

JURCZAK Wojciech¹
GRZĄDZIELA Andrzej

Problemy technologiczne i bezpieczeństwo eksploatacyjne konstrukcji okrętów wykonanych ze stopów aluminium

Słowa kluczowe: okrętowe stopy aluminium, transport, bezpieczeństwo, monitoring korozji

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane problemy technologiczne, jakie wystąpiły podczas budowy konstrukcji okrętów ze stopów aluminium w polskich stoczniach i problemy z ich późniejszą eksploatacją. W latach 60-tych zbudowano kilka szybkich kutrów torpedowych, których kadłub i nadbudówka zostały wykonane odpowiednio ze stopu 5019 i 5086 a w latach 80-tych zbudowano korwetę z dużą, trzy-kondygnacyjną nadbudówką wykonaną ze spawalnego, wysoko wytrzymałościowego stopu 7020. Przedstawiono sposób monitorowania procesów korozyjnych mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

TECHNOLOGICAL PROBLEMS AND EXPLOITATION SAFETY OF SHIP CONSTRUCTION MADE OF ALUMINIUM ALLOYS

Abstract

The paper presents selected technological problems, which occurred during building of ships from aluminum alloys in Polish shipyards as well as during their further service. In the 60s of the twentieth century a few fast motor torpedo boats were built. Their hulls and superstructures were made of 5019 and 5086 alloys, respectively. In the 80s of the twentieth century a corvette with a large, three-floor superstructure made of weldable, high-strength 7020 alloy was built. A method of corrosion monitoring has been proposed aimed at increasing the exploitation safety.

1. WSTĘP

Polski przemysł stoczniowy w przeszłości podejmował wiele wyzwań w projektowaniu i budowie nowych jednostek pływających przeznaczonych do działań militarnych. Pod koniec lat 50-tych po zakończeniu prac projektowych rozpoczęto budowę kutra torpedowego z kadłubem wykonanym ze stopu 5019 (AlMg5Mn-PA20) a nadbudówka ze stopu 5086 (AlMg4Mn). Te stopy na ówczesne czasy posiadały najlepsze cechy materiału lekkiego o dobrych właściwościach mechanicznych i odporności korozyjnej. 20 lat później rusza budowa korwety (dozorowca) z nadbudówką aluminiową o długości 40 m a więc dwukrotnie dłuższej od kutra i o 10-cio krotnie większej wyporności. W obu przypadkach były to wielkie i ambitne wezwania projektowe, które częściowo zostały zakończone sukcesem. Kutry torpedowe o doskonałych parametrach taktyczno-technicznych [1] miały szanse powodzenia gdyby nie wprowadzenie na uzbrojenie marynarki wojennej broni rakietowej, która wyeliminowała torpedy a tym samym okręty tego typu. Jednak kilkuletnie użytkowanie tych okrętów nie odbywało się bez problemów eksploatacyjnych w postaci pęknięć zmęczeniowych na wszystkich ośmiu okrętach, które były wynikiem dużych obciążeń eksploatacyjnych (prędkość maks. 55 węzłów przy wyporności 60 t i 25 m długości) podczas działań z użyciem torped i armaty. W inny aspekt można dokonać oceny „sukcesów” budowy korwety, która jako prototyp jest eksploatowana do dnia dzisiejszego (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 korwet (planowano 7), a prototyp (620) poddano intensywnej eksploatacji z problemami (usuwanymi doraźnie), które powstały już na etapie budowy i zostały spotęgowane „niekonwencjonalnym” wodowaniem. Pechowe wodowanie, w trakcie którego z bocznej pochylni na wodę zsunęła się jedynie rufa, spowodowało naruszenie konstrukcji i wprowadzenie dodatkowych naprężeń miejscami krytycznych. Znaczny problem powstał z późniejszym pękaniem korozyjnym, wyteżonej (dodatkowe naprężenia pospawalnicze) aluminiowej nadbudówki wykonanej pioniersko ze spawalnego stopu 7020 (układu Al-Zn-Mg) bez Cu [2]. 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.

Poddanie, w szerokim zakresie badaniom wytrzymałościowym i korozyjnym, nie tylko stopów aluminium stosowanych na konstrukcje okrętowe jest podstawowym wymogiem towarzystw klasyfikacyjnych dopuszczających materiał do stosowania w konstrukcjach okrętowych. W części badawczej tego artykułu przedstawiono wyniki tych badań dla ww. stopów aluminium i ich złączy spawanych tym bardziej że jednym z głównych problemów, które trzeba było rozwiązać, przy budowie kutra były obliczenia wytrzymałości spawanego kadłuba.

Obecnie ten problem w zakresie oceny bezpieczeństwa spawanych konstrukcji aluminiowych umacnianych zgniotem jest opisany procedurą obliczeniową wg [3]. W okrętownictwie szeroko stosuje się stopy serii 5xxx, (5019 umocniony H14 czyli ½ twardy), których podwyższenie właściwości wytrzymałościowych materiału rodzimego uzyskuje się poprzez

¹ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno Elektryczny, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia 3, tel. 58 626-26-16, e-mail: w.jurczak@amw.gdynia.pl

zgniot na zimno. Jednak oddziaływanie temperatury przy spawaniu takich stopów powoduje degradację wytrzymałości w obszarze SWC (o ok. 20-30%) do właściwości materiału w stanie miękkim. Sformalizowane w eurokodach procedury obliczeniowe uwzględniają jakościowe zmiany w metodach projektowania takich aluminiowych konstrukcji. Klasyczny model ustroju idealnego, z materiału liniowo sprężystego i bez imperfekcji, został zastąpiony modelem ustroju sprężysto-plastycznego z imperfekcjami geometrycznymi lokalnymi i globalnymi [4]. Jakościowe zmiany w analizie nośności są szczególnie widoczne dla spawanych konstrukcji aluminiowych, w SWC [5]. Są to zjawiska specyficzne dla większości stopów serii 5xxx, nieznane dla spawanych konstrukcji stalowych. Destrukcji termicznej nie podlegają stopy aluminium w stanie wyżarzonym O, surowym F oraz wyżarzonym i lekko umocnionym H111

Dwa elementy konstrukcji okrętowej decydują nie tylko o parametrach techniczno-taktycznych ale także o zdolności bojowej okrętu to kadłub i nadbudówka. Konstrukcja tych elementów a przede wszystkim rodzaj materiału zastosowanego na te konstrukcje ma wpływ na późniejszą jego eksploatację. Zasadnicza różnica dla rozpatrywanych okrętów była w konstrukcji kadłuba i rodzaju materiału - dla korwety kadłub stanowi stal kadłubowa, jednak materiał z jakiego wykonano nadbudówki obu okrętów to stop aluminium.

2. KONSTRUKCJA KADŁUBA

Kadłuby okrętowe buduje się systemem sekcyjnym jako konstrukcję spawaną, jednak technologia łączenia- spajania elementów kadłuba zależy od materiału konstrukcyjnego. Inną technologię spawania stosuje się dla stali kadłubowej z której wykonano kadłub korwety a inną do spawania stopu aluminium - wymagającą spawania w osłonie gazów jak to miało miejsce dla kadłuba kutra torpedowego.

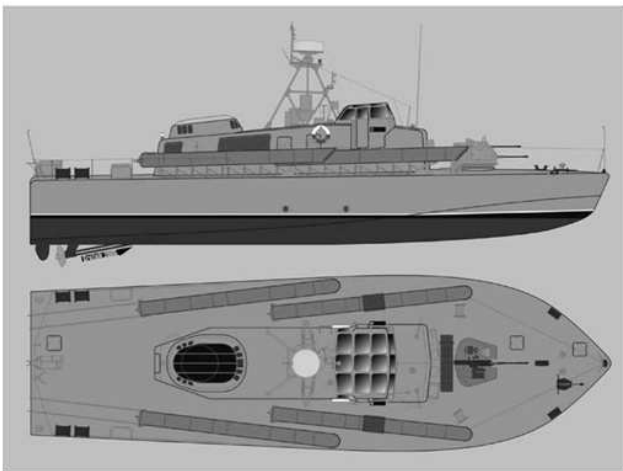
Wybór materiału na konstrukcję kadłuba (stal czy stop aluminium) odniesiony jest do typu jednostki pływającej. Właściwości stopów aluminium jak: amagnetyczność, wysoki współczynnik wytrzymałości względnej $R_{0,2}/\rho$, względnie dobra odporność na korozję w wodzie i atmosferze morskiej, spawalność oraz dobra odporność udarowa także w niskich temperaturach zdecydowały o powszechności zastosowania tych materiałów w światowym budownictwie okrętowym.

W konstrukcji kadłuba kutra torpedowego średni odstęp międzywrgowy wynosił ok. 620 mm, a odległość między wzdłużnikami nie przekraczała 300 mm (rys.3). Krótka eksploatacja kutrów pokazała że na ich poszyciach kadłuba pojawiły się obszary materiału o podwyższonej wytrzymałości, zauważono także poprzeczne i wzdłużne pasy o obniżonej wytrzymałości. Metodyka obliczeń konstrukcji o zmiennej wytrzymałości dla tego typu rozwiązań nie była jeszcze w sposób jednoznaczny rozpracowana i dlatego podstawowy problem wynikał z braku świadomości, które z wartości przyjąć do obliczeń i czy istnieją korelacje między tymi wartościami. Innym problemem, który nie był chyba do końca rozwiązany, były przeciążenia dynamiczne o wartościach dochodzących w warunkach ekstremalnych do 9g i ich wpływ na korektę projektu kolejnych okrętów i ich późniejszą eksploatację [6].

Kadłub kutra zbudowano systemem sekcyjnym jako konstrukcję prawie całkowicie spawaną z wyjątkiem nitowania ułożyskowania wałów i sterów wychodzących z kadłuba i wsporników wałów śrubowych (rys. 1a), natomiast kadłub współczesnej korwety pokazano na rys.1b – wykonano ze stali.

Do wykonania konstrukcji kadłuba kutra zastosowano blachy ze stopu 5019 H24 (umocnionego przez zgniot na zimno). Poszycie denne i stępka płaska miały grubość 6 mm, a burty - 5 mm. Usztywnienia wzdłużne wykonywane były z płaskowników wycinanych z blachy w stanie utwardzonym i wyginane z blachy w stanie utwardzonym wzdłużnymi pasami o obniżonej wytrzymałości. Zastosowanie kątowników giętych z blach umocnionych przez zgniot wynikało z faktu, że wszystkie kształtowniki wytłaczane jako półfabrykaty miały wytrzymałość materiału w stanie miękkim, co mogło wpływać na całkowitą wytrzymałość kadłuba (rys.2a,b).

a)

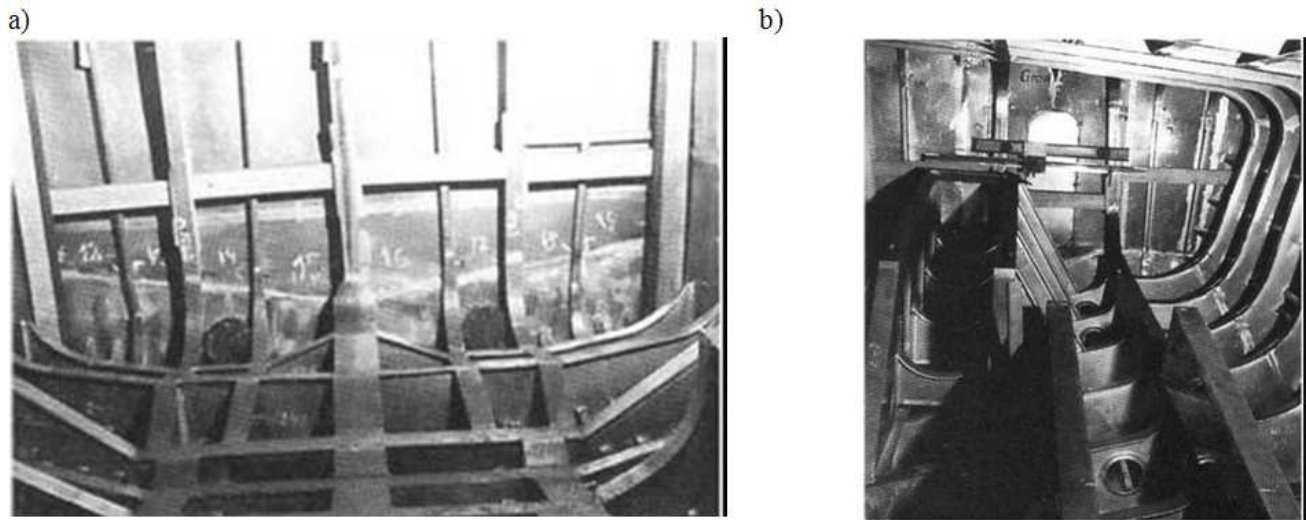


b)



Rys. 1. Konstrukcja okrętów projektu : a) nr. 663 - kutra torpedowego (zdjęcia: WAF z [6]) b) nr.620 – korwety ZOP (dozorowiec)

Grodzie wykonane były z blach o grubości 3-6 mm w zależności od ich położenia wewnątrz kadłuba. Kadłub był podzielony 35 grodziami na 7 przedziałów wodoszczelnych, z gwarancją niezatapialności jedno-przedziałowej.



Rys. 2. a) układ wiązań ramowych rufowej części kadłuba kutra torpedowego b) przedział siłowni z widocznym fundamentem pod turbinę i wzmocnienie burt i dna [6]

Rodzaj spawania w osłonie gazów obojętnych był dostosowany do typu połączenia (doczołowe czy pachwinowe). Doczołowe spoiny zewnętrzne (od strony wody) wykonywane były metodą TIG (ze względu na mikroporowatość spoin wykonywanych metodą MIG) pozostałe spoiny pachwinowe wewnątrz nadbudówki wykonano metodą MIG. Wiele trudności przyniosło opanowanie pęknięcia spoin pachwinowych szczególnie w pierwszej z serii kadłubów. Powodem było występowanie tzw. pęknięć zwłocznych (głównie w kraterach), które opanowano przez nawiercanie i wycinanie kraterów.

3. KONSTRUKCJA NADBUDÓWKI

Technologia spawania aluminiowych nadbudówek opisywanych okrętów różniła się w szczegółach, a była wynikiem wpływu prawie 20 lat w udoskonalaniu technik spawalniczych.

Nadbudówka kutra torpedowego wykonana z blach ze stopu 5086 (AlMg4Mn) o grubości 3 mm rozciągała się między 8 a 26 wręgiem patrząc od rufy. Blachy o wymiarach 8000x1500 mm przed przeróbką plastyczną (gięcie, cięcie i spawanie) podlegały prostowaniu. Średnio zużywano ok. 45 t blachy i kształtowników na jeden okręt, co obecnie może świadczyć o kosztowności budowy. Spawanie blach aluminiowych poprzedzone było zmechanizowanym ukosowaniem krawędzi a kształtowanie odbywało się na specjalnie do tego celu wykonanej w stoczni prasie hydraulicznej. Sekcje płaskie były spawane na zaprojektowanym i wykonanym w stoczni stanowisku z dociskami hydraulicznymi. Maksymalna siła docisku wynosiła 5 t/mb. Wszystkie spoiny podlegały kontroli radiologicznej, która nie lokalizowała podstawowej wady w spoinach jakim były tlenki, na których w czasie eksploatacji okrętu występowały pęknięcia zmęczeniowe. Wysoki współczynnik przewodności cieplnej aluminium i jego stopów był powodem deformacji spawanych elementów konstrukcji, które eliminowano przez docisk ale odrębnym problemem, trudnym do wyeliminowania, były deformacje względnie cienkiego poszycia kadłuba, których wartości naprężeń znacznie przekraczały dopuszczalne.

Dla jednostek pływających z dużymi prędkościami ponad 100 km/h, nierówności występujące na powierzchniach stykających się z wodą, w sposób zasadniczy wpływają na obniżenie parametrów eksploatacyjnych. W tym przypadku niemożliwe było przeniesienie metod prostowania stosowanych w stoczni na konstrukcjach stalowych (grzanie palnikami) ze względu na specyficzne własności stopów aluminium (duża przewodność i szybkość rozprzestrzeniania się ciepła). Dopiero wprowadzenie palnika gazowego z blokadą wodną i zastosowanie nagrzewania łukiem elektrycznym (bez roztopiania powierzchni) pozwoliło na opanowanie sytuacji, wprowadzało jednak do konstrukcji dodatkowe strefy o obniżonej wytrzymałości.

Ten sam problem pojawił się 20 lat później, gdy po feralnym wodowaniu w stoczni zastosowano niewłaściwą technologię prostowania konstrukcji korwety. Prostowanie konstrukcji stalowej kadłuba korwety było wykonane mało dokładnie czego dowodem jest brak możliwości wycentrowania linii wałów (drania całej konstrukcji przy określonych prędkościach), ale główny błąd popełniono przy prostowaniu aluminiowej konstrukcji nadbudówki. Niekontrolowana temperatura nagrzewania przekraczająca dopuszczalną (200-230°C) spowodowała zmianę struktury stopu na dużych powierzchniach arkuszy. Efektem tego była intensywna korozja warstwowa nawet w środku dużych powierzchni blach poszycia wewnątrz nadbudówki.

Wysokowytrzymały stop 7020 z którego wykonano tą nadbudówkę miał zapewnić poprzez 3-krotnie mniejszy ciężar w stosunku do stali, lepsze warunki statecznościowe (niższą wysokość metacentryczną), dobrą odporność na korozję i dobre właściwości mechaniczne porównywalne do właściwości stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości. Niedopracowana technologia spawania tego stopu aluminium a przede wszystkim technologia prostowania [2], spowodowała intensywną korozję i ubytki materiałowe a przez wzrost naprężeń prowadziła do pęknięć. W warunkach laboratoryjnych podano ten stop i jego modyfikację (7020M) badaniom odporności korozyjnej i porównano ze stopami serii 5xxx (Al-Mg) z których między innymi wykonano nadbudówkę i kadłub kutra torpedowego. Jednokadłubowa konstrukcja kadłuba typu ślizgowego kutra torpedowego wynikała z zakładanych prędkości pływania, przy ekstremalnym stanie morza 7-8 stopni i silie wiatru do 12 stopni w skali Beauforta.

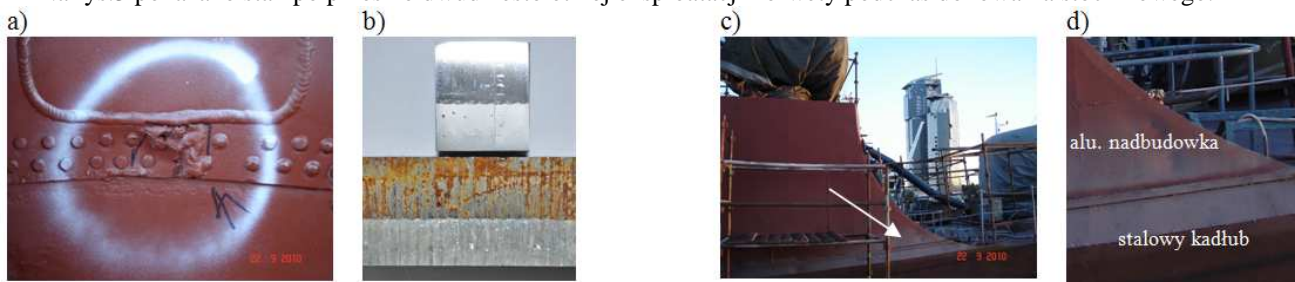
4. PROBLEMY EKSPLOATACYJNE

W trakcie eksploatacji kutra torpedowego projektu 666 stwierdzono następujące problemy spowodowane wadami i niedociągnięciami projektowo-wykonawczymi. Silniki przy prędkościach szczytowych generują bardzo wysoki poziom hałasu we wszystkich pomieszczeniach okrętu w przedziale 115-131 dB a więc znacznie przekraczającym wartości dopuszczalne. Deformacja poszycia kadłuba, szczególnie części dziobowej świadczy o bardzo wysokim poziomie przeciążeń, znacznie przekraczającym projektowe wartości dopuszczalne 9g. Brak właściwej amortyzacji posadowienia silników był przyczyną silnych drgań i wibracji kadłuba. Te efekty na krótkiej, sztywnej konstrukcji powoduje liczne pęknięcia i konieczność częstej kontroli konstrukcji kadłuba i nadbudówki oraz wprowadzają dyskomfort dla załogi. Zmniejszenie prędkości pływania (ograniczenie zdolności bojowej) przy stanie morza do 5 °B zostało wymuszone pęknięciami [7].

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

Obecna eksploatacja korwety to ciągła, doraźna lub stoczniowa regeneracja złączy spawanych aluminiowej konstrukcji nadbudówki. Wyraźna korozja elektrochemiczna na połączeniach nitowanych (rys.3a) między stalową zrzębnicą a aluminiową nadbudówką była powodem wymiany na dużym obwodzie nadbudówki połączenia nitowanego na połączenie wybuchowe rys.3b-c.

Na rys.3 pokazano stan po przeszło dwudziestoletniej eksploatacji korwety podczas dokowania stoczniowego.



Rys.3.a) Pęknięcia korozyjne w obszarze połączenia nitowanego b) połączenie wybuchowe c, d) nowe połączenie wybuchowe stalowej zrzębnicy kadłuba z aluminiową nadbudówką korwety [projekt badawczy NN 509 482438]

5. BEZPIECZEŃSTWO EKSPLOATACYJNE JAKO MONITORING PROCESÓW KOROZYJNYCH

Wykorzystując posiadaną wiedzę z zakresu korozji elektrochemicznej jesteśmy w stanie ograniczyć obecne straty korozyjne, bez dodatkowych inwestycji, nawet o 40%. Stosując wiedzę z zakresu elektrochemii możemy monitorować przebieg procesów korozyjnych i znacznie wcześniej reagować na przyspieszone zużycie likwidując przyczynę i późniejszą degradację materiału konstrukcyjnego lub przyspieszając stosowanie metod ochrony antykorozyjnej [8].

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 [9].

OSDK - Okrętowy System Diagnostowania Korozyjnego dotyczy gromadzenia, rejestrowania i sygnalizowania zagrożenia korozyjnego elementów konstrukcji. 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 inicjację procesów korozyjnych i stanu odkształcenia (naprężania) konstrukcji. Na rys.4 przedstawiono system rejestracji Est na wybranych obszarach nadbudówki okrętu pokazanego na rys.1B.

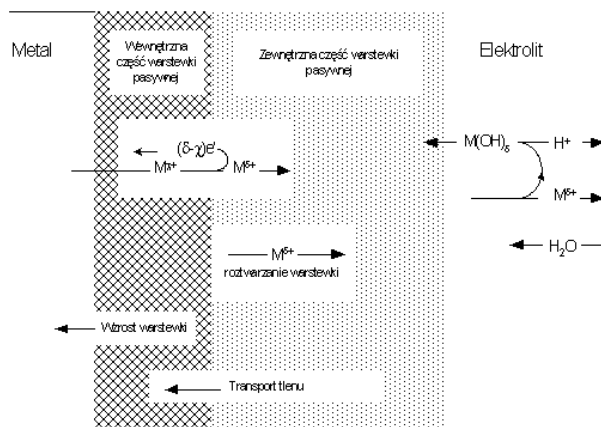


Rys.4.OSDK montowany na wybranych obszarach (pękających) aluminiowej (stop 7020) okrętowej nadbudówki okrętu projektu 620, którego 40-metrowa 3-pokładowa nadbudówka to badany obiekt zestawem pomiarowym w składzie: Data Logger (rejestrator napięcia z własną pamięcią i źródłem zasilania) seperatorem i mini celką elektrochemiczną z elektrolitem, która mocowana była na pęknięciu materiału rodzimego i złącza spawanego [Zgłoszenie Patentowe nr. P.394421 z 2011].

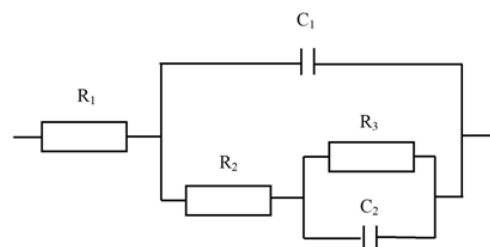
Ten system jest stworzony dla materiałów metalicznych, które w sposób naturalny (lub sztuczny) tworzą na swojej powierzchni szczelną, dobrze przylegającą do podłoża, pasywną warstewkę tlenkową. Dla stopów aluminium dwuwarstwową warstewkę tlenkową stanowi związek chemiczny amorficzny bemit i porowaty hydrargilit. Taka warstewkę 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 wartości E_{st} warunkowanego między innymi poziomem naprężenia. Ta izolacyjna dwuwarstwowa warstewka tlenkowa musi posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne i fizyczne.

Stan pasywny, ochronny (ozn. 0 nie zachodzą procesy korozyjne) zapewnia ciągłość i szczelność przylegania amorficznego bemitu do podłoża stopu. Izolacyjne właściwości tej kruchej warstwy uniemożliwiają przepływ prądu korozyjnego (stan 0) przy ustalonej wartości E_{st} zgodnie z schematem pokazanym na rys.5a. Właściwości tej warstwy pasywnej jak i porowatego hydrargilitu dającego informację o zagrożeniu korozją w warunkach laboratoryjnych wyznaczone są metodą EIS, opisują parametry elektrochemiczne warstewki tlenkowej wyznaczone w oparciu o schemat zastępczy przedstawiony na rys.5b.

a)



b)



Parametry elektrochemiczne pasywnej warstewki tlenkowej.

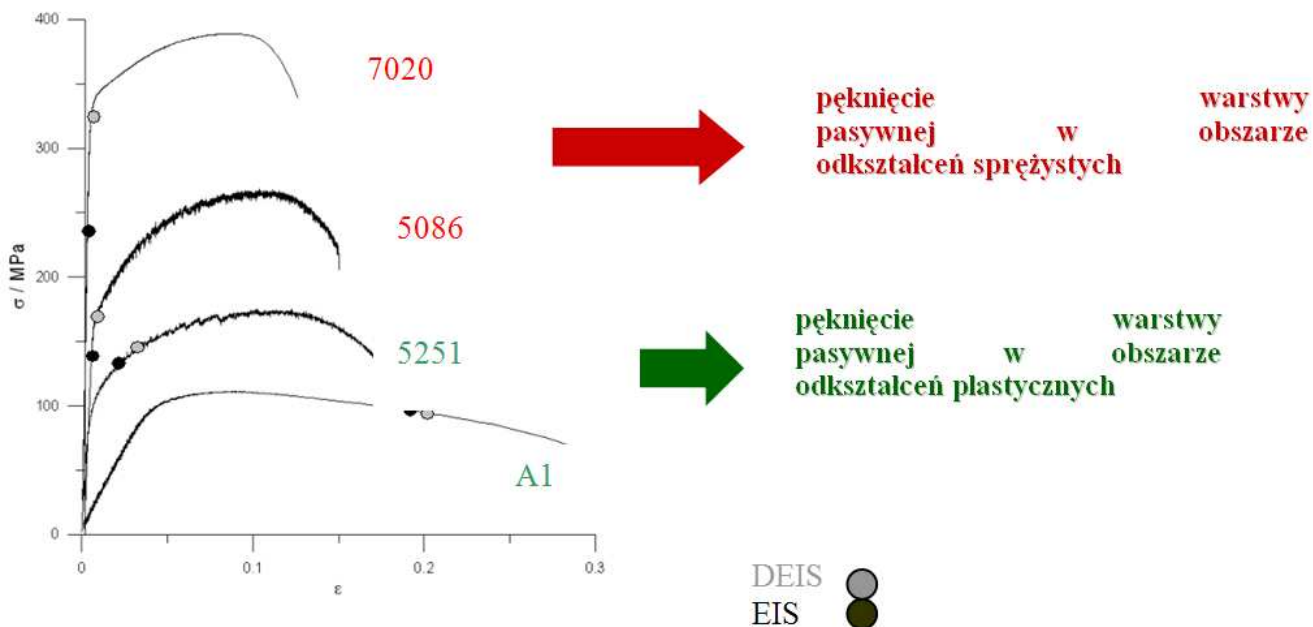
- R1 – rezystancja elektrolitu
- R2 – rezystancja warstwy pasywnej
- R3 – rezystancja przeniesienia ładunku
- C1 – pojemność warstwy pasywnej
- C2 – pojemność podwójnej warstwy pasywnej

Rys.5. Parametry elektrochemiczne pasywnej warstewki tlenkowej naturalnie lub sztucznie (polaryzacja w kwasie) wytworzonej na powierzchni stopu wyznaczonej metodą EIS lub DEIS: a) schemat ideowy przepływu prądu korozyjnego b) schemat zastępczy pasywnej warstwy tlenkowej

Nienaruszona (bez obciążenia) pasywna warstwa tlenkowa jako dielektryk izoluje podłoże stopu aluminium przed dostępem tlenu i przepływem prądu korozyjnego (przejściem kationu metalu Me^+ do elektrolitu - jakim jest woda lub atmosfera morska - anionu Cl^- do powierzchni metalu) i jego dalszym utlenianiem.

Na rys.6 pokazano wyniki badań elektrochemicznych podczas statycznego rozciągania okrętowych stopów aluminium. Wyznaczono poziom naprężeń przy których następuje pęknięcie warstwy tlenkowej i rozpoczyna się proces korozyjny.

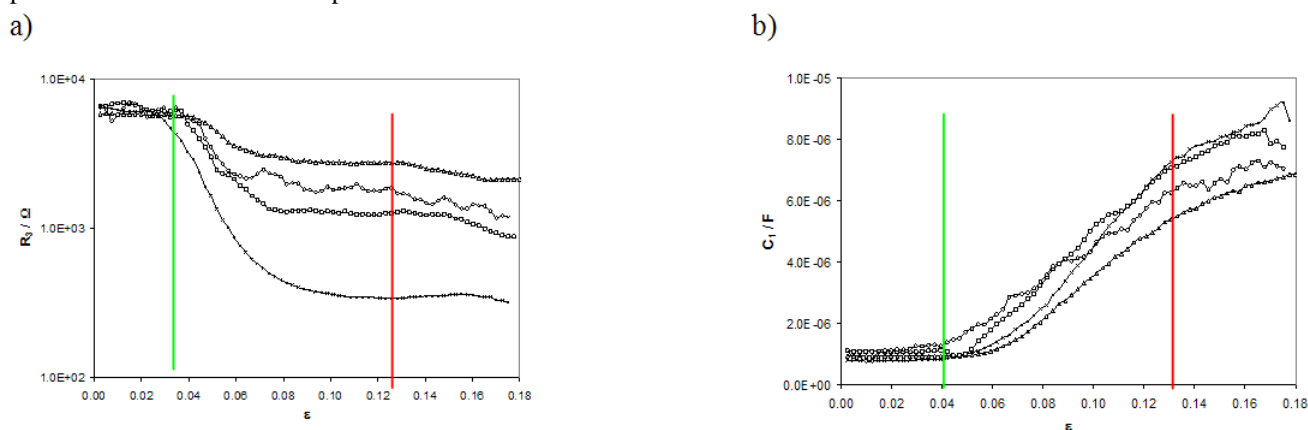
Jeżeli to pęknięcie odbywa się w zakresie sprężystym (zakresie eksploatacyjnym) to oznacza skrócenie „żywności” konstrukcji. Jak można zauważyć ten problem dotyczy stopów wysokowytrzymałych (7020) co oznacza, że rozpatrywany stop nadbudówki należy monitorować odkształcenia a dodatkowo chronić zestawami farb ochronnych.



Rys.6. Właściwości mechaniczne okrętowych stopów aluminium z uwzględnionym poziomem naprężeń pęknięcia ich warstwy tlenkowej określone metodą EIS i DEIS (metoda DEIS wyłącza KME i IM WCH, PG) odniesione do właściwości czystego aluminium [10,11]

Analiza wyników badań mechanicznych i elektrochemicznych pozwoliła na sformułowanie wniosku będącego podstawą działania OSDK, który informuje że: pęknięcie amorficznej warstwy tlenkowej (wewnętrznej - bemit) dla badanych stopów aluminium jest poprzedzone odkształceniem podłoża co skutkuje inicjacją procesów korozyjnych (stan 1) i radykalnym obniżeniem E_{st} do E_{kor} . Stan przejściowy (zagrożenia korozyjnego) między 0 -1 opisują parametry elektrochemiczne zewnętrznej warstwy tlenkowej (hydragrilite).

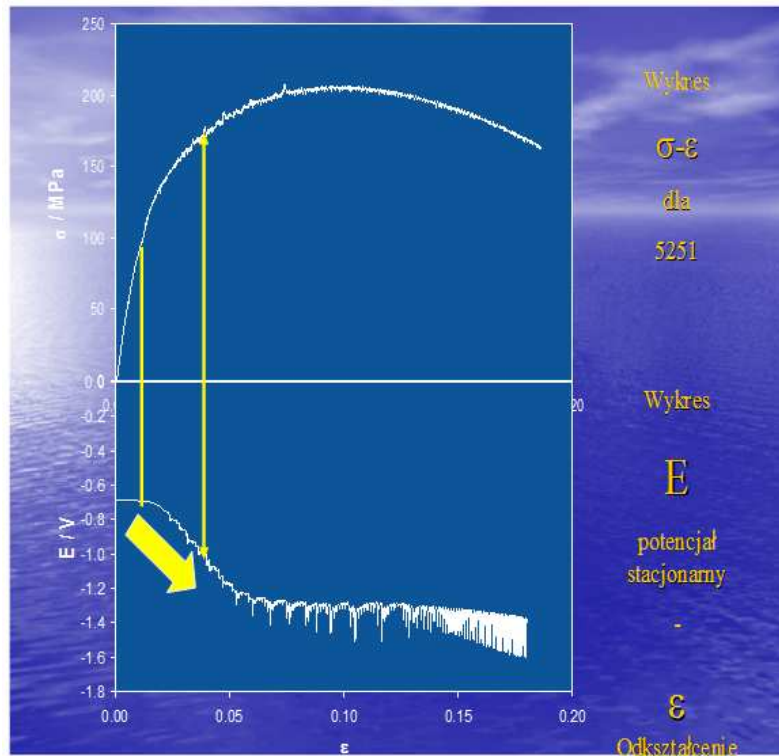
Monitorowanie stanu zagrożenia korozyjnym odbywa się poprzez rejestrację R_3 (rezystancją przeniesienia ładunku) i C_1 (pojemność elektryczną) warstwy zewnętrznej. Na rys.7 pokazano stan przejściowy w oparciu o parametry R_3 i C_1 . Spadek wartości R_3 i wzrost C_1 świadczy o stopniowym rozwarstwieniu (wzrost grubości) warstwy i „łatwiejszego” przejście ładunku (elektronu) do warstwy amorficznej. Stan korozji (ozn.1) zostaje zainicjowany gdy pęka amorficzna wewnętrzna spowodowana odkształceniem podłoża.



Rys.7. Monitorowanie stanu zagrożenia korozyjnego (między 0 zielony-1czerwony) stopu okrętowego stopu 5251[10]

Zakres prawidłowej eksploatacji konstrukcji znajduje się w zakresie odkształceń sprężystych lub max. do dolnej granicy plastyczności. Jak pokazano na rys.6 dla wysokowytrzymałego stopu 7020 ($AlZn4,5Mg1 - PA47$) i stopu 5086 ($AlMg5Mn - PA20$) występuje zagrożenie pęknięcia pasywnej, ochronnej warstwy podczas normalnej eksploatacji. Naprężenia rozciągające powoduje inicjację procesów korozyjnych i degradację właściwości wytrzymałościowych nośnych konstrukcji wykonanych z tych stopów przez ubytki korozyjne pierwotnych przekrojów nośnych.

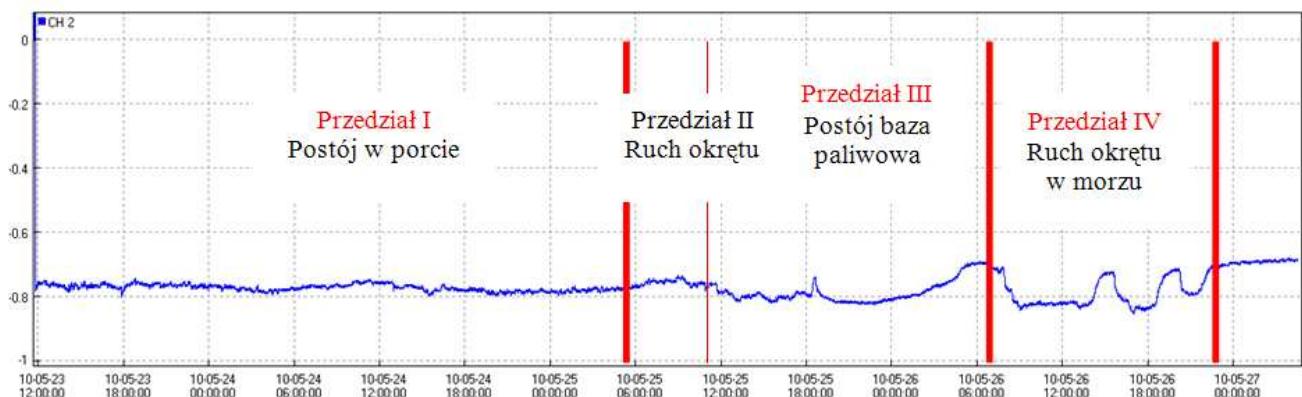
Pęknięcie warstewki tlenkowej stopu aluminium obniża mierzony „online” potencjał stacjonarny E_{st} rys.8, średnio o ok. -500mV do potencjału korozyjnego E_{kor} co świadczy o zainicjowaniu korozji i przekroczeniu odkształceń (naprężeń) dopuszczalnych.



Rys.8. Przebieg zmian E_{kor} w zależności od poziomu naprężenia rozciąganego stopu 5251 [11]

Ten stan zagrożenia korozyjnego zarejestrowany przez Data Logger (obniżenie $E_{st} = -0,7V$ do $E_{kor} = -1,4V$) uruchamia sprężoną z tym urządzeniem sygnalizację świetlną lub akustyczną informującą załogę o przekroczeniu odkształceń (naprężeń) w konstrukcji okrętu powodującym pęknięcie Al_2O_3 w wyniku bieżących warunków eksploatacji (stan morza, prędkość pływania, wykonywane manewry- zwroty, strzelania itp.). Po obniżeniu wartości E_{st} o 50% w kierunku elektroujemnym winna uruchomić się sygnalizacja, na którą informuje załogę o inicjacji procesów korozyjnych. Układ sygnalizacyjny składający się z naładowanego kondensatora po jednokrotnej sygnalizacji podtrzyma stan zagrożenia pomimo że nastąpi **repasywacja** (zjawisko odbudowy pasywnej warstewki tlenkowej) i powrót do wartości E_{st} .

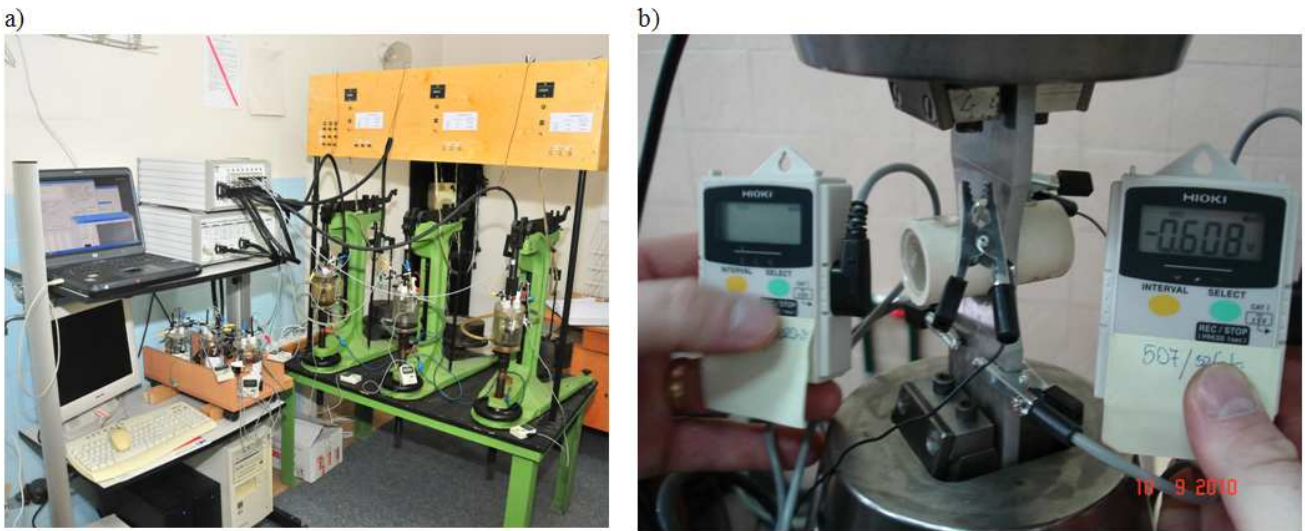
Na rys.9 pokazano przebieg rejestrowanego E_{st} na konstrukcji nadbudówki okrętu.



Rys.8. Przebieg rejestrowanego elektrochemicznego potencjału stacjonarnego mierzonego na obszarze 4LBPA (4 punkt lewej burty pokład artyleryjski) okrętu w warunkach: temp w nocy do 10°C w dzień 24°C przy 55-65%RH

W przedziale IV rys.9 można zauważyć dwukrotne, długotrwałe przekroczenie odkształceń dopuszczalnych poniżej E_{st} . Wartość E_{kor} jest odzwierciedleniem zagrożenia korozyjnego i wytrzymałościowego odniesionego do pozostałych parametrów mechanicznych i elektrochemicznych ujętych w monogramach eksploatacyjnych tab.3.

Dane „wyjściowe” do tych monogramów wyznaczono na zbudowanym, unikatowym stanowisku laboratoryjnym IPKM AMW przedstawionym na rys.10a



Rys.10. Laboratoryjne stanowiska do badań korozji elektrochemicznej metodą EIS:

- a) przy stałym naprężeniu rozciągającym KN i bez naprężenia KO,
- b) przy wolno narastającym naprężeniu rozciągającym na MTS (Materials Test Systems) z pomiarem potencjału DataLogger

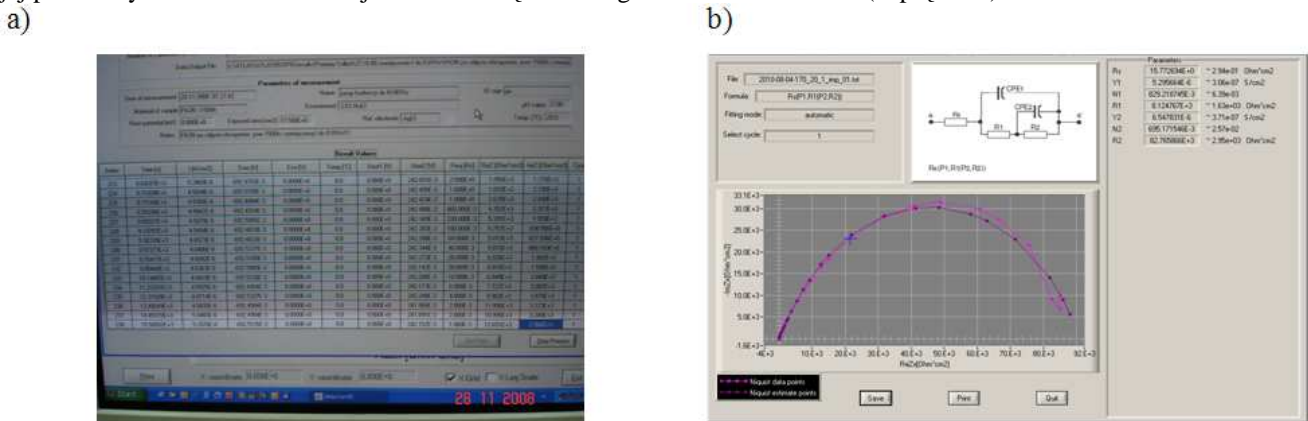
Uniwersalność tej metody polega na wyznaczeniu tych parametrów dla dowolnego, wodnego czynnika korozyjnego pod warunkiem że jest on elektrolitem.

Tab. 3 Nomogramy zagrożenia korozyjnego dla inżynierskiego wykorzystania przy eksploatacji konstrukcji

Rodzaj elektrolitu	Alarm gdy $E = 1,5E_{st}$	E_{st} [mV]	E_{kor} [mV]	ϵ [-]	σ MPa	Parametry elektrochemiczne pasywnej warstewki tlenkowej (parametry schematu zastępczego)				
						R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	C_1 [F]	C_2 [F]
Woda morska					⇒					
Parametry mierzone online na okręcie						Parametry wyznaczone w warunkach laboratoryjnych odniesione do E_{st}				

W tab.3 przedstawiono parametry elektrochemiczne pasywnej warstewki tlenkowej (skuteczność ochronna), które zostały odniesione do odkształcenia (ϵ) i potencjału stacjonarnego wyznaczone w metodzie EIS dla naprężenia rozciągającego (stałego lub wolno narastającego). Przyjęto, że sygnalizacja (alarm) będzie rozpoczynała swoje działanie gdy potencjał mierzony będzie bardziej elektroujemny od stacjonarnego o 50% a więc w przedziale zagrożenia korozyjnego ale przed pęknięciem warstwy amorficznej (ochronnej). Te opracowane w warunkach laboratoryjnych monogramy dla wszystkich okrętowych stopów aluminium dają możliwość oszacowania naprężenia i zagrożenia korozyjnego w obszarze nadbudówki po dokonaniu pomiaru E_{st} .

Na rys.11a pokazano przykładowo rejestrowane parametry warstwy tlenkowej wyznaczone metodą EIS w warunkach laboratoryjnych, które można otrzymać podczas statycznego rozciągania lub bez obciążenia. Na podstawie tych parametrów, stosując odpowiednie oprogramowanie (LabView) wyznaczamy wykres Niquista. Wartość składowej impedancji rzeczywistej tego wykresu (rys.11b) świadczy o skuteczności ochronnej warstwy pasywnej a odpowiadającej jej parametry warstewki tlenkowej odniesione są do danego stanu odkształcenia (naprężenia)

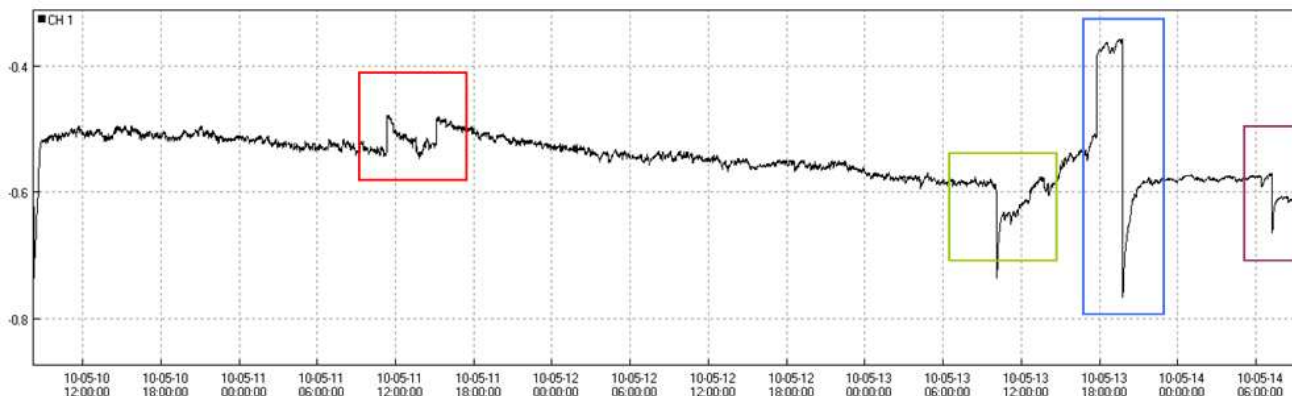


Rys.11. Przykładowe widmo impedancyjne -b) wyznaczone z rejestrowanych parametrów przez EIS dla stopu 7020 [badania własne grant własny]

Dopasowanie schematu zastępczego dla warstwy pasywnej dobieramy w programie LabView umożliwiającym tworzenie monogramów eksploatacyjnych.

Działania załogi po włączeniu „alarmu korozyjnego” muszą być wielowariantowe, określone bieżącą sytuacją eksploatacyjną prędkości pływania odniesioną do stanu morza i realizowanych działań bojowych.

Na rys.12 i 13 przedstawiono wyniki działań tego systemu przeprowadzone na okręcie podczas postoju w porcie i eksploatacji w morzu. Analizę zarejestrowanego pojedynczego potencjału stacjonarnego E_{st} pokazano na rys.12 z zaznaczonymi obszarami radykalnej fluktuacji potencjału spowodowane warunkami eksploatacji co odniesiono do parametrów eksploatacji zamieszczonych w dokumentacji (tab.4). Szczegółowe rozpatrywanie tych obszarów można przeprowadzić z dokładnością do 2 sekund (częstotliwość próbkowania DL) pod warunkiem dokładnego zsynchronizowania zegara DataLoggera z czasem okrętowym.



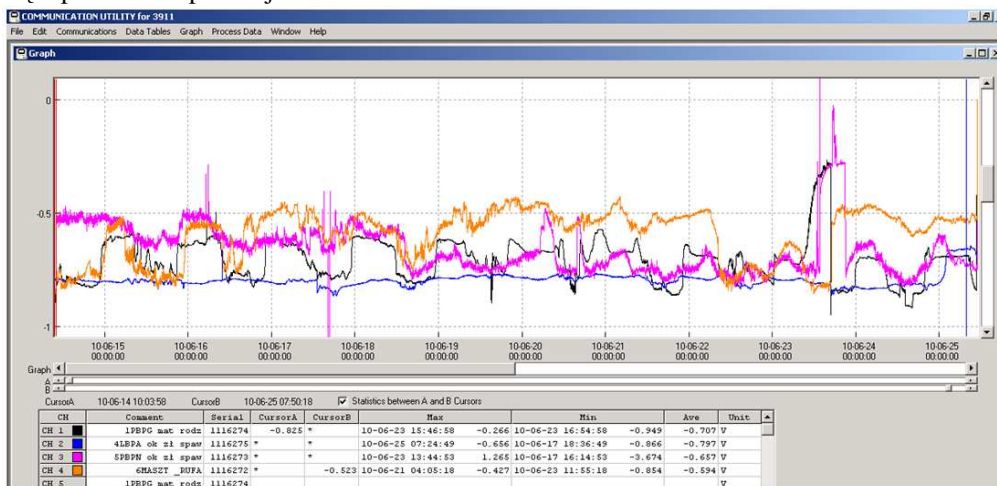
Rys.12. Wykres rejestrowanego elektrochemicznego potencjału stacjonarnego mierzonego na obszarze 1PBPG (materiał rodzimy) przez 120h pobytu okrętu w morzu, $E_{sr}=-0,560V$ (obróbka statystyczna max.-0,390 V min. -0, 780V).

Analiza okrętowej dokumentacji eksploatacyjnej skorelowana z przebiegiem zarejestrowanego E_{st} daje możliwość selekcji tych działań prowadzonych na okręcie, które powodują zagrożenie korozyjne (R_3 obniża wartość a C_1 rośnie – rys.7) lub atak korozyjny spowodowany pęknięciem warstwy ochronnej będących wynikiem przekroczenia dopuszczalnych odkształceń konstrukcji.

Tab.4. Zestawienie wybranych działań prowadzonych na okręcie podczas 4 dni

Obszar zadziałania alarmu	Parametry eksploatacyjne jednostki pływającej			Przedział czasowy	Dokładny czas pęknięcia warstwy
	Dziennik nawigacyjny	Dziennik zdarzeń	Dziennik maszynowy		
15a				12.05 w godz. 11 ⁰⁰ -16 ⁰⁰	
15b				13.05 w godz. 08 ⁰⁰ -13 ⁰⁰	
15c				13.05 w godz. 16 ⁰⁰ -20 ⁰⁰	
15d				14.05 w godz. 6 ⁰⁰ -8 ⁰⁰	

Na rys.13 przedstawiono przykładowy zapisu E_{st} prowadzony na 4 wybranych obszarach badanej aluminiowej nadbudówki okrętu podczas eksploatacji w morzu.



Rys.13. Wykresy rejestrowanego elektrochemicznego potencjału stacjonarnego mierzonego na obszarach 1-3 PBP (G, A, S) i 4LBPA aluminiowej nadbudówki okrętu podczas 12 dni pobytu okrętu w morzu

Odrębne zagadnienie stanowi odporność korozyjna połączeń (rozłącznych i nierozłącznych) materiałów w konstrukcjach okrętowych. Bardziej podatne do korozji elektrochemicznej są połączenia spawane (spajane) niż ich materiał rodzimy. Oddziaływanie temperatury (przy spawaniu), skupionej wiązki elektronów (spawanie elektronowe) czy tarcia (zgrzewania tarciove Friction Stir Welding – FSW) powodują powstawanie obszaru o innej strukturze i składzie chemicznym niż łączone materiały. Konsekwencją tego jest powstawanie obszarów o obniżonej odporności korozyjnej spowodowane powstaniem niejednorodności potencjałowej. W połączeniach spajanych kategorycznie przestrzega się zasady by obszar spoiwa posiadał wyższy potencjał elektrochemiczny niż spawane materiały.

Zbudowanie obiektu technicznego przez zastosowanie połączeń rozłącznych (np. nitowych, śrubowych) prawidłowego pod względem korozyjnym wymaga by materiał łącznika (nit, śruba) miał wyższy potencjał elektrochemiczny od łączonych materiałów.

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 materiały, które dla okrętownictwa muszą spełniać wiele wymagań ale najważniejsze to dobre właściwości mechaniczne w tym zmęczeniu i odporność na korozję w środowisku morskim. Nie zawsze spełniają się założenia konstruktorów okrętowych przyjmujących nowe wyzwania konstrukcyjne i materiałowe, dlatego zawsze prototyp nowej jednostki pływającej to obiekt doświadczalny, a takim jest korweta a jej eksploatacja to baza danych do skorygowania produkcji seryjnej.

Diagnostyka korozyjna zapewnia monitoring eksploatacji każdej konstrukcji, która „pracuje” w warunkach morskich, dlatego jest elementem podnoszącym bezpieczeństwo. Zaprezentowana metoda monitoringu korozyjnego pozwala mierząc potencjał korozyjny określić stan wytężenia (odkształcenia) konstrukcji w danym obszarze.

Cześć wyników badań pokazanych w tym artykule jest rezultatem badań prowadzonych w ramach projektu własnego o nr. NN 509 482438.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bujniewicz Z., Cudny K., Wińcza M., Mańkowski S.: Konstrukcje okrętowe ze stopów aluminium. Wydawnictwo Morskie, 1976
- [2] *Ekspertyza pęknięć korozyjnych na ORP. „Kaszub”*. Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich Kraków, 1989 r
- [3] EN 1999-1-1: Eurocode 9-Design of aluminium structures : Part 1-1: General structural rules, Part 1-2: General rules - Structural fire design, Part 1-3: Structures susceptible to fatigue, Part 1-4: Cold-formed structural sheeting, Part 1-5: Shell structures.
- [4] Gwóźdź M :Wymiarowanie konstrukcji spawanych wykonanych z umocnionych zgniotowo stopów aluminium. Przegląd spawalniczy 2010
- [5] Mazzolani F. M.: Aluminium Alloy Structures (second edition), E&FN SPON, an imprint of Chapman & Hall, London 1994.
- [6] Wińcza M.: Polskie kutry torpedowe z kadłubami ze stopów aluminium. Przegląd spawalniczy 2010
- [7] Makowski T., Rosochowicz R.: Polskie kutry torpedowe - jednostki seryjne. *Morze, statki i okręty*, 2/56, 2006.
- [8] Szczygieł B.: "Korozja i jej wpływ na środowisko" wykład szkoła chemii.2008
- [9] 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
- [10] K. Darowicki, J.Orlikowski, A.Arutunow, W. Jurczak.: *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
- [11] K. Darowicki, J.Orlikowski, A.Arutunow, W. Jurczak.: *The effect of tensile stresses on aluminum passive layer durability*. Electrochimica Acta, 2007