

CHARAKTERYSTYKA WYTRZYMAŁOŚCIOWA POŁĄCZEŃ SPAWANYCH STOPU AW 7020

STRENGTH CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF THE AW 7020 ALLOY

Marzena M. Lachowicz, Grzegorz Pękalski - Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechnika Wrocławska

Artykuł zawiera wyniki badań wytrzymałości doraźnej stopu aluminium z cynkiem przeznaczonego do przeróbki plastycznej gatunku AW 7020 oraz wykonanych dla niego połączeń spawanych. Jako materiał dodatkowy zastosowano dwa gatunki stopów z magnezem: AlMg5 oraz AlMg4,5Mn objętych normą PN-EN ISO 18273:2007. Dla obu analizowanych stopów stwierdzono spadek twardości w połączeniu spawanym w porównaniu do materiału rodzimego. Odnotowano także znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie dla obu badanych połączeń spawanych. Przesycanie i naturalne starzenie połączeń nie wpłynęło znacząco na poprawę wytrzymałości na rozciąganie. Jedynie dla połączeń spawanych z zastosowaniem stopu AlMg5 stwierdzono nieznaczny wzrost średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, obróbka cieplna, połączenia spawane, własności wytrzymałościowe

The work contains results of strength tests for the aluminium alloy with zinc grade AW 7020, destined for plastic working and welded joints made in it. As fillers two grades of alloys with magnesium were applied: AlMg5 and AlMg4,5Mn included in the PN-EN ISO 18273:2007 standard. For both of the analysed deposited metals a drop in hardness of the welded joint in comparison to the native material was observed. Also, significant decrease in tensile strength for both tested joints was discovered. Solution heat treatment and natural ageing of the joints has not significantly improved the tensile strength. Insignificant increase of the average value of tensile strength was only found for the welded joints with the AlMg5 alloy application.

Key words: aluminium alloys, heat treatment, welding joints, strengths properties

Wprowadzenie

W przemyśle górnym zastosowanie stopów aluminium jest nieznaczne, głównie wykorzystywane są na korpusy pomp górniczych, w urządzeniach klimatyzacyjnych czy jako elementy osłonowe maszyn górniczych. Jednak powstawanie nowych gatunków stopów aluminium o coraz wyższej wytrzymałości prowadzi do zwiększonego zastosowania stopów aluminium w kolejnych gałęziach przemysłu, gdyż pozwala na tworzenie elementów konstrukcji o coraz mniejszej wadze przy takich samych parametrach wytrzymałościowych. Z tego względu należy oczekiwać, że podejmowane będą próby stosowania tych materiałów na elementy maszyn również w górnictwie odkrywkowym.

Stopy serii 7000 (tzw. konstrukcyjne) należą do klasy stopów o wysokiej wytrzymałości doraźnej oraz zmęczeniowej. Podstawowym pierwiastkiem stopowym tej serii jest cynk występujący do zawartości 9%. Ponadto prawie wszystkie stopy 7000 zawierają Mg (<4%) i wiele z nich zawiera Cu (<3%) [2]. Należą do grupy stopów umacnianych cieplnie, z tego względu ich właściwości wytrzymałościowe zależą od parametrów obróbki cieplnej. Badania wykazują, że przesycanie i sztuczne starzenie pozwalają na uzyskanie wartości R_m wynoszącej ponad 400 MPa [1].

Energia międzyfazowa stref GP w układzie Al–Zn–Mg jest na tyle niska, że strefy o rozmiarach około 3 nm mogą tworzyć się już w stosunkowo niskich temperaturach (20–120°C) [3,4]. Z tego względu stopy 7000, a także wykonane z nich złącza spawane wykazują zdolność do samorzutnego starzenia. Rozpad roztworu stałego podczas starzenia stopu AW 7020 przebiega w następującej kolejności [3,4]:

Roztwór stały (α) $\rightarrow$ strefy GP $\rightarrow \eta'$ (MgZn₂) $\rightarrow \eta$ (MgZn₂)

Półkoherentna metastabilna faza η' charakteryzuje się heksagonalną komórką krystalograficzną o parametrach sieciowych $a = 0,496$ nm i $c = 0,868$ nm. Niekoherentna równowagowa faza η MgZn₂ (8,432%Zn) posiada również komórkę heksagonalną, jednak o odmiennych parametrach sieciowych $a = 0,521$ nm i $c = 0,860$ nm [3,4]. Liczba cząstek η wzrasta wraz z czasem starzenia, jednak w trakcie starzenia w temperaturze 150 °C, aż do 6 h dominującą jest faza metastabilna η' [5].

W pracach [6÷11] badano wpływ składu chemicznego i faz międzymetalicznych występujących w strukturze stopu na odporność korozyjną stopów z serii 7000. Stwierdzono, że najkorzystniejsze właściwości elektrochemiczne wykazują stopy o bardzo niskiej zawartości miedzi. W przypadku

występowania w składzie chemicznym miedzi, większość z nich wykazuje bardzo umiarkowaną odporność na różne typy korozji elektrochemicznej. Odpowiedni dobór warunków starzenia sztucznego przyczynia się do znacznej poprawy ich odporności na korozję [2]. W pracy [11] wykazano wpływ wielkości ziarna na odporność korozyjną stopu AW 7475. Materiał o strukturze nanokrystalicznej charakteryzował się niższymi wartościami potencjału korozyjnego i prądu korozyjnego niż próbka o mikrometrycznej wielkości ziarna.

Podstawowym problemem spawalności stopów aluminium jest ich duża skłonność do tworzenia pęknięć gorących, wynikająca z ich wysokiego przewodnictwa cieplnego, skurczu objętościowego oraz zjawiska likwacji. Konstrukcje spawane wykonywane są głównie ze stopów serii 5000 i 6000. Badania nad spawalnością stopów serii 7000 opisano w pracach [12÷18]. Autorzy realizowanych badań zwracają głównie uwagę na tendencję stopów do obniżania twardości w strefie wpływu ciepła [12, 14÷16, 18].

Celem realizowanej pracy była ocena wytrzymałości na rozciąganie połączeń spawanych wykonanych na stopie AW 7020 z zastosowaniem dwóch spoiw z magnezem.

Materiał i metodyka badań

Materiał do badań stanowił stop aluminium z cynkiem przeznaczony do przeróbki plastycznej gatunku AW 7020. Skład chemiczny badanego materiału zestawiono w tabeli 1, natomiast jego mikrostrukturę na rysunku 1.

W toku wstępnych badań materiałowych ustalono kierunek walcowania blach o grubości 10 mm. Blachy spawano doczołowo, jednostronnie, wzdłużnie do kierunku walcowania. Jako materiał dodatkowy zastosowano dwa gatunki stopów: AlMg5 (elektroda 1) i AlMg4,5Mn (elektroda 2) objętych normą PN-EN ISO 18273:2007 o średnicy 3,2 mm. Wyboru elektrod do napawania dokonano na podstawie wstępnych badań makro i mikroskopowych.

Próbki do spawania ukosowano na V stosując kąt 60°. Spawano ręcznie w pozycji podolnej metodą GTAW, prądem zmiennym o natężeniu 230 A. Prędkość spawania wynosiła 1,5 mm/s, a liczba ściegów wynosiła 3. Jako gazu osłonowego użyto argonu o czystości 99,99%.

Przesycanie połączeń spawanych prowadzono z temperatury 450°C. Próbki chłodzono w wodzie po 60 minutach wygrzewania w piecu. Starzenie naturalne przebiegało w temperaturze pokojowej przez okres 2 miesiące.

Tab. 1. Skład chemiczny badanych stopów

Tab.1. Chemical composition of the tested alloys

Pierwiastek	Zn	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Zr+Ti	Zr	Cu	Al
Zawartość [%]	4,0	1,4	0,40	0,30	0,11	0,13	0,19	0,16	ślady	reszta

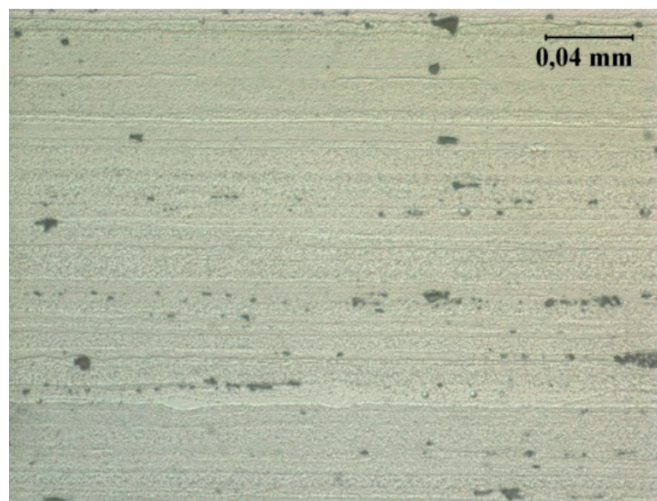
Próbki do badań wytrzymałościowych materiału rodzimego wykonano zgodnie z normą PN-EN 6892-1:2010 dla blach grubości 10 mm. Próbki pobrano w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania i osi spoiny. Próbki płaskie do określenia wytrzymałości na rozciąganie połączeń spawanych i miejsca występowania przełomu wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 4136:2011. Po spawaniu grań i lico spoiny zostało poddane frezowaniu. Badania prowadzono w temperaturze 23°C z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Instron 1126. Stosowano zakresy pomiarowe:

0–100 kN, działka elementarna 1,0 kN.

Wykonano przekroje przez całą grubość blachy obejmujące spoinę, strefę wpływu ciepła oraz materiał rodzimy. Po wykonaniu zglądów metalograficznych próbki trawiono odczynnikiem Ma4Al (PN-75/H-04511). Badania mikroskopowe przeprowadzono z zastosowaniem mikroskopu świetlnego NEOPHOT 32 po trawieniu odczynnikiem Mi1Al (PN-75/H-04512).

Pomiary twardości połączeń spawanych przeprowadzono metodą Vickersa w warunkach zgodnych z wymaganiami normy PN EN ISO 6507-1:2007. Stosowano twardościomierz firmy Zwick 321, przy obciążeniu 5kG (49,03 N). Rozkład odcisków twardości wykonano na przekroju poprzecznym złącza dla trzech linii pomiarowych A-B, C-D i E-F pokazanych na rysunkach 2 i 3.

Mikrostruktura stopu charakteryzowała się występowaniem fazy AlFeSiMn na tle roztworu stałego α . Obserwowano również obecność pojedynczych wydzielen pierwtnej fazy $MgZn_2$ (η). Interpretację tych faz wykonano w oparciu o mikroanalizę składu EDX oraz dane literaturowe. Stop znajdował się w stanie obróbki cieplnej T-6, co wskazuje, że w jego strukturze obecne są koherentne lub semikoherentne do osnowy wydzielenia fazy wtórnej $MgZn_2$ (η') (rys. 1).



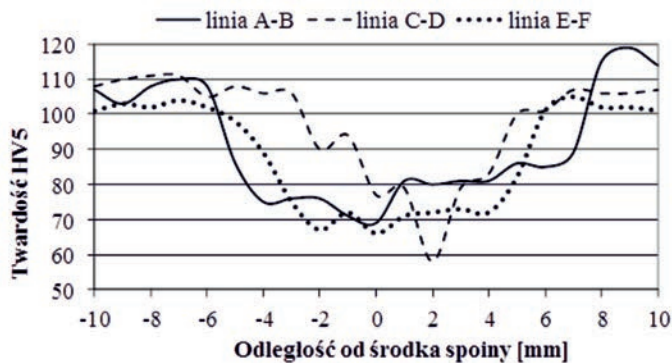
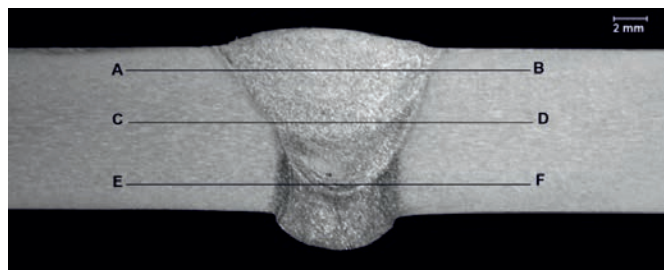
Rys. 1. Mikrostruktura stopu AW 7020 w stanie dostarczenia. Mikroskopia świetlna. Stan trawiony

Fig. 1. Microstructure of the AW 5754 alloy in the 'as delivered' state. Light microscopy. Etched

Wyniki badań

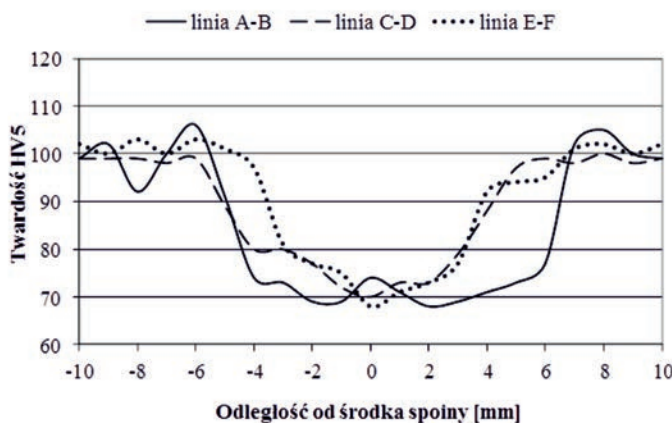
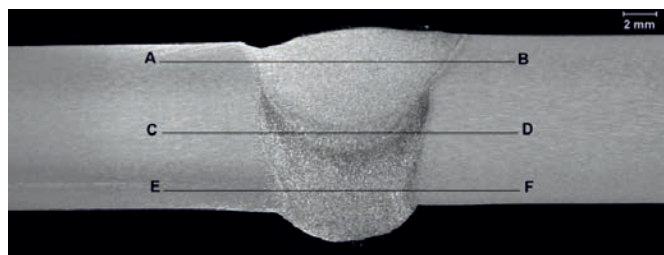
Rozkłady twardości dla wykonanych połączeń spawanych

Przeprowadzono pomiary twardości na stopie AW 7020 spawanym z zastosowaniem dwóch gatunków spoiw (rys. 2, 3). Materiał w stanie dostarczenia charakteryzował się twardością wynoszącą 112 ± 2 HV5.



Rys. 2. Makroskopowy przekrój poprzeczny próbki ze stopu AW7020 spawanej spoiwem 1 z zaznaczonymi liniami kolejnych rozkładów twardości oraz wyniki pomiarów twardości HV5 wykonane wzdłuż tych linii na przekroju spoiny

Fig. 2. Macroscopic cross-section of a specimen made of AW7020 alloy welded with deposited metal 1, with marked lines of subsequent hardness penetration patterns and results of the HV5 hardness measurements performed along those lines at the joint cross-section



Rys. 3. Makroskopowy przekrój poprzeczny próbki ze stopu AW7020 spawanej spoiwem 2 z zaznaczonymi liniami kolejnych rozkładów twardości oraz wyniki pomiarów twardości HV5 wykonane wzdłuż tych linii na przekroju spoiny

Fig. 3. Macroscopic cross-section of a specimen made of AW7020 alloy welded with deposited metal 2, with marked lines of subsequent hardness penetration patterns and results of the HV5 hardness measurements performed along those lines at the joint cross-section

W przypadku spoiny spawanej spoiwem 1 stwierdzono spadek twardości w obszarze spoiny do twardości wynoszącej lokalnie 58 HV5 (rys. 2). Oznacza to 48% spadek twardości w obszarze spoiny w odniesieniu do materiału podstawowego. Spadek twardości obserwowano również w obszarze strefy

wplywu ciepła.

Badania przeprowadzone na przekroju spoiny wykonanej spoiwem 2 (AlMg4.5Mn) wykazały, że w tym przypadku nastąpił niższy spadek twardości w obszarze spoiny. Twardość obniżyła się o 39%, gdyż najniższa odnotowana twardość wynosiła 68 HV5. Spadek twardości obserwowano również w obszarze strefy wpływu ciepła (rys. 3). Jednocześnie stwierdzono bardziej jednorodny rozkład twardości w obszarze połączenia spawanego w porównaniu do próbki łączonej z zastosowaniem spoiwa 1.

Statyczna próba rozciągania

Badania wytrzymałościowe wykazały, że badany stop charakteryzował się wysoką, jak dla stopów aluminium, wytrzymałością doraźną oraz plastycznością (tab. 2). Stosunek $R_{p0,2}/R_m$ dla tego stopu wyniósł 0,89. Co istotne, obserwowano nieznaczny rozrzut w uzyskiwanych wartościach parametrów mechanicznych, co wskazuje na jednorodność analizowanego stopu w skali makroskopowej.

Badania wytrzymałościowe dla wykonanych połączeń spawanych przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 4136:2011. Badania wykazały, że połączeń spawanych spadek wytrzymałości w odniesieniu do materiału podstawowego wynosił odpowiednio 31% i 30% dla poszczególnych elektrod (tab. 3).

Dla wykonanych połączeń spawanych zastosowano przesycanie z temperatury 450°C i naturalne starzenie przez okres 2 miesięcy. Temperaturę obróbki cieplnej dla materiału rodzimego (AW 7020) dobrano na podstawie przeprowadzonych wcześniej pomiarów zmiany twardości w funkcji czasu stopu przesycanego, zachodzących wskutek naturalnego starzenia. Przesycanie prowadzono z temperatur 450, 500 oraz 550°C. Na ich podstawie stwierdzono, że najkorzystniejszy wzrost twardości (do wartości 108 HV5) obserwowano dla stopu przesycanego z temperatury 450°C [19].

W wyniku przeprowadzonej obróbki cieplnej stwierdzono, że w przypadku spoiwa AlMg5 obserwowano nieznaczny wzrost średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie. W przypadku stopu AlMg4.5Mn stwierdzono nieznaczny spadek jej średniej wartości. Wartość ta jednak pozostawała w granicach odchylenia standardowego. Po przeprowadzonej obróbce cieplnej pęknięcie następowało zawsze w obszarze spoiny. Wytrzymałość połączeń po przeprowadzonej obróbce cieplnej zestawiono w tabeli 4.

Tab. 2. Wyniki badań uzyskane w statycznej próbie rozciągania dla materiału rodzimego

Tab. 2. Results obtained in the static tensile tests for the native material

PARAMETR	NUMER PRÓBK		
	1	2	3
$R_{p0,2}$ [MPa]	351	347	346
R_m [MPa]	391	392	390
A [%]	13,0	16,0	14,5
Z [%]	27	28	26
średnie $R_{p0,2}$ [MPa]	348±3		
średnie R_m [MPa]	391±1		
średnie A_s [%]	14,5±2		
średnie Z [%]	27±1		

Tab. 3. Właściwości mechaniczne uzyskane dla wykonanych połączeń spawanych bez dodatkowej obróbki cieplnej
Tab. 3. Mechanical properties obtained for the welded joints without additional heat treatment

MATERIAŁ RODZIMY	AW 7020					
	AlMg5			AlMg4,5Mn		
ELEKTRODA						
NUMER PRÓBK	1	2	3	1	2	3
R_m [MPa]	286	231	291	280	287	254
miejsce złomu	materiał rodzimy	spoina	spoina	materiał rodzimy	spoina	materiał rodzimy
średnie R_m [MPa]	269±33			274±17		

Tab. 4. Właściwości mechaniczne uzyskane dla wykonanych połączeń spawanych po przeprowadzonej obróbce cieplnej
Tab. 4. Mechanical properties obtained for the welded joints after heat treatment

MATERIAŁ RODZIMY	AW 7020					
	AlMg5			AlMg4,5Mn		
ELEKTRODA						
NUMER PRÓBK	1	2	3	1	2	3
R_m [MPa]	316	269	288	252	247	282
średnie R_m [MPa]	291±24			260±19		
miejsce złomu	spoina	spoina	spoina	spoina	spoina	spoina

Podsumowanie

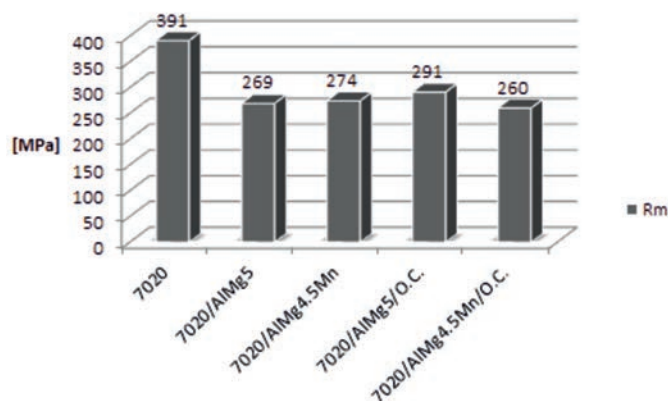
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań stopu AW 7020, dla którego wykonano połączenia spawane z zastosowaniem tradycyjnych spoiw objętych normą PN-EN ISO 18273:2007 i stosowanych dla stopów aluminium przetwarzanych plastycznie. Technologia spawania materiału musi warunkować odpowiedni dobór spoiwa pod względem wytrzymałościowym i korozyjnym. W niniejszej pracy dokonano oceny wpływu spawania metodą GTAW na wytrzymałość na rozciąganie wykonanych połączeń spawanych. Zagadnienia korozyjne objęte zostaną odrębną publikacją.

W wyniku wykonanych na przekroju poprzecznym połączeń spawanych rozkładów twardości stwierdzono, że dla wszystkich analizowanych spoiw występuje spadek wartości twardości w stosunku do materiału rodzimego. Wynosił on odpowiednio do 48% dla spoiwa AlMg5 oraz do 39% dla spoiwa AlMg4.5Mn. Z jednej strony należy to wiązać z zastosowaniem stopów o odmiennym składzie chemicznym, ale jednocześnie tendencję do obniżania twardości obserwowano również w strefie wpływu ciepła, co w tym przypadku związane było z rozrostem faz umacniających stop wydzieleniowo [19]. Obserwowano również znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie dla badanych połączeń spawanych. W przypadku zastosowania jako materiałów dodatkowych stopów zawierających w swoim składzie chemicznym magnez, tj. AlMg5 oraz AlMg4.5Mn, spadek wytrzymałości na rozciąganie wynosił odpowiednio 31% i 30%. Połączenia spawane wykonane na tym stopie cechują się spadkiem wartości wytrzymałości, jednak nadal pozostaje ona wyższa niż dla stopu AW 5083, powszechnie obecnie stosowanego w przemyśle okrętowym.

Biorąc pod uwagę znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie połączeń spawanych można sformułować sugestie, że w sytuacji konieczności utrzymania wysokich parametrów wytrzymałościowych, przy zastosowaniu do spawania metody GTAW należy poszukiwać materiałów dodatkowych innych niż objętych normą EN ISO 18273:2007, które pozwolą na

uzyskanie wytrzymałości na rozciąganie nieznacznie tylko niższej od materiału rodzimego. Ewentualnie należy poszukiwać metod spajania tych stopów bez zastosowania materiału dodatkowego. Przykładowo w literaturze podejmowane są próby łączenia stopu z zastosowaniem zgrzewania tarcowego z przemieszczaniem FSW [2,20].

Dane literaturowe wskazują, że poprawę wytrzymałości stopów z serii 7000 po spawaniu można uzyskać wskutek przeprowadzonej obróbki cieplnej. Wykonana w ramach badań ocena przebiegu wzrostu twardości stopu AW 7020 z czasem po przesycaniu wykazała, że wykazuje on zdolność do naturalnego starzenia. Przeprowadzona obróbka cieplna dla połączeń spawanych wykonanych z zastosowaniem spoiw AlMg5 oraz AlMg4.5Mn nie wpłynęła zasadniczo na wartość wytrzymałości na rozciąganie. Po przesycaniu i naturalnym starzeniu połączeń spawanych stopem AlMg5 stwierdzono tylko nieznaczny wzrost średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie. W przypadku zastosowania stopu AlMg4.5Mn nie obserwowano poprawy wytrzymałości na rozciąganie złączy spawanych (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie R_m dla stopu AW 7020 i wykonanych dla niego połączeń spawanych bez zastosowania oraz po obróbce cieplnej

Fig. 4. Comparison of tensile strength R_m for the AW 7020 alloy and welded joints made on it without and after heat treatment

Literatura

- [1] Jurczak W., *Problemy i perspektywy stopów aluminium w zastosowaniu na konstrukcje morskie*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej 4(183), 2010, s. 89-106
- [2] Dudzik K., Czechowski M., *The properties of AlZn5Mg1 (AW-7020) alloys welded by new technology friction stir welding*. Journal of KONES 15(3), 2008, s. 115-120
- [3] Kumar S., Nambodhri T.K.G., *Precipitation hardening and hydrogen embrittlement of aluminum alloy AA7020*. Bull. Mater. Sci. 34(2), 2011, s. 311-321
- [4] Berg L.K., Gjønnes J., Hansen V., Li X.Z., Knutson-Wedel M., Waterloo G., Schryvers D., Wallenberg L.R., *GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging*. Acta Materialia 49(9), 2001, s. 3443-3451
- [5] Engdahl T., Hansen V., Warren P.J., Stiller K., *Investigation of fine scale precipitates in Al-Zn-Mg alloys after various heat treatments*. Materials Science and Engineering A, 327(1), 2002, s. 59-64
- [6] Andreatta F., Lohrengel M.M., Terryn H., de Wit J.H.W., *Electrochemical characterisation of aluminium AA7075-T6 and solution heat treated AA7075 using a micro-capillary cell*. Electrochimica Acta 48, 2003, s. 3239-3247
- [7] Andreatta F., Terryn H., de Wit J.H.W., *Effect of solution heat treatment on galvanic coupling between intermetallics and matrix in AA7075-T6*. Corrosion Science 45, 2003, s. 33-1746
- [8] Kwiatkowski L., *Podatność na korozję i skuteczność aktualnych metod ochrony przed korozją stopów aluminium w budownictwie*. Inżynieria powierzchni 4, 2009, s. 24-33
- [9] Nowak M., Opyrchal M., Motyka M., Płonka B., Rajda M., *Korozja ultradrobnoziarnistych stopów aluminium serii 2xxx i 7xxx*. Rudy i metale nieżelazne 55(7), 2010, s. 514-517.
- [10] Meng Q., Frankel G.S., *Effect of Cu Content on Corrosion Behavior of 7xxx Series Aluminum Alloys*. Journal of The Electrochemical Society, 151(5), 2004, s. B271-B283
- [11] Ura-Bińczyk E., Bałkowiec A.Z., Mikołajczyk Ł., Lewandowska M., Kurzydłowski K.J., *Wpływ wielkości ziarna na odporność korozyjną stopu aluminium 7475*. Ochrona przed korozją 2, 2011, s. 44-47
- [12] Ma T., den Ouden G., *Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding*. Materials Science and Engineering A, A226, 1998, s. 198 – 204
- [13] Lech-Grega M., Hawrylkiewicz S., Richert M., Szymanski W., *Structural parameters of 7020 alloy after heat treatment simulating the welding process*. Materials Characterization 46, 2001, s. 251-257
- [14] Temmar M., Hadji M., Sahraoui T., *Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints*. Materials and Design 32, 2011, s. 3532-3536.
- [15] Hwan T.K., Soo W.N.: *Solidification cracking susceptibility of high strength aluminium alloy weldment*. Scripta Materialia 34(7) (1995) 1139-1145
- [16] Janaki Ram G.D., Mitra T.K., Shankar V., Sundaresan S., *Microstructural refinement through inoculation of type 702 Al-Zn-Mg alloy welds and its effect on hot cracking and tensile properties*. Journal of Materials Processing Technology 142, 2003, s. 174-181
- [17] Jha A.K., Murty S.V.S.N., Diwakar V., Sree Kumar K., *Metallurgical analysis of cracking in weldment of propellant tank*. Engineering Failure Analysis 10, 2002, s. 265-273
- [18] Liu C., Northwood D.O., Bhole S.D., *Tensile fracture behavior in CO2 laser beam welds of 7075-T6 aluminium alloy*. Materials and Design 25, 2004, s. 573-577
- [19] Podrez-Radziszewska M., *Weldability problems of the technical AW7020 alloy*. Manufacturing Technology 11(11), 2011, s. 59-66
- [20] Kumar K., Kailas S.V., *The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation*. Materials Science and Engineering A 485, 2008, s. 367-374