

Dr inż. Marek Szudrowicz

Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej
Okuniewska 1, 05-070 Sulejówek, Polska
E-mail: marek.szudrowicz@witpis.eu

Kompozyt warstwowy zwiększający odporność samochodów patrolowych i interwencyjnych na atak improwizowanych ładunków wybuchowych (IED) od dołu

Słowa kluczowe: *kompozyty polimerowe, balistyka końcowa, odporność balistyczna, odłamek FSP 1,1 g, improwizowane ładunki wybuchowe*

Streszczenie:

Wykonano modelowe kompozyty warstwowe do budowy których wybrane zostały: żywica poliestrowa zbrojona warstwami tkanin z włókien szklanych i aramidowych. Tkaniny do badań dobrano w sposób umożliwiający porównanie odporności balistycznej w zależności od rodzaju materiału i gęstości. Dodatkowo do konstrukcji kompozytów użyto blachy aluminiowej.

Zbadano odporność wykonanych modeli kompozytów na przebicie pociskami symulującymi odłamek (FSP) o masie 1,1 g, ich podatność na deformację w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej czystych ładunków trotylu, odporność na detonację modelowych improwizowanych urządzeń wybuchowych IED, zawierające odłamki w postaci kulek żyzkowych.

Analiza i optymalizacja wyników badań eksperymentalnych pozwoliła dobrać układ warstwowy, będący kombinacją badanych materiałów, o najmniejszej gęstości powierzchniowej chroniący dno samochodów przed przebiciem w przypadku detonacji małego improwizowanego ładunku wybuchowego.

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie samochodów patrolowych i interwencyjnych w rejonie zagrożeń terrorystycznych obejmuje, m.in. takie działania jak:

- patrolowanie rejonów, w których istnieje zagrożenie ostrzałem oraz narażenie na oddziaływanie ładunków wybuchowych;
- działania interwencyjne, szczególnie w przypadkach zwalczania grup terrorystycznych;
- działania w misjach utrzymania pokoju, rozdzielenia walczących stron, a także w służbie przywracania i utrzymania porządku publicznego;
- transportowanie funkcjonariuszy i innych osób oraz ładunków wymagających szczególnej ochrony;
- przewożenie oraz zapewnienie funkcjonowania aparatury i urządzeń, przeznaczonej do wykonywania czynności zwiadowczych, rozpoznania i rejestracji.

W przypadku narażenia na detonację małych fragmentujących ładunków wybuchowych tj.: min przeciwpiechotnych, granatów ręcznych i ładunków improwizowanych, można wyodrębnić dwa główne rodzaje oddziaływań, których wystąpienie zagraża życiu i zdrowiu załogi. Należą do nich: uderzenie odłamków i oddziaływanie fali uderzeniowej. Wybuch pod samochodem jest przypadkiem najbardziej niekorzystnym. Mała odległość wybuchu (obecnie prześwity

w samochodach osobowo - terenowych wynoszą ok. 0,3÷0,5 m) powoduje, że odłamki uderzają w materiał podłogi obciążony wstępnie falą uderzeniową. Bardzo często nogi załogi, w tego typu samochodach umieszczone są bezpośrednio na podłodze, a fotele, na których siedzą, wykonane są z cienkich materiałów tekstylnych.

Wymagania, co do ochrony balistycznej samochodów powinny być rozważane równolegle z wymaganiami utrzymania ich mobilności [15]. Wskazuje to na potrzebę stosowania na osłony balistyczne, lekkich rozwiązań materiałowych. Z drugiej strony osłonom takim stawia się wymagania elementu konstrukcyjnego, chociażby ze względu na sposób ich montażu, co powoduje, że materiały powinny charakteryzować się określoną sztywnością i wytrzymałością. Wymagania wielofunkcyjności oraz niskich kosztów: produkcji, eksploatacji i utylizacji, stawiane są nowoczesnym materiałom przeznaczonym do zastosowań w technice samochodowej, w tym na osłony balistyczne samochodów specjalnych [9,10,11,25,29].

Założono opracowanie dodatkowej, samonośnej osłony balistycznej podłogi samochodów, mocowanej od zewnątrz, w celu nie dopuszczenia do przebicia podłogi bazowej. W obecnie eksploatowanych samochodach podłogi wykonane są głównie ze zwykłych blach stalowych, grubości 1÷1,5 mm. Nowe konstrukcje posiadają podłogę wykonaną z blach grubszych (ok. 3 mm). Ciężar osłony oraz jej grubość powinny, w przypadku osłony samonośnej, umożliwiać jej zastosowanie w nieopancerzonych samochodach typu: Land Rover, Toyota, Mercedes.

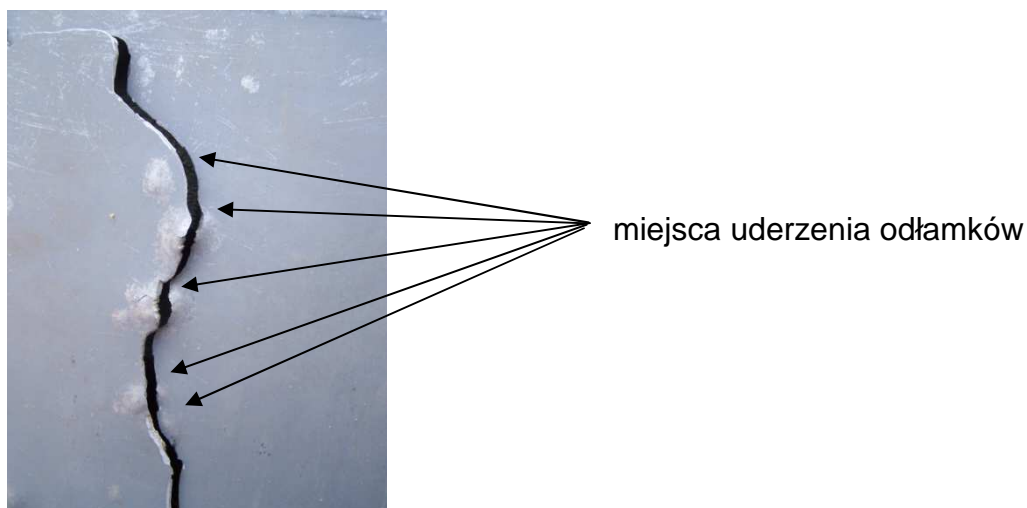
Założenia powyższe były wynikiem analizy uszkodzeń blach stalowych (używanych do produkcji podłóg samochodów – rys.1) przeprowadzonej po wstępnych testach odporności na detonację małych IED. Informacje o ich budowie i fakcie występowania uzyskano od funkcjonariuszy Samodzielnych Pododdziałów Antyterrorystycznych (SPAT). Analiza rozkładu masowego odłamków generowanych podczas detonacji granatów typu F1, min przeciwpiechotnych POMZ (Противопехотная Осколочная Мина Заграждения), IED typu bomby rurowej, wykazały, że statystycznie większość odłamków posiada masę około 1 g, odłamki o większej masie generowane są pojedynczo.

Dodatkowa osłona mocowana pod podłogą, zabezpieczy ją przed:

- deformacją w wyniku działania fali uderzeniowej,
- przebiciem odłamkami, poprzez wykonanie osłony, która nawet w przypadku jej przebicia, obniży energię kinetyczną odłamków na tyle, że nie dojdzie do perforacji materiału podłogi bazowej.

Założono również, że surowce stosowane do produkcji osłon powinny być dostępne i produkowane na terenie kraju.

Wśród lekkich materiałów do zastosowań w tego rodzaju osłonach balistycznych wymieniane są: wysokowytrzymała stal, stopy aluminium, stopy magnezu i tytanu, kompozyty z osnową metalową i polimerową [6,7,13,17,18,23,26].



Rys. 1. Pęknięcie blachy stalowej w wyniku jednoczesnego oddziaływania fali uderzeniowej i odłamków na materiał. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Kombinacja małej masy z bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi spowodowała, że kompozyty polimerowe zbrojone włóknami znalazły zastosowanie w wymagających aplikacjach konstrukcyjnych. Kompozyty łączą wytrzymałość i sztywność włókien zbrojenia z ochronnymi własnościami osnowy polimerowej, przenoszącej obciążenia pomiędzy włóknami [14,27].

Stosowane obecnie najszerzej materiały w kompozytowych osłonach balistycznych to głównie tkaniny z włókien szklanych, aramidowych i węglowych w połączeniu z osnową polimerową. Choć materiały te osobno nie stanowią dobrego materiału konstrukcyjnego, to w połączeniu z sobą ich własności przekraczają niejednokrotnie właściwości tradycyjnych materiałów metalowych [8,33,36,38].

Kompozyty warstwowe były badane w różnych warunkach obciążenia, w tym obciążenia falą uderzeniową. Zostało wykazane że dla kompozytów i materiałów monolitycznych o takiej samej gęstości powierzchniowej, odporność kompozytów jest wyższa [4,31,39,40,41].

Istnieje kilka typów włókien szklanych. Najbardziej popularnym są włókna typu E. Korzyściami wynikającymi z użycia tych włókien szklanych są ich wysoka wytrzymałość, dobra odporność chemiczna i termiczna, łatwość przetwórstwa i niska cena. Włókna węglowe są zbrojeniami stosowanymi w zaawansowanych kompozytach konstrukcyjnych ze względu na ich wysokie własności mechaniczne i niską masę. Są dostępne w kilku odmianach, pod względem własności, a klasyfikowane są głównie ze względu na moduł sprężystości (włókna o niskim module, średnim i wysokim). Włókna aramidowe charakteryzują się małą masą i bardzo wysoką wytrzymałością. Posiadają wysoką zdolność pochłaniania energii, co wyjaśnia ich szerokie wykorzystanie w aplikacjach takich jak wyroby odporne na uderzenia, w tym balistyczne. Dodatkową zaletą w aplikacjach jakimi są osłony balistyczne jest ich wysoka odporność na działanie ognia, należą do grupy materiałów samogasnących. Ze względu na ich stosunkowo niską wytrzymałość na ścinanie, do zastosowań specjalnych zaleca się stosować tkaniny hybrydowe (np. z włóknem szklanym). Zalecaną osnową dla kompozytów są żywice epoksydowe lub poliestrowe [19,21,37].

Kompozyty polimerowe są wrażliwe na obciążenia prostopadłe do powierzchni (a na takie narażone są osłony balistyczne), ponieważ ich własności mechaniczne w tym kierunku są znacznie mniejsze niż w płaszczyźnie warstwy [12,28,30].

Niszczenie tych kompozytów, zależy od:

- własności materiału wzmocnienia i osnowy,
- udziału, postaci i orientacji wzmocnienia,
- sił adhezji osnowy do wzmocnienia,
- energii udaru.

Ogólnie zdolność materiału do skutecznego przeciwdziałania uderzeniom balistycznym zależy od twardości materiałów, która jest krytyczna dla zjawiska deformacji pocisków, i odkształcenia, przy którym następuje zniszczenie materiału, ze względu na zdolność materiału do pochłaniania energii poprzez kruche pękanie, w przypadku ceramiki i kompozytów, oraz plastycznej deformacji, w przypadku niektórych metali [35].

Dla kompozytów, gdzie włókna zespolone są osnową polimerową, proces niszczenia kompozytu można podzielić na dwie fazy (rys. 3). Początkowo pocisk penetrując materiał powoduje jego niszczenie w wyniku ściskania i ścinania górnych warstw. W drugiej fazie, gdy prędkość penetrującego pocisku zmaleje, niszczenie materiału jest skutkiem procesu delaminacji i wyciągania włókien z osnowy w wyniku rozciągania [1,22,24,32].

Kompozyt, jako materiał anizotropowy przy oddziaływaniu udarowym, podlega złożonym stanom naprężeń i odkształceń. Ze względu na różnorodność kompozytów, ich nieograniczoną swobodę w doborze konfiguracji składników i złożony mechanizm niszczenia, zależnego od energii udaru, szacowanie, na podstawie istniejących hipotez cząstkowych, odporności na niszczenie, jest bardzo trudne [5,20].

W pracy [16] badano wpływ rodzaju zbrojenia i kolejności ułożenia warstw w kompozycie na tolerancję zniszczeń wywołanych udarami o małej prędkości. Określono odporność udarową za pomocą kryterium poudarowej wytrzymałości na ściskanie. Kryterium to można też określić mianem tolerancji zniszczeń spowodowanych przez udary o małej prędkości. Nie zaobserwowano dużych różnic w zakresie badanych własności wytrzymałościowych i tolerancji zniszczeń udarowych pomiędzy badanymi kompozytami węglowo-szklanymi, zatem przy wyborze jednego z tych materiałów decydujące znaczenie może mieć jego cena. Biorąc pod uwagę badane własności i cenę, kompozyty na bazie tkaniny aramid-szkło wykazują podobne zachowanie jak kompozyty zbrojone tkaniną szklaną i węglową.

Głównym powodem wykorzystywania kompozytów jest możliwość obniżenia ciężaru elementów konstrukcyjnych. Jednak wysokie własności wytrzymałościowe wiążą się z wysokimi kosztami produkcji. Dlatego obniżenie kosztów produkcji jest w chwili obecnej jednym z najważniejszych wyzwań w obszarze produkcji kompozytów polimerowych.

Dużą korzyścią stosowania jednokierunkowego układu włókien jest możliwość konstruowania kompozytów o dokładnie wymaganej ilości odpowiednio zorientowanych warstw. W porównaniu do tkanin tkanych, warstwy jednokierunkowe wykazują lepsze własności mechaniczne ze względu na brak wiązania (krępowania) poszczególnych włókien. Włókna jednokierunkowe do wykorzystania w kompozytach występują w dwóch postaciach. W postaci włókien ułożonych jednokierunkowo w warstwie, wstępnie impregnowanych żywicą powodującą zachowanie geometrii i układu arkusza (prepregi) oraz tkanin sklejanymi (np. elastomerami). Elementy z ułożonych prepregów są utwardzane w autoklawach. W wyniku zastosowania tej technologii otrzymuje się kompozyty o bardzo dobrych własnościach mechanicznych, przede wszystkim w płaszczyźnie kompozytu. Alternatywą do stosowania prepregów w produkcji kompozytów jest wykorzystanie do uzyskania zintegrowanej struktury

włókien techniki klejenia poszczególnych warstw [2,3,34].

Na podstawie oferty firm krajowych wybrano rodzaje materiałów charakteryzujące się odpornością na przebicie odłamkami i odpornością na zniszczenie w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej. Do materiałów tych należą kompozyty na bazie tkanin szklanych i tkanin aramidowych, blachy ze stopów aluminium, blachy ze stali pancernej (tabela 1).

Tabela 1. Materiały do badań.

Nazwa materiału	Oznaczenie materiału	gęstość powierzchniowa próbek [10^3 g/m ²]	
kompozyt szklany (żywica palna)	A	A1	10,4
		A2	16,2
		A3	21,0
kompozyt szklany (żywica z dodatkami uniepalniającymi)	B	B1	20,0
		B2	26,0
		B3	32,0
kompozyt aramidowy (klejenie elastomerami)	C	C1	5,0
		C2	10,0
		C3	15,0
kompozyt aramidowy (prepregi)	D	D1	4,4
		D2	10,4
		D3	16,3
Stop aluminium	E	E1	8,4
		E2	14,0
		E3	22,4
Blacha stalowa (pancerna)	F	F1	19,5
		F2	23,4
		F3	31,2
Blacha stalowa	G	G1	7,8
		G2	15,6
		G3	23,4

Używane w kraju w produkcji tkanin szklanych rowingi pokryte są czynną chemicznie preparacją, co umożliwia bezpośrednie stosowanie tkanin w produkcji kompozytów (bez dodatkowych operacji nanoszenia potrzebnych wykończeń powierzchniowych) przy zapewnieniu dobrej adhezji polimer-szkło. Produkowany asortyment tkanin obejmuje tkaniny zrównoważone i ukierunkowane. Do wytworzenia kompozytów użyto tkanin szklanych, jednokierunkowych, o gramaturze 500 g w sekwencji ułożenia [0,45]. Przy wyborze żywicy kierowano się osiągnięciem konkurencyjności cenowej wyrobu, dlatego do badań wybrano żywicę poliestrową Polimal i tą samą żywicę z dodatkami uniepalniającymi. Ze względu na dużą lepkość żywic z dodatkami, technologią wykonania kompozytów poliestrowo-szklanych było laminowanie ręczne. Ich gęstość wynosiła 1,8 g/cm³, wytrzymałość na rozciąganie 210 MPa, wydłużenie 10 %.

W kraju nie są produkowane tkaniny aramidowe. Na bazie jednokierunkowych tkanin importowanych, dwie firmy wykonują kompozyty aramidowe, wykorzystywane do produkcji osłon balistycznych (wkłady do kamizelek, hełmy, pancerze

kompozytowe). Każda z firm produkuje kompozyty inną technologią tj. prasowania prepregów i klejenia poszczególnych warstw tkanin elastomerami. Ich gęstość wynosiła $1,1 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 460 MPa , wydłużenie 40% .

Do badań wybrano różne grubości blach ze stopu aluminium, produkowanego w kraju, charakteryzującego się parametrami zbliżonymi do stopów zagranicznych, określanych jako balistyczne. Gęstość wynosiła $2,8 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 380 MPa , wydłużenie 14% .

Wybrana do badań blacha ze stali pancerniej charakteryzowała się gęstością $7,8 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałością na rozciąganie 1550 MPa , wydłużeniem 8% .

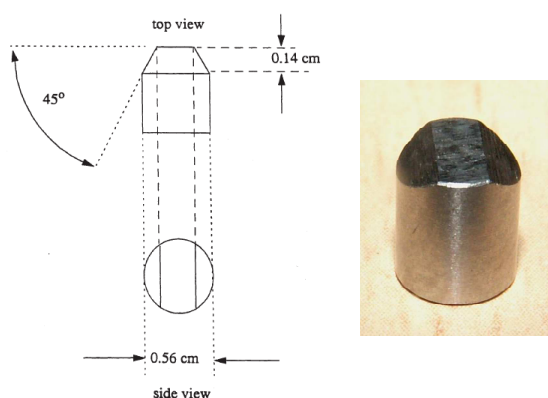
Dodatkowo do badań przygotowano kilka grubości blachy stalowej niskostopowej, jako materiał odniesienia. Gęstość wynosiła $7,8 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 395 MPa , wydłużenie 25% .

2. Badania stanowiskowe.

Podczas badań stanowiskowych przeprowadzono następujące testy:

- odporność na przebicie środkami bojowymi: granaty ręczne, miny przeciwpiechotne, małe IED (wybrane spośród rzeczywistych zagrożeń wg. informacji SPAT),
- odporność na przebicie materiałów z użyciem pocisku symulującego odłamek (FSP) o masie $1,1 \text{ g}$,
- podatność na deformację w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej,
- odporność na przebicie modelowymi IED.

W zakresie odłamkoodporności uznanym testem umożliwiającym porównywanie różnych materiałów, przede wszystkim ze względu na ich gęstość powierzchniową, jest wyznaczanie granicy balistycznej V50 pociskiem symulującym odłamek, o masie $1,1 \text{ g}$, w normach polskich określanych jako odłamek standardowy (rys. 2). Test ten jest opisany w polskiej normie PN-V-87000 „Osłony balistyczne lekkie. Kamizelki kulo- i odłamko odporne. Wymagania ogólne i badania”. Podstawowym dokumentem NATO zawierającym wymagania co do przeprowadzenia tego testu jest STANAG 2920 „Ballistic test method for personal armour”.



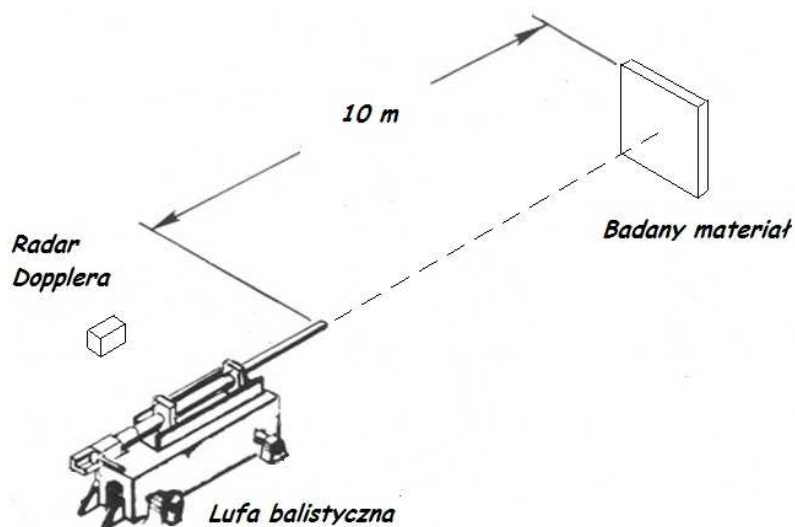
Rys. 2. Pocisk symulujący odłamek o masie $1,1 \text{ g}$. Źródło: STANAG 2920.

Granica balistyczna V50 wyznaczana jest jako średnia 6 prędkości uderzenia prostopadłego (trzech najniższych prędkości zakończonych całkowitym przebiciem i trzech najwyższych prędkości zakończonych częściowym przebiciem). W określaniu granic balistycznych dopuszcza się rozrzut pomiędzy najniższymi i najwyższymi prędkościami uderzenia FSP do 20 m/s . Tylko w przypadkach, gdy najniższa

prędkość zakończona całkowitym przebiciem jest niższa od najwyższej prędkości zakończonej częściowym przebiciem o ponad 20 m/s granice balistyczne oparte są na średniej wyciągniętej z 10 prędkości (5 najniższych prędkości zakończonych całkowitym przebiciem i 5 najwyższych prędkości zakończonych częściowym przebiciem). W tym przypadku zakres prędkości ograniczony jest do najniższego możliwego poziomu (jak najbliżej 20 m/s).

Testy V50 z użyciem pocisków symulujących odłamek o masie 1,1g posłużą głównie do porównywania odłamkoodporności poszczególnych warstw wchodzących w skład kompozytu, wykonanych z różnych materiałów.

Wykonano badania odłamkoodporności, z użyciem odłamka FSP o masie 1,1 g i wyznaczono charakterystyki przygotowanych materiałów. Schemat stanowiska do badań przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badań

Drugim testem wykorzystanym do wyboru materiałów była opracowana własna metoda badania odporności materiałów na deformację podczas wybuchu czystego ładunku 75 g trotylu (TNT), umieszczonego 250 mm pod badanym materiałem o wymiarach 500x500 mm.

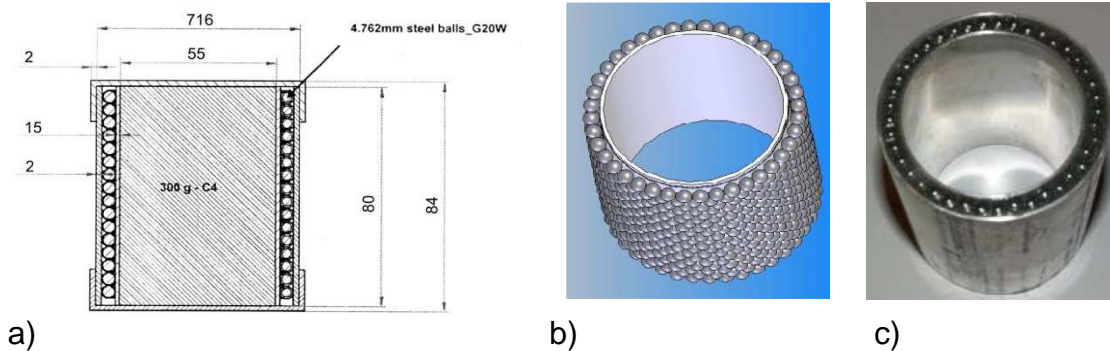
Wielkość deformacji materiałów mierzona była z wykorzystaniem blachy świadka, 0,5 mm blachy ze stopu aluminium, umieszczonej bezpośrednio za badanym materiałem.

W kolejnym teście zaproponowano metodę badań z użyciem modelowych ładunków IED pozwalającą na ocenę poszczególnych materiałów w powtarzalnych warunkach, w których występuje łączne oddziaływanie fali uderzeniowej i odłamków.

Osobnym zagadnieniem rozwiązany w ramach tej metody było opracowanie ładunku modelowego. Potrzeba opracowania takiego ładunku wynikała z faktu, że wnioskowanie o odłamkoodporności materiału tylko na podstawie wyników badań z użyciem FSP nie oddaje rzeczywistych warunków wielokrotnego uderzenia odłamków w materiał, z jednoczesnym działaniem fali uderzeniowej. Ponadto ilość i różnorodność obecnie produkowanych środków bojowych w obszarze granatów i min przeciwpiechotnych jest bardzo duża. Ideą opracowania ładunku modelowego było pozyskanie ładunku pozwalającego na badanie odporności materiałów na przebicie, w tych samych powtarzalnych warunkach.

Jako model ładunku improwizowanego posłużył ładunek zaproponowany w

umowie standaryzacyjnej NATO - STANAG 4569 „Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armored Vehicles” (rys. 4), w którym obudowa wykonana jest ze stopu aluminium, a odłamki stanowi minimum 750 stalowych kulek łożyskowych o średnicy 4,762 mm i masie 0,4 g. Zawartość materiału wybuchowego C4 wynosi 300g. W STANAG 4569 przyjęto założenie, że odłamki generowane z modelowego ładunku powinny mieć prędkość ok. 1200 m/s (rys. 4).



Rys. 4. a) schemat ładunku improwizowanego zaproponowany w STANAG 4569; b) schemat ułożenia kulek w modelu IED; c) model ładunku IED.

3. Wyniki i dyskusja

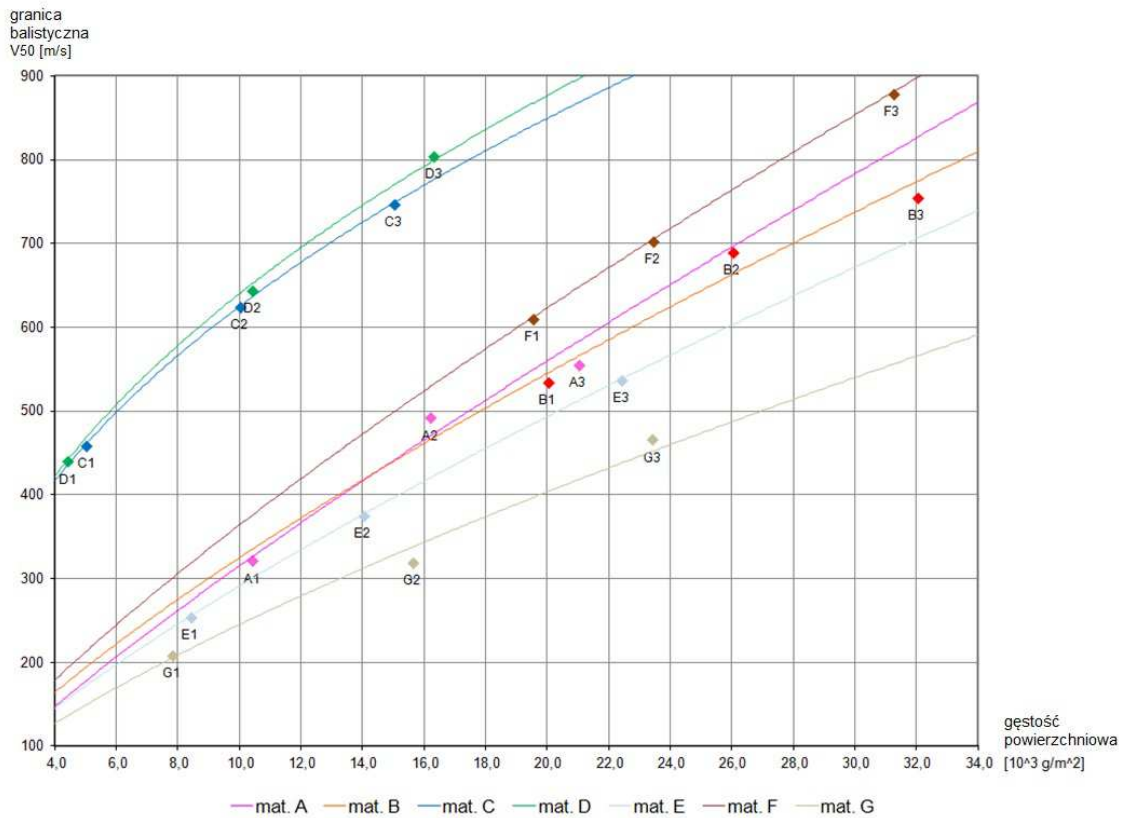
W czasie bliskiego wybuchu ładunku fragmentującego materiał poddawany jest łącznemu oddziaływaniu fali uderzeniowej i odłamków.

W celu opracowania kompozytu warstwowego odpornego na te oddziaływania przeprowadzono badania wstępne, w oddzielnych eksperymentach: badania odłamkoodporności z użyciem FSP 1,1 g oraz badania odporności na wybuch czystego 75 g TNT. Następnie badania weryfikacyjne z użyciem modelowego ładunku IED zgodnego ze STANAG 4569 aneks B poziom 1.

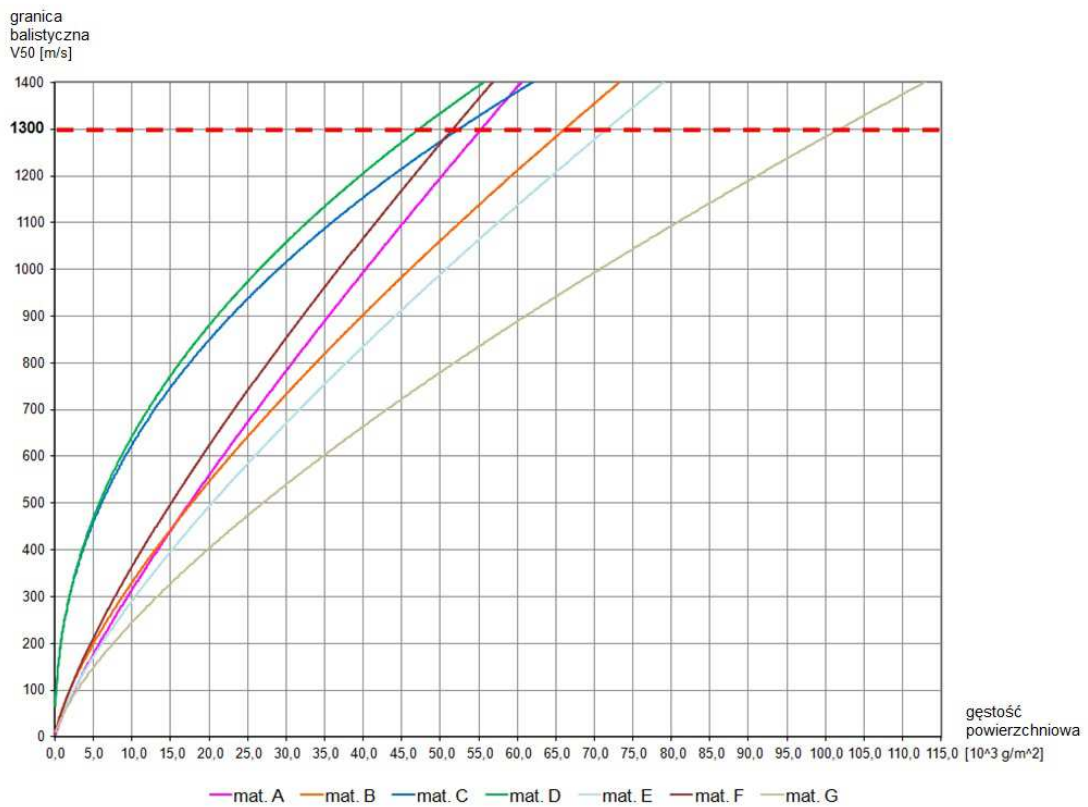
W badaniach wstępnych odłamkoodporności z użyciem FSP 1,1 g zbadano granicę balistyczną V50 dla trzech różnych gęstości powierzchniowych przygotowanych materiałów. Wyznaczono charakterystyki zależności granicy balistycznej od gęstości powierzchniowej, dla każdego z tych materiałów (rys.5).

Na ich podstawie szacowano wartość gęstości powierzchniowej spełniającą limit granicy balistycznej na poziomie 1300 m/s (rys. 6). Prędkość ta, to zmierzona w czasie prób poligonowych maksymalna prędkość odłamków modelu IED i została przyjęta jako kryterium w badaniach porównawczych odłamkoodporności materiałów.

Z otrzymanych rezultatów badań wynika, że dla wybranych materiałów: kompozyt szklany posiada granicę balistyczną V50 dla FSP 1,1 g równą 1300 m/s, przy gęstości powierzchniowej $55 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$. Pozostałe materiały odpowiednio: kompozyt aramidowy – $47 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, stop aluminium – $72 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, blacha stalowa pancerna – $52 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$ i blacha stalowa – $102 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$.



Rys. 5. Wyniki badań odłamkooporności z użyciem odłamka FSP 1,1 g, zależność granicy balistycznej badanych materiałów od ich gęstości powierzchniowej, z naniesionymi liniami trendu. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.



Rys. 6. Zależność granicy balistycznej badanych materiałów od ich gęstości powierzchniowej. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników odłamkodporności w celu optymalizacji układów materiałowych dwuwarstwowych i trójwarstwowych. W optymalizacji przyjęto dwa warunki: suma gęstości powierzchniowych poszczególnych warstw powinna być minimalna i jednocześnie suma wartości ich granic balistycznych powinna być nie mniejsza niż 1300 m/s. W tabeli 2 i 3 przedstawiono przykładowe wyniki optymalizacji dla wybranych układów warstwowych. Kolorem żółtym oznaczono wartości minimalne gęstości powierzchniowej poszczególnych układów warstwowych, dla których granica balistyczna wynosi 1300 m/s.

Tabela 2. Optymalizacja układów dwuwarstwowych. Wybrane, spośród wszystkich wyników optymalizacji, wartości gęstości powierzchniowej materiałów układu [10^3 g/m^2] oraz najmniejsza gęstość powierzchniowa całego układu dwuwarstwowego, dla którego granica balistyczna wynosi 1300 m/s. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Układ A+E	71,67	63,57	59,50	56,72	54,79	53,51	52,79	52,59	52,87	53,65	54,96	56,92	52,59
mat. A	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	34,59
mat. E	71,67	58,57	49,50	41,72	34,79	28,51	22,79	17,59	12,87	8,65	4,96	1,92	18,00

Układ A+D	47,57	38,91	35,57	34,19	34,15	35,13	36,96	39,51	42,67	46,37	50,54	55,11	34,03
mat. A	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	17,65
mat. D	47,57	33,91	25,57	19,19	14,15	10,13	6,96	4,51	2,67	1,37	0,54	0,11	16,38

Układ D+E	47,57	39,79	37,19	36,33	36,61	37,76	39,59	42,01	44,93	48,28	52,03	56,11	36,31
mat. E	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	16,04
mat. D	47,57	34,79	27,19	21,33	16,61	12,76	9,59	7,01	4,93	3,28	2,03	1,11	20,26

Tabela 3. Optymalizacja układów trójwarstwowych. Wybrane, spośród wszystkich wyników optymalizacji, wartości gęstości powierzchniowej materiałów układu [10^3 g/m^2] oraz najmniejsza gęstość powierzchniowa całego układu trójwarstwowego, dla którego granica balistyczna wynosi 1300 m/s. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Układ A+E+D	36,31	32,39	31,52	31,74	32,75	34,39	36,61	39,36	42,62
mat. A	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
mat. E	16,04	10,54	7,23	4,81	3,02	1,74	0,90	0,39	0,13
mat. D	20,26	16,85	14,29	11,94	9,73	7,65	5,71	3,97	2,49

Układ A+E+D	34,03	31,56	31,74	32,76	34,35	36,39	38,82	41,61	44,75	31,49
mat. A	17,65	12,32	9,10	6,61	4,64	3,10	1,93	1,09	0,55	11,20
mat. E	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	6,58
mat. D	16,38	14,23	12,64	11,15	9,71	8,29	6,89	5,52	4,20	13,71

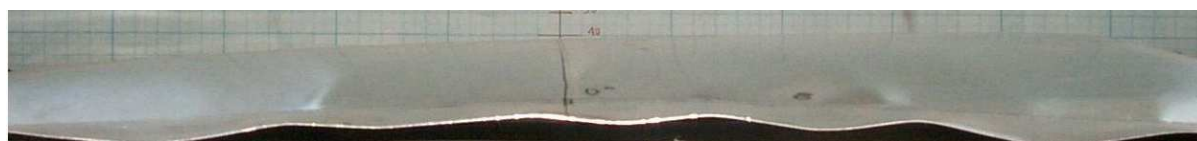
Układ A+E+D	52,59	34,58	31,91	31,53	32,35	33,94	36,13	38,79	41,88
mat. A	34,59	19,02	13,92	10,38	7,66	5,47	3,68	2,23	1,07
mat. E	18,00	10,56	7,99	6,15	4,69	3,48	2,44	1,56	0,81
mat. D	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00

Przeprowadzona optymalizacja wykazała, że najlżejszym układem warstwowym spełniającym postawione założenie jest układ trójwarstwowy. Gęstość

powierzchniowa takiego układu wynosi $31,5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$. Dodatkowymi informacjami do uzyskania z prezentowanych w tabelach wyników jest możliwość wyznaczenia grubości układu, ponieważ znane są gęstości powierzchniowe poszczególnych warstw materiałów w układzie i oszacowania kosztów materiałowych.

Badania odłamkoodporności z użyciem odłamka FSP 1,1 g pozwoliły na wybór poszczególnych warstw wchodzących w skład kompozytu. Nie wskazują jednak ich kolejności ułożenia w kompozycie. W tym celu przeprowadzono badanie odporności materiałów na wybuch czystego ładunku 75 g TNT.

W miarę wzrostu gęstości powierzchniowej materiałów ich deformacja, spowodowana wybuchem ładunku TNT, maleje. Blacha świadek, wykonana ze stopu aluminium, umieszczona za badanym materiałem deformuje się wraz z nim. Po każdym teście wielkość deformacji blachy świadka była mierzona w dwóch prostopadłych kierunkach. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowo deformację blach świadków po testach blach stalowych grubości 1 mm, 2 mm, 3 mm.



stal 3 mm



stal 2 mm

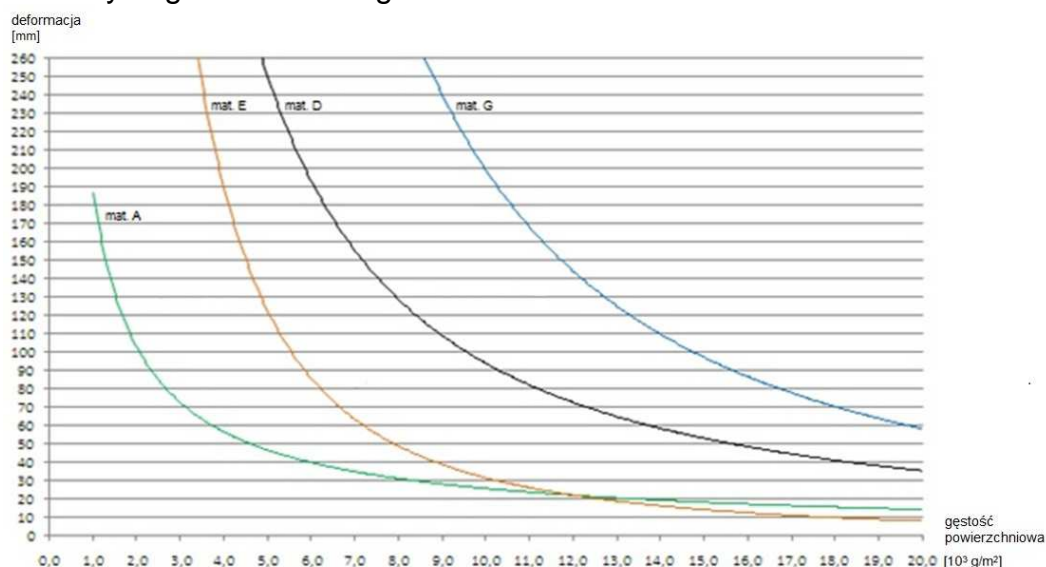


stal 1 mm

Rys. 7. Deformacja blach świadków po testach blach stalowych różnej grubości.

Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Na rysunku 8 przedstawiono wynikową charakterystykę badanych materiałów z użyciem czystego ładunku 75 g TNT.



Rys. 8. Zależność deformacji wybranych materiałów od ich gęstości powierzchniowej.

Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

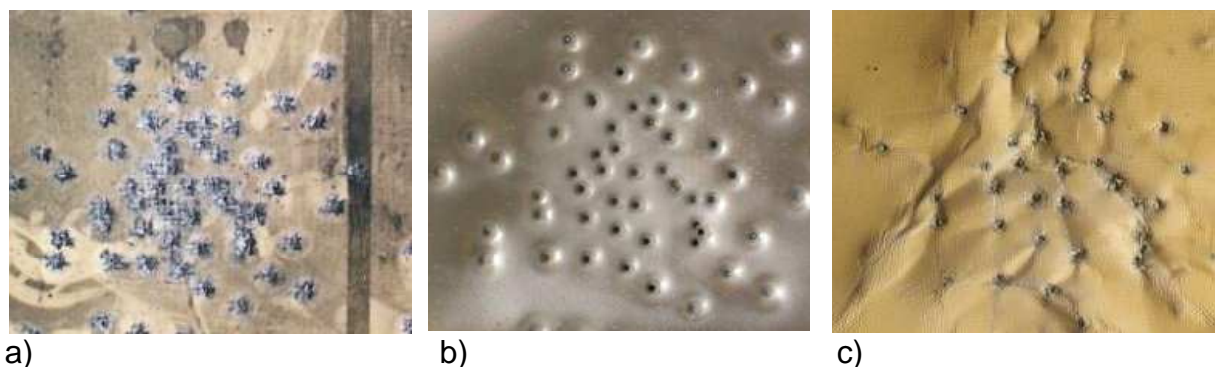
Przeprowadzone badania pozwoliły uszeregować materiały pod względem ich odporności na deformację w wyniku wybuchu czystego ładunku TNT. Materiałem, który deformował się w najmniejszym stopniu jest kompozyt szklany.

Otrzymane wyniki badań wstępnych pozwoliły na ustalenie kolejności ułożenia materiałów w kompozycie warstwowym. Przyjęto, że pierwszym materiałem będzie kompozyt szklany, ze względu na jego największą odporność na deformację podczas wybuchu ładunku TNT oraz wysoką odłamkoodporność, wyrażoną wartością granicy balistycznej V50. Ostatnim materiałem będzie kompozyt aramidowy. Charakteryzuje się on mniejszą odpornością na deformację, niż kompozyt szklany, ale posiada największą odłamkoodporność.

Do badań weryfikacyjnych użyto modeli IED. Badania te były badaniami poligonowymi. Modele IED umieszczano na płycie betonowej, 300 mm pod badaną próbką.

Materiałem odniesienia w tym teście była blacha stalowa o twardości 480 HB tzw. pancerna. W przypadku blach o grubości 4 mm ($32 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$) otrzymywano do 5 przebić. Skuteczną ochronę, przy tych warunkach testu, zapewniła blacha o grubości 6 mm ($48 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$).

Zbadano odporność wybranych modeli dwu- i trójwarstwowych. Jako świadek przebiecia, za badanym materiałem, umieszczano blachę karoseryjną grubości 1 mm, która symulowała podłogę samochodu. Na rysunku 9 przedstawiono efekty oddziaływania modelu IED na opracowany kompozyt trójwarstwowy ($31,5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$). Kompozyt nie został przebity.



Rys. 9. Frontowe strony poszczególnych materiałów z układu trójwarstwowego:
a) kompozyt szklany, b) blacha aluminiowa, c) kompozyt aramidowy.

Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Podsumowanie

Opracowano układ materiałowy dodatkowej osłony dna samochodów patrolowych i interwencyjnych nieopancerzonych i lekko opancerzonych. Osłona jest kompozytem warstwowym (kompozyt szklany o grubości 6 mm jako pierwsza warstwa ze względu na najmniejszą deformację podczas badań z użyciem ładunków TNT, blacha aluminiowa o grubości 2,5 mm i kompozyt aramidowy o grubości 12,5 mm) mocowanym od spodu samochodu, chroniącym załogę samochodu przed zranieniem lub śmiercią oraz konstrukcję podłogi przed uszkodzeniem, w wyniku detonacji małych ładunków fragmentujących.

Ze względu na eksploatację osłon proponuje się wykonywanie osłony poprzez skręcanie poszczególnych warstw. Podstawą takiego wniosku jest:

- w wyniku detonacji ładunków o mniejszej sile rażenia lub w wyniku uszkodzeń mechanicznych, związanych z pokonywaniem przeszkód terenowych przez samochód, uszkodzeniu może ulec tylko pierwsza warstwa osłony tj. kompozyt szklany. W takim przypadku pozostałe warstwy, zwłaszcza kosztowny kompozyt aramidowy, może być wykorzystywany nadal w konstrukcji osłony, po wymianie kompozytu szklanego. Takie podejście wymusza opracowanie bezinwazyjnych metod diagnostycznych spójności kompozytów,
- skręcanie poszczególnych warstw pozwala na komponowanie struktury osłony w dowolny sposób, pod kątem przewidywanych zagrożeń (ich siły rażenia),
- poszczególne warstwy osłony są łatwiejsze w obróbce mechanicznej, niż układ sklejonny z trzech warstw. Nie ma konieczności zamawiania gotowych formatek osłon, przygotowanych na wymiar. Użytkownik ma możliwość wycięcia dowolnych kształtów, z dużych arkuszy poszczególnych materiałów, zgodnie z doraźnymi potrzebami np. w warunkach polowych.

Osłona w układzie trójwarstwowym chroni przed przebicciem odłamkami granatów, typu F1, min przeciwpiechotnych, typu POMZ i małych ładunków improwizowanych IED, na poziomie 1 STANAG 4569. Gęstość powierzchniowa osłony wynosi $31,5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$.

Technologia została częściowo wdrożona (produkcja kompozytu szklanego). Wykonane zostały dodatkowe osłony dna samochodów patrolowo – interwencyjnych eksploatowanych w SZ RP.

Literatura

1. Abrate S. Impact on composite structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, ISBN 0-521-01832-3.
2. Abrate S. Impact on Laminated Composite Materials. Applied Mechanics Reviews 1991; 44(4): 155-190.
3. Amparo G., Graciani E., Paris F. Prediction of in-plane stiffness properties of Non-Crimp Fabric laminates by means of 3D Finite Element analysis. Composites Science and Technology 2008; 68(1): 121-131.
4. Andrews E.W., Moussa N.A. Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading. International Journal of Impact Engineering 2009; 36(3): 418-425.
5. Bogusz P., Ochelski S., Panowicz R., Niezgoda T., Barnat W. Influence of loading rate on energy absorption performance of epoxy composites reinforced with glass fabric. Composites Theory and Practice 2012; 12(2): 110-114.
6. Borvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectile. International Journal of Impact Engineering 2009; 36(7): 948-964.
7. Borvik T., Langseth M., Hopperstad O., S., Malo K., A. Ballistic penetration of steel plates. International Journal of Impact Engineering 1999; 22(9): 855-886.
8. Committee on High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites, National Research Council. Report: High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites. Washington: The National Academies Press, 2005, ISBN: 0-309-54943-4.
9. Committee on Materials Research for Defense After Next, National Research Council. Report: Materials Research to Meet 21st Century Defense Needs. Washington: The National Academies Press, 2003, ISBN: 0-309-50572-0.

10. Committee on Lightweight Materials for 21st Century Army Trucks, National Research Council. Report: Use of Lightweight Materials in 21st Century Army Trucks. Washington: The National Academies Press, 2003, ISBN: 0-309-50646-8.
11. Ernest S.C. Army focused research team on functionally graded armor composites. *Materials Science and Engineering* 1999; A259: 155–161.
12. Fahmy A. A. Report AD-A281587: Deformation, strength, and failure modes of laminated conventional and hybrid polymer-matrix composites loaded in the thickness direction. Defense Technical Information Center, 1994.
13. Galanis K. Rozprawa: Hull construction with composite materials for ships over 100 m in length. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
14. Gürdal Z., Haftka R.T., Hajela P. Design and Optimization of Laminated Composite Materials. John Wiley & Sons, 1999, ISBN: 978-0-471-25276-4.
15. Hogg P.J. Composites for Ballistic Applications. Proceedings of Composite Processing, 2003.
16. Imielińska K., Wojtyra R. Wpływ rodzaju zbrojenia i kolejności ułożenia warstw na tolerancję zniszczeń wywołanych udarami o małej prędkości laminatów epoksydowych zbrojonych włóknem węglowym, szklanym, kevlarowym i hybrydowych. *Kompozyty - Composites* 2002; 5: 364-368.
17. Jena P.K., Mishra B., Ramesh Babu M., Singh A.K. Sivakumar K., Bhat T.B. Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering* 2010; 37(3): 242-249.
18. Jensen R.E., Mcnight S.H., Quesenberry M.J. Report ARL-TR-2655: Strength and Durability of Glass Fiber Composites Treated With Multicomponent Sizing Formulations. Army Research Laboratory, 2002.
19. Kang T.J., Kim C. Impact energy absorption mechanism of largely deformable composites with different reinforcing structures. *Fibers and Polymers* 2000; 1(1): 45-54.
20. Kant S., Verma S. L. A Review on Analysis and Design of Bullet Resistant Jacket - Ballistic Analysis. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 2017; 4(3): 71-80.
21. Kevlar Technical Guide. DuPont
22. Kirkwood J.E., Kirkwood K.M., Lee Y.S., Egres R.G., Wagner N.J., Wetzel E.D. Report ARL-CR-538: Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar® KM-2 fabric: part II: predicting ballistic performance. Army Research Laboratory, 2004.
23. Lane R., Craig B., Babcock W. Materials for blast and penetration resistance. *The Amptiac Quarterly* 2002; 6(4): 39-45.
24. Liu D. Characterization of impact properties and damage process of glass/epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials* 2004; 38(16): 1425-1442.
25. Madhu V., Balakrishna Bhat T. Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles. *Defence Science Journal* 2011; 61(4): 394-402.
26. Mamalis A. G., Spentzas K. N., Manolakos D. E., Ioannidis M. B. Composite and hybrid materials for next generation road and rail vehicles. Proceeding Synenergy Forum Conference, National Technical University of Athens 2008: 9-16.
27. Marston C., Gabbittas B., Adams J. The effect of fibre sizing on fibres and bundle strength in hybrid glass carbon fibre composites. *Journal of Materials Science* 1997; 32(6): 1415-1423.
28. McMahon P.E., Ying L. Report 3607: Effects of fibre/matrix interactions

- on the properties of graphite/epoxy composites. NASA 1982.
29. MIL-HDBK-1002/6. Aluminum structures, composites structures, structural plastics, and fiber-reinforced composites. Department of Defence USA
 30. MIL-HDBK-17. Composite Materials Handbook. Department of Defense USA.
 31. Nurick GN, Langdon GS, Chi Y, Jacob N. Behavior of sandwich panels subjected to intense air blast – part 1: experiments. *Composite Structures* 2009; 91(4): 433-441.
 32. Patel B.P., Bhola S.K., Ganapathi M., Makhecha D.P. Penetration of Projectiles in Composite Laminates. Institute of Armament Technology. *Defence Science Journal* 2004; 54(2): 151-159.
 33. Pike R.A., Novak R.C. Report CR-134763: Design, fabrication and test of multi-fiber laminates. NASA 1975.
 34. Randjbaran E., Zahari R., Majid D., Jalil N., Vaghei R. and Ahmadi R. The Effects of Stacking Sequence Layers of Hybrid Composite Materials in Energy Absorption under the High Velocity Ballistic Impact Conditions: An Experimental Investigation. *Journal of Material Sciences & Engineering* 2013, 2(4): 1-8.
 35. Razali N., Sultan M.T.H., Mustapha F., Yidris N., Ishak M.R. Impact Damage on Composite Structures – A Review. *International Journal of Engineering and Science (IJES)* 2014; 3(7): 8-20.
 36. Report ETL 1110-2-548: Composite materials for civil engineering structures, U.S. Army Corps of Engineers, 1997.
 37. Schuster D. Ballistic impact on composites. *Transactions on Engineering Sciences* 1994; 4: 175-181.
 38. Surowska B. Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2008; 3: 30-40.
 39. Tekalur S.A., Bogdanovich A.E., Shukla A. Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core. *Composites Science and Technology* 2009; 69(6): 736-753.
 40. Wang E., Gardner N., Shukla A. The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores. *International Journal of Solids and Structures* 2009; 46(18-19): 3492-3502.
 41. Zhu F, Lu G. A review of blast and impact of metallic and sandwich structures. *Electronic Journal of Structural Engineering* 2007; Special Issue: Loading on Structures: 92–101.