

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

## **WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I KOROZYJNE STOPU $AlZn5Mg1$ PO MODYFIKACJI PIERWIASTKAMI STOPOWYMI**

### **STRESZCZENIE**

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych i wytrzymałości na zmęczenie stopu  $AlZn5Mg2CrZr$  jako modyfikacji  $AlZn5Mg1$  pierwiastkami stopowymi typu Cr, Zr, Ti. Odporność zmęczeniową wyznaczono, poddając badane stopy obrotowo-giętemu zginaniu w powietrzu i w 3% wodnym roztworze NaCl po różnych obróbkach cieplnych. Badania wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej tych stopów przeprowadzono dla wybranego zakresu cykli naprężeń zmęczeniowych (c.n.). Pozwoliło to na dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych na lekkie spawane konstrukcje okrętowe podlegające cyklicznie zmiennym obciążeniom eksploatacyjnym. Badania wykazały, że parametry obróbki cieplnej decydują o wytrzymałości zmęczeniowej w powietrzu i wodzie morskiej. Modyfikacja struktury Cr i Zr stopu  $AlZn5Mg1$  spowodowała, że wykazał on lepszą odporność korozyjno-zmęczeniową przy zastosowaniu odpowiednich parametrów obróbki cieplnej.

### **WSTĘP**

W latach osiemdziesiątych w przemyśle okrętowym zaczęto stosować wysokowytrzymały, plastycznie przerabiany stop  $AlZn5Mg1$ , opisany cechą PA47. Właściwości tego stopu, podobnie jak innych stopów układu Al-Zn-Mg, silnie związane są z parametrami obróbki cieplnej. Dodatkowo stopy Al-Zn-Mg mają cechę samorzutnego umacniania się złączy spawanych w wyniku przesycań i naturalnego starzenia. Te walory zdecydowały, że zaczęto stosować  $AlZn5Mg1$  także w budowie okrętów, wykonując dużą nadbudówkę okrętu projektu 620. Już krótka, ale intensywna eksploatacja okrętu wykazała małą odporność tej konstrukcji na korozję.

Naprężenia eksploatacyjne (cykliczne zmienne) w połączeniu z naprężeniami (pozostającymi) związanymi z etapem budowy (spawanie, prostowanie itp.) spotęgowały intensywność korozji. Wygenerowało to konieczność modyfikacji składu chemicznego PA47 pierwiastkami zwiększającymi odporność na korozję, przede wszystkim zmęczeniową.

Konstrukcje okrętowe, zwłaszcza jednostek szybkich, np. kadłuby okrętów typu półśliskiego, katamarany i poduszkowce, podlegają połączoneму oddziaływaniu dużych, zmiennych obciążeń eksploatacyjnych i korozyjnego środowiska morskiego (wody i atmosfery morskiej). W przypadku ich niewłaściwego zabezpieczenia zestawami farb (lub ich uszkodzenia) istotną właściwością okrętowego materiału konstrukcyjnego jest jego wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjna.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu losowo zmiennych obciążeń (praca konstrukcji okrętu na fali) i korozyjnego oddziaływania środowiska morskiego na wytrzymałość zmęczeniową i zmęczeniowo-korozyjną stopu AlZn5Mg2CrZr oraz porównanie jego właściwości z właściwościami obecnie stosowanego stopu PA47.

Porównanie uzyskanych wyników badań pozwoliło na ustalenie, w jakim stopniu modyfikacja składu chemicznego stopu PA47 polegająca na zwiększeniu zawartości Cr, Zr, Ti i ograniczeniu Mn oraz odpowiednio dobrana obróbka cieplna wpływają na prędkość i przebieg pękania zmęczeniowego i zmęczeniowo-korozyjnego stopów Al-Zn-Mg. Modyfikacja miała ograniczyć wpływ wielkości i nasilenia obecności faz wtórnych w granicach ziaren (GZ) oraz w otaczających je strefach wolnych od wydzielen (SWW), co było przyczyną intensywnej korozji PA47.

## **SKŁAD CHEMICZNY I PARAMETRY ZASTOSOWANEJ OBRÓBK CIEPLNEJ MATERIAŁÓW UŻYTYCH DO BADAŃ**

Składy chemiczne stopów AlZn5Mg2CrZr i AlZn5Mg1 podano odpowiednio w tabelach 1. i 2.

Efektywne umocnienie stopów aluminium polega na wprowadzeniu atomów obcych i dyslokacji do sieci metalu podstawowego oraz na tworzeniu odpowiedniej liczby bardzo mocnych i stabilnych wydzielen fazy międzymetalicznych w postaci drobnych i równomiernie rozmieszczonych cząstek. W celu zapewnienia wysokiego udziału objętościowego wydzielen powinny one powstawać z pominięciem atomów metalu podstawowego i w miarę możliwości poza granicami ziaren i innych defek-

tów struktury krystalicznej. Defekty te bowiem obniżają barierę energetyczną zarodkowania, a przez to stają się uprzywilejowanymi miejscami wydzielania faz wtórnych [5, 8, 10].

Tabela 1. Skład chemiczny stopu AlZn5Mg2CrZr (spr. IMN-OML nr 4550/91,336 OML/91/) [4]

Nr wytopu	Skład chemiczny [%]											Nr partii i atestu
	Zn	Mg	Cr	Zr	Ti	Fe	Si	Cu	Mn	Ni	Al	
507	5.13	1.9	0.16	0.15	0.07	0.27	0.15	0.08	0.057	0.006	reszta	1086

Tabela 2. Skład chemiczny stopu AlZn5Mg1 (2945/485/4 ZN 81/MH MN-190-06) [4]

Wytop	Skład chemiczny [%]										Nr partii i atestu <i>Al – reszta</i>
	Mg	Mn	Ti	Zn	Cr	Si	Fe	Cu	Zr		
AlZn5Mg1	1,25	0,18	0,034	5,3	0,14	0,16	0,32	0,05	0,04	485/4	

W stopie AlZn5Mg2CrZr w stosunku do PA47 zwiększono zawartość Cr, Zr, które tworzą wydzielania koherentne faz wtórnych, sterujące procesami rekrytalizacji i rozrostu ziaren lub związków typu  $Al_3Mg_2$ , a ich obecność zwykle poprawia ciągliwość i wytrzymałość zmęczeniową badanych stopów. Zwiększona zawartość Ti spowodowała drobnoziarnistość struktury przez zmniejszenie rozmiaru ziaren i udziału dużych cząstek faz wtórnych w osnowie ziaren i ich granicach (SWW), przyczyniając się do wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej i odporności na pękanie stopów Al-Zn-Mg. Zmniejszenie zawartości Fe i Si w dużych wydzieleniach powinno zwiększyć ciągliwość badanych stopów [1, 2].

Z przeglądu literatury [1, 2, 3, 4, 11, 12] wynika, że parametry zastosowanej obróbki cieplnej decydują nie tylko o właściwościach mechanicznych badanych materiałów, ale mają istotny wpływ na wytrzymałości zmęczeniową i zmęczeniowo-korozyjną. Dlatego badane stopy poddano dodatkowej obróbce cieplnej o parametrach podanych w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry obróbki cieplnej stopów AlZn5Mg2CrZr i AlZn5Mg1

Opis stopu	Parametry obróbki cieplnej stopów układu Al-Zn-Mg			Ozn. obróbki cieplnej
	Przesycanie		Starzenie	
	Temperatura i czas przesycania	Sposób chłodzenia po przesycaniu		
AlZn5Mg2CrZr AlZn5Mg1	450 °C/1.5 h 430 °C/45'	powietrze 20 °C	leżakowanie 100 dni	ta
AlZn5Mg2CrZr AlZn5Mg1	450 °C/1.5 h 430 °C/45'	woda 20 °C	20 °C/6 dni + sztuczne starzenie: 95 °C/15 h + 150 °C/10 h	tb <sub>21</sub>
AlZn5Mg2CrZr AlZn5Mg1	450 °C/1.5 h 430 °C/45'	powietrze 20 °C	20 °C/6 dni + sztuczne starzenie: 95 °C/15 h + 150 °C/10 h	tb <sub>23</sub>
AlZn5Mg2CrZr AlZn5Mg1	450 °C/1.5 h 430 °C/45'	woda 80 °C	20 °C/6 dni + sztuczne starzenie: 95 °C/15 h + 150 °C/10 h	tb <sub>22</sub>

Badany stop AlZn5Mg2CrZr **naturalnie umocniony wydzieleniowo** (ozn. **ta**) otrzymano przez przesycanie w temperaturze około 450 °C w ciągu około 1,5 h i następnie naturalnie starzono w temperaturze otoczenia. Te parametry obróbki cieplnej są charakterystyczne dla złączy spawanych, w których ciepło spawania zapewnia przesycanie, a stygnięcie na powietrzu to naturalne chłodzenie. Ten sam stop **sztucznie umocniony wydzieleniowo** (ozn. **tb**) uzyskano wskutek przesycania w temperaturze około 450 °C w ciągu około 1,5 h i chłodzenie w powietrzu lub wodzie oraz sztuczne starzenie dwustopniowe (90 °C – 8 h i 145 °C – 16 h). Dla stopu PA47 zastosowano zbliżoną obróbkę cieplną jak dla AlZn5Mg2CrZr, jednak obniżono temperaturę i czas przesycania (430 °C – 45 min).

Dobór parametrów obróbki cieplnej stopów Al-Zn-Mg w znacznym stopniu reguluje proces wydzielania faz przejściowych i równowagowych typu MgZn<sub>2</sub>, strukturę osnowy oraz stopień koherencji wydzielen z osnową. Regulowane przebiegami starzenia wielkości tych wydzielen zwykle rosną, co prowadzi do rozwoju odkształceń (wzrostu HB) związanych z ich pomieszczeniem w strukturze. W pewnych warunkach związana z tymi odkształceniami energia odkształceń cyklicznych

przekracza poziom granicy koherentnej powierzchni styku wydzielen z osnową i wydzielenia stają się niekoherentne. Towarzyszy temu zmiana wzajemnego oddziaływania pomiędzy wydzieleniem a dyslokacjami – od oddziaływania polegającego na tworzeniu pętli dyslokacyjnych lub omijaniu wydzielen. Bezpośrednim efektem tych zmian wydają się być zmiany w nachyleniu krzywych prędkości pęknięcia zmęczeniowego funkcji szybkości chłodzenia.

## METODYKA BADAŃ

Do wyznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej wymagana jest znajomość właściwości mechanicznych badanych materiałów konstrukcyjnych. Właściwości mechaniczne badanych stopów Al-Zn-Mg wyznaczono na maszynie wytrzymałościowej firmy MTS zgodnie z EN 10002-1 + AC1. Wyznaczona granica wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  była podstawą doboru poziomu obciążeń zmęczeniowych badanych stopów Al-Zn-Mg. Wartości  $R_m$  dla badanych stopów aluminium silnie uzależnione były od parametrów obróbki cieplnej, dlatego wyznaczono właściwości mechaniczne dla każdego rodzaju obróbki cieplnej.

Próbki badanych materiałów wycięte zostały wzdłuż kierunku walcowania z blach o grubości 12 mm. Kształt, wymiary i stan powierzchni próbek były zgodne z PN-76/H-04325.

Do wyznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej użyto czterostanowiskowej maszyny zmęczeniowej do badań giętno-obrotowych typu UBM produkcji VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig. Badania te przeprowadzono w temperaturze otoczenia, poddając próbki zginaniu obrotowo-giętnemu z częstotliwością 50 Hz w dwóch środowiskach:

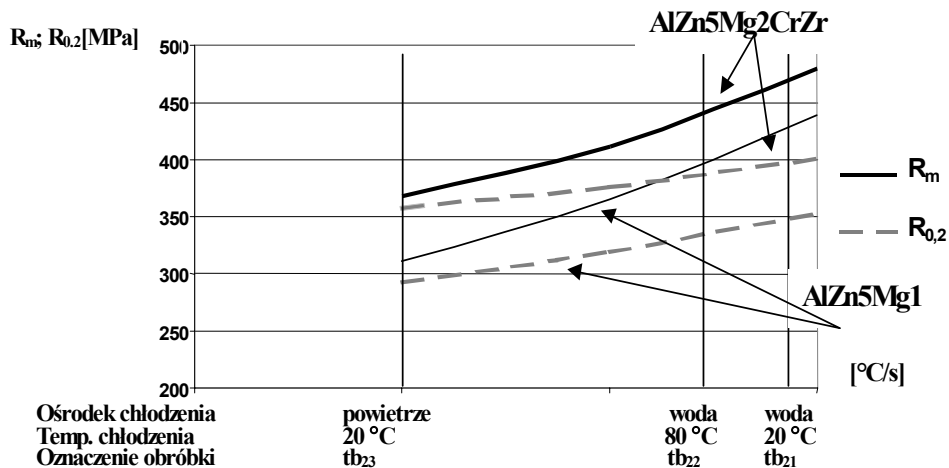
- powietrze o temperaturze pokojowej;
- 3% r.w. NaCl.

## WYNIKI BADAŃ

Wpływ obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne badanych materiałów przedstawiono graficznie na rysunku 1., a dokładnie opisano w tabeli 4.

Właściwości stopów Al-Zn-Mg są silnie uzależnione od składu chemicznego i obróbki cieplnej (czynników metalurgiczno-technologicznych), decydujących o stopniu ich umocnienia wydzieleniami faz wtórnych [2, 5, 8, 10].

Wzrost szybkości chłodzenia po przesyleniu powoduje wzrost właściwości wytrzymałościowych badanych stopów, przy czym stop AlZn5Mg2CrZr wykazuje wyższe właściwości wytrzymałościowe niż stop AlZn5Mg1. Jest to efekt nie tylko zmian struktury stopów Al-Zn-Mg pod wpływem obróbki cieplnej, ale także składu chemicznego.



Rys. 1. Wpływ obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne stopów układu Al-Zn-Mg

Różnice we właściwościach mechanicznych badanych stopów układu Al-Zn-Mg wynikają z różnych składów chemicznych. Wyższe własności mechaniczne miał stop AlZn5Mg2CrZr, dzięki większej sumarycznej zawartości cynku i magnezu o około 0,5% oraz zwiększonej zawartości miedzi o około 0,04% w stosunku do stopu AlZn5Mg1. Równie duży wpływ na własności mechaniczne miały cyrkon i tytan, których zawartość procentowa w stopie AlZn5Mg2CrZr była dwukrotnie większa niż w stopie AlZn5Mg1. Wzrost zawartości cynku i magnezu jako głównych pierwiastków stopowych spowodował, że stop AlZn5Mg2CrZr uzyskał lepsze własności mechaniczne. Cynk w obecności magnezu oraz miedzi wyraźnie podnosi własności mechaniczne, szczególnie w stopach Al-Zn-Mg obrabialnych cieplnie. Tytan i cyrkon jako dodatki stopowe zapewniają drobnoziarnistość struktury przez wstrzymywanie rozrostu ziaren podczas obróbki cieplnej. Natomiast zwiększona zawartość magnezu i zbliżone zawartości krzemu powodują, że związki międzymetaliczne Mg<sub>2</sub>Si czy Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, które utwardzają stop, liczniej powstają w stopie AlZn5Mg2CrZr niż w stopie AlZn5Mg1. Nie pozostaje to bez wpływu na podatność do odkształceń plastycznych.

Tabela 4. Zestawienie własności mechanicznych badanych materiałów AlZn5Mg2CrZr i materiału porównywanego AlZn5Mg1 w zależności od stanu obróbki cieplnej

Opis stopu	Własności mechaniczne		
	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
<b>AlZn5Mg2CrZr</b>	423	379	14,3
<b>ta</b>	418	258	14,0
<b>tb<sub>21</sub></b>	480	438	9,2
<b>tb<sub>22</sub></b>	465	418	9,8
<b>tb<sub>23</sub></b>	381	310	11,5
AlZn5Mg1	310	240	13,1
ta	386	242	22,3
tb <sub>21</sub>	401	354	17,9
tb <sub>22</sub>	376	319	17,8
tb <sub>23</sub>	358	293	14,3

Przy wyznaczaniu wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej badanych stopów na każdy z pięciu poziomów naprężeń przypadało po 5 jednakowych próbek. Badania rozpoczynano od najwyższego poziomu naprężeń, przy którym następowało zniszczenie próbek po około 10<sup>4</sup> cyklach. Naprężenia gnące w badanym przekroju próbki określono z zależności:

$$\sigma_g = 509,5 \frac{F}{d^3} [\text{MPa}], \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_g$  – naprężenie gnące [MPa];  
 $F$  – siła gnąca [N];  
 $d$  – średnica próbki [mm];  
 509,5 [mm] – wartość wynikająca z rozstawu uchwytów mocujących maszyny zmęczeniowej.

Wyniki badań poddano opracowaniu statystycznemu.

Na rysunkach 2. i 3. przedstawiono graficznie wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej dla badanych stopów.

Zgodnie z metodyką obróbki matematycznej wyników badań określono przebieg krzywych Wohlera przy założeniu prawdopodobieństwa  $P = 0,95$ . Przykładowe funkcje regresji dla wybranej obróbki cieplnej przedstawiono wzorami (2) i (3) [6].

Dla stanu **ta**:

- w środowisku obojętnym otrzymano następujące funkcje regresji  
/n = 2,77 x 10<sup>5</sup> (21,52 x 10<sup>6</sup>) c.n./

$$\sigma_g = -47,57 \log n_E + 473,5 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

przy współczynniku korelacji  $r_k = -0,95$ ;

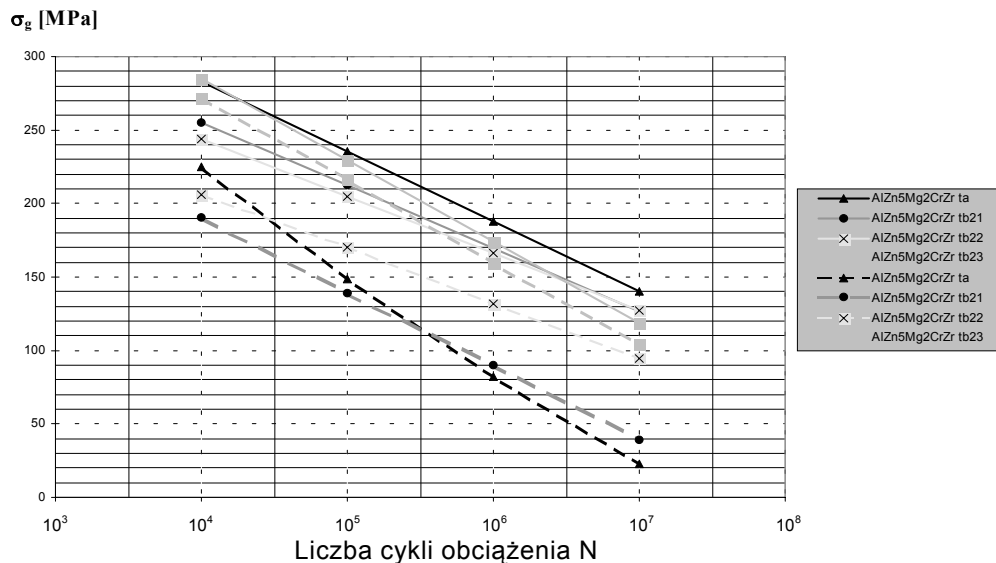
- w środowisku korozyjnym /n<sub>K</sub> = 21,25 x 10<sup>6</sup> (0,88 x 10<sup>7</sup>) c.n./

$$\sigma_g = -58,39 \log n_{EK} + 458,3 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

przy współczynniku korelacji  $r_k = -0,93$ .

Stop AlZn5Mg2CrZr w stanie obróbki cieplnej oznaczony **ta** miał małą odporność na korozję zmęczeniową – krzywe Wöhlera dla środowiska obojętnego i korozyjnego wykazały dużą rozbieżność oraz duże zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej w środowisku korozyjnym (rys. 2.).

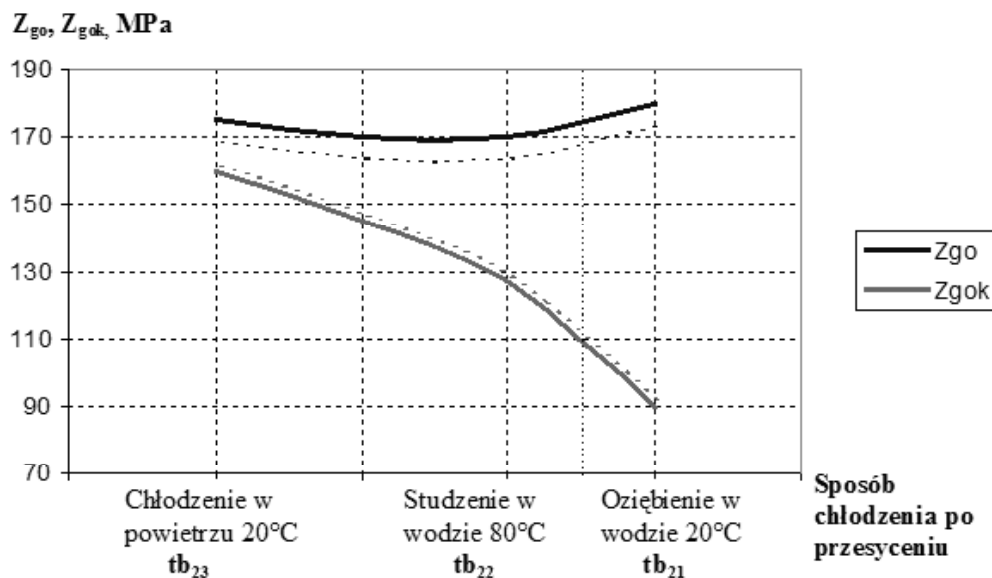
Po obróbce **tb<sub>21</sub>** stop AlZn5Mg2CrZr wykazał gorszą odporność na korozję zmęczeniową tego stopu po obróbce **tb<sub>22</sub>**, lecz lepszą od **ta**. Najlepszą odporność na korozję zmęczeniową wykazał stop AlZn5Mg2CrZr po obróbce **tb<sub>23</sub>** (rys. 2.).



Rys. 2. Krzywe Wöhlera dla próbek poddanych obróbce cieplnej i obustronnemu zginaniu (dla  $f = 50$  Hz) wykonanych ze stopu AlZn5Mg2CrZr w środowisku obojętnym (powietrze) oznaczone linią ciągłą i w środowisku korozyjnym oznaczone linią przerywaną



Na rysunku 3. przedstawiono wpływ szybkości chłodzenia po przesyleniu na wytrzymałość zmęczeniową i zmęczeniowo-korozyjną stopu AlZn5Mg2CrZr dla  $N = 10^6$  c.n.



Rys. 3. Wpływ szybkości chłodzenia po przesyleniu na wytrzymałość zmęczeniową i zmęczeniowo-korozyjną stopów AlZn5Mg2CrZr (opisano linią ciągłą) oraz dla porównania stopu AlZn5Mg1 (opisano linią przerywaną) dla  $N_E = 10^6$  c.n.

Z rysunku 3. wynika, że nowy stop AlZn5Mg2CrZr ma nieco lepszą wytrzymałość zmęczeniową (powietrze) od stopu PA47, natomiast wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjna badanych stopów jest zbliżona. Jednocześnie można zauważyć, że ze wzrostem szybkości chłodzenia po przesyleniu ( $tb_{21}$ ) wytrzymałość zmęczeniowa rośnie dla obu stopów, a wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjna radykalnie spada.

### ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Badany stop AlZn5Mg2CrZr pochodził z dwóch wytopów, niewiele różniących się składem chemicznym. Dwustopniowa po przesyleniu obróbka cieplna (stan  $tb_{23}$ ) nie była ukierunkowana na wysokie własności wytrzymałościowe. W wyniku zbyt wolnego chłodzenia (w powietrzu) po przesyleniu i następnego dwustopniowego starzenia osiągnięto granicę plastyczności  $R_{0,2} = 310$  MPa i wytrzymałość  $R_m = 381$  MPa.

Zaletą tej obróbki jest duża odporność na korozję zmęczeniową – krzywe Wöhlera dla środowiska obojętnego i korozyjnego wykazują małą rozbieżność (rys. 3.). Stop AlZn5Mg2CrZr **tb**<sub>23</sub> wykazał także dobrą odporność na korozję naprężeniową.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej stopów Al-Zn-Mg po różnych obróbkach cieplnych

Lp.	Stop w stanie	Odporność na korozję zmęczeniową $f = 50$ Hz				Zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej wskutek korozji
		powietrze		3% r.w. NaCl		
		$N = 10^5$ $Z_{go}$ MPa	$N = 10^6$ $Z_{go}$ MPa	$N = 10^5$ $Z_{gok}$ MPa	$N = 10^6$ $Z_{gok}$ MPa	$N = 10^6$ c.n. $\frac{Z_{go} - Z_{gok}}{Z_{go}} 100\%$
1	AlZn5Mg2CrZr <b>tb</b> <sub>21</sub>	210	170	139	90	47,1
2	AlZn5Mg2CrZr <b>tb</b> <sub>22</sub>	203	168	170	130	21,6
3	AlZn5Mg2CrZr <b>tb</b> <sub>23</sub>	230	173	215	165	4,6
4	AlZn5Mg1 <b>tb</b> <sub>21</sub>	232	179	202	127	29
5	AlZn5Mg1 <b>tb</b> <sub>22</sub>	233	177	226	156	11
6	AlZn5Mg1 <b>tb</b> <sub>23</sub>	228	171	220	160	7

Stop AlZn5Mg2CrZr po przesyleniu, chłodzony w zimnej wodzie **tb**<sub>21</sub> i następnie starzony dwustopniowo, wykazał mniejszą odporność na korozję zmęczeniową (krzywe Wöhlera dla środowiska obojętnego i korozyjnego wykazują dużą rozbieżność), a także wykazał skłonność do korozji naprężeniowej.

Stop AlZn5Mg2CrZr **ta** (przesycany i naturalnie starzony) ma bardzo małą odporność na korozję zmęczeniową – krzywe Wohlera dla środowiska obojętnego i korozyjnego wykazują dużą rozbieżność (rys. 3.) oraz duże zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej w środowisku korozyjnym. Stop ten wykazał również małą odporność na korozję warstwową występującą pod naprężeniem.

Porównując ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową badanych stopów układu Al-Zn-Mg w środowisku obojętnym, stwierdzono, że największą wytrzymałość wykazał stop AlZn5Mg2CrZr **tb**<sub>23</sub>, następnie w kolejności stop AlZn5Mg1 **tb**<sub>23</sub> oraz **tb**<sub>22</sub> i **tb**<sub>21</sub>, przy czym dla  $N = 10^6$  c.n. Wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjna stopów Al-Zn-Mg w stanach **tb** była w zasadzie taka sama (rys. 3.).

Badane stopy wykazały przy  $N = 10^6$  c.n. (tabela 5. i 6.) następujące zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej w środowisku korozyjnym w porównaniu do

środowiska obojętnego: stop AlZn5Mg2CrZr **min.** dla  $tb_{23}$  – **4,6%** i **max** dla  $ta$  – **58%**, stop AlZn5Mg1 **min.** dla  $tb_{23}$  – **7%** i **max** dla  $ta$  – **58%**, stop AlMg4,5Mn r – **24,8%**, stop AlMg6 r – **35%**.

Reasumując, przeprowadzone badania odporności zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej stopów AlZn5Mg2CrZr i AlZn5Mg1 pozwalają na sformułowanie następujących konkluzji:

1. Wytrzymałość zmęczeniowa i zmęczeniowo-korozyjna sztucznie starzonych stopów układu Al-Zn-Mg zależy od szybkości chłodzenia po przesyleniu. Wzrost szybkości chłodzenia ( $tb_{21}$ ) zwiększa wytrzymałość zmęczeniową, ale obniża radykalnie wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjną. Zmniejszenie szybkości chłodzenia po przesyleniu ( $tb_{23}$ ) zwiększa wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjną. Zastosowanie dla stopów układu Al-Zn-Mg przesylenia i chłodzenia w gorącej wodzie ( $tb_{22}$ ) i dwustopniowe sztuczne starzenie umożliwia otrzymanie znacznej wytrzymałości statycznej  $R_m > 460$  MPa  $R_{0,2} > 410$  MPa i odpowiedniej wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej.
2. Wytrzymałość zmęczeniowa ( $Z_{go}$ ) stopu AlZn5Mg2CrZr i AlZn5Mg1 jest natomiast zbliżona do wytrzymałości zmęczeniowo-korozyjnej ( $Z_{gok}$ ) po obróbce  $tb_{23}$  dla stopu AlZn5Mg2CrZr i jest wyższa niż dla stopu AlZn5Mg1 pomimo znacznie wyższej sumarycznej zawartości ( $Zn + Mg > 7\%$ ), co może być spowodowane zwiększoną zawartością Zr i Cr w stopie, a także zwiększoną temperaturą i czasem przesylenia. Po pozostałych obróbkach cieplnych lepszą odporność zmęczeniową wykazał stop AlZnMg1.

## WNIOSKI

1. Modyfikacja struktury stopu AlZn5Mg1 pierwiastkami stopowymi, jak Cr, Zr i Ti, poprawia zasadniczo właściwości wytrzymałościowe o około 15%, ale obniżenia właściwości plastyczne jako efekt umocnienia wydzieleniowego w postaci twardych faz  $Al_3Mg_2$ , których liczba i sposób rozmieszczenia zależy od szybkości chłodzenia po przesyleniu.
2. Modyfikacja struktury stopu AlZn5Mg1 zwiększa wytrzymałość zmęczeniową tego stopu o około 10%, jednak pogarsza wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjną w 3% roztworze wodnym NaCl, szczególnie przy zwiększeniu chłodzenia po przesyleniu.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Akers W., *Corrosion-Induced Fatigue Measurements on 2024 and 7075 Aluminum Using Photon-Induced Positron Annihilation (PIPA)*, Dec. 2002.
- [2] Davis J. R., *Aluminium and Aluminium Alloys*, Ohio 2004.
- [3] Dexter S. C., *Effects of Stress on Localized Corrosion in Al and Al Alloys*, „Ohio State Univ Columbus Dept of Materials Science and Engineering”, 2005.
- [4] Dexter S. C., *Mechanism of Passivity Breakdown in Seawater*, „Delaware Univ Newark Coll of Marine Studies”, 2000.
- [5] Hahn G. T., Rosenfield A. R., „*Metalurgical Transactions*” A, Vol. 6A, pp. 653 – 668, April 1975.
- [6] Ingraffea A., *Probabilistic Simulation of Fatigue Crack Initiation*, Probabilistic Simulation of Fatigue Crack Initiation, 2001.
- [7] Jurczak W., *Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i odporność korozyjną stopów układu Al-Zn-Mg przeznaczonych na spawane konstrukcje okrętowe*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998.
- [8] Kawabata T., Izumi O., „*Acta Metall*”, Vol. 24, pp. 817 – 825, 2005.
- [9] Kenneth G., *Mechanical Properties of 7076-T6 Aluminum Alloy*, „Naval Air Warfare Center Aircraft Div Patuxent River Md”, Aug. 2000.
- [10] Kocańda S., *Zmęczeniowe zniszczenie metali*, WNT, Warszawa 1978.
- [11] Milman Y. V., *High-Strength Aluminum Alloys*, Ohio 2004.
- [12] Sanders H. C., *Microstructural Effect on Fatigue of 7075 Aluminum Alloy*, „Naval Air Warfare Center Aircraft Div Patuxent River Md”, 2002.

**ABSTRACT**

The article presents the results of investigations into mechanical properties and fatigue strength of rotary-flexural bending in the air medium and in 3% NaCl water solution of Al-Zn-Mg alloys samples in various stages of heat treatment. The trials were conducted for selected range of corrosion fatigue strength of tested alloys, which in turn, permitted selecting appropriate materials for light vessel structures affected by high changing loads in sea water. The research indicated that heat treatment parameters decide about fatigue strength of examined materials in air and sea water. Modification of Cr and Zr structures of AlZn5Mg1 alloy resulted in higher corrosion-fatigue resistance of the alloy when appropriate heat treatment parameters were applied.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stanisław Dobrociński