

Lesław Kyzioł
Akademia Marynarki Wojennej

PRZESTRZELIWANIE MATERIAŁÓW NIEMETALICZNYCH STOSOWANYCH NA KONSTRUKCJE OKRĘTOWE

STRESZCZENIE

Zaprezentowano wyniki badań przestrzeliwania materiałów niemetalicznych, takich jak ceramika, ceramika-guma, laminaty poliestrowo-szklane oraz drewno naturalne i modyfikowane. Wykazano, że płyta z laminatu poliestrowo-szklanego o odpowiedniej grubości osłonięta płytkami ceramicznymi może być kuloodporna dla pocisków kalibru 7.62 mm. Płyta wielowarstwowa z przekładką drewna naturalnego, a także modyfikowana nie może natomiast zostać uznana za materiał odporny na przestrzeliwanie pociskami o kalibrze 7.62 mm.

Słowa kluczowe:

laminaty poliestrowo-szklane, drewno naturalne i modyfikowane, ceramika, guma, przestrzeliwanie, płyta balistyczna.

WSTĘP

Laminaty poliestrowe mogą być zbrojone tkaninami lub matami z włókien szklanych, węglowych lub kevlarowych, taśm albo siatek z metali amorficznych. Stosowane w budowie okrętów konstrukcje są o małej grubości i wykazują małą odporność na ostrzał z karabinu maszynowego pociskami kalibru 7,62 mm AP o masie 9,5 g i prędkości początkowej 830 m/s [1, 2, 3, 7, 8]. Dla zapewnienia odporności na ostrzał pociskami kalibru 7.62 mm laminaty poliestrowo-szklane powinny być osłonięte odpowiednimi osłonami. Brak jest norm krajowych, dlatego badania odporności osłon na ostrzał prowadzi się zgodnie z wymaganiami DIN 52290 lub EUROPEAN STANDARD CEN przedstawionymi w tabeli 1.

Tabela 1. Wymagania DIN 52290 i EUROPEAN STANDARD CEN dla badania osłon ostrzałem pociskami kaliber 7.62 mm AP

Lp.	Rodzaj zagrożenia	Rodzaj pocisku	Masa pocisku [g]	Prędkość pocisku V_{50} [m/s]	Odległość ostrzału [m]
1	4	VMS/WK	9,45 ± 0,1	785 – 795	10
2	5	VMS/HK	9,75 ± 0,1	800 – 810	25

HK – pocisk z twardym rdzeniem, WK – pocisk z miękkim rdzeniem stalowym, V_{50} – prędkość, przy której 50% pocisków zostanie zatrzymanych w tarczy

Do budowy i modernizacji okrętów niezbędne są nowe materiały konstrukcyjno-osłonowe. W tym celu prowadzi się badania na ostrzał z myślą o wdrożeniach do budowy i/lub modernizacji miejscowo (zewnątrznie i wewnątrznie) opancerzonych okrętów oraz lądowych pojazdów wojskowych i policyjnych. Przygotowując materiały do ochrony balistycznej, dążono do tego, by atakujące ich powierzchnie pociski karabinowe wytrącały energię kinetyczną całkowicie podczas ich penetracji czy nawet pod koniec erozyjnej perforacji. W pracy przedstawiono wyniki badań odporności na ostrzał wybranych materiałów. Zbadano zachowanie się przy ostrzale laminatów poliestrowo-szklanych stosowanych w budowie nadbudówek okrętów osłoniętych płytkami ceramicznymi i warstwami gumy. Ponadto określono udział drewna naturalnego i modyfikowanego będącego jedną z warstw w osłonie balistycznej. Szczegółowy opis badań przedstawiono w pracy [7].

Badania prowadzone w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn mają na celu określenie globalnej podatności osłon wykonanych z różnych materiałów na jej odporność balistyczną. Brak jest w literaturze danych o zastosowaniu materiałów niemetalicznych jako składnika osłon o podwyższonej ułamko- i kuloodporności.

Celem niniejszego artykułu jest określenie właściwości balistycznych (poprzez zaprezentowanie wyników pomiarów) przy strzelaniu pociskiem kalibru 7.62 mm do próbek o średnicy 50 mm utworzonych z kilku warstw niemetalicznych. Próbki instalowano w tulei z tensometrycznym miernikiem siły osadzonej w wahadle balistycznym. Jako efektywność względną próbki przyjęto wartość wyrażenia:

$$\left(\frac{\textit{kąt wychylenia wahadła}}{\textit{kąt wychylenia wahadła przy stalowej próbce}} \right)^2 \cdot 100\%$$

Średni kąt wychylenia wahadła przy przestrzeliwaniu próbek stalowych o grubości 12 mm wynosi 6,19° Almohandes [4].

Zdolność poszczególnych typów próbek do pochłaniania energii kinetycznej pocisku może stanowić miarę ich odporności balistycznej i podstawę do oceny przydatności przy konstruowaniu osłon o podwyższonej ułamko- i kuloodporności.

Ze względu na możliwości pomiarowe stanowiska badawczego w AMW, zamiast maksymalnej siły uderzenia pocisku w próbkę i energii zaabsorbowanej przez próbkę mierzone będą siła w tulei, w której osadzona jest próbka, oraz wychylenie wahadła balistycznego, w którym osadzona jest ta tuleja [4].

OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 1.) składającym się z wahadła balistycznego (6) i dodatkowego wyposażenia w postaci dwóch zestawów ramek (3) do mocowania, wymienianych po każdym strzale czujników piezoceramicznych (2), osadzonych w wahadle tulei (5) z tensometrycznym miernikiem siły i wskaźnika (7) do pomiaru kąta wychylenia wahadła. Pocisk (1) po przejściu przez pierwszy zestaw dwóch ramek uderza w próbkę (4) i po jej przestrzeleniu oddziałuje na kolejne dwa czujniki piezoceramiczne. Impuls z pierwszego czujnika wyzwała w oscyloskopie (9) licznik czasu, który rejestruje moment uderzenia pocisku w drugi czujnik. Pozwala to wyznaczyć prędkość pocisku przed próbką. Podobnie wyznacza się prędkość pocisku za próbką, za pomocą drugiego zestawu ramek z czujnikami i oscyloskopu (10). Próbka jest oparta na tulei (5) i dociśnięta nakrętką dociskową. Dla zapewnienia większej globalnej podatności próbki docisk jest na tyle lekki, że przy przestrzeliwaniu próbki możliwe jest przemieszczanie się jej brzegów względem nakrętki i tulei. Badań na temat wpływu sztywnego zamocowania próbki w tulei nie prowadzono.

Maksymalny kąt φ wychylenia wahadła na skutek strzału (tabela 6. kolumna 6.) odczytywano na skali wskaźnika. Kąt wychylenia wahadła jest tym większy (a tym samym i energia zaabsorbowana przez próbkę), im większy jest impuls siły uderzenia pocisku.

Odchylenie osi pocisku od osi próbki wyniosło około 9 mm i pocisk znalazł się blisko krawędzi podparcia próbki, nie przebijając jej. Tym samym całkowitą energię kinetyczną pocisku zaabsorbowała próbka i wahadło, które wychyliło się do położenia kąтового $\varphi_{\max} = 9^\circ$.

Ze względu na to, że energia potencjalna wahadła w najwyższym jego położeniu, wynosząca

$$E_{pot} = mgl(1 - \cos\varphi), \quad (1)$$

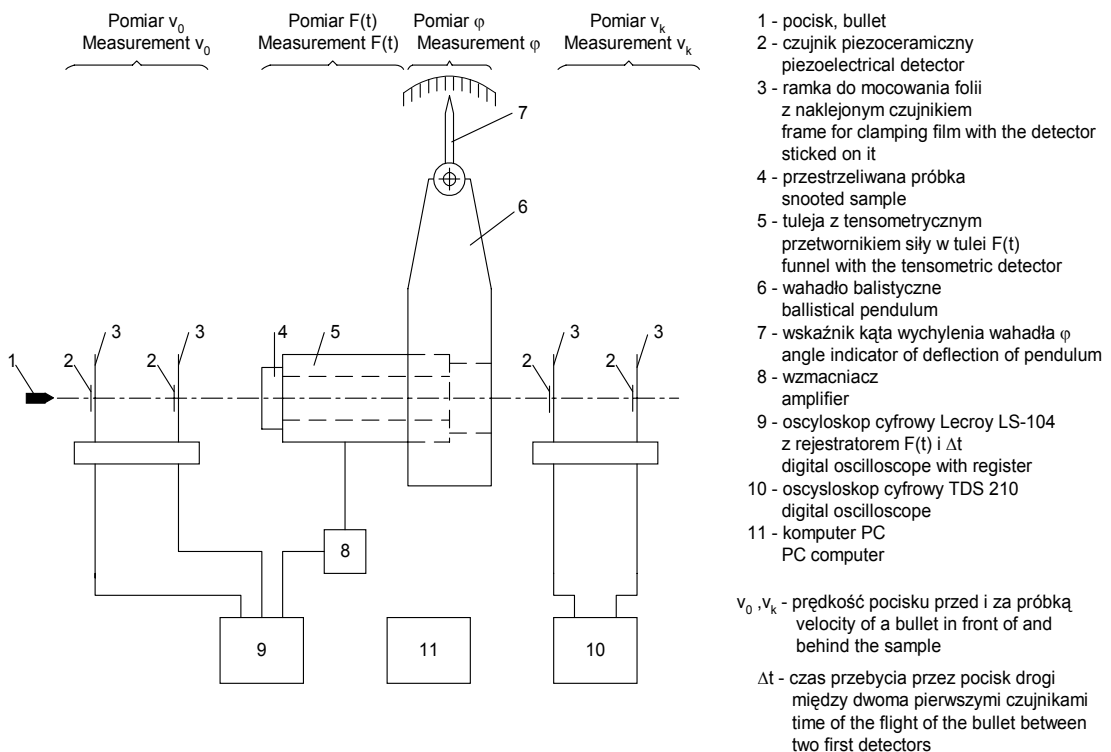
gdzie: m – masa wahadła (z oprzyrządowaniem);
 g – przyspieszenie ziemskie;
 l – odległość środka masy od osi obrotu;
 φ – maksymalny kąt wychylenia wahadła,

jest równa energii przekazanej wahadłu przez próbkę w czasie jej przestrzeliwania, jako efektywność poszczególnych próbek przyjęto wyrażenie:

$$\varepsilon = \frac{1 - \cos\varphi}{1 - \cos 9^0} 100\% = \frac{\sin^2 0,5\varphi}{\sin^2 0,5 \cdot 9^0} 100\% . \quad (2)$$

Przy małych kątach wartość sinusa jest praktycznie równa jego argumentowi, stąd (tabela 6. kolumna 9.) podano wartości:

$$\varepsilon = \left(\frac{\varphi}{9} \right)^2 \cdot 100\% . \quad (3)$$

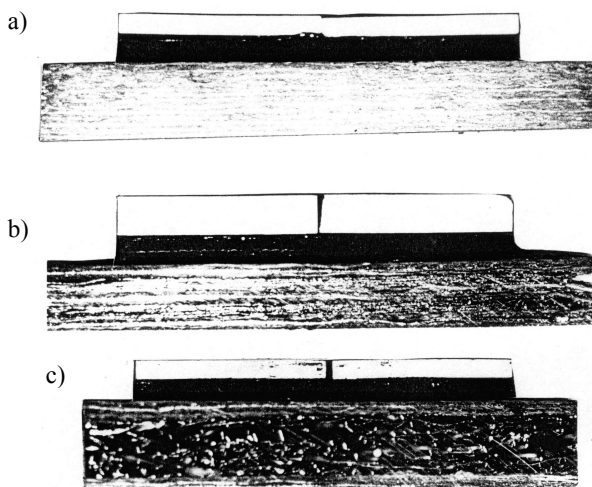


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

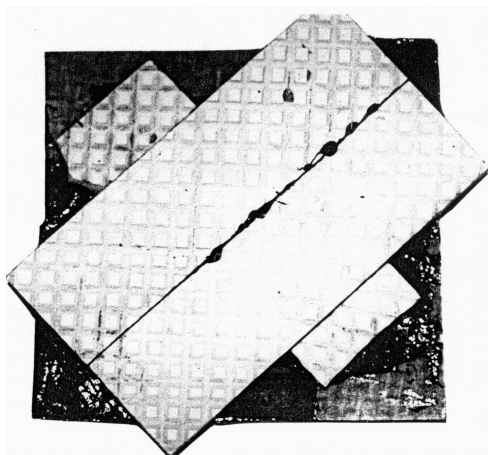
BADANE LAMINATY I OSŁONY

Badaniom poddano laminat poliestrowo-szkłany (LPS) o grubości 16 i 17 mm stosowany do budowy nadbudówek na jednostkach specjalnych. Laminat ten oznaczono L16 lub L17, zależnie od jego grubości. LPS dodatkowo zbrojony warstwami tkaniny o splocie płóciennym z taśm o wymiarach 1 x 0,032 mm ze stopu amorficznego, 39% Fe, 40% Ni, 1% Al i 20% B, o wytrzymałości $R_m = 1560$ MPa oznaczono L18. Do wklejenia zbrojenia metalowego w LPS użyto spoiwa Epidian-5 z utwardzaczem Z-1. LPS dodatkowo wzmocniono warstwami maty z ciętych włókien stopu amorficznego zlepionych w matę spoiwem Epidian-5 z utwardzaczem Z-1 i oznaczono L22 lub L24, zależnie od grubości laminatu.

Jako spoiwo w LPS zastosowano żywicę poliestrową D23-E, a na osłony zastosowano gładkie płytki z balistycznej ceramiki aluminiowej ($Al_2O_3 + SiC$) o wymiarach 5 x 50 x 50 mm lub 10 x 50 x 50 mm i płytki z reliefem x o wymiarach 5 x 45 x 159 mm i 10 x 45 x 159 mm naklejone na płyty z laminatu. Płyty próbne laminatu z osłoną ceramiczną oznaczono C5 i C10, zależnie od grubości osłony lub C5x i C10x, gdy osłonę stanowiły płytki ceramiczne z reliefem x. Płyty próbne laminatu, w których między osłonę ceramiczną i laminat wklejono warstwę gumową o grubości 5,5 mm, oznaczono /g/, a płyty bez warstwy gumowej oznaczono -/-. Przykłady oznaczenia płyt próbnych z laminatu pokazano na rysunkach 2. i 3.



Rys. 2. Przykłady kompozytów balistycznych CGL (ceramika + guma + laminat):
a) ceramika aluminiowa 5 x 50 x 50 mm + guma gr. 5,5 mm + laminat poliestrowo-szkłany (LPS) 16 x 140 x 140 mm (ozn. C5/g/L16), b) ceramika aluminiowa 10 x 50 x 50 mm + guma gr. 5,5 mm + laminat poliestrowo-szkłany zbrojony tkaniną z metalu amorficznego 16 x 140 x 140 mm (ozn. C10/g/L18), c) ceramika aluminiowa 5 x 50 x 50 mm + guma gr. 5,5 mm + laminat poliestrowo-szkłany zbrojony matą z metalu amorficznego 24 x 140 x 140 mm (ozn. C5/g/L24)



Rys. 3. Kompozyt balistyczny CGL o strukturze: ceramika aluminiowa reliefowana
10 x 45 x 159 mm + guma gr. 5,5 mm + laminat poliestrowo-szklany (LPS)
16 x 140 x 140 mm (ozn. C10x/g/L16)

Badaniom poddano dziewięć płyt próbnych laminatu z osłonami balistycznymi o oznaczeniach: C5/-/L16, C10/-/L16, C10/g/L16, C5/g/L17, C10/g/L17, C10x/g/17, C10/g/L18, C5x/-/L22 i C5x/g/L24.

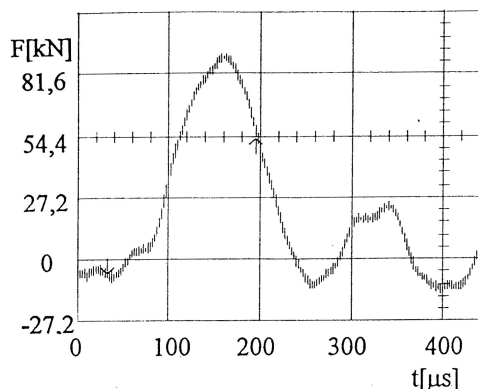
WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA OSTRZAŁ

Badania przeprowadzono na zunifikowanym stanowisku do badania odporności balistycznej materiałów [6]. Próbki laminatu o wymiarach 140 x 140 mm mocowano na głowicy dynamometru tulejowego osłonami balistycznymi w kierunku ostrzału. Płyty ostrzeliwano z karabinu PK pociskami kalibru 7.62 mm AP o masie 9,5 g z prędkością początkową 830 m/s z odległości 3 m. Na dynamometrze rejestrowano przebieg zmian siły w czasie wgłębiania się pocisku w płytę próbną. Po ostrzale rejestrowano na zdjęciach powstałe uszkodzenia płyt próbnych.

Przykładowo zarejestrowano uszkodzenia płyt próbnych spowodowane uderzeniem pocisku:

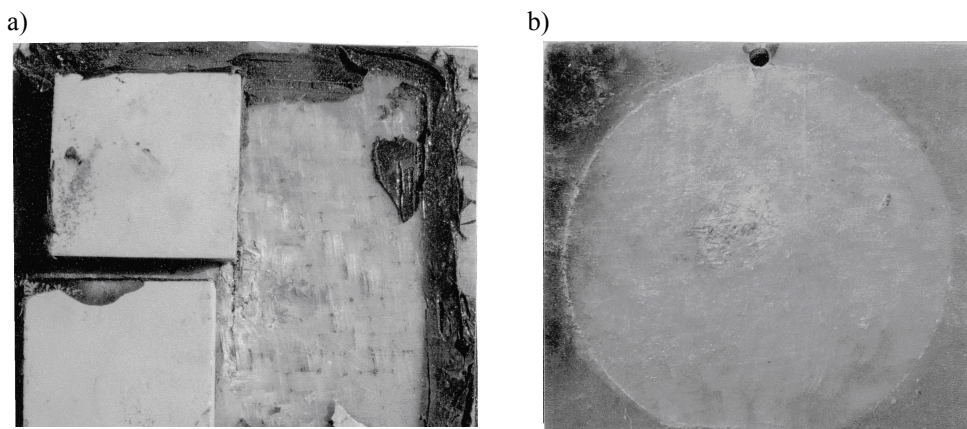
– płyta C10/g/16

Przebieg siły uderzenia pociskiem pokazano na rysunku 4. Największa siła uderzenia $F_{max} = 88,6$ kN.

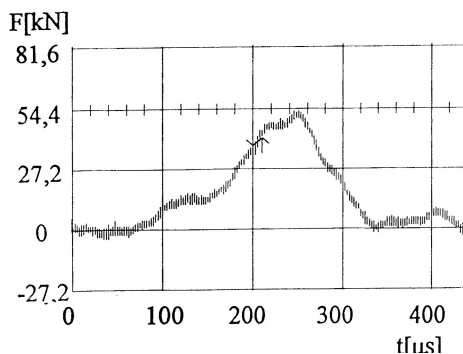


Rys. 4. Przebieg siły uderzenia pociskiem kal. 7.62 mm AP z prędkością 830 ms^{-1} kompozytu balistycznego (C10/g/16) o wymiarach: ceramika aluminiowa $10 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ + laminat poliestrowo-szklany (LPS) $16 \times 140 \times 140 \text{ mm}$, $F_{\text{max}} = 88,6 \text{ kN}$

Pocisk uszkodził płytkę ceramiczną, nastąpiła erozja balistyczna warstwy gumy, a na LPS od strony uderzenia pocisku pojawiły się niewielkie odciski wielkości pocisku. Na krawędzi płyty pojawiły się miejscowe podpowierzchniowe ścięcia LPS, a na stronie tylnej powstały płytkie rozwarstwienia LPS (rys. 5.).



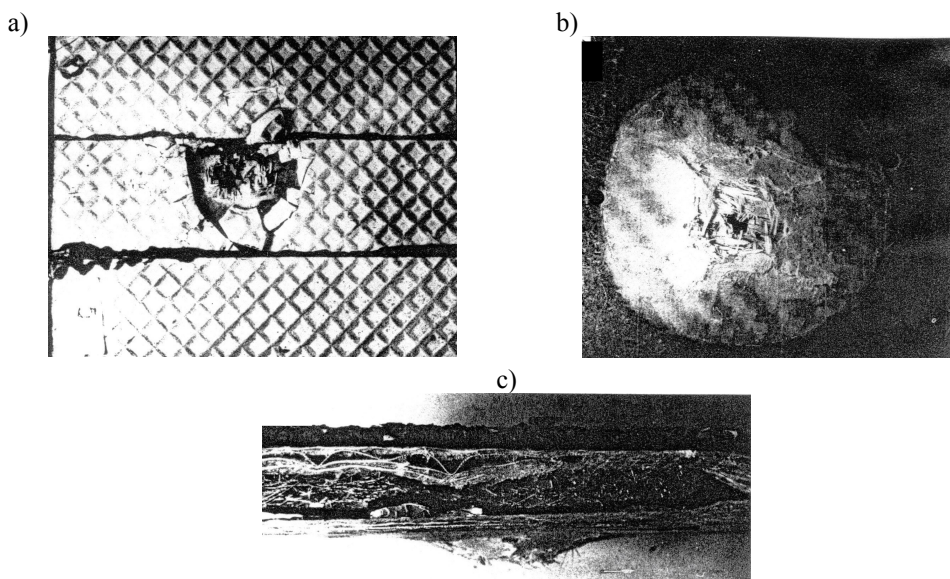
Rys. 5. Efekt ostrzału pociskiem kal. 7.62 mm AP z prędkością 830 ms^{-1} kompozytu balistycznego (C10/g/16): a) widok od strony wlotu pocisku, b) widok od strony tylnej LPS



Rys. 6. Przebieg siły uderzenia pociskiem kal. 7.62 mm AP z prędkością 830 ms^{-1} kompozytu balistycznego o wymiarach: ceramika aluminiowa reliefowana $5 \times 45 \times 159 \text{ mm}$ + LPS zbrojony matą z metalu amorficznego $22 \times 140 \times 140 \text{ mm}$ (ozn. C5x/-/L22), $F_{\max} = 47,5 \text{ kN}$

– plyty CGL C5x/-/L22

Przebieg siły uderzenia pocisku pokazano na rysunku 6. Największa siła uderzenia $F_{\max} = 54 \text{ kN}$. Pocisk przebił LPS. Nastąpiło częściowe rozwarstwienie w powierzchniach rozdziału mata z metalu amorficznego – laminat oraz rozwarstwienie tylnej strony laminatu (rys. 7.).



Rys. 7. Efekt ostrzału pociskiem kal. 7.62 mm AP z prędkością 830 ms^{-1} kompozytu balistycznego (ozn. C5x/-/L22): a) i b) widok od strony wlotu i wylotu pocisku, c) przekrój poprzeczny kompozytu

DREWNO NATURALNE I MODYFIKOWANE

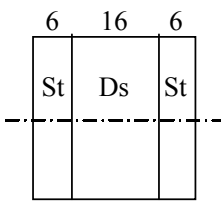
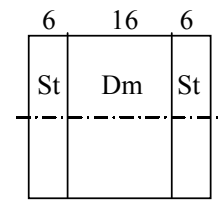
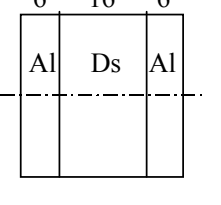
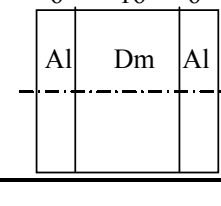
Badania nad modyfikacją drewna modyfikowanego, jakie przeprowadzono w Instytucie Podstaw Techniki Akademii Marynarki Wojennej, skłoniły autora do określenia odporności tego materiału na przestrzeliwanie. Chociaż tematem artykułu jest określenie odporności materiałów niemetalicznych na przestrzeliwanie pociskami kalibru 7.62 mm, to biorąc pod uwagę zastosowanie tego materiału na konstrukcje morskie, stało się koniecznością sprawdzenie jego odporności na przestrzeliwanie, przyjmując, że drewno modyfikowane będzie stanowiło jedną z warstw płyty balistycznej.

W tabeli 2. przedstawiono wyniki badań przestrzeliwania próbek warstwowych, w których warstwą wewnętrzną było drewno naturalne lub modyfikowane (o grubości 16 mm), a warstwami zewnętrznymi krążki ze stali lub aluminium (6 mm). Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w pracy [5]. Dla próbek poddanych przestrzeliwaniu prędkości początkowe pocisku wahały się w granicach 790 – 909 [m/s].

Maksymalne wartości siły w tulei wynosiły od $F_{S_{max}} = 68$ [kN] oraz $F_{r_{max}} = -32$ [kN] (stal-drewno modyfikowane-stal) do $F_{S_{max}} = 18$ [kN] i $F_{r_{max}} = -6$ [kN] (aluminium-drewno naturalne-aluminium). Odporność na przestrzeliwanie warstw aluminium-drewno modyfikowane-aluminium jest porównywalna do przestrzeliwania warstw aluminium-piasek-aluminium oraz aluminium-szkło-aluminium [4]. W każdym przypadku, gdzie warstwy zewnętrzne były stalowe, natomiast środkowe z piasku, szkła kruszonego lub drewna modyfikowanego, najmniejszą odporność wykazały próbki, w których warstwa środkowa była z drewna modyfikowanego. Próbki, w których warstwa wewnętrzna była z drewna naturalnego, wykazały najmniejszy opór w próbie przestrzeliwania [5].

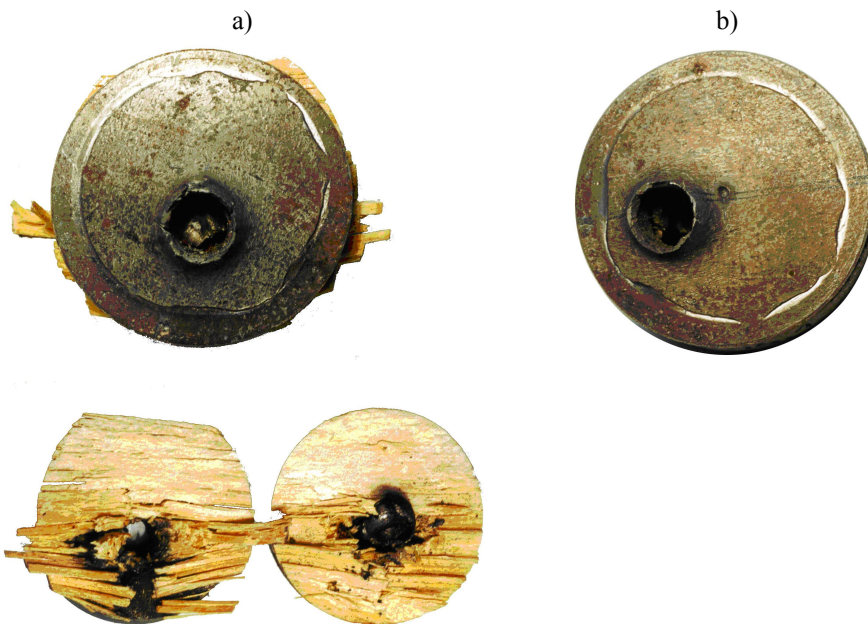
Na rysunku 8. przedstawiono wygląd zniszczonej pośredniej warstwy a) drewna modyfikowanego i b) drewna naturalnego. Można zaobserwować, że w przypadku niszczenia pośredniej warstwy drewna modyfikowanego (rys. 7a) dominuje fragmentyzacja. Warstwa pośrednia stawiająca opór uległa zniszczeniu. Obrazem zniszczenia są widoczne na zdjęciu fragmenty materiału. Warstwa pośrednia z drewna naturalnego (rys. 7b) doznała perforacji. Pocisk nie natrafił na żaden opór ze strony warstwy pośredniej.

Tabela 2. Wyniki badań balistycznych

Nr serii	Rodzaj próbki	Nr próbki	Prędkość pocisku		Kąt wych. waha.	Siła uderzenia		Efektywność próbki
			przed próbką	za próbką		maks.	min.	
			V_0 [m/s]	V_k [m/s]	φ [deg]	F_{Smax} [kN]	F_{rmin} [kN]	ε [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		14.1	806	370	6	57	-21	44
		14.2	862	394	6	49	-18	44
		14.3	793	366	5,5	52	-16	37
		średnia	820	377	5,8	53	-18	42
2		26.1	877	434	6	64	-29	44
		26.2	892	374	6,5	72	-33	52
		26.3	885	410	6	67	-34	44
		średnia	885	406	6,1	68	-32	47
3		18.1	851	781	1,5	13	-5	2
		18.2	888	745	2	21	-6	4
		18.3	888	765	1,5	19	-6	2
		średnia	876	764	1,6	18	-6	3
4		30.1	869	714	2,9	41	-19	10
		30.2	909	704	2,8	38	-17	9
		30.3	888	666	2,2	34	-16	5
		średnia	887	695	2,6	37	-17	8

5		22.1	869	609	4	34	-8	19
		22.2	869	632	4,1	30	-5	20
		22.3	869	645	4,2	32	-6	20
		średnia	869	629	4,1	32	-6	20
6		34.1	888	526	4	49	-18	19
		34.2	869	625	4	50	-23	19
		34.3	869	543	4,5	46	-15	25
		średnia	876	564	4,1	48	-19	21

Oznaczenia: St – stal kadłubowa kategorii A, Al – stop AlZn5Mg2CrZr, Ds –drewno sosnowe, Dm – drewno sosnowe modyfikowane, $F_{s,max}$ – maksymalna siła ściskająca, $F_{r,max}$ –maksymalna siła rozciągająca



Rys. 8. Przykładowy wygląd próbki z pośrednią warstwą: a) drewna modyfikowanego, b) drewna naturalnego

DYSKUSJA NAD WYNIKAMI BADAŃ

Uzyskane wyniki badań odporności na ostrzał laminatów poliestrowo-szklanych wskazują, że dominującą rolę odgrywała grubość balistycznej osłony ceramicznej. Poprzez zastosowanie osłony ceramicznej o grubości 10 mm wykazano, że badane płyty składające się z osłon ceramicznych i LPS okazały się odporne na ostrzał. Najczęściej energię pocisku absorbowała tylko jedna płytka ceramiczna o wymiarach 10 x 50 x 50 mm lub 10 x 45 x 159 mm (rys. 5.). W przypadku, kiedy pocisk niszczył kilka płytek ceramicznych (rys. 7.), absorbowały one więcej energii uderzenia i pocisk wchodził na mniejszą głębokość w osłonę ceramiczną. Należy przypuszczać, że przy zastosowaniu do osłony balistycznej płytek ceramicznych o większej grubości, będą one absorbować więcej energii i siła uderzenia pocisku będzie szybciej się zmniejszać. Pozytywne wyniki uzyskano przy zastosowaniu warstwy gumy o grubości 5,5 mm między osłoną ceramiczną i laminatem. Guma absorbowała energię uderzenia fragmentów pocisku i ceramiki w laminat, tak że uderzenia te pozostawiały na laminacie tylko niewielkie ślady. W oparciu o przeprowadzone badania wykazano, że wprowadzenie dodatkowego zbrojenia w LPS warstwami tkaniny lub maty metalowej okazało się niecelowe, a jedynie zwiększyło rozwarstwienie laminatu w wyniku uderzenia pocisku. Tak więc można przyjąć, że laminaty poliestrowo-szklane z dodatkowymi zbrojeniami matą lub tkaniną metalową okazały się mniej odporne na rozwarstwienie niż sam laminat poliestrowo-szklany. Rozwarstwienie było mniejsze w płytach laminatu przeбитych pociskiem niż w płytach nieprzebitych pociskiem i głównie występowało na tylnej stronie płyt z LPS.

Uogólniając wyniki badań, można stwierdzić, że największą odporność na ostrzał z karabinu PK pociskiem o rdzeniu stalowym kal. 7.62 mm o masie 9,5 g i prędkości początkowej 830 m/s uzyskano przy ochronie laminatu balistycznymi płytkami ceramicznymi ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) o grubości 10 mm i warstwą gumy o grubości 5,5 mm.

WNIOSKI

Wyniki badań pozwalają na następujące wnioski:

1. Najlepszą ochronę laminatu poliestrowo-szklanego (LPS) o grubości 16 – 24 mm przed ostrzałem pociskami kal. 7.62 mm AP o masie 9,5 g i prędkości początkowej 830 m/s dają płytki z ceramiki balistycznej aluminiowej ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) o grubości 10 mm z warstwą gumy o grubości 5,5 mm.

2. Dla zmniejszenia energii uderzenia w LPS fragmentów pocisku i ceramiki celowe jest wprowadzenie między osłonę ceramiczną i laminat warstwy gumy o grubości około 5 mm.
3. Wzmacnianie LPS dodatkowym zbrojeniem metalowym nie jest celowe, gdyż zwiększa to rozwarstwienie LPS w wyniku ostrzału.
4. Warstwa drewna modyfikowanego jest bardziej efektywna niż warstwa drewna naturalnego. Uzyskuje się zwiększenie absorpcji energii pocisku i wzrost maksymalnej siły w tulei.
5. Proces niszczenia pośredniej warstwy drewna modyfikowanego pociskiem 7.62 mm ma zupełnie inny charakter (dominuje fragmentacja) aniżeli drewna naturalnego (dominuje perforacja).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chun I., Lam K. Y., *Dynamic response of fully clamped laminated composite plates subjected to low velocity impact of a mass*, „International Journal of Solids and Structures”, 1998, Vol. 35, No 11.
- [2] Goldsmith W., Dharan C. K. H., Chang H., *Quasi-static and ballistic perforation of fiber laminates*, „International Journal of Solids and Structures”, 1995, Vol. 32, No 1.
- [3] Kim S. J., Goo N. S., *Dynamic contact response of laminated composite plates according to the impactors shapes*, „International Journal of Impact Engineering”, 1997, Vol. 65, No 1.
- [4] Kolenda J., Kyzioł L. i inni., *Odporność udarowa i balistyczna nowego stopu aluminium i kompozytów z jego zastosowaniem*, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, IPBMO, sprawozdanie z pracy n-b, etap II, 2000.
- [5] Kyzioł L., *Badania odporności balistycznej kompozytów z zastosowaniem drewna modyfikowanego*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2004, nr 3, s. 23 – 35.
- [6] Patent UP RP nr 0641 AMW z 1999 r.: Zmodyfikowane stanowisko do badania odporności balistycznej materiałów, zwłaszcza okrętowych konstrukcyjno-osłonowych i pancernych, twórcy wynalazku: J. Fila, Z. Zatorski.
- [7] Zatorski Z., *Odporność na przebicie płyt jednorodnych*, materiały VII Krajowej Konferencji Mechaniki Pękania, „Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej – Mechanika”, 1999, z. 68, t. 2.

- [8] Zhu G., Goldsmith W., Dharan C. K. H., *Penetration o laminated kevlar by projectiles*, „International Journal of Solids and Structures”, 1992, Vol. 29, No 4.

ABSTRACT

The paper presents the results of investigations into shooting through nonmetallic materials such as ceramics, ceramics-rubber, polyester-glass laminates, and natural and modified wood. It was shown that a plate made of polyester-glass laminate of appropriate thickness, covered with ceramic tiles can be bullet-proof against 7.62 mm bullets. A many-layer plate with natural wood, as well as modified wood can not be regarded as bullet-proof material against 7.62 mm bullets.

Recenzent dr hab. inż. Michał Czech