

JURCZAK Wojciech  
GRZĄDZIELA Andrzej

### **KOROZJA NAPRĘŻENIOWA OKRĘTOWYCH STOPÓW ALUMINIUM W ASPEKCIE BEZPIECZEŃSTWA TRANSPORTU**

*W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z bezpieczeństwem eksploatacyjnym środków transportu morskiego w odniesieniu do destrukcyjnego, korozyjnego oddziaływania środowiska morskiego. Elementy konstrukcji środków transportu, wykonane nie tylko ze stopów aluminium, ulegają stopniowemu niszczeniu korozyjnemu podczas eksploatacji. Jednocześnie, złożone oddziaływanie odkształceń (naprężeń) elementów konstrukcji i czynnika korozyjnego intensyfikuje procesy korozyjne. Konsekwencją tego działania są ubytki materiałowe powodujące zmniejszenie pierwotnych przekrojów nośnych elementów konstrukcji i wzrost zagrożenia bezpieczeństwa dla zdrowia i życia załóg okrętowych.*

*Wysokowytrzymałe stopy aluminium grupy 7xxx, wykazują znacznie gorszą odporność na korozję naprężeniową niż powszechnie stosowane w okrętownictwie stopy grupy 5XXX a ich złącza spawane wymagają dodatkowych zabezpieczeń antykorozyjnych celem zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego konstrukcji morskich.*

### **STRESS CORROSION CRACKING OF ALUMINIUM ALLOYS INTENTENDED FOR SHIPS CONSTRUCTIONS – TRANSPORT SAFETY CONSIDERATIONS**

*The paper presents selected problems connected with exploitation safety of marine transport regarding destructive and corrosive impact of marine environment. Structural elements of marine means of transport undergo gradual corrosion damage during service. Simultaneously stress corrosion cracking intensifies this damage. A result is material loss leading to a decrease in the initial cross-section area of the structural elements and consequently to an increase in safety hazard for ship crew.*

*High-strength aluminum alloys of 7xxx group exhibit significantly worse resistance to stress corrosion cracking than commonly applied alloys of 5xxx type. Their weld joints require additional anticorrosion protection in order to increase exploitation safety of marine structures.*

## **1. WPROWADZENIE**

Odporność na korozję to istotna cecha użytkowa każdego materiału konstrukcyjnego, która nabiera szczególnego znaczenia gdy ośrodkiem eksploatacji jest środowisko morskie.

Procesy korozyjne występowały, występują i będą występować, ponieważ korozja to naturalny proces naturalnego utleniania się wszystkich materiałów konstrukcyjnych. Korozja jest procesem roztwarzania materiałów konstrukcyjnych, zachodzącym w ciągły sposób, powodującym stopniowe obniżanie właściwości mechanicznych, technologicznych i użytkowych materiałów konstrukcyjnych pod wpływem chemicznego lub elektrochemicznego oddziaływania środowiska naturalnego. Opisując problematykę korozji konstrukcji środków transportowych należy podkreślić, że oprócz sfery ekonomicznej musimy pamiętać o bezpiecznej eksploatacji. Korozja zbiorników paliwa prowadzi do poważnego skażenia gleby, korozja gazociągów stwarza niebezpieczeństwo wybuchu, korozja układu sterowania lub hamulcowego w samochodzie, samolocie czy jednostce pływającej może spowodować awarię i w rezultacie zagrożenie zdrowia lub życia ludzkiego, itd. Aspekt korozji musi być odniesiony do typu konstrukcji, bo czym innym jest korozja elementu podrzędnej konstrukcji (np. ogrodzenia) a innym zagrożeniem jest korodujące układ sterowania w elektrowni atomowej.

Przebieg procesów korozyjnych zależy od wielu czynników, które możemy podzielić na dwie zasadnicze grupy: czynniki wewnętrzne i zewnętrzne. Czynniki wewnętrzne odniesiono do właściwości materiału konstrukcyjnego natomiast czynnikom zewnętrznym przyporządkowano właściwości naturalnego ośrodka korozyjnego [1]. To właśnie typ środowiska korozyjnego decyduje o rodzaju korozji i sposobie przebiegu procesów korozyjnych na powierzchni materiałów konstrukcyjnych. Korozja chemiczna zachodząca przy wilgotności powietrza powyżej 70% (powodującej kondensację pary wodnej) oraz dużym stopniu zanieczyszczenia powietrza (np. SO<sub>2</sub>, sadze, pył węglowy) zmienia proces utleniania na korozję elektrochemiczną. Ten rodzaj korozji elektrochemicznej jest powszechny i typowy dla środowiska morskiego, któremu podlegają elementy konstrukcji jednostek pływających, platform a także infrastruktury portowo-stoczniowej. Atmosfera i woda morska jest klasycznym elektrolitem przewodzącym prąd korozyjny, którego gęstość jest głównym parametrem wyznaczającym szybkość (intensywność) korozji. Przeciwdziałaniem dla korozji są wszelkie zabiegi mające na celu minimalizowanie skutków jej destrukcyjnego działania np. przez stosowanie ochrony antykorozyjnej (czynnej, biernej). Wykorzystując posiadaną wiedzę z zakresu korozji elektrochemicznej jesteśmy w stanie ograniczyć obecne straty korozyjne, bez dodatkowych inwestycji, nawet o 40% [2]. Stosując wiedzę z zakresu elektrochemii, materiałoznawstwa i ochrony środowiska możemy wielokrotnie zmniejszyć zagrożenie środowiska powodowane przez korozję i przez zastosowanie metod ochrony antykorozyjnej [3].

## **2. SKŁAD CHEMICZNY MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH A PODATNOŚĆ KOROZYJNA**

Każdy rodzaj materiału konstrukcyjnego metaliczny i niemetaliczny podlega procesowi naturalnej degradacji. Największe zagrożenie, korozja stanowi dla materiałów metalicznych. Większość metali występujących w przyrodzie, w swoich rudach to postać utleniona (stan naturalny). Natomiast stan wolny (metaliczny) w warunkach eksploatacyjnych to stan nietrwały, ciągle dążący do powrotu w stan utlenienia (korozji). Im więcej energii włożymy w przekształcenie metalu z postaci związanej (rudy) w stan wolny (metaliczny) tym łatwiej będzie ulegał on korozji w warunkach naturalnych.

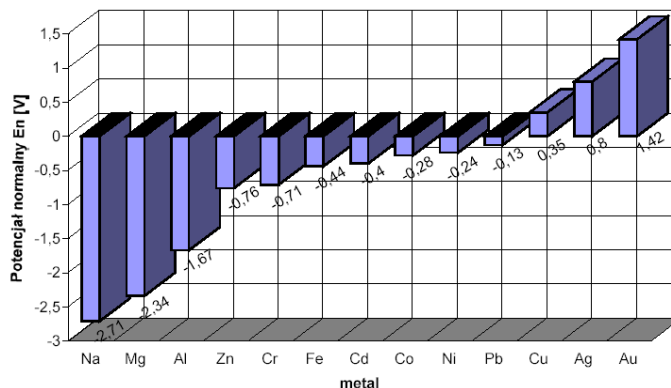
Przebieg procesów korozyjnych zachodzących na powierzchni materiałów konstrukcyjnych uwarunkowany jest istnieniem elektrolitu (wody, wilgoci wraz

z rozpuszczonymi związkami chemicznymi i gazami) i tlenu jako depolaryzatora. Są to tzw. zewnętrzne podstawowe czynniki korozyjne. Jednak na wartość ubytków korozyjnych wpływ mają także czynniki wewnętrzne, odniesione do składu chemicznego, jego struktury związanej z obróbką cieplną i powstałymi naprężeniami oraz stan powierzchni. To mikrostruktura materiału konstrukcyjnego a więc typ sieci krystalicznej zawierająca atomy określonych pierwiastków o konkretnych właściwościach, opisanych ilością elektronów walencyjnych stanowi o jego właściwościach korozyjnych [4].

Im materiał konstrukcyjny posiada większy stopień czystości tym bardziej odporny jest na korozję. Większość materiałów konstrukcyjnych stosowanych do budowy obiektów technicznych to materiały metaliczne głównie stopy (np. stal), których zasadniczy skład chemiczny (osnowę) stanowią metale (pierwiastki) o niskim potencjale elektrochemicznym (poniżej trzech elektronów walencyjnych) z dużym stopniem zanieczyszczenia związkami i fazami międzymetalicznymi (wielofazowe) oraz wtrąceniami.

Powszechnie do konstrukcji morskich stosuje się stopy żelaza, aluminium, miedzi i rzadziej tytanu, których technologia wytwórstwa ma także wpływ na ich podatność korozyjną. Obróbka cieplna jest zabiegiem technologicznym mająca na celu nadanie materiałowi odpowiednich właściwości wytrzymałościowych i korozyjnych przy ustalonym składzie chemicznym. Struktura materiału konstrukcyjnego powstająca w wyniku wyżarzania, hartowania, ulepszania cieplnego posiada cechy jednorodności, zmniejszająca możliwości powstawania mikroogniw korozyjnych. Poprawnie dobrane parametry obróbki cieplnej stopów (materiałów wielofazowych) może zapobiec powstawaniu korozji międzykrystalicznej przez równomierne rozłożenie małych faz anodowych w osnowie kryształu. Podatność metali i stopów na korozję elektrochemiczną jest zależna od składu chemicznego i struktury fazowej stopu. Odpowiedni dobór składu chemicznego może spowodować przesunięcie standardowego potencjału elektrodowego stopu do dodatnich wartości, zapewniając wysoką odporność na korozję [5].

Położenie metalu w szeregu napięciowym (rys.1) a więc wartość jego stacjonarnego potencjału elektrochemicznego (SPE) zwanego często normalnym, posiada bardzo istotne znaczenie dla podatności metalu na korozję elektrochemiczną. Im bardziej ujemna jest wartość potencjału normalnego metalu tym większą podatność do korozji wszelkiego typu. Różnica potencjałów w szeregu galwanicznym, mniejsza niż 50 mV, nie ma praktycznego znaczenia na przebieg korozji. Intensywność korozji wzrasta ze wzrostem różnicy potencjałów stykających się z sobą metali w środowisku korozyjnym [6].



Rys.1. Szereg napięciowy wybranych pierwiastków chemicznych tworzące materiały konstrukcyjne w odniesieniu do potencjału elektrody wodorowej  $E_w=0[V]$

Wysoką odporność na korozję elektrochemiczną wykazują stopy lub metale jednofazowe, gdyż nie występują na ich powierzchni mikroogniwa pomiędzy dwiema fazami. Dążenie do uzyskania struktury jednofazowej stanowi więc jedną z zasad komponowania składów chemicznych stopów odpornych na korozję elektrochemiczną.

Każda konstrukcja wytworzona w określonej technologii łączy w sposób trwały (spajanie) lub rozłączny (np. połączenia kształtowe) kilka rodzajów materiałów, tworząc w obecności elektrolitu (powietrze, woda, gleba) typowy przykład galwanicznego ogniwa korozyjnego. To makroogniwo korozyjne stanowią połączone elektrycznie (styk metaliczny) materiały o różnym potencjale elektrochemicznym (własnym). Potencjał własny tworzą lokalne ogniwa powstające w rezultacie niejednorodności chemicznej lub fizycznej fazy metalicznej (niejednorodność różnych faz krystalicznych stopu, wtrącenia faz obcych, lokalne różnice naprężeń odkształceń i stanu gładkości powierzchni) albo na skutek różnic w stężeniu elektrolitu [7]. Efektem tego są korozyjne ubytki materiału konstrukcyjnego (plamy, wżery) w strefach anodowych co obniża wytrzymałość elementu lub całości konstrukcji obiektu technicznego.

Szersze zagadnienia odporności korozyjnej dotyczą łączonych (spajanych) metalicznych materiałów konstrukcyjnych. Oddziaływanie temperatury (przy spawaniu), skupionej wiązki elektronów (spawanie elektronowe) czy tarcia (zgrzewania tarciove Friction Stir Welding – FSW) powoduje powstawanie obszaru o innej strukturze i składzie chemicznym niż łączone materiały. Konsekwencją tego jest powstawanie kolejnej elektrody w galwanicznym ogniwie korozyjnym. 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, śruby) miał wyższy potencjał elektrochemiczny od łączonych materiałów.

Korozja zachodzi także przy połączeniach klejonych, w których zastosowana substancja klejowa (spolimeryzowany związek epoksydowy lub poliuretanowy) wchodząc w reakcję z metalami łączonymi tworzy najczęściej związki kwasowe. Dobór kleju i technologia łączenia pod względem korozyjnym uwarunkowana jest stanem i rodzajem powierzchni

łączonych elementów. Powierzchnie materiałów łączonych są najczęściej zabezpieczone różnego rodzaju powłokami (obróbka chemiczna, elektrochemiczne, elektrolityczne nakładanie powłok), których rodzaj decyduje o szczelności połączenia klejowego a tym samym zapobiega to przenikaniu czynnika korozyjnego. Struktura kleju nie może być porowata, gąbczasta oraz podatna na gromadzenie wilgoci oraz tlenu z powietrza.

### 3. OCENA ODPORNOŚCI NA KOROZJĘ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

Szybkość korozji ( $V_k$ ) określa się w zależności od typu korozji przyjmując ogólną zasadę - ubytek masy w przedziale czasu. Tak wyznaczona  $V_k$  winna być zbliżona do  $V_k$  wyznaczonej z prawa Faradaya uwzględniające prąd korozyjny

$$m = k i_{kor} t \quad (1)$$

gdzie:  $m$  – masa substancji wydzielonej na elektrodzie,  $k$  – równoważnik elektrochemiczny,  $i_{kor}$  – ładunek elektryczny [As] przepływający przez elektrolit.

Typ korozji (równomierna, wżerowa, międzykrystaliczna) determinuje metodę oceny odporności korozyjnej. Korozja międzykrystaliczna jest oceniona przez określenie właściwości mechanicznych przed i po ekspozycji korozyjnej a korozja wżerowa wyrażana jest współczynnikiem korozji wżerowej. Jest to stosunek największej głębokości wżerów do głębokości średniej wyznaczonej z ubytku masy próbki. Współczynnik korozji wżerowej, równy jedności, utożsamiany jest z korozją równomierną. Podatność do korozji dzieli materiały na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią materiały stosowane na wysokoobciążone konstrukcje morskie ponieważ są odporne na działanie korozji w stopniu zadawalającym, czyli gdy  $V_k < 0,005$  ipy (0,15 mm/rok). Konstrukcje średnioobciążone stanowią materiały drugiej grupy, o stosunkowo wysokiej  $V_k = 0,005-0,05$  ipy (0,15-1,5 mm/rok). Każdy materiał, którego  $V_k > 0,05$  ipy ( $> 1,5$  mm/rok) winien być eliminowany z budownictwa obiektów technicznych [8]. Ten podział materiałów konstrukcyjnych możemy zastosować do oceny korozji równomiernej, która nie uwzględnia korozji międzykrystalicznej tak niebezpiecznej dla budowli inżynierskich. Natomiast ocena korozji międzykrystalicznej może się odbyć przez określenie różnicy właściwości mechanicznych przed ( $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $A$ ,  $Z$ ) i po ( $R_{mk}$ ,  $R_{0,2k}$ ,  $A_k$ ,  $Z_k$ ) ekspozycji korozyjnej [9]. 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.

$$K_{R_m} = \frac{R_m - R_{mt}}{R_m} \times 100[\%] \quad (2) \quad K_{A_5} = \frac{A_5 - A_{5t}}{A_5} \times 100[\%] \quad (3)$$

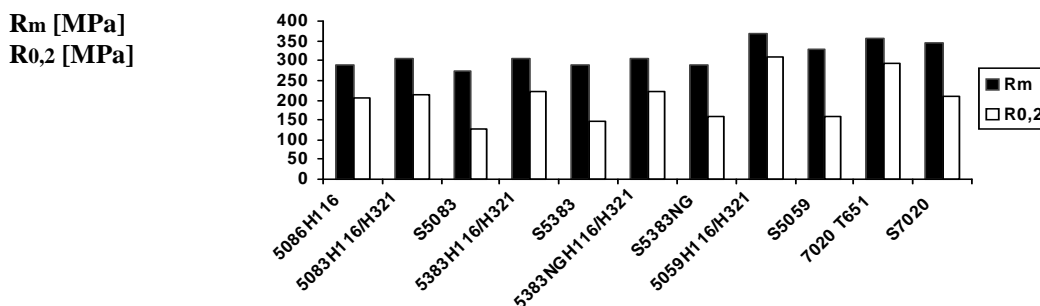
gdzie:

$K_{R_m}$  - 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  $t = 1500h$ .

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Materiał rodziny stopów 5XXX można zaliczyć do materiałów inżynierskich o dobrej odporności korozyjnej ale średnich właściwościach mechanicznych. W latach 80-tych rozpoczęto w polskim budownictwie okrętowym stosować wysokowytrzymały stop 7020 (bez Cu), którego właściwości wytrzymałościowe zestawiono (rys.2) ze stopami 5XXX powszechnie stosowanymi w budowie jednostek pływających.

Zastosowanie stopu 7020 w budowie okrętów przyniosło wiele problemów eksploatacyjnych min. ze względu na małą odporność korozyjną, co przedstawiono w tab.2 i 3. Dlatego kilkanaście lat później opracowano stop 7020M (zwiększono zawartość Cr i Zr, ograniczono sumaryczną zawartość Zn+Mg) jako przyszłościowej alternatywy dla zastosowania wysokowytrzymałych stopów 7XXX na spawane konstrukcje morskie.



Rys.2. Zestawienie właściwości wytrzymałościowych okrętowych stopów aluminium dla materiału rodzimego 5XXX i złączy spawanych (ozn.S) oraz stopu 7020 [5, badania własna grant]

Na szczególną uwagę zasługuje stop 5059 (Alustar), którego właściwości są porównywalne z 7020. Powodem tak wysokich właściwości 5059 jest stosunkowo duża zawartość Cu, która zwiększa jednocześnie podatność do korozji w środowisku morskim, stąd zastosowanie tego stopu w na konstrukcje morskie jest silnie ograniczone.

Stopy układu 5XXX nie podlegają obróbce cieplnej tzn. że ich właściwości mechaniczne nie ulegają zmianie pod wpływem dodatkowej obróbki cieplnej. Jedynie zgniot na zimno (ozn H) i wygrzewanie może w małym zakresie zmienić te właściwości. Jednak właściwości wytrzymałościowe złączy spawanych tych stopów są niskie ze względu na uzyskanie w strefie wpływu ciepła (SWC) złącza spawanego właściwości materiału miękkiego. Znacznie korzystniejsze właściwości wytrzymałościowe uzyskują stopy 7XXX, których wyższe właściwości wytrzymałościowe zależą od obróbki cieplnej (ozn. T6). Ten rodzaj obróbki cieplnej polegający na przesycaaniu i sztucznym dwustopniowym starzeniu może spowodować, że R<sub>m</sub> wynosi ponad 400 MPa [9].

Jak wcześniej wspomniano wartość EPS warunkuje podatność materiału do korozji. W tab.1 wyznaczono potencjały dla materiału rodzimego stopów grupy 7XXX i ich złączy spawanych. Skład chemiczny zastosowanego spoiwa jest ważny bo tworzy jego potencjał, który nie może być niższy (bardziej elektroujemny) od EPS spawanego materiału. Zapobiegamy w ten sposób intensywnej korozji stosunkowo małej powierzchni spoiny i rozłożeniu prądu korozyjnego na dużej powierzchni złącza spawanego. Pod względem

potencjałowym (odporności korozyjnej) idealnym rozwiązaniem jest uzyskanie takiej samej wartości EPS zarówno dla spoiny jak i spawanego materiału. Tą zasadę wykorzystuje się przy spawaniu stopów grupy 5XXX, stosując materiał rodzimy jako spoiwa, uzyskując dobrą odporność na korozję przy zachowaniu dobrych właściwości wytrzymałościowych. Niestety tej zasady nie można stosować do spajania stopów 7XXX ze względu na podatność do gorących pęknięć spawalniczych [9]. Ten fakt, wymusił poszukiwanie takich spoiw, które zapewnią dobrą wytrzymałość i dobrą odporność na korozję dla stopów 7XXX. W tab.1 pokazano wartości EPS dla spoiw jakie stosowano do spawania stopu 7020M.

Tab.1. Zestawienie wartości elektrochemicznych potencjałów stacjonarnych materiałów wchodzących w skład złączy spawanych i złączy spawanych wykonanych przy użyciu różnych spoiw

Lp	Materiał rodzimy/wytop	Grubość blach [mm]	Elektrochemiczny potencjał stacjonarny stopu	
			względem elektrody chlorosrebrowej [mV]	względem nasyconej elektrody kalomelowej [mV]
1	7020M w 507	6	-0,824	-0,535
2		12		
3	7020M w 635	6	-0,855	-0,559
4		12		
Lp	Materiał spoiwa	Oznaczenie spoiwa	Potencjał stacjonarny spoiwa	
			względem elektrody kalomelowej [mV]	względem elektrody chlorosrebrowej [mV]
1	SAIMg5Ti0,1	SPA20	-0,569	-0,419
2	SAIMg5Zn0,2	CZ	-0,812	-0,667
3	SAIMg5Zr0,4	Z	-0,515	-0,398
4	SAIMg5Zn2Zr0,4	SZ	-0,690	-0,488
5	SAIZn5Mg2CrZr	R	-0,855	-0,559

Jednak złącza spawane stopów 7XXX, w odróżnieniu od 5XXX, po zakończeniu procesu spawania ulegają samorzutnemu umocnieniu wydzieleniowemu. Ten proces umacnia się złącza spawanych trwa kilka dni, co powoduje, że spawane konstrukcje zaleca się poddać obciążeniu po kilku (min. 7) dniach od zakończenia spawania. Te właściwości złączy spawanych są znacznie wyższe niż stopów 5XXX (rys.2).

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. Wspomniana skłonność do gorących pęknięć spawalniczych, złączy spawanych stopów 7XXX wyznaczona w próbie P.T. Houldcrofta ( $K_p > 17\%$ ) [9], spowodowała, że dla stopów 7020 i 7020M stosuje się spoiwa z ograniczoną zawartością Mg i dodatkami Zr, Cr i Be. Ten fakt przekłada się na właściwości złączy spawanych stopów 7XXX, które winny być wyższe niż

pokazano na rys.2. Pod względem odporności na korozję nie można stosować do spawania stopu 7020M spoiw z dużą zawartością Zn, jednocześnie Mg obniża właściwości wytrzymałościowe złączy spawanych tego stopu.

Obniżenie właściwości mechanicznych, wyznaczone wg wzorów 2 i 3, stopu 7020M i jego złączy w wyniku ekspozycji korozyjno-naprężeniowej w 3,5% NaCl przedstawiono w tab.2 poz.1-4 i tab.3. Dla porównania w tab. 2 poz.5 pokazano średnie procentowe obniżenie właściwości mechanicznych ( $K_{Rm}$ ,  $K_{A5}$  dla powszechnie stosownego w okrętownictwie stopu 5083.

Większa zawartość Zn+Mg w wytopie 507 spowodowała obniżenie odporności na korozję naprężeniową złączy spawanych stopu 7020M. Ekspozycja korozyjna złączy spawanych badanego stopu zdecydowanie obniżyła własności plastyczne średnio o ok. 30%, natomiast spadek własności wytrzymałościowych wynosił średnio o ok. 20%. Znacznie lepszą odporność na KN wykazał stop 5083 szczególnie po wyżarzaniu rekrytalizującym.

Tab.2. Odporność korozyjno-naprężeniowa stopów grupy 7XXX i stopu 5083

Lp	Materiał rodzimy/wytop	Rodzaj obróbki cieplnej	Odporność na korozję naprężeniową	
			$K_{Rm}$ [%]	$K_{A5}$ [%]
1	7020	T4- naturalnie starzony po przesycaeniu	24	49
2		T6- dwustopniowe sztuczne starzenie po przesycaeniu	11	25
3	7020M	T4	21	36
4		T6	8	44
Lp	Materiał rodzimy/wytop	Rodzaj obróbki cieplnej	Odporność na korozję naprężeniową	
			$K_{Rm}$ [%]	$K_{A5}$ [%]
5	5083	H111 - wyżarzony	7	14
		H321 - umocniony przez zgniot na zimno	10	18

Tab.3 Odporność na korozję naprężeniową złączy spawanych stopu 7020M wykonanych metodą TIG ręcznie przy użyciu spoiw o różnym składzie chemicznym

Lp	Materiał spoiwa	Oznaczenie spoiwa	Odporność na korozję naprężeniową		
			$K_{Rm}$ [%]	$K_{A5}$ [%]	Uwagi
1	SAIMg5Ti0,1	SPA20	18,9	52	
2	SAIMg5ZnZr0,2	CZ	4,5	26,9	
3	SAIMg5Zr0,4	Z	1	15,9	
4	SAIMg5Zn2Zr0,4	SZ	9,2*	21,4*	
5	SAIZn5Mg2CrZr	R	30,2*	51,4*	

\* z 5 próbek 3 uległy pęknięciu przed 1500h



Podsumowując można stwierdzić, że skład chemiczny spawanego stopu aluminium (materiału rodzimego) i spoiwa ma wpływ na korozję naprężeniową złączy spawanych. Można więc stwierdzić, że ze wzrostem zawartości cyrkonu w spoiwa rośnie odporność korozyjno-naprężeniowa złączy spawanych. Wzrost zawartości cynku /SAIMg5Zn2Zr0,4/ i magnezu /SAIZn5Mg2CrZr/, pomimo obecności cyrkonu w materiale spoiwa powoduje radykalne obniżenie odporności korozyjno-naprężeniowej.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań korozji naprężeniowej (metodą obniżenia właściwości mechanicznych i pomiaru elektrochemicznego potencjału) złączy spawanych stopu AlZn5Mg2CrZr można sformułować następujące wnioski:

- W stopach grupy 7XXX ze wzrostem sumarycznej zawartości cynku i magnezu zmniejsza się ich odporność korozyjno-naprężeniowa (bardziej elektroujemny EPS) przeprowadzona w 3% r.w NaCl przy  $\sigma_o=0,8R_{0,2}$  w czasie=1500h.
- Podobnie ze wzrostem zawartości tych pierwiastków w materiale spoiwa, zmniejsza się odporność korozyjno-naprężeniowa złączy spawanych. Głównie Zn i jego związki ulegając w procesie spawania częściowemu nadtopieniu i związanej z tym segregacji są powodem podatności do korozji naprężeniowej. Dlatego w odróżnieniu od stopów układu 5XXX stopy 7XXX nie można spawać spoiwami o składzie chemicznym zbliżonym do składu chemicznego spawanego materiału rodzimego.
- Dodatek cyrkonu do materiału spoiwa podnosi odporność korozyjno-naprężeniową złączy spawanych stopu 7020M. Zr jako modyfikator zmniejsza różnicę potencjałów korozyjnych między roztworem stałym  $\alpha$  a powstałymi fazami międzymetalicznymi przez co zmniejsza intensywność wydzielania wodoru odpowiedzialnego za kruche pęknięcia korozyjne w środowisku morskim. Zwiększając zawartość Zr z 0,2% do 0,4% w SAIMg5Zr zmniejszamy podatność do korozji naprężeniowej złączy spawanych stopu AlZn5Mg2CrZr o 3,5% dla własności wytrzymałościowych i o 11% dla plastycznych.
- Największa podatność do korozji naprężeniowej wykazuje stop 7020M i jego złącza spawane, których potencjał stacjonarny jest bardziej elektroujemny wskutek zwiększenia sumarycznej zawartości Zn+Mg w materiale rodzimym (spawanym) i zwiększenia zawartości Zn w materiale spoiwa oraz ograniczanie zawartości Zr.

## 5. PODSUMOWANIE

Korozja w środowisku morskim jest naturalnym, elektrochemicznym, ciągłym procesem niszczenia materiałów konstrukcyjnych z których wytwarza się konstrukcje jednostek pływających. Stopień obniżenia właściwości wytrzymałościowych w szczególności nośnych konstrukcji jest uwzględniony przez konstruktorów. Jednak doraźny nadzór i monitoring procesów korozyjnych zachodzących na konstrukcjach morskich winien być okresowo wykonany jako podstawowy warunek bezpiecznej ich eksploatacji.

Bezpieczeństwo eksploatacyjne konstrukcji wykonanych ze stopów grupy 7XXX i jego złączy spawanych polega na stosowaniu intensywnej ochrony biernej (malowanie zestawem farb ochronnych, stosowanie protektorów). Niektóre rozwiązania technologicznie polegające na stosowaniu spoiw o mniejszej podatności do korozji a jednocześnie obniżające wytrzymałość jest rozwiązaniem niewystarczającym. Jeżeli nie występuje konieczność stosowania stopów wysokowytrzymałych to alternatywą dla stopów 7XXX są stopy 5XXX o zdecydowanie lepszej odporności na korozję.

**BIBLIOGRAFIA:**

- [1] 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, Ohio 2004
- [2] "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States Report" opracowany w 2007 [www.corrosioncost.com](http://www.corrosioncost.com)
- [3] Szczygieł B.: "Korozja i jej wpływ na środowisko" wykład szkoły chemii, 2002
- [4] Z. Miszewski: *Zarys teorii korozji i ochrony metali w środowisku morskim*. 1987
- [5] N. Puchaczewski, K. Cudny: *Stale i stopy aluminium w budownictwie okrętowym*. Wydanie Morskie, Gdańsk 1996
- [6] H. Uhling, *Korozja i jej zapobieganie*, WNT, Warszawa 1976
- [7] H. Bugłacki „Wpływ obróbki cieplnej oraz składu chemicznego spoiw na własności mechaniczne i korozję naprężeniową stopu AlZn5Mg1 w spawanych konstrukcjach okrętowych. Gdańska, 1981
- [8] *Ocena odporność korozyjnej PN-EN ISO 8044;2002*. Korozja metali i stopów
- [9] W. Jurczak: *Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i odporność korozyjną stopów układu Al-Zn-Mg przeznaczonych na spawane konstrukcje okrętowe*, Gdańsk 1998

Wyniki badań odporności na korozję naprężeniową stopu 7020M są rezultatem prac badawczych prowadzonych w ramach projektu własnego nr. N N509 482438