

Wojciech Jurczak
Akademia Marynarki Wojennej

PROBLEMY I PERSPEKTYWY STOPÓW ALUMINIUM W ZASTOSOWANIU NA KONSTRUKCJE MORSKIE

STRESZCZENIE

Stopy aluminium mają coraz szersze zastosowanie w światowym budownictwie okrętowym. W artykule zaprezentowano problemy eksploatacyjne morskich konstrukcji wykonanych ze stopów aluminium oraz wyniki badań ich modyfikacji. Materiał rodzimy i złącza spawane stopów grupy 5XXX i 7XXX (bez Cu) wykazują podatność na korozję w środowisku morskim, powodując zagrożenie eksploatacyjne (awarie, zagrożenia dla ludzi i środowiska) i wzrost nakładów na eksploatację. Efekty pracy ośrodków badawczo-naukowych w postaci nowych stopów aluminium jako modyfikacji powszechnie stosowanych stopów zapewniają konstruktorom okrętowym szersze możliwości ich stosowania w konstrukcjach morskich.

Słowa kluczowe:

okrętowe stopy aluminium, korozja, właściwości, eksploatacja.

WSTĘP

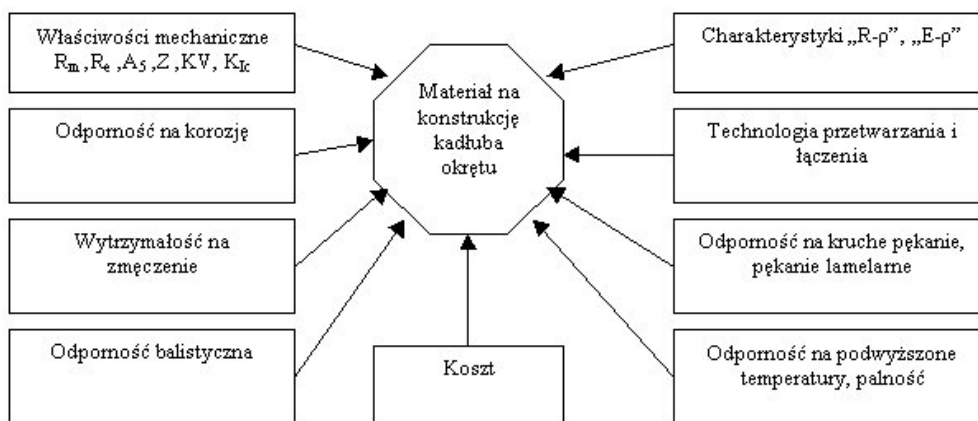
Powszechność stosowania stali, nie tylko w budownictwie okrętowym, ale także w każdej dziedzinie gospodarki, wywodzi się z jej stosunkowo wysokich właściwości mechanicznych i niskich kosztów wytwarzania oraz dużej dostępności. Jednym z wielu zadań konstruktorów okrętowych jest obniżanie ciężaru finalnego jednostki pływającej. Ma to wpływ na zdolności eksploatacyjne, a mianowicie prędkości pływania, zwrotność, warunki stateczności itp. Stosując na konstrukcje okrętowe stopy aluminium, redukujemy ciężar o ponad 50% w stosunku do stali i zapewniamy zwiększenie autonomiczności jednostki przez zwiększenie ilości paliwa, wody lub zwiększenie prędkości pływania przy stałej mocy siłowni [9, 22].

Koszt budowy podobnych gabarytowo jednostek jest pięciokrotnie wyższy dla stopów aluminium niż dla stali, jednak na przykładzie masowców można wykazać, że w eksploatacji następuje szybki zwrot tych kosztów. Nie tylko wspomniana ładowność, ale lepsza odporność na korozję (sto razy wolniej koroduje aluminium niż stal) zmniejsza koszty zabezpieczeń powłokami antykorozyjnymi. Dodatkowo amagnetyczność ($\mu \sim 0,00002$) jako czynnik inicjacji min głębinowych i naprowadzania w dobie piractwa morskiego ma znaczenia nie tylko dla okrętów, ale także dla statków. Ekonomia morskiego transportu pasażerskiego też wymaga szybkości i bezpieczeństwa pływania. Rozwój transportu morskiego cywilnego i wojskowego wprowadza do budownictwa okrętowego wiele nowych rozwiązań, technologii i materiałów, między innymi nowych spawalnych i wysokowytrzymałych stopów aluminium.

W niniejszym artykule przedstawiono problemy eksploatacyjne konstrukcji aluminiowych, które pojawiły się podczas pracy w środowisku morskim i problemy, jakie towarzyszą hutniczemu wytwarzaniu tych stopów, odnosząc właściwości do ich struktur. Wyniki badań stopów grupy 5XXX (tych powszechnie stosowanych, zwanych hydronaliami ozn. Al-Mg) i 7XXX (zwanych konstruktalami Al-Zn-Mg) oraz ich modyfikacji są częścią eksperymentalną tego artykułu. Adaptacja stopu 7020M do budowy konstrukcji okrętowych i wykorzystanie cech tego nowego materiału do pracy w środowisku morskim została w publikacji oceniona w kontekście modyfikacji struktury odpowiednią obróbką cieplną.

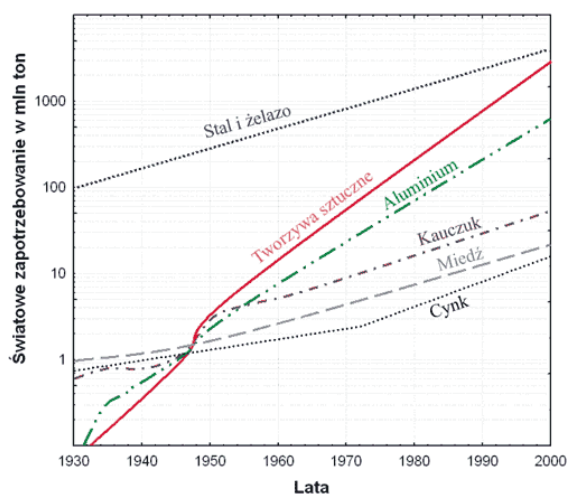
WYMOGI DLA OKRĘTOWYCH MATERIAŁÓW I KRÓTKI RYS HISTORYCZNY

Jednym z podstawowych wymagań doboru materiału na konstrukcje okrętowe jest odporność korozyjna. Jednak nie tylko odporność na korozję, ale czynnik ekonomiczny (koszt) decyduje o tym, jaki rodzaj materiału konstruktorzy okrętowi zaproponują na wykonanie określonego typu jednostki pływającej (rys. 1.). Działania konstruktora są optymalizowane, by materiał konstrukcyjny spełniał większość przedstawionych dalej kryteriów. Głównym kryterium doboru materiału na konstrukcje morskie są jednak wymogi wytrzymałościowe, które w budownictwie okrętowym spełniają stale kadłubowe zwykłej, podwyższonej i wysokiej wytrzymałości oraz stopy aluminium grupy 5XXX (zwane hydronaliami) i 7XXX (zwane konstruktalami).



Rys. 1. Kryteria doboru materiału inżynierskiego na konstrukcje okrętowe [9]

Stal konstrukcyjna jest tradycyjnym materiałem używanym od 150 lat w przemyśle stoczniowym ze względu na doskonałe właściwości mechaniczne i niskie koszty wytwarzania. Badania powodowały ewolucję stali i obecne stale, zwane kadłubowymi, to szeroki zakres wytrzymałościowy w szerokim zakresie temperaturowym pracy pod względem kruchego pękania. Dobór materiału na konstrukcje morskie pracujące w niskich temperaturach musi być zdefiniowany podatnością do kruchego pękania. To właśnie stal, w tym kadłubowa, wykazuje obniżenie właściwości wytrzymałościowych, gdy następuje obniżenie temperatury. Ta negatywna cecha stali dzieli jej właściwości na kategorie (od A do H), co nie dotyczy stopów aluminium.



Rys. 2. Zapotrzebowanie budownictwa okrętowego na materiały konstrukcyjne [22]

Stopu aluminium jako materiału alternatywnego zaczęto używać w 1930 roku [19]. Pierwszymi łodziami ze stopów aluminium były łodzie policyjne i patrolowe czy szybkie statki pasażerskie, takie jak katamarany (do 400 osób). Rozwój większych statków na bazie stopów aluminium był związany z pojawieniem się w Niemczech [1] pierwszych statków o długości do 60 m i wyporności 1000 ton, a kilka lat później (1967 r.) w USA został skonstruowany statek o długości 70 m [18].

STAL OKRĘTOWA A OKRĘTOWE STOPY ALUMINIUM

Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na budowę coraz większych i szybszych jednostek pływających poszukiwano, i dalej poszukuje się, nowych, alternatywnych materiałów inżynierskich, które zadowolilyby konstruktorów okrętowych. Stopy aluminium od sześćdziesięciu lat były alternatywą dla stali okrętowej. Ze względu na wysoką odporność na korozję i znaczne zmniejszenie ciężaru ich gęstość jest prawie trzykrotnie niższa niż gęstość stali ($\rho = 2,73 \text{ g/cm}^3$ — stopy aluminium, $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$ — stal) [3].

Pewnymi ograniczeniami w stosowaniu stopów aluminium były problemy ze spawaniem, stąd pierwsze aluminiowe konstrukcje nitowano. Złącza spawane stopów 5XXX wykazują stosunkowo niskie właściwości wytrzymałościowe, a stosowanie gazów obojętnych (metoda TIG, MIG) podnosi koszt wytwarzania konstrukcji morskich. Jednak postęp technologiczny pozwolił stopom aluminium do osiągnięcia przez obróbkę cieplną i modyfikację struktury wymaganych w przemyśle stoczniowym właściwości mechanicznych zarówno dla materiału rodzimego, jak i złączy spawanych. Te argumenty zdecydowały o wytwarzaniu stopów aluminium do zastosowań morskich.

Początkowo stopy aluminium wykorzystywano do wytwarzania galanterii okrętowej (relingi, zejściówki itp.), poszerzając zakres stosowania do budowy dużych pokładówek, nadbudówek [4], a nawet całych jednostek pływających. Redukcja ciężaru to polepszenie stateczności, nośności i warunków pływania przy oszczędności paliwa lub redukcji mocy siłowni [6].

Stal kadłubowa to zazwyczaj stal o dużej wytrzymałości (HSLA). Minimalne wymagania wytrzymałościowe dla stali zostały jednoznacznie ujednolicone w 1980 roku przez IACS i wprowadzone przez morskie towarzystwa klasyfikacyjne [23]. Oprócz tych poziomów właściwości rodziny stali HSLA typu HY 80, HY-100 lub HY-130 o wytrzymałości 550 MPa, 690 MPa i 900 MPa stosuje się do budowy kadłubów i nadbudówek pancerników, lotniskowców, okrętów podwodnych itp. Najpopularniejszą

i najczęściej stosowaną stalą konstrukcyjną w przemyśle stoczniowym jest stal A36 (w zależności od nazwy ASTM), z typową granicą plastyczności do 250 MPa, w Polsce opisana jako stal kadłubowa zwykłej wytrzymałości.

Kadłuby dużych amerykańskich okrętów są obecnie budowane ze stali o podwyższonej wytrzymałości HSS ($R_{0,2} > 345$ MPa) i stali HSLA-80 stosowanej do budowy wysoko obciążonych elementów. Na przykład do budowy kadłubów krążowników typu „Triconderoga” użyto 1200 t stali HSLA-80 na każdy kadłub, co stanowi około 50% jego masy. W Niemczech produkuje się i stosuje stale HY-80, XABO-90, a w Japonii WELTEN-80, HT-80 i inne. Stale te znajdują zastosowanie w budowie kadłubów okrętów.

W Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni prowadzone były prace nad zastosowaniem stali 14HNMBCuA i 10GHMBA do budowy okrętów. Otrzymały one certyfikaty PRS. Stal 14HNMBCuA, o podobnym składzie chemicznym do T1, po hartowaniu w wodzie w temperaturze 910–940 °C i odpuszczaniu w temperaturze 620–650 °C uzyskuje bardzo dobre własności wytrzymałościowe i korzystne właściwości plastyczne. Stal 10GHMBA wykazuje również bardzo dobre własności wytrzymałościowe, a zwłaszcza bardzo dobre właściwości plastyczne [9, 28]. Pomimo tego zasadnicze elementy konstrukcyjne, głównie kadłuba dużych jednostek pływających, wykonuje się ze stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości.

Stopy aluminium grupy 7XXX, szczególnie 7020M, osiągają właściwości wytrzymałościowe porównywalne z właściwościami stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości. Perspektywicznie jest to czynnik skłaniający do zamian stali na stopy aluminium, które dają znacznie więcej pozytywnych cech eksploatacyjnych.

DOBÓR STOPÓW ALUMINIUM NA KONSTRUKCJE MORSKIE

Obecnie w budownictwie okrętowym najczęściej używanym stopem aluminium jest stop 5083 stosowany w formie blach (do przeróbki plastycznej), a na odlewane elementy stop 6082 [24]. Uzyskały one zatwierdzenie przez IASC w budowie konstrukcji morskich. Wzrost zawartości Mg powyżej 3% podnosi właściwości wytrzymałościowe, ale musi być poddany obróbce cieplnej opisanej przez normy jako H116 (umocniony przez zgniot — walcowany) i H321 (umocniony i stabilizowany — ćwierć twardy) [26]. Odpowiednie właściwości wymagane do zastosowań morskich wprowadza się już na etapie wytwarzania. W obu zastosowanych obróbkach cieplnych osiągnięto żądany poziom właściwości mechanicznych, zachowując dobrą odporność na korozję, którą oceniano w przyspieszonych badaniach korozji

(wg NAMLT i ASSET). Ten rodzaj obróbki cieplnej zapewnia także dobrą odporność na korozję w podwyższonych temperaturach do 60 °C.

Powszechnie stosowany w okrętownictwie jest stop 6082, po obróbce HXXX, która zapewnia wymagane właściwości. Parametry obróbki cieplnej opisane jako H116 lub H321 nadają się do nieprzerwanej pracy w temperaturach < 66 °C.

ODPORNOŚĆ NA KOROZJĘ

Modyfikacja stali niskostopowej chromem, wanadem, molibdenem podwyższa jej odporność na korozję w agresywnym środowisku morskim. Jest ona jednak znacznie niższa od stopów aluminium, pomimo stosowania powłok antykorozyjnych. Stopy aluminium, w których naturalnie tworzy się pasywna warstewka tlenków (duże powinowactwo chemiczne z tlenem), są chronione przed dalszym utlenianiem. Doskonała odporność na korozję aluminium pochodzi głównie od Al_2O_3 , który tworzy się na powierzchni stopów, zarówno w atmosferze, jak i w wodzie morskiej. Dodatkowe zabezpieczenie farbami antykorozyjnymi lub stosowanie protektorów (Zn lub Mg) zależy od składu chemicznego stopu aluminium.

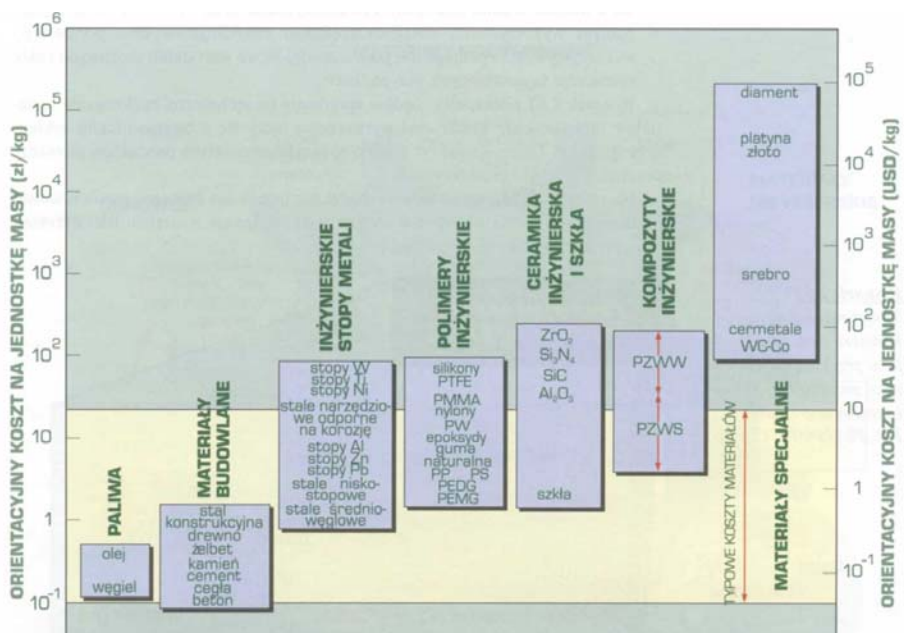
Najpopularniejsze stopy aluminium do zastosowania w warunkach morskich nieobrabbialne termicznie to stopy grupy 5XXX, a obrabiane cieplnie to stopy 6XXX, ze względu na optymalne właściwości mechaniczne i eksploatacyjne. Stopy typu 6XXX mają lepsze właściwości wytrzymałościowe, ale dwa, trzy razy mniejszą odporność na korozję niż grupy 5XXX. Stopy aluminium rzadziej są malowane lub pokrywane innymi powłokami antykorozyjnymi, co stanowi istotne oszczędności podczas użytkowania elementów aluminiowych [25].

W latach osiemdziesiątych w polskim budownictwie okrętowym po raz pierwszy zastosowano stop grupy 7XXX, konstruując ze stopu 7020 dużą nadbudówkę okrętu projektu 620. Stop ten wykazał wytrzymałość na poziomie stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości, jednak dodatek 5% Zn spowodował jednocześnie dużą podatność na korozję, którą minimalizowano, stosując obróbkę cieplną T651. Trzydziestoletnia eksploatacja okrętu wykazała wiele trudności i problemów związanych z pęknięciem korozyjnym i zmęczeniowym tej ponad czterdziestometrowej nadbudówki [15]. Już na etapie budowy popełniono błędy, stosując połączenia nitowane do mocowania aluminiowej nadbudówki do zębownicy stalowego kadłuba. Istniała wówczas możliwość zastosowania połączenia wybuchowego, ale rozwiązanie to było kosztowne. Technologię tę zastosowano dopiero podczas pierwszego głównego remontu okrętu z powodu intensywnej korozji pasa połączenia nitowanego po

zniszczeniu przekładki izolacyjnej. Połączenia spawane, w szczególności ich strefa wpływu ciepła (SWC), podlegały intensywnej korozji naprężeniowej, a ich bieżąca naprawa kończyła się gorącymi pęknięciami pospawalniczymi [21]. To zdecydowało, że w latach dziewięćdziesiątych wprowadzono modyfikację stopu 7020 poprzez zmianę składu chemicznego. Ograniczenie sumarycznej zawartości Zn + Mg oraz dodatków Cr i Zr ma podwyższyć odporność na korozję tego stopu opisanego jak 7020M.

ANALIZA KOSZTÓW

Na etapie projektowania każdej konstrukcji, także morskiej, konstruktor wśród wielu aspektów musi uwzględnić czynnik ekonomiczny (rys. 3).



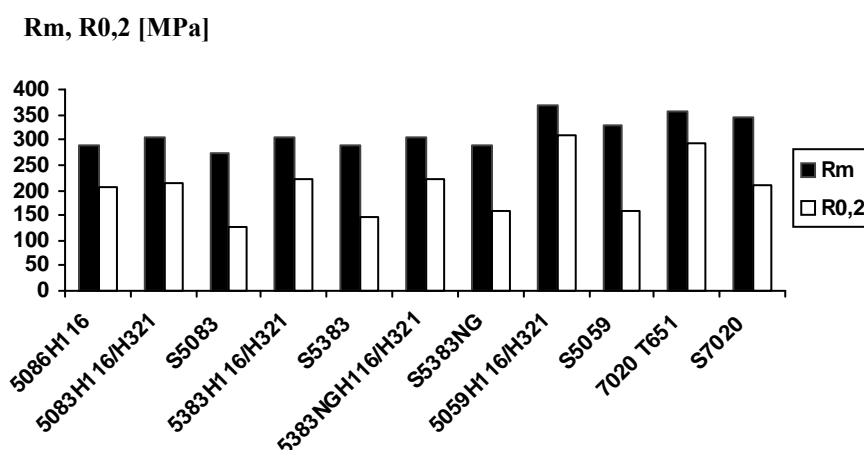
Rys. 3. Orientacyjne koszty różnych grup materiałów odniesione do 1 kg materiału [2]

Aluminium ze względu na mniejsze zasoby naturalne i kosztowną technologię wytwórstwa hutniczego jest znacznie droższe od stali. Szacuje się, że koszt budowy tych samych konstrukcji okrętowych ze stali jest od 3 do 5 razy niższy niż dla stopów aluminium. Ze względu na wysokie koszty wydaje się zatem, że aluminium nie zawsze jest oszczędne, jednak redukcja ciężaru jednostki pływającej, wysoka odporność na korozję i poziomy wytrzymałości dają podstawę do zastąpienia stali

okrętowej zwykłej wytrzymałości stopami aluminium grupy 5XXX, a stali wysoko-wytrzymałych stopami 7XXX [1, 12]. Ta koncepcja sprawdza się na przykładzie masowców, których trzykrotnie mniejszy ciężar własny daje możliwość przewozu trzy razy więcej surowców podczas jednego rejsu przy zachowaniu tych samych warunków stateczności i szybkości pływania. W innym aspekcie, gdy ekonomia transportu wymusza terminowość dostarczenia towaru lub przewozu ludzi, wykorzystanie jednostek szybkich (katamaranów czy poduszkowców) wymaga stosowania na konstrukcje tych jednostek stopów aluminium [20].

PROBLEMY I PERSPEKTYWA STOSOWANIA STOPÓW 5XXX I 7XXX

Materiał rodzimy stopów 5XXX można zaliczyć do materiałów inżynierskich o dobrej odporności korozyjnej, ale średnich właściwościach mechanicznych (rys. 4.). W poszukiwaniu nowych materiałów w polskim budownictwie okrętowym rozpoczęto więc stosowanie wysokowytrzymałego stopu grupy 7XXX bez Cu, którego właściwości wytrzymałościowe zestawiono ze stopami 5XXX powszechnie stosowanymi w budowie jednostek pływających.



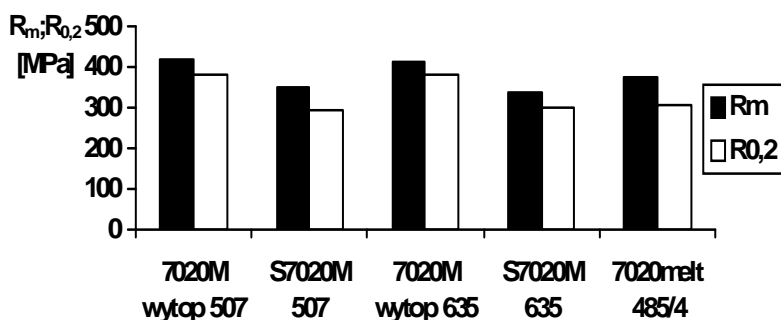
Rys. 4. Zestawienie właściwości wytrzymałościowych okrętowych stopów aluminium dla materiału rodzimego 5XXX i złączy spawanych (ozn. S) oraz stopu 7020 [badania własne i 10]

Stopy układu 5XXX nie podlegają obróbce cieplnej, to znaczy ich właściwości mechaniczne nie ulegają zmianie pod wpływem dodatkowej obróbki cieplnej. Jedynie zgniot na zimno (ozn. H) i wygrzewanie może je w małym zakresie zmienić.

Jednak właściwości wytrzymałościowe złączy spawanych są niskie ze względu na uzyskanie w SWC właściwości materiału miękkiego. Znacznie korzystniejsze właściwości wytrzymałościowe uzyskują stopy 7XXX. Lepsze są właściwości wytrzymałościowe stopu 7020, które zależą od parametrów obróbki cieplnej. Przesycanie i sztuczne dwustopniowe starzenie może spowodować, że R_m wyniesie ponad 400 MPa [7]. Dodatkowo złącza spawane po zakończeniu procesu spawania ulegają samorzutnemu umocnieniu wydzieleniowemu, co powoduje, że po siedmiu dniach osiągają wysokie właściwości wytrzymałościowe, które są znacznie wyższe niż stopów 5XXX.

W budowie konstrukcji morskich obecnie wykorzystuje się połączenia spawane tych stopów, które mają jeszcze wyższe właściwości wytrzymałościowe niż spawany materiał rodzimy (rys. 5.). Technologia spawania, obejmująca przygotowanie blach (oczyszczanie z tlenków, krawędziowanie blach) i samo spawanie z wykorzystaniem metody TIG i MIG w osłonie gazów obojętnych, musi warunkować właściwy dobór spoiwa do spawanego materiału nie tylko pod względem wytrzymałościowym, ale także korozyjnym. Nigdy potencjał elektrochemiczny stacjonarny spoiwa nie może być niższy od spawanego materiału [11]. Jakość wykonania połączeń spawanych stanowi podstawę wytrzymałości konstrukcji, stąd wszystkie połączenia konstrukcji nośnych muszą mieć pierwszą lub drugą klasę dokładności wykonania (ocena metodami nieniszczącymi, np. Rtg). Dla stopów 5XXX najbardziej atrakcyjną poprawę właściwości w 1995 roku osiągnął Pechiney Marine Group po niewielkiej modyfikacji chemicznej stopu 5083, oznaczonego jako 5383. W tym stopie ograniczono zawartość Si i Fe, które są znacznie niższe od maksymalnej dopuszczalnej zawartości [24]. Wzrost zawartości w stopach 5383 Mg i Mn, a obniżenie Cr i Cu z maksymalnego poziomu oraz dodatek Zr powoduje powstanie nowych właściwości stopu 5383 oznaczonego jako NG [13]. Ta modyfikacja struktury powoduje wzrost właściwości wytrzymałościowych (najwyraźniej umowną granicę plastyczności $R_{0,2}$) złączy spawanych tego stopu, co umożliwia szersze zastosowanie w spawanych konstrukcjach morskich. Porównanie minimalnej wytrzymałości złączy spawanych stopu 5083 i jego modyfikacji (5383 5383NG) pokazuje, że ten parametr został początkowo zwiększony ze 125 do 145 MPa dla 5383, a następnie podwyższony do 160 MPa dla NG (rys. 4.).

Podobne zabiegi poczyniono w Polsce, dokonując modyfikacji stopów grupy 7XXX. Pierwsze objawy dużej podatności na korozję naprężeniową stopu 7020 spowodowały poszukiwanie modyfikatorów w postaci Zr i Cr oraz doboru parametrów obróbki cieplnej. Stop AlZn5Mg2CrZr (7020M) o podwyższonej zawartości Zn + Mg = 7,01 oraz dodatku Zr i Cr uzyskał R_m około 500 MPa (rys. 5.). Modyfikacji dokonano w dwóch wytopach ozn. 507 i 635 różniących się składem chemicznym (tabela 1.).



Rys. 5. Właściwości wytrzymałościowe modyfikowanego stopu 7020M dla dwóch wytopów i jego złączy spawanych ozn. S [badania własne]

Tabela 1. Składy chemiczne stopów stosowanych na konstrukcje morskie i ich modyfikacje

5XXX

Ozn. stopu	%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
5086	min				0.2	3.50	0.05				reszta
	max	0.40	0.5	0.10	0.7	4.5	0.25	0.25	0.15		
5083	min				0.40	4.0	0.05				reszta
	max	0.40	0.40	0.10	1.0	4.9	0.25	0.25	0.15		
5383	min				0.7	4.0					reszta
	max	0.25	0.25	0.20	1.0	5.2	0.25	0.4	0.15	0.2	
5383NG	min				0.8	4.3				0.05	reszta
	max	0.25	0.25	0.1	1.1	5.2	0.15	0.4	0.15	0.20	
5059 „Alustar”	min				1.6	5.0		0.40		0.05	reszta
	max	0.45	0.5	0.25	1.2	6.0	0.25	0.9	0.20	0.25	
	max	0.40	0.50	0.10	0.7	4.5	0.25	0.25	0.15		
	max	0.40	0.50	0.10	0.5	3.6	0.3	0.20	0.15		
	max	0.25	0.4	0.1	1.0	5.5	0.2	0.25	0.2		

7XXX

Skład chemiczny [%] 7020											Nr atestu hutniczego	
Mg	Mn	Ti	Zn	Cr	Si	Fe	Cu	Zr	Al			
1.25	0.18	0.034	5.3	0.14	0.16	0.32	0.05	0.04	reszta	2945/485/4		
No. of melt	Skład chemiczny [%] 7020M										Nr atestu hutniczego	
	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

Konstrukcja jednostki pływającej podczas eksploatacji poddawana jest cyklicznie powtarzającemu się obciążeniu zmęczeniowemu, które jest porównywalne do obustronnego zginania. Jego parametry zależą od warunków pływania. Częstotliwość i amplituda zmian obustronnego obciążenia oznaczona jest w tabeli 2. przez liczbę cykli naprężeń (c.n.) wymaganych dla danego materiału.

Modyfikacja struktury stopu 5059 zwiększoną zawartością Cu nie jest korzystna pod względem korozyjnym, jednak dla stopu 5059 Alustar uzyskano wyższą odporność zmęczeniową od stopu 5083 [14]. Modyfikacja stopu 5083H116 także dała dobre wyniki wytrzymałości zmęczeniowej jego złączy spawanych. Wytrzymałość zmęczeniowa przeprowadzona w warunkach korozyjnych dla obustronnego zginania Z_{gok} przy $N 10^6$ była wyższa o 20 MPa dla tego samego spoiwa i wyniosła 167 MPa (rys. 4). Ta modyfikacja stopu 5083 przyniosła [17] redukcję ciężaru gazu o 5% bez podnoszenia kosztów produkcji. Modyfikacja stopu 7020 spowodowała wzrost wielu cech użytkowych i eksploatacyjnych stopu 7020M, między innymi wytrzymałości zmęczeniowej. W tabeli 2. zestawiono wyniki badań zmęczeniowych tego stopu dla dwóch ośrodków środowiska morskiego.

Tabela 2. Zestawienie wyników badań wytrzymałości zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej stopu 7020 i jego modyfikacji 7020M dla różnych parametrów obróbki cieplnej T6XX [badania własne]

Stop w stanie T6XX	Odporność na korozję zmęczeniową $f = 50 \text{ Hz}$				Zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej wskutek korozji $N = 10^6 \text{ c.n.}$ $\frac{Z_{go} - Z_{gok}}{Z_{go}} 100$ %
	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	
7020M tb ₂₁	210	170	139	90	47,1
7020M tb ₂₂	203	168	170	130	21,6
7020M tb ₂₃	230	173	215	165	4,6
7020 tb ₂₁	232	179	202	127	29
7020 tb ₂₂	233	177	226	156	11
7020 tb ₂₃	228	171	220	160	7

Porównując ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową badanych stopów 7020 w środowisku obojętnym, stwierdzono, że największą wykazał stop 7020M dla tb₂₃, następnie w kolejności: stop 7020 tb₂₃, tb₂₂ i tb₂₁, przy czym dla $N = 10^6 \text{ c.n.}$ Wytrzymałość zmęczeniowo-korozyjna stopu 7XXX po obróbce T6XX była w zasadzie bardzo zbliżona.

Badane stopy wykazały przy $N = 10^6 \text{ c.n.}$ (tabela 2.) następujące zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej w środowisku korozyjnym w porównaniu do środowiska obojętnego: stop 7020M min. dla tb₂₃ 4,6% i maks. dla ta 58%, stop 7020 min. dla tb₂₃ 7% i maks dla ta 58%.

Wytrzymałość zmęczeniowa i zmęczeniowo-korozyjna sztucznie starzonych stopów 7XXX 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 7XXX 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 oraz zmęczeniowo-korozyjnej. Wytrzymałość zmęczeniowa (Z_{go}) stopu 7020M i 7020 jest natomiast zbliżona do wytrzymałości zmęczeniowo-korozyjnej (Z_{gok}) po obróbce tb_{23} dla stopu 7020M i jest wyższa niż dla stopu 7020 pomimo znacznie wyższej sumarycznej zawartości (Zn + Mg > 7%), co może być spowodowane zwiększoną zawartością Zr i Cr, a także zwiększoną temperaturą i czasem przesylenia. Po pozostałych obróbkach cieplnych lepszą odporność zmęczeniową wykazał stop 7020. Dodatkowo stopy 7XXX wykazują rzadko spotykana cechę samorzutnego naturalnego umocnienia wydzieleniowego złączy spawanych po zakończeniu procesu spawania [16].

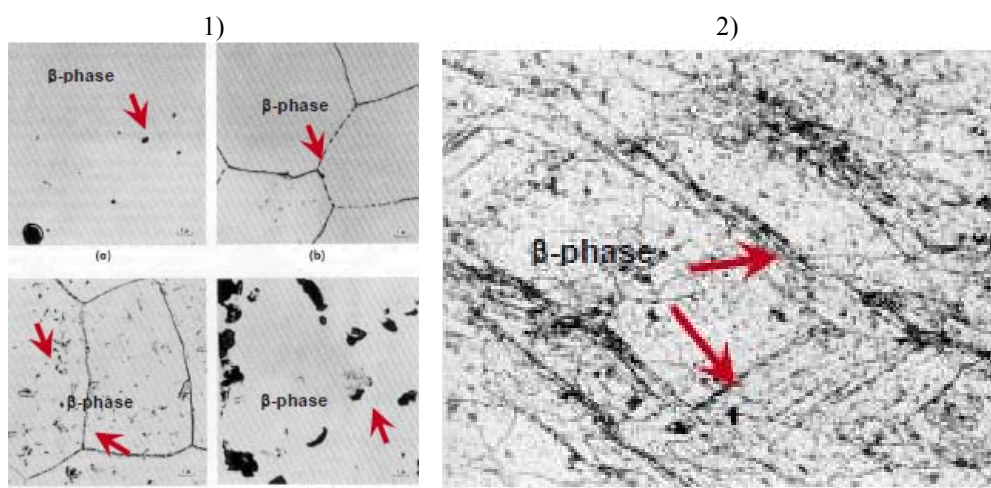
ODPORNOŚĆ NA KOROZJĘ W ŚRODOWISKU MORSKIM A STRUKTURA

Pełna kontrola procesu hutniczego wytwarzania jest pierwszym etapem uzyskania właściwej struktury stopów aluminium przeznaczonych do pracy w środowisku morskim. W przypadku stopów 5XXX, szczególnie tych o Mg > 3%, ważne są warunki wylewania wlewka, a później walcowania na zimno i kolejno następujące wyżarzanie. Proces wytwarzania morskich typów stopów 5XXX wymaga starannej kontroli, a podstawowym założeniem jest kontrola fazy β , która warunkuje podatność na korozję w wodzie morskiej. Różne temperatury obróbki cieplnej opisane jako H116 i H321 stopów 5XXX stosowanych dla konstrukcji morskich powodują, że w mikrostrukturze stopów o zawartości Mg > 3% minimalizuje się rozwój fazy β i kontroluje jej rozkład, aby nie był skoncentrowany na granicach ziaren, tylko rozłożony równomiernie na obszarze fazy α . Dodatek do nowych stopów, takich jak 5383, 5383NG i 5059, domieszki Zn najlepiej eliminuje istnienie fazy β w postaci ciągłych łańcuchów na granicach ziarna, a to zwiększa odporność na korozję w wodzie morskiej.

Wyniki badań stopu 5383 (zawierającego do 0,4% Zn) wykazały dobrą odporność na korozję w wodzie morskiej w porównaniu do przemysłowego stopu 5083, natomiast stop 5383NG ma lepsze właściwości korozyjne w stosunku do stopów 5083 i 5383. Dla wszystkich stopów (5083, 5383, 5383NG i 5059) badania korozji

zostały przeprowadzone dla materiału rodzimego i złączy spawanych. Wzrost zawartości Mg od 4% do 6% powoduje wzrost właściwości wytrzymałościowych stopów 5XXX ponad te, które uzyskano dla nowych stopów 5383 i 5093 stosowanych w okrętownictwie [13, 17]. To jednak obniża odporność na korozję w wyniku powstawania w strukturze tych stopów fazy β (Mg_5Al_8) o bardzo wysokim anodowym ($-1,24$ V) potencjale w stosunku do roztworu stałego ($-0,87$ V). Optymalizacja składu chemicznego stopów 5XXX ma zapewnić stosunkowo wysokie właściwości mechaniczne przy co najmniej dobrej odporności na korozję w wodzie morskiej. Rozpad roztworu stałego odbywa się w temperaturze pokojowej, a w temperaturze powyżej 65 °C zostaje znacznie przyspieszony. Jego przebieg odbywa się według schematu: α — roztwór stały/sterfa GP/faza β' /faza β (Mg_5Al_8). Przyspieszony proces korozji elektrochemicznej w wyniku dużej różnicy potencjału powoduje intensywną korozję. Inne wydzielane fazy, jak $MnAl_6$, nie mają wpływu na zachowanie korozyjne stopów 5XXX, ponieważ ich potencjał korozji ($-0,85$ V) jest zbliżony do potencjału α — roztworu stałego [27].

Podatność stopów 5XXX na różne formy korozji (międzykrystaliczną, naprężeniową) zależy nie tylko od obecności fazy β , ale przede wszystkim od jej rozkładu i formy występowania w strukturze. Na rysunku 6.1 i 6.2 przedstawiono różne mikrostruktury β -fazowe wytracone jako ciągła warstwa wzdłuż granic ziaren w stopie 5356 (rys. 6.1 b, c) lub w pasmach ścinania w zdeformowanym stopie 5083 (rys. 6.2) oraz losowe dystrybucje β -fazowe wytracone w postaci kulistej w strukturze (rys. 6.1 a, d).

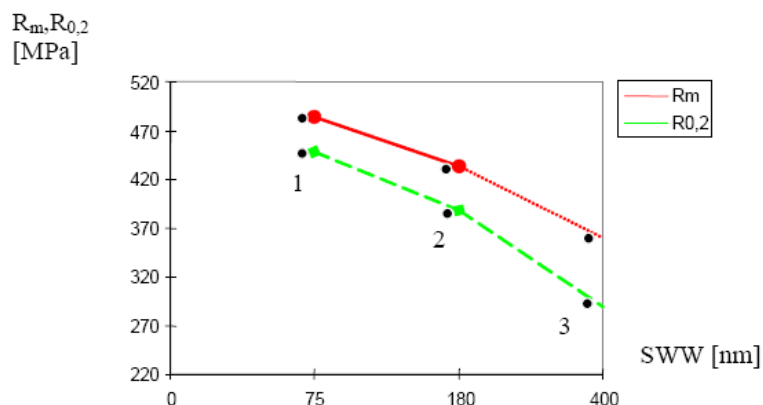


Rys. 6. 1) mikrostruktury stopu 5356-H12 z różnym stopniem wrażliwości na naprężeniowe pękanie korozyjne (SCC): (a), (b) bardzo odporne, (c) nieznacznie wrażliwe, (d) bardzo podatne; 2) mikrostruktura stopu 5083H116 (zgniot i wygrzewanie w temp. 120 °C/24 h, bardzo podatne na SCC [8])

W stopach 5XXX przy wzroście zawartości Mg > 3%, gdzie zawartość Mg jest wyższa niż 1,9%, występuje równowaga rozpuszczalności Mg w α -roztworze stałym w temperaturze pokojowej i tendencja do wytrącania się β -fazy (Mg_5Al_8) wzdłuż granic, a ziarna są losowo rozłożone w strukturze.

Blachy grupy 7XXX wykazują obecność silnie wydłużonych ziaren równoległych do kierunku walcowania. W wyniku szczegółowej obserwacji na powierzchniach równoległych i prostopadłych do kierunku walcowania można zauważyć pojedyncze zrekrystalizowane ziarna szczególnie widoczne na powierzchniach równoległych do kierunku walcowania. W stopach 7XXX, po zabiegach przesycania i starzenia, występują dwa rodzaje wydzielen: duże wydzielania rozmieszczone przypadkowo w osnowie oraz strefy GP. Obok stref GP występują strefy roztworu stałego (SWW) przylegające do granicy ziaren i podziaren (substruktura). Również na granicach ziaren występują większe wydzielania związku $MgZn_2$.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono wyraźną zależność struktury i własności wytrzymałościowych stopu 7020M od stanu obróbki cieplnej. Stop 7020M w stanie tb_{21} ma wyższe własności wytrzymałościowe aniżeli w stanie tb_{22} czy tb_{23} . W $AlZn_5Mg_2CrZr$ przy zastosowaniu trzech rodzajów chłodzenia po przesyceniu (zimna woda 20 °C, gorąca woda 80 °C, powietrze) wraz ze wzrostem szybkości chłodzenia po przesyceniu maleje szerokość SWW i rosną własności wytrzymałościowe (R_m , $R_{0,2}$).



Rys. 7. Związek między szerokością strefy wolnej od wydzielen (SWW) i własnościami wytrzymałościowymi stopu 7020M, które po przesyceniu poddane są: 1 — studzeniu w zimnej wodzie ($T = 20\text{ °C}/tb_{21}$), 2 — chłodzeniu w gorącej wodzie ($T = 80\text{ °C}/tb_{22}$), 3 — chłodzeniu w powietrzu tb_{23} , a następnie dwuetapowemu starzeniu: 90 °C/8 h + 145 °C/16 h [badania własne]

Badania struktur przeprowadzone w IMN pozwoliły na wyznaczenie szerokości stref wolnych od wydzielen (SWW) dla poszczególnych rodzajów obróbki cieplnej.

Chłodzenie w zimnej wodzie (20 °C) po przesyleniu i dwustopniowe sztuczne starzenie spowodowało, że SWW mieściła się w przedziale 50–80 nm. Na granicach ziaren występowały większe wydzielenia fazy MgZn₂. Z kolei w próbkach chłodzonych po przesyleniu w powietrzu (stan tb₂₃) rozpad roztworu stałego był bardziej zaawansowany, a SWW miała szerokość 380–420 nm [5].

PODSUMOWANIE

Zastosowanie wysoko wytrzymałościowych spawalnych stopów aluminium w przemyśle okrętowym wciąż rośnie. Są wykorzystywane do budowy coraz większych konstrukcji okrętowych. Zastosowanie ich jest zasadne ekonomicznie. Trzykrotnie mniejsza gęstość redukuje ciężar gabarytowo podobnych jednostek pływających w stosunku do stali okrętowej o ponad 50%, dając jednocześnie wiele innych korzyści, jak chociażby amagnetyczność. Stosunkowa dobra odporność korozyjna na działanie środowiska morskiego wydłuża czas międzydokowań, a bieżąca eksploatacja nie wymaga dużych nakładów finansowych.

Nowe stopy aluminium grup 5XXX (5383, 5383NG, 5059) i 7XXX (7020M) to przykład wciąż rosnących właściwości mechanicznych, większej odporności na korozję i rozszerzenia zakresu zastosowania w okrętownictwie. Złącza spawane stopów 7XXX (bez Cu), w szczególności stopu 7020M, wykazują najlepsze właściwości wytrzymałościowe spośród wszystkich stopów aluminium stosowanych w budownictwie okrętowym. Wykonane z nich konstrukcje okrętowe są droższe od stopów 5XXX, ale dają znacznie wyższą wytrzymałość, a tym samym bezpieczeństwo eksploatacyjne. Właściwości i ekonomia stosowania stopów aluminium w budowie jednostek pływających, zwłaszcza tych szybkich, daje podstawę do zastąpienia stali stopami 5XXX i 7XXX.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Allan R. G., *Applications for Aluminum Alloys in the Marine Industry a Current Perspective*, Proceedings of Alumitech '97, Atlanta, 20–23 May, 1997, p. 292.
- [2] Ashby M. F., *Engineering materials*, 1998.
- [3] ASM: *Aluminum*, 2004.
- [4] ASM: *Corrosion*, 2004.

- [5] *Badania strukturalne stopów AlZn5Mg2CrZr*, praca zlecona, Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich, 2001.
- [6] Brown S., *Feasibility of Replacing Structural Steel with Aluminum Alloys in the Shipbuilding Industry*, University of Wisconsin-Madison, 29 April, 1999.
- [7] Bugłacki H., *Wpływ obróbki cieplnej oraz składu chemicznego spoiw na własności mechaniczne i korozję naprężeniową stopu AlZn5Mg1 w spawanych konstrukcjach okrętowych*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1981.
- [8] *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*, ed. by J. R. Davis & Associates, ASM Intl., Metals Park OH, USA, 1999.
- [9] Cudny K., Puchaczewski N., *Stale i stopy aluminium stosowane na kadłuby okrętowe*, Wydawnictwo MARPRESS, Gdańsk 1996.
- [10] Cudny K., *Technologia konstrukcji okrętowych ze stopów aluminium*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
- [11] Darowicki K., Orlikowski J., Arutunow A., Jurczak W., *Passive Layer Cracking Studies Performed on A95056 Aluminum Alloy by DEIS and Acoustic Emission*, 'Electrochemical and Solid-State', 2005, Vol. 8, pp. 55–59.
- [12] Das S. K., Hayden H. W., Barthold G. B., *Development of Non-Heat-Treatable Automotive Aluminum Sheet Alloys*, 'Materials Science Forum-Trans Tech Publications', 2000 (913), pp. 331–337.
- [13] Duran A., Bennet A., *Advantages of High Strength Marine Grade Aluminium Alloys for Marine Structures*, 'Ausmarine — Pechiney and NGA', Paper. doc, 2003, pp. 1–24.
- [14] Duran A., Dif R., *New Alloy Development at Pechiney, a New Generation of 5383*, Conf. Proc. FAST 2001, ed. by P. A. Wilson, G. E. Hearn, Southampton, Southampton University, September 2001.
- [15] *Ekspertyza nadbudówki okrętu 620*, wykonana przez IMNo ML, Kraków 1992.
- [16] Galanty A., Golian A., Wojciechowski A., *Właściwości kształtowników i blach stopu AlZn5Mg1*, Gliwice 1972.
- [17] Haszler A., *Latest Aluminium Alloy Developments for Plate Applications in High Speed Ferry and Aircraft Structures*, Conference Proceedings of Aluminum '97, Aluminum Technology and Markets for the New Century, Messe Essen, Germany, 24–25 September, 1997.
- [18] Holtyn C. H. at all, *The Construction and Service Record of a 306 Ft Aluminum Trailership*, 'Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers', 1972.

- [19] Holtyn C. H., *The Age of Ships*, 'Transactions — Society of Naval Architects and Engineers', 1966.
- [20] Jurczak W., *Nowe stopy aluminium dla budownictwa okrętowego*, VII Sympozjum Wojskowej Techniki Morskiej SWTM '99, 20–21.10.1999, Gdynia.
- [21] Jurczak W., *Problemy eksploatacji konstrukcji okrętowych wykonanych ze stopów Al-Zn-Mg*, II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Explo-Ship 2002 „Problemy eksploatacji obiektów pływających i urządzeń portowych”, 21–24.05.2002 Szczecin, „Zeszyty Naukowe” WSM, s. 173–185.
- [22] Pawłow A. I., *Sudowye konstrukcjeiz aluminijowych splawow w sudostrojenii*, Leningrad 1973.
- [23] Radulović B., Perović B., Mišović M., 'Metalic Materials I', University of Montenegro, 2001, Vol. 90.
- [24] Raynaud G. M., Gomiero Ph., *The Potential of 5383 Alloy in Marine Application*, Proceedings of Alumitech '97, Atlanta, 20–23 May, 1997, p. 353.
- [25] Siegrist M., *Aluminum Extrusions for Shipbuilding*, Proceedings of Alumitech '97, Atlanta, 20–23 May, 1997, p. 367.
- [26] Skillingberg M., *Making aluminum alloy selection easier*, 'Marine Log', October 2004.
- [27] Wei R. P., Liao C. M., Gao M., *Magnetic Fields Induced by Electrochemical Reactions: Aluminum Alloy Corrosion Sensing by SQUID Magnetometry on a Macroscopic Scale*, 'Metall. Mat. Trans. A', 1998, 29A, p. 1153–1160.
- [28] Wiewiórski S., Wituszyński K., *Konstrukcja stalowego kadłuba okrętowego*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1977.

PROBLEMS AND PERSPECTIVES FOR ALUMINUM ALLOYS IN MARINE STRUCTURES

ABSTRACT

Aluminum alloys gain increasingly wide application in shipbuilding. The paper presents operation problems related to the marine structures made of aluminum alloys and the results of tests on their modifications. The mother material and welded joints belonging to groups 5XXX and 7XXX

(without Cu) are susceptible to corrosion in marine environment which causes operation hazards (failures, hazards to people and environment) and leads to rise in cost of maintenance. New aluminum alloys being modifications of conventional aluminum materials, developed in research and development centers offer wider possibilities for application of aluminum in marine structures.

Keywords:

marine aluminum alloys, corrosion, properties, operation.

Recenzent prof. dr hab. inż. Witold Precht