

JURCZAK Wojciech

SPAJANIE TARCIOWE NOWĄ METODĄ ŁĄCZENIA STOPÓW ALUMINIUM STOSOWANYCH W TRANSPORCIE MORSKIM

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań połączeń spawanych i spajanych tarciowo okrętowych stopów 7020 i jego modyfikacji opisanych cechą 7020M. Połączenia stopów aluminium wykonane metodą spajania tarcioowego pozwala uzyskać lepsze właściwości mechaniczne i lepszą odporność na korozję w środowisku wody morskiej w porównaniu do połączeń spawanych wykonanych metodą TIG. Strefa wpływu ciepła obniżająca wytrzymałość połączeń spawanych stopów aluminium praktycznie nie istnieje w połączeniach uzyskanych nową technologią spajania tarcioowego. Brak specjalnych wymagań przygotowania krawędzi łączonych blach do łączenia tarcioowego, jakie ma miejsce dla spawania (ukosowanie i oczyszczanie z tlenków do spawania), ułatwia i znacznie obniża koszty łączenia wysokowytrzymałych okrętowych stopów aluminium.

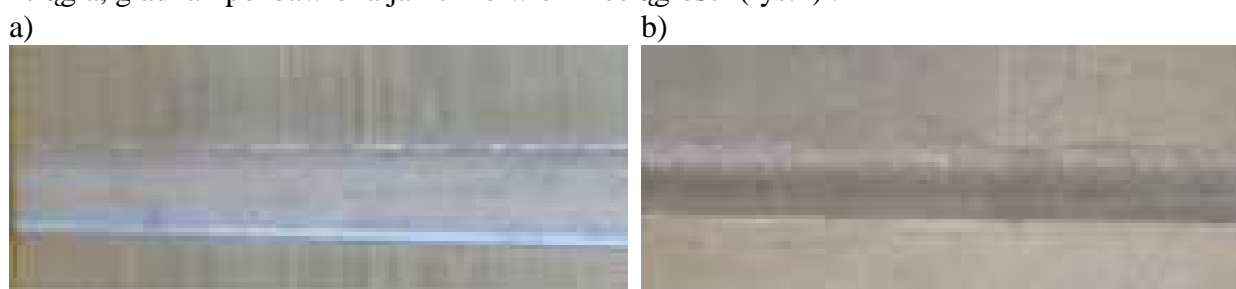
WSTĘP

W obecnym czasie w budownictwie okrętowym do łączenia stopów aluminium coraz częściej stosuje się nowoczesne metody spawania. Te drogie i wymagające odpowiedniego sprzętu oraz kwalifikacji spawaczy metody łączenia jak np. spawanie wiązką laserową są alternatywą do powszechnie stosowanego spawania łukowego w osłonie gazów obojętnych. Jednak przyszłością wydają się stosowanie prostej i taniej, niewymagającej specjalnego przygotowania metody łączenia stopów aluminium wykorzystując spajanie tarcioowe z przemieszczeniem zwane Friction Stir Welding (FSW) [1,5].

Skład chemiczny wysokowytrzymałych stopów aluminium serii 7xxx i skład chemiczny spoiwa zastosowanych dla ich łączenia metodą spawania w osłonie gazów obojętnych (TIG, MIG) to kompromis pomiędzy właściwościami wytrzymałościowymi i odpornością korozyjną połączeń spawanych. Obszarem połączenia determinującym powyższe właściwości jest strefa wpływu ciepła (SWC), która jest najslabszym ogniwem połączenia spawanego. Koncentracja procesów korozyjnych na SWC połączenia spawanego spowodowana jest oddziaływaniem czynnika korozyjnego (chlorków zawartych w wodzie morskiej) na powierzchnię pozbawioną ochronnej warstewki tlenkowej w obszarze SWC. Cienka warstewka Al_2O_3 nie zapewnia poprawnej ochrony a jej osłabienie spowodowane jest temperaturą spawania stopu 7020 T6xx i 7020M T6xx opisane jako T4 (przesycanie a następnie naturalne chłodzenie). Im dłuższy czas oddziaływania temperatury spawania (metoda ręczna TIG) tym szersza jest SWC i większa podatność do korozyjnego pęknięcia spawanych stopów aluminium [2].

Natomiast spajanie tarcioowe z przemieszczeniem jest procesem, gdzie połączenie wytwarzane jest w temperaturach niższych niż temperatura topnienia metalu bazowego (bez przesycania). W tym sposobie łączenia nie ma potrzeby użycia materiału wypełniającego (spoiwa) i stosowania gazów obojętnych ponieważ metal nie osiąga temperatury topnienia

potrzebnej do utleniania, dodatkowo nie wymagane jest oczyszczanie blach z tlenków i ich ukosowania. To są zalety spajania tarcowego w odniesieniu do tradycyjnego spawania stopów aluminium. Dodatkowo dzięki temu, że stop nie osiąga temperatury topnienia wytwarza się o wiele mniej wad spoiny w czasie topnienia i krzepnięcia metalu. Konwencjonalne zgrzewanie tarcowe jest wykonywane poprzez mechaniczne przesunięcie krawędzi łączonych blach, które mają być zespolone wzdłuż powierzchni przylegania wykorzystując siłę ściskającą trzpienia do krawędzi blach działającą w poprzek spoiny. Ciepło tarcia powstałe na powierzchni przylegania zmiękcza metal, który jest wyciskany przez siłę docisku trzpienia i tworzy się spoina, względny ruch zostaje zatrzymany i siły ściskające tworzą mocny zgrzeinę (spaw) zanim on wystygnie. Jakość połączeń spajanych tarcowo zależy od prędkości obrotowej, siły docisku specjalne zbudowanego trzpienia. Poprawny dobór tych parametrów uzależniony od grubości łączonych blach daje właściwą budowę lica zgrzeiny, z nieznacznym odciskiem od wieńca opory, bez widocznych nieciągłości i odkształceń. Od strony grani brak było śladów na linii styku. Powierzchnia była ciągła, gładka i pozbawiona jakichkolwiek nieciągłości (rys.1) .



Rys. 1. Powierzchnie poprawnie wykonanego połączenia tarcowego z przemieszczeniem okrętowego stopu 7020 dla $g=6\text{mm}$: a) lico, b) gran zgrzeiny

Metoda FSW nie powoduje dużych zniekształceń i niewielkie naprężenia, w porównaniu z tradycyjnymi technikami spawania. Zgrzewanie tarcowe z przemieszczeniem jest stosowane w przemyśle stoczniowym przy budowie kadłubów, nadbudówek, pokładów i wewnętrznych konstrukcji szybkich promów i statków przewożące LPG [3].

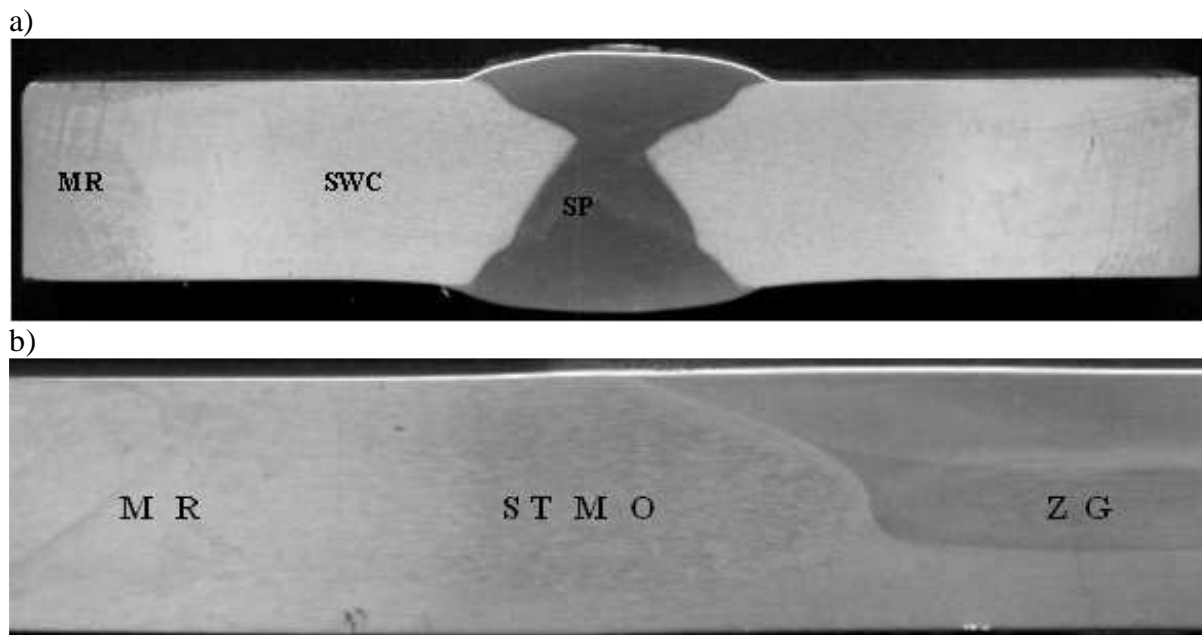
Na rysunku 2 pokazano wytrawione w różnym powiększeniu przekroje połączeń spawanych TIG i spajanych tarcowo FSW. Na rysunku 2a. przedstawiono klasyczną strefę wpływu ciepła od spawania (SWC) zaś na rysunku 2b. przedstawiono strefę termiczno-mechanicznej obróbki (STMO).

Parametry spawania i spajania tarcowego wysokowytrzymałych stopów serii 7xxx zawarto odpowiednio w tabeli 1 oraz w tabeli 2.

Tab. 1. Parametry spawania metodą TIG blach stopów 7020, 7020M [4]

Rodzaj połączenia	Grubość blach [mm]	Średnica elektrody [mm]	Średnica drutu [mm]	Natężenie prądu [A]	Zużycie argonu [dm^3/min]	Prędkość spawania [mm/min]	Liczba warstw w spoinie
Doczołowa bez ukosowania	6	4-5	4-5	220-250	7-9	250	1-2
	6	4-5	4-5	220-240	7-9	250	1-2

Parametry spawania dla blach o tych samych grubości stopów 7xxx i zbliżonym składzie chemicznym są podobne, co oznacza, że w praktyce stoczniowej tylko szybkość spawania i wydatek argonu w połączeniu z wartością prądu spawania decyduje o jakości połączenia. Jakość badanych połączeń została sprawdzona w badaniu radiologicznym i mieściła się w 1-2 klasie dokładności wykonania.



Rys. 2.Przekrój poprzeczny połączenia spawanego- a) spjanego -b) stopu 7020 z widocznymi elementami spoiwa -SP (zgrzeiny -ZG), strefy wpływu ciepła -SWC (strefy termiczno-mechanicznej obróbki -STMO) i obszaru materiału rodzimego -MR (łączonego) [3]

Tab. 2. Parametry spajania tarcowego FSW blach stopu 7020 i 7020M doczołowe dwustronne [4]

Wymiary trzpienia		wieńca	Kąt pochylenia trzpienia α [°]	Prędkość obrotowa narzędzia mieszającego V_n [obr/min]	Prędkość zgrzewania V_z [mm/min]
D[mm]	d[mm]	h[mm]			
24	5,5	10	1,5	710	240

Dobór parametrów spajania tarcowego warunkuje jakość połączeń tarcowych. Na rysunku 3. przedstawiono przełomy próbek połączenia tarcowego stopu 7020 (z wadą rys.3a i prawidłowy rys. 3b.)



Rys. 3. Przełomy próbek połączenia tarcowego stopu 7020: a) z wadą , b) bez wady

1. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

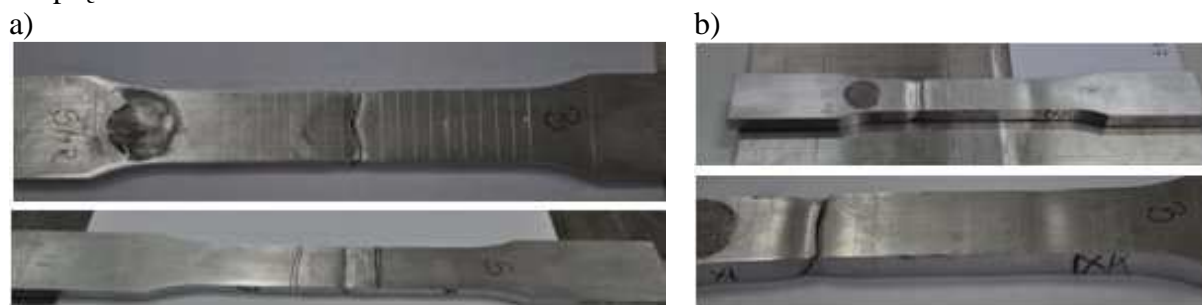
Wyznaczenie właściwości mechanicznych połączeń wykonano w próbie statycznego rozciągania, która umożliwiła wyznaczenie charakterystyki σ - ϵ (naprężenie-odkształcenie). Właściwości mechaniczne materiału rodzimego i ich połączeń spawanych i spajanych badanych stopów aluminium przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Właściwości mechanicznych okrętowych stopów aluminium i ich złączy spawanych

Stop / złącze	Właściwości mechaniczne				HV ₅
	R _m MPa	R _{0,2} MPa	A ₅ %	Z %	
Materiał rodzimy (stan dostawy)					
7020M w.507	422	362	14,6	25,6	114
7020M w.635	406	347	14,4	27,6	109
7020	372	317	16		104
Złącze spawane TIG spoiwem SPA20					
7020M/w.507 SPA20	380	341	4,8	25,6	111(spoiny) 80 (SWC)
7020M/w.635 SPA20	369	340	6	27,6	107(spoiny) 80(SWC)
7020 SPA20	355	304	17		85(spoiny) 104 (SWC)
Złącze spajane FSW					
7020M/w.507	422	398	8,1	13	120 STMO
7020	360	280	12	25,7	104 STMO

Właściwości mechaniczne badanych połączeń uzupełniono badaniami twardości metodą Vickers'a - HV₅ wyznaczając rozmiar obszarów składowych połączenia (obszar spoiny-zgrzeiny, SWC i strefy termiczno-mechanicznej obróbki (STMO) oraz materiału rodzimego). Szerokość SWC i STMO decydują bezpośrednio o wytrzymałości połączenia a pośrednio o podatności do korozji.

Rozkład twardości determinuje właściwości wytrzymałościowe, które wskazują najslabszy obszar połączenia spawanego lub spajanego. Na rysunku 4 pokazano próbki poddane próbie statycznego rozciągania i miejsce zerwania próbki przy jednoosiowym stanie naprężenia.



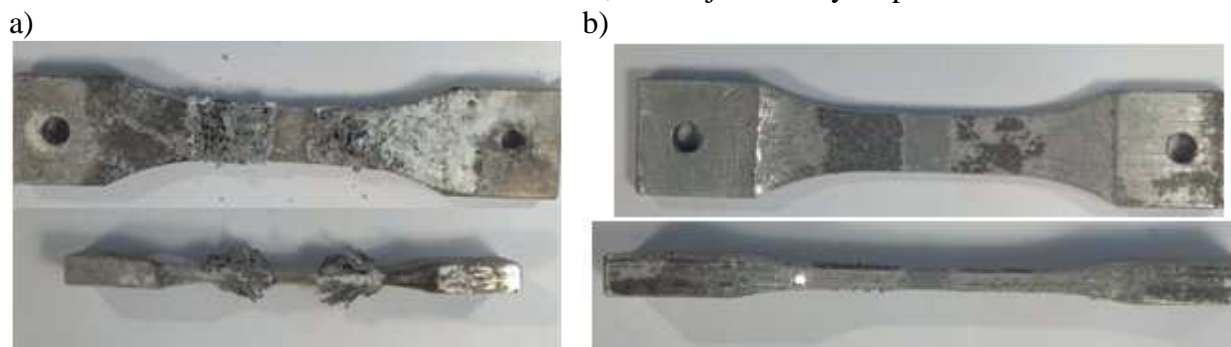
Rys. 4. Próbka stopu 7020 po zerwaniu w statycznej próbie rozciągania a) spawanej TIG
b) spajanej FSW

Miejsce pęknięcia próbek stopu 7020 uzależnione jest od metody łączenia. Spawane próbki stopu 7020 pękały na linii wtopu (linia graniczna między spoiną a SWC) lub w SWC natomiast próbki spajane pękały poza obszarem STMO (rys.4b) czyli w materiale rodzimym. Oznacza to że zgrzeina ma lepszą wytrzymałość od materiału łączonego, co potwierdza rozkład twardości [4].

2. ODPORNOŚĆ KOROZYJNA

Każda powierzchnia stopu aluminium poddana oddziaływaniu powietrza lub wody tworzy na swojej powierzchni cienką tlenkową warstwę, która jest twarda (amorficzna), chemicznie stabilna i wyróżniająca się dużą adhezją do podłoża. Jej właściwości zmieniają się zależnie od składu chemicznego im więcej pierwiastków stopowych tym słabsza ochrona. Pomimo tego, że jest bardzo cienka (standardowa grubość to 0.005 mm), ta warstwa uniemożliwia dalsze utlenianie. Kiedy ulega zniszczeniu, pod działaniem obciążenia natychmiast (kilka milisekund) się odnawia, zapewniając dobrą trwałość [6].

Atmosferyczna korozja aluminium następuje przez proces pitingu, natomiast korozja w środowisku morskim to korozja warstwowa (odwarstwienie, tzw. rozszczepienie warstw równoległe do powierzchni), atak międzykrystaliczny lub „korozja naprężeniowa”. Korozja warstwowa występuje w wytrzymałych stopach serii 7xxx (rys.4), kiedy są stosowane bez ochrony farbami w niekorzystnych warunkach morskich. Korozja naprężeniowa jest rodzajem utleniania charakterystycznym dla stopów aluminium serii 5xxx o zawartości Mg >3.5%, szczególnie gdy temperatura otoczenia (eksploatacji) przez dłuższy czas przekracza 70°C. Ten rodzaj korozji występuje w strefie wpływu ciepła i na spoinach wykonanych z materiałów z serii 7xxx bez dodatku Cr i Zr, takich jak badany stop 7020.



Rys. 5. Wybrane próbki stopu 7020 po ekspozycji korozyjno-naprężeniowej w 3,5% roztworze wodnym NaCl a) próbka połączenia spawanego b) próbka połączenia spajanego

Tab. 4. Zestawienie odporności korozyjnej i korozyjno-naprężeniowej w warunkach morskich połączeń wykonanych metodą TIG spawanych i FSW spajanych stopów serii 7xxx .

Stop / połączenie	Statyczne właściwości mechaniczne $10^{-3}s^{-1}$			Odporność na korozję w			
				atmosferze morskiej		wodzie morskiej	
	R_m	$R_{p0,2}$	A_5	Korozja w komorze solnej		Korozja naprężeniową $t=1500h$ przy $\sigma_o=0,8 R_{p0,2}$	
	MPa	MPa	%	K_{Rm}	K_{A5}	K_{Rm}	K_{A5}
				%	%	%	%
Materiał rodzimy(dla obróbki T₆₅₂)							
7020M T6xx	443	397	9,8	4,7	36	9,3	45,7
7020 T6xx	372	317	16	4,4	30	6,4	27,2
Złącze spawane TIG spoiwem SPA20							
7020M	380	341	4,8	2,3	9	13,3	16,3
7020	355	304	17	3,8	12	16,3	18,2
Złącze spajane FSW							
7020M	422	398	8,1	1,8	6,3	6,5	8,4
7020	360	280	12	2,4	9,3	7,8	10,3

Stopień obniżenia właściwości mechanicznych badanych połączeń stopów aluminium wyznaczono w wyniku oddziaływania czynnika korozyjnego w postaci mgły solnej (atmosfera morska) i 3,5% roztwór wodny NaCl (sztuczna woda morska) według wzorów:

$$K_{R_m} = \frac{1}{n} \sum \frac{R_{mo} - R_{mk}}{R_{mo}} 100 \% \quad (1)$$

$$K_{A_5} = \frac{1}{n} \sum \frac{A_0 - A_k}{A_0} 100 \% \quad (2)$$

gdzie:

R_{mo} - wytrzymałość na rozciąganie przed ekspozycją korozyjną, R_{mk} - wytrzymałość na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej, n - liczba próbek, A_0 - wydłużenie plastyczne materiału przed ekspozycją korozyjną, A_k - wydłużenie plastyczne materiału po ekspozycji korozyjnej K_{Rm} - średnie procentowe zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej, K_{A5} - średnie procentowe zmniejszenie wydłużenia plastycznego po ekspozycji korozyjnej.

Odporność korozyjna materiałów konstrukcyjnych opisana jest szybkością korozji a jej wartość dzieli odporność materiałów na korozję wg. kategorii A, B, C, i D z uwzględnieniem warunków środowiskowych.

Przy połączeniach dodatkowo uwzględnia się skład chemiczny spoiwa, który nigdy nie może mieć niższego potencjału elektrochemicznego niższego od spawanego materiału. Ta zasada dotyczy połączeń spawanych ponieważ połączenia spajane FSW nie wymagają dodatkowego materiału. Ta zaleta przekłada się na odporność korozyjną w wodzie morskiej, która ma charakter korozji elektrochemicznej a jej intensywność zależy od różnicy potencjałów własnych spoiwa i materiału spawanego. Ta różnica jest znikoma dla połączeń spajanych ponieważ wynika ona tylko z różnicy strukturalnej zgrzeiny spowodowanej tylko zmieszaniem materiału o tym samym składzie chemicznym w odróżnieniu do połączeń spawanych. Te różnice zobrazowane są podatnością korozyjną pokazaną na rysunku 5.

Jednak najbardziej właściwą ocenę odporności na korozję opisuje utrata właściwości wytrzymałościowych i plastycznych określona współczynnikami K_{Rm} i K_{A5} . Kryterium Cudnego wyznacza, że stop nie jest odporny na korozję w wodzie morskiej gdy wartość $K_{Rm} > 15\%$ i $K_{A5} > 25\%$, materiał wykazuje dobrą odporność na korozję gdy wartość $15\% > K_{Rm} > 10\%$ i $25\% > K_{A5} > 15\%$, natomiast gdy $K_{Rm} < 10\%$ i $K_{A5} < 15\%$ potwierdza to że stop wykazuje bardzo dobrą odporność na działanie morskich czynników korozyjnych.

WNIOSKI

1. Właściwości wytrzymałościowe badanych stopów serii 7xxx spajanych tarciovo są wyższe średnio o 10-15% od wytrzymałości połączeń spawanych tych stopów co potwierdza rozkład twardości na porównywanych połączeniach.
2. Spajanie tarciovo-mechaniczne stopów serii 7xxx zapewnia proste wykonanie połączeń czołowych, a obszar połączenia (zgrzeiny) jest wolny od wad strukturalnych, które występują w spoinie i strefie wpływu ciepła połączeń spawanych łukowo w osłonie gźów obojętnych.
3. Połączenia spajane tarciovo badanych stopów serii 7xxx wykazują lepszą odporność na oddziaływanie morskich czynników korozyjnych niż połączeń spawanych. Średnie obniżenie procentowe wytrzymałości jest wyższe o 10% dla korozji naprężeniowej i 3% dla korozji w mgie solnej.
4. Lepszą odporność korozyjną strefy termiczno-mechanicznej obróbki połączeń spajanych, odniesione do strefy wpływu ciepła połączeń spawanych to wynik nie tylko węższej strefy

zmian struktury materiału, ale także brak wtrąceń, obniżających wytrzymałość i odporność na korozję.

BIBLIOGRAFIA

1. **Thomas W. M.**, *Friction stir butt welding*, GB patent 9125978, 6.12.1991, International patent application PCT/GB92/02203.
2. **Dudzik K, Charchalis A. Jurczak W**, *Microscopic examination of AZzn5Mg1 alloy joints welded by FSW and MIG*, Journal of Kones Powertrain Transport, 2012, vol.19.
3. **Kristensen J. K., Pietras A. i in.**, *Properties of Friction Stir Welded Joints in the Aluminium Alloys 2024, 5083, 6082, 6060 and 7075*, in: 5th International Friction Stir Welding Symposium, 2004
4. **Jurczak W.**, *Wpływ obciążeń na właściwości mechaniczne i elektrochemiczne połączeń okrętowych stopów 7xxx wykonanych metodą TIG i FSW*. **Czasopismo TTS Technika Transportu Szynowego**. Vol. 9 , CD1 , 2012
5. **Projekt międzynarodowy Lostir** COOP-CT-2004-508587 Development of a low cost processing unit for friction stir welding, 2004-2006.
6. **Michel Jacques**, *Corrosion of aluminum Elsevier , 2004*

FRICION STIR WELDING AS A NOVEL JOINING METHOD OF ALUMINUM ALLOYS APPLIED IN MARINE TRANSPORT

Abstract

The paper presents the results of investigation of welded joints and friction stir welded joints on 7020 alloys and their modification designated as 7020M intended for shipbuilding. Friction stir welding of aluminum alloys allows for better mechanical properties and higher corrosion resistance in sea water environment as compared to TIG welded joints. Detrimental influence of heat affected zone is minimum with this novel method. Lack of special requirements concerning preparation of friction stir welded sheet edges (beveling and oxide removal prior to welding) facilitates and reduces the cost of joining of high-strength aluminum alloys intended for shipbuilding.

Autor:

dr inż. Wojciech JURCZAK, Wydział Mechaniczno-Elektryczny,
Akademii Marynarki Wojennej