Krzysztof Dudzik
Akademia Morska w Gdyni

PODATNOŚĆ NA KOROZJĘ NAPRĘŻENIOWĄ ZŁĄCZY SPAWANYCH ŁUKOWO STOPU AW 5059 ALUSTAR

W artykule omówiono metody spawania łukowego w osłonie gazów obojętnych (MIG, TIG) stopów aluminium, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań stawianych w przemyśle okrętowym. Zaprezentowano technologię spawania metodą MIG oraz parametry wykonywania spoin doczołowych tą metodą stopów aluminium. Omówiono główne problemy występujące podczas spajania stopów aluminium. Przedstawiono wyniki badań podatności na korozję naprężeniową złączy spawanych metodą MIG stopu AW 5059 ALUSTAR (AlMg5Mn0,7). Badania korozji naprężeniowej wykonano, stosując próbę odkształcenia z małą prędkością (10^{-6} s^{-1}), zgodnie z PN-EN ISO 7539-7.

WSTĘP

Stopy aluminium to materiał szeroko wykorzystywany w światowym przemyśle. Na początku XX wieku zaczęto je stosować w przemyśle lotniczym ze względu na możliwość obniżenia masy ówczesnych konstrukcji. Niebagatelną zaletą była także znacznie większa odporność na korozję w porównaniu ze stalą. Tuż po II wojnie światowej stopy aluminium zaczęto stosować w przemyśle samochodowym. Jako materiał służący do budowy bloków silników wykorzystywany był już wcześniej, ale nigdy nie użyto go do budowy całego samochodu (poza próbami w sporcie). Ponieważ po wojnie brakowało stali, a w Wielkiej Brytanii było wiele wysłużonych już samolotów, ich aluminiowe poszycie okazało się przydatne jako materiał do budowy samochodu Land Rover. Od tamtego czasu stopy aluminium zaczęto coraz częściej i chętniej stosować w przemyśle samochodowym i motocyklowym. Tak wielka ekspansja stopów aluminium nie ominęła także przemysłu okrętowego – zaczęto je wykorzystywać zwłaszcza do budowy małych statków i okrętów o dużej prędkości oraz nadbudówek i różnego wyposażenia okrętowego. Zapotrzebowanie na stopy aluminium do budowy kadłubów statków i okrętów wzrasta, gdyż stopy te umożliwiają znaczne zmniejszenie masy konstrukcji okrętowych w porównaniu z masą konstrukcji stalowych. Oprócz wymienionych korzyści stopy aluminium mają wiele innych zalet, które pozwalają na zastosowanie ich w budownictwie okrętowym.

Ze względu na to, że większość budowanych obecnie konstrukcji wymaga w większym lub mniejszym stopniu łączenia ze sobą wykonanych wcześniej elementów, konieczny stał się wybór odpowiednich metod spajania. Wyparcie z po-

wszechnego użycia konstrukcji nitowanych przez spawane skłoniło konstruktorów i inżynierów do udoskonalenia metod spawalniczych, aby spełniały one wymagania dotyczące jakości i wytrzymałości spoin.

1. PROBLEMY ZE SPAWALNOŚCIĄ STOPÓW ALUMINIUM

Główne trudności, jakie występują podczas spawania stopów aluminium, wynikają z:

- dużego powinowactwa aluminium do tlenu i powstawania trudno topliwego (2060°C) tlenku Al_2O_3,
- wysokiej przewodności cieplnej,
- dużej rozszerzalności stopów aluminium,
- dużego skurczu odlewniczego (przyczyna odkształceń i naprężeń spawalniczych),
- znacznych spadków wytrzymałości w temperaturach spawania,
- utraty w czasie spawania pierwiastków stopowych takich jak magnez, cynk czy lit [5].

Podstawowym problemem przy spawaniu jest konieczność usunięcia warstewki tlenku aluminium. Problemy spawalnicze może sprawić również duża różnica temperatur topnienia Al i Al_2O_3 (odpowiednio 660 i 2060°C), a także większy ciężar właściwy tlenku (4 g/cm^3) od ciekłego metalu (2,4 g/cm^3). W rezultacie tego cząstki Al_2O_3 opadają na dno spoiny, powodując jej porowatość.

Wysoka rozpuszczalność wodoru w ciekłym aluminium i praktycznie brak rozpuszczalności w stanie stałym mogą powodować w złączach spawanych z przetopem obecność pęcherzy gazowych [1, 5, 7].

Kolejny problem stanowi duża przewodność cieplna aluminium, która z jednej strony utrudnia miejscowe nagrzanie metalu do temperatury topnienia, a z drugiej powoduje szybkie chłodzenie materiału – w wyniku tego w spoinie powstają wysokie naprężenia spawalnicze, mogące z łatwością doprowadzić do zniszczenia złącza. Wysokie przewodnictwo cieplne aluminium powoduje konieczność zwiększenia energii liniowej spawania. W konwencjonalnych metodach spawania stopów aluminium (MIG, TIG) prowadzi to do powstawania szerokiej strefy wpływu ciepła wokół spoiny.

Negatywnie wpływa również niska wytrzymałość aluminium w temperaturach wyższych od ok. 500°C, powodująca występowanie pęknięć gorących, a także duża rozszerzalność cieplna skutkująca powstawaniem znacznych naprężeń i pękaniem spoin [3, 4].

Z powodu braku zmiany barw przejściowych przy podgrzewaniu aluminium trudno jest określić stopnień nagrzania metalu i bliskości punktu topienia – to znacznie utrudnia wykonanie prawidłowego złącza.

W czasie spawania łukowego w osłonie gazów ochronnych wyrobów wykonanych ze stopów Al-Mg przerobionych plastycznie, wskutek procesu spawania

powstaje gruboziarnista struktura lana materiału spoiny oraz następuje rekrystalizacja struktury materiału spawanego i zmiana właściwości mechanicznych w strefie wpływu ciepła (SWC) [6]. Właściwości użytkowe złączy spawanych zależą od technologii spawania, użytego do spawania spoiwa oraz od stopnia zgniotu materiału spawanego [4]. Skład chemiczny drutów spawalniczych stosowanych do spawania stopów aluminium przerobionych plastycznie, wykorzystywanych w okrętownictwie, powinien być dostosowany do materiału podstawowego, aby zapewnić dobrą jakość połączenia i odporność na korozję. Według [4] skład chemiczny materiałów dodatkowych do spawania stopów aluminium przerobionych plastycznie powinien odpowiadać następującym wymaganiom: Cu < 0,10%, Mg < 4,5–5,5%, Si < 0,60%, Fe < 0,50%, Mn < 1,0%, Zn < 0,20%, Cr < 0,40%, Ti + Zr < 0,2%, Al – pozostałe.

W praktyce przemysłowej spawanie stopów aluminium cieplnie nieobrabialnych grupy 3xxx i 5xxx oraz cieplnie obrabialnych grupy 6xxx i 7xxx wykonuje się najczęściej w osłonie czystego argonu (o czystości 99,98%). Do spawania można zastosować elektrodę topliwą – metoda MIG, lub elektrodę nietopliwą – metoda TIG.

2. CHARAKTERYSTYKA SPAWANIA ŁUKOWEGO W OSŁONIE GAZU OBOJĘTNEGO (MIG, TIG)

Łuk prądu stałego dodatniej biegunowości, jarzący się w osłonie argonu, charakteryzuje się zdolnością rozpylania błonki tlenków aluminium. Właściwość tę wykorzystano przy metodzie MIG (*Metal Inert Gas*), zastępując nietopliwą elektrodę wolframową stosowaną w metodzie TIG (*Tungsten Inert Gas*) elektrodą topliwą, która równocześnie spełnia rolę spoiwa. Łuk elektryczny jarzy się między materiałem spawanym a mechanicznie podawanym szybko stapiającym się drutem aluminiowym o średnicy 1,2–2,4 mm. Gęstość prądu powinna zawierać się w granicach 100–175 A na każdy mm średnicy elektrody, wywiera bowiem zasadniczy wpływ na postać płynnego spoiwa przechodzącego z elektrody na materiał spawany oraz na stabilność łuku.

Dzięki bardzo dużej szybkości spawania jest to obecnie jedna z najekonomiczniejszych metod spawania.

Zastosowanie metody MIG ograniczano kiedyś wyłącznie do połączeń mniej odpowiedzialnych ze względu na mikroporowatość spoin, a tym samym spadek wytrzymałości. Dzięki nowoczesnej aparaturze spawalniczej oraz coraz lepszym jakościowo materiałom spawalniczym obecnie połączenia wykonane metodą MIG są wystarczająco dobre pod względem wytrzymałościowym.

Zarówno spawanie półautomatyczne, jak i automatyczne umożliwia wykonywanie spoin we wszystkich pozycjach, włącznie z pozycją pionową i naścienną. Sprzyja temu małe i szybko krzepnące jeziorko kąpieli metalowej.

3. PRZYGOTOWANIE DO SPAWANIA

Minimalna grubość blach, które można spawać metodą MIG, wynosi 4 mm. Spawanie blach cieńszych wymagałoby podawania przewodem wężowym do uchwytu drutów elektrodowych o średnicach poniżej 1,6 mm, co ze względu na małą sztywność oraz wysoki współczynnik tarcia metali lekkich jest bardzo kłopotliwe albo wprost niemożliwe z powodu częstego zakleszczania się drutu w układzie podawania. Przy spawaniu automatycznym dolną granicę grubości blach można jednak obniżyć do 2 mm, a nawet więcej, ponieważ istnieją wówczas warunki do skrócenia drogi od podajnika drutu do dyszy elektrodowej. Taką możliwość daje także zastosowanie specjalnie przystosowanych półautomatów z podajnikiem oraz bębnem elektrodowym, zabudowanymi wprost na uchwycie.

Metoda MIG umożliwia podczas spawania uzyskanie głębokiego przetopu, dlatego blachy o grubościach do 6 mm nie wymagają ukosowania. Należy jedynie pozostawić około 1 mm odstępu między krawędziami. W granicach 6–15 mm krawędzie blach ukosuje się na V (kąt 70°) , przy czym próg powinien wynosić 2–5 mm, a odstęp między krawędziami 1–2 mm. Gdy istnieje możliwość dwustronnego spawania, blachy o grubościach powyżej 15 mm należy ukosować na X (kąt 70°) z 2–3-milimetrowym progiem. Poza koniecznością ukosowania krawędzi blach wymagane jest także dokładne ich odtłuszczenie i oczyszczenie, natomiast drut elektrody musi być wytrawiony.

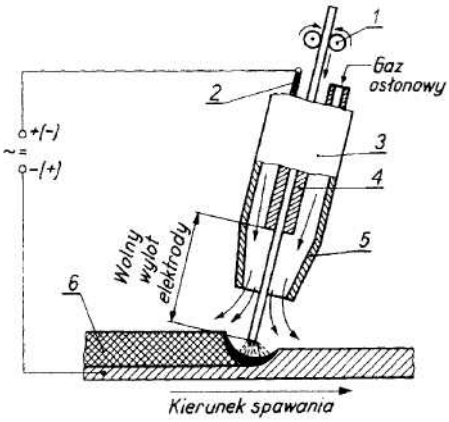
4. TECHNIKA SPAWANIA

W metodzie MIG elektroda topliwa (drut) jest przesuwana za pomocą podajnika przez ślizg podłączony do bieguna źródła prądu. Drut przechodzi przez dyszę, do której doprowadzony jest gaz osłonowy. Zadaniem doprowadzanego do dyszy gazu jest zabezpieczenie przestrzeni łuku przed dostępem powietrza z otaczającej atmosfery. Stapiająca się w łuku elektrycznym elektroda topliwa, czyli drut, stanowi materiał dodatkowy, który łącznie z ciekłym metalem nadtopionych brzegów spawanych elementów tworzy spoinę.

W metodzie MIG gaz ochronny dobierany jest w zależności od rodzaju materiału rodzimego. Dla stopów aluminium stosuje się czysty argon lub mieszankę helu z argonem. Odpowiedni dobór gazu (mieszanki gazowej) ma na celu uzyskanie bardziej stabilnego jarzenia się łuku. Zadaniem dyszy gazowej jest zapewnienie stabilnego przepływu gazu, osłaniającego obszar spawania. W metodzie tej zużycie gazu jest stosunkowo duże (10–15 litrów/min) [7].

Niezależnie od grubości łączonych krawędzi najkorzystniej jest spawać od strony lewej do prawej. Uchwyt spawalniczy powinien być ustawiony prawie prostopadle do blach (kąt odchylenia pistoletu nie większy niż 15–20°). Spawać należy bez przerw i możliwie krótkim łukiem (odległość dyszy gazowej pistoletu od

materiału nie powinna przekraczać 20 mm). Elementy o grubościach powyżej 6 mm zaleca się spawać wielowarstwowo. Stosując tę metodę, można spawać w pozycjach poziomej, pionowej i naściennej. Parametry spawania podano w tabeli 1.



Rys. 1. Schemat spawania metodą MIG [8]; 1 – podajnik drutu, 2 – przewód prądowy, 3 – palnik, 4 – końcówka prądowa, 5 – dysza gazowa, 6 – spoina

Tabela 1

Parametry czołowego spawania metali lekkich metodą MIG [2]

Grubość materiału [mm]	Średnica drutu elektrodowego [mm]	Natężenie prądu* [A]	Napięcie łuku [V]	Szybkość podawania drutu elektrodowego [m/min]	Zużycie argonu [l/min]	Szybkość spawania [mm/min]
2	0,8	90–130	22–24	7,5	12	700
3	1,0	100–150	22–24	6,0	14	650
4	1,2	150–200	24–25	5,0	14	600
5	1,6	180–240	24–25	4,6	15	600
6	1,6	220–270	24–25	5,0	15	600
8	2,0	250–300	25–26	4,8	18	550
10	2,0	280–320	26–28	5,0	18	500
12	2,4	300–370	26–28	3,8	18	450
20	2,4	350–400	26–28	4,0	20	300

* Spoiny pachwinowe wykonuje się przy natężeniach prądu wyższych o ok. 10–20%

5. METODYKA BADAŃ

Badano stop aluminium stosowany na konstrukcje morskie: AW 5059 H321 ALUSTAR (AlMg5Mn0,7). Jego skład chemiczny w % mas. podano w tabeli 2.

Tabela 2

Skład chemiczny stopu AW 5059

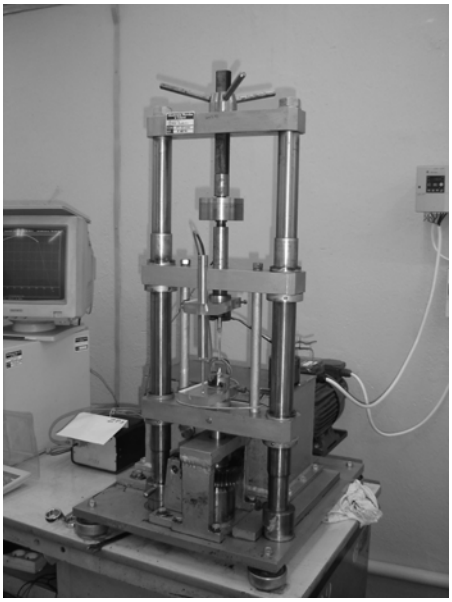
Skład chemiczny [%]													
Si	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Cr**	**Zn**	**Ti**	**B**	**Zr**	**Ni**	**Sn**	**Be**	**Al**
0,037	0,09	0,01	0,76	5,41	0,003	0,57	0,024	0,001	0,11	0,004	0,001	0,005	reszta

Blachy o grubości *g* równej 12 mm były ukosowane na „X", a następnie spawane metodą MIG. Do spawania wykorzystano drut o średnicy *d* równiej 1,2 mm gatunku AA 5183. Skład chemiczny stopu użytego na drut spawalniczy w % mas. przedstawiono w tabeli 3. Spawanie przeprowadzono w osłonie argonu o czystości wynoszącej 99,99%.

Tabela 3

Skład chemiczny stopu zastosowanego na drut spawalniczy

Skład chemiczny [%]							
Mg	**Zn**	**Cu**	**Si**	**Fe**	**Mn**	**Ti**	**Al**
4,8	0,001	0,001	0,04	0,12	0,6	0,006	reszta



Rys. 2. Stanowisko do badania korozji naprężeniowej

Badania odporności na korozję naprężeniową wykonano stosując próbę odkształcania z małą prędkością $\dot{\varepsilon} = 1{,}6 \times 10^{-6}\ s^{-1}$ zgodnie z PN-EN ISO 7539-7, na stanowisku zbudowanym w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Akademii Morskiej w Gdyni. Widok stanowiska przedstawia rysunek 2.

Zastosowano próbki cylindryczne gładkie o średnicy d równej 5 mm o długości pomiarowej l_0 równej 50 mm. Próbki przed badaniami były odtłuszczone. Badania wykonano w powietrzu oraz 3,5-procentowym wodnym roztworze NaCl. Parametrami mierzonymi podczas badań były: wydłużenie względne w momencie zniszczenia próbki A_{10} [%], maksymalna siła $F_{\max}$ [kN], maksymalne naprężenie $R_{\max}$ [MPa], energia właściwa zniszczenia E [MJ/m^3], przewężenie w momencie zniszczenia próbki Z [%], czas trwania próby do zniszczenia próbki T [min].

6. WYNIKI BADAŃ

Podatność na korozję naprężeniową oceniono, porównując wartości średnie mierzonego parametru, uzyskane na identycznych próbkach eksponowanych w środowisku korozyjnym (zastępcza woda morska) i w powietrzu, według zależności:

$$K_x = [1 - (X_{SCC}/X_{pow})] \cdot 100\ [\%], \tag{1}$$

gdzie:
K_x – podatność na korozję naprężeniową,
X_{SCC} – parametr mierzony w środowisku korozyjnym,
X_{pow} – parametr mierzony w powietrzu.

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Wyniki badań korozji naprężeniowej stopu AW 5059 spawanego metodą MIG

Środowisko korozyjne	$F_{\max}$ **[kN]**	R_m **[MPa]**	**Energia właściwa [MJ/m^3]**	A_{10} **[%]**	Z **[%]**	T **[min]**
Powietrze	6,27	319,4	42,94	16,18	19,3	1440
3,5% roztwór NaCl	6,23	317,3	40,06	15,3	19,0	1386
Podatność na korozję naprężeniową K_x		K_{Rm} [%]	K_E [%]	K_A [%]	K_Z [%]	K_T [%]
		0,66	**6,70**	**5,43**	**1,55**	**3,75**

PODSUMOWANIE

Stopy Al-Mg, a szczególnie ich złącza spajane, podczas eksploatacji mogą ulegać różnym formom niszczenia w zależności od czynników zewnętrznych. Naj-

częściej występującą w eksploatacji i opisaną w literaturze formą niszczenia środowiskowego, prowadzącą często do zniszczenia (pękania) materiału, jest korozja naprężeniowa. Podatność na niszczenie środowiskowe ulega wyraźnemu zwiększeniu dla obszaru spoiny lub do niej przyległego. Degradacja złączy spawanych zależy od rodzaju stopu aluminium, materiału dodatkowego i technologii spawania.

Po przeprowadzeniu badań wykonano analizę uzyskanych wyników, polegającą na porównaniu ze sobą wyników uzyskanych podczas badań w powietrzu i w środowisku sztucznej wody morskiej. Porównane odpowiednie wartości tych samych wielkości uzyskane w różnych środowiskach zostały przeliczone i przedstawione w postaci podatności na korozję naprężeniową. Takie parametry jak wytrzymałość na rozciąganie czy przewężenie zmieniły się nieznacznie. Najbardziej widoczne zmiany zaszły w przypadku energii właściwej, która dla próbki eksponowanej w roztworze NaCl była niższa o blisko 7%, oraz wydłużenia, którego spadek osiągnął ok. 5,5%. Czas potrzebny do zniszczenia próbki w tym wypadku uległ skróceniu o 3,75%. Generalnie w wypadku badanego stopu AW 5059 ALUSTAR spawanego metodą MIG osiągnięte wyniki świadczą o bardzo dobrej odporności na korozję naprężeniową zarówno tego stopu, jak i jego połączeń spawanych.

Tak dobre wyniki uzyskane podczas badań świadczą o dopracowaniu technologii oraz prawidłowym doborze materiałów użytych podczas spawania blach.

LITERATURA

1. Anderson T., *The history of Aluminium Welding*, Svetsaren, 2004, vol. 59, no. 1, s. 60–62.
2. Bryś S., *Poradnik spawalniczy,* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
3. Bugłacki H., Neser G., *Właściwości złączy spawanych stopów aluminium stosowanych w budownictwie okrętowym,* Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, 2001, nr 5.
4. Bujniewicz Z., Cudny K., Wincza M., *Stopy aluminium w budownictwie okrętowym*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1971.
5. Cudny K., Puchaczewski N., *Stale i stopy aluminium stosowane na kadłuby okrętowe*, Marpress, Gdańsk 1996.
6. Czechowski M., *Własności złączy doczołowych blach ze stopów Al-Mg spajanych różnymi metodami,* Materiały i Technologie, 2003, nr 1(1), s. 16–19.
7. Gourd L.M., *Podstawy technologii spawalniczych,* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
8. Pilarczyk J., Pilarczyk J., *Spawanie i napawanie elektryczne metali*, „Śląsk" sp. z.o.o., Katowice 1996.

STRESS CORROSION CRACKING OF ARC WELDED JOINTS OF ALUMINIUM ALLOY AW 5059 ALUSTAR

Summary

The article presents methods of arc welding in inert gas cover (MIG, TIG) of alumiunim alloys, with special requirements of shipbuilding industry. There is shown technology of MIG welding method and parameters of butt joints of aluminium alloys making by this method. The main problems which appeared during aluminium alloys joining process were described. The results of stress corrosion cracking (SCC) of aluminum alloy AW 5059 ALUSTAR [AlMg5Mn0,7] by MIG welded were presented. Stress corrosion cracking was examined via the slow-strain-rate-testing (SSRT) according to EN ISO 7539-7.