handbook, American Ceramic Society Bulletin 79, 6, 2000
- [13] A. R. OLSZYNA, *Twardość a kruchość tworzyw ceramicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004
- [14] P.G. KARANDIKAR, G. EVANS, S. WONG, *A Review of Ceramics for Armor Applications*, Ceramics Engineering and Science Proceedings 2008, 29, no. 6
- [15] R. PAMPUCH, J. LIS, L. STOBIEŃSKI, *Pękanie dynamiczne materiałów ceramicznych*, Szkło i Ceramika 6/95.

