

Małgorzata SZYMICZEK
Instytut Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Politechnika Śląska
e-mail: malgorzata.szymiczek@polsl.pl

Dobór materiałów inżynierskich na lekkie osłony energochłonne

Streszczenie: *Celem pracy było opracowanie kryteriów oraz algorytmu doboru materiałów inżynierskich na lekkie osłony energochłonne pracujące czasem bardzo zróżnicowanych warunkach środowiskowych. W wielu obszarach zarówno cywilnych jak i militarnych występuje potrzeba ochrony zdrowia i życia ludzi przed zagrożeniami wynikającymi z uderzenia skupionym odłamkiem lub falą uderzeniową. Podstawowym elementem konstrukcyjnym pozwalającym na odpowiednie zabezpieczenie są powłoki energochłonne, zapobiegające przenoszeniu się zagrożeń do strefy chronionej. Wykorzystanie w tym celu lekkich, mobilnych osłon warstwowych pozwala na minimalizację zagrożenia. Nieduża waga i łatwość montażu daje możliwość szybkiej naprawy, nawet w warunkach poligonowych. Osłony takie składają się z kilku warstw spełniających odpowiednie zadania, a mianowicie podkładu kompozytowego, warstwy adhezyjnej oraz paneli ceramicznych. Racjonalny dobór cech konstrukcyjnych takich powłok wymaga określenia warunków zachodzących w stanie zagrożenia oraz sformułowania kryteriów efektywności zabezpieczenia.*

Słowa kluczowe: *osłony balistyczne, laminaty, aramid*

SELECTION OF ENGINEERING MATERIALS ON LIGHTWEIGHT ENERGY-INTENSIVE SHIELDS

Abstract: *The aim of the work was to develop the criteria and the algorithm of selection of engineering materials to light energy-intensive shield which are sometimes supposed to work in very diverse environmental conditions. In many areas, both civilian as and military ones there is a need to protect human life and health against the risks resulting from the hitting of concentrated splinter or a blast wave. The basic constructional element allowing for an adequate protection are energy-intensive shields, which prevent the transmission of risks to the protected zone. The application of this light mobile layered shields allow to minimize risk. Lower weight and ease of installation enable fast repairs, even in military range conditions. These devices consist of several layers that perform the proper roles, namely a composite undercoat, adhesive layer and ceramic panels. Rational selection of the constructional characteristics of such shields requires the determination of the conditions occurring in a state of emergency and to formulate the criteria for the protection effectiveness.*

Keywords: *ballistic shields, laminates, aramid*

WSTĘP

Poszukiwanie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych lekkich osłon energochłonnych jest uwarunkowane przede wszystkim ochroną zdrowia i życia ludzi wszędzie tam, gdzie eksploatacja urządzeń przemysłu energetycznego, wydobywczego, gospodarki morskiej itp., może powodować realne zagrożenie. Osobnym zagadnieniem, bardziej wymagającym, jest opracowanie systemu takich osłon dla przemysłu zbrojeniowego.

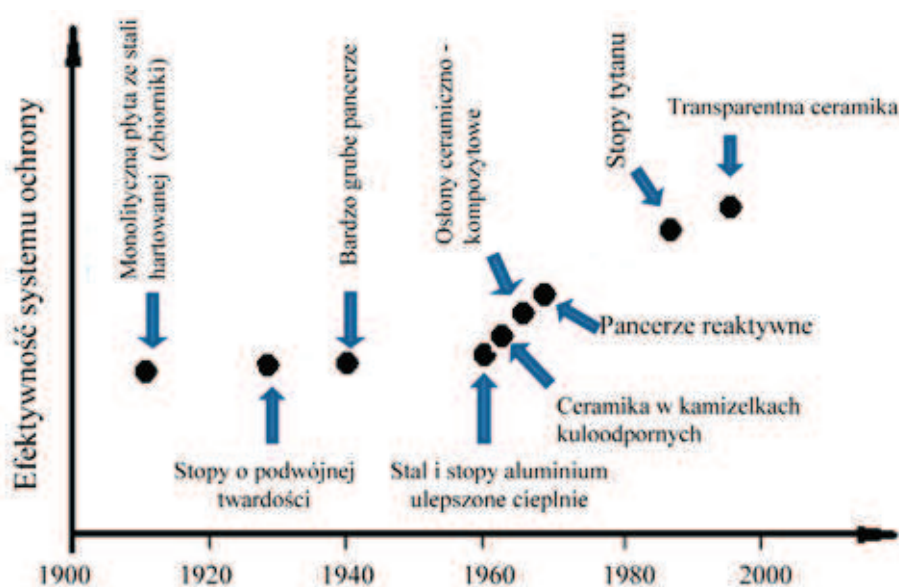
Zagrożenie militarne jest aspektem determinującym poszukiwanie materiałów zapewnia-

jących jak najwyższy poziom ochrony zdrowia i życia ludzi skalkulowane przez standardy NATO, a określone w procedurach zdefiniowanych przez STANAG [1]. Właściwy poziom ochrony załogi uzyskuje się przez stosowanie modułowych pancerzy i osłon dodatkowych, dobieranych i montowanych na pojeździe w zależności od rodzaju zagrożenia [2].

Głównym zadaniem projektowania lekkich warstwowych osłon energochłonnych jest wybór ich optymalnego rodzaju dla założonych warunków pracy. W większości stosowane są pancerze pasywne, pochłaniające energię kine-

tyczną uderzających pocisków lub odłamków. Druga grupa pancerzy tzw. pancerze reaktywne lub aktywne, przeznaczone są do ochrony przed pociskami o działaniu kumulacyjnym. Dotychczasowe lokalne konflikty zbrojne wygenerowały zagrożenia o coraz to większej skali zjawisk wpływających negatywnie na standardowe elementy opancerzenia. Na bazie tych doświadczeń przyjęto szereg koncepcji ewaluowania pancerza – Rys.1.

odporność na płomień, czy własności barierowe [5]. Osobnym zagadnieniem jest opracowanie odpowiedniego kształtu i struktury paneli ceramicznych, których głównym zadaniem jest defragmentacja pocisku. Działania te i rozwiązania konstrukcyjne mają jeden zasadniczy cel ochronę zdrowia i życia załogi pracującej w obszarze zagrożeń cywilnych (np. wybuchy na platformach wiertniczych, w kamieniołomach) i militarnych (np. zminimalizować penetrację pancerza).



Rys. 1. Rozwój i ewaluacja lekkich osłon energochłonnych [6]

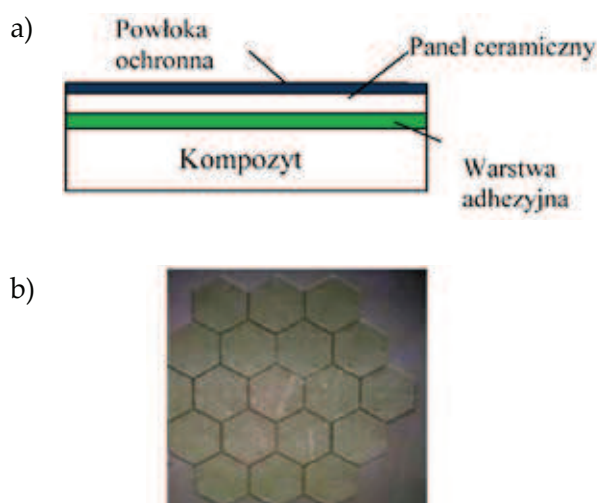
Fig. 1. The development and evaluation of lightweight energy-intensive shields [6]

Obecnie trwają prace nad zastosowaniem nanonapełniaczy jako środków poprawiających własności paneli kompozytowych. Wprowadzanie tego typu napełniaczy do żywic pozwala m.in. na zapewnienie odpowiedniej adhezji pomiędzy komponentami. Wykorzystywane tu nanonapełniacze węglowe [3,4] lub mineralne [4] dają możliwości podwyższenia wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe nawet o 30%, co spowodowane jest wnikiem nanocząstek w przestrzenie między włóknami elementarnymi [5]. Nanonapełniacze mineralne (np. montmoryllonit, haloizyt) zwiększają stabilność termiczną żywic,

MATERIAŁY NA LEKKIE OSŁONY ENERGOCHŁONNE

Istotą konstrukcji współczesnych pojazdów wojskowych jest optymalizacja wskaźnika mocy jednostkowej, co zwiększa jego mobilność i lepsza charakterystyki, w tym zdolność do przyspieszeń, a to wpływa na jakość konstrukcji [2,7]. W związku z poszukiwaniem rozwiązań gwarantujących zarówno wysoką ochronę życia załogi, jak i samego pojazdu na polu walki, rośnie zapotrzebowanie na rozwiązania wykorzystujące nowoczesne materiały, w szczególności ukie-

runkowane na zastosowania pozwalające znacznie ograniczyć wagę pojazdu. Wykorzystywanie do tego celu lekkich warstwowych osłon balistycznych (Rys. 2a) wydaje się być rozwiązaniem optymalnym, przy zastosowaniu odpowiednich rozwiązań konstrukcyjno – materiałowo – technologicznych.



Rys. 2. Schemat (a) oraz widok panelu (b) lekkiej osłony balistycznej

Fig. 2. Scheme (a) and view of panel (b) of the lightweight ballistic shields

Każda z wymienionych warstw powinna spełniać swoje zadania wynikające z uwarunkowań bojowych oraz środowiskowych. Dobór materiałów na poszczególne warstwy osłon balistycznych jest zadaniem trudnym i wymagającym wiedzy interdyscyplinarnej.

Ceramiczne panele redukują prędkość uderzającej masy oraz defragmentują pocisk. Warstwa ta, zatem absorbuje energię kinetyczną uderzenia przy fragmentacji pocisku, zmieniając tor wnikania pocisku podczas przebijania. Badania prowadzone przez [2,8] pozwoliły na opis przebiegu procesu wnikania pocisku uderzonego w pancierz z zewnętrzną warstwą ceramiczną. Proces taki składa się z trzech zasadniczych faz, tj. fragmentacji, podczas której następuje zaabsorbowanie około 35% energii kinetycznej, erozji (pochłania około 50% energii kinetycznej). W ostatniej fazie odłamki poci-

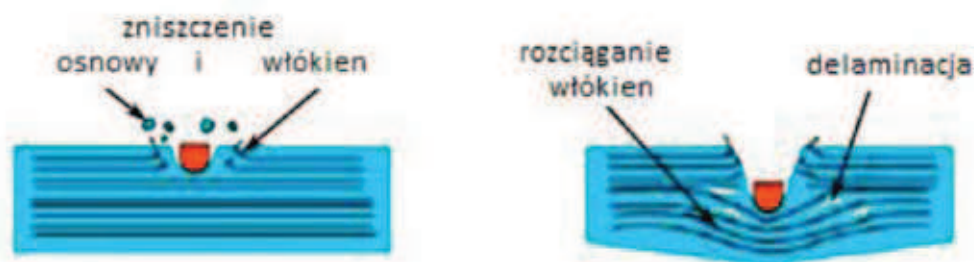
sku wnikające w płytę ceramiczną mają energię na poziomie 15%. Energia kinetyczna pocisku może być absorbowana poprzez odkształcenie plastyczne lub proces pęknięcia materiału.

Ceramika występuje w postaci kształtek wypalanych z zagęszczonych wstępnie proszków korundu, węglików krzemu lub boru, a także z intermetali. Wykorzystanie nanoceramiki pozwala dodatkowo obniżyć masę panelu nawet do 47% [6]. Innowacyjne tworzywa ceramiczne o gradientowych właściwościach twardości pozwalają na ograniczoną zdolność do pęknięcia objętościowego. Zmiana kierunku pęknięcia powoduje zmianę mechanizmu pęknięcia, co przejawia się w większej odporności na działanie różnego rodzaju odłamków. Ceramika, stosowana na osłony balistyczne powinna charakteryzować się określoną mikrostrukturą ze stałą wielkością ziarna w połączeniu wysokim stopniem homogenizacji. Z punktu widzenia funkcji ochronnych, istotne są jak najwyższe wartości twardości, modułu sprężystości, odporności na kruche pęknięcie, prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej.

Kompozytowa warstwa podkładowa ma za zadanie zaabsorbowanie fragmentujących elementów rozpadającego się pocisku o zmniejszonej masie i prędkości oraz dyssypację energii uderzenia. Podczas penetracji pocisku, w osłonie występuje złożony stan naprężenia. Przebijany materiał poddawany jest ścinaniu, rozciąganiu, ścisnaniu oraz skręcaniu wywołanego ruchem obrotowym pocisku [9]. Uderzenie pocisku powoduje dwufazowe niszczenie podkładu kompozytowego. W pierwszej kolejności pocisk o dużej prędkości i energii uderza w kompozyt powodując zniszczenie włókien i osnowy w warstwach wierzchnich (Rys.3a). Następnie zaś, w miarę zmniejszania się prędkości pocisku, część energii zostaje zużyta na zniszczenie (ścianienie) osnowy, a włókna znajdujące się pod miejscem koncentracji energii uderzenia, podlegają rozciąganiu – Rys. 3b. Następuje delaminacja. Rozciąganie oznacza duży stopień absorpcji energii kinetycznej pocisku. W takim ujęciu

zwiększenie zdolności ochronnych uzyska się przez zmniejszenie grubości laminatu oraz optymalizację sztywności i zastosowanie włókien i osnowy o odpowiednio wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i wydłużeniu [2].

od progu energii powodującego zniszczenia włókna. Właściwości kompozytu uzależnione są od składu chemicznego osnowy, stopnia modyfikacji, rodzaju i jakości powierzchni włókien wzmacniających, technologii wyko-

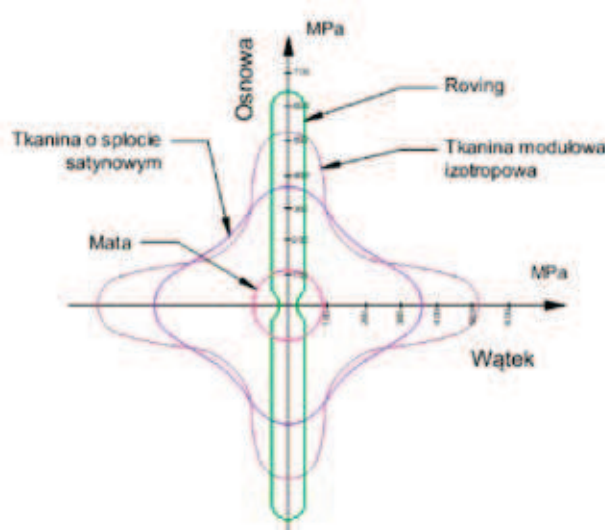


Rys. 3. Mechanizm dyssypacji energii uderzenia w procesie niszczenia kompozytu a) faza I – zniszczenie włókien i osnowy, b) faza II – delaminacja matrycy i rozciąganie włókien [7]

Fig. 3. The mechanism of energy dissipation impact in the process of destruction of the composite a) Phase I – destruction of the fibers and the matrix, b) Phase II – delamination matrix and tensile the fiber [7]

Wewnątrz pojedynczej warstwy, obciążenie udarowe powoduje przekroczenie wytrzymałości osnowy w postaci ścinania oraz zginania. Na granicy poszczególnych warstw zauważa się inicjowanie delaminacji. Poziom energii, który inicjuje zjawisko rozwarstwiania się laminatu, jest znacznie niższy

nania i utwardzania kompozytu oraz ilości wad powierzchniowych włókien i nieciągłości kompozytu, a także postaci geometrycznej wzmocnienia – Rys. 4 [10,11]. Badania prowadzone przez Bless'a i Hartman'a [12] wykazały liniową zależność pomiędzy prędkością penetracji pocisku a zawartością włókien.



Rys. 4. Kierunkowa wytrzymałość laminatu z różnym wzmocnieniem szklanym [10]

Fig. 4. The directional strength of the laminate with different glass reinforcement [10]

Osnową kompozytów polimerowych wykorzystywanych w tego typu aplikacjach są modyfikowane żywice epoksydowe lub fenolowo – epoksydowe. Żywice fenolowe odznaczają się wyższymi charakterystykami niż epoksydowe (tabela 1.) problemem jest jednak sposób utwardzania.

na zerwanie przy pełzaniu nawet przy naprężeniach rzędu 70% granicy wytrzymałości na rozciąganie. Problemem jest jednak wytrzymałość na ściskanie, szczególnie w przypadku aplikacji na osłony balistyczne, co rozwiązuje się przez układy hybrydowe (np. z włóknem węglowym). Z punktu widzenia zastosowań militarnych pod-

Tabela 1.

Wybrane własności przykładowych żywic stosowanych na osnowy [11,13]

Rodzaj żywicy	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wydłużenie [%]	Skurcz liniowy [%]	Temperatura ugięcia pod obciążeniem – HDT [°C]
Epoksydowe	40 – 140	3	1 – 5 (10)	< 2	130 – 180
Fenolowe	27 – 65	8–12	1 – 3	0,10 – 1,10	140 – 200

Wzmocnienie kompozytu w tego typu aplikacjach, jest wykonane z włókien o zwiększonej odkształcalności. Włókna te charakteryzują się niską gęstością oraz wysoką wytrzymałością na rozciąganie i absorpcją energii uderzenia. Najczęściej wykorzystywanymi włóknami w osłonach balistycznych są włókna aramidowe (Kevlar®, Twaron®), szklane wykonane ze szkła typu S. Ze względu na stosunkowo niską odporność termiczną włókna z polietylenowe (Dyneema®, Spectra®) nie spełniają w pełni wymagań z uwagi na niską odporność termiczną. Włókna z poli(p-fenyleno-2,6-benzobisoksazolu) – Zylon® są stosunkowo nowym materiałem wzmacniającym o prawie dwukrotnie wyższej wytrzymałości na rozciąganie niż włókna aramidowe. W 1999 roku opatentowano w laboratorium Akzo Nobel włókna (poli[2,6-[(4,5-b:4',5')diimidazolo] pirydynyleno-2,5-dihydroksy-1,4-fenylen] – tzw. M5. Włókno to charakteryzuje się kowalencyjnymi wiązaniami w łańcuchu głównym, ale dodatkowo tworzy przestrzenną sieć wykorzystując wiązania wodorowe. Taka struktura daje znacznie wyższe własności wytrzymałościowe.

Włókna aramidowe charakteryzują się dużą sztywnością, wysoką wytrzymałością na rozciąganie i zginanie, a także opornością zmęczeniową. W porównaniu do innych włókien np. szklanych, Kevlar odznacza się mniejszą podatnością

kreślić należy, iż włókna te cechują się stosunkowo wysoką odpornością na ścieranie, dużą energią zniszczenia, ponadto są stabilne termicznie i odporne chemicznie, z wyjątkiem mocnych kwasów organicznych i zasad.

Wzmocnienie ze zorientowanych włókien z polietylenu o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej charakteryzuje się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi. Jest to wynikiem możliwie największej długości każdej z pojedynczych molekuł. Dzięki temu też włókno może osiągnąć równoległą orientację powyżej 95%, a poziom krystaliczności ponad 85%. Daje to wytrzymałość 15-krotnie wyższą od stali i o ponad 40% wyższą niż Kevlar. Przykładem może tu być włókno Dyneema, które pomimo słabej odporności termicznej (temperatura topnienia około 150°C) jest wykorzystywane w osobistych osłonach balistycznych. Wykazują one wysoką odporność na wilgoć, większość chemikaliów, promienie UV i mikroorganizmy. W związku z wysoką absorpcją energii, Dyneema zapewnia ochronę przed wszystkimi głównymi zagrożeniami. Jego konstrukcja powoduje zwiększenie obszaru efektu deformacji tylnej powierzchni podkładu i zmniejszenie głębokości penetracji pocisku.

Zylon® charakteryzuje się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi, w tym doskonałą wytrzymałością na ścinanie, bardzo dobrą od-

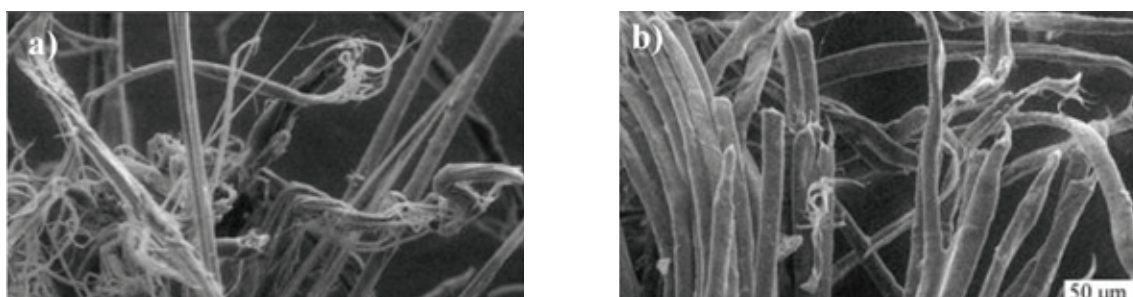
pornością na działania płomienia (palą się przy zawartości tlenu powyżej 68%). Proces degradacji termicznej rozpoczyna się w temperaturze powyżej 650°C, czyli około 100°C wyższej niż włókien aramidowych. Podstawową wadą włókien poli(p-fenyleno-2,6-benzobisoksazolu) jest ich niska odporność na działanie UV, co w przypadku aplikacji na lekkie osłony energochłonne znacznie obniża ich wartość, ale odznaczają się niskim współczynnikiem pochłaniania wilgoci (ok. 0,6%) Wykazują wysoką stabilność wymiarową nawet w warunkach wilgoci oraz odporność chemiczną.

Włókna M5 charakteryzują się bardzo dobrą zwilżalnością, co w sposób istotny wpływa na własności kompozytu. Odznaczają się bardzo wysokimi własnościami wytrzymałościowymi oraz użytkowymi. Są odporne na działanie wody,

kwasów, promieniowania UV oraz oddziaływanie płomienia. Na rysunku 5 przedstawiono obrazy zniszczenia kompozytów wzmocnionych włóknem M5 (a) oraz Zylon® (b) w miejscu uderzenia pocisku.

Włókna szklane S2, wytwarzane ze szkła o większej zawartości krzemionki, w porównaniu do włókien typu E, charakteryzują się znacznie wyższym modułem sprężystości, wytrzymałością na rozciąganie, wydłużeniem przy zerwaniu. Przekłada się to na wyższą energię potencjalną. Są odporne na warunki użytkowania (środki chemiczne, ogień, UV). Istotną zaletą włókien S2 jest cena oraz fakt, że są niewidoczne dla radarów [14].

Porównanie własności włókien wzmacniających wykorzystywanych do wytwarzania lekkich osłon balistycznych przedstawiono w tabeli 2



Rys. 5. Widok zniszczenia kompozytu wzmocnionego włóknem M5 (a) oraz Zylon® (b) podczas uderzenia pociskiem balistycznym [12]

Fig. 5. View the destruction of composite reinforced fiber M5 (a) and Zylon® (b) during the impact ballistic missile [12]

Tabela 2.

Wybrane własności przykładowych włókien wzmacniających [10,12,14]

Rodzaj włókna	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wydłużenie [%]	Temperatura [°C]
Szklane E	2,58	3500	73	1,5 – 4	620
Szklane S2	2,46	4500	86		800
Kevlar 29*	1,44	2900–3600	70	2,3 – 4	200
Kevlar 49*	1,44	3000–3600	112		200
Kevlar 149*	1,47	3450	180		420
Dyneema SK78	0,97	3300 – 3900	109 – 132	4 – 5	100
Dyneema SK65	0,97	2400 – 3500	65 – 125		
Spectra 1000	0,97	3000	75	2,0	
Zylon AS	1,56	5800	180	3,5	600
Zylon HM	1,56	5800	270	2,5	
M5	1,7	2500 – 9500	350 – 400	1,5 -2,2	-

Połączenie ceramiki i panelu kompozytowego jest możliwe dzięki adhezyjnej warstwie łączącej, której zasadniczym zadaniem jest zapewnienie odpowiedniej, wymaganej współpracy pomiędzy tymi elementami. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu odpowiedniego rodzaju warstwy wiążącej (np. kleju, elastomeru), który pozwoli m.in. na efektywną szybką naprawę w warunkach poligonowych. Całość osłony zabezpiecza się zewnętrzną elastyczną powłoką ochronną, posiadającą elementy zakłócające fale elektromagnetyczne. Zadaniem tej powłoki jest minimalizacja bądź całkowita eliminacja odprysku odłamków ceramicznych.

Kluczowym zadaniem procesu projektowania jest dobór poszczególnych elementów składowych (warstw) lekkiej osłony balistycznej przy uwzględnieniu środowiskowych warunków użytkowania i obciążeń występujących w strefach zagrożeń.

DOBÓR MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH NA LEKKIE OSŁONY ENERGOCHŁONNE

Osłony energochłonne wykorzystywane w przemyśle zbrojeniowym powinny charakteryzować się wysoką ochroną balistyczną wg standardu STANAG 4569 aneks 5 oraz zachowa-



Rys. 6. Algorytm doboru materiałów na lekkie osłony energochłonne

Fig. 6. The algorithm of selection materials on lightweight energy-intensive shields

niem założonych parametrów eksploatacyjnych z jednoczesnym ograniczeniem masy osłony [1,2]. Wymagania te podyktowane są przez charakter współczesnych działań bojowych związanych z udziałem m.in. w misjach stabilizacyjnych w różnych częściach świata.

Do podstawowych elementów konstrukcyjnych znajdujących zastosowanie w zabezpieczających systemach osłonowych należą powłoki energochłonne, posiadające zdolności osłonowe, to znaczy zapobiegające przenoszeniu się groźnych procesów do strefy chronionej. Racjonalny dobór cech konstrukcyjnych takich powłok wymaga określenia warunków zachodzących w stanie zagrożenia oraz sformułowania kryteriów efektywności zabezpieczenia.

Osłony energochłonne powinny się charakteryzować:

- zdolnością ochronną – odporność na przebicie
- kwasoodpornością,
- odłamkoodpornością,
- odpornością na działanie powietrznej fali uderzeniowej,
- odpornością pancerza na cięcie i klucie,
- odpornością eksploatacyjną pancerza [1,17–19].

Definiowane tzw. efektywności masową i grubości, określane odpowiednio przez stosunek masy i grubości innowacyjnych układów warstwowych osłon balistycznych do pancerzy stalowych przy zachowanej zdolności ochronnej jest podstawowym kryterium optymalizacyjnym.

Wynika stąd, że odpowiednie opracowanie kryteriów doboru materiałów na warstwowe osłony balistyczne jest zadaniem skomplikowanym i powinno być indywidualnie rozpatrywane dla danych zagrożeń, możliwości aplikacji oraz środowiska pracy. Algorytm doboru materiałów inżynierskich na poszczególne warstwy osłony balistycznej przedstawiono na rys.6.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:

- Dobór materiałów inżynierskich na poszczególne warstwy lekkich osłon energochłonnych powinien uwzględniać warunki przenoszonych obciążeń oraz środowiska pracy. Warunki użytkowania są szczególnie istotne dla materiałów polimerowych.
- Opracowanie konstrukcji osłony jest zdeterminowane przede wszystkim zaprojektowaniem optymalnego, zapewniającego wymaganą adhezję układu panel ceramiczny – podkład kompozytowy. Jest to istotny czynnik zapewniający monolityczność osłony.
- Konstrukcja i dobór materiałów na poszczególne warstwy lekkiej osłony energochłonnej jest zadaniem interdyscyplinarnym i wymaga szeregu badań eksperymentalnych uwzględniających specyfikę aplikacji osłon.

BIBLIOGRAFIA

1. STANAG 4569, Protection levels for logistic and light armoured vehicle occupants. NATO/PFP 1998,
2. Wiśniewski A.: Pancerze budowa, projektowanie i badanie. Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa 2001,
3. Wicks S. S., de Villoria R.G., Wardle B.L.: Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, Vol. 70, 2010, 20 – 28,
4. Norkhairunnisa M., Azhar A.B., Shyang C. W.: Effects of organo-montmorillonite on the mechanical and morphological properties of epoxy/glass fiber composites. *Polymer International*, Vol. 56, 4, 2007, 512–517,
5. Fan Z., Santare M.H., Advani S.G.: Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A*, Vol. 39, 3, 2008, 540–554,
6. Colombo P.: Ceramic armour: Design and defect mechanisms, *Advances in Applied Ceramics*, Money Publishing 2008, 107, 4, 232,
7. Jamrozik K.: Identyfikacja własności materiałów w balistyce końcowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013,
8. Materiały informacyjne firmy CeramTec: Ceramic Materials for light – weight Ceramic Polymer Amor Systems,

9. Jamroziak K., Kulisiewicz M., Bocian M., Przykłady zastosowań nieklasycznych modeli sprężysto – tłumiących w procesie uderzenia balistycznego. Modelowaniu Inżynierskie, Gliwice 2010,
10. Walczak K.: Criteria of decrease in mechanical resistance of spirally wound laminated tubes under internal pressure. Conference Proceedings of The Scientific Conference on the occasion of the 55th Anniversary of the Faculty of Mechanical Engineering, Gliwice 2000, 441–446,
11. Królikowski W.: Polimerowe kompozyty włókniste, PWN, Warszawa, 2012,
12. Bless S.J., Hartman R.D.: Ballistic penetration of S-2 glass laminates, 21st International SAMPE Technical Conference, 25–28.09.1989,
13. Ochelski S.: Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych. WNT, Warszawa, 2004,
14. Wesołowska M., Delczyk-Olejniczak B.: Włókna w balistyce – dziś i jutro, Techniczne Wyroby Włókiennicze, 2011, 41–50,
15. Fecko D., Lyle D., Gambert X.: Composite armor solutions for STANAG 4569,
16. Cunniff P.M., Auerbach M.A.: High performance “M5” fiber for ballistics / structural composites
17. PN-EN 1522, Okna, drzwi, żaluzje i zasłony. Kuloodporność. Wymagania i klasyfikacja. PKN, Warszawa 2000,
18. PN-EN 1523, Okna, drzwi, żaluzje i zasłony. Kuloodporność. Metody badań. PKN, Warszawa 2000,
19. PN-EN 1063, Szkło w budownictwie. Bezpieczne oszklenia. Badanie i klasyfikacja odporności na uderzenie pocisku. PKN, Warszawa 2002

Publikację przyjęto do druku 31-05-16