

Lesław Kyziol

## **BADANIA ODPORNOŚCI BALISTYCZNEJ KOMPOZYTÓW Z ZASTOSOWANIEM DREWNA MODYFIKOWANEGO**

### **STRESZCZENIE**

W artykule przedstawiono wyniki badań balistycznych próbek 3-warstwowych. Warstwy zewnętrzne były ze stopów aluminium lub ze stali. Pośrednia warstwa była z drewna sosnowego lub kompozytu drewno-polimetakrylan metylu (D-PMM). Próbkę o średnicy 50 mm przestrzeliwano pociskiem kalibru 7,62 mm.

### **WSTĘP**

Badania odporności balistycznej z wykorzystaniem drewna przeprowadzono na przygotowanym stanowisku w Akademii Marynarki Wojennej.

Wyniki badań odporności udarowej próbek dzielonych z materiałów jednorodnych, takich jak stopy aluminium i stali, wykazały ich większą odporność aniżeli próbek litych, np. [1, 2, 4, 12]. Natomiast badania odporności udarowej przeprowadzone na podobnych próbkach z materiału niejednorodnego, jakim jest drewno, dowiodły, że próbki wykonane z drewna dzielonego wykazały mniejszą odporność udarową w stosunku do próbek litych [5].

Zasadniczym celem badań dotyczących odporności udarowej materiałów jest określenie ich przydatności na osłony balistyczne. Brak jest w literaturze danych o zastosowaniu materiałów drewnopodobnych jako składnika osłon o podwyższonej ułamko- i kuloodporności.

W militarnych elementach konstrukcyjnych występuje w znacznej ilości drewno jako materiał podstawowy lub wypełniający (wzmacniający) daną konstrukcję. Przykładami są mosty składane, schrony, elementy wyposażenia jednostek pływających. Drewno może być jednym ze składników osłon balistycznych składających się z kilku materiałów o różnej kombinacji.

W artykule określono wpływ zawartości polimeru w kompozycie D-PMM jako nowego alternatywnego materiału na odporność balistyczną próbek.

Celem niniejszego artykułu jest określenie właściwości balistycznych drewna modyfikowanego poprzez przestrzeliwanie próbek pociskiem kalibru 7,62 mm. Próby strzelania przeprowadzono na próbkach o średnicy 50 mm utworzonych z dwóch warstw stopu aluminium lub stalowych o grubości 6 mm każda i pośredniej warstwy 16 mm naturalnego drewna sosnowego lub kompozytu D-PMM o zawartości 56% polimetakrylanu metylu (PMM) [4, 6 – 11]. Próbki instalowano w tulei z tensometrycznym miernikiem siły, osadzonej w wahadle balistycznym. Jako efektywność względną próbki przyjęto wartość wyrażenia [4]

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

Średni (dla sześciu strzałów) kąt wychylenia wahadła przy przestrzeliwaniu próbek stalowych o grubości 12 mm wynosi 6, 19° [1].

Zdolność poszczególnych typów próbek do pochłaniania energii kinetycznej pocisku może stanowić miarę ich odporności balistycznej i podstawę do oceny ich 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].

## CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW

### 1. Stop AlZn5Mg2CrZr

Tabela 1. Parametry warstw ze stopu AlZn5Mg2CrZr [4]

Dane z atestu			Wartości pomierzone		
Grubość [mm]	Granica wytrzymałości na rozciąganie R <sub>m</sub> [MPa]	Granica plastyczności R <sub>0.2</sub> [MPa]	Grubość [mm]	Twardość KCV10	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
6	415	367	6.32	93.5	2.76
12	423	378	11.75	122.5	2.73

## 2. Stal kadłubowa kategorii A [4]

Tabela 2. Parametry warstw ze stali kadłubowej kategorii A

Dane z atestu			Wartości pomierzone		
Grubość [mm]	Granica wytrzymałości na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Granica plastyczności $R_e$ [MPa]	Grubość [mm]	Twardość KCV30	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
6	510	325	6.35	133	7.64
12	490	230	12.08	160.6	7.73

Tabela 3. Skład chemiczny stali kadłubowej kategorii A [%]

C	Mn	Si	P	S	Al	ATEST
0,14	0,69	0,21	0,008	0,01	0,045	149/99/S

Stal poddana była wyżarzaniu i walcowaniu na gorąco

W celu określenia wpływu zawartości PMM w próbce kompozytu na odporność balistyczną próbki trójwarstwowe początkowo zawierały warstwę pośrednią z naturalnego drewna sosnowego, a następnie z drewna modyfikowanego PMM. Właściwości mechaniczne drewna naturalnego podano w tabeli 4. Proces modyfikacji przeprowadzono po wcześniejszym klimatyzowaniu drewna do stanu wilgotności równej 10% [6, 9]. Wprowadzony monomer metakrylanu metylu (MM) do drewna poddany został procesowi polimeryzacji termicznej [10]. Probki poddano nasycaniu metakrylanem metylu stabilizowanym eterem metylowym hydrohinonu. Do 100 części wagowych (cz.w.) takiego MM dodaje się 0.1 cz.w. inicjatora dwunitrylu kwasu dwuizomasłowego i całość miesza się dokładnie.

Przebieg procesu nasycania:

- odpowiednio przygotowane próbki umieszczono w autoklawie;
- wytworzono podciśnienie 0.1[MPa] przez okres 1 godziny celem ewakuacji powietrza z drewna;
- wprowadzono do autoklawu przygotowany monomer.

Stopień nasycenia próbek monomerem regulowano czasem ich przebywania w autoklawie. Po nasyceniu poddano je procesowi polimeryzacji termicznej [10].

Proces nasycania i polimeryzacji przeprowadzono tak, by otrzymać kompozyt o różnych właściwościach mechanicznych [6 – 9]. Do badań balistycznych wyselekcjonowano kompozyt o największej zawartości polimeru MM – 56%. Właściwości mechaniczne drewna modyfikowanego podano w tabeli 5.

## 3. Sosnowe drewno naturalne

Tabela 4. Własności mechaniczne drewna sosnowego [6].

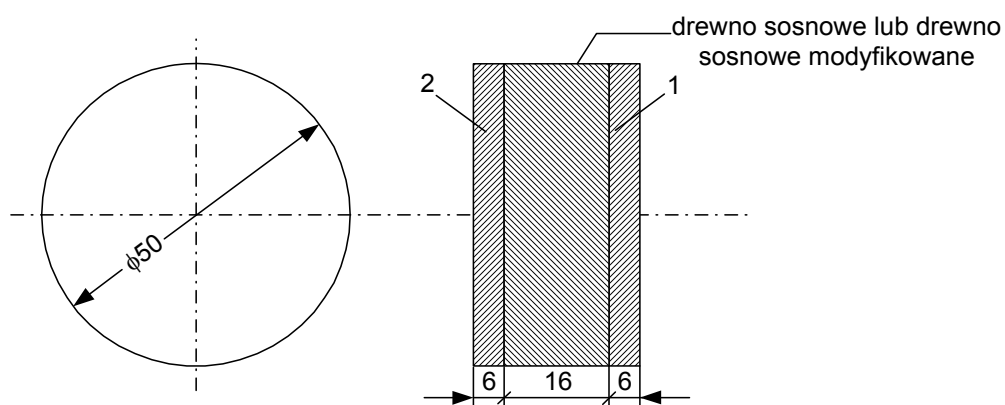
Dane z badań			Wartości pomierzone	
Grubość [mm]	Wytrzymałość na rozrywanie $R_m$ [MPa]	Granica plastyczności $R_e$ [MPa]	Twardość KCV30	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
16	95	–	50	0,56

## 4. Kompozyt drewno sosnowe-polimetakrylan metylu 56% [6].

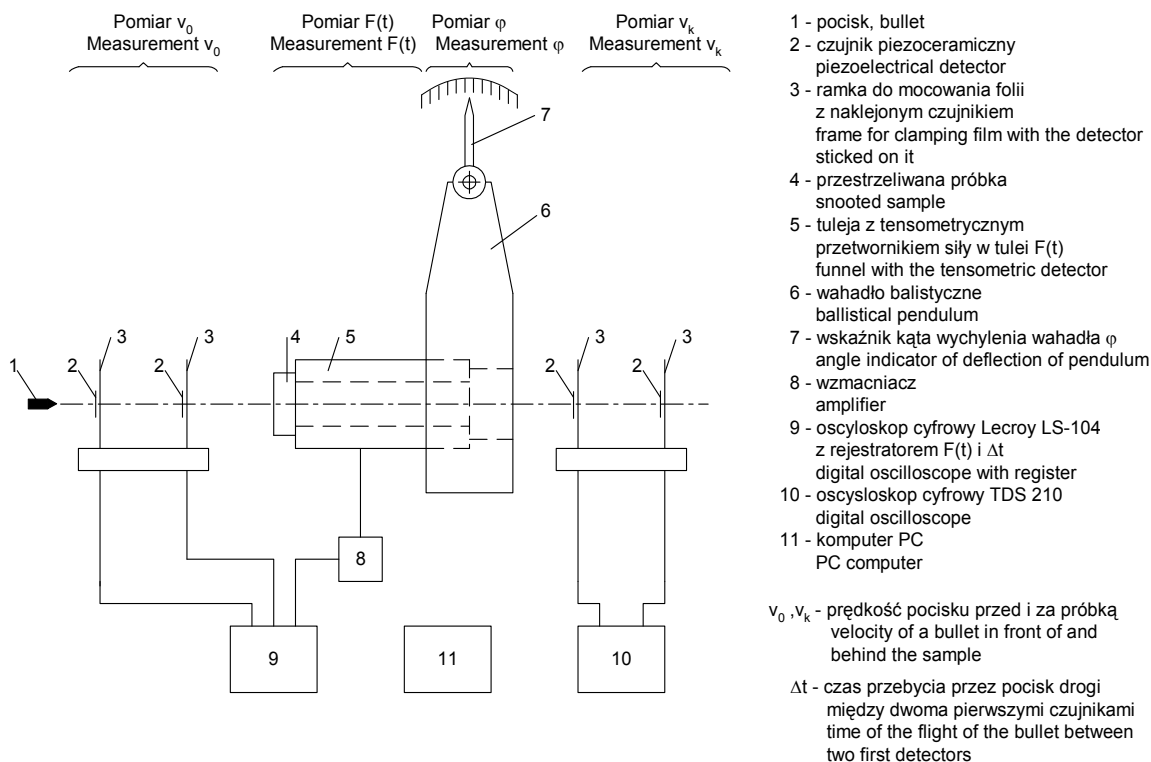
Tabela.5. Własności mechaniczne kompozytu D-PMM

Dane z badań			Wartości pomierzone	
Grubość [mm]	Granica wytrzymałości na rozrywanie $R_m$ [MPa]	Granica plastyczności $R_e$ [MPa]	Twardość KCV30	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
16	118	–	120	0,87

## PRZEBIEG BADAŃ

Rys. 1. Próbkki do badań balistycznych  
1, 2 – stal kadłubowa lub stop aluminium

Badaniom poddano próbki 3-warstwowe wykonane ze stopu aluminium i/lub ze stali kadłubowej z warstwą pośrednią. Warstwom nadano kształt krążków o średnicy 50 mm. Ich grubości były równe grubości płyt, z których zostały wycięte, tj. 6 mm i 12 mm. Warstwy pośrednie z drewna sosnowego i kompozytu D-PMM były grubości 16 mm (rys. 1.). Poszczególne warstwy połączone były za pomocą kleju na bazie żywicy „Polimal”.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 2.) 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  $\varphi$  wychylenia wahadła na skutek strzału (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;

$\varphi$  – maksymalny kąt wychylenia wahadła,

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

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

Przy małych kątach wartość sinusa jest praktycznie równa jego argumentowi, stąd w kolumnie (9) podano wartości:

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

### WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Równolegle prowadzone badania przy strzelaniu pociskiem (z produkcji seryjnej) o masie 9,5 g typu ŁPS kalibru 7,62 mm z rdzeniem stalowym próbek 3-warstwowych z warstwą pośrednią z piasku lub szkła skruszonego wykazały, że prędkości początkowe pocisku wahały się w granicach 794 – 1000[m/s], a maksymalne wartości siły w tulei wyniosły  $F_{s_{max}} = 93$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -54$ [kN] (stal-piasek-stal) do  $F_{s_{max}} = 35$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -19$ [kN] (aluminium-szkło-aluminium). Wartości te odczytywano na ekranie oscyloskopu [4].

Tabela 6. Wyniki badań balistycznych

Nr serii	Rodzaj próbki	Nr próbki	Prędkość pocisku		Kąt wychyl. wahadła	Siła uderzenia		Efektywność próbki									
			przed próbką	za próbką		maks.	min.										
			$V_0$ [m/s]	$V_k$ [m/s]	$\varphi$ [deg]	$F_{s_{max}}$ [kN]	$F_{r_{min}}$ [kN]	$\epsilon$ [%]									
1	2	3	4	5	6	7	8	9									
1	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>6</td><td>16</td><td>6</td></tr> <tr><td>St</td><td>Ds</td><td>St</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>	6	16	6	St	Ds	St				14.1	806,45	370,85	6	57,72	-21,26	44,46
		6	16	6													
		St	Ds	St													
14.2	862,06	394,78	6	49,62	-18,23	44,46											
14.3	793,65	366,97	5,5	52,66	-16,20	37,35											
średnia	820,72	377,53	5,83	53,33	-18,56	42,09											
2	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>6</td><td>16</td><td>6</td></tr> <tr><td>St</td><td>Dm</td><td>St</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>	6	16	6	St	Dm	St				26.1	877,2	434,78	6	64,81	-29,56	44,46
		6	16	6													
		St	Dm	St													
26.2	892,85	374,53	6,5	72,92	-33,34	52,18											
26.3	885,65	410,56	6	67,85	-34,43	44,46											
średnia	885,23	406,62	6,16	68,52	-32,44	47,03											

1	2	3	4	5	6	7	8	9						
3	<div style="text-align: center;">6 16 6</div> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="width: 33px; height: 33px;">Al</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">Ds</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">Al</td> </tr> <tr> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> </tr> </table>	Al	Ds	Al				18.1	851,06	781,25	1,5	13,79	-5,69	2,77
		Al	Ds	Al										
		18.2	888,87	745,54	2	21,90	-6,45	4,94						
18.3	888,89	765,54	1,5	19,44	-6,48	2,77								
	średnia	876,28	764,11	1,66	18,37	-6,20	3,49							
4	<div style="text-align: center;">6 16 6</div> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="width: 33px; height: 33px;">Al</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">Dm</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">Al</td> </tr> <tr> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> </tr> </table>	Al	Dm	Al				30.1	869,6	714,28	2,9	41,32	-19,80	10,38
		Al	Dm	Al										
		30.2	909,09	704,22	2,8	38,08	-17,82	9,68						
30.3	888,89	666,66	2,2	34,03	-16,20	5,97								
	średnia	887,19	695,05	2,63	37,81	-17,94	8,67							
5	<div style="text-align: center;">6 16 6</div> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="width: 33px; height: 33px;">Al</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">Ds</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">St</td> </tr> <tr> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> </tr> </table>	Al	Ds	St				22.1	869,6	609,75	4	34,84	-8,10	19,76
		Al	Ds	St										
		22.2	869,6	632,91	4,1	30,78	-5,67	20,76						
22.3	869,6	645,34	4,2	32,81	-6,34	20,15								
	średnia	869,6	629,33	4,1	32,81	-6,70	20,22							
6	<div style="text-align: center;">6 16 6</div> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="width: 33px; height: 33px;">Al</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">Dm</td> <td style="width: 33px; height: 33px;">St</td> </tr> <tr> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> <td style="border-top: 1px dashed black;"></td> </tr> </table>	Al	Dm	St				34.1	888,89	526,31	4	49,42	-18,63	19,76
		Al	Dm	St										
		34.2	869,6	625,0	4	50,23	-23,49	19,76						
34.3	869,6	543,47	4,5	46,99	-15,39	25								
	średnia	876,03	564,92	4,16	48,88	-19,17	21,51							

Oznaczenia:

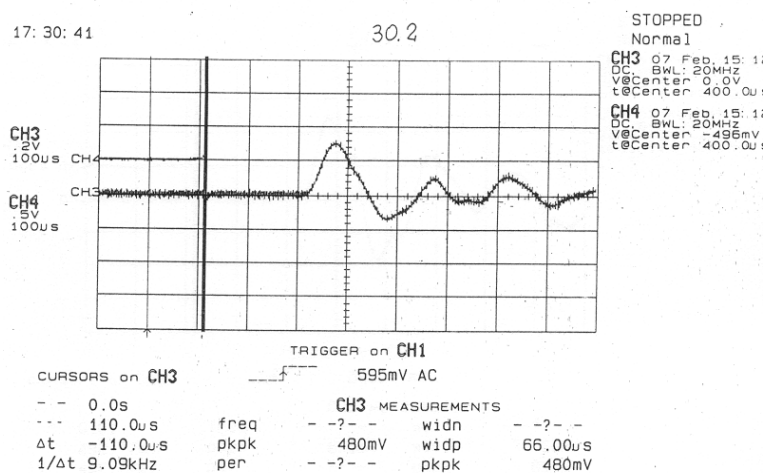
- St – stal kadmowa kategorii A  
Al. – stop AlZn5Mg2CrZr  
Ds. – drewno sosnowe  
Dm – drewno sosnowe modyfikowane  
 $F_{smax}$  – maksymalna siła ściskająca  
 $F_{rmax}$  – maksymalna siła rozciągająca



Zbiorcze wyniki badań balistycznych podano w tabeli 6. Dla próbek poddanych przestrzeliwaniu, których warstwa środkowa (wewnętrzna) była z drewna naturalnego lub modyfikowanego, prędkości początkowe pocisku wahały się w granicach 790 – 909[m/s], a maksymalne wartości siły w tulei wynosiły od  $F_{S_{max}} = 68$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -32$ [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. 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.

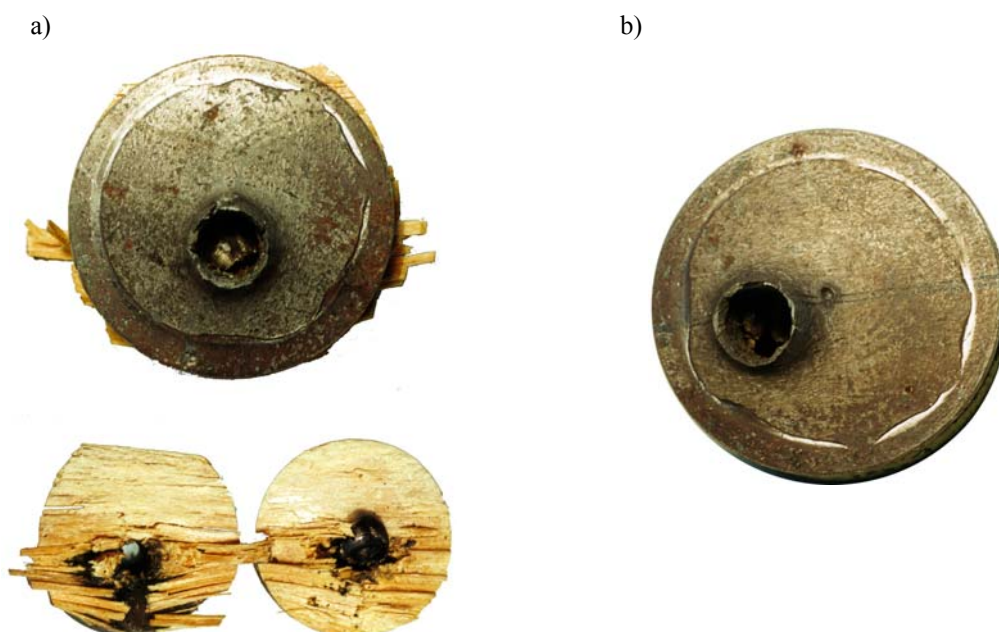
Porównując odporność na przestrzeliwanie tylko drewna naturalnego i modyfikowanego dla jednakowych warstw zewnętrznych (stal lub stop aluminium) można stwierdzić, że drewno modyfikowane wykazało znacznie większą odporność aniżeli naturalne:

- dla warstw (stal-drewno naturalne-stal)  $F_{S_{max}} = 53$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -18$ [kN], (stal-drewno modyfikowane-stal)  $F_{S_{max}} = 68$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -32$ [kN];
- dla warstw (aluminium-drewno naturalne-aluminium)  $F_{S_{max}} = 18$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -6$ [kN], (aluminium-drewno modyfikowane-aluminium)  $F_{S_{max}} = 38$ [kN] i  $F_{r_{max}} = -18$ [kN].



Rys. 3. Przykładowy przebieg siły w funkcji czasu (próbka 3-warstwowa aluminium-drewno modyfikowane-aluminium)

Załączono przykładowo oscylogram (rys. 3.) przebiegu siły w funkcji czasu. Jak zaznaczono na oscylogramie 30.2, zawiera on także informacje o odstępie czasu  $\Delta t$  niezbędnym do przebycia przez pocisk odległości 100 mm pomiędzy dwoma czujnikami piezoceramicznymi przed próbką.



Rys. 4. Przykładowy wygląd próbki z pośrednią warstwą:  
a) drewna modyfikowanego, b) drewna naturalnego

Na rysunku przedstawiono wygląd zniszczonej pośredniej warstwy drewna modyfikowanego i drewna naturalnego. W przypadku niszczenia pośredniej warstwy drewna modyfikowanego (rys. 4a) dominuje fragmentacja. Warstwa pośrednia stawiająca opór uległa zniszczeniu. Obrazem zniszczenia są widoczne na zdjęciu fragmenty materiału. Warstwa pośrednia z drewna naturalnego (rys. 4b) doznała perforacji. Pocisk nie natrafił na żaden opór ze strony warstwy pośredniej.

## WNIOSKI

1. Próbki stalowe lub aluminiowe z warstwą drewna modyfikowanego w porównaniu z analogicznymi próbkami z drewna naturalnego stawiają pociskowi

większy opór (maksymalna siła ściskająca w tulei jest znacznie większa), ale na skutek dłuższego kontaktu z pociskiem absorbują nieco większą porcję jego energii (impuls uderzenia pocisku i kąt wychylenia wahadła balistycznego są większe).

2. Warstwa drewna modyfikowanego jest bardziej efektywna niż warstwa drewna naturalnego. Uzyskuje się zwiększenie absorpcji energii pocisku i wzrost maksymalnej siły w tulei.
3. Warstwa drewna modyfikowanego daje podobny efekt jak warstwa piasku lub kruszonego szkła.
4. Proces niszczenia pośredniej warstwy o średnicy 50 mm drewna modyfikowanego pociskiem 7,62 mm ma zupełnie inny charakter (dominuje fragmentacja) aniżeli drewna naturalnego (dominuje perforacja).

**Słowa kluczowe:**

drewno sosny, kompozyt drewno-polimetakrylan metylu, próbki wielowarstwowe, własności balistyczne

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Almohandes A. A., Abdel-Kader M. S., Eleiche A. M., *Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates*, „Composites”, part B, 27B, 1996.
- [2] Dobrociński S., Jurczak W., Kolenda J., *Badania odporności udarowej dwuwarstwowych próbek ze stopu AlZn5Mg2CrZr*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2000, nr 2.
- [3] Dobrociński S., Kyziół L., *Wpływ modyfikacji drewna na rozkład naprężeń*, XXIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczo-Budownictwo Podziemne na początku XXI wieku, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Łądek Zdrój 2001.
- [4] Kolenda J., Kyziół L. i inni, *Odporność udarowa i balistyczna nowego stopu aluminium i kompozytów z jego zastosowaniem*, Wydział Mechaniczno-Elektryczny IPBMO, sprawozdanie z pracy n.b. 2, 2000.
- [5] Kyziół L., *Odporność udarowa próbek z drewna*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2001, nr 2.

- [6] Kyzioł L., *Wpływ zawartości metakrylanu metylu na wybrane własności drewna modyfikowanego*, VII Sympozjum Wojskowej Techniki Morskiej, Gdynia 20 – 21 X 1999.
- [7] Kyzioł L., *The influence of polymethylmethacrylate content in a wood composite on its impact strength*, Polish Academy of Sciences-Branch in Gdansk, „Marine Technology Transactions”, Vol. 12, 2001.
- [8] Kyzioł L., *Wpływ polimetakrylanu metylu na nasiąkliwość i wytrzymałość kompozytu przeznaczonego na konstrukcje okrętowe*, „Przemysł Drzewny”, 2001, nr 7 – 8.
- [9] Kyzioł L., *Examination results of methylmethacrylate concentration in modified woods*, Polish Academy of Sciences-Branch in Gdansk, „Marine Technology Transactions”, Vol. 11, 2000.
- [10] Kyzioł L., Kowalski S. J., *Mechanical properties of modified wood*, IUTAM Symposium on Theoretical and Numerical Methods in Continuum Mechanics of Porous Materials, University of Stuttgart, Germany, September 5 – 10, 1999.
- [11] Kyzioł L., *Distribution of methylmethacrylate concentration in a porous material*, Polish Academy of Sciences-Branch in Gdansk, „Marine Technology Transactions”, Vol. 10, 1999.
- [12] Pogodin-Aleksiejew D. I., *Wytrzymałość dynamiczna i kruchość metali*, WNT, Warszawa 1969.

#### ABSTRACT

The paper presents the results ballistic investigations of 3-layer samples. External layers were made of aluminum alloys or steel. The intermediary layer was made from pine wood or wood-polimethacrylate methyl composite. Samples of 50 mm in diameter were shot through with a 7.62 mm round.

Recenzent dr hab. inż. Michał Czech