

**Wojciech Jurczak**  
**Akademia Marynarki Wojennej**

**ZMODYFIKOWANY KOMPOZYT  
POLIESTROWO-SZKLANY  
JAKO PRZEKŁADKA BALISTYCZNA  
DLA STOPU  $AlZn_5Mg_2CrZr$**

**STRESZCZENIE**

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań odporności balistycznej trójwarstwowych próbek o średnicy 50 mm przestrzeliwanych pociskiem kalibru 7,62 mm. Warstwy zewnętrzne, o grubości 6mm każda, wykonane były ze stopu  $AlZn_5Mg_2CrZr$ , natomiast wymienną warstwę środkową wykonano z kompozytu poliestrowo-szklanego przed i po jego modyfikacji, co polegało na dodaniu 20% recyklatu. Przekładka balistyczna wykonana ze zmodyfikowanego kompozytu poliestrowo-szklanego nie polepsza odporności balistycznej badanego stopu  $AlZn_5Mg_2CrZr$  w porównaniu do przekładki z kompozytu poliestrowo-szklanego.

**WSTĘP**

Rezultaty przeprowadzonych w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni porównawczych badań odporności balistycznej stopu  $AlZn_5Mg_2CrZr$  świadczą o tym, że stop ów pod wieloma względami osiąga bardzo dobre właściwości eksploatacyjne, ale ma niską odporność balistyczną [8]. Porównanie badanego stopu aluminium ze stalą kadłubową zwykłej wytrzymałości wypada niekorzystnie dla rzeczonoego stopu w zakresie badań udarności [5]. Stwierdzono jednak [1, 3, 5], że możliwe jest zwiększenie jego odporności na uszkodzenia w przypadku kolizji oraz uderzeń odłamków i pocisków poprzez zastąpienie osłony 1-warstwowej osłoną złożoną z dwóch dwukrotnie cieńszych warstw z tego samego materiału.

Dalszy wzrost odporności balistycznej badanego stopu aluminium możemy uzyskać, stosując warstwę ochronną z innego materiału, ale uwzględniając zmniejszenie odłamkowości. Takim tanim materiałem, będącym jednocześnie odpadem, jest kompozyt poliestrowo-szklany pochodzący z wycofywanych trałowców projektu 664 [6]. Właściwości kompozytu [2] wskazują na jego dobre właściwości mechaniczne i udarowe, a dodatkowo na dobre tłumienie drgań i dużą zdolność do pochłaniania energii uderzenia. Zalety te skłoniły autora do przeprowadzenia badań balistycznych stopu  $AlZn5Mg2CrZr$  z zastosowaniem kompozytu poliestrowo-szklanego, a także jego recyklatu uzyskanego w technologii opracowanej przez Akademię Morską [7]. Przechodzone próbki składały się z luźno stykających się jednej lub dwóch warstw stopu i warstwy kompozytu lub jego modyfikacji z recyklatu. Zachowano zasadę, że pierwszą warstwę od kierunku uderzenia pocisku stanowi najmocniejszy materiał tej przechodzonej kompozytowej próbki [4, 7], a był nim stop aluminium. W prezentowanej pracy ograniczono się do 1-, 2- i 3-warstwowych próbek.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników pomiarów przeprowadzonych przy strzelaniu pociskiem kalibru 7,62 mm do próbek o średnicy 50 mm utworzonych z dwóch warstw z wyżej wymienionego stopu i pośredniej warstwy 12 mm kompozytu poliestrowo-szklanego lub 12 mm kompozytu poliestrowo-szklanego zmodyfikowanego recyklatem. Próbkę instalowano w tulei z tensometrycznym miernikiem siły, osadzonej w wahadle balistycznym (rys. 1.).

We wcześniejszych badaniach prowadzonych w AMW i opublikowanych w pracy [5] wykazano, iż całkowita energia kinetyczna pocisku zaabsorbowana przez próbkę i wahadło powoduje wychylenie wahadła do położenia kąтового  $\varphi_{\max} = 9^\circ$ .

Energia przekazywana wahadłu przez pocisk w czasie przechodzenia próbki jest równa energii potencjalnej wahadła w najwyższym jego położeniu. Wynosi ona:

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

gdzie:  $m$  – masa wahadła;  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie;  
 $l$  – odległość środka masy wahadła od osi obrotu;  
 $\varphi$  – maksymalny kat wychylenia wahadła.

Jako efektywność względną poszczególnych próbek przyjęto wyrażenie:

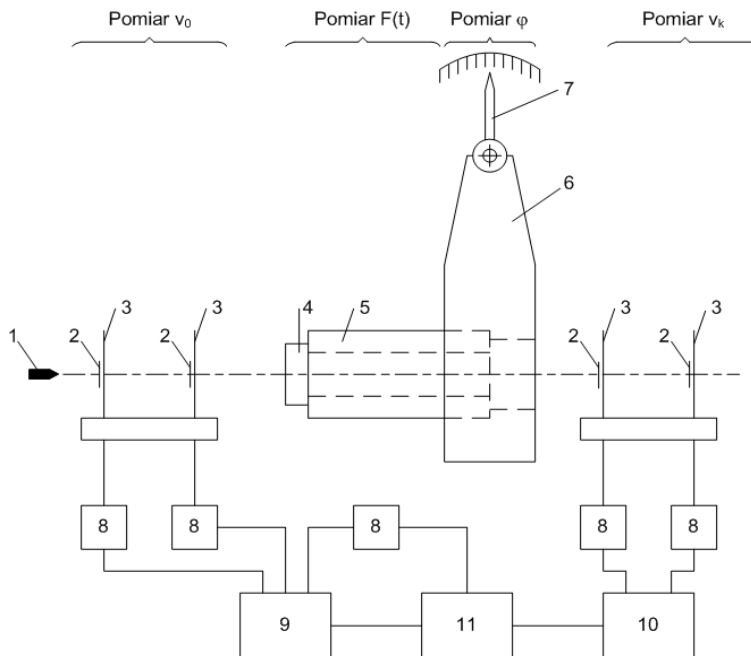
$$\dot{\epsilon} = \frac{1 - \cos\varphi}{1 - \cos 6,19^\circ} \cdot 100\% = \frac{\sin^2 0,5\varphi}{\sin^2 0,5 \cdot \alpha} \cdot 100\%,$$

gdzie  $\alpha$  jest średnim kątem maksymalnego wychylenia wahadła przy przestrzeliwaniu próbek aluminiowych z badanym rodzajem przekładki kompozytowej.

### 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), osadzonej 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. Docisk ma zapewnić przyleganie próbki do czoła tulei dynamometru, ale podparcie próbki jako płyty jest podparciem przegubowym. Badań na temat wpływu sztywnego zamocowania próbki w tulei nie prowadzono.

Do rejestracji parametrów przestrzeliwania użyto dodatkowo SEFRAM-u, oscyloskopu do badań szybkozmiennych przebiegów, który na rysunku 1. został opisany jako PC.



Rys. 1. Schemat wahała balistycznego:

1 – pocisk, 2 – czujnik piezoelektryczny, 3 – ramka do mocowania folii z naklejonym czujnikiem, 4 – przestrzeliwana próbka, 5 – tuleja z tensometrycznym przetwornikiem siły w tulei  $F(t)$ , 6 – wahało balistyczne, 7 – wskaźnik kąta wychylenia wahała  $\varphi$ , 8 – wzmacniacz, 9 – oscyloskop cyfrowy z rejestratorem  $F(t)$  i  $\Delta t$ , 10 – oscyloskop cyfrowy, 11 – SEFRAM 8416 16-kanalowy rejestrator przebiegów szybkozmiennych,  $v_0$ ,  $v_k$  – prędkość pocisku przed i za próbka,  $\Delta t$  – czas przebycia przez pocisk drogi między dwoma pierwszymi czujnikami

## BADANE MATERIAŁY

### Stop AlZn5Mg2CrZr

Obszerne informacje o właściwościach stopu podano w [7]. Poniżej zestawiono jedynie jego podstawowe parametry.

Tabela 1. Parametry warstw ze stopu AlZn5Mg2CrZr

Dane z atestu				Wartości pomierzone		
Grubość [mm]	Wytrzymałość na rozrywanie $R_m$ [MPa]	Granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]	Wydłużenie jednostkowe $A_5$ [%]	Grubość [mm]	Udarność KCV10	Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]
6	415	367	14	6.32	93.5	2760

### Kompozyt poliestrowo-szklany

Podstawowe jego parametry podano w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry warstwy kompozytu poliestrowo-szklanego

Dane z atestu			Wartości pomierzone	
Grubość [mm]	Wytrzymałość na rozrywanie $R_m$ [MPa]	Wydłużenie jednostkowe $A_5$ [%]	Udarność KCV	Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]
12	100 – 600*	1,1	0,4	1500

\* zależnie od jakości i rodzaju wzmocnienia

Technologię wytwórstwa kompozytu poliestrowo-szklanego podano w [7].

### Zmodyfikowany kompozyt poliestrowo-szklany

Podstawowe parametry tego nowego materiału wyznaczono w ramach badań własnych i podano w tabeli 3., a pod nią ogólnie opisano jego technologię wytwórstwa.

Tabela 3. Parametry warstwy zmodyfikowanego kompozytu poliestrowo-szklanego

Wartości wyznaczone		
Grubość [mm]	Wytrzymałość na ściskanie $R_c$ [MPa]	Skrócenie $S$ [%]
12	96	0,4

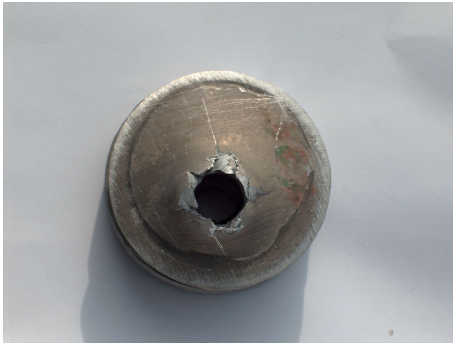
Technologię wytwórstwa zmodyfikowanego kompozytu otrzymanego przez dodanie w określonym stosunku recyklatu (powstałego z rozdrobnienia, a następnie zmielenia dużej bryły wykonanej z kompozytu poliestrowo-szklanego) do nowo powstałego kompozytu na bazie żywicy poliestrowej i włókna szklanego opracowano w Akademii Morskiej i stanowi ona etap pracy badawczej zastrzeżony prawami autorskimi.

## **WYNIKI BADAŃ**

Wyniki badań przy strzelaniu pociskiem (z produkcji seryjnej) o średniej masie 9,6 g typu ŁPS kalibru 7,62 mm z rdzeniem stalowym zestawiono w tabeli 4. w kolumnach 4 – 8. Prędkości początkowe pocisku (kolumna 4) wahały się w grani-

cach 769 – 888 m/s. Maksymalne wartości siły w tulei (kolumny 7 i 8) odczytywano na ekranie oscyloskopu. Załączono przykładowe oscylogramy przebiegu tej siły w funkcji czasu. Jak zaznaczono na oscylogramie 1, zawierają one także informacje o odstępie czasu  $\Delta t$  niezbędnym do przebycia przez pocisk odległości 100 mm pomiędzy dwoma czujnikami piezoceramicznymi przed próbką.

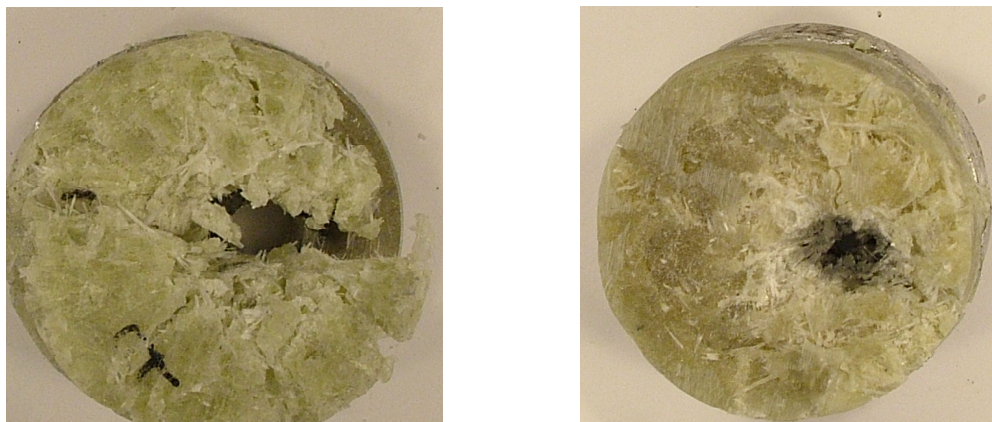
Na rysunkach 2. – 4. przedstawiono przykładowe efekty penetracji pocisku stalowego ŁPS 7,62 mm w badanych próbkach z przekładkami.



Rys. 2. Sposób penetracji (przebicia) próbki dzielonej (2x6 mm, części klejone żywicą) badanego stopu AlZn5Mg2CrZr pociskiem ŁPS 7,62 mm



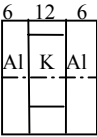
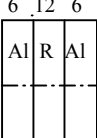


Rys. 3. Obszarowa delaminacja wzmocnień kompozytu poliestrowo-szklanego K zastosowanego jako 12 mm przekładki balistycznej po przebiciu pociskiem ŁPS 7,62 mm próbki dzielonej (2x6 mm) stopu AlZn5Mg2CrZr



Rys. 4. Obszarowe kruche pęknięcia zmodyfikowanego kompozytu poliestrowo-szklanego R zastosowanego jako 12 mm przekładki balistycznej po przebicium pociskiem LPS 7,62 mm próbki dzielonej (2x6 mm) stopu AlZn5Mg2CrZr

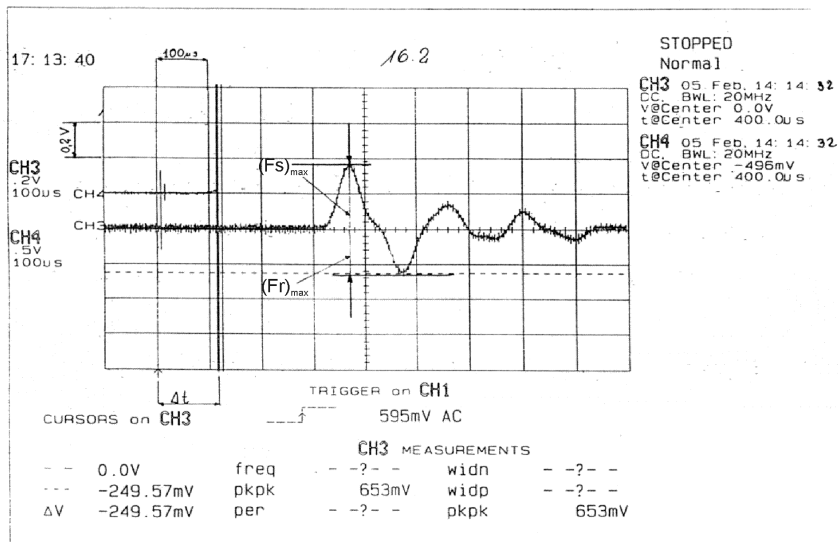
Tabela 4. Wyniki badań balistycznych

Nr serii	Rodzaj próbki (podział po grubości)	Nr próbki	Prędkość pocisku przed próbka/za próbka		Kąt wychylenia wahadła $\phi$ [deg]	Siła w tulei		Efektywność względna próbki $\epsilon$ [%]
			$V_0$ [m/s]	$V_k$ [m/s]		(Fs)max [kN]	(Fr)max [kN]	
1	12 	1.1.	888	714	1	12,96	-8,91	2,609
		1.2.	890		1	13,77		2,609
		średnia	<b>889</b>	<b>714</b>	<b>1</b>	<b>13,36</b>	<b>-8,91</b>	<b>2,609</b>
2	6 6 	2.1	888	704	1,5	19,44	-11,34	5,87
		2.2 (klejone)	869	746	1,2	21,87	-12,15	3,76
		średnia	<b>879</b>	<b>725</b>	<b>1,35</b>	<b>20,65</b>	<b>-11,74</b>	<b>4,76</b>
3	6 12 6 	3.1	823	619	1,72	29,56	-13,58	7,73
		3.2 (klejone)	802	608	1,64	31,89	-11,4	7,12
		3.3	796	601	1,52	35,02	-12,8	6,13
		średnia	<b>807</b>	<b>609</b>	<b>1,92</b>	<b>32,16</b>		<b>7,02</b>
4	6 12 6 	4.1 (klejone)	787	-	0,96	41,9	-20,2	2,41
		4.2	769	-	1,26	37,6	-10,4	4,15
		4.3	794	-	0,99	28,4	-9,6	2,63
		średnia	<b>783</b>		<b>0,92</b>	<b>35,97</b>		<b>3,06</b>

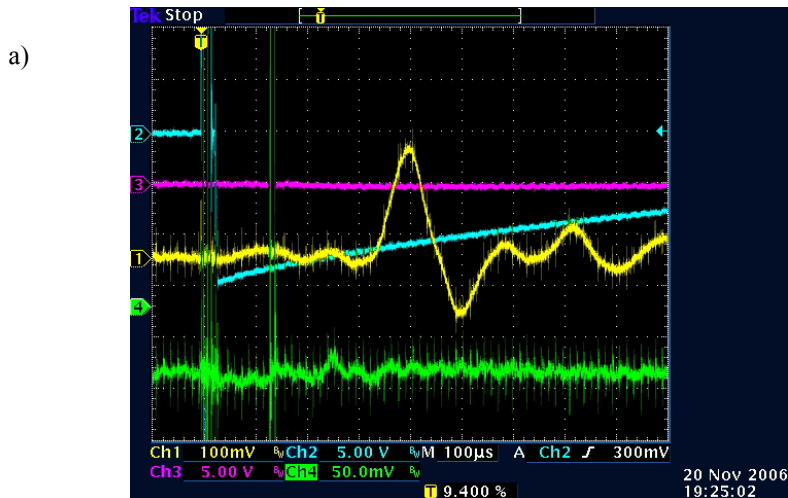
Al stop AlZn5Mg2CrZr g=6mm, K kompozyt poliestrowo-szklany g=12mm, R zmodyfikowany kompozyt g=12mm  
 (Fs)max maksymalna siła ściskająca  
 (Fr)max maksymalna siła rozciągająca

## WYBRANE OSCYLOGRAMY BADAŃ

Na rysunku 5. przedstawiono sposób odczytywania parametrów przebijalności z zarejestrowanych oscylogramów. Na kolejnych (rys. 6a – c) zaprezentowano oscylogramy z przestrzeliwania próbek dzielonych stopu AlZn5Mg2CrZr i przekładką balistyczną w postaci zmodyfikowanego kompozytu z udziałem 20% recyklatu.

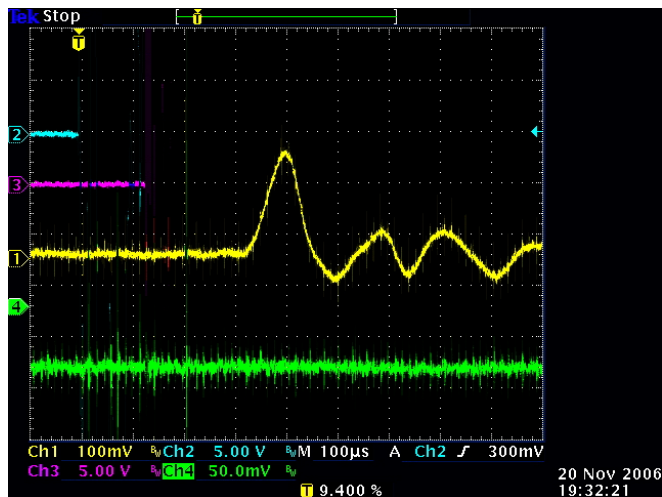


Rys. 5. Sposób odczytywania zapisów parametrów balistycznych na oscylogramach z oscyloskopu Lecroy LS-104

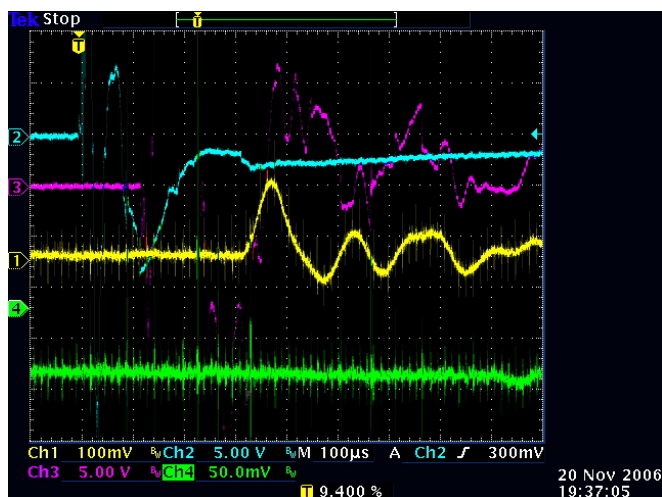




b)



c)



Rys. 6. Oscylogramy SEFRAM-u z przestrzeliwania 3 próbek (a, b, c) zmodyfikowanego kompozytu poliestrowo-szklanego R zastosowanego jako 12 mm przekładka balistyczna próbki dzielonej (2x6 mm) stopu AlZn5Mg2CrZr

## DYSKUSJA CELOWOŚCI BADAŃ I WNIOSKI

Kompozyt poliestrowo-szklany wykazuje dobre właściwości mechaniczne i eksploatacyjne, a jego wysoki współczynnik wytrzymałości względnej  $R/\rho$  (tabela 2.) i wysoka trwałość spowodowała, że w latach 70. na dużą skalę wykorzystywano ten

materiał także w budownictwie okrętowym. Obecnie obiekty wykonane z kompozytu poliestrowo-szklanego ze względu na przestarzały kształt i niedostosowanie do współczesnych wymogów stanowią kłopotliwy pod względem ekologicznym odpad, który należy wtórnie wykorzystać. Uwzględniając bardzo dobre właściwości kompozytu poliestrowo-szklanego do tłumienia drgań, zastosowano go jako materiał na osłonę balistyczną. Stąd w przeprowadzonych badaniach balistycznych porównano pod względem odporności na udarowe obciążenie kompozyt poliestrowo-szklany i jego wtórne wykorzystanie (zmodyfikowany kompozyt poliestrowo-szklany z recyklatem). Przeprowadzone badania wykazały:

1. Zastosowanie kompozytu poliestrowo-szklanego podwyższa odporność balistyczną badanego stopu  $AlZn5Mg2CrZr$ .
2. Klejenie kompozytu żywicą poliestrową niemetalicznej przekładki balistycznej do chronionego stopu aluminium nie ma wpływu na jego odporność balistyczną. Klejenie z wykorzystywaniem żywicy (epoksydowej, poliestrowej) jest powszechnym sposobem mocowania niemetalicznych przekładek balistycznych do chronionych metalicznych materiałów konstrukcyjnych. W badaniach luźno połączone elementy składowe badanych próbek skleiono żywicą poliestrową, a wyniki przestrzelania luźnych i sklejonnych próbek nie wykazywały istotnych różnic.
3. Warstwa zmodyfikowanego kompozytu poliestrowo-szklanego nie jest efektywniejsza w odporności balistycznej niż warstwa kompozytu poliestrowo-szklanego o tej samej grubości.

Dodanie 20% recyklatu o ustalonej gradacji (jako zagospodarowanie odpadu) do nowo wytworzonego kompozytu poliestrowo-szklanego (zmodyfikowany) nie podwyższa odporności balistycznej badanego stopu  $AlZn5Mg2CrZr$  w stosunku do przekładki z kompozytu poliestrowo-szklanego. Wartość efektywności względnej (tabela 4.) sugeruje, że odległość, jaką stwarza grubość (12 mm) przekładki z recyklatem, wręcz pogarsza efekt odporności balistycznej uzyskanej już przy dzieleniu (w tej samej grubości) stopu  $AlZn5Mg2CrZr$ . Takie efekty są wynikiem bardzo krótkiego oddziaływania pocisku na wahadło (małe kąty wychYLENIA), bo chociaż siła zarejestrowana przez dynamometr jest większa, to odchylenie wahadła mniejsze w stosunku do tych samych parametrów dla kompozytu poliestrowo-szklanego (tabela 4.).

4. Uzyskano znaczny zakres odchylenia wyników badań odporności balistycznej stopu  $AlZn5Mg2CrZr$  z zastosowaniem silnie niejednorodnej kruchej przekładki

zmodyfikowanego kompozytu poliestrowo-szklanego. Badania dotyczące tego materiału należy przeprowadzić w szerszym zakresie, tj. przy większej liczbie próbek i w tych samych warunkach badawczych (np. taka sama aparatura kontrolno-pomiarowa, naboje z jednej serii produkcyjnej).

## 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] Dobrocinski S., Fila J., Zatorski Z., *Metodyka i wyniki badań kuloodporności konwencjonalnych tworzyw konstrukcyjnych*, II Konferencja Naukowo-Techniczna „Odporność udarowa konstrukcji”, Rynia, grudzień 1998, WAT, Warszawa 1998.
- [3] Dobrociński S., Jurczak W., Kolenda J., *Badania odporności udarowej dwuwarstwowych próbek ze stopu AlZn5Mg2CrZr*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2000, nr 2.
- [4] Gooch W. A., Filbey G. L., Senf H., Weidemaier P., Rothenhäusler H., *Ballistic resistance of laminated steel targets experiments and numerical calculations*, Proc. of 14<sup>th</sup> Int. Symp. Ballistics '93, Vol. 2, Québec Canada, 1993.
- [5] Jurczak W., Kolenda J., *Porównawcze badania odporności balistycznej jedno- i dwuwarstwowych próbek ze stali kadłubowej kategorii A i stopu AlZn5Mg2CrZr*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2001, nr 2.
- [6] Jurczak W., Piaseczny L., *The recycling problems of the ship's polymers constructions*, artykuł zamówiony dla Grupy Roboczej Ochrony Środowiska Połączonej Rady Rodzajów Sił Zbrojnych Agencji Standaryzacji NATO (pismo MON 1371/V), 2004.
- [7] Jurczak W., Rutkowska M., Jastrzębska M., *Recycling of ships made of glass reinforced polyester*, Papers International Conference „Recycling of Ships and other Maritime Structures”, The Royal Institution of Naval Architects, Londyn, 4 – 5 V 2005, pp. 115 – 117.
- [8] Jurczak W., *Badania odporności balistycznej stopu AlZn5Mg2CrZr przeznaczonego do budowy okrętów*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2005, nr 1.
- [9] Jurczak W., *The influence of chemical composition and heat treatment on the mechanical properties and resistance to stress corrosion of sheets made of Al-Zn-Mg alloys*, „Marine Technology Transactions”, 1999, Vol. 10, p. 31.

## ABSTRACT

The article presents the results of ballistic resistance investigations on three-layered samples with diameter of 50 mm, penetrated with a 7,62 mm bullet. Outer layers, each of 6 mm in thickness, were made of alloy AlZn5Mg2CrZr. Replaceable interlayer was made of polyester-glass composite before and after its modification, which required addition of 20% of recycled agent. It was shown that the modified interlayer made of polyester-glass composite does not improve ballistic resistance of the investigated alloy AlZn5Mg2CrZr, as compared to the non-modified one.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stanisław Dobrociński