

Wojciech Jurczak

WPLYW LITU NA WLAŚCIWOŚCI I ODPORNOŚĆ KOROZYJNĄ STOPÓW Al-Zn-Mg W WODZIE MORSKIEJ

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych i odporności na korozję naprężeniową stopu AlZn_{4,5}Mg_{1,2}Li o zmiennej zawartości Li (1,2 – 2,5%) poddanego obróbce cieplnej jako modyfikacji okrętowego stopu AlZn₅Mg₁.

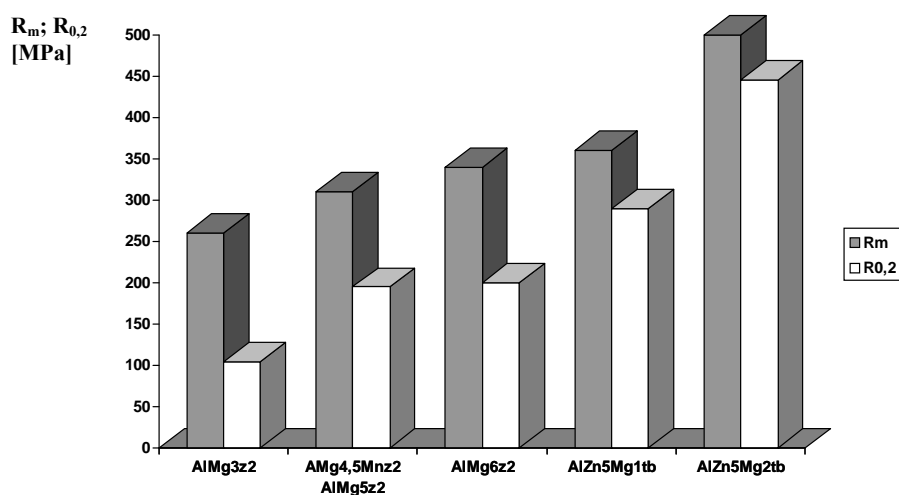
WSTĘP

Zastosowanie stopu AlZn₅Mg₁ (cecha PA47) do budowy nadbudówki okrętu projektu 620 spowodowało wiele problemów eksploatacyjnych tej jednostki pływającej. Niewłaściwa technologia prostowania dużych elementów konstrukcyjnych zastosowana na etapie budowy, polegająca na przekroczeniu dopuszczalnych temperatur (350 °C) nagrzewania [3], była jedną z przyczyn wzmożonej podatności dużej nadbudówki na pękanie korozyjne podczas eksploatacji [4]. Pęknięcia korozyjne występowały masowo nie tylko na zewnętrznych powierzchniach, mających bezpośredni kontakt z czynnikami korozyjnymi (woda i atmosfera morska), ale także na powierzchniach wewnętrznych, przede wszystkim na łączeniach spawanych i nitowanych. Powodem inicjującym korozyjne pęknięcia połączeń nitowanych było uszkodzenie przekładki izolacyjnej występującej między stalową zrebrnicą kadłuba a aluminiową nadbudówką w wyniku nagrzewania palnikami acetylenowymi w procesie prostowania. Natomiast w połączeniach spawanych korozji ulegał obszar strefy wpływu ciepła (SWC) powstały podczas procesu spawania potęgowany naprężeniami eksploatacyjnymi. Opisane błędy technologiczne popełnione na etapie budowy spowodowały przyspieszone zużycie korozyjne i degradację właściwości wytrzymałościowych konstrukcji nadbudówki okrętu.

Fakty te wymusiły poszukiwanie rozwiązań mających na celu zachowanie wysokich właściwości wytrzymałościowych zastosowanego stopu AlZn5Mg1 przy jednoczesnym zwiększeniu odporności korozyjnej.

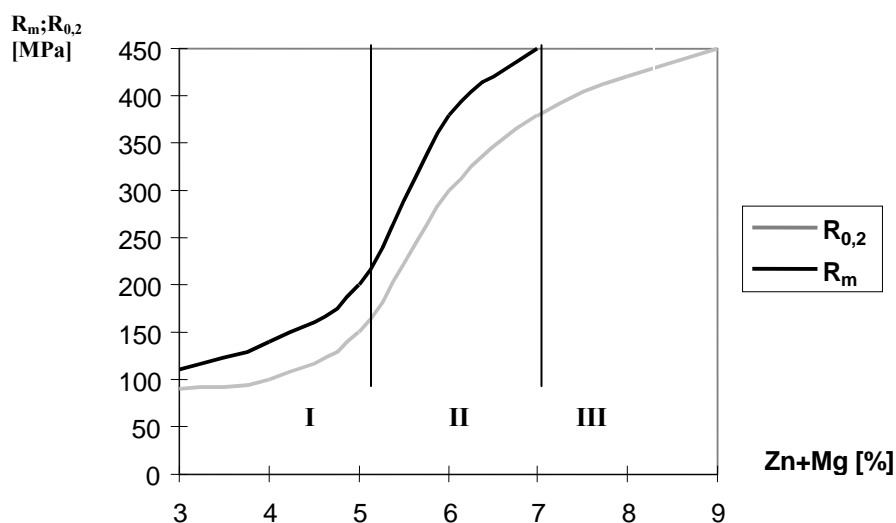
Właściwości wytrzymałościowe stosowanych stopów aluminium w budownictwie okrętowym przedstawiono na rysunku 1.

Wprowadzono modyfikację składu chemicznego stopu AlZn5Mg1 przez zastosowanie zwiększonej zawartości Ti, Zr i ograniczenie Mn oraz sumarycznej zawartości Zn + Mg. Szczegółowe badania i właściwości tego stopu podano w pracy [5]. Równoległe podjęto próbę modyfikacji stopu PA47 litem. Lit jest modyfikatorem stopów aluminium stosowanych w konstrukcjach lotniczych i kosmicznych, np. do konstrukcji zbiorników ciekłego tlenu i wodoru w pojazdach kosmicznych [2]. Jedną z korzyści stosowania litu jest zwiększenie odporności na korozję oraz zwiększenie wytrzymałości względnej stopów aluminium przez wykorzystanie faktu, że gęstość tego pierwiastka jest pięciokrotnie niższa od aluminium ($\rho_{\text{Li}} = 7,9 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{Li}} = 0,534 \text{ g/cm}^3$). Lit stosowany jest także z powodu wysokiej wartości modułów, sprężystości wzdłużnej i poprzecznej, doskonałych właściwości zmęczeniowych i kriogenicznych. Znane są zastosowania stopów opisane jako „Weldalite 049” i CP276 [2].



Rys. 1. Orientacyjne właściwości wytrzymałościowe stopów Al-Mg i Al-Zn-Mg: z2 – ćwierćtwadry; tb – przesycony i sztucznie utwardzony wydzieleniowo

Wysokie właściwości wytrzymałościowe przy – jak wykazała praktyka – dużej podatności na korozję pod naprężeniem i korozję warstwową stopów układu Al-Zn-Mg o $Zn + Mg > 6\%$ (rys. 2.) spowodowały, że stały się one przedmiotem intensywnych badań.



Rys. 2. Wpływ zawartości Zn + Mg na mechaniczne właściwości i skłonność do korozji naprężeniowej stopów Al-Zn-Mg przy $Zn/Mg = 2,5$

Ze wzrostem sumarycznej zawartości Zn + Mg wzrasta skłonność do korozji naprężeniowej (rys. 2.). Stopy o zawartości Zn + Mg $< 5\%$, znajdujące się w przedziale I, nie są skłonne do korozji naprężeniowej i można je stosować w warunkach korozyjnych bez specjalnej obróbki cieplnej. Stopy zawierające Zn + Mg w przedziale 5,0 – 7,0% mogą być skłonne do korozji naprężeniowej (przedział II). Jeżeli zawartość sumaryczna Zn + Mg $> 7\%$ (przedział III), stop staje się nieodporny na korozję naprężeniową.

Badany stop AlZn5Mg1 znajduje się w przedziale podatnej lub wzmoczonej skłonności do korozji naprężeniowej. Modyfikacja struktury przez zastosowanie pierwiastków stopowych, jak Li, Ti, Zr, oraz odpowiedni dobór parametrów obróbki cieplnej tego stopu może wpłynąć na wzrost odporności na korozję naprężeniową przy zachowaniu wysokich właściwości wytrzymałościowych stopów Al-Zn-Mg. Dlatego też materiałem w poniżej przedstawionych badaniach jest modyfikowany stop AlZn5Mg1.

SKŁAD CHEMICZNY MODYFIKOWANEGO STOPU

Skład chemiczny stopu PA47, jaki zastosowano do budowy nadbudówki okrętu projektu 620, i skład chemiczny stopu modyfikowanego AlZn_{4,5}Mg_{1,2}Li podano odpowiednio w tabeli 1. i tabeli 2.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu **AlZn₅Mg₁ tb**/ZN 81/MH-MN-190-06/

Nr wytopu	Skład chemiczny [%]										Nr partii i atestu
	Mg	Mn	Ti	Zn	Cr	Si	Fe	Cu	Zr	Al	
485/4	1,25	0,18	0,034	5,3	0,14	0,16	0,32	0,05	0,04	reszta	2945/485/4

Tabela 2. Skład chemiczny stopu **Al-Zn-Mg-Li**

Nr stopu	Skład chemiczny [%]									
	Li	Zn	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zr	Ti	
1.1	1,15	4,60	1,15	0,20	0,15	0,18	0,12	0,14	0,03	
1.8	1,82	4,50	1,20	0,26	0,22	0,10	0,07	0,15	0,04	
2.5	2,50	4,55	1,15	0,22	0,20	0,15	0,08	0,14	0,04	

Składy chemiczne stopów zestawionych w powyższych tabelach pokazują, że dla badanego stopu sumaryczna zawartość Zn + Mg wynosi 5,7 – 7,05%, a więc jest na pograniczu przedziału wzmoczonej korozji (rys. 2.). Dodatkowo przekroczenie dopuszczalnej dla stopów morskich zawartości miedzi może spowodować, że zastosowane modyfikatory, jak Li, Zr, Ti, nie przyniosą oczekiwanego wzrostu odporności na korozję.

PARAMETRY OBRÓBKI CIEPLNEJ BADANEGO STOPU

Na właściwości mechaniczne i odporność korozyjną badanych stopów ma wpływ obróbka cieplna, szczególnie parametry przesylenia, określające prędkość chłodzenia, której wzrost z jednej strony zwiększa właściwości mechaniczne, a z drugiej bardzo obniża odporność na korozję.

Tabela 3. Parametry obróbki cieplnej badanego stopu AlZn4,5Mg1,2Li1,8 jako modyfikacji AlZn5Mg1tb

Stop	Parametry obróbki cieplnej		
	Oznaczenie	Przesycanie	Starzenie
AlZn4,5Mg1,2Li	jednostopniowa: 1-st.	530 °C/45 min chłodzenie	a) 150 °C/8 – 48 h b) 180 °C/8 – 48 h
	dwustopniowa: 2-st.	w wodzie t = 20 °C	a) 90 °C/8 – 48 h+180 °C/12 – 18 h b) 120 °C/8 – 48 h + 1800 °C/12 – 18 h c) 150 °C/8 – 24 h + 180 °C/12 – 18 h
AlZn5Mg1	ta	430 °C/45 min ozębienie w powietrzu 20 °C	naturalne starzenie 100 dni (naturalnie umocnienie wydzieleniowo)
	tb ₂₁	430 °C/45 min chłodzenie w wodzie 20 °C	naturalne starzenie 6 dni w temp. 20 °C sztuczne starzenie 95 °C/15 h + 150 °C/10 h (sztucznie umocnienie wydzieleniowo)
	tb ₂₃	450 °C/90 min chłodzenie w powietrzu 20 °C	naturalne starzenie 6 dni w temp. 20 °C sztuczne starzenie 95 °C/15 h + 150 °C/10 h (sztucznie umocnienie wydzieleniowo)
	tb ₂₂	450 °C/90 min ozębienie w wodzie 80 °C	naturalne starzenie 6 dni w temp. 20 °C sztuczne starzenie 95 °C/15 h + 150 °C/10 h (sztucznie umocnienie wydzieleniowo)

Parametrami obróbki cieplnej badanych stopów są zakres zmian temperatury i czas przesycania oraz sposób starzenia (naturalny czy sztuczny). Na podstawie długoletnich badań prowadzonych w AMW ustalono parametry tych obróbek, co szczegółowo przedstawiono w tabeli 3. [7 – 9]. Z kolei dla modyfikowanego stopu AlZn4,5Mg1,2Li1,8 parametry obróbki cieplnej dobrano na podstawie [8], podwyższając temperaturę zarówno przesycania, jak i starzenia w porównaniu ze stopem PA47. Wykorzystując te doświadczenia, wyznaczono właściwości mechaniczne badanych stopów.

WPLYW OBRÓBKII CIEPLNEJ NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE STOPÓW UKŁADU Al-Zn-Mg ORAZ Al-Zn-Mg-Li

Badania własności mechanicznych przeprowadzono zgodnie z PN-EN 10002-1 + Ac1:1998 na maszynie wytrzymałościowej MTS 1812. Szczegółowe wyniki dla wszystkich wytopów badanego stopu przedstawiono w tabelach 4. i 5.

Tabela 4. Zestawienie własności mechanicznych stopu Al-Zn-Mg-Li po jednostopniowym starzeniu (ozn. 1-st.)

Przesycanie	Parametry obróbki cieplnej		Symbol stopu (zawartość % Li)	Własności mechaniczne		
	Starzenie naturalne	Starzenie sztuczne		R _m [MPa]	R _{0,2} [MPa]	A _g [%]
		150 °C/8 h	1.1	434	330	6,5
			1.8	487	385	4,6
			2.5	425	379	2,9
		150 °C/12 h	1.1	414	300	6,3
			1.8	480	409	4,0
			2.5	430	380	2,5
		150 °C/24 h	1.1	443	350	6,5
			1.8	487	374	5,5
			2.5	456	371	5,0
530 °C/45 min	6 dni w temp. 20 °C	150 °C/48 h	1.1	458	362	7,4
			1.8	530	467	3,2
			2.5	471	435	2,0
chłodzone w wodzie T = 20 °C		180 °C/8 h	1.1	428	348	6,5
			1.8	517	440	3,0
			2.5	448	400	1,5
		180 °C/12 h	1.1	357	254	8,5
			1.8	478	382	5,0
			2.5	489	444	2,5
		180 °C/24 h	1.1	362	240	8,5
			1.8	467	367	5,5
			2.5	435	415	2,0
		180 °C/48 h	1.1	355	255	8,2
			1.8	463	352	6,2
			2.5	446	425	2,5

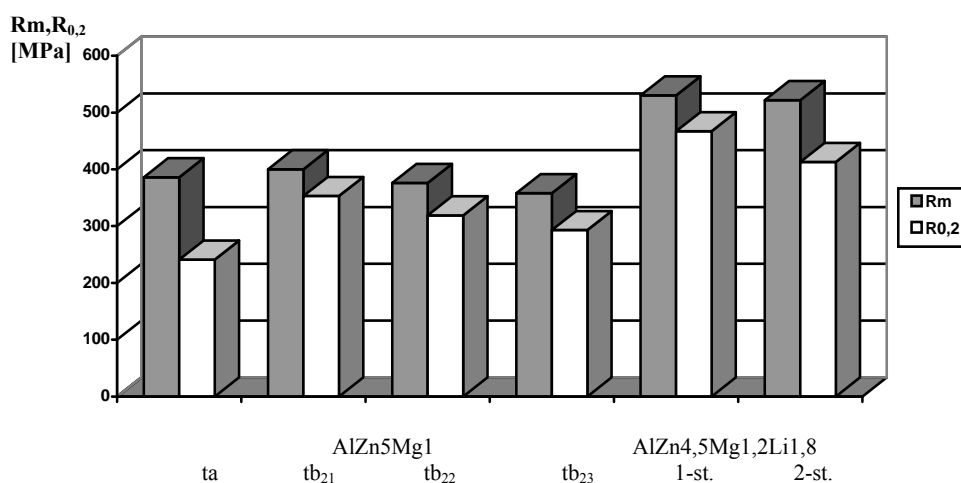
Tabela 5. Średnie własności mechaniczne stopów Al-Zn-Mg-Li po dwustopniowym starzeniu (ozn. 2-st.)

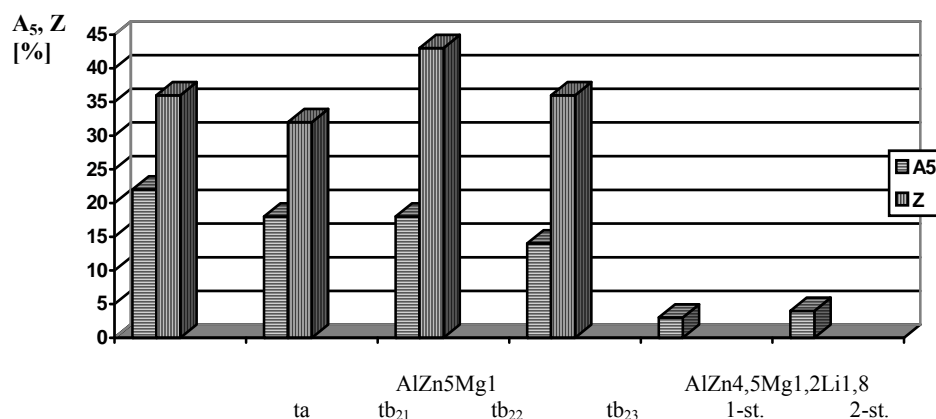
Przescycanie	Parametry obróbki cieplnej		Symbol stopu	R _m [MPa]	R _{0,2} [MPa]	A _g [%]
	Starzenie naturalne	Starzenie sztuczne				
		90 °C/8 h + 180 °C/12 h	1.1 1.8 2.5	365 509 447	256 412 418	8,0 5,0 1,5
		90 °C/12 h + 180 °C/18 h	1.1 1.8 2.5	365 515 470	262 433 425	9,3 5,0 2,0
530 °C/45 min	6 dni w temp. 20°C	120 °C/48 h + 180 °C/12 h	1.1 1.8 2.5	390 448 461	276 358 435	8,0 6,5 2,0
chłodzone w wodzie T = 20 °C		120 °C/8 h + 180 °C/18 h	1.1 1.8 2.5	397 490 476	272 376 407	7,7 5,5 2,5
		150 °C/8 h + 180 °C/12 h	1.1 1.8 2.5	364 522 462	247 413 412	8,4 4,2 2,6
		150 °C/24 h + 180 °C/18 h	1.1 1.8 2.5	380 512 486	252 430 432	8,5 4,5 2,5

Czas wygrzewania przy sztucznej jednostopniowej obróbce cieplnej badanego stopu nie ma znaczącego wpływu na jego właściwości wytrzymałościowe (po 24 h otrzymujemy zbliżone właściwości jak po 8 h) dla temperatury 150 °C. Wzrost temperatury wygrzewania do 180 °C powodują średni wzrost ok. 30 MPa właściwości wytrzymałościowych i niewielki 1,2% spadek właściwości plastycznych przy najniższym badanym czasie wygrzewania trwającym 8 h. Zwiększając czas wygrzewania do 48 h, spowodowano spadek wytrzymałości o ok. 31 MPa, ale wzrost właściwości plastycznych o 1,8%.

Wzrost temperatury wygrzewania skraca czas sztucznego starzenia i w niewielkim stopniu polepsza właściwości plastyczne dla jednostopniowego starzenia. Wprowadzenie drugiego stopnia starzenia przy zmniejszonych parametrach stopnia pierwszego (tab. 5.) nieco zmienia relacje, powodując przede wszystkim wzrost wytrzymałości średnio o 20 MPa przy niewielkim wzroście właściwości plastycznych o 0,8%. Im dłuższy czas i wyższa temperatura drugiego etapu starzenia, tym wyższe właściwości wytrzymałościowe przy mniejszych właściwościach plastycznych.

Na rysunku 3. zestawiono właściwości mechaniczne stopu AlZn5Mg1 (PA47) w różnych stanach obróbki cieplnej i najwyższe właściwości mechaniczne modyfikowanego stopu AlZn4,5Mg1,2Li dla zawartości Li = 1,82% w dwóch stanach obróbki cieplnej.





Rys. 3. Wpływ rodzaju obróbki cieplnej na własności mechaniczne stopów: AlZn5Mg1 i AlZn4,5Mg1,2Li1,8

Przeprowadzone badania stopów AlZn5Mg1 i AlZn4,5Mg1,2Li wykazały, że ich właściwości mechaniczne zależą od składu chemicznego i parametrów przeprowadzonej obróbki cieplnej. Właściwości mechaniczne stopu AlZn4,5Mg1,2Li1,8 są wyższe od stopu PA47, który zastosowano na nadbudówkę okrętu projektu 620.

Wyższe własności wytrzymałościowe stopu AlZn4,5Mg1,2Li1,8 należy tłumaczyć wpływem obróbki cieplnej polegającej na przesycaeniu i starzeniu, w wyniku czego następowało umocnienie wydzieleniowe stopów [1]. Umocnienie to nastąpiło dzięki obecności w badanym stopie pierwiastków, takich jak Li, Zn, Mg, Si i Cu, których ilość była większa niż w stopie AlZn5Mg1.

Analizując wyniki badań (rys. 3.), należy stwierdzić, że stop AlZn5Mg1 w stanie ta (naturalnie umocnionym wydzieleniowo) charakteryzuje się mniejszą umowną granicą plastyczności od stopu w stanie tb (sztucznie umocnionym wydzieleniowo). Sztuczne starzenie po przesycaeniu powoduje wzrost umownej granicy plastyczności w stosunku do starzenia naturalnego.

W stanie sztucznie umocnionym wydzieleniowo (tb) zwiększenie szybkości chłodzenia po przesycaeniu (tb₂₁) powoduje wzrost własności wytrzymałościowych (R_m , $R_{0,2}$) przy niewielkich zmianach własności plastycznych (A_5 , Z).

Po jedno- i dwustopniowej obróbce cieplnej najkorzystniejsze własności mechaniczne uzyskano dla stopu AlZn4,5Mg1,2Li zawierającego 1,8% Li (tab. 3. i 4.).

Wyniki badań własności mechanicznych po jednostopniowym starzeniu oraz obserwacje struktur na mikroskopie elektronowym przeprowadzone w IMNoML w Skawinie [2] świadczą o tym, że wzrost własności mechanicznych stopów w temperaturach starzenia niższych od 150 °C powodował wydzielenia stref GP i faz

przejściowych η' (MgZn_2). Do wzrostu własności wytrzymałościowych stopu w temperaturach starzenia wyższych od $150\text{ }^\circ\text{C}$ przyczyniła się natomiast głównie faza δ' (Al_3Li), a nie faza η' (MgZn_2), ponieważ w tych temperaturach następuje wzrost fazy η' połączony z utratą koherencji. Najwyższe własności wytrzymałościowe osiągnięto w temperaturze starzenia $150\text{ }^\circ\text{C}$ w czasie $t = 48\text{ h}$. Takie warunki obróbki cieplnej sprzyjały prawdopodobnie powstaniu wydzieleni utwardzających, tj. fazy η' i δ' . Wymaga to jednak dalszych szczegółowych badań.

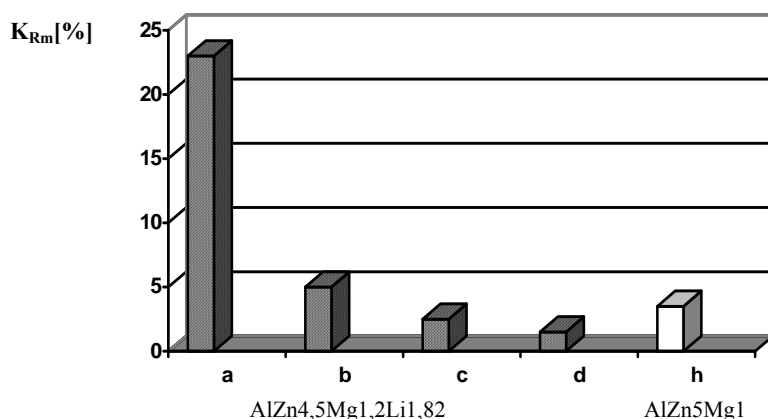
Dla stworzenia warunków sprzyjających ewentualnemu powstaniu faz η' i δ' oraz doprowadzenia w ten sposób do wysokich i korzystnych własności badanego stopu wykonano próby dwustopniowej obróbki cieplnej (starzenia). Parametry tej obróbki podano w tabeli 3.

Podobnie jak przy jednostopniowym, tak i przy dwustopniowym starzeniu najwyższą wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 450\text{--}520\text{ MPa}$ ma stop $\text{AlZn}_4,5\text{Mg}_1,2\text{Li}$ ozn. wytopem 1.8 przy wysokiej granicy plastyczności $R_{0,2} = 360\text{--}430\text{ MPa}$ i wydłużeniu $A_5 = 4,5\text{--}6,5\%$. Najwyższą granicę plastyczności uzyskano dla stopu ozn. wytopem 2.5, co przy niższej, w porównaniu ze stopem ozn. wytopem 1.8, wytrzymałości na rozciąganie i w związku z tym małym zapasie plastyczności doprowadziło do małych wartości wydłużenia $A_5 = 1,5\text{--}2,5\%$. W strukturze stopów starzonych dwustopniowo obserwowano wprawdzie jednakowe dwie fazy utwardzające osnowę, ale faza η' (MgZn_2) była już skoagulowana i rozmieszczona homologicznie i tym samym decydowała o wzroście wytrzymałości badanych stopów.

Modyfikowany stop $\text{AlZn}_4,5\text{Mg}_1,2\text{Li}_1,8$ w porównaniu ze stopem AlZn_5Mg_1 (PA47) wykazał większą wytrzymałość na rozciąganie i wyższą granicę plastyczności, ale zmniejszenie wydłużenia plastycznego odpowiednio: $\Delta R_m = +27\%$; $\Delta R_{0,2} = +26\%$; $\Delta A_5 = -14,2\%$. Parametry obróbki cieplnej, zwłaszcza parametry chłodzenia po przesyleniu, i rodzaj starzenia decydują o własnościach wytrzymałościowych stopów układu Al-Zn-Mg.

BADANIE KOROZJI NAPRĘŻENIOWEJ

Odporność na korozję naprężeniową stopów Al-Zn-Mg zależy od składu chemicznego i obróbki cieplnej. Badania korozji naprężeniowej przeprowadzono w 3% roztworze wodnym NaCl przy naprężeniu $\sigma_0 = 0,8 R_{0,2}$ w czasie $t = 1500\text{ h}$. Na jeden punkt pomiarowy przypadało od 3 do 5 próbek. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Średnie procentowe zmniejszenie wytrzymałości K_{Rm} stopów AlZn4,5Mg1,2Li1,8; AlZn5Mg1 po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej:

- a * stop AlZn4,5Mg1,2Li1,8 (ozn. 2-st. 98)
- b * stop AlZn4,5Mg1,2Li1,8 (ozn. 2-st. 58)
- c stop AlZn4,5Mg1,2Li1,8 (ozn. 1-st. 81)
- d stop AlZn4,5Mg1,2Li1,8 (ozn. 1-st. 51)
- h * stop AlZn5Mg1 (wytop 482\4) w stanie (tb₂₂)
- * zbliżone parametry obróbki cieplnej

Odporność na korozję określono przez wyznaczenie współczynnika procentowego zmniejszenia wytrzymałości po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej K_{Rm} :

$$K_{Rm} = \frac{R_m - R_m^*}{R_m} \times 100 [\%],$$

gdzie: R_m – wytrzymałość na rozciąganie przed ekspozycją korozyjną;
 R_m^* – wytrzymałość na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej.

Stop AlZn5Mg1 w stanie tb₂₂ wykazał dobrą odporność na korozję naprężeniową, a w stanie tb₂₁ niedostateczną odporność na korozję naprężeniową. Stop AlZn5Mg1 w stanie tb₂₃ wykazał najlepszą odporność na korozję naprężeniową, lecz nieco mniejszą wytrzymałość na rozciąganie. Z rysunku 4. wynika, że najlepszą odporność na korozję naprężeniową wykazał stop AlZn4,5Mg1,2Li1,8, który ma także najwyższe własności wytrzymałościowe już po jednostopniowym sztucznym starzeniu. Jednak czynnikiem dyskwalifikującym według Polskiego Rejestru Statków są jego własności plastyczne poniżej $A_5 = 10\%$ [6].

WNIOSKI

1. Zastosowanie litu do modyfikacji stopów układu Al-Zn-Mg jest celowe, ponieważ zwiększa odporność na korozję i poprawia właściwości wytrzymałościowe.
2. Po obróbce cieplnej jedno- i dwustopniowej najkorzystniejsze własności mechaniczne uzyskano dla stopu Al-Zn-Mg zawierającego 1,82% litu. Wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 510 - 530$ [MPa], umowna granica plastyczności $R_{0,2} = 440 - 460$ [MPa], wydłużenie $A_5 = 2,5 - 8,5\%$.
3. Wzrost zawartości litu powyżej 2% w stopach Al-Zn-Mg powoduje bardzo wyraźny spadek wydłużenia jednostkowego A_5 stopu przy zachowaniu wytrzymałości na rozciąganie na poziomie uzyskanym przy niższych zawartościach litu.
4. Badany stop AlZn4,5Mg1,2Li1,82 w porównaniu ze stopami tego samego układu ma najwyższą wytrzymałość na rozciąganie R_m , najwyższą granicę plastyczności $R_{0,2}$, mniejsze wydłużenie plastyczne.

Badany stop AlZn4,5Mg1,2Li ze względu na dobre własności wytrzymałościowe i dobrą odporność na korozję wydaje się najbardziej przydatny (po odpowiedniej obróbce cieplnej) w budownictwie okrętowym, wymaga to jednak dalszych wnikliwych badań.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ashby M. F., Jones D. R. H., *Materiały inżynierskie. Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*, cz. II, WN-T, 1996.
- [2] *Badanie własności stopów Al-Zn-Mg i Al-Zn-Mg-Li przeznaczonych na lekkie wytrzymałe konstrukcje*, sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej (statutowa), Politechnika Gdańska, Gdańsk 1997.
- [3] Cudny K., Puchaczewski N., *Stale i stopy aluminium na konstrukcje morskie*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1998.
- [4] Ekspertyza *Zbadanie wpływu prostownika termicznego na strukturę i własności wytrzymałościowe stopu PA47*, zleceniodawca Stocznia Północna, Gdańsk.
- [5] Jurczak W., *Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i odporność na korozję stopów układu AlZnMg przeznaczonych na spawane konstrukcje okrętowe*, praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998.

- [6] *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich*, Polski Rejestr Statków, t. 7, 1990.
- [7] Sprawozdanie z pracy n-b *Podsumowanie badań własności stopu AlZn5Mg1 /PA47/ i wstępne wytyczne zastosowania go na konstrukcje okrętowe podlegające dużym naprężeniom statycznym i dynamicznym.*
- [8] Sprawozdanie z pracy n-b *Podsumowanie wstępnych badań własności stopu /PA47/ ALZn5Mg1.*
- [9] Sprawozdanie z pracy n-b *Wstępne badania korozji naprężeniowej stopu AlMg5 i AlZn5Mg1.*

ABSTRACT

The paper presents the results of investigations into mechanical properties and resistance to tension-related corrosion of AlZn4,5Mg1,2Li alloy of variable content of Li (1.2 – 2.5%) subject to heat treatment as a modification of marine AlZn5Mg1 alloy.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stanisław Dobrociński