

Wojciech Jurczak
Akademia Marynarki Wojennej

Krzysztof Dudzik
Akademia Morska w Gdyni

ODPORNOŚĆ KOROZYJNO-NAPRĘŻENIOWA I ZMĘCZENIOWO-KOROZYJNA OKRĘTOWYCH STOPÓW ALUMINIUM I ICH SPAWALNOŚĆ

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej dla osiowego rozciągania (korozja naprężeniowa) i zginania obrotowo-giętnego (korozja zmęczeniowa) stopów aluminium serii 5xxx i 7xxx stosowanych na konstrukcje okrętów. W siłach Polskiej Marynarki Wojennej eksploatowano siedem szybkich kutrów torpedowych w całości wykonanych ze stopów serii 5xxx, a obecnie w składzie sił NATO eksploatowana jest polska korweta projektu 240 z nadbudówką wykonaną ze spawalnego stopu 7020. Stopy serii 7xxx mają wysokie właściwości wytrzymałościowe, ale mniejszą odporność korozyjną od stopów 5xxx. Zaprezentowano wyniki badań spawalności tych stopów oraz podano wyniki badań najnowszego stopu 7020M w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej i odporności korozyjnej jako alternatywy dla dotychczas stosowanych stopów aluminium.

Słowa kluczowe:

odporność korozyjna, korozja naprężeniowa, korozja zmęczeniowa, okrętowe stopy aluminium, spawalność.

WSTĘP

Polski przemysł stoczniowy w przeszłości podejmował wiele wyzwań przy projektowaniu i budowie nowych jednostek pływających przeznaczonych do działań militarnych. Pod koniec lat pięćdziesiątych po zakończeniu prac projektowych

rozpoczęto budowę kutra torpedowego z kadłubem wykonanym ze stopu 5019 (AlMg5Mn-PA20) i nadbudówką ze stopu 5086 (AlMg4Mn). Wówczas te stopy posiadały najlepsze cechy materiału lekkiego o dobrych właściwościach mechanicznych i odporności korozyjnej. Z końcem lat siedemdziesiątych podjęto się budowy korwety (dozorowca) z nadbudówką ze stopu aluminium o długości 40 m. Jednostka ta była dwukrotnie większa i miała dziesięciokrotnie większą wyporność od wspomnianego kutra torpedowego. W obu przypadkach były to wielkie i ambitne wyzwania projektowe, które tylko częściowo zwińczył sukces. Kutry torpedowe o doskonałych parametrach taktyczno-technicznych [3] miały szanse powodzenia, gdyby na uzbrojenie marynarki wojennej nie wprowadzono broni raketowej, która wyeliminowała torpedy, a tym samym okręt tego typu. Kilkuletnie użytkowanie tych okrętów nie odbywało się bez problemów eksploatacyjnych w postaci pęknięć zmęczeniowych, które były wynikiem dużych obciążeń eksploatacyjnych (prędkość maks. 55 węzłów przy wyporności 60 t i 25 m długości) podczas działań z użyciem uzbrojenia.

W innym aspekcie można dokonać oceny „sukcesów” budowy korwety, która jako prototyp jest eksploatowana do dnia dzisiejszego (prędkość maks. 26 węzłów przy wyporności 900 t i 83 m długości). Jednostka, będąca doświadczalną, umożliwia w oparciu o jej eksploatację uwzględnianie poprawek do budowy kolejnych jednostek tego typu. Jednakże szereg nieprzewidzianych okoliczności spowodowało naruszenie konstrukcji kadłuba, a w rezultacie znaczne wyężenie elementów konstrukcyjnych wykonanych ze stopu aluminium. Wymusiło to na pracowniach AMW w latach dziewięćdziesiątych badania nad modyfikacją zastosowanego stopu 7020, w którym upatrywano niską odporność korozyjną, szczególnie złączy spawanych. Poddanie w szerokim zakresie badaniom wytrzymałościowym i korozyjnym stopów metali stosowanych na konstrukcje okrętowe, ale i pozostałych materiałów, jest podstawowym wymogiem towarzystw klasyfikacyjnych.

W artykule przedstawiono wyniki badań dla wspomnianych stopów aluminium i ich złączy spawanych. Jednym z głównych problemów, który należałoby rozwiązać przy budowie kutra, są obliczenia wytrzymałości spawanego kadłuba. Obecnie problem ten w zakresie oceny bezpieczeństwa spawanych konstrukcji aluminiowych umacnianych zgniotem jest opisany procedurą [9]. W okrętownictwie szeroko stosuje się stopy serii 5xxx, których podwyższenie właściwości wytrzymałościowych materiału rodzimego uzyskuje się poprzez zgniot na zimno [6, 7, 10]. Jednak oddziaływanie temperatury przy spawaniu takich stopów powoduje degradację wytrzymałościową w obszarze SWC do właściwości materiału w stanie miękkim (około 20–30%). Te specyficzne zjawiska, zwłaszcza dla stopów aluminium, szczególnie

objawiają się dla spawanych konstrukcji stalowych. Sformalizowane w eurokodach procedury obliczeniowe uwzględniają jakościowe zmiany w metodach projektowania takich aluminiowych konstrukcji. Klasyczny model ustroju z idealnego materiału liniowo sprężystego i bez imperfekcji został zastąpiony modelem ustroju sprężysto-plastycznego z imperfekcjami geometrycznymi lokalnymi i globalnymi [11]. Jakościowe zmiany w analizie nośności są szczególnie widoczne dla spawanych konstrukcji aluminiowych w strefie wpływu ciepła (SWC) [14]. Destrukcji termicznej nie podlegają stopy aluminium w stanie wyżarzonym *O*, surowym *F* oraz wyżarzonym i lekko umocnionym *H111* [6].

Dwa elementy konstrukcji okrętowej decydują nie tylko o parametrach techniczno-taktycznych, ale także o zdolności bojowej okrętu — to kadłub i nadbudówka. Konstrukcje tych elementów i przede wszystkim rodzaj materiału zastosowanego na nie ma wpływ na późniejszą jego eksploatację. Zasadnicza różnica dla rozpatrywanych okrętów była w konstrukcji kadłuba i rodzaju materiału. Kadłub korwety wykonany jest ze stali kadłubowej, natomiast na nadbudówki obu okrętów zastosowano stopy aluminium.

KONSTRUKCJA KADŁUBA

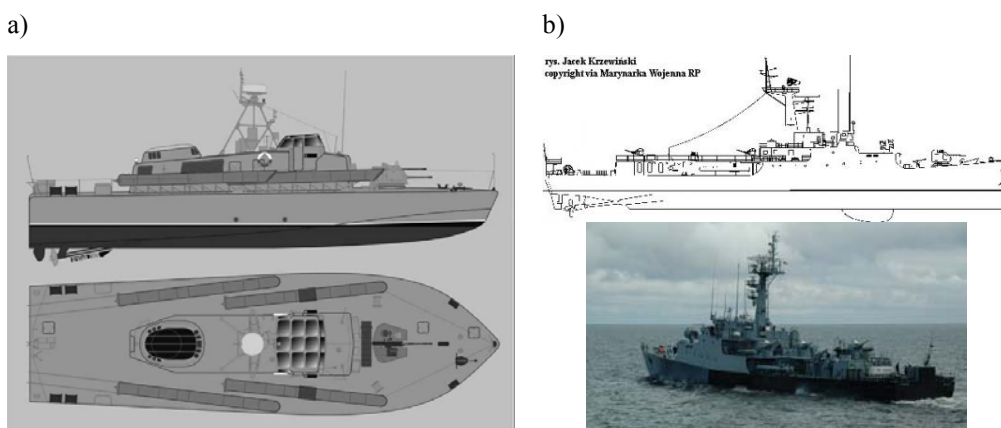
Kadłuby okrętowe buduje się systemem sekcyjnym jako konstrukcje spawane. Technologia łączenia, spajania elementów kadłuba zależy od materiału konstrukcyjnego. Inną technologię spawania stosuje się dla stali kadłubowej, z której wykonano kadłub korwety, a inną do spawania stopu aluminium wymagającą spawania w osłonie gazów obojętnych (TIG, MIG), jak to miało miejsce dla kadłuba kutra torpedowego.

Gęstość stopów aluminium jest trzykrotnie mniejsza niż stali. Ich właściwości, takie jak amagnetyczność, wysoki współczynnik wytrzymałości względnej $R_{0,2}/\rho$, dobra odporność na korozję w wodzie i atmosferze morskiej, dobra spawalność oraz dobra odporność udarowa także w niskich temperaturach, zdecydowały o powszechności zastosowania tych materiałów w światowym budownictwie okrętowym [6, 7].

Zbudowany ze stopu aluminium kadłub kutra torpedowego charakteryzował się między innymi tym, że średni odstęp międzywřęgowy wynosił około 620 mm, a odległość między wzdłużnikami nie przekraczała 300 mm (rys. 2.). Eksploatacja kutrów pokazała, że na poszyciach ich kadłubów pojawiły się obszary materiału o podwyższonej wytrzymałości otoczone poprzecznymi i wzdłużnymi pasami 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 wiedzy, które z wartości przyjąć do obliczeń i czy istnieją korelacje między tymi wartościami. Innym problemem, który nie był zapewne do końca rozwiązany, okazały się przeciążenia dynamiczne o wartościach przekraczających w warunkach ekstremalnych 9 g i ich wpływ na prace projektowe oraz późniejszą eksploatację okrętu [16].

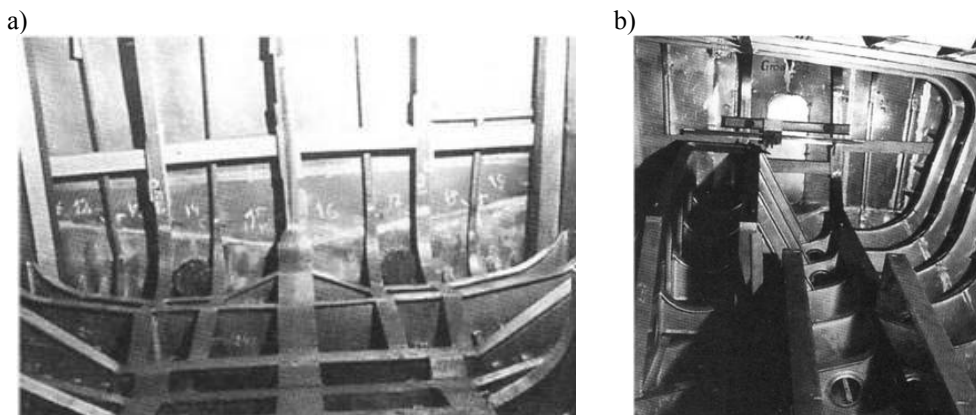
Kadłub kutra zbudowano systemem sekcyjnym jako konstrukcję prawie całkowicie spawaną, z wyjątkiem ułożyskowania wałów, sterów wychodzących z kadłuba i wsporników wałów śrubowych (rys. 1a), które połączono metodą nitowania. Do wykonania konstrukcji podstawowej kadłuba kutra zastosowano blachy ze stopu 5019 H24 (umocnionego przez zgniot na zimno). Na etapie wyboru materiału na kadłub oceniano między innymi jego odporność na erozję kawitacyjną [10]. 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 oraz wyginane z blachy w stanie utwardzonym. 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 przyczynić się do obniżenia ogólnej wytrzymałości kadłuba (rys. 2a, b).



Rys. 1. Konstrukcja okrętów projektu: a) nr 663 — kutra torpedowego;
b) nr 620 — korwety ZOP (dozorowiec)

Źródło: M. Wińcza, *Polskie kutry torpedowe z kadłubami ze stopów aluminium*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2010.

Grodzie kutra wykonano z blach o grubości 3–6 mm, w zależności od ich położenia wewnątrz kadłuba. Kadłub był podzielony 35 grodziami na siedem przedziałów wodoszczelnych z gwarancją niezatapialności jednoprzędziałowej.



Rys. 2. Konstrukcja kadłuba kutra torpedowego proj. 6333:
a) układ wiązań ramowych rufowej części; b) przedział siłowni z widocznym fundamentem pod turbinę i wzmocnienie burt oraz dna

Źródło: M. Wińcza, Polskie kutry torpedowe z kadłubami ze stopów aluminium, wyd. cyt.

Rodzaj spawania w osłonie gazów obojętnych był dostosowany do typu spoin (czołowe lub pachwinowe). Czołowe spoiny zewnętrzne (od strony wody) wykonywane były metodą TIG (ze względu na mikroporowatość spoin wykonywanych metodą MIG), a pozostałe spoiny pachwinowe wewnątrz nadbudówki wykonano metodą MIG. Wiele trudności przyniosło opanowanie pękania spoin pachwinowych (głównie w kraterach) szczególnie w pierwszej serii kadłubów. Opanowano je poprzez nawiercanie i wycinanie kraterów.

KONSTRUKCJA NADBUDÓWKI

Technologia spawania aluminiowych nadbudówek opisywanych okrętów różniła się w szczegółach i była wynikiem upływu prawie dwudziestu lat w udoskonalaniu technologii spawania omawianych stopów [2, 5, 7]. Nadbudówka kutra torpedowego wykonana z blach ze stopu 5086 (AlMg4Mn) o grubości 3 mm rozciągała się między 8. a 26. wręgiem w kierunku rufy. Blachy o wymiarach 8000 x 1500 mm przed dalszym przetwarzaniem (gięcie, cięcie i spawanie) podlegały dekonserwacji i prostowaniu. Średnio zużywano około 45 t blachy i kształtowników na jeden okręt, co obecnie może świadczyć o kosztowności budowy. Spawanie blach ze stopów aluminiowych poprzedzone było zmechanizowanym ukosowaniem krawędzi, a kształtowanie odbywało się na specjalnie do tego celu wykonanej prasie hydraulicznej.

Sekcje płaskie były spawane na zaprojektowanym i wykonanym w stoczni stanowisku z dociskami hydraulicznymi. Maksymalna siła docisku wynosiła ~ 50 kN/mb. Wszystkie spoiny podlegały kontroli radiologicznej, która nie lokalizowała podstawowej wady w spoinach, jaką były tlenki, na których w czasie eksploatacji okrętu zarodkowały pęknięcia zmęczeniowe. Wysoki współczynnik przewodności cieplnej aluminium i jego stopów był powodem deformacji spawanych elementów konstrukcji, które eliminowano przez docisk. Odrębnym problemem, trudnym do wyeliminowania, okazały się deformacje względnie cienkiego poszycia kadłuba, wywołujące naprężenia znacznie przewyższające wartości 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 roztapiania powierzchni) pozwoliło na opanowanie sytuacji, wprowadzało jednak do konstrukcji dodatkowe strefy o obniżonej wytrzymałości.

Ten sam problem pojawił się dwadzieścia lat później, gdy po feralnym wodowaniu w stoczni zastosowano niewłaściwą technologię prostowania konstrukcji korwety (rys. 1b). Prostowanie konstrukcji stalowej kadłuba korwety było wykonane mało dokładnie, czego dowodem jest brak możliwości wycentrowania linii wałów (drżania całej konstrukcji przy określonych prędkościach), ale główny błąd popełniono przy prostowaniu konstrukcji nadbudówki. Niekontrolowana temperatura nagrzewania przekraczająca dopuszczalną ($200\text{--}230^\circ\text{C}$) spowodowała zmianę struktury stopu na dużych powierzchniach arkuszy. Efektem tego była intensywna korozja warstwowa nawet w środku dużych powierzchni blach poszycia wewnątrz nadbudówki [7].

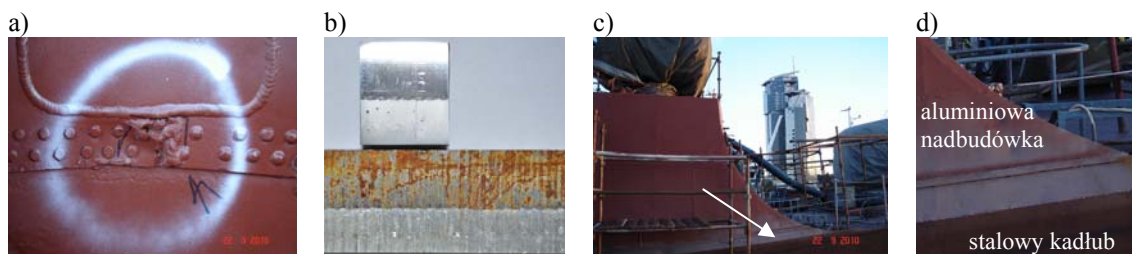
Wysokowytrzymały stop 7020, z którego wykonano nadbudówkę, miał zapewnić poprzez trzykrotnie mniejszy ciężar w stosunku do stali lepsze warunki statecznościowe (wysokość metacentryczna), dobrą odporność na korozję i właściwości mechaniczne porównywalne do właściwości stali kadłubowej zwykłej wytrzymałości. Niedopracowana technologia spawania stopu aluminium i przede wszystkim technologia prostowania [7, 8] w praktyce eksploatacyjnej spowodowały intensywną korozję i ubytki materiałowe oraz wzrost naprężeń wywołujących pęknięcia. W warunkach laboratoryjnych poddano ten stop i jego modyfikację (7020M) badaniom odporności korozyjnej i porównano ze stopami serii 5xxx (Al-Mg), z których wykonano między innymi nadbudówkę i kadłub kutra torpedowego. Jednokadłubowa

konstrukcja kadłuba kutra torpedowego typu ślizgowego wynikała z zakładanych prędkości pływania, przy ekstremalnym stanie morza 7–8 stopni i sile wiatru do 12 stopni w skali Beauforta.

PROBLEMY EKSPLOATACYJNE

W trakcie eksploatacji kutra torpedowego projektu 633 pojawiło się wiele problemów spowodowanych wadami i niedociągnięciami projektowo-wykonawczymi. Silniki przy prędkościach szczytowych generowały bardzo wysoki poziom hałasu (115–131 dB) we wszystkich pomieszczeniach okrętu, znacznie przekraczający wartości dopuszczalne. Deformacja poszycia kadłuba, szczególnie części dziobowej, świadczyła o bardzo wysokim poziomie przeciążeń, znacznie przekraczających projektowe wartości dopuszczalne wynoszące 9 g. Brak właściwej amortyzacji posadowienia silników był przyczyną silnych drgań i wibracji kadłuba. Te efekty na krótkiej, sztywnej konstrukcji powodują liczne pęknięcia i konieczność częstej kontroli konstrukcji kadłuba i nadbudówki. Wprowadza to dyskomfort dla załogi. Nawet zmniejszenie prędkości pływania przy stanie morza 5°B powodowało liczne pęknięcia kadłuba [13]. Problemy te były wynikiem nie tylko błędów projektowych, ale głównie następstwem złej jakości prac stoczniowych, zwłaszcza spawalniczych.

Podobne problemy występują podczas eksploatacji korwety. Obecna jej eksploatacja to ciągła doraźna lub stoczniowa regeneracja konstrukcji nadbudówki ze stopu aluminium powodowana pęknięciami spoin i korozją SWC. Wyrażna korozja elektrochemiczna na połączeniach nitowanych (rys. 3a) między stalową zębnicą i nadbudówką ze stopu aluminium była powodem wymiany na dużym obwodzie nadbudówki połączenia nitowanego na połączenie zgrzewane wybuchowo (rys. 3b — c).



Rys. 3. Stan po przeszło dwudziestoletniej eksploatacji korwety: a) połączenie stalowego kadłuba z nadbudówką ze stopu aluminium korwety proj. 620 — pęknięcia korozyjne w obszarze połączenia nitowanego; b) połączenie zgrzewane wybuchowe stal — stop aluminium; c, d) nowe połączenie wybuchowe stalowej zębnicy kadłuba z alumiuniową nadbudówką ze stopu aluminium

Źródło: Projekt badawczy NN 509 482438 (zdjęcia zrobiono podczas dokowania stoczniowego).

WYNIKI BADAŃ

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 i niedopracowana technologia spawania tego stopu aluminium w warunkach stoczniowych spowodowała podczas eksploatacji intensywną korozję i ubytki materiałowe. Zmienne obciążenia, jakim podlega kadłub, spowodowały koncentrację naprężeń, które doprowadziły do licznych pęknięć. Intensywne wibracje linii wałów przenoszone szczególnie na konstrukcje nadbudówki w połączeniu z udarowym oddziaływaniem podczas wykorzystania uzbrojenia były kolejną przyczyną pęknięć. Eliminację tych niekorzystnych efektów rozpoczęto od modyfikacji materiału konstrukcyjnego, zmieniając jego skład chemiczny (zwiększono zawartość $Zn + Mg > 5,5$ oraz wprowadzono dodatki Cr i Zr). W warunkach laboratoryjnych poddano ten stop i jego modyfikację 7020M badaniom odporności korozyjnej i porównano ze stopem 5019 zastosowanym na konstrukcję kutra torpedowego.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne i odporność korozyjna stopów aluminium 7020M, 7020 oraz 5019

Stop aluminium	Statyczne właściwości mechaniczne $10^{-3} s^{-1}$			Odporność na korozję								
				w atmosferze morskiej		w wodzie morskiej						
				korozja w komorze solnej		korozja naprężeniowa dla $t = 1500$ h i poziomu naprężenia rozciągającego $\sigma_0 = 0,8 R_{0,2}$			korozja zmęczeniowa przy zginaniu obrotowo-giętnym dla $f = 50$ Hz i N cykli zmęczeniowych			
				R_m	$R_{0,2}$	A_5	K_{Rm}	K_{A5}	R_m'	$R_{0,2}'$	A_5'	powietrze $N = 10^5$ $N = 10^6$
MPa	MPa	%	%	%	MPa	MPa	%	Z_{go}^{go} MPa	Z_{go}^{go} MPa	Z_{gok}^{gok} MPa	Z_{gok}^{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

* obróbka cieplna stopów serii 7xxx (Al-Zn-Mg) — T6xx — przesycanie $-450^\circ C/1,5$ h ($430^\circ C/45^\circ$), studzenie w gorącej wodzie $80^\circ C$ i dwustopniowe sztuczne starzenie $20^\circ C/6$ dni + sztuczne starzenie: $95^\circ C/15$ h + $150^\circ C/10$ h

** $u = 0,6$ — stopień umocnienia

Źródło: W. Jurczak, Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i odporność korozyjną stopów układu Al-Zn-Mg przeznaczonych na spawane konstrukcje okrętowe, PG, Gdańsk 1997; projekt badawczy nr 4824/T02/2010/38.

Stopień obniżenia właściwości mechanicznych badanych złączy spawanych stopów aluminium wyznaczono z równań:

$$K_{R_m} = \frac{1}{n} \sum \frac{R_{m_o} - R_{m_k}}{R_{m_o}} 100\%; \quad (1)$$

$$K_A = \frac{1}{n} \sum \frac{A_o - A_k}{A_o} 100\%, \quad (2)$$

gdzie:

R_{m_o} — wytrzymałość na rozciąganie przed ekspozycją korozyjną;

R_{m_k} — wytrzymałość na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej;

n — liczba próbek;

A_o — wydłużenie plastyczne materiału przed ekspozycją korozyjną;

A_k — wydłużenie plastyczne materiału po ekspozycji korozyjnej;

K_{R_m} — średnie procentowe zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej;

K_A — średnie procentowe zmniejszenie wydłużenia plastycznego po ekspozycji korozyjnej.

Materiały rodzime rozpatrywanych stopów wykazują znaczne różnice właściwości mechanicznych. Z tabeli 1. wynika, że duża dysproporcja (100–200 MPa) we właściwościach wytrzymałościowych występuje między stopem 5019 (hydranalium) a stopem 7020 oraz jego modyfikacją 7020M (konstruktales). Fakt ów powoduje, że właściwości plastyczne (A_5) tych wysokowytrzymałych stopów są niższe, ale mieszczą się w dopuszczalnych granicach „Przepisów Budowy Okrętów” i „Przepisów Polskiego Rejestru Statków”. Badania dowiodły, że dodatki Cr i Zr wpłynęły na polepszenie jego właściwości [1].

Wytrzymałość zmęczeniową materiału konstrukcji kadłuba i nadbudówki podczas eksploatacji, czyli pracy okrętu na fali, określa się w warunkach laboratoryjnych poprzez przeprowadzanie badań dotyczących między innymi wyznaczania granicy zmęczeniowej (Z_{go}) i zmęczeniowo-korozyjnej (Z_{gok}). Wyniki tych badań (pokazane w tabeli 1.) są podstawą do względnego wyznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej wskutek oddziaływania korozji przy $N = 10^6$ cykli naprężeń opisanego równaniem:

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

Uzyskane wyniki wskazują nieco lepszą odporność na zmęczenie korozyjne stopu 5019 ($k = 10\%$) w stosunku do stopów 7020 ($k = 11\text{--}21\%$), dlatego stopy

Al-Zn-Mg wymagają lepszego zabezpieczenia antykorozyjnego. Procentowe obniżenie wytrzymałości K_{Rm} i plastyczności K_{A5} w wyniku korozyjnego oddziaływania wody i atmosfery morskiej dla konstruktali jest zbliżone, ale wyższe od hydronaliów, co wykazano w wielu publikacjach [1, 2, 6].

Stopy układu 7xxx mają 4,5–5% Zn w złączach spawanych samorzutnym umacnianiem wydzieleniowym po zakończeniu spawania [1, 6]. Oznacza to, że od 7 do 30 dni po spawaniu złącze zyskuje lepsze właściwości wytrzymałościowe i co najważniejsze są one znacznie wyższe niż dla hydronaliów [1]. Tych stopów ze względu na gorące pęknięcia spawalnicze (określone współczynnikiem K_p wg próby P. T. Houldcrofta dla próby „rybi szkielet”) nie można łączyć spoiwem o tym samym składzie chemicznym co materiał rodzimy. W praktyce stoczniowej do spawania stopów serii 7xxx zaleca się spoiwa AlMg5Zr0,3Be, AlMg5, AlMg4Zn2ZrBe, AlMg5Ti [7]. Współczynnik skłonności do pęknięć spawalniczych określamy z równania:

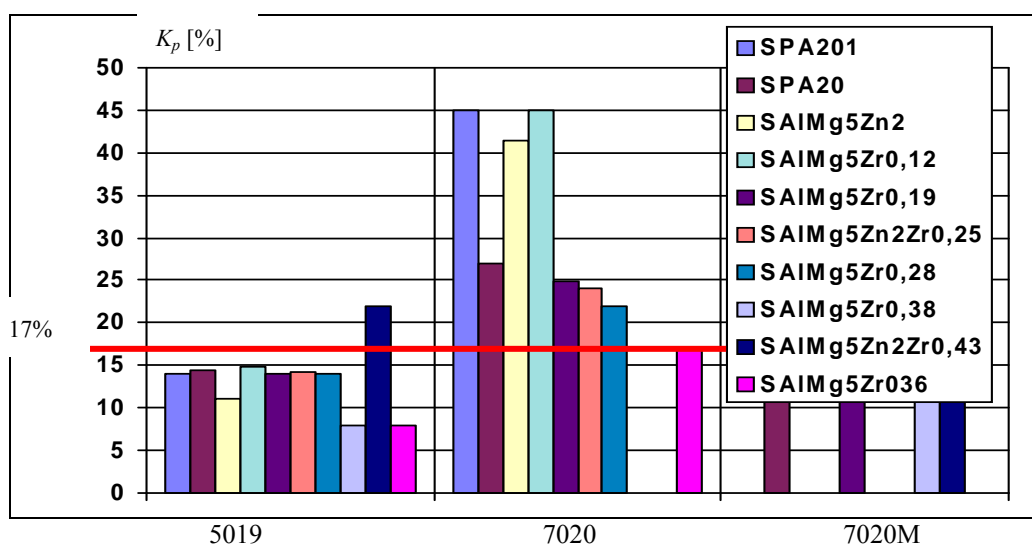
$$K_p = (L_p/L) 100\%, \quad (4)$$

gdzie:

L_p — długość pęknięć spoiny [mm];

L — całkowita długość spoiny [mm]

Dobór składu chemicznego spoiwa do spawania okrętowych stopów aluminium przyjęto wg kryterium Houldcrofta, w którym podatność do gorących pęknięć spawalniczych została określona dopuszczalnym współczynnikiem $K_p = 17\%$ (rys. 4.) [7].



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

Źródło: W. Jurczak, Wpływ składu..., wyd. cyt.; projekt badawczy nr 4824/T02/2010/38.

Na podstawie rysunku 4. można zauważyć, że ze wzrostem zawartości cynku w spoinie współczynnika skłonność do pęknięć spawalniczych stopu 7020M zmniejsza się. Natomiast dodanie do spoiwa cynku powoduje wzrost wartości tego współczynnika. W zestawieniu ze stopem 7020 stop 7020M wykazał mniejszą skłonność do pęknięć spawalniczych (mniejsza wartość K_p). Największą podatność do gorących pęknięć spawalniczych (nie została pokazana na rys. 5. $1/K_p \approx 40\%$) wykazał stop 7020M spawany spoiwem o składzie chemicznym identycznym jak materiał rodzimy. Potwierdzenie tego faktu można znaleźć również w [1]. Zawartość Zn + Mg > 7% zarówno w materiale rodzimym, jak i w spoiwie decydowała głównie o wysokim współczynniku K_p , pomimo modyfikatorów (tj. Mn, Cr, Zr, Ti, Be), które wpływają na obniżenie K_p .

Regułą jest, że dla stopów 5xxx spoiwo ma zbliżony skład chemiczny do spawanego materiału, zapewniając brak gorących pęknięć spawalniczych i niewielkie pogorszenie odporności na korozję w SWC złącza [1].

Tabela 2. Właściwości mechaniczne i odporność korozyjno-naprężeniowa złączy spawanych wybranych okrętowych stopów aluminium wykorzystanych przy budowie okrętów projektu 633 i 620 oraz najnowszego stopu 7020M w dwóch wytopach ozn. 507 i 635

Lp.	Wytop	Grubość blach g [mm]	Własności mechaniczne							
			rodzaj obróbki cieplnej	R_m [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	K_{Rm} [%]	K_A [%]	Liczba i średni czas do pęknięcia próbki
Właściwości mechaniczne złączy spawanych stopu 7020M wykonanych przy użyciu spoiwa SPA 20 po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej										
1	507	6		273	–	4,2	–	13,3	16,3	–
	635			262	–	4,5	–	18,6	33,8	–
2	507	12		282	–	3,1	–	7,9	45,6	–
	635			271	–	4,8	–	16,1	48,9	–
Właściwości mechaniczne złączy spawanych stopu 7020 wykonanych przy użyciu różnych spoiw SPA20 i SPA201 po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej										
3	SPA20 (SAIMg5Ti0,1)			268	170	9	–	6,3	18,2	8/20 570 h
4	SPA201 (SAIMg5r0,3Be)			278	203	9	–	11,5	25	0/9
Właściwości mechaniczne złączy spawanych stopu 5019 wykonanych przy użyciu spoiwa SPA20 po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej										
5	SPA20 (SAIMg5Ti0,1)			176	110	14		3	11	0/5 1500 h

Źródło: Projekt badawczy nr 4824/T02/2010/38.

Modyfikacja stopu 7020 poprzez dodatek Cr, Zr i ograniczenie zawartości Mn oraz wzrost $Zn + Mg > 5,5\%$ spowodowała polepszenie właściwości mechanicznych materiału rodzimego i złączy spawanych stopu opisanego cechą 7020M. Wytrzymałość zmęczeniowa złączy spawanych stopów użytych do budowy kadłuba i nadbudówki podczas eksploatacji, czyli pracy okrętu na fali, są znacznie gorsze niż materiału rodzimego [6]. Wyniki tych badań pokazane w tabeli 3. pokazują, że współczynnik k opisany równaniem (3) dla połączenia spawanego stopu 5019 wynosi $k = 15\%$, a dla stopów 7020 $k = 38\text{--}40\%$. Obecnie ze stopu 7020, 7020M i 5019 jest to główny obszar zabiegów antykorozyjnych mających na celu eliminację pęknięć zmęczeniowo-korozyjnych.

Tabela 3. Odporność zmęczeniowo-korozyjna złączy spawanych wybranych okrętowych stopów aluminium wykorzystanych przy budowie okrętów projektu 663 i 620 oraz najnowszego stopu 7020M

Oznaczenie spoiwa	Wytrzymałość zmęczeniowa $f=50$ Hz				Zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej
	w powietrzu		w 3% r.w. NaCl		wskutek korozji
	$N = 2 \times 10^4$ Z_{go} [MPa]	$N = 10^6$ Z_{go} [MPa]	$N = 2 \times 10^4$ Z_{go} [MPa]	$N = 10^6$ Z_{gok} [MPa]	$N = 10^6$ c.n. $k = \frac{Z_{go} - Z_{gok}}{Z_{go}} 100$ [%]
Złącze spawane stopu 7020M					
SPA201/SAlMg5Zr0,3Be	252	141	235	87	38,3
SPA20/SAlMg5Ti	223	165			
Złącze spawane stopu 7020					
SPA201/SAlMg5Zr0,3Be	214	156	168	93	40
SPA20/SAlMg5Ti	260	150			
Złącze spawane stopu 5019					
SPA201/SAlMg5Zr0,3Be	137	90	123	76	15,5
SPA20/SAlMg5Ti	158	118	128	80	32,2

Źródło: Projekt badawczy nr 4824/T02/2010/38.

WNIOSKI

1. Okrętowe stopy aluminium serii 7xxx (bez dodatku Cu) wykazują znacznie lepsze właściwości wytrzymałościowe od stopów serii 5xxx.
2. Zwiększenie sumarycznej zawartości $Zn + Mg > 5,5\%$ w stopach serii 7xxx zwiększa właściwości wytrzymałościowe, ale obniża odporność na korozję w wodzie i atmosferze morskiej oraz obniża odporność korozyjno-naprężeniową.
3. Stopy serii 7xxx, a w szczególności stop 7020M o zwiększonej zawartości Zn i Mg, wykazują większą podatność na korozję i obniżenie wytrzymałości zmęczeniowo-korozyjnej.

4. Dodatek Cr i Zr ma niewielki wpływ na podwyższenie odporności korozyjnej stopu 7020M, w którym zawartość Zn decyduje o jego wytrzymałości oraz odporności zmęczeniowej i zmęczeniowo-korozyjnej.
5. Podczas spawania stopów serii 7xxx w celu zapewnienia wymaganej jakości połączeń spawanych należy ściśle przestrzegać technologii spawania i właściwego doboru składu chemicznego spoiwa (SPA20 i SPA201). Hydronalia można spawać spoiwem o zbliżonym składzie chemicznym do materiału rodzimego. Praktyka stoczniowa wykazała, że podgrzewanie przed spawaniem krawędzi blach badanych stopów poprawia ich spawalność.
6. Właściwości mechaniczne i odporność na korozję (ogólną, naprężeniową i zmęczeniową) złączy spawanych badanych stopów zależą od składu chemicznego spoiwa i technologii spawania.
7. Najślabszym obszarem połączeń spawanych stopów serii 7xxx jest SWC, gdzie lokalizuje się intensywna korozja wywołana oddziaływaniem korozyjnym środowiska morskiego i obciążeń eksploatacyjnych.
8. Doraźne naprawy spawanych elementów konstrukcji ze stopu aluminium powinny być poprzedzone właściwym doбором stopu aluminium, spoiwa i grubości blach oraz właściwym przygotowaniem do spawania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Aluminium and aluminium alloys*, ASM Specialty Handbook, ASM International, 1993.
- [2] Bugłacki H., *Wpływ obróbki cieplnej oraz składu chemicznego spoiw na własności mechaniczne i korozję naprężeniową stopu AlZn5Mg1 w spawanych konstrukcjach okrętowych*, rozprawa doktorska, PG, Gdańsk 1981.
- [3] Bujniewicz Z., Cudny K., Wińcza M., Mańkowski S., *Konstrukcje okrętowe ze stopów aluminium*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1976.
- [4] Cieślak J., *Dozorowiec ORP „Kaszub” ćwierć wieku pod „biało-czerwoną”*, „Morze, Statki i Okręty”, 2012, nr 4.
- [5] Cudny K., Puchaczewski N., *Stale i stopy aluminium stosowane na kadłuby okrętowe*, Wyd. Marpress, Gdańsk 1996.
- [6] Cudny K., Puchaczewski N., *Stopy metali na kadłuby okrętowe i obiekty oceanotechniczne*, PG, Gdańsk 1995.
- [7] Cudny K., *Technologia konstrukcji okrętowych ze stopów aluminium*, PG, Gdańsk 1995.
- [8] *Ekspertyza pęknięć korozyjnych na ORP „Kaszub”*, Oddział Metali Lekkich, Kraków 1989.

- [9] 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*.
- [10] Fila J., *Wpływ procesów technologicznych na erozję stopów AlMg5 (PA3) stosowanych do budowy jednostek szybkich*, praca doktorska, PG, Gdańsk 1969.
- [11] Gwóźdź M., *Wymiarowanie konstrukcji spawanych wykonanych z umocnionych zgniotowo stopów aluminium*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2010.
- [12] Jurczak W., *Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i odporność korozyjną stopów układu Al-Zn-Mg przeznaczonych na spawane konstrukcje okrętowe*, PG, Gdańsk 1997.
- [13] Makowski T., Rochowicz R., *Polskie kutry torpedowe — jednostki seryjne*, „Morze, Statki i Okręty”, 2006, nr 2.
- [14] Mazzolani F. M., *Aluminium Alloy Structures*, E&FN SPON, Chapman & Hall, London 1994.
- [15] Projekt badawczy nr 4824/T02/2010/38.
- [16] Wińcza M., *Polskie kutry torpedowe z kadłubami ze stopów aluminium*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2010.

CORROSION-STRESS AND FATIGUE-CORROSION STRENGTH OF MARINE ALUMINUM ALLOYS AND THEIR WELDABILITY

ABSTRACT

The paper presents the results of investigations of mechanical properties and corrosion strength of axial tension (stress corrosion) and rotational-flexural bending (fatigue corrosion) in aluminum alloys, series 5xxx and 7xxx used in ship structures. The Polish Navy used seven fast torpedo boats made exclusively from alloys series 5xxx, and at present one Polish corvette, project 240, with superstructure made from weldable alloy 7020 is operated within the NATO force. Alloys series 7xxx have high strength properties but lower corrosion resistance than alloys 5xxx. The paper shows the results of the investigations on weldability of these alloys as well as the results of investigations on the newest alloy 7020M in relation to fatigue strength and corrosion resistance as an alternative for up to now used aluminum alloys.

Keywords:

corrosion resistance, stress corrosion, fatigue corrosion, ship aluminum alloys, weldability.