

Wojciech Jurczak

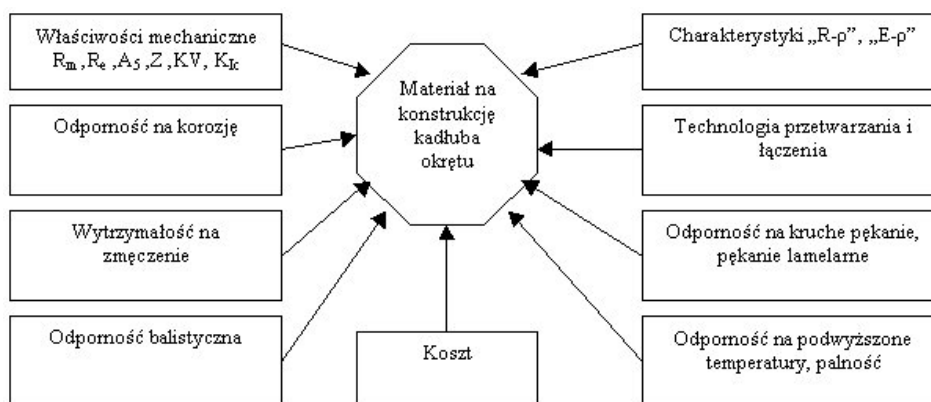
BADANIA ODPORNOŚCI BALISTYCZNEJ STOPU $AlZn5Mg2CrZr$ PRZEZNACZONEGO DO BUDOWY OKRĘTÓW

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów przeprowadzonych przy strzelaniu pociskiem kalibru 7,62 mm do próbek o średnicy 50 mm i grubości 12 mm oraz próbek dwuwarstwowych o grubości 2x6 mm wykonanych ze stopu $AlZn5Mg2CrZr$ na specjalistycznym stanowisku badawczym.

WSTĘP

Dobór materiału do budowy konstrukcji okrętów wymaga od konstruktora przeanalizowania wielu czynników, m.in. natury technicznej i ekonomicznej (rys. 1.). Obecnie w okrętownictwie stosuje się stale kadłubowe, stopy aluminium i materiały kompozytowe. Problemem pozostaje właściwy dobór tych materiałów do budowy poszczególnych elementów konstrukcji jednostki pływającej dla zapewnienia bezpiecznej jej eksploatacji.



Rys. 1. Kryteria doboru materiału konstrukcyjnego na kadłuby okrętowe [7]

Doboru materiału do budowy konstrukcji okrętowych ze względu na ich właściwości dokonuje praktycznie konstruktor, który przeprowadza analizy celowości stosowania materiału na podstawie przepisów towarzystwa klasyfikacyjnego i żądań armatora w pewnym stopniu determinujących zastosowanie tych materiałów przez wymagania np. sztywności wiązań kadłuba [8].

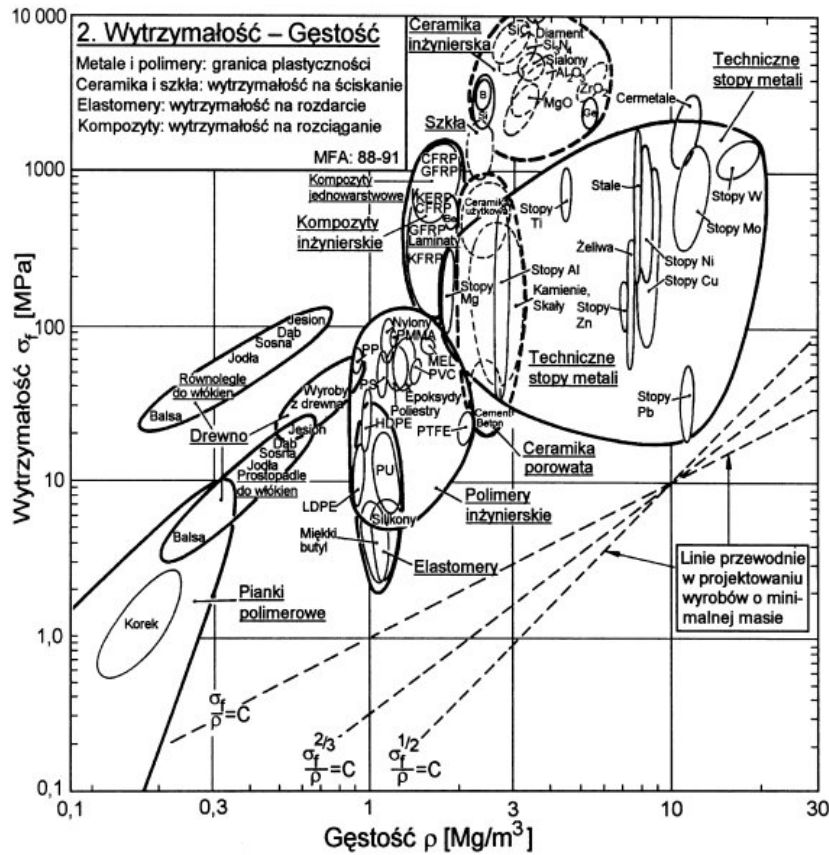
Do budowy okrętów stosowane są zwykle stale kadłubowe i austenityczne (amagnetyczne) wysokowytrzymałe stale oraz materiały kompozytowe. Materiały te wykazują szczególnie dużą odporność na pęknięcie i przebijanie przez pociski oraz odłamki bojowe o zróżnicowanym kształcie, prędkościach i skutkach uderzenia. Współczesna ekonomia transportu morskiego i wymogi budowy okrętów wymuszają stosowanie materiałów o wysokim współczynniku R_m/ρ wytrzymałości względnej, by uzyskiwać duże prędkości pływania przy stosunkowo dużej wytrzymałości konstrukcji. Takie wymagania spełniają stopy aluminium, szczególnie stop, który poddany został badaniom balistycznym. Kadłuby szybkich okrętów często budowane są ze stopów serii 5000 – hydronaliów, przy czym własności nowoczesnych stopów Al-Mg-Mn zależą od zawartości magnezu, która sukcesywnie wzrasta i sięga już 6, a nawet 9%. Zapewnienie niezbędnej odporności na korozję uzyskuje się obecnie poprzez nowoczesną obróbkę cieplno-mechaniczną lub zastosowanie zgniotu na zimno i wyżarzania stabilizującego. W efekcie własności użytkowe hydronaliów wynoszą: $R_{0,2} = 175 - 275$ [MPa], $R_m = 290 - 425$ [MPa], $A_5 = 23 - 12$ [%].

Konstrukta le (do których zaliczamy badany stop) typu Al-Zn-Mg (serii 7000) są z kolei obrabiane cieplnie. Wykazują one podatność do samoumocnienia po spawaniu i są stosowane w budowie okrętów. Własności użytkowe tej grupy wieloskładnikowych stopów to: $R_{0,2} = 250 - 450$ [MPa], $R_m = 325 - 550$ [MPa], $A_5 = 15 - 8$ [%]. Coraz częściej do budowy całych jednostek wykorzystuje się stopy aluminium, są to jednostki małej i średniej wielkości, natomiast na dużych jednostkach ze stopów aluminium wykonuje się nadbudówki, pokładówki, wzmocnienia poszycia kadłuba itp. Zasadniczą wadą stopów aluminium w kontekście wykorzystania militarnego jest znikoma odporność udarowa i balistyczna. Mają jednak wiele zalet. Stopy aluminium w odróżnieniu od stali kadłubowych są lżejsze i charakteryzują się tym, że ich plastyczność i udatność nieco wzrasta z obniżeniem temperatury. Nie istnieje zatem problem kruchości kadłubów okrętów budowanych ze stopów aluminium w obniżonych temperaturach. Stopy aluminium charakteryzują się bardzo małą przenikalnością magnetyczną. Ich zastosowanie jako materiału konstrukcyjnego paramagnetycznego jest celowe w budowie okrętów do wyposażenia okrętowego oraz na nadbudówki.

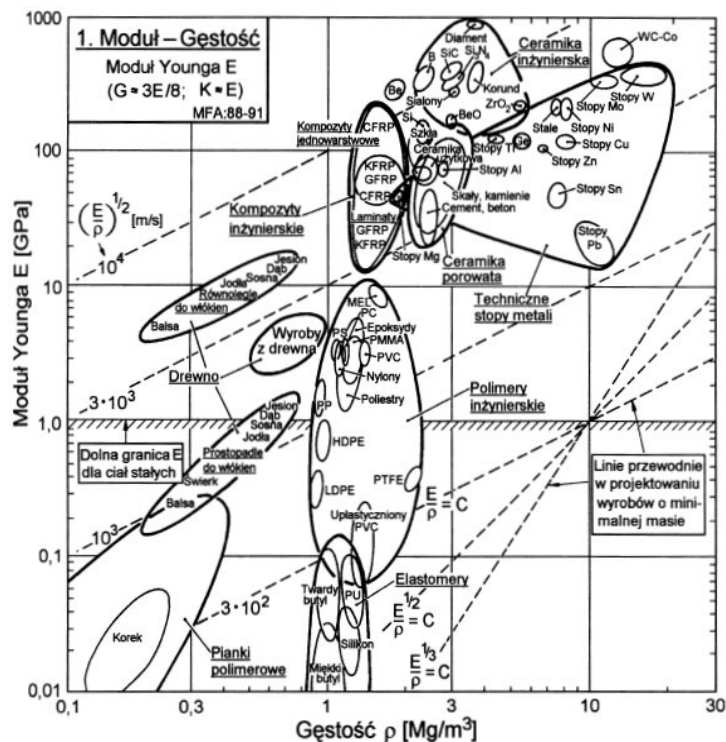
Projektując kadłub okrętu, należy uwzględnić również możliwość jego uszkodzeń wskutek obciążeń dynamicznych, występujących przy dużych prędkościach odkształceń spowodowanych zwłaszcza wybuchami niekontaktowymi bądź ostrzałem artyleryjskim. Problematykę wytrzymałości dynamicznej materiałów na

kadłuby opisano w [1, 5]. Biorąc pod uwagę obciążenia dynamiczne, którym podlegają kadłuby okrętów, należy przy doborze materiałów konstrukcyjnych uwzględniać ich dynamiczne (udarowe) właściwości mechaniczne. Ponadto w uzasadnionych okolicznościach trzeba uwzględnić wymagania odpowiedniej wytrzymałości na zmęczenie, wytrzymałości zmęczeniowo-korozyjnej, wymagania małej przenikalności magnetycznej, odpowiedniej odporności balistycznej, odporności na oddziaływanie podwyższonych temperatur, gęstość.

Jak już wspomniano, przy projektowaniu lekkich konstrukcji istotny jest stosunek wytrzymałości do gęstości ρ [9]. Na rysunkach 2. i 3. pokazano zależności umożliwiające dobór materiałów na konstrukcje okrętowe o minimalnej masie i minimalnym odkształceniu plastycznym (rys. 2.) lub na konstrukcje okrętowe o minimalnej masie i ograniczonym odkształceniu (rys. 3.).



Rys. 2. Wytrzymałość σ_f w zestawieniu z gęstością ρ kompozytów. Linie przewodnie odpowiadają stałej wartości wskaźników σ_f/ρ , σ_f^2/ρ^2 , σ_f^3/ρ^3 , $\sigma_f^{1/2}/\rho^{1/2}$, $\sigma_f^{1/3}/\rho^{1/3}$ materiałów na konstrukcje o minimalnej masie i minimalnym odkształceniu plastycznym [9]



Rys. 3. Moduł Younga E w zestawieniu z gęstością ρ rodzajów materiałów. Linie ukośne łączą materiały, w których prędkość rozchodzenia się fali podłużnej jest jednakowa. Linie przewodnie odpowiadają stałej wartości wskaźników $E/\rho^{1/2}/\rho^{1/3}/\rho$ materiałów na konstrukcje o minimalnej masie i ograniczonym odkształceniu [9]

Jak wykazano w [3], istnieje możliwość zwiększenia udarności stopów aluminium w przypadkach, gdy wykonane z nich fragmenty konstrukcji mogą stanowić elementy złożone z dwóch lub z większej liczby cieńszych warstw. Np. porównując wyniki badań na młocie Charpy'ego próbek ze stopu $AlZn5Mg2CrZr$ o grubości 10 mm z karbem w postaci znormalizowanego rowka i próbek luźno złożonych z dwóch cieńszych płytek o łącznej grubości 10 mm i z takim samym karbem na dolnej płytce, stwierdzono wzrost udarności tych ostatnich o ponad 300%. Jest to spowodowane następującymi czynnikami [8]:

- zwiększeniem objętości materiału, który doznaje odkształcenia plastycznego;
- ekranującym działaniem szczeliny na styku obu części, uniemożliwiającym rozwój poprzecznego pęknięcia;
- tłumieniem sprężystej fali przy przekazywaniu impulsu uderzenia od części uderzanej do części następnej;
- tarciem na powierzchni styku poszczególnych części próbek;
- zwiększeniem powierzchni próbki.

OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 5. i 6.) 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 wyzwala w oscyloskopie 9 licznik czasu, który rejestruje moment uderzenia pocisku w drugi czujnik. Pozwala to wyznaczyć prędkość pocisku przed próbką. Prędkość pocisku za próbką wyznacza się za pomocą drugiego zestawu ramek z czujnikami i oscyloskopu 10. Próbka ma średnicę 50 mm i grubość 12 mm lub 2x6 mm. 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 oraz obu jej warstw względem siebie. Badań na temat wpływu sztywnego zamocowania próbki w tulei nie prowadzono.

MATERIAŁ ZASTOSOWANY DO BADAŃ

Obszerne informacje o technologii wytwórstwa i właściwości badanego stopu podano w [6]. Poniżej zestawiono jego podstawowe parametry i skład chemiczny.

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]	Grubość [mm]	Twardość KCV10	Gęstość [g/cm ³]
6	415	367	6.32	93.5	2.76
12	423	378	11.75	122.5	2.73

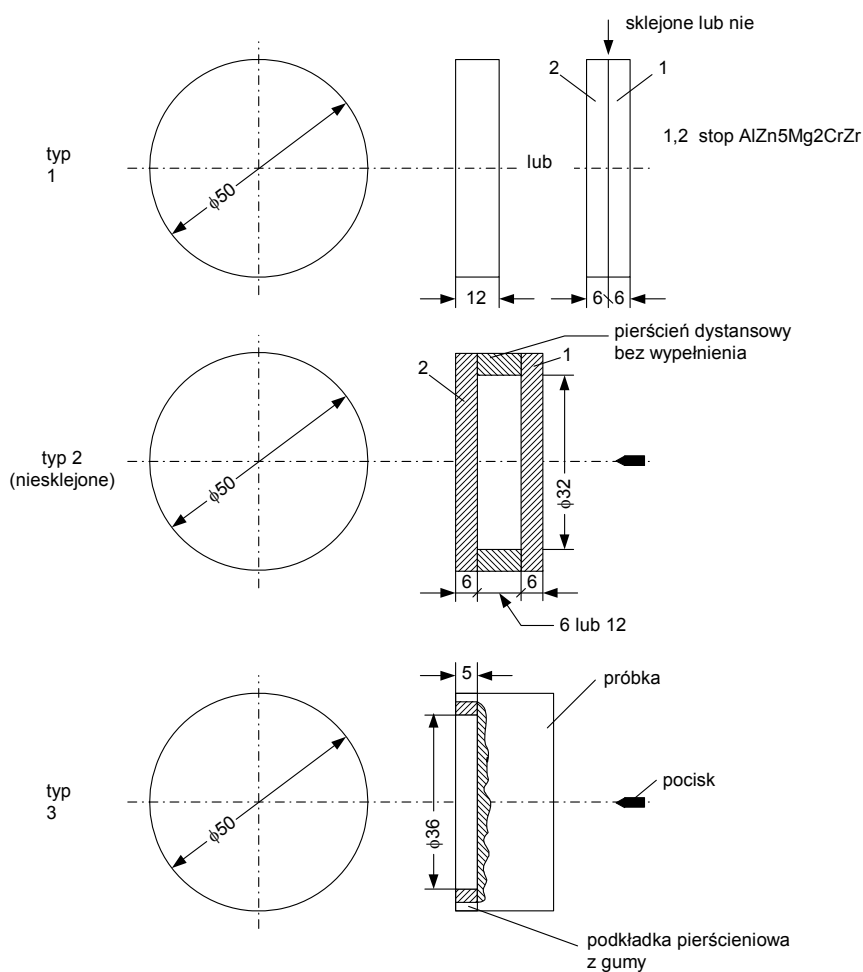
Tabela 2. Skład chemiczny blach ze stopów AlZn5MgCrZr tb (spr. IMN-OML nr 4550/91,336 OML/91)

Nr stopu	Skład chemiczny [%] AlZn5MgCrZr											Nr partii i atestu
	Zn	Mg	Cr	Zr	Ti	Fe	Si	Cu	Mn	Ni	Al	
507	5.13	1.9	0.16	0.15	0.071	0.27	0.15	0.08	0.057	0.006	reszta	1086
635	4.81	1.9	0.17	0.12	0.016	0.31	0.21	0.09	0.06	0.006	reszta	1085

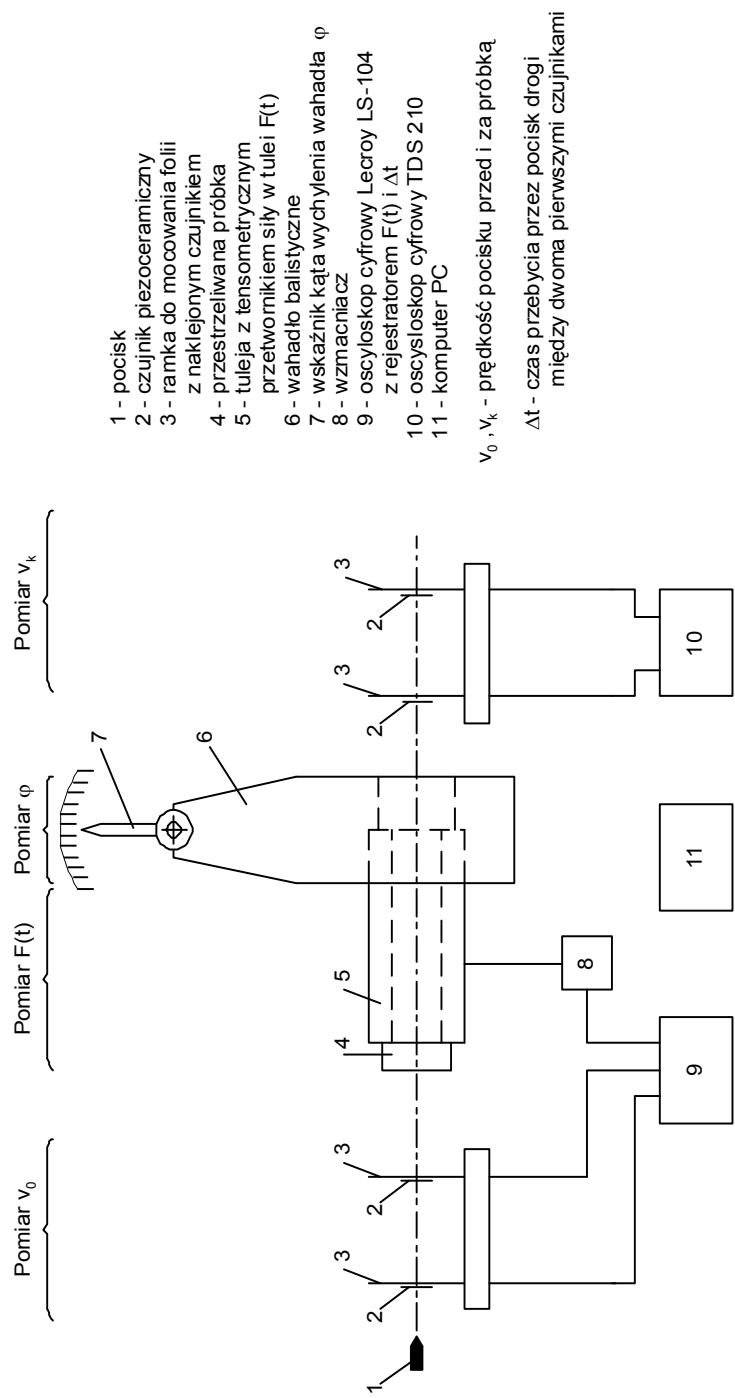
tb; przesylenie – nagrzewanie do 480 °C przez 50 min, studzenie gorącą wodą min. 70 °C, naturalne starzenie 0 – 4 dni 20 °C, dwustopniowe sztuczne starzenie 95 °C/8h+150 °C/8h

PRÓBKII DO BADAŃ BALISTYCZNYCH

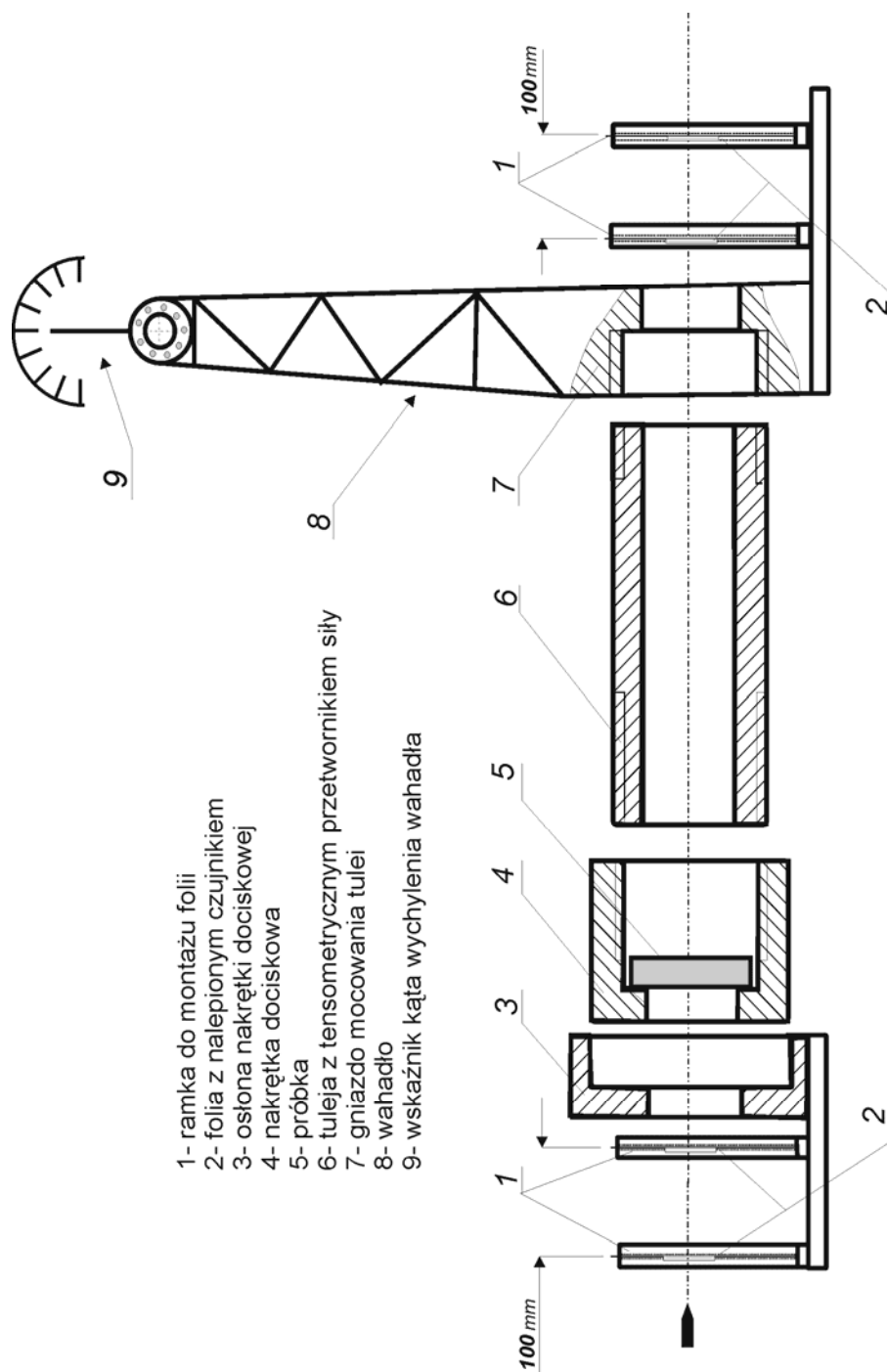
Oprócz próbek 2-warstwowych o luźnym styku badano także próbki sklejo-
ne klejem na bazie żywicy „Polimal 109” (Polimal 109 – 97%, przyspieszacz: nafta-
nian kobaltu – 0,02%, utwardzacz: Luperkos GZS – 3%), a także próbki podparte
elastycznie na podkładce pierścieniowej $\phi 50 / \phi 36$ z miękkiej gumy ($15^\circ - 18^\circ\text{ShA}$)
o grubości 5 mm. Odstęp między przestrzeliwanymi próbkami stanowił pierścień
dystansowy o długości 6 i 12 mm. Podstawowe dane materiałów próbek podano
w tabelach 1. i 2. Strzelano nabojem ŁPS kalibru 7,62 mm z rdzeniem stalowym
pociskiem o masie 9,5 g ze sztucera typu OWGS z celownikiem optycznym. Próbki
przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Próbki do badań balistycznych



Rys. 5. Schemat stanowiska balistycznego z aparaturą kontrolno-pomiarową



Rys. 6. Elementy składowe wahadła balistycznego z oprzyrządowaniem

WYNIKI BADAŃ

Maksymalne wartości sił ściskających i rozciągających w tulei (kolumny 7. i 8.) odczytywano na ekranie oscyloskopu i na oscylogramach. Przykładowe przebiegi podano w załączeniu. Jak zaznaczono na oscylogramie 2.2, oprócz przebiegu siły w tulei w czasie zawierają one także informacje o odstępie czasu Δt niezbędnym do przebycia przez pocisk odległości 100 mm pomiędzy dwoma pierwszymi czujnikami piezoceramicznymi.

Maksymalny kąt φ wychylenia wahadła odczytywano z dokładnością $\pm (0,1 - 0,2^\circ)$. W przypadku nieprzebiecia próbki całkowita energia kinetyczna pocisku była absorbowana przez próbkę i wahadło, które wychyliło się do położenia kąтового $\varphi_{\max} = 9^\circ$.

Energia przekazywana wahadłu przez pocisk w czasie przestrzeliwania próbki jest równa energii potencjalnej wahadła w najwyższym jego położeniu:

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

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

Jako efektywność względną poszczególnych próbek przyjęto wyrażenie

$$\epsilon = \frac{1 - \cos \varphi}{1 - \cos 1,15^\circ} \cdot 100\% = \frac{\sin^2 0,5\varphi}{\sin^2 0,5 \cdot 1,15^\circ} \cdot 100\%,$$

gdzie $1,15^\circ$ jest średnim kątem maksymalnego wychylenia wahadła przy przestrzeliwaniu próbek aluminiowych (serie: 2., 6., 10., 15., 27., 36., 38.).

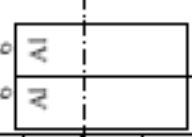
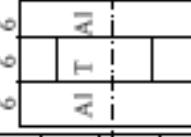
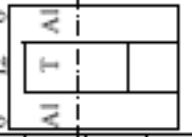
Ze względu na stwierdzone małe kąty φ (kolumna 6.), w kolumnie 9. podano wartości $(\varphi/1,15)^2 \cdot 100\%$.

Rezultaty pomiarów zestawiono w tabeli 3. w kolumnach 4 – 8. Jak wynika z kolumny 4., rozrzut prędkości początkowej pocisków był w granicach 715 – 820 m/s. Puste miejsca w kolumnie 5. dotyczą przypadków, gdy obraz na ekranie oscyloskopu nie był jednoznaczny, a wybór impulsów oznaczających uderzenia pocisku w kolejne czujniki piezoceramiczne utrudniony. Może to być spowodowane pobudzeniem czujnika przez odłamki, gazy lub wstrząsy przenoszone drogą strukturalną od próbek.

Porównanie odporności balistycznej badanych próbek i analogicznych próbek ze stali okrętowej przedstawiono w pracy [4].

Tabela 3. Wyniki badań balistycznych

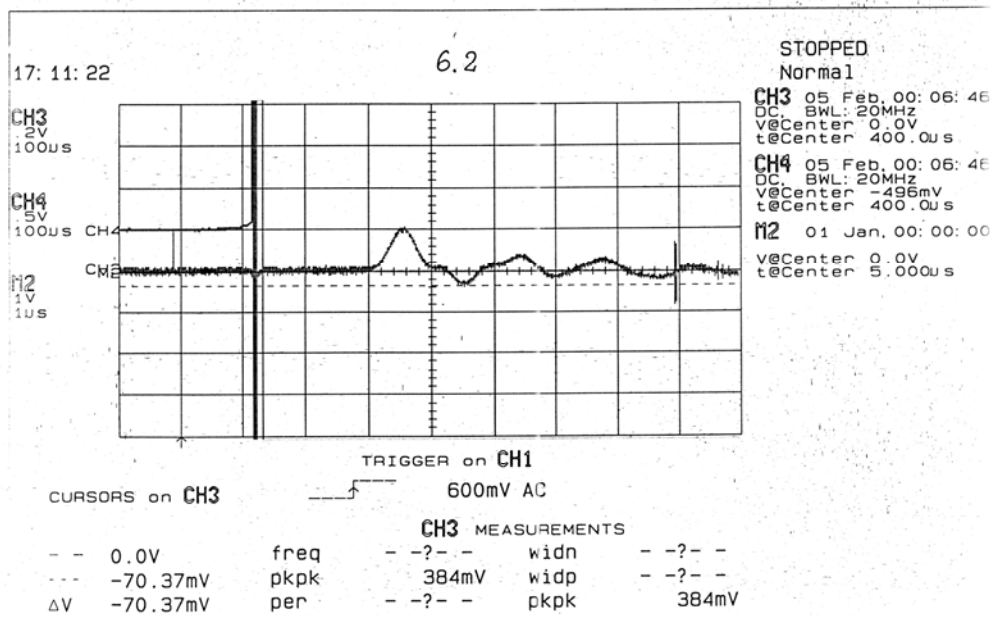
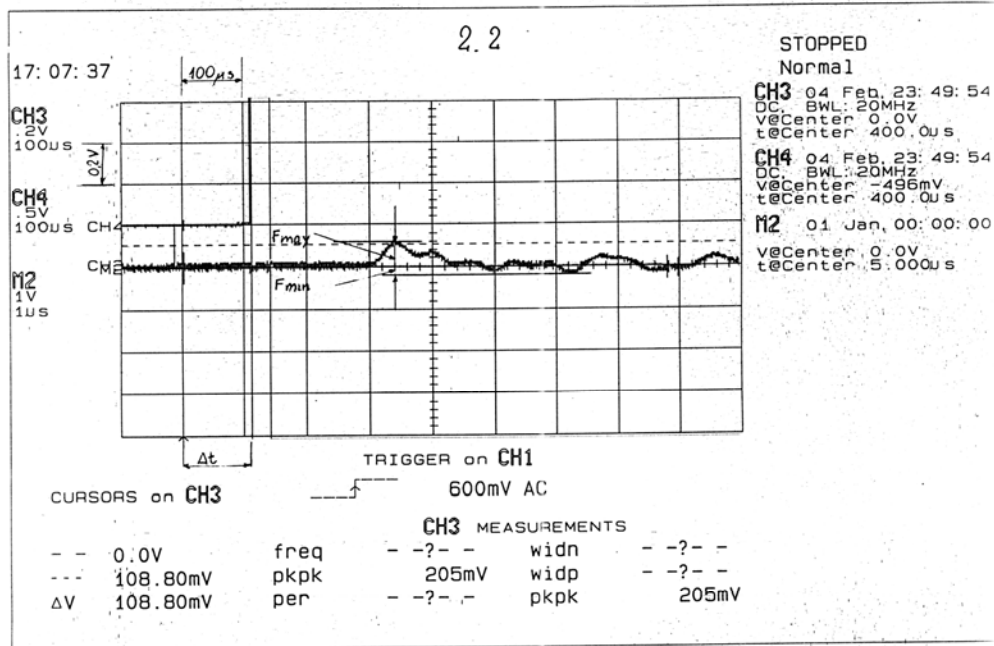
Nr serii	Rodzaj próbki	Nr próbki	Prędkość pocisku		Kąt wychylenia waha φ [deg]	Siła w tulei		Efektywność względna próbki ε [%]	Uwagi
			przed próbką V ₀ [m/s]	za próbką V _k [m/s]		F(s)max [kN]	F(r)max [kN]		
2	12 AI	2.1	888,89	714,29	1	12,96	-8,91	2,609	
		2.2*	888,89		1	13,77		2,609	
		2.3							
		średnia	888,89	714,29	1	13,36	-8,91	2,609	
6	6 6 AI AI sklejone	6.1	869,6	806,45	1	22,68	-12,15	2,609	Klej na bazie żywic „Polimal”
		6.2*	869,6	704,2	1,5	25,92	-8,86	5,87	
		6.3							
		średnia	869,6	755,3	1,25	24,30	-10,50	4,08	

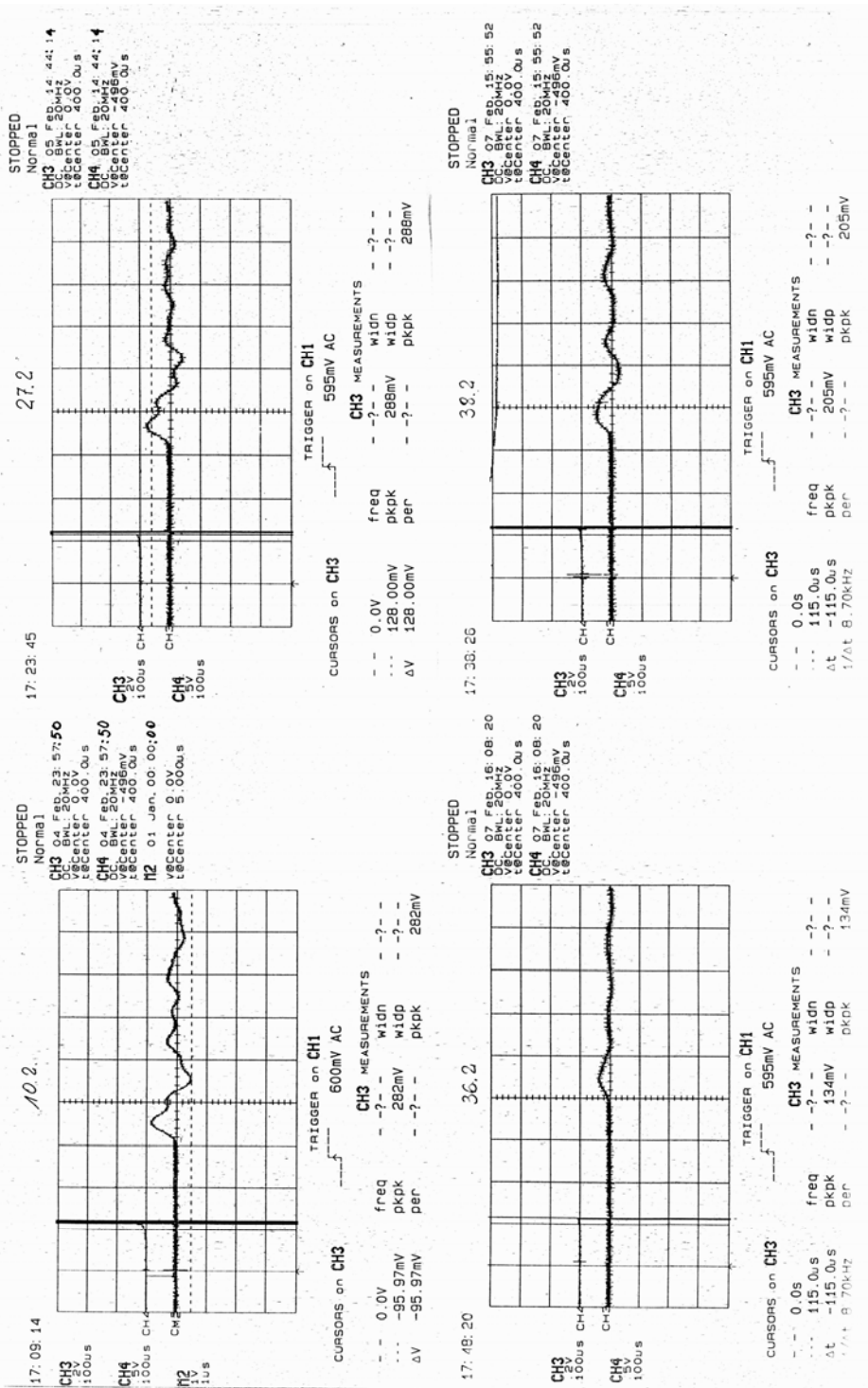
10		10.1	888,89	704,22	1,5	19,44	-11,34	5,87	
		10.2*	869,6	746,26	1,2	21,87	-12,15	3,76	
		10.3							
		średnia	879,24	725,24	1,35	20,65	-11,74	4,76	
15		15.1		746,26	1,8	40,51		4,0	
		15.2		819,67	1,1		-26,33	1,49	
		15.3		867,6	735,29	1,1			1,49
		średnia		867,6	767,07	1,33	40,51	-26,33	2,32
27		27.1	909,09	769,23	1,5	16,20	-8,10	2,77	
		27.2*	867,6	793,65	1,5	21,06	-10,50	2,77	
		27.3	909,09	781,25	1	23,49	-11,34	1,235	
		średnia		875,92	781,37	1,33	20,25	9,98	2,25

	36.1	896,6	769,23	1	7,29	-1,62	2,609
	36.2*	896,6	714,28	0,5	9,72	-2,43	0,532
	36.3	888,89	769,23	1	12,96	-8,10	2,609
	średnia	876,03	750,91	0,83	9,99	-4,05	1,80
	38.	888,89	726,63	1	15,39	-6,48	2,609
	38.2*	896,6	819,67	1	12,91	-8,10	2,609
	38.3	888,89	847,45	0,9	17,82	-12,15	2,11
	średnia	882,46	797,25	0,96	15,37	-8,91	2,41

Oznaczenia:

- (F_s)max – maksymalna siła ściskająca
- (F_r)max – maksymalna siła rozciągająca
- T – pierścień dystansowy
- G – podkładka pierścieniowa gumowa
- Al. – stop AlZn5Mg2CrZr
- ()* – założono wydruk przebiegu siły w tulei





WNIOSKI

1. Próbki 2-warstwowe (sklejone i niesklejone) ze stopu AlZn5Mg2CrZr mają lepszą odporność balistyczną niż 1-warstwowe: wykazują większą maksymalną siłę w tulei (tzn. stawiają pociskowi większy opór) i powodują większe wychylenie wahadła balistycznego (tzn. absorbują większą porcję energii pocisku). Ten efekt częściowo można tłumaczyć mniejszą gęstością badanego stopu aluminium, dzięki czemu udział oporu inercyjnego w całkowitym oporze próbki przy jej przestrzeliwaniu jest znacznie mniejszy niż np. dla stali.
2. Próbki ze stopu AlZn5Mg2CrZr sklejone stawiają pociskowi nieco większy opór niż niesklejone (luźne).
3. Zastosowanie tulei dystansowej (6 i 12 mm) powoduje, że próbki te stawiają mniejszy opór pociskowi (maksymalna siła ściskająca w tulei jest mniejsza) w porównaniu z próbkami bez szczeliny, co zmniejsza odporność balistyczną stopu AlZn5Mg2CrZr (serie 10., 15., 27.).
4. Próbki z podkładką gumową wykazują nieco gorsze własności balistyczne niż analogiczne próbki bez podkładek. Usytuowanie podkładki (przed lub między dzielonymi próbkami) nie ma wpływu na własności balistyczne, a różnice w efektywności między seriami 36. i 38. wynikają z wniosku 1.

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”, 1996, Part B, 27B.
- [2] Cudny K, Puchaczewski N., *Stale i stopy aluminium na konstrukcje morskie*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1998.
- [3] Dobrociński S., Jurczak W., Kolenda J., *Badania odporności udarowej dwuwarstwowych próbek ze stopu AlZn5Mg2CrZr*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2000, nr 2, Gdynia 2000.
- [4] Dobrociński S., Jurczak W., Kolenda J., *Porównawcze badania odporności balistycznej jedno- i dwuwarstwowych próbek ze stopu AlZn5Mg2CrZr i stali kadłubowej kategorii A*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2001, nr 2, Gdynia 2001.

- [5] Gooch W. A., Filbey G. L., Senf H., Weidemaier P., Rothenhäusler H., *Ballistic resistance of laminated steel targets experiments and numerical calculations*, Proc. of 14th Int. Symp. Ballistics '93, 26 – 29 Sept. 1993, Vol. 2, Québec 1993.
- [6] 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.
- [7] Michael F. Ashby, David R. H. Jones., *Materiały inżynierskie. Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*, cz. II, WNT, Warszawa 1996.
- [8] Pogodin-Aleksiejew G. I., *Wytrzymałość dynamiczna i kruchość metali*, WNT, Warszawa 1969.
- [9] Przybyłowicz J., *Materialoznawstwo w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 2000.

ABSTRACT

The paper presents the results of measurements carried out with ϕ 50 mm specimens of 12 mm and 2x6 mm width, made of the AlZn5Mg2CrZr alloy, when hit by bullets of 7.62 mm caliber. It has been found that the ballistic resistance of the bi-layer alloy specimens is higher than that of a single-layer alloy specimens.

Recenzent prof. dr hab. inż. Janusz Kolenda