

Prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski
Dr hab. inż. Jacek Janiszewski
Dr hab. inż. Marek Rośkowicz
Dr inż. Zbigniew Surma

Wojskowa Akademia Techniczna

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

00-908 Warszawa

E-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl, jacek.janiszewski@wat.edu.pl,

marek.roskowicz@wat.edu.pl, zbigniew.surma@wat.edu.pl

Badania odporności na przebicie osłon o strukturze wielowarstwowej

Słowa kluczowe: badania balistyczne, balistyka końcowa, pancerze wielowarstwowe, odporność na przebicie

Streszczenie: Współczesne lekkie osłony balistyczne są zwykle strukturami wielowarstwowymi o małej gęstości. Celem badań była ocena możliwości zastosowania struktur wielowarstwowch na lekkie pancerze, mogące znaleźć zastosowanie jako kuloodporne osłony balistyczne śmigłowców bojowych i innego lekkiego sprzętu wojskowego. Badane materiały przygotowano na bazie tkanin aramidowych, cienkich blach ze stopu aluminium 2024T3 oraz ceramiki typu Al_2O_3 i SiC. Dodatkowo oceniono wpływ zastosowania połączeń adhezyjnych pomiędzy komponentami osłon balistycznych na ich właściwości ochronne. Określono energię przebijania osłon wykorzystując do tego celu stanowisko zbudowane na bazie działa helowego oraz szybkiej kamery. Wykonano również próby przebicia wytypowanych osłon pociskiem naboju Parabellum. Wykazano, że klejone struktury złożone z cienkich warstw metalowych i tkanin aramidowych charakteryzuje mniejsza odporność na przebicie odniesiona do ich gramatury niż blach metalowych i tkanin, z których były wytwarzane. Również pakiety luźnych tkanin aramidowych cechuje większa odporność na przebicie w porównaniu z kompozytami polimerowymi wytworzonymi z takich tkanin. Wykazano celowość stosowania komponentu ceramicznego w postaci oddzielnego pakietu, w którym płytki ceramiki wklejone są pomiędzy dwie warstwy cienkiej blachy.

1. Wprowadzenie

Lekkie wielowarstwowe osłony balistyczne znajdują coraz większe zastosowanie w podwyższeniu odporności na przebicie lekkich okrętów, samochodów, samolotów oraz kamizelek kuloodpornych [10, 18, 23]. W przeszłości pancerz był zazwyczaj monolityczny i wykonany z wysokowytrzymałych płyt stalowych. Jednakże, od kilku ostatnich dekad, obserwuje się wyraźną tendencję w dążeniu do stosowania osłon gwarantujących możliwie jak najwyższą ochronę balistyczną przy jednocześnie jak najmniejszej masie. Wśród wielu oryginalnych rozwiązań balistycznych układów ochronnych wyróżnić należy wielowarstwowe pancerze o małej gęstości, które wydają się być najbardziej perspektywiczne [10, 14, 18, 23]. Tego typu pancerz składa się z kilku warstw, które pełnią określoną rolę w niszczeniu pocisku i pochłanianiu energii uderzenia. Ogólnie można wyróżnić warstwy twarde i miękkie. Pierwsze z nich wykonane najczęściej z wysokowytrzymałego stopu lekkiego lub ceramiki odpowiadają za „zużywanie” pocisku podczas penetracji pancerza i rozpraszanie energii kinetycznej

pocisku. Z kolei drugi rodzaj warstw określanych terminem „miękkich” lub „o niskiej impedancji mechanicznej” pełnią rolę absorbera energii uderzenia oraz medium wychwytyjącego odłamki, które powstają w rezultacie niszczenia zarówno materiału pocisku, jak i twardej warstwy pancerza.

Współczesna lekka osłona balistyczna to układ kilku, a nawet kilkunastu warstw różnych materiałów, połączonych lub odseparowanych, tworzących tzw. warstwową strukturę kompozytową. Rodzaj zastosowanych materiałów warstwy oraz ich grubość i układ determinuje właściwości ochronne danego pancerza. Najprostsza konfiguracja struktury nowoczesnego pancerza lekkiego składa się z trzech warstw, tj. przedniej warstwy ceramicznej, która bezpośrednio spoczywa na warstwie miękkiej, ta zaś podparta jest blachą ze stopu lekkiego lub warstwą kompozytu włóknistego (warstwa podporowa).

Warstwy ceramiczne lekkich osłon balistycznych są zazwyczaj wykonywane z tlenku aluminium (Al_2O_3), węgla krzemu (SiC) oraz węgla boru (B_4C) [10, 18, 21]. Jest także wiele przykładów badań nad zastosowaniem na lekkie osłony balistyczne azotku krzemu (Si_3N_4), borka tytanu (TiB_2), azotku aluminium (AlN), sialonów (SiAlON), szkieł [4, 10, 18], a także kompozytów ceramicznych wzmacnianych fazami metalowymi lub międzymetalicznymi [7]. Z przyczyn technologicznych, warstwy ceramiczne pancerzy są wykonywane z segmentów (płytek), które są mocowane do podłoża. Jako podłoże stosuje się – w przypadku współczesnych pancerzy lekkich - wysokowytrzymałe elastomery (np. gumy syntetyczne lub elastomery polimocznikowe [8, 20]) lub piany metaliczne [6]. Materiały te tworzą warstwę przejściową pomiędzy segmentami ceramicznymi a warstwą podporową, która może być integralnym elementem pancerza kasetowego lub elementem konstrukcyjnym (opancerzeniem zasadniczym) obiektu chronionego. Warstwa ta jest więc najczęściej ze stopu aluminium, stopu tytanu lub kompozytu zbrojonego włóknami szklanymi, węglowymi lub aramidowymi.

W literaturze podkreśla się również rolę połączenia klejowego w kształtowaniu właściwości ochronnych pancerza warstwowego [1, 11]. Na przykład w pracy [1] stwierdzono, że dla pancerza dwuwarstwowego (tlenek aluminium/aluminium) istnieje optymalna grubość warstwy kleju (0,3 mm), dla której efektywność pancerza jest najwyższa. Do łączenia poszczególnych warstw pancerza wykorzystuje się najczęściej kleje na bazie żywic epoksydowych lub klei cyjanoakrylowych.

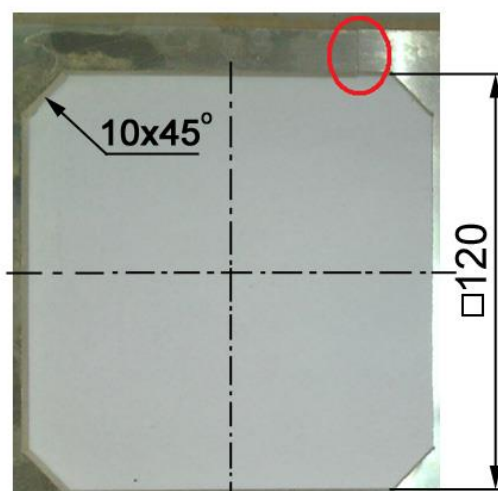
Opracowanie konstrukcji wielowarstwowej osłony balistycznej jest bardzo złożonym zadaniem, które usiłuje się rozwiązać bazując na wynikach badań doświadczalnych [16, 19], symulacji numerycznych [3, 17] lub modelowaniu analitycznym [22]. Szczególnie pomocne w optymalizacji konstrukcji pancerzy wielowarstwowych jest modelowanie numeryczne. W literaturze przedmiotu można znaleźć dużo przykładów wykorzystania modelowania numerycznego w badaniu zachowania się struktur wielowarstwowych. Ostatnio do tego celu wykorzystuje się także technologię informatyczną bazującą na sztucznych sieciach neuronowych [13, 15], która jest konkurencyjna w stosunku do modelowania numerycznego ze względu na stosunkowo krótki czas potrzeby na rozwiązanie problemu. Przewidywanie zachowania się osłony wielowarstwowej na podstawie wyników analiz numerycznych wymaga jednak kalibracji zastosowanych modeli numerycznych w oparciu o wyniki badań doświadczalnych. W tym celu są wykonywane na przykład testy balistyczne w warunkach eksperymentu możliwie zbliżonych do modelowych. W tego typu testach jako pocisk często stosuje się kulę, gdyż w porównaniu ze standardowymi pociskami naboju broni strzeleckiej unika się dodatkowych efektów zwiększających złożoność zjawiska perforacji (np. ruch obrotowy pocisków stabilizowanych żyroskopowo, precesja pocisku itp.) [5, 2, 9, 12]. Badania doświadczalne są więc niezbędne, pomimo, że są kosztowne i czasochłonne. Ponadto, już na etapie wstępnych testów pozwalają one obiektywnie ocenić zasadność przyjętych rozwiązań lub koncepcji.

W związku z tym, że problematyka lekkich osłon balistycznych jest obecnie, w sposób szczególny, szeroko podejmowana przez wiele ośrodków badawczych na całym świecie, podjęto próbę zbadania własnych rozwiązań wielowarstwowych osłon balistycznych. Niniejsza praca stanowi pierwszy etap podejmowanych przedsięwzięć i jej celem – oprócz dostarczenia danych doświadczalnych dla kalibracji modeli numerycznych – jest doświadczalna ocena właściwości ochronnych opracowanych struktur wielowarstwowych, mogących znaleźć zastosowanie jako kuloodporne osłony balistyczne śmigłowców bojowych i innego lekkiego sprzętu wojskowego. Ponadto, celem prac doświadczalnych była ocena wpływu zastosowania wybranych połączeń adhezyjnych na właściwości ochronne opracowanych osłon balistycznych.

2. Obiekt i metodyka badań

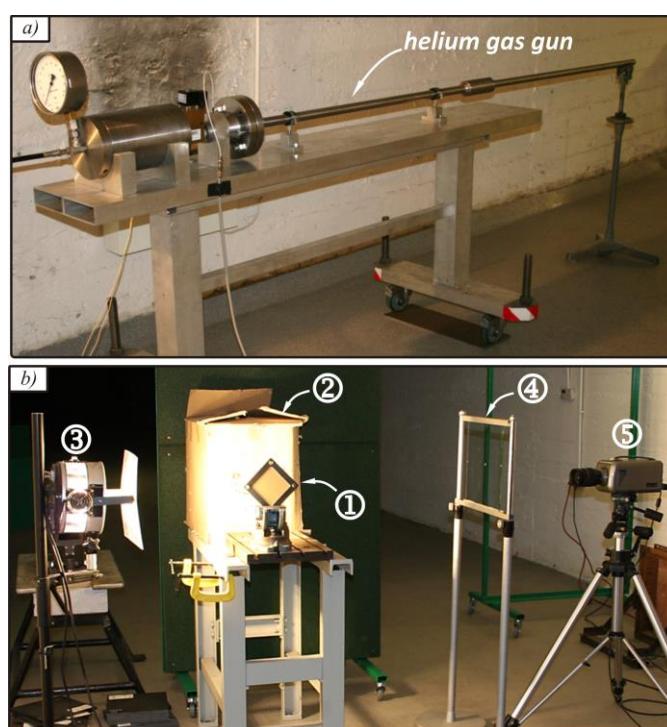
Uwzględniając wymóg małej gęstości badanych pancerzy wielowarstwowych postanowiono wytwarzać je na bazie blach ze stopu aluminium AW 2024-T3 (EN AW-AlCu4Mg1i, materiał przesycający i sztucznie starzony) oraz czterech różniących się budową i gramaturą tkanin aramidowych. Ponadto, zastosowano segmenty heksagonalne z tlenku aluminium Al_2O_3 lub z węgla krzemu SiC oraz stal nierdzewną w postaci cienkiej blachy o grubości 0,2 mm. Wykorzystano dwa rodzaje blach ze stopu aluminium AW 2024-T3: o grubości 0,3 mm oraz 3 mm oraz cztery tkaniny aramidowe o oznaczeniach Microflex, CT 709, T 750 i XPS10. Warstwa ceramiczna składała się z płytek o kształcie graniastosłupa prostego o podstawie sześciokąta foremnego (długość średnicy okręgu wpisanego 20,2 mm, grubość 4,2 mm). Do wytwarzania struktur klejonych wykorzystano klej epoksydowy Epidian 57 utwardzany utwardzaczem Z1. Zastosowanie kleju a nie syciwa wynikało z faktu, że stosowane tkaniny praktycznie nie dają się przesycać, a syciwa stosowane do przesycań tkanin charakteryzuje gorsza adhezja do metali w porównaniu z klejami.

Powierzchnie blach przygotowywano do klejenia poprzez ścieranie płótnem ściernym o granulacji 80 zamocowanym na gąbce oraz przemywanie benzyną ekstrakcyjną. Próby piaskowania cienkich blach powodowały ich odkształcenia plastyczne uniemożliwiające ich sklejenie na całej powierzchni. Spoiny klejonych próbek wstępnie utwardzono w temperaturze pokojowej przy zastosowaniu nacisków powierzchniowych 0,05 MPa w czasie 24 h, a następnie przez 6 h w temperaturze 60°C. Uzyskiwano płytki o wymiarach 150x250 mm, z których następnie metodą cięcia strugą wodno-ścierną (*ang. abrasive water jet*) wycinano płytki o kształcie i wymiarach przedstawionych na rys. 1.



Rys. 1. Płytkę kompozytu po wycięciu próbek metodą cięcia strugą wodno-ścierną. (czerwonym kółkiem zaznaczono miejsce rozpoczęcia cięcia)

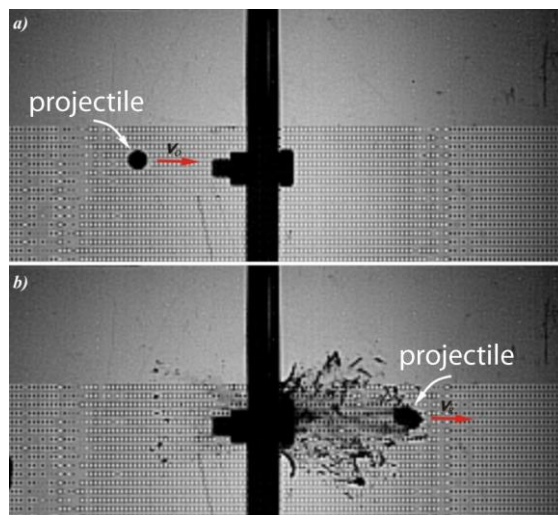
Wycięte próbki pancerzy umieszczano w stalowej ramce mocującej (Rys. 2b), którą następnie pozycjonowano w imadle naprzeciwko wylotu helowego układu miotającego (Rys. 2a). Odporność na przebicie badano poprzez strzelanie do próbek stalowymi kulkami o średnicy 8 mm umieszczonymi w teflonowym sabocie (Rys. 3). Podczas ostrzału próbek kompozytowych rejestrowano tor lotu kulki za pomocą kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych (Phantom v12). Obszar obserwacji kamery był tak przyjęty, aby obejmował zarówno przestrzeń przed, jak i za pancerzem warstwowym (Rys. 4). Dzięki takiej konfiguracji kamery było możliwe otrzymanie danych doświadczalnych, na podstawie których obliczano prędkości pocisku przed uderzeniem z tarczą i po jej przebiciu. Jako miarę odporności na przebicie przyjęto wartość energii pochłoniętej przez pancerz podczas jego penetracji, w skrócie nazwaną *energiją wytracaną na przebicie* E_p - różnica energii kinetycznych pocisku przed uderzeniem i po przebiciu próbki pancerza.



Rys. 2. Stanowisko do badania odporności próbek na przebicie: a - widok ogólny działa helowego, b – widok próbki przygotowanej do próby balistycznej oraz optycznego systemu rejestracji obrazu; 1 – próbka, 2 – kulochwyt, 3 – system oświetlenia, 4 – osłona, 5 - kamera



Rys. 3. Stalowe kulki o średnicy 8mm i teflonowe saboty



Rys. 4. Obszar obserwacji kamery szybkiej: widok przed uderzeniem (a) i po przebicium (b) próbki pancierza

3. Wyniki badań

Celem pierwszego etapu badań balistycznych było porównanie odporność na przebicie trzech konfiguracji osłon wykonanych ze stopu AW 2024-T3, tj.z blachy o grubości 3 mm, pakietu o grubości 3 mm utworzonego z dziesięciu blach o grubości 0,3 mm oraz pakietów składającego się dwóch i trzech blach o grubości 3 mm każda. Celem eksperymentu było oszacowanie czy pakiety blach charakteryzuje większa odporność na przebicie w porównaniu z blachami jednolitymi oraz czy energia wytracana na przebicie zależy liniowo od grubości osłony. Energię tą liczono z zależności (1).

$$E_p = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1)$$

gdzie: E_p – energia wytracana na przebicie, m – masa kulki, V_1 – prędkość kulki przed próbką, V_2 – prędkość kulki po przebicium próbki

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Odporność na przebicie blach ze stopu aluminium AW 2024-T3

Materiał	Grubość [mm]	Gęstość [g/cm ³]	Energia wytracana na przebicie [J]	Energia/grubość [J/mm]	Gramatura [kg/m ²]	Energia/Gramatura [J/kg/m ²]
AW 2024-T3	3	2,7	142,39	47,46	8,1	17,57
	2x3	2,7	271,48	45,25	16,2	16,76
	3x3	2,7	393,15	43,68	24,3	16,18
	10x0,3	2,7	146,12	48,71	8,1	18,04

Energia wytracana na przebicie badanych próbek odniesiona do grubości pakietu była podobna niezależnie od jego budowy. Różnica energii wytracanej na przebicie blachy i pakietu 10 blach o tej samej grubości wynosiła 2,5%. Wraz ze wzrostem grubości pakietu energia potrzebna do przebicia jego jednostkowej grubości nieznacznie spadła (o 8% przy porównaniu 3 mm blachy i trzech złożonych blach o tej samej grubości 3 mm każda).

Drugi etap testów dynamicznych obejmował badania kompozytów aramidowo-epoksydowych składających się z warstw różnych tkanin aramidowych sklejonych klejem Epidian 57/Z1. Dodatkowo zbadano osłonę otrzymaną poprzez zszycie 7 tkanin XPS102.

Uzyskano w ten sposób próbki osłony składającej się z takiej samej liczby warstw jak wytworzony wcześniej laminat aramidowo-epoksydowych (L XPS102). Rezultaty badań przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Odporność na przebicie laminatów (L) i luźnych warstw tkaniny aramidowej (7W)

Materiał	Grubość [mm]	Gęstość [g/cm ³]	Energia wytracana na przebicie [J]	Energia/grubość [J/mm]	Gramatura [kg/m ²]	Energia/Gramatura [J/kg/m ²]
L CT709	1,75	1,2	nieudana rejestracja		2,1	?
L XPS102	3,9	1,18	80,49	20,64	4,6	17,49
L Microflex	2,15	1,23	39,94	18,58	2,64	15,11
L T750	4,1	1,05	72,71	17,73	4,3	16,89
XPS102-7W	3,2	1,18	118,18	36,93	3,78	31,30

Energia wytracana na przebicie odniesiona do gramatury badanych laminatów okazała się porównywalna z energią przebijania blach ze stopu aluminium AW 2024-T3. Z czterech badanych tkanin najlepsze właściwości ochronne charakteryzują tkaninę XPS102. Energia wytracana na przebicie luźnych tkanin XPS102 (zszytych na krawędzi próbki) była prawie dwukrotnie większa od energii przebicia laminatu wytworzonego z tej tkaniny.

Kolejny etap dotyczył kompozytów typu FML składających się z na przemian ułożonych warstw cienkich blach metalowych (8 warstw) i tkanin aramidowych (7 warstw) sklejonych klejem Epidian 57/Z1. Wszystkie tkaniny klejono z blachami ze stopu AW 2024-T3, a tkaninę XPS102 dodatkowo z blachami ze stali nierdzewnej. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

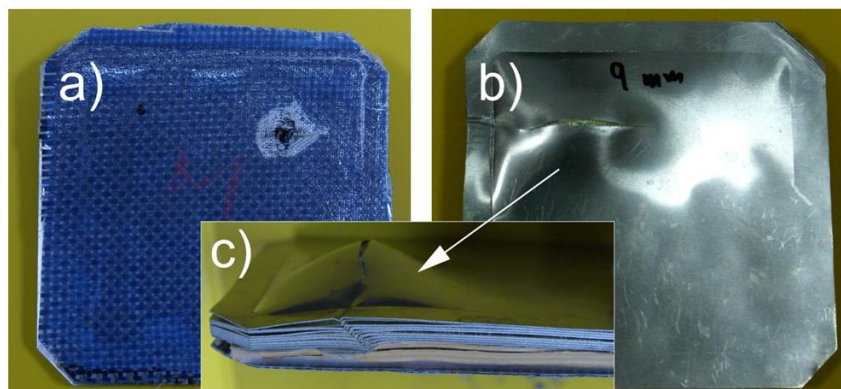
Tab. 3. Odporność na przebicie kompozytów typu FML na bazie stopu AW 2024-T3 lub stali (S) i tkanin aramidowych

Materiał	Grubość [mm]	Gęstość [g/cm ³]	Energia wytracana na przebicie [J]	Energia/grubość [J/mm]	Gramatura [kg/m ²]	Energia/Gramatura [J/kg/m ²]
K CT709	4,1	2,03	100,37	24,48	8,32	12,06
K XPS102	6,35	1,69	159,33	26,67	10,73	15,78
K Microflex	4,65	1,91	112,32	24,15	8,89	12,64
K T750	6,79	1,69	182,17	26,83	11,48	15,88
K XPS102S	4,85	2,23	159,99	32,99	10,82	14,79
K XPS102S	4,85	2,23	162,52	33,51	10,82	15,03

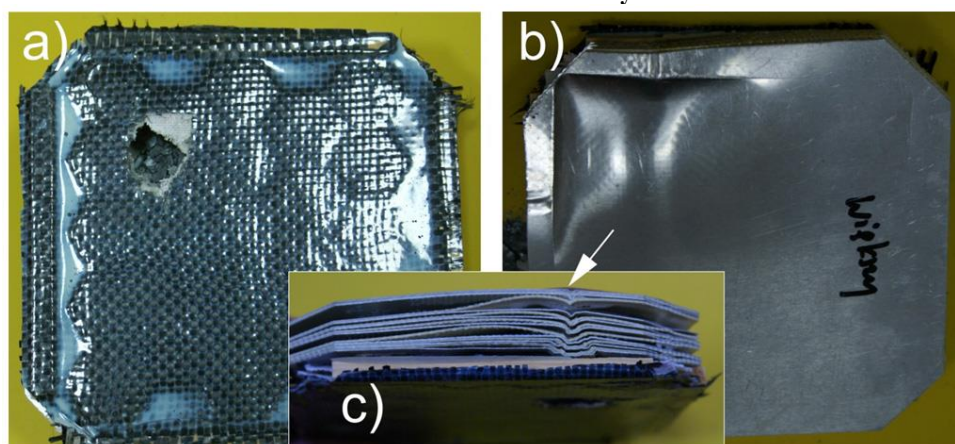
Energia wytracana na przebicie odniesiona do gramatury badanych kompozytów okazała się nieco niższa od energii przebicia laminatów i blach ze stopu AW 2024-T3. W związku z tym postanowiono ww. kompozyty typu FML wzmocnić 4,2 mm warstwą węgla krzemu. Przyklejoną warstwę ceramiki SiC osłonięto dodatkowo jedną warstwą tkaniny węglowej przesyconej klejem Epidian 57/Z1. W przypadku otrzymanych osłon ceramiczno – aramidowo – metalowych, testy strzelaniem za pomocą kulki stalowej wystrzelwanej z działa helowego wykazały brak perforacji dwóch badanych próbek (Tab. 4). Dlatego dwie pozostałe próbki poddano próbie odporności na przebicie pociskami amunicji pistoletowej typu Parabellum w celach porównawczych (energia kinetyczna pocisku Parabellum wynosi 450 J i jest ona porównywalna z energią kulki stalowej wystrzelwanej z helowego układu miotającego). Celem takiego postępowania była między innymi potrzeba stwierdzenia, czy na podstawie wyników badań uzyskanych z wykorzystaniem działa helowego można wnioskować o odporności osłon na przebicie pociskami amunicji bojowej. Zgodnie z oczekiwaniem pociski Parabellum nie przebiły badanych kompozytów (Rys. 5, Rys. 6)

Tab. 4. Kompozyty typu FML na bazie stopu 2024T3 i tkanin aramidowych z ceramiką typu Si₂C

Materiał	Gramatura z ceramiką [g/cm ²]	Grubość z ceramiką [mm]	Gęstość [g/cm ³]	Prędkość [m/s]	Energia wytracana na przebicie [J]	Energia/grubość [J/mm]	Energia/gramatura [J/kg/m ²]
KC CT709	22,80	8,75	2,61	655	>448	>51	> 19,54
KC XPS102	24,55	11	2,23	657	>451	>41	> 18,39
KC Microflex	23,36	9,3	2,51	pocisk ołowiany Parabellum		> 52,7	>20,98
KC T750	25,96	11,44	2,27	pocisk ołowiany Parabellum		> 42,8	>18,88



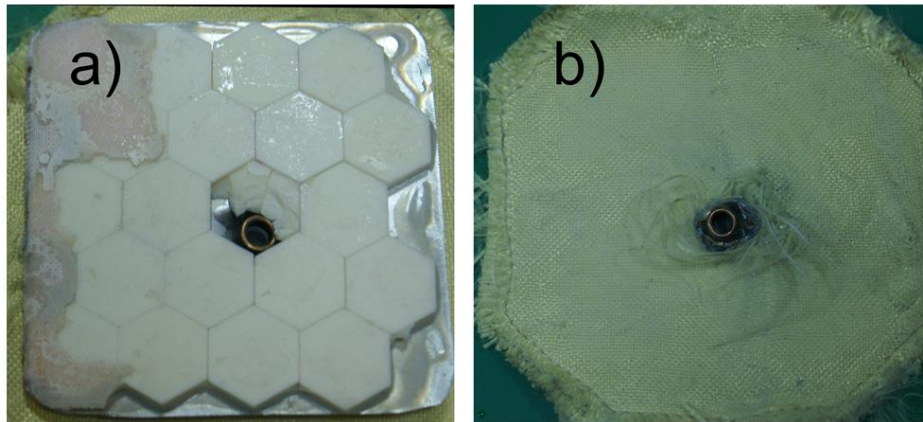
Rys. 5. Widok próbki KC Microflex po próbie przestrzelenia pociskiem Parabellum:
a - widok od strony ceramiki, b – odkształcenie i pęknięcie ostatniej warstwy metalowej,
c – rozwarstwienie osłony



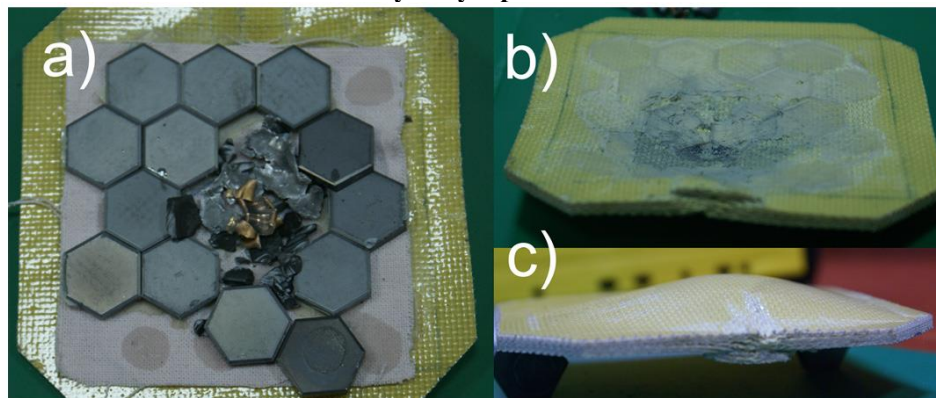
Rys. 6. Widok próbki KC T750 po próbie przestrzelenia pociskiem Parabellum:
a - widok od strony ceramiki, b – odkształcenie ostatniej warstwy metalowej, c – rozwarstwienie materiału

Ostatni etap badań dotyczył tkanin aramidowych osłoniętych jedną warstwą płytek ceramicznych. W pierwszym przypadku było to siedem zszytych warstw tkaniny CT709 osłoniętej jedną warstwą płytek ceramicznych Al₂O₃ wklejonych pomiędzy dwie blachy ze stopu AW 2024-T3 o grubości 0,3 mm. W drugim przypadku wykonano kompozyt polimerowy na bazie siedmiu warstw tkaniny T750 i żywicy L285, do którego przyklejono jedną warstwą płytek ceramicznych SiC. Sprawdzono odporność tak przygotowanych osłon na przebicie pociskiem Parabellum. W obu przypadkach pocisk nie przebił badanych próbek (Rys. 7, Rys. 8). Płytki ceramiczne, przyklejone do kompozytu wykonanego na bazie tkaniny T750 klejem Epidian 57, odrywały się od odkształconego plastycznie materiału (Rys. 8). W przypadku płytek wklejonych pomiędzy dwie warstwy cienkich blach ze stopu aluminium zniszczeniu uległa tylko jedna płytka ceramiki, a pozostałe przyklejone do blachy dalej stanowiły osłonę

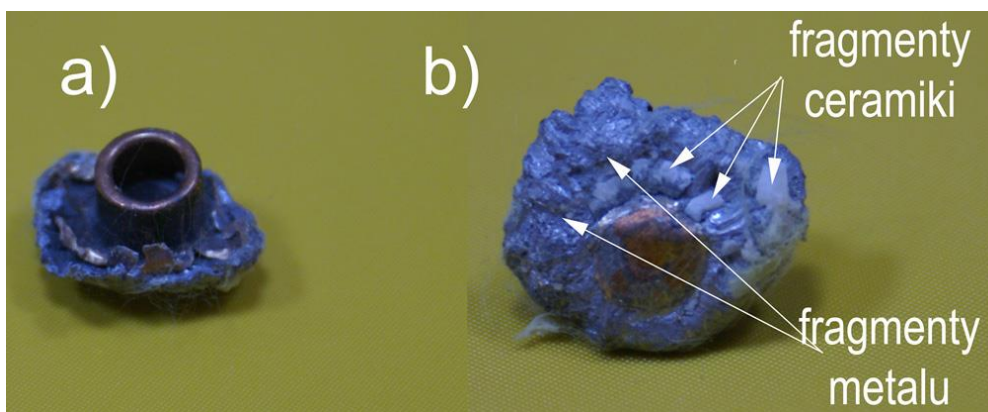
(Rys. 7). Ponadto, zaobserwowano, że czołowa część zdeformowanego pocisku (Rys. 9) była powiększona (rozbudowana) przez fragmenty warstwy ceramicznej i metalowej, które scaliły się z płaszczem i ołowianym rdzeniem pocisku.



Rys. 7. Widok próbki składającej się z 7 zszytych warstw tkaniny CT709 i jednej warstwy ceramiki Al_2O_3 po próbie przestrzelenia pociskiem Parabellum: a - widok zniszczenia ceramiki, b – widok tkaniny z zatrzymanym pociskiem



Rys. 8. Widok próbki wykonanej z kompozytu na bazie tkaniny T750 z przyklejoną warstwą ceramiki SiC po próbie przestrzelenia pociskiem Parabellum: a - widok od strony ceramiki, b – widok kompozytu ze śladami oderwanej ceramiki, c – trwale odkształcenie kompozytu



Rys. 9. Pocisk Parabellum po przebiciu ceramiki wklejonej pomiędzy dwie cienkie blachy ze stopu aluminium: a) widok ogólny, b) widok zdeformowanego pocisku z widocznym fragmentem metalu i ceramiki

4. Ocena wyników badań

Konstruując lekkie pancerze statków powietrznych należy przyjąć za główny parametr pozwalający porównywać ich jakość iloraz energii wytracanej na przebicie i gramatury (masy jednostkowej powierzchni) pancerza. Porównując wartości tego parametru można stwierdzić, że osłony wytwarzane ze stopów aluminium 2024T3 i badanych tkanin aramidowych cechują porównywalne właściwości antybalistyczne. Z przeprowadzonych badań wynika również, że luźne pakiety cienkich warstw wykazują większą odporność na przebicia w porównaniu ze strukturami monolitycznymi – w przypadku warstw metalowych stwierdzono wzrost na poziomie tylko 8%, ale w przypadku tkaniny XPS102 był on dwukrotny. W dalszych badaniach należałoby sprawdzić, czy zszywanie tkanin mogło mieć wpływ na tak znaczny wzrost odporności na przebicie i czy rozmieszczeniem szwów można wpływać na antybalistyczne właściwości pakietów tkanin aramidowych.

Gorsza odporność na przebicie struktur monolitycznych w porównaniu ze strukturami złożonymi z luźnych cienkich warstw pozwala stwierdzić, że klejenie ich nie jest zasadne, co znalazło potwierdzenie w badaniach kompozytów typu FML. Ich odporność na przebicie mierzona energią wytracaną na przebicie odniesioną do gramatury okazała się mniejsza od odporności laminatów i blach. FML-e cechuje wysoka trwałość zmęczeniowa wynikająca z wolnej propagacji pęknięć hamowanej delaminacją połączeń adhezyjnych. W trakcie przestrzeliwania występowała miejscowa delaminacja próbek wytworzonych z kompozytów typu FML, ale nie miało to wpływu na ich odporność na przebicie.

Badania potwierdziły celowość stosowania zewnętrznej warstwy twardej (ceramicznej) do deformacji pocisku i rozpraszania energii kinetycznej. Żadna z próbek z warstwą ceramiki nie została przebita ani kulką stalową z działa helowego, ani pociskiem Parabellum. Ze względu na małe wymiary płytek ceramicznych powinny być one łączone w większe segmenty. Racjonalnym sposobem uzyskiwania większych segmentów jest przyklejanie płytek do tkanin, blach lub innego podłoża. Istotne jest ze względów na efektywność osłony, aby pojedynczy pocisk niszczył możliwie małą powierzchnię warstwy ceramicznej. Badania wykazały, że w wypadku jednostronnego klejenia płytek ceramicznych, uderzenie pociskiem kruszy jedną płytkę i jednocześnie powoduje oderwanie kilku sąsiednich. Wklejenie ceramicznych płytek między dwie cienkie blachy ze stopu aluminium tworzy strukturę przekładkową o zwiększonej sztywności na zginanie, czego wynikiem jest ograniczenie zniszczenia warstwy ceramicznej do pojedynczej płytki.

4. Wnioski

Przedstawione w artykule wyniki badań lekkich osłon balistycznych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wytypowane struktury klejone, złożone z cienkich warstw metalowych i tkanin aramidowych charakteryzują się mniejszą odpornością na przebicie odniesioną do ich gramatury, niż blach metalowych i tkanin, z których były wytwarzane.
2. Pakiety luźnych tkanin aramidowych wykazują większą odporność na przebicie w porównaniu z kompozytami polimerowymi wytworzonymi z takich samych tkanin.
3. Warstwy ceramiczne znacznie zwiększają odporność na przebicie osłon balistycznych, a ich stosowanie w takich osłonach wydaje się w pełni uzasadnione.
4. Wklejanie płytek ceramicznych pomiędzy dwie cienkie blachy ze stopu aluminium i niełączenie ich bezpośrednio z tkaninami aramidowymi przeciwdziała uszkodzeniom segmentów ceramicznych sąsiadujących z obszarem bezpośredniego oddziaływania udarowego pocisku.

Literatura

1. Arias A, López-Puente J, Navarro C, Zaera R. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering* 2005; 32: 321-336.
2. Atiq S, Boccaccini A R, Boccaccini D N, Dlouhy I, Kaya C. Fracture behaviour of mullitefibre reinforced–mullitematrix composites under quasi-static and ballistic impact loading. *Composites Science and Technology* 2005; 65: 325–333.
3. Bansal S, Krishnan K, Rajan S D, Sockalingam S. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact. *Composites: Part B* 2010; 41: 583–593
4. Bell W C, Grujicic M, Pandurangan B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems. *Materials and Design* 2012; 34: 808–819.
5. Bogetti T A, Cheeseman B A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite Structures* 2003; 61: 161–173.
6. Bogetti T A, Fink B K, Gama B A, et al. Aluminium foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures* 2001; 52: 381–395.
7. Bojar Z, Dolata-Groszc A, Formanek B, Józwiak S, Szczucka-Lasota B. Intermetallic alloys with oxide particles and technological concept for high loaded materials. *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL* 2005; 162:46-51.
8. Cheeseman B A, Grujicic M, Hea T, Pandurangana B, Randow C L, Yenb C F. Computational investigation of impact energy absorption capability of polyuria coatings via deformation-induced glass transition. *Materials Science and Engineering A* 2010; 527: 7741–7751.
9. Ching T W, Tan V B C. Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts. *International Journal of Impact Engineering* 2006; 32: 1737–1751.
10. Dekel E, Rosenberg Z. *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2012.
11. D'entremont B, Grujicic M, Pandurangan B. The role of adhesive in the ballistic/structural performance of ceramic/polymer–matrix composite hybrid armor. *Materials and Design* 2012; 41: 380–393.
12. Deshpande V S, Fleck N A, Karthikeyan K, Russell B P, Wadley H N G. The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates. *European Journal of Mechanics A/Solids* 2013; 42: 35-53.
13. Ekici B, Hartomacioglu S, Kilic N. Determination of penetration depth at high velocity impact using finite element method and artificial neural network tools. *Defence Technology* 2015: 1-13 (in press).

14. Falzon B G, Iannucci L, Yong M. Efficient modelling and optimisation of hybrid multilayered plates subject to ballistic impact, *International Journal of Impact Engineering* 2010; 37: 605–624.
15. Fernández-Fdz D, Zaera R. A new tool based on artificial neural networks for the design of lightweight ceramic–metal armour against high-velocity impact of solids. *International Journal of Solids and Structures* 2008, 45: 6369–6383.
16. Fragiadakis D, Gamache R M, Roland C M. Elastomer – steel laminate armor, *Composite Structures* 2010; 92: 1059–1064.
17. Hall I W, Tasdemirci A. Development of novel multilayer materials for impact applications: A combined numerical and experimental approach, *Materials and Design* 2009; 30: 1533–1541.
18. Hazell P J. *Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms*. Argos Press. Canberra 2006.
19. Javadpour G, Shokrieh M. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Compos. Struct* 2008; 82 (2): 269–276.
20. Mendis P, Mohotti D, Ngo T, Raman S N. Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. *Materials and Design* 2013; 52: 1–16.
21. Płonka B, Senderski J, Wiśniewski A, Witkowski Z. Wielowarstwowe metalowo-ceramiczne pasywne pancerze dla helikopterów i pojazdów specjalnych. *Problemy Techniki Uzbrojenia* 2011; 40: 57-64.
22. Sánchez-Gálvez V, Zaera R. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *Int. J. Impact Eng.* 1998; 21 (3): 133–148.
23. Wiśniewski A. *Pancerze — budowa, projektowanie i badanie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2001.