

THE PROPERTIES OF AlZn5Mg1 (AW-7020) ALLOYS WELDED BY NEW TECHNOLOGY FRICTION STIR WELDING

Krzysztof Dudzik, Mirosław Czechowski

Gdynia Maritime University, Faculty of Marine Engineering
Morska Street 81-87, 81-225 Gdynia, Poland
tel.: +48 58 690 15 49, +48 58 690 13 46, fax: +48 58 6901399
e-mail: krys-r6@wp.pl

Abstract

The results of examining mechanical properties and stress corrosion cracking (SCC) of aluminum alloy AW 7020 [AlZn5Mg1] by friction stir welded were presented. Friction Stir Welding (FSW) - a new technology can be successfully used for butt welding of different types of aluminum alloy sheets. In the article the parameters for friction stir welding of sheets made of AlZn5Mg1 [7020] alloy was presented. Metallographic analysis of bonds showed a proper structural construction of the friction stir welded 7020 aluminum alloys. Stress corrosion cracking was examined via the slow-strain-rate-testing (SSRT) according to EN ISO 7539-7. The following parameters were measured: time-to-failure - T [h], obtained max. load - F [N]; strain energy (the diagram surface under the stress-elongation curve) - E [MJ/m³]; relative elongation of the specimen - A_{10} [%]; max. tensile stress - R [MPa] and narrowing - Z [%]. The tests were carried out on cylindrical notch-free specimens in the air and 3.5% water solution NaCl. Good resistance to stress corrosion was found of friction stir welded 7020 aluminum alloys. The tested samples cracked during SSRT test in the native material. Original value are received results of the stress corrosion resistance of new method friction stir welded AlZn5Mg1 alloy.

Keywords: aluminium alloys, friction stir welding (FSW), stress corrosion cracking, mechanical properties, slow-strain-rate-testing

WŁASNOŚCI ZŁĄCZY STOPU AlZn5Mg1 ZGRZEWANYCH TARCIOWO NOWĄ TECHNOLOGIĄ FSW

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych oraz podatności na korozję naprężeniową złączy zgrzewanych tarcioowo (FSW) stopu AW 7020 [AlZn5Mg1]. Nową technologię zgrzewania tarcioowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny FSW (Friction Stir Welding) można z powodzeniem stosować do zgrzewania doczołowego blach z różnego rodzaju stopów aluminium. Przedstawiono parametry zgrzewania tarcioowego (FSW) zastosowane do połączenia blach ze stopu AlZn5Mg [7020]. Analiza metalograficzna wykazała poprawną budowę strukturalną złączy zgrzewanych stopu aluminium 7020.

Badania korozji naprężeniowej wykonano stosując próbę odkształcenia z małą prędkością ($10^{-6} s^{-1}$), zgodnie z PN-EN ISO 7539-7. Parametrami mierzonymi podczas badań były: czas do zniszczenia - T [h], uzyskane maksymalne obciążenie - F [N], energia odkształcenia (powierzchnia wykresu pod krzywą naprężenie-wydłużenie) - E [MJ/m³], wydłużenie względne próbki - A_{10} [%], maksymalne naprężenia rozciągające - R [MPa] oraz przewężenie - Z [%]. Badania wykonano na próbkach gładkich cylindrycznych w powietrzu oraz sztucznej wodzie morskiej. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono dobrą odporność na korozję naprężeniową złącza stopu aluminium 7020 zgrzewanego metodą FSW. Oryginalnym osiągnięciem są otrzymane wyniki odporności na korozję naprężeniową złączy stopu AlZn5Mg1 zgrzewanych tarcioowo nową metodą Friction Stir Welding.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, zgrzewanie tarcioowe z przemieszaniem materiału zgrzeiny (FSW), korozja naprężeniowa, własności mechaniczne, próba odkształcenia z małą prędkością

1. Wprowadzenie

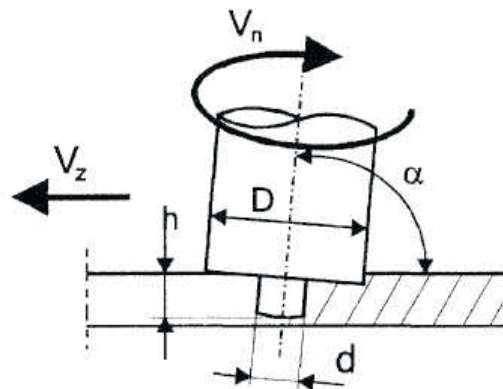
Od przeszło dwudziestu lat prowadzone są badania spawalnych stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo oraz umacnianych przez zgniot na zimno, przeznaczonych na lekkie spawane konstrukcje okrętowe [1-4]. Wśród spawalnych stopów aluminium do przeróbki

plastycznej najpopularniejsza pozostaje wciąż grupa stopów układu Al-Mg (seria 5xxx), o dobrej spawalności i względnie dobrych własnościach w warunkach eksploatacyjnych. Zaletą tych stopów jest ich względna niewrażliwość na korozję warstwową i korozję naprężeniową, wadą - mała wytrzymałość złączy spawanych, nie przewyższająca 300 MPa. W latach 90-tych duże zainteresowanie wzbudziły stopy układu Al-Zn-Mg (seria 7xxx). Charakteryzują się one wyższymi właściwościami wytrzymałościowymi od właściwości wytrzymałościowych stopów Al-Mg. Wadą stopów Al-Zn-Mg jest skłonność do korozji naprężeniowej i warstwowej. Wieloletnie badania wykazały, że na odporność tych stopów na korozję naprężeniową wpływa między innymi obróbka cieplna, skład chemiczny i technologia spawania (metoda spawania, rodzaj materiałów dodatkowych, rodzaj złącza) [1-2, 4-5]. Szczególnie wrażliwe na korozję są złącza spawane metodami MIG lub TIG, gdzie występuje znaczna niejednorodność strukturalna.

Dotychczasowe badania nad spawalnością i odpornością na korozję naprężeniową złączy spawanych stopów układu Al-Zn-Mg wykazały, że przy zastosowaniu spoiwa AlMg5Zr otrzymuje się w spoinie dobrą odporność na korozję naprężeniową [1-2]. Strefa wpływu ciepła złączy spawanych stopów Al-Zn-Mg ulega jednak w środowisku morskim korozji warstwowej, co szczególnie uwidacznia się w warunkach polaryzacji anodowej [1-2, 14]. Szerokość obszaru korozji warstwowej jest zależna od stanu obróbki cieplnej materiału rodzimego oraz technologii spawania (metoda MIG jest najkorzystniejsza, metoda TIG spawanie automatyczne - korzystna, metoda TIG spawanie ręczne - najszersza strefa korozji warstwowej) [1]. Praktycznie wszystkie złącza spawane, tradycyjnymi metodami MIG lub TIG, stopów tej grupy nie posiadają wystarczającej odporności na korozję naprężeniową lub korozję warstwową i dlatego wciąż jedynymi materiałami na kadłuby jednostek lekkich pozostają stopy grupy 5xxx Al-Mg.

Łączenie aluminium i jego stopów metodami spawalniczymi jest utrudnione ze względu na jego specyficzne własności. 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), znacznymi spadkami wytrzymałości w temperaturach spawania, utraty w czasie spawania pierwiastków stopowych takich jak magnez, cynk czy lit. Wymienione pokrótce główne trudności związane ze spawaniem stopów aluminium skłaniają do poszukiwania innych metod łączenia tych materiałów. Taką alternatywę łączenia doczołowego blach stanowi metoda zgrzewania tarcowego FSW.

Technologia zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny FSW (Friction Stir Welding) została opracowana i opatentowana w 1991r. w Instytucie Spawalnictwa (TWI) w Cambridge w Wielkiej Brytanii. W metodzie tej do nagrzewania i uplastyczniania materiału zastosowano narzędzie z obrotowym trzpieniem umieszczone w miejscu łączy dociśniętych blach. Po wprowadzeniu w ruch obrotowy narzędzia z trzpieniem, nagrzaniu ciepłem tarcia i uplastycznieniu materiału blach w bezpośrednim jego sąsiedztwie, następuje wolne przesuwanie się całego układu wzdłuż linii styku (Rys. 1).



Rys. 1 Schemat zgrzewania FSW [15]
Fig. 1. The diagram of FSW

FSW jest metodą zgrzewania w stanie stałym, dotychczas głównie aluminium oraz miedzi. Główną zaletą tej metody jest łatwość uzyskiwania złączy o wysokich, powtarzalnych własnościach [9-11]. Ponieważ jest to metoda zgrzewania w stanie stałym, poniżej temperatury topnienia materiału, własności wytrzymałościowe uzyskane tą metodą złączy mogą być wyższe, niż uzyskane technikami spawania łukowego (MIG, TIG).

Zastosowanie zgrzewania tarcowego jest możliwe pod warunkiem dobrej odporności na korozję połączeń zgrzewanych FSW w wodzie morskiej. Badania korozyjne przeprowadzone w stopach Al-Mg (serii 5000) wykazały dobrą odporność na korozję właśnie przy zastosowaniu nowoczesnych metod spajania, takich jak zgrzewanie metodą FSW czy spawanie wiązką elektronów [16]. Celem prezentowanej pracy było określenie podatności na korozję naprężeniową w roztworze chlorku sodu złączy zgrzewanych metodą FS stopu AlZn5Mg1(AW-7020).

2. Metodyka badań

Do badań użyto blach o grubości $g = 10$ mm wykonanych ze stopu aluminium EN AW-7020 przesyconego i starzonego (stan T6). Skład chemiczny stopu 7020 podano w Tab. 1.

Tab. 1. Skład chemiczny badanego stopu aluminium
Tab. 1. Chemical composition of 7020 aluminum alloy

| Skład chemiczny (% mas.) | | | | | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Zr | Al |
| 0,30 | 0,35 | 0,10 | 0,24 | 1,30 | 0,14 | 4,70 | 0,08 | 0,07 | reszta |

Złącza zgrzewano dwustronnie, doczołowo metodą FSW. Zastosowane parametry (Rys. 1) zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) zestawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Parametry zgrzewania FSW blach ze stopu 7020
Tab. 2. FSW parameters of 7020 aluminum alloy sheets

| Wymiary trzpienia | | | Kąt nachylenia narzędzia α [°] | Prędkość obrotowa trzpienia V_n [obr/min] | Prędkość liniowa zgrzewania V_z [mm/min] |
|-------------------|-----------|-----------|---|---|--|
| D [mm] | d [mm] | h [mm] | | | |
| 25 | 10 | 5,8 | 88,5 | 450 | 180 |

Badania budowy strukturalnej zgrzeiny wykazały jej poprawną budowę bez widocznych nieciągłości w obszarze materiału odkształconego plastycznie.

Badania korozji naprężeniowej przeprowadzono stosując próbę odkształcania z małą prędkością (Slow Strain Rate Testing - SSRT) zgodnie z PN-EN ISO 7539-7 [12]. Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku pomiarowym umożliwiającym rozciąganie próbek w środowisku korozyjnym, przy szybkości rozciągania od 10^{-3} do 10^{-7} s⁻¹. Do pomiaru wartości siły zastosowano tensometryczny czujnik siły FT-5307 o zakresie pomiarowym 16 kN, natomiast do pomiaru odkształcenia przetwornik PSz 20 o zakresie pomiarowym 20 mm i maksymalnej nieliniowości $E = 0,159\%$ dla $x = 10,00$ mm. Podatność na korozję naprężeniową (K) oceniano porównując wartości średnie mierzonych parametrów, uzyskanych na identycznych próbkach ekspozycyjnych na działanie środowiska korozyjnego (X_{SCC}) oraz obojętnego (X_{pow}), wg zależności (1).

$$K_x = [1 - (X_{SCC}/X_{pow})] \times 100 (\%) \quad (1)$$

Podczas badań rejestrowano komputerowo lub mierzono po zakończeniu pomiaru takie parametry, jak: wydłużenie względne w momencie zniszczenia próbki A_{10} [%], maksymalną siłę F_{max} [kN], maksymalne naprężenie R_{max} [MPa], względną energię zniszczenia E [MJ/m³] (powierzchnia

wykresu pod krzywą naprężenie - wydłużenie), przewężenie w momencie zniszczenia próbki Z [%], czas trwania próby do zniszczenia próbki T [godz.].

Próbie przeprowadzano na próbkach gładkich, cylindrycznych bez karbu. Próby wytrzymałościowe były wykonywane w zastępczej wodzie morskiej (PN-66/C-06502) o temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ oraz w środowisku obojętnym - suchym powietrzu, przy małych prędkościach odkształcania $\dot{\epsilon} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, aż do całkowitego zniszczenia próbki. Przed ekspozycją próbki były polerowane i odtłuszczone.

3. Wyniki badań

Wyniki otrzymane ze statycznej próby rozciągania stopu AW-7020 oraz złączy zgrzewanych FSW, wykonanych na próbkach płaskich (zgodnie z EN 895:1995), zamieszczono w Tab. 3. W Tab. 3 podano także właściwości mechaniczne złączy spawanych metodą MIG stopu 7020 oraz stopu AlMg4.5Mn (AW-5083), najczęściej obecnie stosowanego na konstrukcje morskie [13].

Wyniki prób SSRT przeprowadzonych w powietrzu (oznaczone - pow.) oraz w zastępczej wodzie morskiej (oznaczone - NaCl), dla próbek gładkich przedstawiono, dla poszczególnych mierzonych parametrów, w Tab. 4 w formie ich wartości średnich z 4-5 pomiarów.

Tab. 3. Właściwości mechaniczne materiału rodzimego i złączy zgrzewanych stopu AW-7020 (średnie z dwóch do czterech próbek)

Tab. 3. Mechanical properties of the native material and FSW joints AW-7020 alloy (average value from two-four specimens)

| Materiał | R_m [MPa] | $R_{p0.2}$ [MPa] | A_5 [%] |
|-----------------|----------------|---------------------|--------------|
| 7020/mat. rodz. | 373 | 317 | 14,2 |
| 7020/FSW | 367 | 314 | 13,8 |
| 7020/MIG | 315 | 283 | 8,2 |
| 5083/MIG | 282 | 206 | 15,1 |

Tab. 4. Wyniki z próby odkształcania z małą prędkością (SSRT)

Tab. 4. Slow strain rate test results

| Materiał | Środowisko | Wydłużenie A_{10} [%] | Przewężenie Z [%] | Energia względna E [MJ/m ³] | Czas do zniszczenia T [godz.] |
|----------|------------|----------------------------|----------------------|--|----------------------------------|
| 7020 | pow. | 8,77 | 48,3 | 26,87 | 12,45 |
| 7020 | NaCl | 8,77 | 45,8 | 27,1 | 12,04 |
| 7020/FSW | pow. | 7,32 | 48,65 | 19,32 | 9,86 |
| 7020/FSW | NaCl | 7,12 | 48,8 | 19,17 | 9,53 |

Podatność na korozję naprężeniową dla materiału rodzimego oraz dla złączy zgrzewanych metodą FSW przedstawiono w Tab. 5. Podatność na korozję naprężeniową określono porównując wartości średnie mierzonych podczas badań parametrów:

K_E - procentowe zmniejszenie energii zniszczenia,

K_T - procentowe zmniejszenie czasu do zniszczenia próbki,

K_A - procentowe zmniejszenie wydłużenia przy zniszczeniu próbki,

K_Z - procentowe zmniejszenie przewężenia.

Tab. 5. Podatność na korozję naprężeniową stopu 7020 i ich złączy zgrzewanych metodą FSW

Tab. 5. Stress corrodibility of FSW 7020 alloy

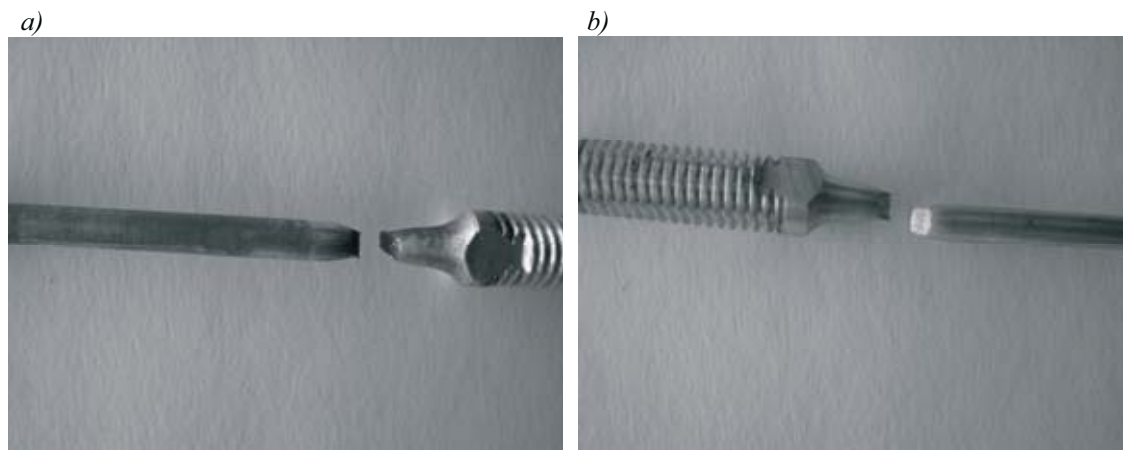
| Stop/metoda spajania | K_A [%] | K_Z [%] | K_E [%] | K_T [%] |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 7020 | 0 | 5.17 | 0 | 3.2 |
| 7020/FSW | 2,7 | 0 | 0,77 | 3,3 |

4. Podsumowanie

Badania własności mechanicznych pokazały, że właściwości wytrzymałościowe stopu 7020 zgrzewanego metodą FSW są wyższe w porównaniu z właściwościami wytrzymałościowymi złączy spawanych metodą MIG stopu 7020 oraz stopu AlMg4.5Mn0.7 (5083), najczęściej obecnie stosowanego w przemyśle okrętowym [13]. Zgrzeina charakteryzuje się brakiem typowych wad, właściwych dla metod spawania łukowego, takich jak np. pęcherze czy brak przetopu w złączy.

Na podstawie otrzymanych wyników badań, można stwierdzić, że stop AlZn5Mg1 zgrzewany tarciovo metodą FSW jest odporny na korozję naprężeniową w wodzie morskiej. Wartości poszczególnych mierzonych parametrów otrzymane w powietrzu i sztucznej wodzie morskiej dla złączy zgrzewanych tarciovo nie różnią się znacząco (Tab. 4-5). Wydłużenie próbek, wykonanych ze stopu 7020 zgrzewanych metodą FSW, rozciąganych w zastępczej wodzie morskiej, zmniejszyło się tylko średnio o 2.7% w porównaniu z tymi badanymi w powietrzu. Jeszcze mniejsze procentowe zmniejszenie uzyskano przy pomiarze przewężenia oraz względnej energii zniszczenia ($K_E = 0.77\%$).

Wysoką wytrzymałość złączy wykonanych metodą FSW potwierdza miejsce pęknięcia badanych próbek. Podczas próby odkształcania z małą prędkością (SSRT) pękały one w materiale rodzimym poza zgrzeiną. Dotyczy to zarówno próbek eksponowanych w powietrzu (Rys. 2a) jak również środowisku zastępczej wody morskiej (Rys. 2b).



Rys. 1. Widok próbek zgrzewanych tarciovo FSW po badaniu SSRT: a) w powietrzu, b) w NaCl
Fig. 1. Sight of specimens by FSW after SSRT: a) in the air, b) in the NaCl

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Złącza zgrzewane tarciovo nową metodą FSW stopu EN AW-7020 T6 wykazują większe właściwości wytrzymałościowe w porównaniu do właściwości złączy spawanych tradycyjną metodą MIG.
2. Złącza stopu EN AW-7020 T6 zgrzewane tarciovo metodą FSW wykazują małą podatność na korozję naprężeniową, określoną w próbie odkształcania z małą prędkością.

Literatura

- [1] Anderson, T., *New developments within the Aluminium Shipbuilding Industry*, Svetsaren, Vol. 58, No. 1, pp. 3-5, 2003.
- [2] Burłacki, H., *Wpływ technologii spawania na odporność korozyjną stopów Al-Zn-Mg*. International Conference On Environmental Degradation of Engineering Materials, Politechnika Gdańska, pp. 260-267, Jurata 1999.
- [3] Cudny, K., Puchaczewski, N., *Stopy metali na kadłuby okrętowe*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1995.

- [4] Czechowski, M., *Badanie wpływu polaryzacji elektrochemicznej i obróbki cieplnej na naprężeniowe pękanie korozyjne stopów Al-Zn-Mg*, Zeszyty Naukowe WSM w Gdyni, Nr 30, Gdynia 1996.
- [5] Czechowski, M., *Effect of anodic polarization on stress corrosion cracking of some aluminium alloys*, Advances in Materials Science, Vol. 7, No. 1(11), pp. 13-20, 2007.
- [6] Czechowski, M., *Optymalne metody spajania stopów Al-Mg w aspekcie odporności na korozyjne pękanie naprężeniowe*, Materiały i Technologie, Politechnika Gdańska, Nr 3 (3), pp. 23-27, 2005.
- [7] Czechowski, M., *Własności złączy doczołowych blach ze stopów Al-Mg spajanych różnymi metodami*, Materiały i Technologie, Politechnika Gdańska, Nr 1(1) 2003, pp. 16-19, Gdańsk 2003.
- [8] Czechowski, M., Chrzanowski, J., Zieliński, A., *Naprężeniowe pękanie korozyjne złączy spawanych stopów aluminium*, Materiały, II Pomorska konferencja Naukowa - Inżynieria Materiałowa 2001, Politechnika Gdańska, Sobieszewo 2001.
- [9] Czechowski, M., Pietras, A., Zadroga, L., *Własności stopów aluminium serii 5000 zgrzewanych tarciovo nową technologią FSW*, Inżynieria Materiałowa, Nr 6/2003, pp. 264-266.
- [10] Czechowski, M., Zieliński, A., *Effect of cathodic polarization on failure and degradation of mechanical properties of some aluminium alloys*, Scripta Metallurgy Materials, Vol. 30, 1994.
- [11] Czechowski, M., Zieliński, A., Cudny, K., *Effect of chemical composition and thermal treatment on stress corrosion cracking of aluminium alloys*, Conference Corrosion-Deformation Interactions, Fontainebleau, 1991.
- [12] Jurczak, W., Czechowski, M., *Odporność korozyjna i korozyjno-naprężeniowa złączy spawanych stopów układu Al-Zn-Mg w warunkach polaryzacji elektrochemicznej*, Zeszyty Naukowe AMW, Rok XXXVIII, Nr 1(132) 97, Gdynia 1997.
- [13] Lahti, K., *FSW - possibilities in shipbuilding*, Svetsaren, Vol. 58, No. 1, pp. 6-8, 2003.
- [14] Nicholas, E. D., Kalle, D. S., *Proces zgrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny ma już 10 lat*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, Nr 3/2001, pp. 30-39.
- [15] Poniewierska, C., Birn, J., Narożniak-Łuksza, A., Skalski, I., *Odporność korozyjna stopu aluminium o wysokiej wytrzymałości*, Przegląd Spawalnictwa (LXXI), Nr 6-1999, pp. 17-19.
- [16] PN-EN ISO 7539-7: 2000. *Badania korozji naprężeniowej. Próba odkształcenia z małą prędkością.*