

prof. dr hab. inż. Waldemar A. TRZCIŃSKI *
prof. dr hab. inż. Radosław TRĘBIŃSKI *
dr hab. inż. Stanisław CUDZIŁO *
dr inż. Marek SZUDROWICZ **
* Wojskowa Akademia Techniczna
** Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

BADANIE REAKCJI OSŁON LAMINATOWYCH NA OBCIĄŻENIE FAŁĄ PODMUCHOWĄ I ODŁAMKAMI

W pracy zaproponowano metodykę badania reakcji osłon laminatowych na działanie fali podmuchowej oraz pocisku. Układ badawczy umożliwia obciążenie osłony impulsem ciśnienia oraz pociskiem o charakterystykach zbliżonych do obciążenia lekkiego pojazdu po wybuchu granatu. Do rejestracji procesu oddziaływania fali podmuchowej oraz przebijania osłony pociskiem zastosowano technikę rentgenografii impulsowej. Badano dwuwarstwowy układ blacha stalowa- płyta laminatowa. Dokonano analizy otrzymanych wyników doświadczalnych.

1. Wstęp

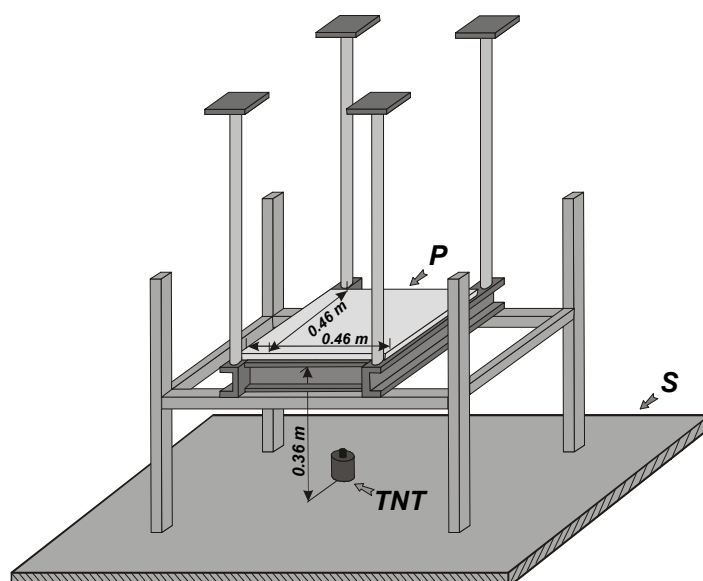
W krajach NATO prowadzone są intensywne badania nad zastosowaniem nowoczesnych materiałów kompozytowych jako osłon w pojazdach pancernych, opancerzonych pojazdach transportowych oraz bojowych wozach piechoty. Kompozyty wzmocnione włóknami stosuje się jako strukturalne elementy kadłubów pojazdów. Programy badań realizowane w USA dotyczą kompozytowych pojazdów piechoty (CIFV – Composite Infantry Fighting Vehicle) i kompozytowych pojazdów opancerzonych (CAV – Composite Armoured Vehicle), w Wielkiej Brytanii prace koncentrują się na kadłubie kompozytowego pojazdu opancerzonego (ACAVP – Advanced Composite Armoured Vehicle Platform). Kadłuby tych ostatnich wykonane są z kompozytu zbrojonego włóknami szklanymi, a osłonę balistyczną zapewniają kompozycje ceramiczne, płyt para-aramidowych i polietylenowych. W wyniku dotychczas przeprowadzonych badań stwierdzono, że kompozyty zbrojone włóknami szklanymi są bardziej wytrzymałe i stanowią efektywniejszą osłonę balistyczną przeciw pociskom, minom i ładunkom wybuchowym niż konstrukcje stalowe.

W kraju badania nad zastosowaniem laminatów do ochrony konstrukcji lekkich pojazdów wojskowych prowadzone są w Wojskowym Instytucie Techniki Pancernej i Samochodowej (WITP i S) – [1]. Opracowano osłony kompozytowe oparte na materiałach produkcji krajowej, które powinny skutecznie zabezpieczać osoby znajdujące się w pojazdach. Uzyskano pozytywne wyniki badań nad odpornością osłon na przebicie pociskami 9 i 7,2 mm. Problemem otwartym pozostaje natomiast zbadanie odpowiadzi osłon kompozytowych na obciążenie falą podmuchową generowaną wybuchem materiału wybuchowego oraz na równoległe oddziaływanie odłamków i fali podmuchowej powstałych po wybuchu granatów lub artyleryjskiej amunicji odłamkowej. W tym drugim przypadku fala podmuchowa może wzmacniać destrukcyjne działanie odłamków i rozrywać ochronną warstwę materiału kompozytowego. W Zakładzie Ma-

teriałów Wybuchowych Wojskowej Akademii Technicznej zaproponowano metodykę badania odpowiedzi płyt laminatowych i stalowych na obciążenie falą podmuchową i odłamkami.

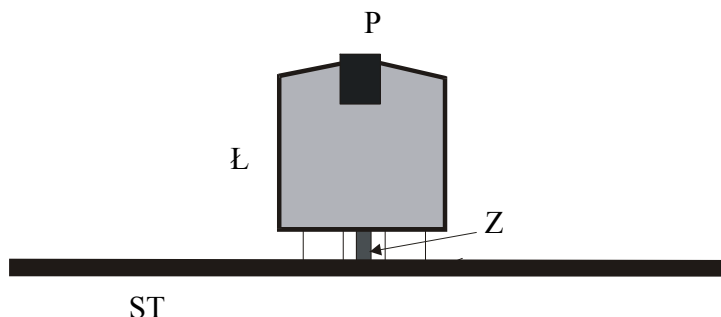
2. Układ do badania reakcji osłon balistycznych na obciążenie falą podmuchową i odłamkami

Stanowisko do badania odpowiedzi osłony balistycznej na obciążenie falą podmuchową i uderzenie pocisku pokazano na rys. 1. Testowana płyta (osłona) przytwierdzona była ze wszystkich stron do stalowych ceowników. Płyty miały wymiar 0,50x0,50 m, przy czym część obciążana bezpośrednio falą podmuchową była nieco mniejsza (0,46x0,46 cm).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: **P** – testowana osłona balistyczna, **S** – masywna płyta stalowa, TNT – ładunek trotylu

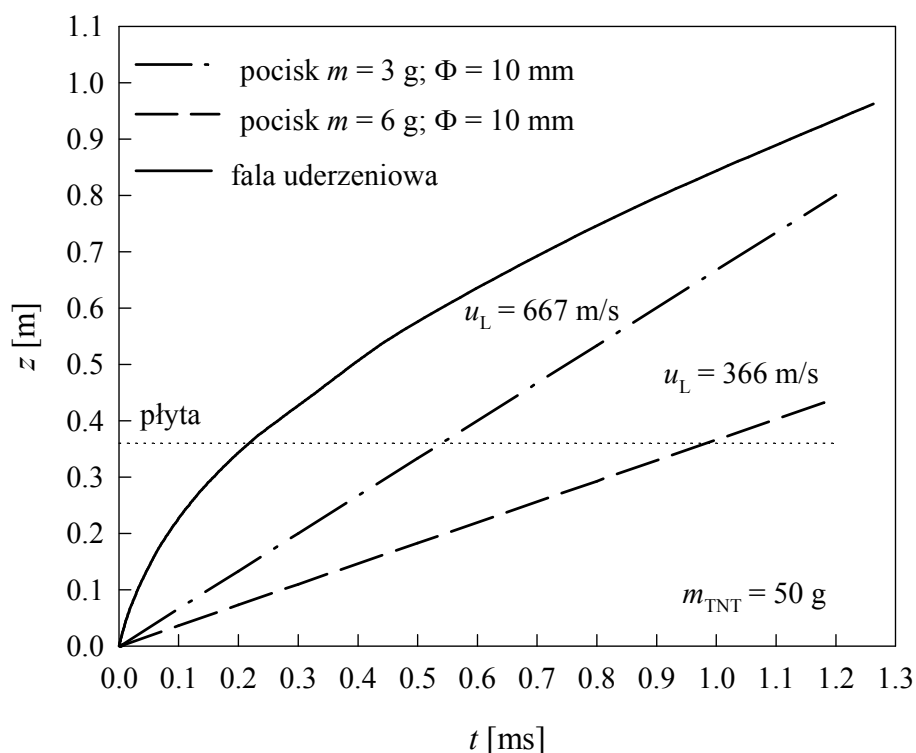
Do napędzania odłamków uderzających w osłony zastosowano układ pokazany na rys. 2.



Rys. 2. Układ wybuchowy do napędzania pocisku: **P** – pocisk stalowy, **Ł** – ładunek trotylu, **Z** – zapalnik, **ST** – masywna płyta stalowa

W testach zastosowano pociski stalowe o średnicy 10 i 12 mm oraz o masie 3 i 6 g. Masa ładunków trotylu wynosiła 50 lub 100 g. Pociski o średnicy $\Phi = 10$ mm i masie $m = 6$ g były ze stali twardej, pozostałe ze stali miękkiej. Ponieważ większa część pocisku znajdowała się w materiale wybuchowym, produkty detonacji intensywnie oddziaływały na pocisk. Na skutek działania silnej fali obciążenia i później gwałtownego odciążenia pocisk ze stali twardej ulegał fragmentacji. W tym przypadku w badany układ balistyczny uderzały właściwie fragmenty pocisku (odłamki). Dokładna analiza testowanych osłon po odciążeniu wykazała, że fragmenty uderzały praktycznie w to samo miejsce (rozrzut nie przekraczał 2 cm). Pozostałe pociski ze stali miękkiej nie ulegały fragmentacji.

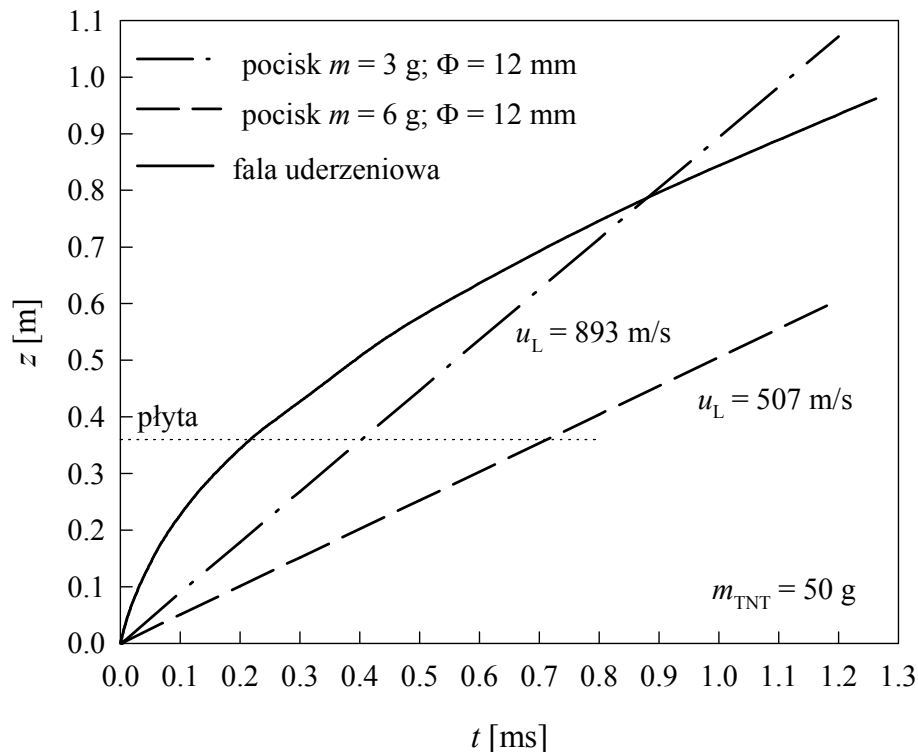
W pracy [2] zaproponowano i zweryfikowano metodę szacowania intensywności i prędkości propagacji fali podmuchowej oraz prędkości pocisków miotanych przez układ wybuchowy pokazany na rys. 2. Na rys. 3-4 przedstawiono zaczerpnięte z pracy [2] czasowe zależności drogi przebytej przez pociski oraz falę podmuchową. Linia kropkowaną zaznaczono odległość od ładunku osłon balistycznych testowanych w układzie prezentowanym na rys. 1. Z położenia krzywych wynika, że pierwsza do osłony dociera fala podmuchowa. Oznacza to, że w momencie uderzenia pocisku osłony są już odkształcone. Fakt ten ma duże znaczenie dla zdolności ochronnych płyt osłonowych i będzie dyskutowany w drugiej części pracy.



Rys. 3. Czasowa zależność drogi przebytej przez pocisk o średnicy 10 mm oraz fali podmuchowej generowanej detonacją ładunku 50 g trotylu

Do rejestracji kształtu obciążanych płyt zastosowano technikę rentgenografii impulsowej (SCANDIFLESH model 450). Źródło promieniowania X (promiennik) oraz kasetę z filmem umieszczano w taki sposób, aby wiązka promieniowania była równoległa do powierzchni płyty oraz prostopadła do dwóch przeciwległych krawędzi płyty. Wiazka obejmowała środkową część płyty na długości równej około 1/3 szerokości

plyty. Zdjęcia wykonywano w czasie $t = 1$ ms od momentu dotarcia fali podmuchowej do płyty. Wykonywano również zdjęcia przed strzałem i po strzale. Te pierwsze wykorzystywano do skalowania zdjęć.

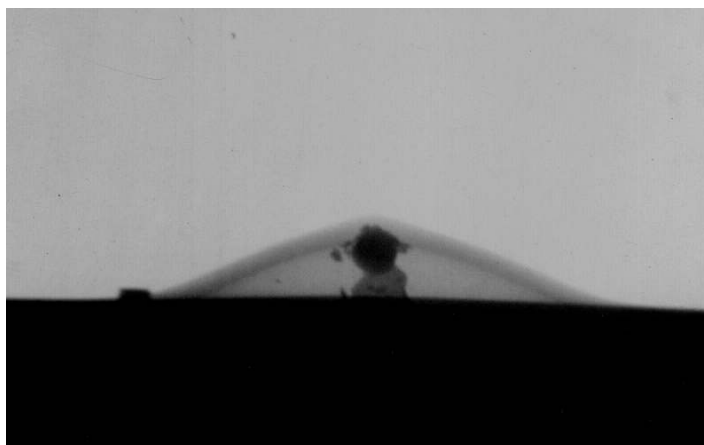


Rys. 4. Czasowa zależność drogi przebytej przez pocisk o średnicy 12 mm oraz fali podmuchowej generowanej detonacją ładunku 50 g trotylu

Badaniom poddano laminaty balistyczne wyprodukowane w firmie MIKANIT w wyniku połączenia gumą syntetyczną ośmiu warstw tkaniny wykonanej z włókien aramidowych. Badane laminaty o nazwie LIM1 i LIM3 różniły się zdecydowanie sztywnością z powodu zastosowania różnych warunków termicznych i mechanicznych w technologicznym procesie ich otrzymywania. Gęstość bardziej elastycznego laminatu LIM1 wynosiła $1,15 \text{ g/cm}^3$, grubość $4,5 \text{ mm}$. Wartości tych samych parametrów dla laminatu LIM3 były równe $1,05 \text{ g/cm}^3$ oraz 5 mm . Statyczne i dynamiczne właściwości laminatów badano w pracach [3-5].

Laminaty umieszczano na płycie z karoseryjnej blachy stalowej 08X o grubości 1 mm . Parametry wytrzymałościowe tej stali są następujące: wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 295 \text{ MPa}$, granica plastyczności $R_e = 175 \text{ MPa}$, wydłużenie $A_5 = 35\%$, moduł Younga – 196 GPa [6]. Testowano układy dwuwarstwowe płyta stalowa-laminat oraz dla porównania dwie płyty stalowe. Płyty w układach dwuwarstwowych nie były ze sobą połączone na stałe. Sposób mocowania osłony z blachy stalowej i laminatu w układzie badawczym omówiono szczegółowo w pracy [4].

Na rys. 5-13 pokazano przykładowe wyniki rejestracji procesu przebijania blachy karoseryjnej i płyty laminatowej pociskiem o różnej masie i średnicy oraz zdjęcia płyt po wyjęciu ich z układu badawczego. Dla porównania na rys. 14 pokazano przebijanie dwóch płyt stalowych.



Rys. 5. Zdjęcie rentgenowskie układu blacha karoseryjna – LIM1 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50 \text{ g}$, $m = 6 \text{ g}$, $\Phi = 10 \text{ mm}$. Pocisk zatrzymany przez laminat LIM1.



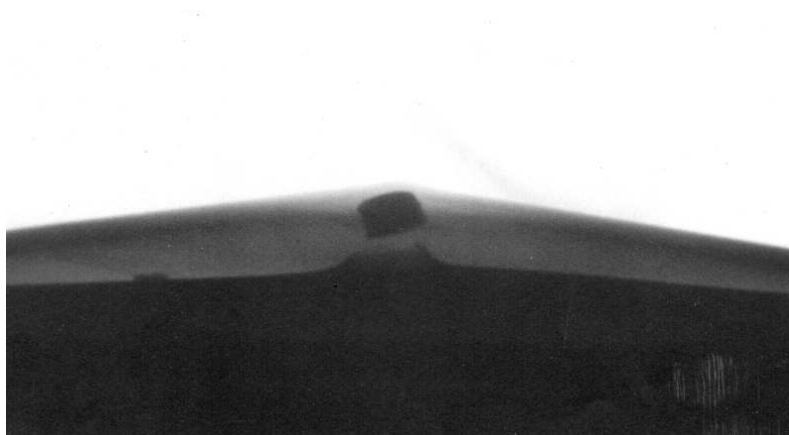
Rys. 6. Zdjęcie blachy karoseryjnej oraz LIM1 po wyjęciu z układu badawczego. Warunki eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50 \text{ g}$, $m = 6 \text{ g}$, $\Phi = 10 \text{ mm}$. Pocisk zatrzymany przez LIM1.



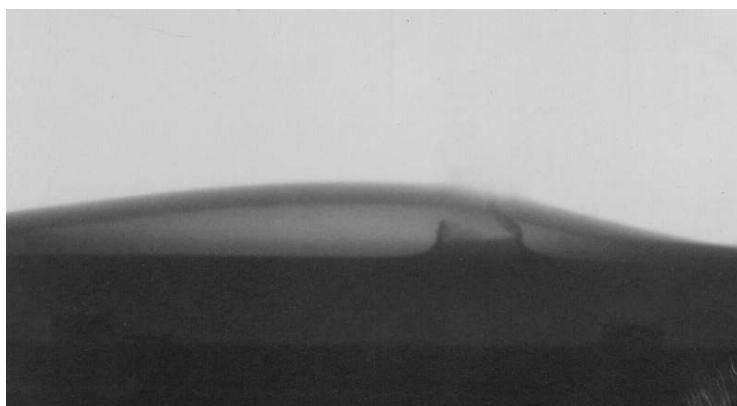
Rys. 7. Zdjęcie rentgenowskie układu blacha karoseryjna – LIM1 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50 \text{ g}$, $m = 3 \text{ g}$, $\Phi = 10 \text{ mm}$. Pocisk przebija LIM1, ale jest zarejestrowany w kadrze.



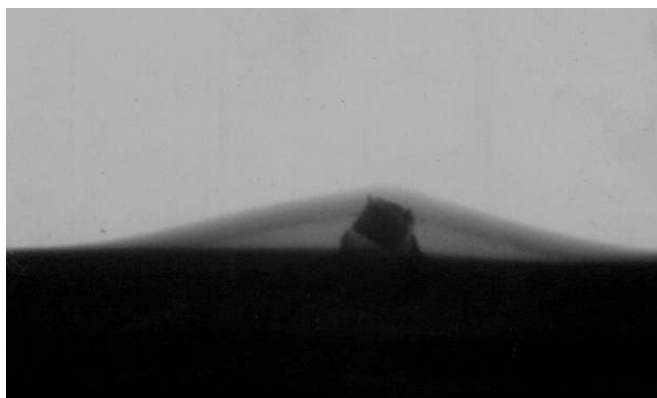
Rys. 8. Zdjęcie układu blachy karoseryjnej oraz laminatu LIM1 po wyjęciu z układu badawczego. Warunki eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50 \text{ g}$, $m = 6 \text{ g}$, $\Phi = 10 \text{ mm}$. Pocisk przebija LIM1.



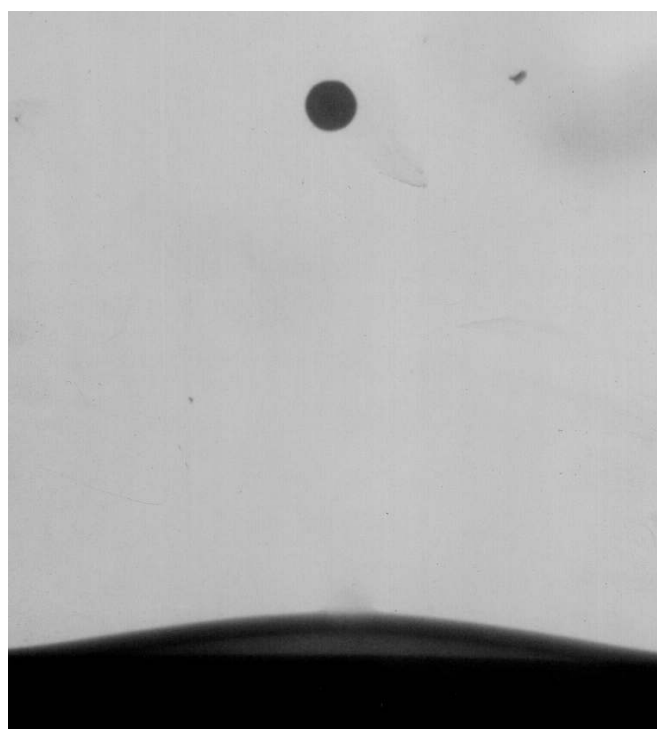
Rys. 9. Zdjęcie rentgenowskie układu dwuwarstwowego blacha karoseryjna – LIM1 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50 \text{ g}$, $m = 6 \text{ g}$, $\Phi = 12 \text{ mm}$. Pocisk zatrzymany przez LIM1.



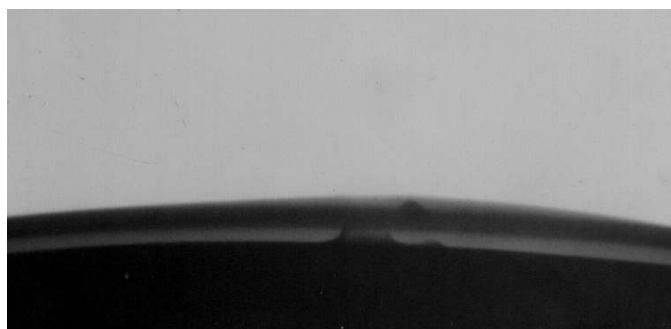
Rys. 10. Zdjęcie rentgenowskie układu dwuwarstwowego blacha karoseryjna – LIM1 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 100 \text{ g}$, $m = 6 \text{ g}$, $\Phi = 12 \text{ mm}$. Pocisk przebija LIM1 i nie jest rejestrowany w kadrze.



Rys. 11. Zdjęcie rentgenowskie układu dwuwarstwowego blacha karoseryjna – LIM3 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50$ g, $m = 6$ g, $\Phi = 10$ mm. Pocisk zatrzymany przez LIM3.



Rys. 12. Zdjęcie rentgenowskie układu dwuwarstwowego blacha karoseryjna – LIM3 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50$ g, $m = 6$ g, $\Phi = 12$ mm. Pocisk przebija LIM3, ale jest zarejestrowany w kadrze.



Rys. 13. Zdjęcie rentgenowskie układu dwuwarstwowego blacha karoseryjna – LIM3 dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50$ g, $m = 3$ g, $\Phi = 12$ mm. Pocisk przebija LIM3 i nie jest rejestrowany w kadrze.



Rys. 14. Zdjęcie rentgenowskie układu z dwóch blach karoseryjnych dla warunków eksperymentu: $m_{\text{TNT}} = 50$ g, $m = 6$ g, $\Phi = 12$ mm. Pocisk przebija obie blachy, ale jest rejestrowany w kadrze. Drugi pocisk to wycięty fragment blachy (korek)

Ze zdjęć rentgenowskich procesu przebijania układów dwuwarstwowych wynika, że gdy pocisk jest zatrzymywany przez warstwę laminatu, obserwuje się duże odkształcenia laminatu i częściowe jego uszkodzenie. Rozciąganie laminatu oznacza dużą absorpcję energii kinetycznej pocisku. Delaminacja i zrywanie warstw tkaninowych w części laminatu będącej w kontakcie z pociskiem osłabia zdolności ochronne kompozytu. Optymalizacja dwuwarstwowego pancerza jako osłony balistycznej polega z jednej strony na zwiększeniu wytrzymałości pierwszej warstwy stalowej oraz zwiększeniu zdolności rozciągających laminatu. Ten drugi efekt można uzyskać przez zmniejszenie grubości warstwy laminatowej i zastosowanie włókien i matrycy o małej sztywności na wygięcie i dużej wytrzymałości na rozciąganie.

3. Analiza wyników

Wyniki testów z układami dwuwarstwowymi zebrano w tabeli 1. Znak „-” oznacza, że pocisk został zatrzymany przez testowany układ, znak „+” oznacza przebicie obu warstw. W tabeli podano również prędkości pocisków oszacowane metodą opisaną i zweryfikowaną w pracy [2].

Z tabeli wynika jednoznacznie, że najlepszą ochronę balistyczną na oddziaływanie fali podmuchowej i pocisku zapewnia układ dwuwarstwowy blacha stalowa – LIM1. Zatrzymuje on pociski do prędkości ok. 500 m/s. Nieco słabsze właściwości ochronne ma układ blacha – LIM3 – zatrzymuje pocisk o prędkości ok. 360 m/s. Dwie blachy karoseryjne stanowią najslabszą ochronę balistyczną z testowanych układów.

Tabela 1. Wyniki testów dla układów dwuwarstwowych obciążonych falą uderzeniową i pociskiem

Masa trotylu m_{TNT} [g]	Masa pocisku m [g]	Średnica pocisku Φ [mm]	Stal+LIM1	Stal+LIM3	Stal+stal	Prędkość pocisku [m/s]
50	6	10	-	-	+ Pocisk w kadrze	366
		12	- -	+ + Pocisk w kadrze	+ Pocisk w kadrze	507
	3	10	+ Pocisk w kadrze	+		667
		12	+	+		893
100	6	12	+	+		651

W porównaniu z układem z podwójną blachą stalową, układy z laminatem są skuteczniejsze. Chociaż silnie rozciągliwe włókna aramidowe w laminatach położonych na stalowej blasze odkształcają się w zasadzie w sposób sprężysty, natura splotu tkaniny pozwala na duże przemieszczenia nawet, gdy indywidualne odkształcenia włókien są małe. Zdolność do dużych przemieszczeń pozwala laminatom tkaninowym stawiać opór pociskowi na dużym dystansie (ugięciu), umożliwiając w ten sposób zaabsorbowanie stosunkowo dużej ilości energii kinetycznej. Z tabeli 1 wynika, że duże znaczenie w zatrzymywaniu pocisków mają również właściwości osnowy laminatu. Laminat bardziej sztywny LIM3 przebija w układzie pocisk z prędkością ok. 500 m/s. Ten sam pocisk jest zatrzymywany przez laminat LIM1, który łatwiej poddaje się deformacji.

Jak wykazano w pracy [2], w zastosowanym stanowisku pomiarowym do obciążanej płyty dociera w pierwszej kolejności fala podmuchowa. Opóźnienie pocisku waha się od 0,3 do 0,8 ms. Oznacza to, że blachy stalowa i laminatowa są w tym momencie częściowo lub całkowicie odkształcone. W przypadku blachy stalowej jest to odkształcenie plastyczne. Włókna laminatu są natomiast rozciągnięte, osnowa laminatu silnie naprężona. Może występować częściowe zrywanie połączenia włókna z osnową. Przebite pociskiem tak osłabionego układu warstwowego jest skuteczniejsze niż układu nieodkształconego falą podmuchową. Fakt ten potwierdza porównanie uzyskanych wyników z danymi dotyczącymi przebijania podobnych laminatów pociskiem karabinowym [1].

4. Podsumowanie

Analiza danych literaturowych wskazuje, że istnieją następujące możliwości zastosowania kompozytowych struktur aramidowych w opancerzeniach lekkich wozów bojowych ([7]):

- a) warstwy podkładowe w pancerzach ceramiczno-warstwowych,
- b) wykładziny antyodłamkowe, mocowane od wewnątrz pojazdu, chroniące załogę przed odłamkami pocisków i fragmentów pancerza wozu,

- c) modułowe i ciągłe struktury kompozytowe mogące mieć zastosowanie w lekkich opancerzeniach samochodów.

Celowość zastosowania laminatu aramidowego w połączeniu z ceramiką wynika z faktu, że zastosowanie laminatu i ceramiki prowadzi do obniżenia masy powierzchniowej pancerza w porównaniu ze stalą pancerną zapewniającą taki sam poziom ochrony przed pociskami. Laminaty kompozytowe jako warstwa podkładowa ceramiki są szczególnie skuteczne w zastosowaniach na opancerzenie narażone na odłamki pocisków artyleryjskich.

Rezultaty badań prezentowanych w niniejszej pracy potwierdzają możliwość zastosowania laminatu włókninowego jako wykładziny antyodłamkowej, mocowanej wewnątrz pojazdu. Przede wszystkim zdolność do dużych przemieszczeń pozwala laminatom tkaninowym stawiać opór pociskowi lub odłamkowi pancerza na dużym ugięciu i w ten sposób absorbować stosunkowo dużą ilość energii kinetycznej.

Praca została zrealizowana w ramach Projektu Badawczego nr 0 T00B 027 22 finansowanego przez MNil w latach 2002-2004.

Literatura

- [1] *Opracowanie i wdrożenie do produkcji osłon laminatowych, zabezpieczających osoby i ładunki przewożone samochodami, przed działaniem amunicji karabinowej i odłamkami*, Projekt celowy nr 148335/C-T00/2001.
- [2] W. A. Trzciński, D. Parchem, *Układ do wybuchowego miotania pocisków i generowania fali podmuchowej*, Biul. WAT, (w druku).
- [3] W. A. Trzciński, R. Rekucki, J. Janiszewski, *Badanie reakcji płyt laminatowych i stalowych na falę podmuchową*, Biul. WAT, LII, 2, 2003, 93-108.
- [4] W. A. Trzciński, R. Trębiński, S. Cudziło, *Investigation of the behaviour of steel and laminated fabric plates under blast wave load. Part I – Experimental approach*, V Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Waplewo, 2004, 1055-1064.
- [5] V. Adamik, W. A. Trzciński, J. Vagenknecht, *Investigation of the behaviour of steel and laminated fabric plates under blast wave load. Part II – Numerical approach*, V Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Waplewo, 2004, 1-13.
- [6] Polska Norma, PN-75 H-89019, 1975.
- [7] A. Wiśniewski, *Ochrona wozów bojowych*, WITU, 2003.