

mjr dr inż. Marek SZUDROWICZ *
ppłk dr inż. Krzysztof RUTYNA **
mjr dr inż. Krzysztof JAMROZIAK ***
* Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej
** Wojskowa Akademia Techniczna
*** Wyższa Szkoła Wojsk Lądowych

OSŁONY BALISTYCZNE – LAMINATY NA BAZIE TKANIN ARAMIDOWYCH

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat wynaleziono nowe i zmodyfikowano istniejące materiały, których włókna wykazują wysoką wytrzymałość. Są wśród nich włókna węglowe, szklane, włókna polimerowe, w tym nowe włókna aramidowe oraz włókna polietylenowe. Jako osłony balistyczne stosowane są one często jako pakiety luźnych tkanin lub w postaci laminatów. W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych odporności na przebicie laminatów wytworzonych na bazie tkanin z włókien aramidowych o różnej matrycy. Badania te obejmowały kuloodporność (pociski 9x19mm oraz 5,56mm) oraz odporność na przebicie odłamkami (granat RG42).

1. Wstęp

Energia kinetyczna pocisku jest jednym z głównych parametrów decydujących o wyborze materiału, który ma być użyty przy konstrukcji osłony. Dla małych energii uderzenia np. dla pocisków symulujących odłamki lub amunicji o małym kalibrze (o energii kinetycznej poniżej 700J) zastosowanie luźno złożonych (pakietów) tkanin z włókien wysokowytrzymałych jest wystarczające do zatrzymania pocisku. Zachowane zostaje małe odkształcenie tylnej strony osłony, co jest istotne przy produkcji osłon do ochrony osobistej np. w kamizelkach kuloodpornych. Dla laminatów na bazie włókien wysokowytrzymałych, przy małych prędkościach uderzenia, odporność na uderzenie wzrasta wraz ze wzrostem wytrzymałości włókien i wytrzymałości osnowy oraz odwrotnie proporcjonalnie do modułu sprężystości. Dla energii pocisków z zakresu 700–3000J, niektórzy badacze sugerują stosowanie laminatów wykonanych z włókien o wysokim module sprężystości i wytrzymałości, w osnowie polimerowej. Właściwości osłony w ujęciu makroskopowym są wtedy zbliżone do właściwości materiałów kruchych, ponieważ odkształcenie laminatu, w kierunku uderzenia, jest bardzo małe. Inni badacze sugerują wykorzystanie włókien o małym module sprężystości i dużym względnym wydłużeniu, w osnowie polimerowej. Takie laminaty mają tendencję do deformacji przed wystąpieniem perforacji tak, że energia pocisku jest rozpraszana częściowo także poprzez nadanie osłonie energii kinetycznej.

2. Wybór materiałów

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat wynaleziono nowe i zmodyfikowano istniejące materiały, których włókna wykazują wysoką wytrzymałość. Są wśród nich włókna węglowe, szklane, włókna polimerowe, w tym nowe włókna aramidowe oraz włókna polietylenowe (tabela 1).

Tabela 1. Podstawowe właściwości wybranych włókien wysokowytrzymałych

WŁÓKNA	GĘSTOŚĆ [g/cm ³]	MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI [GPa]	WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE [GPa]
T700 (węglowe)	1,80	228	4,83
T1000G (węglowe)	1,80	297	6,38
E – szkło	2,58	72	3,45
R – szkło	2,55	85	4,33
S2 – szkło	2,49	87	4,59
Hollex (szkło)	1,80	67	3,45
Kevlar 49	1,45	120	3,62
Kevlar 29	1,44	58	3,62
Twaron	1,44	80	3,15
Twaron HM	1,45	124	3,15
Technora	1,39	70	3,04
Spectra 900 (PE)	0,97	117	2,68
Spectra 1000 (PE)	0,97	173	3,12
Dyneema (PE)	0,97	87	2,70

Dobierając materiał do zastosowania jako osłony balistyczne należy przede wszystkim rozważyć zależność efektywności od kosztu. W tym celu istnieje potrzeba odpowiedzenia na pytanie, co dla danej aplikacji jest miarą efektywności.

Jeżeli miarą efektywności będzie tylko zapewnienie określonego poziomu ochrony to rozwiązaniem spełniającym w/w kryterium są nadal osłony metalowe np. stalowe. W przypadku laminatów są to laminaty z tkanin szklanych. Za tymi rozwiązaniami materiałowymi przemawia fakt łatwości ich montażu na pojazdach, zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz pojazdów. Materiały te mogą stanowić elementy konstrukcyjne pojazdów. Warunkiem użycia tych materiałów jest to, że nie stawia się dodatkowych wymagań dotyczących elastyczności osłony i obniżenia masy. Przy warunku, że osłona taka ma być elastyczna, łatwa w formowaniu, z laminatów szklanych należy zrezygnować.

Jeżeli miarą efektywności będzie zapewnienie poziomu ochrony przy jednoczesnym maksymalnym obniżeniu masy osłony to odpowiednimi są płyty balistyczne Spectra lub kompozyty SpectraShield. Są one jednak jednym z droższych rozwiązań.

W przypadku, gdy istnieje pewien margines ze względu na masę, najodpowiedniejszymi wydają się być tkaniny aramidowe. Na ich korzyść, oprócz właściwości, przemawia fakt ich dostępności na rynku europejskim i krajowym. Do dalszych badań przyjęto tkaninę aramidową o następujących właściwościach:

- gęstość powierzchniowa – 0,46kg/m²
- grubość – 0,6mm
- wytrzymałość na rozciąganie (próbka 50mm) - 14,0kN
- moduł Younga – 7,5 GPa

- odkształcenie przy max obciążeniu - 11mm
- naprężenie przy max obciążeniu - 500MPa
- splot płócienny
- gęstość nitek na 10cm – 66/66 (wątek/osnowa)
- 3360/3360dtex (wątek/osnowa)

W kompozytach wzmacnianych włóknami osnowa polimerowa pełni kilka funkcji. Przeciwdziała przesuwaniu się włókien i tworzy ośrodek, przez który zewnętrzne obciążenie jest przekazywane do włókien. Odpowiednia adhezja jest podstawą maksymalnego przekazywania obciążenia ze słabej osnowy do wysokowytrzymałych włókien. Osnowa powinna chronić włókna przed mechanicznym uszkodzeniem lub niekorzystnym wpływem substancji chemicznych. Takie oddziaływania mogą generować wady prowadzące do pękania, już dla niskich wartości naprężeń.

Przygotowano pięć rodzajów laminatów. Wszystkie z nich zawierały taką samą ilość tkanin, różniły się tylko rodzajem osnowy. Podstawowe właściwości laminatów zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie właściwości wytrzymałościowych badanych laminatów.

	Laminat E	Laminat S	Laminat N1	Laminat N2	Laminat N3
grubość [mm]	4,7	4,8	4,65	5,5	5
gęstość powierzchniowa [kg/m ²]	5,9	4,9	5,2	5,5	5,3
gęstość [g/cm ³]	1,255	1,020	1,118	1,000	1,06
udział włókien w laminacie [%]	62,4	75,1	70,8	66,9	69,4
wytrzymałość na rozciąganie [kN] (wg. ASTM D638-99 pr. typ1)	19,6 sigma 0,5	10,0 sigma 0,28	19,3 sigma 0,95	21,9 sigma 0,262	22,9 sigma 0,533
moduł Younga [MPa]	12255 sigma 184,8	4271 sigma 387	7458 sigma 894	7060 sigma 113	6836 sigma 209
wydłużenie przy max obciążeniu [mm]	3,9	7,7	10,24	7,6	7
naprężenie przy max obciążeniu [MPa]	273,9 sigma 6,99	149,3 sigma 2,85	303,4 sigma 14,9	301,4 sigma 3,6	352,5 sigma 8,2
wytrzymałość na rozdieranie [kN] (szer. próbki 50mm, odcinek pom. 100mm)	-	0,008 sigma 0,003	0,0893 sigma 0,01	0,084 sigma 0,04	0,115 sigma 0,02
wytrzymałość na ścinanie [kN] (próbka o pow. 25x25mm)	-	0,165 sigma 0,04	1,42 sigma 0,27	1,86 sigma 0,23	2,85 sigma 0,7

3. Badania kuloodporności

W pierwszym etapie do laminatów oddano po trzy strzały. Użyto pocisków 9x19mm Parabellum, wystrzelianych z broni PM84 z odległości 3m. Laminat E został przeбитo (rys.1), pozostałe laminaty były odporne na przebicie.



Rys. 1. Laminat E. Po lewej strona frontowa, po prawej tył laminatu.

W kolejnym etapie badań przygotowano próbki laminatów S, N1, N2, N3. Zrezygnowano z dalszych badań laminatu E.

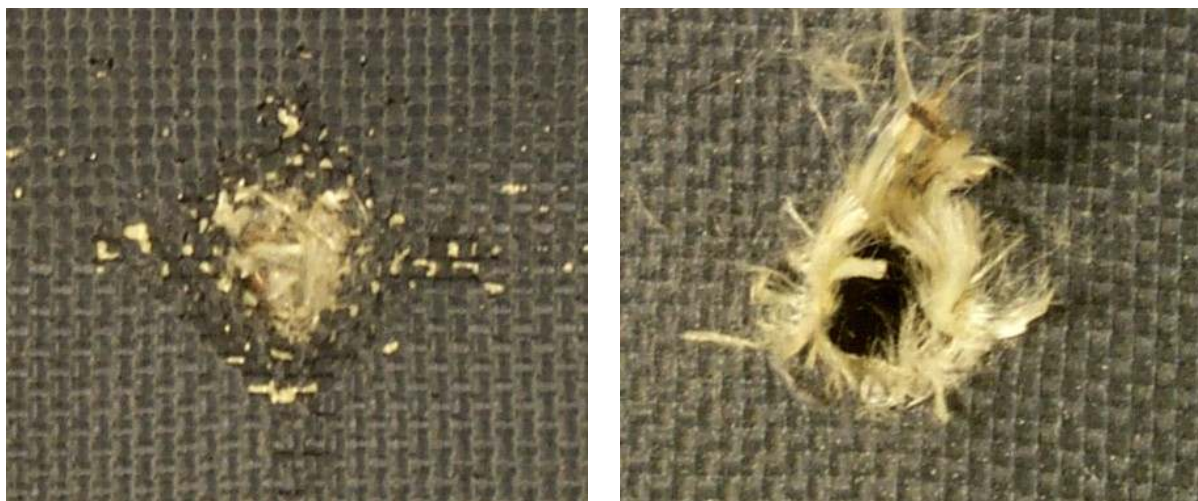
Przygotowano po trzy próbki z każdego rodzaju laminatów, które zostały przyklejone do stalowej blachy karoseryjnej o grubości 0,55mm. Tak przygotowane próbki były zaciskane w uchwycie – dwie ramki stalowe skręcane po obwodzie śrubami. Uchwyt zaciskał próbkę równomiernie na całym obwodzie próbki. Do tak przygotowanych próbek oddawano po jednym strzale, w środek próbki, z odległości 3m.

Przyklejenie laminatów do cienkich blach stalowych miało na celu umożliwienie określenia wielkości deformacji laminatów. Po badaniach mierzona była wielkość ugięcia blachy stalowej. Powierzchnię odniesienia przy pomiarach stanowiły fragmenty blachy zaciśnięte w uchwycie. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów ugięcia.

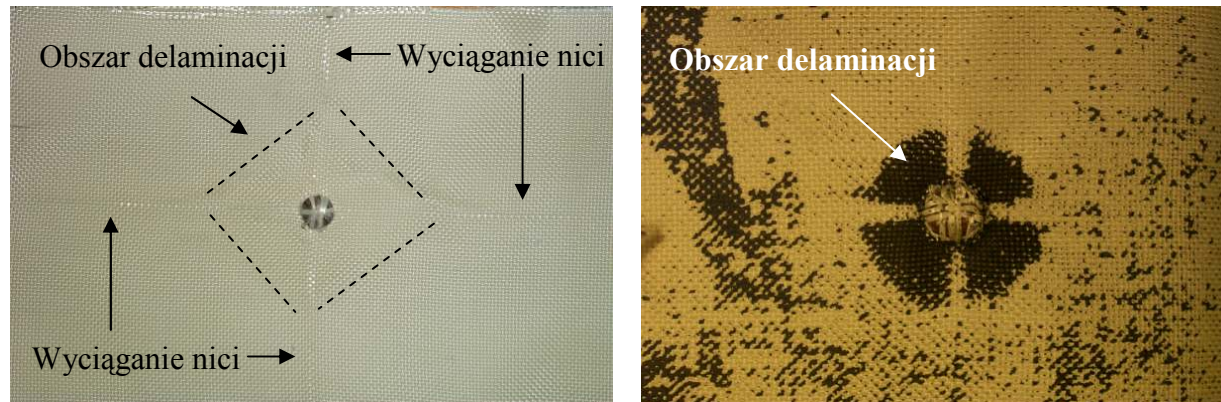
Rodzaj laminatu	Prędkość pocisków [m/s]	numer próbki	ugięcie blachy [mm]	wartość średnia
S	353	1	blachy zostały rozerwane i mocno odkształcone	
	348	2		
	357	3		
N1	366	1	26,2	28,3 sigma 1,9
	352	2	28,7	
	352	3	29,9	
N2	352	1	29,8	29,8 sigma 0,8
	356	2	30,5	
	356	3	29,0	
N3	360	1	26,3	27,2 sigma 0,9
	359	2	28,0	
	360	3	27,2	

Można zauważyć, że penetracja laminatów przebiega dwuetapowo. W początkowej fazie mamy do czynienia z mechanizmami charakterystycznymi dla uderzenia z dużą prędkością tj. ścinaniem i zrywaniem włókien (rys.2).



a) b)
Rys.2. Druga warstwa tkanin w laminatach N1 (a) i N2 (b) – ścinanie i zrywanie włókien.

Następuje deformacja pocisku i zmniejszanie jego prędkości. W drugim etapie, decydującą rolę w rozpraszaniu energii pocisku zaczyna odgrywać delaminacja. Powierzchnia utraty połączenia osnowy i tkaniny powiększa się. Dla laminatów o małej adhezji tkanin, laminaty S, delaminacja jest największa, widoczne jest ciągnięcie nici w kierunkach wątku i osnowy tkaniny (rys. 3). Odształcenie tych laminatów jest największe. W laminatach serii N nie zauważalne jest wyciąganie nici z tkanin (rys. 3).



Rys.3. Piąta tkanina w laminacie S i czwarta tkanina w laminacie N1.


W kolejnym etapie badań było sprawdzenie odporności laminatów na przebicie pociskami z rdzeniem stalowym. Do badań wybrano pocisk 5,56mm FMJ (tabela 4).

W celu sprawdzenia odporności poszczególnych rodzajów laminatów na przebicie pociskami 5,56mm FMJ przeprowadzono badania kuloodporności dla laminatów o różnych grubościach. Przyjęto następującą zasadę przygotowania próbek do badań.

Grubość laminatów, dla której rozpoczęto badania, była sumą grubości sklejonych sześciu pojedynczych laminatów o formacie 250x300, co dawało grubość wyjściową około 30mm i gęstość powierzchniową około 30kg/m². Do klejenia użyto materiałów osnowy. Następnie zwiększano ilość pojedynczych laminatów, aż do osiągnięcia braku przebicia lub otrzymania ciężaru laminatu, powstałego po sklejeniu, około 50kg na 1m² (odpowiadało to sklejeniu dziesięciu pojedynczych

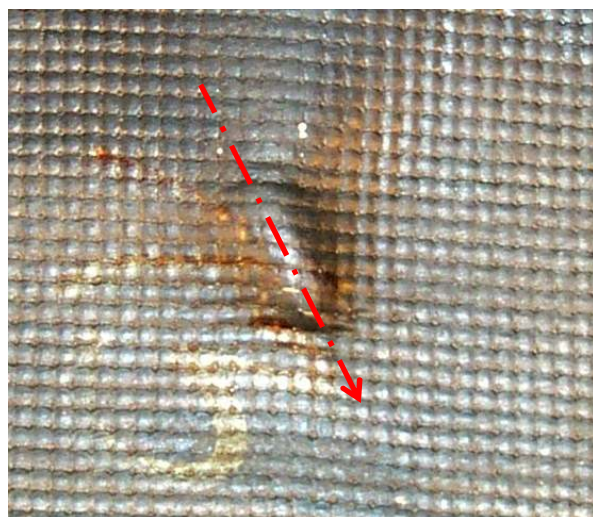
laminatów). Ograniczenie to wynikało z faktu, że pocisk 5,56mm FMJ przy danych warunkach badań zatrzymywany jest przez stalową blachę pancerną o grubości 6mm. Masa 1m² tej blachy wynosi 47kg, dlatego badanie laminatów, których masa przekraczała masę blachy było nieekonomiczne z punktu wyboru osłon do ochrony pojazdów.

Tabela 4.

Warunki Badań	Przekrój pocisku 5,56mm FMJ
<ul style="list-style-type: none"> - strzał prostopadły, - odległość: 30m, - kaliber: 5,56mm, - waga pocisku: 4g, - rdzeń: stalowo – ołowiany, - prędkość: 900m/s ± 20m/s. 	 <p style="text-align: center;"> rdzeń ołowiany rdzeń stalowy płaszcz </p>

Laminaty S zostały przebite dla wszystkich badanych grubości. Dla najgrubszego wariantu, pociski nieznacznie zmieniały kierunek w laminacie, miejsce trafienia i miejsce wyjścia pocisków z próbek laminatów nie leżą na prostej prostopadłej do laminatu. Włókna niszczone są przede wszystkim w wyniku ścinania, ponadto pociski, zwłaszcza w początkowej fazie, prześlizgują się pomiędzy nićmi.

Dla próbek z laminatu N1 pociski zostały zatrzymane w 10-tym pojedynczym laminacie. Głównym mechanizmem penetracji laminatu jest rozsuwanie nici przez pociski i ścinanie włókien. Ponieważ poszczególne nici w tych laminatach nie rozsuwały się tak łatwo jak w laminacie S, poszczególne warstwy tkanin stawiały większy opór pociskom, co powodowało zmianę toru pocisków. W rezultacie następowała zmiana toru o kąt 90⁰ (rys.4).



Rys. 4. Tylna strona układu 10-ciu laminatów N1 – rdzeń stalowy zatrzymany pomiędzy tkaninami.

W układach z laminatów N2 rdzeń stalowy pocisków zatrzymywany był pomiędzy 7 i 8 laminatem lub wewnątrz ósmego laminatu. Mechanizmy niszczenia laminatu są podobne jak dla laminatów opisanych powyżej jednak w końcowej fazie penetracji widoczne jest dodatkowo niszczenie włókien na drodze rozciągania i

zrywania. Większa siła adhezji pomiędzy tkaninami powodowała, że pociski szybciej zmieniały swój tor ruchu o 90° (rys. 5).



Rys. 5. Tylna strona 7-go w układzie laminatu N2.

Dla układów z laminatów N3 uzyskano wyniki analogiczne jak dla laminatów N2. Rdzeń pocisków zatrzymywany był pomiędzy tkaninami najwyżej 8-go pojedynczego laminatu (rys. 6).



Rys. 6. Ósmy w układzie pojedynczy laminat N3

Dla wszystkich próbek prędkość pocisków była większa od 900m/s – wynosiła średnio 921m/s (sigma 6,0).

Ogólnie można stwierdzić, że nie następuje odkształcenie rdzenia stalowego. W miarę postępującej penetracji układu laminatów, z pocisków usuwany jest płaszcz oraz ołowiana część rdzenia. W końcowej fazie pozostaje tylko rdzeń stalowy. Dominującym mechanizmem niszczenia poszczególnych warstw laminatu jest ścinanie włókien. Delaminacja praktycznie nie występuje. Ponadto pociski, w początkowej fazie przebijania, rozsuwają poszczególne nici. Zatrzymanie pocisków w laminacie należy wiązać ze stopniową zmianą toru ruchu pocisków. Należy przypuszczać, że w miarę wzrostu kąta odchylenia toru ruchu pocisków w laminacie, spadek ich prędkości jest większy. Wszystkie pociski zatrzymane w laminacie znajdowały się pomiędzy tkaninami ułożone równolegle do nich. We wszystkich

przypadkach odległość od punktu, w którym zatrzymał się pocisk, a miejscem przebicia ostatniej tkaniny był kilkakrotnie większy od długości rdzenia.

Podsumowując opisane etapy badań kuloodporności pociskami 9x19 Parabellum i 5,56mm FMJ można stwierdzić, że same laminaty nie są dobrą osłoną balistyczną przed pociskami z rdzeniem stalowym, z racji tego, że ich masa jest zbliżona do masy blachy pancernej, a koszty produkcji wielokrotnie wyższe. Dla takich pocisków uzasadnione jest traktowanie laminatów jako warstwy wychwytyjącej stępione rdzenie pocisków lub ich odłamki i absorbującej pozostałą energię pocisków (spall-liner). W takich przypadkach warstwą frontową osłon powinien być materiał twardy, powodujący zniszczenie pocisku. Konstrukcja takich układów materiałowych – pancerze kompozytowe – jest zagadnieniem bardzo obszernym, ze względu chociażby na różnorodność materiałów i przypisywanych im funkcji w pancerzu, znacznie wykraczającym poza ramy niniejszego artykułu.

Dla pocisków z rdzeniem ołowianym laminaty na bazie tkanin aramidowych stanowią wystarczającą osłonę balistyczną.

Przypisanie takim laminatom funkcji spall-linera powodowało także potrzebę sprawdzenia ich odporności na odłamki granatów.

4. Badanie odporności na przebicie odłamkami granatów

W kolejnym etapie badań przeprowadzono badania odporności laminatów N3 na przebicie odłamkami granatu RG-42. Dodatkowo zbadano odporność blachy karoseryjnej o grubości 1,5mm oraz układów blacha – laminat. Podczas badań próbki umieszczone były w odległości 300mm nad detonowanym granatem.

Odłamki tego typu granatu są fragmentami taśmy stalowej o grubości około 1mm, o różnorodnym kształcie (rys. 7).



Rys.7. Frontowa strona laminatu N3.
Widoczny wbity odłamek granatu.

W przypadku uderzenia odłamka w laminat lub blachę bokiem, płaską powierzchnią, nie następuje przebicie, nawet zewnętrznej, pierwszej warstwy tkaniny w laminacie. Dla odłamków uderzających krawędzią występowało przebicie pojedynczego laminatu i blachy. Dla pozostałych przypadków uderzeń, w zależności od kąta uderzenia, odłamki zatrzymują się pomiędzy tkaninami. Niszczenie laminatu jest wynikiem ścinania i zrywania włókien.

Pojedyncza blacha oprócz występującego przebicia jest zdeformowana na całej powierzchni próbki (rys.8).



Rys.8. Frontowa i tylna strona blachy karoseryjnej 1,5mm.

Całkowitą ochronę uzyskano dla blachy stalowej (od strony wybuchu) z przyklejonym jednym laminatem i dla dwóch złożonych z sobą pojedynczych laminatów. W pierwszym przypadku blacha nie jest zdeformowana, występują tylko odkształcenia w miejscach uderzenia odłamków (rys.9).



Rys.9. Frontowa i tylna strona blachy w układzie z 1 laminatem.

Dla osłony złożonej z dwóch laminatów, tkaniny w drugim laminacie, nie są poprzecinane (rys.10).



Rys.10. Tylna strona pierwszego laminatu w układzie z 2 laminatami. Laminat przebiły nieliczne odłamki, które zostały zatrzymane w drugim laminacie.

5. Podsumowanie

W momencie uderzenia pocisku w materiał na bazie tkanin, taki jak np. laminat, w jego zatrzymywaniu uczestniczy duża ilość pojedynczych włókien. Rozciąganie i zrywanie włókien absorbuje energię pocisku. Ponadto rozciąganie włókien w

tkaninach przenosi energię pocisku do sąsiednich włókien i przez to rozprasza ją na dużą powierzchnię. Pocisk ulega odkształceniu i spłaszczeniu, co pochłania dodatkowe porcje energii. Mechanizm ten sprawdza się dla pocisków miękkich np. z rdzeniem ołowianym. Dla badanych laminatów podczas badań przy użyciu pocisku 9x19mm Parabellum, otrzymana wielkość ugięcia pojedynczych laminatów poniżej 30mm jest wynikiem, który spełnia wymagania, co do tego parametru np. w produkcji wkładów do kamizelek kuloodpornych, gdzie wymaganiem jest, aby wielkość odkształcenia była mniejsza od 40mm (efekt trauma).

Przy stosowaniu pocisków z rdzeniami stalowymi układy samych laminatów nie stanowią efektywnej skutecznej osłony, pociski mogą prześlizgiwać się pomiędzy splotami tkaniny. Rozwiązaniem tego problemu jest dodanie większej ilości warstw tkaniny, co powoduje zwiększenie masy układu, co jest nieekonomiczne ze względu na wysokie koszty laminatów względem stali, lub wykonanie osłon hybrydowych – pancerzy kompozytowych, z użyciem twardej warstwy frontowej, w których laminaty pełnią funkcję spall-linera. Przeprowadzone próby pozwoliły na uzyskanie pancerza kompozytowego odpornego na przebicie pociskami 5,56mm FMJ o gęstości powierzchniowej 31kg/m^2 .

Weryfikacja właściwości przeciwołamkowych przy użyciu granatów RG-42 wskazuje, że skuteczną ochroną jest laminat podwójny. Masa takiego laminatu wynosi około 10kg na 1m^2 , a grubość 10mm .

Możliwość regulacji sztywnością laminatów, poprzez dobór matrycy powoduje, że mogą one stanowić opancerzenie montowane wewnątrz pojazdów w postaci wykładzin podłogowych lub ściennych oraz na zewnątrz pojazdu jako pancerz dodatkowy.