

Wojciech JURCZAK<sup>1</sup>

### **WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I ODPORNOŚĆ KOROZYJNA MATERIAŁÓW AMAGNETYCZNYCH STOSOWANYCH NA SPECJALNE JEDNOSTKI PŁYWAJĄCE**

*W artykule przedstawiono właściwości mechaniczne i przebieg procesów korozyjnych wybranych materiałów inżynierskich stosowanych na elementy konstrukcyjne specjalnych jednostek pływających (jednostki szybkie i trałowce). W tego typu jednostkach pływających na szeroką skalę stosuje się stale austenityczne i stopy aluminium. Korozja tych materiałów, spowodowana jednoczesnym oddziaływaniem wody i naprężeń eksploatacyjnych, jest jedną z głównych przyczyn obniżenia właściwości wytrzymałościowych konstrukcji okrętowych. Charakter i przebieg niszczenia korozyjnego zależy w głównej mierze od składu chemicznego badanego materiału [1,2]. Odporność korozyjną ww. materiałów określono przez połączenie standardowych metod badawczych i analizę parametrów elektrochemicznych warstewki tlenkowej (pasywnej), która w sposób naturalny tworzy się na badanych materiałach. Stal 304 wykazuje znacznie lepszą odporność na korozję od stopu 5086 przy obciążeniu  $\sigma=0,8R_{e(0,2)}$ . Korozyjną degradację właściwości eksploatacyjnych stopu 5086 powoduje korozja warstwowa, natomiast stali 304 korozja wżerowa z późniejszą korozją międzykrystaliczną.*

### **MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF AMAGNETIC MATERIALS FOR SPECIAL SHIP CONSTRUCTIONS**

*The paper presents mechanical properties and corrosion resistance of selected engineering materials for structural elements of special ships (fast boat and minesweeper). These kind of ships are made of austenitic steels and aluminum alloys. Corrosion of these materials due to simultaneous impact of sea water and exploitation stress is one of the reasons of deterioration of their mechanical properties. The character and the progress of the corrosion degradation depends mainly on chemical composition of the investigated material [1,2]. Corrosion resistance of the aforementioned materials was determined by combination of standard investigation method and analysis of electrochemical parameters of oxide layer (passive layer), which forms naturally on the these materials. 304 steel exhibits much better corrosion resistance than alloy AlMg5 at the load ( $\sigma=0,8R_{e(0,2)}$ ).*

*AlMg5 alloys undergoes exfoliations type of corrosion damage whereas 304 steel suffers from pitting attack, which later transforms into intergranular corrosion.*

---

<sup>1</sup>Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, 81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69  
Tel. +48 58 626-26-16, fax +48 58 626-26-35

## 1. WSTĘP

W przypadku stopów aluminium i stali austenitycznej jednym z głównych cech tych materiałów jest dobra odporność na korozję [3]. Jednak i inne właściwości materiałów jak wysoki współczynnik wytrzymałości względnej  $R_{0,2}/\rho$ , niski współczynnik przenikalności magnetycznej, brak podatności do kruchego pęknięcia w obniżonych temperaturach a także spawalność daje tym materiałom duże możliwości zastosowania na jednostkach pływających także o przeznaczeniu militarnym [4].

Eksploatacja metalicznych okrętowych konstrukcji w środowisku wody i atmosfery morskiej to przede wszystkim występowanie korozji naprężeniowej o charakterze elektrochemicznym. Każdy z tych materiałów inżynierskich w zetknięciu z tlenem ulega pasywacji (utlenianiu), przy czym skład chemiczny materiału warunkuje przebieg tego procesu.

Badane materiały łączą zbliżony charakter naturalnego zabezpieczenia powierzchni przed dalszym utlenianiem wskutek wytworzenia warstewki tlenkowej [5,6]. Warstewki tlenkowe badanych materiałów wykazują dużą adhezję do materiału rodzimego a ich szczelność zabezpiecza przed dostępem tlenu i dalszym rozwojem procesów korozyjnych. Proces zniszczenia ochronnych warstewek pasywnych występujących na podstawowych materiałach konstrukcyjnych, takich jak stale wysokostopowe (austenityczne) czy stopy aluminium ma zdecydowanie inny charakter niż pozostałych stali konstrukcyjnych. Zniszczenie warstewki ochronnej w wyniku obciążenia (naprężenia) eksploatacyjnego umożliwia stały kontakt agresywnego środowiska korozyjnego z podłożem eksponowanego metalu. Przyczyny zniszczenia warstewek pasywnych są zarówno mechaniczne i elektrochemiczne, jednak oba te procesy, które występują jednocześnie są trudne do diagnozowania czy monitorowania. Podjęto próbę monitorowania korozji stali austenitycznej 0H18N9 (304) i stopu AlMg5Mn (5086) wykorzystując klasyczne metody elektrochemiczne w postaci elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (EIS).

## 2. METODYKA BADAŃ I ZASTOSOWYWANE MATERIAŁY

Do badań odporności korozyjno-naprężeniowej (KN), konstrukcyjnych materiałów metalicznych można wykorzystać kilka metod badawczych opisanych odpowiednimi normami i przepisami (metoda grawimetryczna, wyznaczanie: prędkości korozji, stopnia obniżenia właściwości mechanicznych itp.) [7]. Klasyczne metody badania KN obejmują pomiary elektrochemiczne w połączeniu z badaniami mechanicznymi oraz badania makroskopowe. Bardzo powszechną jest metoda SSRT (Slow Strain Rate Test) obejmująca pomiary siły rozciągającej oraz stopnia wydłużenia w warunkach oddziaływania środowiska elektrolitycznego [8,9]. Pomiary elektrochemiczne wykorzystywane są zarówno do oceny zagrożenia procesu pęknięcia warstw pasywnych ale również do przyspieszania tego procesu. Najprostszą metodą jest wykonywanie pomiarów w warunkach potencjostatycznych. Cha-

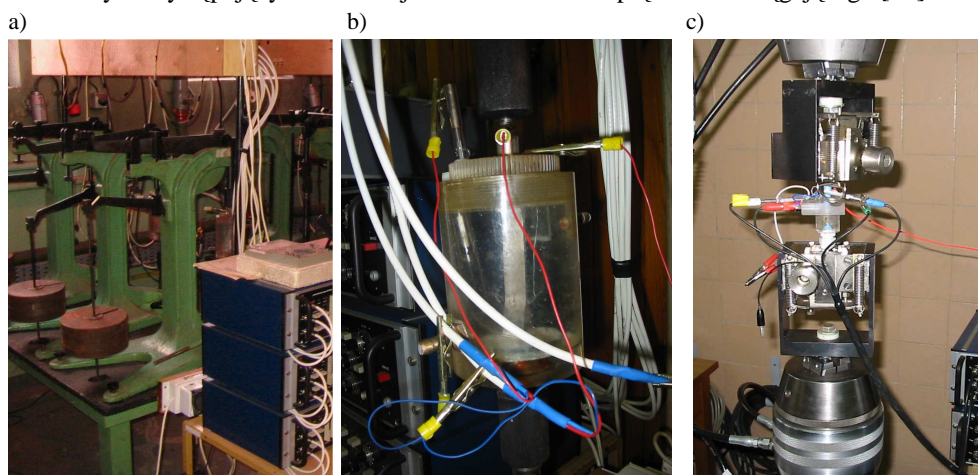
rakter zmian wartości prądu określa stan i stopień ochronny przez warstewkę ochronną i poziom naprężeń przy którym warstewka ta traci swoją ciągłość. Tym samym wyznaczamy udział naprężeń „ochronnych” gdy istnieje warstewka ochronna, naprężenia przy których ulega ona pęknięciu i naprężenia które rzeczywiście w praktyce powodują intensyfikację procesu korozyjnego.

Najczęściej wykorzystywaną techniką pomiarową i najbardziej wiarygodną jest określenie stopnia obniżenia właściwości mechanicznych (wyznaczenie  $K_{A_5}$  i  $K_{R_m}$ ) badanych materiałów konstrukcyjnych pod wpływem złożonego, jednoczesnego korozyjnego oddziaływania wody morskiej i naprężenia rozciągającego wg. PN/EN ISO 7539:2000.

$$(1.1) \quad K_{R_m} = \frac{R_m - R_{mt}}{R_m} \times 100[\%] \quad (1.2) \quad K_{A_5} = \frac{A_5 - A_{5t}}{A_5} \times 100[\%]$$

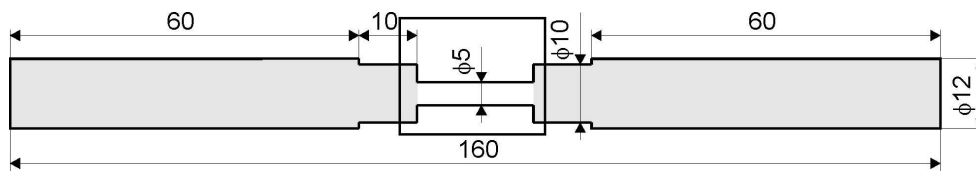
$K_{R_m}$  - współczynnik procentowego obniżenia właściwości wytrzymałościowych w wyniku działania korozyjnego oddziaływania wody morskiej i naprężenia rozciągającego,  $K_{A_5}$  - współczynnik procentowego obniżenia właściwości plastycznych w wyniku działania korozyjnego oddziaływania wody morskiej i naprężenia rozciągającego,  $R_m$  - wytrzymałość doraźna próbek badanego materiału nie poddanych ekspozycji KN,  $R_{mt}$  - wytrzymałość doraźna próbek badanego materiału poddanych ekspozycji KN przy  $\sigma=0,8R_{0,2}$  w czasie  $t=1500h$ ,  $A_5$  - wydłużenie względne próbek badanego materiału nie poddanych ekspozycji KN,  $A_{5t}$  - wydłużenie względne próbek badanego materiału poddanych ekspozycji KN przy  $\sigma=0,8R_{0,2}$  w czasie  $t=1500h$ .

Oprócz ww. opisanej klasycznej metody pomiarowej w badaniach wykorzystano metody elektrochemiczne (rys.1) stałoprądowe, zapewniając w ten sposób głębsze poznanie procesów towarzyszących KN, przez wyznaczenie parametrów elektrochemicznych i mechanicznych występujących w każdej chwili działania naprężenia rozciągającego [10].



Rys.1. Ogólny wygląd stanowiska do badań KN: a) naprężarki z potencjostatami, b), badana próbka w celce elektrochemicznej na naprężarce, c) i w szczękach MTS

Próbki wycięto z arkusza blachy o grubości 12 mm, a kształt i wymiar pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Kształt i wymiary próbek do badań odporności korozyjnej. Obszar nie podlegający korozyjnemu oddziaływaniu oznaczono odcieniem szarości.

Materiały poddane badaniom to stop 5086 i stal 304, których składy chemiczne podano odpowiednio w tab. 1 i 2.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu AlMg5Mn (5086)

Nr. stop	Skład chemiczny 5086 wg atestu 68/1863 wytop177								
	Składniki stopowe %				Zawartość zanieczyszczeń %				
	Mn	Mg	Cr	Ti	Fe	Si	Cu	Zn	Al
5086	0,31	5,17	0,18	0,01	0,28	0,1	-	0,07	reszta

Tab. 2. Skład chemiczny stali austenitycznej 0H18N9 (304)

Gatunek wg EN	Gatunek wg AISI	Gatunek wg PN	Przeciętny skład chemiczny, [%]						
			C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
1.4301	304	0H18N9	0,04	18,3	8,7	1,2	0,45	0,045	0,03

Technologia wytwarzania badanych materiałów ma istotne znaczenie na odporność korozyjną. To parametry końcowej obróbki cieplno-mechanicznej jak walcowanie na gorącą i rekrytalizacja oprócz składu chemicznego decydują o podatności do korozji w wodzie morskiej.

### 3. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

#### Właściwości mechaniczne przed ekspozycją KN

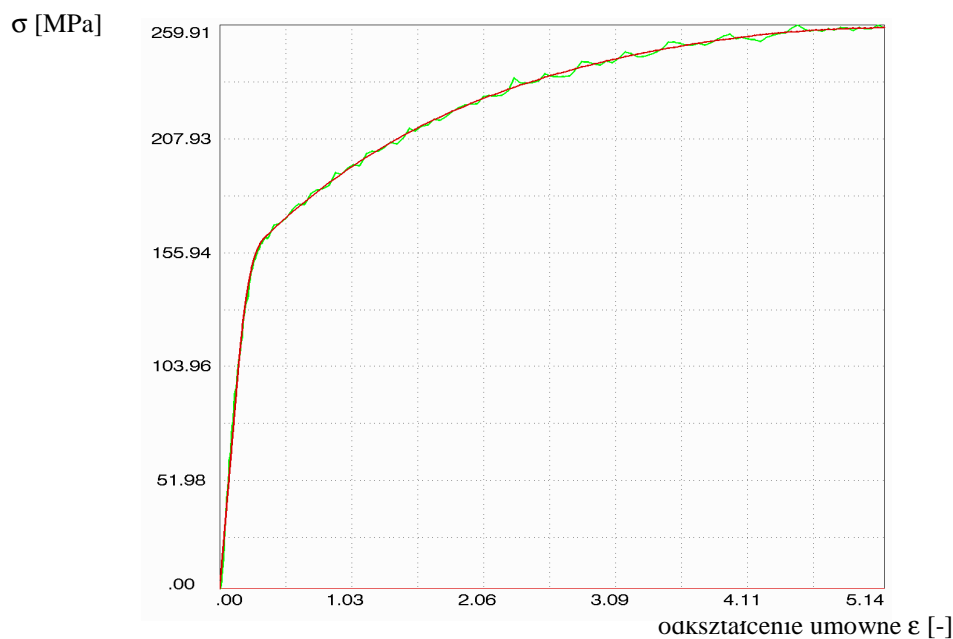
Składową tensora naprężeń do badania korozji naprężeniowej wyznaczono w próbie osiowego rozciągania wg. EN 485-2 (EN10002-1+AC1). Poddając rozciąganiu po trzy próbki badanych materiałów wyznaczono wykresy  $\sigma$ - $\epsilon$ . Wartość średnią z wykonanych prób przedstawiono na rys.3b za pomocą krzywej zaznaczonej linią zieloną. Krzywą tą aproksymowano za pomocą funkcji sklepanych w trzech przedziałach wielomianami odpowiedniego stopnia

$$\sigma(\varepsilon) = 10^3 (a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon^3 + a_4 \varepsilon^4) \text{ [kPa]}.$$

Tab.3. Zakresy przedziałów i współczynniki wielomianów.

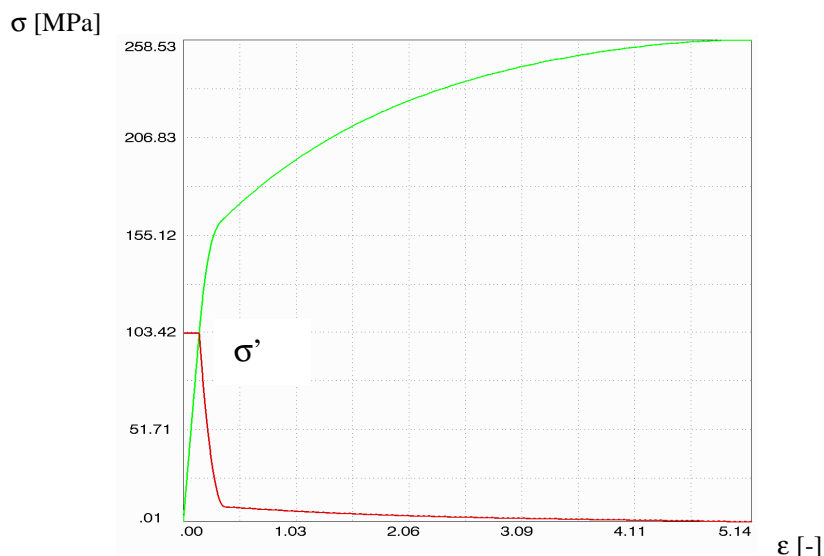
	$0 \leq \varepsilon \leq 1.440 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-3} \leq \varepsilon \leq 3.703 \times 10^{-3}$	$3.703 \times 10^{-3} \leq \varepsilon \leq 5.142 \times 10^{-2}$
$a_0$	0	$-0.7009 \cdot 10^2$	$0.1401 \cdot 10^3$
$a_1$	$0.7008 \cdot 10^5$	$0.1761 \cdot 10^6$	$0.6836 \cdot 10^4$
$a_2$	0	$-0.4559 \cdot 10^8$	$-0.1719 \cdot 10^6$
$a_3$	0	$0.4065 \cdot 10^{10}$	$-0.2412 \cdot 10^7$
$a_4$	0	0	$0.1523 \cdot 10^8$

Na podstawie pochodnej funkcji aproksymującej uzyskano moduł sprężystości podłużnej  $E = 0.7009 \times 10^5$  [MPa] dla części sprężystej charakterystyki, granicę sprężystości  $\sigma_r = 101.07$  [MPa] oraz wartość modułu wzmocnienia w nieliniowej części charakterystyki materiału. Zmienność funkcji aproksymującej zaznaczono na rys.3b.



Rys.3. Aproksymowany wykres naprężenie- odkształcenie umowne dla stopu 5086

Naprężenie w rozciąganej próbce obliczono ze wzoru:  $\sigma = F/S_0$  [N/mm<sup>2</sup>], natomiast odkształcenie umowne wyznaczono jako odkształcenia ekstensometru do jego bazy lub wg. wzoru  $\varepsilon = \Delta L/L_0$ .



Rys.4. Pochodna funkcji aproksymującej krzywej rozciągania stopu 5086 dla granicy sprężystości  $\sigma_r = 101.07[\text{MPa}]$

Podobne badania wykonano dla stali 304 a wyniki przedstawiono w tabeli 4.

W próbie rozciągania rozpatrywano model jednoosiowego naprężenia i odkształcenia pomimo tego iż po przekroczeniu granicy wytrzymałości, któremu towarzyszy powstanie przewężenia powstaje przestrzenny stan naprężenia i odkształcenia [11]. Zostało to podsygnalizowane faktem, że warstewki tlenkowe badanych materiałów ulegają pękaniu przed powstaniem przewężenia.

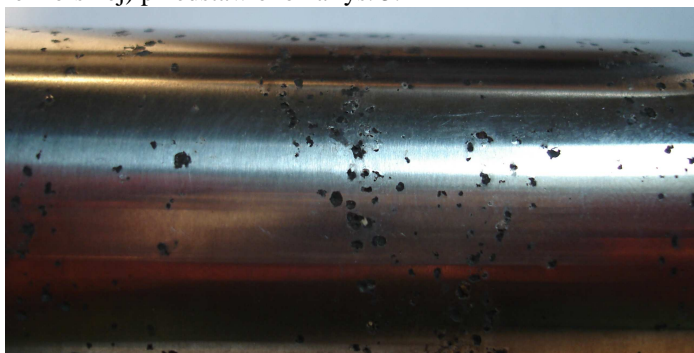
#### 4. ODPORNOŚĆ NA KN WYZNACZONA STANDARDOWĄ METODĄ

Wszystkie badane próbki stali 0H18N9 i stopu AlMg5 nie uległy zniszczeniu pod wpływem jednoczesnego oddziaływania naprężenia rozciągającego równego  $\sigma=0,8R_{0,2}$  i sztucznej wody morskiej w planowanym czasie badania (1500h). Po tym czasie próbki zostały oczyszczonej i poddane zrywaniu celem wyznaczenia właściwości mechanicznych po ekspozycji KN. Wyniki tych badań zestawiono w tabeli 4.

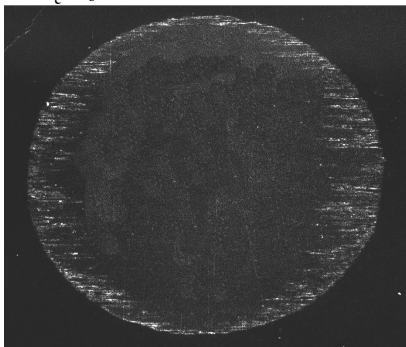
Tab.4. Odporność na KN przy  $\sigma=0,8R_{0,2}$  stali 0H18N9 i stopu 5086 w 3,5%NaCl w  $t=1500h$

Badany materiał konstrukcyjny	Własności mechaniczne przed ekspozycją korozyjno-naprężeniową		Własności mechaniczne po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej		Średnie procentowe zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie	Średnie procentowe zmniejszenie wydłużenia plastycznego
	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]		
<b>0H18N9</b>	568	25	514	18	<b>9,5</b>	<b>28</b>
<b>5086</b>	242	19	218	13	<b>11,6</b>	<b>31,6</b>

Stan próbek po ekspozycji KN po 1500 h w roztworze wodnym 3,5% NaCl (sztucznej wodzie morskiej) przedstawiono na rys. 5.



a) Powiększony fragment powierzchni badanej próbki stali 304 po ekspozycji KN. Korozja wżerowa, pojedyncze wżery. Powiększenie 10x



b) Wybrany przekrój poprzeczny próbki ze stopu 5086 po ekspozycji KN. Powiększenie 10x

Rys.5. Próbki badanych materiałów inżynierskich po ekspozycji KN przy  $\sigma=0,8Re_{(0,2)}$  w czasie 1500 h w roztworze wodnym 3,5% NaCl (sztucznej wodzie morskiej) dla:

a) dla stali 0H18N9 b) 5086

Ocenę podatności do KN stopu 5086 dokonano w oparciu o PN-EN ISO 11306 natomiast stali austenitycznej stosując dodatkowo ISO11463.

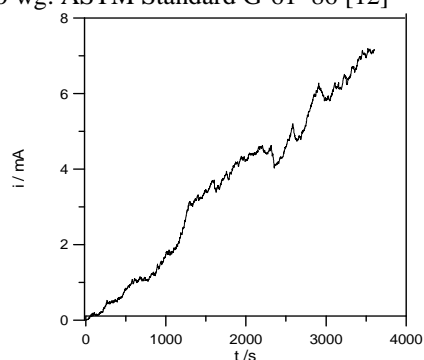
## 5. BADANIA ELEKTROCHEMICZNE

### Stali 0H18N9

Badania KN metodami znormalizowanymi wykazały także, że badana stal austenityczna wykazuje inny charakter niszczenia korozyjnego niż stop aluminium (rys. 5). Dlatego korozję wżerową stali 0H18N9 opisano w oparciu krzywą polaryzacji cyklicznej pokazanej na rys. 6. Polega ona na dynamicznej polaryzacji próbki w kierunku anodowym i zmianie potencjału w kierunku polaryzacji potencjałów katodowych po przekroczeniu założonej wielkości prądu płynącego w układzie. Umożliwia to przyspieszenie procesów korozyjnych i ocenę podatności na korozję lokalną. W przypadku wzrostu prądu może on być związany ze zniszczeniem warstewki pasywnej lub z wydzieleniem tlenu na elektrodzie

badanej. O tym czy stal stopowa jest odporna, czy też podatna na korozję wżerową będzie decydował kształt krzywej powrotnej (w kierunku potencjałów katodowych).

Badania przeprowadzono przy polaryzacji potencjostatycznej wynoszącej 0,5V w stosunku do Ust ( wywołującą korozję) w czasie 1h a charakter zmian prądu w czasie pozwala określić podatność do korozji wżerowej bądź wykazania stanu pasywnego przy niższych potencjałach anodowych (rys. 6). Ocenę podatności na korozji wżerowej, szczelinowej stali austenitycznych dokonano wg. ASTM Standard G-61-86 [12]

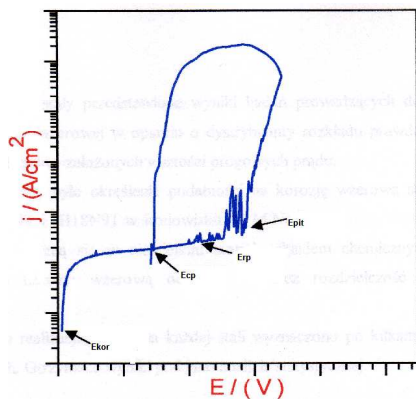


Rys.6. Charakterystyka  $i = f(t)$  dla próbki polaryzowanej przy potencjale 0,5 V do Ust

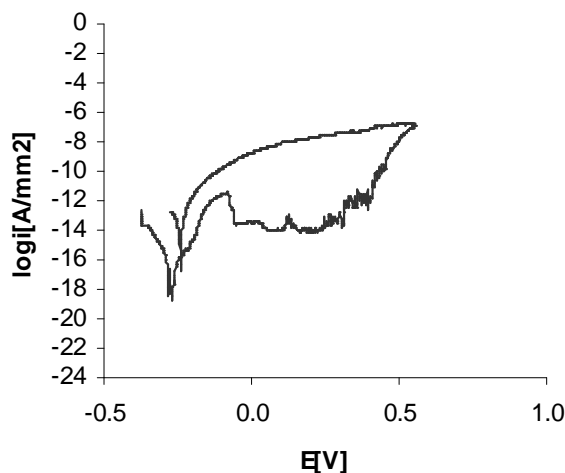
Po odpowiednim przygotowaniu badane próbki umieszczono w 0,1M chlorku sodu (NaCl). Elektrode pomocniczą stanowiła chlorosrebrna (Ag/AgCl), natomiast elektrodę odniesienia – elektroda kalomelowa. Wyniki badań przedstawiono na rys. 7b.



a)



1.  $E_{kor}$ - potencjał korozyjny badanej stali, 2.  $E_{cp}$ - potencjał ochronny lub krytyczny korozji wżerowej, poniżej którego korozja wżerowa nie występuje, a pomiędzy potencjałami 2-4 istniejące wżery mogą się rozwijać, 3.  $E_{rp}$ - potencjał powstawania wżerów nietrwałych ulegających repasywacji, 4.  $E_{pit}$ - potencjał korozji wżerowej, powyżej którego powstają i rozwijają się trwałe wżery.

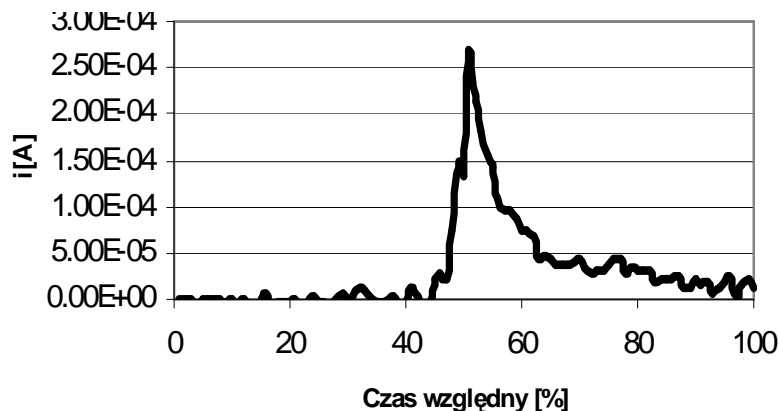


Rys. 7. Krzywa polaryzacji cyklicznej dla stali ulegającej korozji wżerowej: a-przykładowa, b-0H18N9

### Stopu 5086

Badania właściwości mechanicznych warstw pasywnych stopu 5086 rozpoczęto od klasycznych pomiarów elektrochemicznych. Przed wykonywaniem pomiarów badane próbki były eksponowane w roztworze buforu w czasie okres 1 doby w celu uzyskania stabilnej warstwy pasywnej. Właściwe pomiary prowadzone były w tym samym roztworze buforowym z dodatkową zawartością chlorku sodu o stężeniu 0,1M.

Charakterystykę czasowo-prądową wskazującą na pęknięcie warstwy pasywnej i inicjacji korozji pod naprężeniem pokazano na rys. 8.



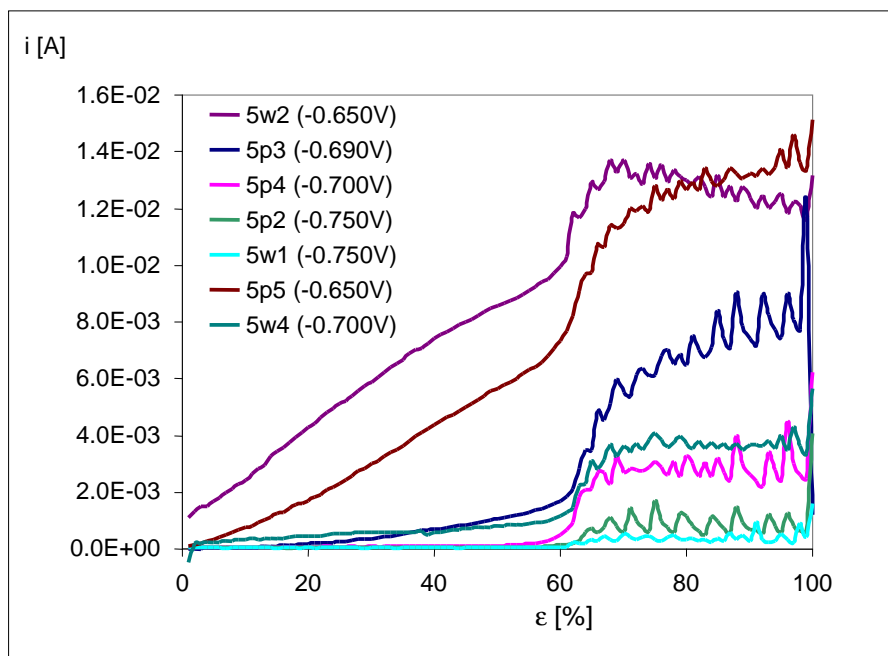
Rys.8. Charakterystyka  $i = f(t)$  dla próbki spolaryzowanej anodowo przy potencjale 0,03V do Ust

Po inicjacji korozji (przy sile rozciągania  $F_r=3\text{kN}$  i po upływie 150s od rozpoczęcia rozciągania), jak się później okazało warstwowej (rys. 5b) następuje proces częściowej repasywacji. Jest to odpowiedni początek badań korozji tego stopu na którą wpływ ma tylko naprężenie rozciągające.

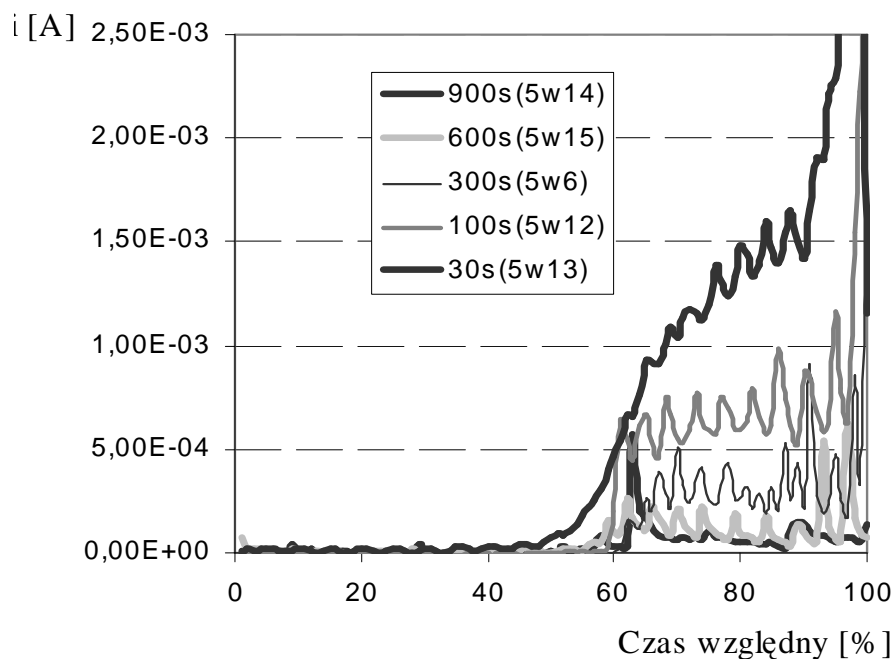
Kierunek wycinania badanych próbek stopu 5086 w stosunku do kierunku walcowania nie ma wpływu na poziom odkształcenia próbki, przy którym pęka warstwa ochronna. Jednak wartość prądu korozyjnego świadcząca o rozszczelnieniu warstwy ochronnej zależy od poziomu anodowego spolaryzowania w stosunku do potencjału stacjonarnego wynoszącego  $-0.8\text{V}$ , spolaryzowanie stopu AlMg5 do potencjałów:  $-0.65\text{V}$ ,  $-0.7\text{V}$ ,  $-0.75\text{V}$  w stosunku do potencjału stacjonarnego.

Do dalszych badań, wpływu prędkości odkształcenia na poziom naprężenia, przy którym pęka warstwa ochronna zakwalifikowano tylko próbki stopu 5086 wycięte wzdłuż kierunku walcowania.

Przebiegi prądu korozyjnego pokazane na rys.10 wskazują, iż jego wartość po pęknięciu warstwy pasywnej zależy od szybkości rozciągania. Im krótszy czas rozciągania (30s) tym większa jest wartość prądu korozyjnego a tym samym pozostaje mniej czasu na ewentualną repasywację. Proces repasywacji warstewki tlenkowej na badanym stopie 5086 zachodzi pomimo statycznego narastającego naprężenia w czasie dłuższym niż 600s. Na powyższym wykresie można zauważyć powstawanie przewężenia na rozciąganej próbce co charakteryzuje wzrost prądu.



Rys.9. Przebieg prądu korozyjnego podczas wolnego rozciągania dla próbek stopu 5086 wyciętych wzdłuż „w” i w poprzek „p” do kierunku walcowania w 0,1MNaCl i splaryzowane.



Rys.10. Wpływ prędkości rozciągania na wartość i przebieg prądu korozyjnego podczas osiowego rozciągania (3,5kN w 900s) próbek stopu 5086 spolaryzowanych anodowo 0,03V w stosunku do Ust, wyciętych wzdłuż „w” do kierunku walcowania w 0,1MNaCl.

## 6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W wielu publikacjach autorstwa Darowicki i inni wykazano iż pęknięcie warstwy pasywnej (wyznaczone z dużą dokładnością metodą **D**ynamicznej **E**lektrochemicznej **S**pektroskopii **I**mpedancyjnej) dla czystego aluminium odbywało się przy  $\epsilon=80\%$ . Dodatek 5% Mg (stop 5086) powoduje radykalny wzrost właściwości wytrzymałościowych w stosunku do czystego aluminium ale tym samym większą podatność do KN. Fakt ten potwierdzony został wcześniejszym pękaniem warstwy pasywnej, które zachodzi w strefie odkształcenia sprężystego, blisko granicy odkształcenia plastycznego. Podobna sytuacja występuje w przypadku stali 0H18N9. Pęknięcie warstwy pasywnej dochodzi w strefie odkształcenia sprężysto-plastycznego. Dla badanych materiałów konstrukcyjnych podatność do korozji pod naprężeniem występuje w zakresie ekstremalnych ale dopuszczalnych obciążeń eksploatacyjnych.

Zakres bezpiecznych obciążeń eksploatacyjnych konstrukcji to zakres odkształceń sprężystych. Ochronna warstewka pasywna stali 304 nie ulega pękaniu w zakresie odkształceń eksploatacyjnych co oznacza że stanowi ona dodatkowe zabezpieczenie przed korozją konstrukcji wykonanych z tej stali. Podobne właściwości wykazuje stop 5086, którego ochronna warstwa pasywna pęka przy naprężeniu zbliżonym do wartości granicy sprężystości. Uzyskane krytyczne wartości właściwości mechanicznych pęknięcia warstwy pasywnej potwierdzają te informacje. W związku z tym wyjaśnienie procesów związanych

z pękaniem warstw pasywnych może w znaczącym stopniu ułatwić ustalenie mechanizmu pękania korozyjnego

*Tab.5. Krytyczne właściwości wytrzymałościowe badanych materiałów związane z pękaniem ich warstw pasywnej*

Rodzaj materiału konstrukcyjnego	Właściwości mechaniczne ochronnej warstwy pasywnej	
	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]
5086	155	0,4
304	437	0,18

Na podstawie wartości krytycznych odkształcenia umownego dla których obserwuje się proces pęknięcia warstwy uzyskanych z badań stałoprądowych można stwierdzić, że są to badania obciążone błędem. Wynika z nich jedynie iż rozpoczął się proces korozyjny po pęknięciu warstwy tlenkowej. Dokładne i rzeczywiste parametry elektrochemiczne warstwy tlenkowej można określić jedynie na podstawie zmian jej parametrów elektrycznych w oparciu o badania DEIS, będąca w posiadaniu specjalistów z Katedry Elektrochemii, Korozji i Inżynierii Materiałowej Politechniki Gdańskiej.

Jeżeli proces pęknięcia warstwy zachodzi w strefie proporcjonalności (zakresu działania prawa Hooke'a) błąd wyznaczonej wartości krytycznej odkształcenia jest największy [12].

Większość modeli opisujących zjawisko występowania pęknięcia korozyjnego uwzględnia duże znaczenie obecności warstwy pasywnej. Utrata właściwości barierowych warstwy pasywnej łącznie z działaniem statycznego rozciągania w obecności środowiska elektrochemicznego jest głównym czynnikiem występowania pęknięcia korozyjnego.

Uzyskane krytyczne wartości właściwości mechanicznych pęknięcia warstwy pasywnej potwierdzają te informacje. W związku z tym wyjaśnienie procesów związanych z pękaniem warstw pasywnych może w znaczącym stopniu ułatwić ustalenie mechanizmu pęknięcia korozyjnego.

Wstępne badania korozji naprężeniowej stali 304 wykazały b.dobłą odporność na ten typ korozji badanej stali 304 ale na powierzchni badanych próbek zauważono ślady korozji wżerowej (rys.5). Jej nierównomierny charakter ze stosunkowo niewielkim zagęszczeniem uwarunkował kierunek dalszych badań korozyjnych tego materiału. Badania korozji wżerowej oparto na badaniach elektrochemicznych.

## 7. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Podczas statycznego rozciągania stopu 5086 i stali 304 w środowisku sztucznej wody morskiej dochodzi do zjawiska pęknięcia warstwy pasywnej.
- Detekcję tego zjawiska można uzyskać na podstawie klasycznych metod takich jak pomiar potencjostatyczny.
- Krytyczna wartość odkształcenia przy których pęka ochronna warstwa pasywna badanych materiałów uzyskana z badań stałoprądowych wymaga korekty (duży rozrzut wyników) przez zastosowanie zaawansowanych technik np. dynamicznej EIS (dostępna w Katedrze Elektrochemii, Korozji i Inżynierii Materiałowej PG)

- Rozbieżność wartości krytycznych odkształceń może prowadzić do istotnych błędów jeśli chodzi o ocenę stabilności warstw pasywnych stopów aluminium i stali austenitycznych podczas działania czynnika elektrochemicznego i mechanicznego.
- Zawartość składników stopowych ma wpływ na warunki pęknięcia warstw pasywnych. Dla stopu aluminium to zawartość magnezu a dla stali austenitycznej to zawartości chromu i niklu powoduje, że pęknięcie warstewki tlenkowej zachodzi w strefie poniżej granicy sprężystości, co ma duże znaczenie praktyczne w przewidywaniu zagrożenia pęknięcia korozyjnego stopów aluminium.

Badania stopu aluminium są częścią badań realizowanych w ramach projektu badawczego własnego nr. N N509 482438

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Wranglen, Podstawy korozji i ochrony metali, WNT, Warszawa 1975
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją L.L. Shreira, Korozja metali i stopów, Tom I, WNT, Warszawa 1966
- [3] He.t H. Uhling, Korozja i jej zapobieganie, WNT, Warszawa 1976
- [4] N. Puchaczewski, K. Cudny, Stale i stopy aluminium w budownictwie okrętowym. Wydanie Morskie, Gdańsk 1996
- [5] J.R. Davis "Corrosion of Aluminum, and Aluminum Alloys" Edited by J.R. Davis, The Materials Information Society ASM International, Chapter 2 "Understanding the Corrosion Behavior of Aluminum pp. 25-43.
- [6] A. J. Sedriks, Corrosion of stainless steels, Wiley, New York, 1996.
- [7] PN-EN ISO 11306
- [8] R.C. Newman, T. Shahrabi, K. Sieradzki, Scr. Metall. 23 (1989) 71
- [9] R.G. Kelly, A.J. Frost, T. Shahrabi, R.C. Newman, Metall. Trans. A 22A (1991) 531.
- [10] J.R. Macdonald (ed.), Impedance Spectroscopy, J.Wiley and Son Inc., New York, 1987,1
- [11] N.N. Malinin, R. Rżysko, Mechanika materiałów. PWN Warszawa 1981
- [12] ASTM Standard G-61-86, Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys (Reapproved 1998)