

Wojciech Jurczak
Akademia Marynarki Wojennej

WPLYW PRĘDKOŚCI ODKSZTAŁCENIA NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STOPU AlZn5Mg2CrZr I STALI KADŁUBOWEJ KAT. A

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych próbek stopu AlZn5Mg2CrZr i stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości kat. A rozciąganych na młocie rotacyjnym przy dużych prędkościach bijaka młota (10, 20, 30 [m/s]). Dokonano oceny zmian właściwości mechanicznych tych materiałów przy wzroście prędkości oddziaływania od 10^{-2} [m/s] do 30 [m/s].

Obciążenie dynamiczne będące wynikiem oddziaływania bijaka młota z prędkością do 10 [m/s] na próbki stopu AlZn5Mg2CrZr i stali kadłubowej powoduje ich wzrost wytrzymałości w stosunku do statycznego obciążenia w zakresie zależnym od prędkości odkształcania.

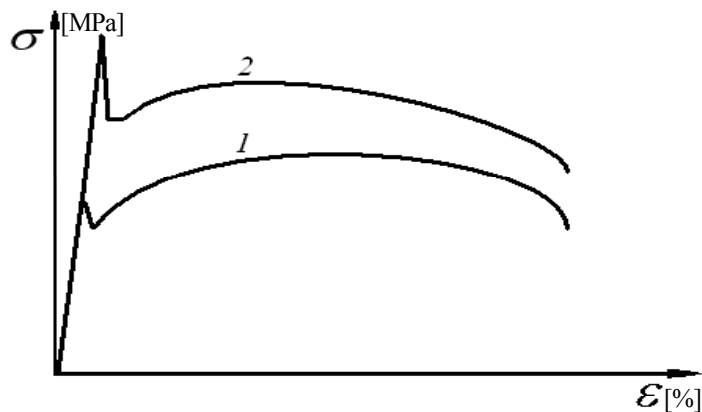
WSTĘP

Stopy aluminium są szeroko stosowane w światowym budownictwie okrętowym [9]. Niski ciężar właściwy, amagnetyczność, dobra odporność korozyjna oraz wysokie właściwości wytrzymałościowe stopów Al-Zn-Mg skłaniają konstruktorów i technologów okrętowych do ich stosowania w jak najszerszym zakresie [7]. Projektowanie okrętowych elementów konstrukcyjnych podlegające podczas eksploatacji obciążeniom dynamicznym (praca okrętu na wzburzonym morzu przy dużych prędkościach pływania) wymaga oprócz znajomości właściwości statycznych także znajomości właściwości dynamicznych. Jednocześnie okręt jako jednostka pływająca o charakterze militarnym z przeznaczenia narażona jest na oddziaływanie dynamiczne środków bojowych nieprzyjaciela. Wspomniane wymagania determinują między innymi dobór materiału konstrukcyjnego, dla którego nieodzowna jest znajomość właściwości mechanicznych (określone dla obciążeń statycznych) elementów konstrukcji obciążonych statycznie. Natomiast dla znacznie

większej liczby okrętowych elementów konstrukcyjnych wymagana jest znajomość charakterystyk dynamicznych ze względu na zmiany w czasie charakteru obciążenia.

Prędkość odkształcenia przy obciążeniu dynamicznym zasadniczo zmienia właściwości wytrzymałościowe [3, 10] materiałów konstrukcyjnych, w tym badanych materiałów [4]. Aby ocenić te własności, wyznaczono charakterystyki statyczne i dynamiczne badanych materiałów.

Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na wartość granicy plastyczności jest prędkość narastania odkształcenia. Dla przykładu, na rysunku 1. krzywa 1 odpowiada rozciąganiu stali węglowej o zawartości 0,2% C z prędkością narastania odkształcenia 10^{-2}s^{-1} – obciążenie statyczne, a krzywa 2 rozciąganiu próbki z tego samego materiału z prędkością 10^2s^{-1} – obciążenie dynamiczne.



Rys. 1. Wykresy zależności $\sigma = f(\epsilon)$ z prędkościami odkształcenia statycznego (1) i dynamicznego (2) [8]

Stal kategorii A jest materiałem wykorzystywanym do wykonywania wewnętrznych elementów kadłuba. Jej niewysokie właściwości mechaniczne i zarazem umiarkowana cena sprawiają, że jest dobrym materiałem porównawczym w badaniach stopów aluminium.

Przy obciążeniu dynamicznym wartość działającej siły zależy zarówno od masy uderzającego ciała, jak i od prędkości uderzenia i odkształcenia próbki [5, 8].

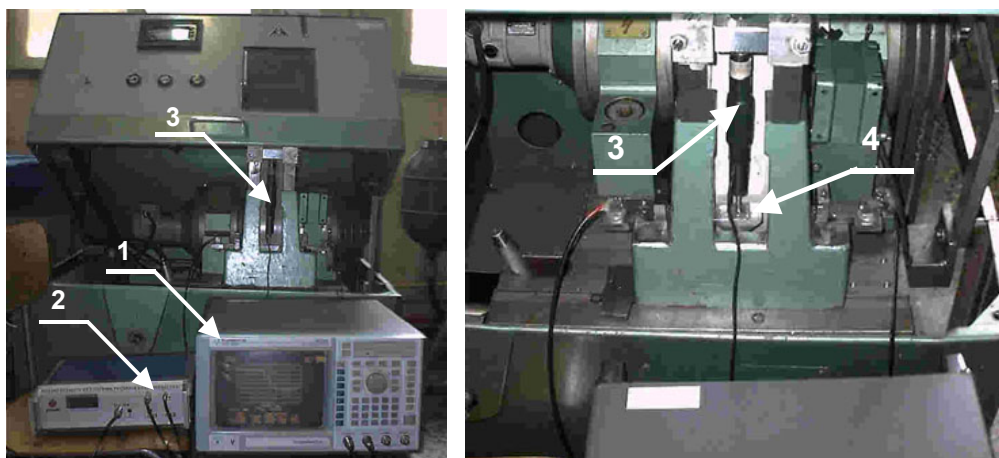
Sposób oddziaływania energii wybuchu na konstrukcje okrętowe zależy od odległości źródła wybuchu jego mocy i może być to oddziaływanie bezpośrednie, zwane kontaktowym, albo pośrednie, zwane bezkontaktowym. W obu przypadkach powstaje fala uderzeniowa (impuls ciśnienia fali uderzeniowej), która w powietrzu

działa na nawodne części okrętu, a w wodzie na podwodną część kadłuba. Sposób rozchodzenia się fali uderzeniowej w tych dwóch ośrodkach jest różny. W prezentowanych badaniach reprezentatywną metodą określającą oddziaływanie impulsu ciśnienia w powietrzu jest energia pazura młota rotacyjnego (rys. 2.), którego krótki czas niszczenia próbki jest najbardziej zbliżony do działania impulsu ciśnienia fali na konstrukcję okrętową podczas wybuchu [3, 6].

BADANIA WŁASNE

Metodyka badań

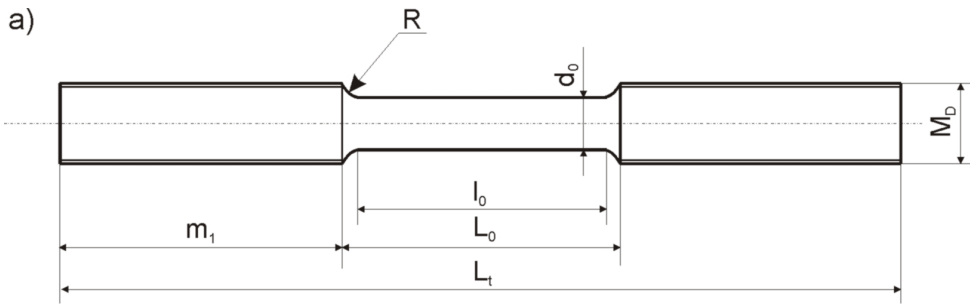
Do badań użyto specjalnie oprzyrządowany młot rotacyjny będący w posiadaniu Instytutu Podstaw Techniki AMW (rys. 2.).



Rys. 2. Oprzyrządowany młot rotacyjny

Oprzyrządowanie pomiarowe młota rotacyjnego składało się z: dynamometru tensometrycznego (3), wzmacniacza układu (2), oscyloskopu cyfrowego LS-140 firmy LeCroy (1). Przed pomiarami dokonano kalibracji dynamometru tensometrycznego na MTS-ie (56kN/1V) i skalibrowano wskazania prędkości obrotowej bębna, na którym umieszczono pazur bijaka (4).

Z badanego materiału wykonano próbki przewidziane do statycznych i dynamicznych prób rozciągania, których kształt przedstawiono na rysunku 3., a szczegółowe wymiary podano w tabeli 1.



Rys. 3. Kształty badanych próbek na młocie rotacyjnym

Tabela 1. Wymiary badanych próbek okrągłych w zależności od kształtu karbu opisane wg rysunku 3.

a) próbka gładka						
L_t [mm]	M_D	R [mm]	m_1 [mm]	L_0 [mm]	l_0 [mm]	ϕd_0 [mm]
65	M10	5	25	25	21	5

Kierunek wycięcia z arkuszy blach próbek do badania właściwości statycznych stopu aluminium wytopu 507 i stali był zgodny z kierunkiem walcowania. Dla rozpoznania wpływu kierunku walcowania na właściwości dynamiczne badanego stopu próbki stopu aluminium wytopu 635 wycięto prostopadle do kierunku walcowania i oznaczono „p”. Właściwości statyczne próbek 635 stopu AlZn5Mg2CrZr wycięto zgodnie z kierunkiem walcowania i pobrano do porównania z pracy [7].

Skład chemiczny badanych materiałów

Próbki do badań zostały wykonane z blach stopu AlZn5Mg2CrZr z dwóch wytopów różniących się składem chemicznym i stali kadmowej kat. A. Składy chemiczne badanych materiałów podano w tabelach 2. i 3.

Tabela 2. Skład chemiczny blach ze stopów AlZn5Mg2CrZr tb [1]

Nr stopu	Skład chemiczny [%] AlZn5Mg2CrZr										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; przesycenie – 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/8 h + 150 °C/8 h

Tabela 3. Skład chemiczny stali kadłubowej kategorii A wg ASTM A6/A6M-96b [2]

Skład chemiczny [%] stali kadłubowej kategorii A													
C	Mn	Si	S	P	Mo	Cr	V	Ni	Cu	Al	Nb	Fe	ATEST
0,18	0,69	0,21	0,0024	0,021	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,045	0,003	reszta	D032206/469927
Stal poddana była wyżarzaniu i walcowaniu na gorąco													

WYNIKI BADAŃ

Właściwości statyczne badanych materiałów

Statyczne właściwości badanych materiałów, dla znormalizowanych próbek pokazanych na rysunku 3., przedstawiono w tabeli 4. Prędkość $V \approx 0$ [m/s] oznacza statyczną prędkość rozciągania 10^{-2} s^{-1} .

Badany stop AlZn5Mg2CrZr ma najwyższe właściwości wytrzymałościowe spośród wszystkich stopów aluminium do przeróbki plastycznej stosowanych w budownictwie okrętowym i zbliżone do właściwości wytrzymałościowych badanej stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości. Mniejszy od stali zapas plastyczności stopu AlZn5Mg2CrZr warunkuje także dużo niższe właściwości plastyczne w stosunku do badanej stali. Jednak i takie właściwości plastyczne stopu aluminium spełniają wymogi Przepisów Budowy Okrętów.

Próbki badanego stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 635p pobrane w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania mają znacznie niższe właściwości wytrzymałościowe (spadek: $\Delta R_m = 158 \text{ MPa}$, $\Delta R_{0,2} = 116 \text{ MPa}$), ale nieco lepsze właściwości plastyczne (wzrost: $\Delta A_5 = 3\%$, $Z = 8,5\%$) w stosunku do wytopu 635 pobranych wzdłuż kierunku walcowania. Sposób mocowania arkusza blachy badanego stopu aluminium na poszyciu kadłuba czy nadbudówki musi uwzględniać kierunek działania naprężeń eksploatacyjnych.

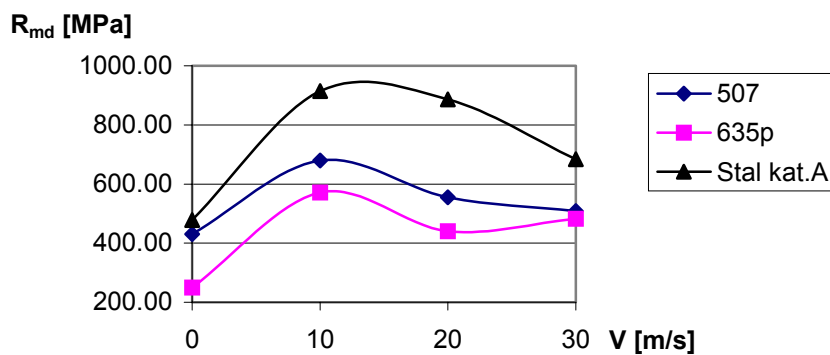
Właściwości dynamiczne AlZn5Mg2CrZr w zależności od prędkości odkształcenia

Charakter zjawisk występujących przy obciążeniach dynamicznych jest złożony ze względu na wpływ wielu czynników, jak rozprzestrzenianie się fal naprężeń, koncentracja naprężeń, temperatura, rozkład prędkości odkształceń itp. Wzrost prędkości odkształceń powoduje wzrost oporu odkształcenia plastycznego metali, co działa na wzrost granicy plastyczności, wytrzymałości i twardości.

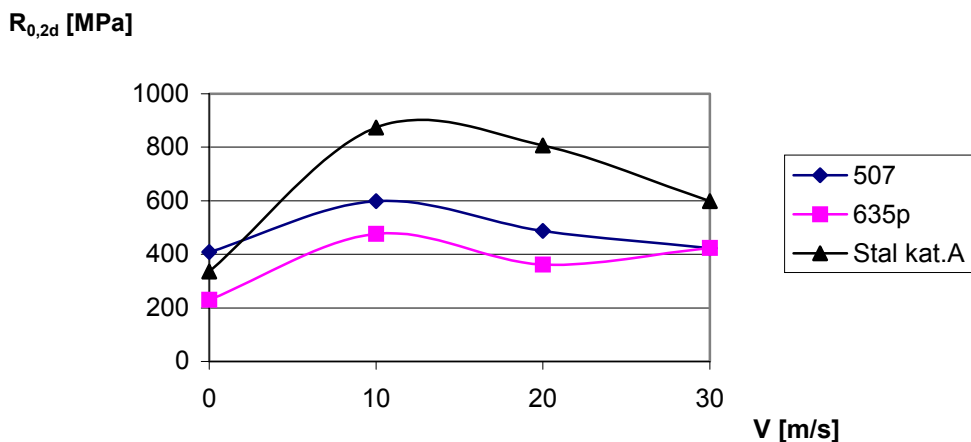
Znajomość uderowych właściwości mechanicznych materiału jest niezbędna do oceny rzeczywistej odporności uderowej konstrukcji okrętu. Próby przeprowadzono w zakresie prędkości uderzenia dla: 10, 20 i 30 [m/s].

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań określono wskaźniki wytrzymałościowe stopu AlZn5Mg2CrZr i stali kat. A poddanej dynamicznej próbie rozciągania. Pokazano je na rysunkach 4. – 7. i zestawiono w tabeli 4.



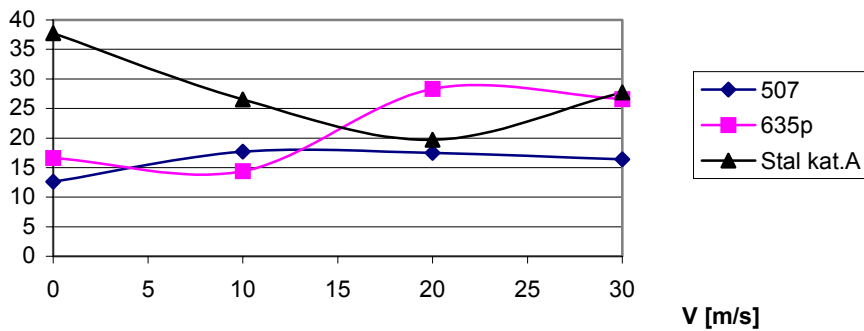
Rys. 4. Dynamiczna granica wytrzymałości na rozciąganie dynamiczne R_{md} stopu AlZn5Mg2CrZr wtopu 507 i 635p oraz stali kat. A



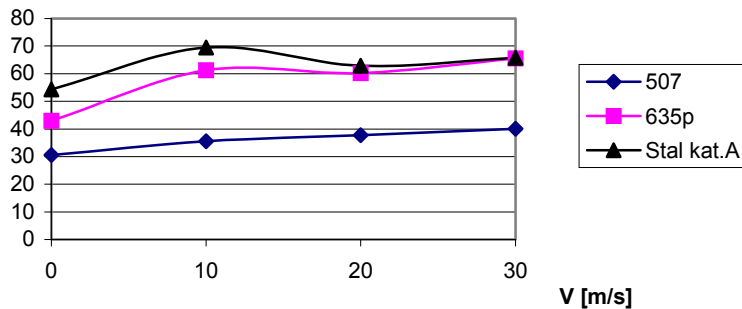
Rys. 5. Dynamiczna granica plastyczności na rozciąganie dynamiczne stopu AlZn5Mg2CrZr wtopu 507 i 635p oraz stali kat. A

Tabela 4. Zestawienie średnich właściwości mechanicznych i parametrów badanych próbek poddanych różnym prędkościom zrywania: od statycznego $V \approx 0$ m/s do dynamicznego do 30 m/s dla stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 507, 635p i stali kadłubowej kat. A

Lp.	Prędkość odkształcenia V [m/s]	Rodzaj próbki i wytopu	PARAMETRY PRÓBEK PRZED BADAANIAMI						PARAMETRY PRÓBEK PO ZRYWANIU					DYNAMICZNE WŁAŚNOŚCI MECHANICZNE			
			L_0 [mm]	l_0 [mm]	ϕ_0 [mm]	S_0 [mm ²]	L_{0k} [mm]	l_{0k} [mm]	ϕ_{0k} [mm]	S_{0k} [mm ²]	R_{md} [MPa]	$R_{0,2d}$ [MPa]	A_{od} [%]	Z_d [%]			
1	0	507	25.86	22.30	5.03	19.87	29.11	4.19	13.79	430.94	408.84	12.57	30.61				
2	10		24.53	21.44	5.07	20.19	28.86	4.07	13.01	679.82	598.47	17.65	35.56				
3	20		26.74	23.34	5.12	20.59	31.42	4.04	12.82	555.50	487.13	17.50	37.74				
4	30		24.80	21.12	5.04	19.95	28.86	3.90	11.95	508.60	423.34	16.37	40.12				
1	0	635	24.73	21.25	4.99	19.56	28.84	3.77	11.16	250.77	231.54	16.62	42.92				
2	10		25.55	21.77	5.05	20.03	29.33	3.14	7.74	571.01	477.30	14.79	61.34				
3	20		25.10	20.56	5.04	19.95	32.19	3.18	7.94	440.98	361.61	28.25	60.19				
4	30		25.37	21.42	5.02	19.79	32.12	2.95	6.83	483.03	423.76	26.61	65.47				

$A5_d$ [%]

Rys. 6. Dynamiczne właściwości plastyczne – wydłużenie jednostkowe stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 507 i 635p oraz stali kat. A

 Z_d [%]

Rys. 7. Dynamiczne właściwości plastyczne – przewężenie stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 507 i 635p oraz stali kat. A

Charakterystyki dynamiczne prób rozciągania stali kat. A są położone znacznie wyżej od krzywych uzyskanych podczas próby statycznego rozciągania stopu AlZn5Mg2CrZr. Zwiększenie prędkości odkształcenia od statycznej do dynamicznej maks. 30 [m/s] wyraźniej podwyższa właściwości wytrzymałościowe stali niż badanego stopu z tendencją do spadku po przekroczeniu $V = 10$ [m/s].

Właściwości plastyczne badanego stopu aluminium uzyskują wyższe wartości ze wzrostem prędkości odkształcenia, co jest przeciwieństwem do właściwości plastycznych stali, które generalnie ulegają obniżeniu.

Tabela 5. Wartości względnych właściwości wytrzymałościowych w zależności od prędkości odkształcenia dla:

a) stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 507 i 635p

V [m/s]	$\Delta R_{md}/R_m$ [%]		$\Delta R_{0,2d}/R_{0,2}$ [%]	
	507	635p	507	635p
10	22,4	127,7	46,4	106,1
20	28,9	75,9	19,1	56,2
30	18,02	92,6	3,7	83,01

b) stali kadłubowej kategorii A

V [m/s]	$\Delta R_{md}/R_m$ [%]	$\Delta R_{ed}/R_e$ [%]
10	87,8	159,8
20	81,9	139,8
30	40,5	77,9

Tabela 6. Wartości względnych właściwości plastycznych w zależności od prędkości odkształcenia dla:

a) stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 507 i 635p

V [m/s]	$\Delta A_{5d}/A_5$ [%]		$\Delta Z_d/Z$ [%]	
	507	635p	507	635p
10	40,4	-11,1	16,2	42,3
20	39,2	70	23,3	40,2
30	30,2	60,1	31,1	52,5

b) stali kadłubowej kategorii A

V [m/s]	$\Delta A_{5d}/A_5$ [%]	$\Delta Z_d/Z$ [%]
10	-29,9	28,7
20	-47,7	15,9
30	-26,7	21,2

W przypadku badanego stopu AlZn5Mg2CrZr doraźna granica wytrzymałości R_m pod wpływem wzrostu prędkości odkształcenia wzrasta zależnie od kierunku pobrania próbek. Próbki pobrane prostopadle do kierunku walcowania uzyskały prawie 3-krotnie większy wzrost R_{md} w stosunku do R_m niż pobrane zgodnie z kierunkiem walcowania. Podobnie zachowuje się umowna granica plastyczności $R_{0,2d}$.

Granica R_m badanej stali kat. A przy wzroście prędkości odkształcenia uzyskała stabilny 80% wzrost w stosunku do statycznego rozciągania i 4-krotnie wyższy w odniesieniu do R_m wzdłużnych próbek stopu AlZn5Mg2CrZr wytopu 507.

Znacznie większe zróżnicowanie pod wpływem wzrostu prędkości odkształcenia wykazują właściwości plastyczne badanych materiałów. Dla stali nastąpił 30% spadek A_{5d} w stosunku do A_5 przy 20% wzroście przewężenia Z . Stop AlZn5Mg2CrZr wykazuje 18% wzrost przewężenia (podobnie dla stali kat. A) i 39% wzrost wydłużenia jednostkowego.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań statycznych i dynamicznych na próbkach stopu AlZn5Mg2CrZr i stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości oraz po dokonaniu analizy wyników badań można stwierdzić:

1. Kierunek walcowania ma istotny wpływ na statyczne i dynamiczne właściwości mechaniczne badanych materiałów.
2. Badana stal uzyskuje wyższy wzrost właściwości wytrzymałościowych od AlZn5Mg2CrZr przy rosnącej prędkości odkształcenia.
3. Pod wpływem obciążenia dynamicznego nastąpił wzrost wskaźników wytrzymałościowych badanego stopu AlZn5Mg2CrZr w stosunku do wartości uzyskanych w statycznej próbie rozciągania. Znacznie większy wzrost wytrzymałości uzyskano dla próbek pobranych prostopadle do kierunku walcowania.
4. Największa wrażliwość właściwości wytrzymałościowych badanego stopu aluminium i stali kadłubowej na wzrost prędkości odkształcania następuje przy $V = 10$ [m/s].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Atest AlZn5Mg2CrZr, IMN-OML nr 4550/91, 336 OML/91.
- [2] Atest stali kat. A, nr D032206/469927, PRA 700817/4, LRoS Prague 161443 01.
- [3] Cudny K., Powierża Z., *Wybrane zagadnienia odporności udarowej okrętów*, WSMW, Gdynia 1978.

- [4] Dobrociński S., Fila J., Jurczak W., Kolenda J., *Odporność udarowa i balistyczna nowego stopu aluminium i kompozytów z jego zastosowaniem*, praca statutowa AMW 1999 – 2001 pk. „BALIDUR”.
- [5] Fila J., *Badania wpływu stanu obciążeń i szybkości odkształceń na wytrzymałość i ciągliwość materiałów okrętowych*, konferencja nt. „Odporność udarowa konstrukcji”, AMW, Gdynia 1993.
- [6] Fila J., Zatorski Z. i in., Raport nr 1/1993 oraz nr 1/94 i nr 2/95/IPBMO/„Powłoka”, AMW – KBN 1993 – 1995.
- [7] Jurczak W., *Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i odporność na korozję stopów Al-Zn-Mg przeznaczonych na spawane konstrukcje okrętowe*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998.
- [8] Kinslov R. at al., *High-Velocity Impact Phenomena*, Academic Press, New York and London 1970.
- [9] Levedahl W., Capable A., Affordable 21st Century Destroyer, „Naval Engineers Journal”, May 1993, pp. 213 – 223.
- [10] Wiśniewski A., *Pancerze – budowa, projektowanie i badanie*, WNT, Warszawa 2001.

ABSTRACT

The paper presents the results of investigations into mechanical properties of samples of AlZn5Mg2CrZr alloy and hull steel of typical strength cat. A stretched on a rotational hammer at high speed of the hammer face (10, 20, 30 m/s). It makes an assessment of changes in mechanical properties of these materials for the increase in impact speed from 10⁻² [m/s] do 30 [m/s].

The dynamic load, being a result of hammer impact at speed up to 10 [m/s] on samples of AlZn5Mg2CrZr alloy and hull steel results in increase of their strength in relation to static load in the range dependent on distortion speed.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stanisław Dobrociński