THE EXPLOITATION PROBLEMS MARINE LIGHT CONSTRUCTIONS FOR CORROSION RESISTANCE

PROBLEMY EKSPLOATACYJNE LEKKICH KONSTRUKCJI MORSKICH W ASPEKCIE ODPORNOŚCI KOROZYJNEJ

Wojciech Jurczak

Akademia Marynarki Wojennej

e-mail: w.jurczak@amw.gdynia.pl

Abstract: Corrosive degradation of construction materials for marine structures is a natural phenomenon. The extent of deterioration in mechanical properties of materials used in ship construction is directly linked to the chemical makeup of the material as well as the prevailing environmental conditions (e.g. salinity, physical stress) and the applied anti-corrosive coating. The paper presents results of research into stress corrosion of highly durable aluminum alloys. In order to increase the safety while using the above mentioned components, logging of corrosive potential has been introduced in the case of selected (corrosion-prone) number of surfaces of the quarter-section in relation the model 620 ship, made of 7020 alloy, so that the hazard of corrosive breach can be monitored.

Keywords: degradation aluminum alloys, stress corrosion cracking, monitoring corrosion

Streszczenie: Korozyjne obniżenie właściwości eksploatacyjnych materiałów stosowanych na konstrukcje morskie jest naturalnym zjawiskiem. Stopień obniżenia właściwości mechanicznych materiałów zastosowanych na konstrukcje okrętów zależy od składu chemicznego materiału konstrukcyjnego, warunków eksploatacyjnych (zasolenie, obciążenie) oraz rodzaju zastosowanej ochrony przeciwkorozyjnej. W artykule przedstawiono problemy eksploatacyjne okrętów, których konstrukcje wykonano ze stopów aluminium oraz wyniki badań korozji naprężeniowej współczesnych, wysokowytrzymałych stopów aluminium. Dla podwyższenia bezpieczeństwa eksploatacji tych konstrukcji wprowadzono rejestrację potencjału korozyjnego na wybranych (zagrożonych) obszarach nadbudówki okrętu projektu 620 wykonanej ze stopu 7020 celem monitorowania zagrożenia pęknięciem korozyjnym.

Słowa kluczowe: degradacja stopów aluminium, korozyjne pękanie, monitoring korozji.

1. Wprowadzenie

Eksploatacja jednostek pływających, w tym okrętów w środowisku morskim powoduje przyspieszoną utratę parametrów eksploatacyjno technicznych elementów konstrukcji wskutek korozyjnego oddziaływania wody i atmosfery morskiej. To naturalne środowisko o podwyższonej zawartości chlorów sodu przy wilgotności powietrza powyżej 70% i wielu innych związków chemicznych [1] oddziałujący na powierzchnię metaliczną konstrukcji okrętowych powodując ich korozję o charakterze elektrochemicznym.

Korozja elektrochemiczna związana z procesem redukcji i utleniania zachodzi w sposób naturalny na powierzchniach materiałów konstrukcyjnych. Tym procesom towarzyszy przepływ prądu korozyjnego, którego gęstość decyduje o szybkości (intensywności) korozji a tym samym zużyciu. Tych szkodliwych procesów nie można uniknąć (zatrzymać korozję) można jedynie minimalizować skutki ich degradacyjnego oddziaływania stosując ochronę: bierną (farby, protektory Zn lub Mg) czynną (ochrona katodowa) lub kombinowaną [2].

Warunki klimatyczne danego rejonu świata określają szybkość tej korozji. Straty wywołane korozją środków transportu wynoszą w Japonii 1.8% PKB, w Anglii 0.45% z tendencją malejącą ze względu na stosowanie coraz nowocześniejszych zabezpieczeń antykorozyjnych [3]. Dane z "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States Report" zweryfikowane w 2008 roku i opublikowane na stronie www.corrosioncost.com, wykazują, że nakłady bezpośrednie na korozję w USA wynoszą obecnie 276 bilionów \$ rocznie (ok. 6% produktu narodowego brutto). 1% tej kwoty to nakłady na korozję dla przemysłu okrętowego [4]. Szacuje się, że w Polsce nakłady te mogą sięgać nawet ponad 10% [5]. Lekkie nawodne siły uderzeniowe (LNSU) to okręty torpedowe, raketowe oraz małe okręty raketowe (MOR) projektu 660 i 1241RE, które stanowiły siłę uderzeniową Polskiej Marynarki Wojennej (rys.1) [6]. Konstrukcje tych okrętów, w większym lub mniejszym stopniu, wykonywano min. ze stopów aluminium (w pewnych projektach jak 663D kutra torpedowego polskiej produkcji kadłub i nadbudówka stanowiła konstrukcja aluminiowa) by zyskać na właściwościach eksploatacyjno-taktycznych [7].

Trzykrotnie lżejsze od stali stopy aluminium zapewniały zmniejszenia ciężaru właściwego okrętu, wzrost wytrzymałości względnej $R_{0,2}/\rho$ co przy podwyższonej mocy silników napędowych i turbiny gazowej pozwalało osiągnąć większe prędkości pływania. To właśnie szybkie podejście do okrętu n-pla a później równie szybkie „odejście” stanowiło podstawę sukcesu ataku torpedowego dla okrętów projektu 183 i 663D późniejszego 664. Jednak dla konstrukcji tych okrętów wykonanych wówczas ze stopów serii 5xxx (hydronalium) duże szybkości pływania dzięki siłowni w układzie (CODAG – 4 silniki tłokowe + turbina gazowa TM-1) do 50 węzłów były źródłem dużych wibracji (także hałasu do 130dB) co w połączeniu z dynamicznym uderzeniem w fale morską były przyczyną pęknięć nie tylko poszycia ale także wręg kadłuba, a w skrajnych przypadkach lokalnego oderwania nadbudówki od pokładu głównego.

Rys.1 Konstrukcje okrętów Polskiej Marynarki Wojennej wykonane w oparciu o okrętowe stopy aluminium serii 5xxx i 7xxx: a) kuter torpedowy proj. „183”, b) kuter torpedowy duży KTD proj.664 jako następca kuter torpedowy proj. 663D z fot.e, c) kuter KTR proj.205, d) mały okręt rakietowy MOR proj. 1241RE, f) mały okręt rakietowy MOR proj.660 , g) dozrowiec/korweta proj.620 [niepublikowane materiały AMW „Lekkie nawodne..."]

Okręty w konstrukcjach aluminiowych wchodzące do LNSU były głównie produkcji radzieckiej, angielskiej ale także i polskiej. W polskiej stoczni pod koniec lat 50-tych po zakończeniu prac projektowych rozpoczęto budowę kutra torpedowego z kadłubem wykonanym ze stopu 5019 (AlMg5Mn) a nadbudówka ze stopu 5086 (AlMg4Mn). Te stopy na ówczesne czasy posiadały najlepsze cechy materiału lekkiego o dobrych właściwościach mechanicznych i odporności korozyjnej. Te doświadczenia na bazie których zbudowano osiem okrętów wykorzystano 20 lat później wykorzystano przy budowie korwety (dozorowca) z nadbudówką aluminiową o długości 40 m a więc dwukrotnie większa od całego kutra ale także o 10-cio krotnie większej wyporności (rys.1g). W obu przypadkach były to wielkie i ambitne wezwania projektowe, które tylko częściowo zostały zakończone sukcesem.

Kutry torpedowe o doskonałych parametrach taktyczno-technicznych (rys.1a,b,e) miały szanse budowy seryjnej gdyby nie wprowadzenie na uzbrojenie marynarki wojennej broni rakietowej, która wyeliminowała torpedy a tym samym okręt tego typu. Jednak kilkunastoletnie (od 1968 r. - 1986 r.) użytkowanie tych okrętów (KTD nr. burtowy 452-459) nie odbywało się bez problemów eksploatacyjnych w postaci pęknięć zmęczeniowych we wszystkich ośmiu okrętów, które były wynikiem dużych obciążeń eksploatacyjnych (prędkość maks. 50 węzłów przy wyporności 60t i 25 m długości) podczas działań z użyciem torped i armaty. Zbyt dalekie „odejście” od doświadczeń eksploatacyjnych prototypu proj. 663D spowodował seryjną produkcję wadliwych (głównie ze względu na napęd) okrętów, które wycofano w 1986 roku [8].

W innym aspekcie można dokonać oceny „sukcesów” budowy dozorowca, który jako prototyp jest eksploatowana do dnia dzisiejszego (od 1983 roku przy danych - prędkość maks. 26 węzłów wyporności 900 t i 83 m długości). To właśnie prototyp jest doświadczalną jednostką, z eksploatacji której winno się brać poprawki do budowy kolejnych jednostek tego typu. Jednak nie zdecydowano o budowie kolejnych tego typu okrętów (planowano 7) a prototyp (nr. burtowy 620) poddano intensywnej eksploatacji z problemami (usuwane doraźnie), które powstały już na etapie budowy spotęgowane „niekonwencjonalnym” wodowaniem.

Niestandardowe wodowanie, w trakcie którego z bocznej pochylni na wodę zsunęła się jedynie rufa, spowodowało naruszenie konstrukcji i wprowadzenie dodatkowych naprężeń, lokalnie przekraczające wartości krytyczne. Znaczny problem powstał z późniejszym pękaniem korozyjnym, wyężonej aluminiowej nadbudówki wykonanej, pioniersko ze spawalnego stopu 7020 (układu Al-Zn-Mg) bez Cu [9]. Już pod koniec lat 90-tych rozpoczęto w Akademii Marynarki Wojennej badania nad modyfikacją zastosowanego stopu 7020, w którym upatrywano niską odporność korozyjną szczególnie złączy spawanych.

2. Obiekt badań

W latach 80-tych wprowadzono do polskich norm stop PA 47 (konstrukcyjne Al-Zn-Mg), którego właściwości wytrzymałościowe są porównywalne do stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości. Ten stop zastosowano do budowy dużej nadbudówki okrętu projektu 620 (rys.1g) początkowo zwanego dozorcem a później korwetą. Krótka eksploatacja wykazała brak doświadczenia polskich stocznii w budowie konstrukcji z tych materiałów, które w powiązaniu z awaryjnym dokowaniem tego okrętu przyczyniły się do późniejszych, poważnych problemów eksploatacyjnych. Pęknięcia korozyjne i intensywna korozja elektrochemiczna na połączeniach nitowanych stalowego kadłuba z aluminiową nadbudówką, niska odporność na przebijanie i intensywna korozyjna naprężeniowa nie tylko na elementach nośnych tej nadbudówki ale także na arkuszach ścian działowych spowodowały poszukiwania nowych rozwiązań i modyfikacji tych stopów. Trzykondygnacyjna, ponad 40-to metrowej długości nadbudówka wykonana ze wysokowytrzymałego stopu aluminium (7020) mocowana do stalowego kadłuba jest przyczyną częstych dokowań i napraw stoczniowych z powodów pęknięć. Niektóre pęknięcia pokazanych na rys.2.

Rys.2. Pęknięcia korozyjne elementów nadbudówki okrętu projektu 620:
a) prawa burta pokładu głównego, b) pokład artyleryjski, c) węzłówki pokładu głównego, d) obszar wentylatorów pokładu głównego. [Zdjęcia wykonał autor podczas dokowania i przygotowania do napraw stoczniowych].

*The exploitation problems marine light constructions for corrosion resistance.
Problemy eksploatacyjne lekkich konstrukcji morskich w aspekcie odporności korozyjnej*

Powyżej przedstawione problemy są wynikiem nie tylko błędów projektowych ale głównie jakości prac stoczniowych, zwłaszcza spawalniczych.

Obecna eksploatacja korwety to ciągła, doraźna lub stoczniowa regeneracja konstrukcji aluminiowej nadbudówki polegająca na pękaniu spoin i korozji sterfy wpływu ciepła (SWC) tych złączy. Także wyraźna korozja elektrochemiczna pasa nitowanego (rys.3a,b) łączącego stalową zrębnicę z aluminiową nadbudówką wymusiła wymianę na dużym obwodzie nadbudówki połączenia nitowanego na połączenie wybuchowe rys.3c.

Na rys.3 pokazano stan techniczny nadbudówki po przeszło trzydziestoletniej eksploatacji korwety podczas kolejnego dokowania stoczniowego.

Rys.3 a) b) Pęknięcia korozyjne w obszarze połączenia nitowanego,
c) nowe połączenie wybuchowe stalowej zrębownicy kadłuba
z aluminiową nadbudówką Al/St

Współczesny wysokowytrzymały stop 7020, z którego wykonano nadbudówkę korwety projektu 620, miał zapewnić redukcję ciężaru w stosunku do stali, dobrą odporność na korozję i dobre właściwości mechaniczne. Niewłaściwa technologia prostowania [9] po feralnym wodowaniu i niedopracowana technologia spawania tego stopu aluminium w warunkach stoczniowych spowodowała podczas eksploatacji intensywną korozję i ubytki materiałowe, a przez wzrost naprężeń powodujące pęknięcia. Dodatkowo, intensywne vibracje linii wałów przenoszone szczególnie na konstrukcje nadbudówki w połączeniu z uderowym oddziaływaniem podczas wykorzystania uzbrojenia są kolejną przyczyną pęknięć.

3. Metody badawcze i wybrane wyniki badań

Eliminację tych niekorzystnych efektów rozpoczęto od modyfikacji materiału konstrukcyjnego zmieniając jego skład chemiczny (zwiększono zawartości $Zn+Mg>5,5$ przy zwiększeniu Cr i Zr). W warunkach laboratoryjnych podano ten stop i jego modyfikację 7020M badaniom odporności korozyjnej i porównano do stopów 5019 i 5086 zastosowanych do budowy konstrukcji kutra torpedowego.

Tab.1 Właściwości mechaniczne i odporność korozyjna materiału rodzimego wybranych okrętowych stopów aluminium wykorzystanych przy budowie okrętów projektu 664 i 620 oraz najnowszego stopu 7020M na korozję w środowisku morskim [10,11]

Stop aluminium wykorzystany w budowie okrętów w stanie	Statyczne właściwości mechaniczne $10^{-3}s^{-1}$					Odporność na korozję w:							
						atmosferze morskiej		wodzie morskiej					
								Korozja naprężeniowa dla $t=1500h$ i naprężenia rozciągającego $\sigma_0=0,8 R_{0,2}$			Korozja zmęczeniowa obrotowo-giętna dla $f=50Hz$ i N cykli zmęczeniowych		
	R_m	$R_{0,2}$	A_5	K_{Rm}	K_{A5}	R_m'	$R_{0,2}'$	A_5'	Powietrze $N=10^5$ $N=10^6$		3%NaCl $N=10^5$ $N=10^6$		
	MPa	MPa	%	%	%	MPa	MPa	%	Z_{go} MPa	Z_{go} MPa	Z_{gok} MPa	Z_{gok} MPa	
7020M T6xx*	443	397	9,8	4,7	36	426	377	2,9	236	175	224	134	
7020 T6xx*	372	317	16	4,4	30	339	305	8	233	180	226	160	
5019 u=0,6**	273	166	23						192	143	177	129	
5086 r***	295	151	20	3	10	285	146	13	185	155	152	118	

* Obróbka cieplna stopów serii 7xxx (Al-Zn-Mg) – T6xx – przesycanie i czas - 450°C/1.5h (430°C/45'), studzenie w gorącej wodzie 80°C i dwustopniowe sztuczne starzenie 20°C/6 dni + sztuczne starzenie: 95°C/15h+150°C/10h,

** u=06 stopień umocnienia przez zimno zyskując na umownej granicy plastyczności,

*** r- rekrytalizacja.

Stopień obniżenia właściwości mechanicznych badanych złączy spawanych stopów aluminium wyznaczono wg. wzorów:

$$K_{R_m} = \frac{1}{n} \sum \frac{R_{mo} - R_{mk}}{R_{mo}} 100 \% \quad (1)$$

$$K_{A_5} = \frac{1}{n} \sum \frac{A_0 - A_k}{A_0} 100 \% \quad (2)$$

gdzie: R_{mo} - wytrzymałość na rozciąganie przed ekspozycją korozyjną,

R_{mk} - wytrzymałość na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej,

n - liczba próbek,

A_0 - wydłużenie plastyczne materiału przed ekspozycją korozyjną,

A_k - wydłużenie plastyczne materiału po ekspozycji korozyjnej

K_{R_m} - średnie procentowe zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej,

K_{A_5} - średnie procentowe zmniejszenie wydłużenia plastycznego po ekspozycji korozyjnej.

Dla materiału rodzimego rozpatrywanych stopów właściwości mechaniczne wykazują znaczne różnice. Z tab.1 wynika, że duża dysproporcja rzędu od 100–200 MPa we właściwościach wytrzymałościowych występuje między stopem 5019 (hydronalia) a stopami 7020 i jego modyfikacją 7020M (konstruktalami). Ten fakt powoduje, że właściwości plastyczne (A_5) tych wysoko wytrzymałościowych stopów są gorsze ale mieszczące się w dopuszczalnych granicach Przepisów Budowy Okrętów i Polskiego Rejestru Statków. To dodatek cynku, chromu i cyrkonu do składu chemicznego konstruktaali wywołuje ww. efekt.

Odporność zmęczenie materiału konstrukcji kadłuba i nadbudówki podczas eksploatacji czyli pracy okrętu na fali to w warunkach laboratoryjnych wyznaczanie odporności zmęczeniowej (Z_{go}) i zmęczeniowo korozyjnej (Z_{gok}). Wyniki tych badań pokazane w tab.1 dają podstawę do wyznaczenia zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej wskutek oddziaływania korozji przy $N=10^6$ cykli naprężeń opisany wzorem:

$$k = \frac{Z_{go} - Z_{gok}}{Z_{go}} 100[\%] \quad (3)$$

wskazują nieco lepszą odporność zmęczeniową stopu 5019 ($k=10\%$) stąd stopy 7020 ($k=11-21\%$) wymagają zwiększonego zabezpieczenia antykorozyjnego. Procentowe obniżenie wytrzymałości K_{R_m} i plastyczności K_{A_5} w wyniku korozyjnego oddziaływania wody i atmosfery morskiej dla konstruktaali jest zbliżony ale wyższy niż dla hydronaliów wskazane w wielu publikacjach.

Jednak te stopy posiadające od 4,5–5% Zn w przypadku złączy spawanych stopów 7xxx nadaje im cechę samorzutnego umacniania wydzieleniowego po zakończeniu spawania. Oznacza to, że od 7 do 30 dni po spawaniu złącza tych konstruktaali zyskuje lepsze właściwości wytrzymałościowe a co najważniejsze są one znacznie wyższe niż dla hydronaliów. Tych stopów ze względu na gorące pęknięcia spawalnicze (określone współczynnikiem K_p wg. próby P. T. Houldcrofta dla próby „rybi szkielet”) nie można spawać spoiwem o tym samym składzie chemicznym co łączony stop. W praktyce stoczniowej do spawania stopów 7xxx stosuje się SPA20 (AlMg5Ti0,1) lub SPA201(AlMg5Be 0,3).

$$K_p = (L_p/L) 100\% \quad (4)$$

L_p - długość pęknięć spoiny [mm]; L - całkowita długość spoiny [mm]

Dobór składu chemicznego spoiwa do spawania okrętowych stopów aluminium został opisany wg. kryterium Houldcrofta w których podatność do gorących pęknięć spawalniczych została określona współczynnikiem $K_p=17\%$ pokazano na rys. 5.

Rys. 4 Podatność do gorących pęknięć spawalniczych okrętowych stopów aluminium wg. próby Houldcrofta

Z rys. 4 min. wynika, że ze wzrostem zawartości cyrkonu w spoinie wskaźnik skłonności do pęknięć spawalniczych stopu 7020M zmniejsza się [12]. Natomiast dodanie do spoiwa cynku powoduje wzrost wartości tego wskaźnika. W zestawieniu ze stopem 7020 stop 7020M wykazał mniejszą skłonność do pęknięć spawalniczych (mniejsza wartość K_p). Największą podatność do gorących pęknięć spawalniczych nie pokazaną na rys.5 [$K_p \approx 40\%$] wykazał stop 7020M spawany spoiwem o składzie chemicznym identycznym jak materiał rodzimy. Ten fakt dyskwalifikuje go jako spoiwo. Zawartość $Zn+Mg > 7\%$ w materiale rodzimym jak i w spoiwie głównie decydowała o wartościach K_p , pomimo dużej zawartości modyfikatorów (tj. Mn,Cr,Zr,Ti,Be), które obniżają K_p .

Natomiast za regułę przyjęto, że dla stopów 5xxx spoiwo ma zbliżony skład chemiczny do spawanego materiału, zapewniając brak gorących pęknięć spawalniczych i zminimalizowanie pogorszenia odporności na korozję w SWC złącza.

4. Monitorowanie lokalne korozji

Rozwój technik antykorozyjnych i monitorowanie korozji mogą jedynie minimalizować skutki jej degradacyjnego charakteru i przyczynić się do poprawy kontroli eksploatacji. Jest to możliwe poprzez poznawanie mechanizmów korozji. Ochrona przed korozją to przeciwdziałanie naturalnemu procesowi niszczenia polegającego na wydłużeniu cyklu eksploatacji tj. od stworzenia do zniszczenia materiału, a ściślej od momentu jego wytworzenia do momentu utraty jego właściwości użytkowych. Tak współcześnie pojmuje się problematykę korozji i ochronę przeciwkorozyjną [13].

OSDK - Okrętowy System Diagnozowania Korozyjnego dotyczy gromadzenia, rejestrowania i sygnalizowania zagrożenia korozyjnego elementów konstrukcji [14].

*The exploitation problems marine light constructions for corrosion resistance.
Problemy eksploatacyjne lekkich konstrukcji morskich w aspekcie odporności korozyjnej*

W oparciu o rejestrację potencjału stacjonarnego, elektrochemicznego (Est) na wybranym obszarze konstrukcji, nie tylko morskiej, można z dużym przybliżeniem, korzystając z monogramów (stabelaryzowane wyniki laboratoryjnych badań mechaniczno-elektrochemiczne oparte na Elektrochemicznej Spektroskopii Impedancyjnej lub jej Dynamicznej odmianie) określić zagrożenie i inicjację procesów korozyjnych oraz stanu lokalnego odkształcenia (naprężania) konstrukcji. Na rys.5 przedstawiono system rejestracji Est na wybranych obszarach nadbudówki okrętu pokazanego na rys.1g obszaru z rys.2a.

Rys. 5 Okrętowy System Diagnostyki Korozyjnej montowany na wybranych obszarach (pękających) aluminiowej (stop 7020) okrętowej nadbudówki okrętu pr.620 [14]

Ten system jest stworzony dla materiałów metalicznych, które w sposób naturalny (lub sztuczny) tworzą na swojej powierzchni szczelną, dobrze przylegającą do podłoża, pasywną warstwę tlenkową (dla stopu 7020 warstwę stanowią amorficzny bemit i porowaty hydrargilit). Taka warstwę wytwarzają stopy aluminium jako wynik kontaktu powierzchni stopu z tlenem z powietrza lub wody. Korozja materiałów w środowisku morskim to korozja elektrochemiczna, której towarzyszy przepływ prądu którego wartość zależy głównie od mierzonej wartości Est warunkowanego min. poziomem naprężenia. Ta izolacyjna warstwa tlenkowa musi posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne i fizyczne odniesione do Est. Jej roztwarzanie sygnalizowane obniżeniem potencjału od 10mV do 100mV w stosunku do Est obrazuje **zagrożenie korozją** (zmniejszenie rezystancji przeniesienia ładunku i wzrost pojemności warstwy zewnętrznej porowatej), a kolejny wzrost powyżej 100mV do Est potwierdza pękanie wewnętrznej amorficznej warstwy i **inicjację procesu korozji**.

Analizę zarejestrowanego pojedynczego potencjału stacjonarnego Est pokazano na rys.7 z zaznaczonymi obszarami radykalnej fluktuacji potencjału spowodowane warunkami eksploatacji co odniesiono do odpowiedniej dokumentacji (dziennik maszynowy, zdarzeń, nawigacyjny i wszelkie rejestratory położenia i warunków meteo). Szczegółowe rozpatrywanie tych obszarów można przeprowadzić z dokładnością do 0,2 sekundy (częstotliwość próbkowania). Warunkiem jest dokładne skorelowanie zegara DataLoggera z czasem okrętowym, wg. którego dokonuje się zapisów w dokumentacji okrętowej. Przykładowy, pojedynczy przebieg przedstawiono na rys.6

Rys.6 Wykres rejestrowanego elektrochemicznego potencjału stacjonarnego mierzonego na wybranym obszarze aluminiowej nadbudówki przez 120h pobytu okrętu proj.620 w morzu, $E_s = -0,560V$ (obrobka statystyczna max. $-0,390V$ min. $-0,780V$). Zaznaczone przedziały czasowe fluktuacji potencjału korozyjnego są obszarami do szczegółowej analizy zdarzeń eksploatacyjnych powodujące te zmiany.

Analiza okrętowej dokumentacji eksploatacyjnej skorelowana z przebiegiem zarejestrowanego Est daje możliwość selekcji tych działań prowadzonych na okręcie, które powodują pękanie warstwy ochronnej i przekroczeniem dopuszczalnych naprężeń spowodowanych odkształceniem konstrukcji.

5. Wnioski

Na odporność korozyjną aluminiowych konstrukcji okrętowych, która stanowi największy problem eksploatacyjny ma wpływ nie tylko skład chemiczny materiału rodzimego ale także właściwy dobór spoiwa do ich spawania. Wraz ze składem chemicznym tych stopów kształtowane są nie tylko właściwości mechaniczne tych materiałów i złączy spawanych ale także wartości potencjału elektrochemicznego, który w głównej mierze wyznacza gęstość prądu korozyjnego a tym samym szybkość korozji. W żadnym wypadku spoina w konstrukcji nie może mieć niższego (bardziej elektrochemiczny) potencjału od spawanego materiału by nie stanowiło anody w galwanicznym ogniwie korozyjnym. Tą zasadę stosuje się również przy połączeniach nitowanych, gdzie stosunkowo mała powierzchnia nitu czy spawu ulegałaby intensywnej korozji.

Wnioski z przedstawionych, wybranych badań okrętowych stopów aluminium zestawionych w tabeli 1 pozwalają stwierdzić:

1. Stopy serii 5xxx (5019, 5086 zwane hydronaliami) stosowane w przeszłości na konstrukcje szybkich kutrów raketowych czy torpedowych wykazywały lepszą odporność na korozję ogólną, korozję naprężeniową czy zmęczeniową niż stopy serii 7xxx (zwane konstruktalami) stosowane obecnie w okrętownictwie. Jednak te stopy posiadają prawie dwukrotnie lepsze właściwości wytrzymałościowe od stopów 5xxx i możliwość optymalizacji ich właściwości poprzez właściwy dobór parametrów obróbki cieplnej. Pękanie zmęczeniowo-korozyjne tych stopów następuje przy znacznie wyższych poziomach obciążeń (naprężeń) niż dla stopów 5xxx.
2. Hydronalia należy spawać spoiwami o zbliżonym składzie chemicznym co spawany stop uzyskując dobre właściwości wytrzymałościowe i korozyjne tych połączeń (zbliżone potencjału obszaru spoiny, SWC i materiału rodzimego). Tej zasady nie można stosować do konstruktalem ze względu na gorące pęknięcia spawalnicze (rys.4), a dodatek Zr do składu chemicznego spoiwa szczególnie przy zwiększonej zawartości Zn (dla zwiększenia wytrzymałości) musi sięgać wartości 0,12-0,43%.
3. Monitoring korozyjny na wybranych obszarach eksploatowanej aluminiowej konstrukcji okrętowej oparty na pomiarze potencjału korozyjnego stanowi ważną informację dla eksploatatorów o zagrożeniu czy późniejszym zainicjowaniu procesu korozyjnego. Warunki eksploatacyjne mają swoje odzwierciedlenie w poziome obniżenia potencjału względem potencjału stacjonarnego, jego radykalne (powyżej 30%) obniżenie sygnalizuje załodze przekroczenia odkształceń (naprężeń) wywołanych obciążeniem eksploatacyjnym.

6. Podsumowanie

Poprawność doboru materiału i technologia wykonania konstrukcji okrętowej to jeden z wielu podstawowych uwarunkowań późniejszej bezproblemowej eksploatacji jednostki pływającej. Ośrodki naukowe współpracujące z przemysłem metalurgicznym oferują coraz to nowsze lepsze materiały, które dla okrętownictwa muszą spełniać wiele wymagań ale najważniejsze to dobre właściwości mechaniczne w tym zmęczeniowe, a także odporne na korozję w środowisku morskim. Nie zawsze spełniają się założenia konstruktorów okrętowych przyjmujących nowe wyzwania konstrukcyjne i materiałowe, dlatego zawsze pierwsza jednostka nowego typu to jednostka doświadczalna (prototyp), a jej eksploatacja to baza danych do skorygowania produkcji seryjnej. Jednak współczesna polityczna ekonomia decyduje o rzeczywistości, czego przykładem są opisane okręty i obecny stan przemysłu stocznioowego.

7. Literatura

- [1] Schlichter D.: The importance of dissolved organic compounds in sea water for the nutrition of *Anemonia sulcata* (Pennant), Proc. 9th Europ. Mar. Biol. Symp. 395, 1975.
- [2] Miszewski Z.: Zarys teorii korozji i ochrony metali w środowisku morskim. 1998.
- [3] Zawadzki J.: Analiza skutków korozji samochodów a badania korozyjne, Eksploatacja Maszyn nr 9, 1998.
- [4] www.corrosioncost.com, 2014
- [5] Sokółski W.: *Współczesne problemy ochrony przeciwkorozyjnej konstrukcji*. Materiały szkoleniowe. Gdańsk 2005.
- [6] Makowski T., Rochowicz R.: Polskie kutry torpedowe - jednostki seryjne. Morze, statki i okręty, 2/56, 2006.
- [7] Bujniewicz Z., Cudny K., Wińcza M., Mańkowski S.: Konstrukcje okrętowe ze stopów aluminium. Wydawnictwo Morskie, 1976.
- [8] Pietkiewicz I., Naubauer N.: Niezrealizowane wizje serii nowoczesnych polskich okrętów torpedowych w latach 1965-86. Kwartalik Qollegium WNiHS, 2013.
- [9] Ekspertyza pęknięć korozyjnych na ORP. „Kaszub”. Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich Kraków, 1989.
- [10] Jurczak W., Arutunow A.: Long-term researches of stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg alloys. Surface Engineering 2A' 2005 Vol. I s. 127-134.
- [11] Jurczak W.: Wyniki badań prowadzonych w ramach projektu badawczego nr. 4824/T02/2010/38. 2013
- [12] Jurczak W.: Maritime methods of anticorrosive protection with use of aluminum and its alloys. Polish Journal of Environmental Studies, vol.16 no.3C, pp.34-43, 2005
- [13] Darowicki K., Orlikowski J., Arutunow A., Jurczak W.: The comparative electrochemical analysis of the passive layer cracking process on aluminium alloys performed by means of dc and ac techniques. Journal of Electrochemical Society, 2006.
- [14] Jurczak W.: Patent nr.216723 Sposób diagnozowania zagrożeń korozyjnych konstrukcji wykonanych ze stopów aluminium i stali austenitycznych. 2013.

Wojciech Jurczak, Navy Cpt., DSc. Eng. – doctor at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of Polish Naval Academy in Gdynia.

The exploitation problems marine light constructions for corrosion resistance.
Problemy eksploatacyjne lekkich konstrukcji morskich w aspekcie odporności korozyjnej