

Wojciech JURCZAK

## WPŁYW PARAMETRÓW TECHNOLOGII SPAJANIA TARCIOWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POŁĄCZEŃ STOPU 7020

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań połączeń spajanych tarciowo okrętowego stopu 7020 w zakresie właściwości mechanicznych. Porównano wyniki tych badań dla połączeń tarciowych wykonanych technologią różniącą się prędkością obrotową trzpienia.

Zbyt wysoka prędkość obrotowa trzpienia spajającego powoduje nieciągłości materiałowe połączenia tarcioowego w strefie zgrzeiny przez co materiał pęka w tej strefie a jego właściwości mechaniczne są niższe o 30% od prawidłowo wykonanego połączenia tarcioowego.

### WSTĘP

Technologie łączenia arkuszy lekkich materiałów konstrukcyjnych są ważne do wyboru materiału przyszłych nowoczesnych, szybkich środków transportu powietrznego, lądowego i morskiego. Zgrzewanie tarciove z przemieszczeniem (FSW) jest stosowane w zagranicznym przemyśle stoczniowym do łączenia elementów kadłubów, nadbudówek, pokładów a także do budowy wewnętrznych konstrukcji szybkich promów i specjalnych jednostek (okrętów, jednostek przewożące LPG). W lotnictwie te techniki łączenia wykorzystuje się do budowy płatowców, kadłubów, skrzydeł, a także zbiorników paliwa, zaś w transporcie lądowym to spajanie konstrukcje samochodów różnym tonażu ale głównie wykorzystanie tej technologii łączenia występuje w budownictwie kolejowym (szybkie pociągi, wagony kolejowe i nadwozia i wagony towarowe).

Postęp techniczny i technologiczny w metodach łączenia metalicznych materiałów konstrukcyjnych jest znaczny dzieląc je zasadniczo na połączenia spawane i zgrzewane. Trend rozwojowy pozwala stosować techniki laserowe, wybuchowe a także zgrzewanie tarciove z przemieszczaniem opisane jako Friction Stir Welding (FSW), które coraz częściej zastępują klasyczną metodę łączenia przez spawanie elektryczne bądź gazowe. FSW potrzebuje tylko 25% energii połączenia laserowego do wykonania poprawnego połączenia co przekłada się korzystnie jednocześnie na ekonomię wytwarzania.

Ta nowa technologia łączenia wymaga wielu prób i eksperymentalnych doświadczeń przy doborze odpowiednich parametrów spajania tarciowego by uzyskać złącze o najlepszych właściwościach wytrzymałościowych. Od wielu lat takie próby wykonywano w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach, gdzie na drodze eksperymentu dobierając prędkość posuwu ( $V_z$ ) i obrotowa trzpienia ( $V_n$ ), a także jego kąt pochylenia ( $\alpha_z$ ) konwencjonalnego narzędzia spajającego otrzymano poprawne połączenia, indywidualnie dla każdego rodzaju materiału konstrukcyjnego (rys.1). Także inne, różne od parametrów ruchowych, elementy jak wymiary tego narzędzia spajającego (średnica montażowa, średnica kołnierza – D, i robocza trzpienia - d, patrz. rys.1a i 3) mają wpływ na jakość połączenia spajaniego tarciove.

Okrętowy stop 7020 jest materiałem o wysokim współczynniku wytrzymałości względnej ( $R/\rho$ ) i stosunkowo dobrej odporności korozyjnej materiału rodzimego, jednak ich połączenia spawane ulegają intensywnej korozji elektrochemicznej wskutek niskiej skuteczności ochronnej warstewki tlenkowej tworzącej się na powierzchni strefy wpływu ciepła połączenia spawanego. Te zjawiska

są minimalizowane przy zastosowaniu zgrzewania, którego temperatura spajania nieznacznie przekracza temperaturę przesycań (minimalny rozpad termiczny [1]) co ułatwia szybką i lepszą odbudowę warstewki tlenkowej na obszarach połączenia tarciowego. Brak widocznej „strefy przejściowej” między materiałem rodzimym a zgrzeiną jest potwierdzone zbliżoną wartością potencjału elektrochemicznego na tych obszarach połączenia. [materiały niepublikowane]

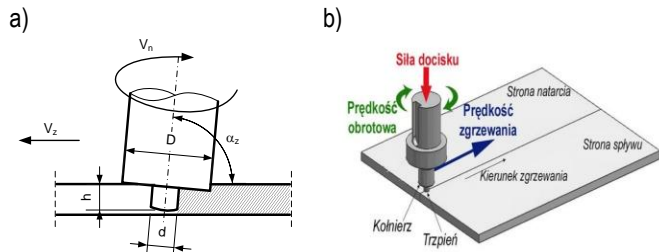
Proces nagrzewania i topnienia krawędzi blach i etap krzepnięcia występujące tuż po zakończeniu spawania powoduje mechaniczne pogorszenie właściwości mechanicznych spoiny takich jak zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałości zmęczeniowej i plastyczności. Wadami są również porowatość, utlenianie, mikrosegregacja, rozpad w wysokiej temperaturze i inne mikrostrukturalne defekty w spoinie. Natomiast spajanie tarciove jest procesem gdzie połączenie wytwarzane jest w temperaturach niższych niż temperatura topnienia metalu bazowego. 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 tarciowego 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 [2]. Konwencjonalne zgrzewanie tarciove jest wykonywane poprzez przesuw części, które mają być zespolone wzdłuż powierzchni przylegających powierzchni wykonywanych siłą ściskającą w poprzek spoiny (rys.1b). Ciepło tarciove powstałe na powierzchni przylegania zmiękcza metal i miękki metal jest wyciskany przez siły ściskające i tworzy się spoina, względny ruch zostaje zatrzymany i siły ściskające tworzą mocny zgrzeina (spaw) zanim on wystygnie [3].

### 1. TECHNOLOGIA I PARAMETRY WYKONANIA POŁĄCZEŃ SPAJANYCH DLA STOPU 7020

Proces FSW jest, podobnie jak konwencjonalne zgrzewanie tarciove, procesem przebiegającym w stanie stałym, poniżej temperatury topnienia materiału elementów zgrzewanych. W Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach na zlecenie Akademii Marynarki Wojennej wykonano wg. PN-EN ISO 15620, 2005 zgrzewanie wysokowytrzymałych okrętowych stopów aluminium serii 7xxx.

Schemat zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) pokazano na rys. 1a i b, natomiast parametry tej technologii przedstawiono w tab. 1.

Złącza doczołowe blach o grubości  $g=10$  mm wykonano metodą FSW. Blachy zgrzewano dwustronnie przy takich samych parametrach różniących się jedynie prędkością obrotową trzpienia (urządzenia spajającego).



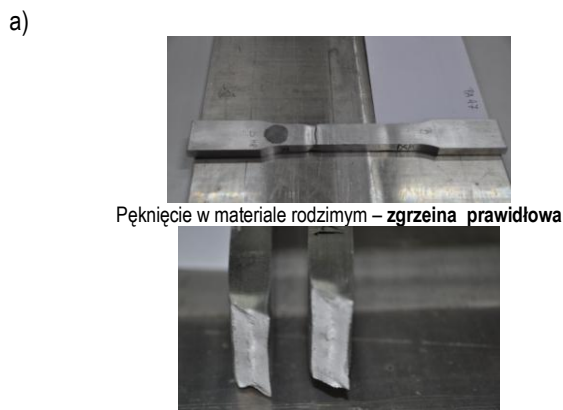
**Rys. 1.** Schemat zgrzewania FSW a) schemat ideowy b) przebieg zgrzewania [4].

Wykonane badania złączy wytworzonych przy różnych prędkościach obrotowych narzędzia wykazały, że odpowiednią jakość złączy, zarówno pod względem mikrostruktury, jak i właściwości, można uzyskać przy stosunkowo szerokim zakresie parametrów procesu. Ten zakres podawany w literaturze to: prędkość obrotowa 300-3000 obr/min., prędkość spajania 0,3-1,5 m/min., a docisk urządzenia od 12-17kN.

Efekty odpowiedniego doboru parametrów spajania tarcowego zostały przedstawione na rys.2, gdzie pokazano poprawność wykonania połączeń spajanych rys.2a. Zgrzeina wykazuje znacznie lepszą wytrzymałość od materiału rodzimego stąd miejsce pęknięcia usytuowane poza jej obszarem.

**Tab. 1.** Parametry spajania tarcowego FSW blach stopu 7020 doczołowe dwustronne [sprawozdanie z wykonania usługi].

Wymiary trzpienia			Kąt nachylenia narzędzia $\alpha_z$ [°]	Prędkość obrotowa trzpienia $V_n$ [obr/min]	Prędkość liniowa zgrzewania $V_z$ [mm/min]
D [mm]	d [mm]	h [mm]			
24	5,5	5,8	88,5	710	240
24	5,5	5,8	88,5	1080	255



Przelom próbki złącza spajanego tarcowo stopu 7020 wykonany z odpowiednią prędkością obrotową trzpienia

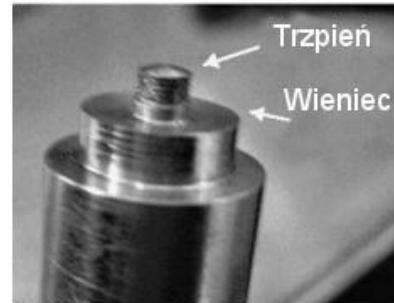


Przelom próbki złącza spajanego tarcowo stopu 7020 po próbie statycznego zrywania przy 52% większej prędkości obrotowej trzpienia

**Rys. 2.** Próbki i przelomy złącza spajanego tarcowo stopu 7020 po próbie statycznego rozciągania stopu 7020: a) wykonane przy optymalnej prędkości obrotowej trzpienia b) prędkości o 52% większej w stosunku do optymalnej dobranej w drodze wieloetapowego eksperymentu.

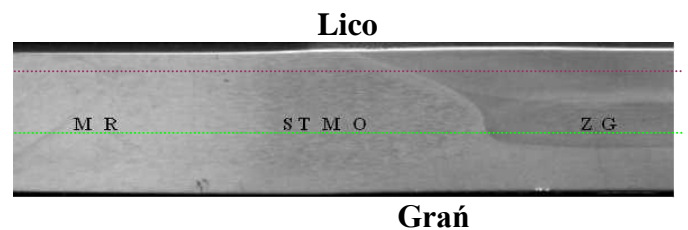
Zły dobór parametrów spajania obrazuje rys.2b gdzie pęknięcie próbek połączenia spajanego, podczas próby statycznego rozciągania, przebiegało w osi zgrzeiny.

Parametry zgrzewania stopu 7020 nie zostały w pełni udostępnione przez wykonawcę (IS), jednak jakość tych połączeń zależy w dużej mierze oprócz danych z tab.1 od kształtu narzędzia pokazanego na rys.3



**Rys.3.** Zdjęcie konwencjonalnego narzędzia

Na rys.4 przedstawiono rzeczywisty zgląd, z wyszczególnieniem obszarów połączenia spajanego tarcowo dla optymalnej prędkości obrotowej trzpienia spajającego.



**Rys.4.** Zgląd poprzeczny połączenia spajanego stopu 7020 z widocznymi obszarami połączenia zgrzeiny - ZG, Strefa Wpływu Ciepła (między ZG a STMO) - SWC, strefy termiczno-mechanicznej obróbki - STMO i obszaru materiału rodzimego -MR [3]. Linia przerywaną pokazano poziomy pomiaru twardości.

Przy optycznym powiększeniu zglądu pokazanego na rys.4 można zauważyć drobniejsze ziarno zgrzeiny niż materiału rodzimego powodujące, w przypadku działania naprężeń, zginanie w płaszczyźnie poprzecznej.

## 2. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH POŁĄCZEŃ

### 2.1. Właściwości materiału rodzimego stopu 7020

Badania właściwości mechanicznych materiału rodzimego stopu 7020 i jego połączeń spawanych i spajanych tarciovo (wykonane zgodnie z PN EN ISO i PN-M-69710, 1988), przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS. Badania rozkładu twardości w połączeniach przeprowadzono zgodnie z PN -EN-ISO 6507-1,2007 metodą Vickersa.

### 2.2. Właściwości połączeń tarciowych stopu 7020 dla $V_n=710$ obr/min

Zasadniczym parametrem spajania tarciowego jest prędkość obrotowa narzędzia spajającego pokazanego na rys.3. W eksperymencie dobrano jej optymalną wartość dla stopów serii 7xxx bez Cu.

Porównywane złącze spawane tego samego stopu wykonano metodą TIG ręcznie.

Tab.2. Właściwości mechanicznych okrętowych stopów aluminium i ich złączy spawanych

Stop	Właściwości mechaniczne				
	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>0,2</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Z %	HV 5
Materiał rodzimy					
7020	372	317	16	25	104
Złącze spawane TIG spoiwem SPA20					
7020	355	304	17		85 (spoiny) 104 (SWC)
Złącze spajane FSW					
7020	371	298	15	24	120 STMO

### 2.3. Właściwości połączeń tarciowych stopu 7020 dla $V_n=1080$ obr/min.

Zwiększając znacznie prędkość obrotową a tym samym prędkość zgrzewania uzyskano połączenie spajane tarciovo, które obserwacji makro grani i jego lica nie różniły się zasadniczo od połączenia wykonanego dla  $V_n=710$  obr/min. Przełom jaki uzyskano w próbie statycznego rozciągania tych połączeń uwidocznił (rys.2b) Wady w strefie zgrzeiny.

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

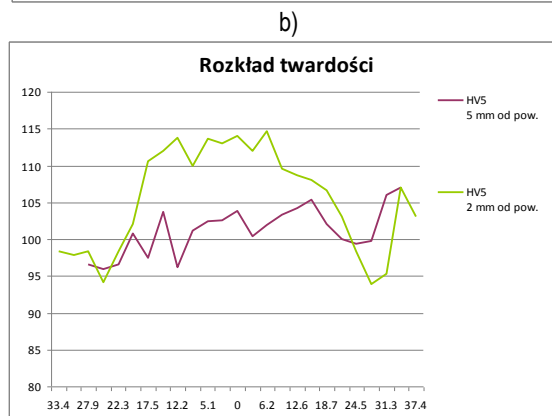
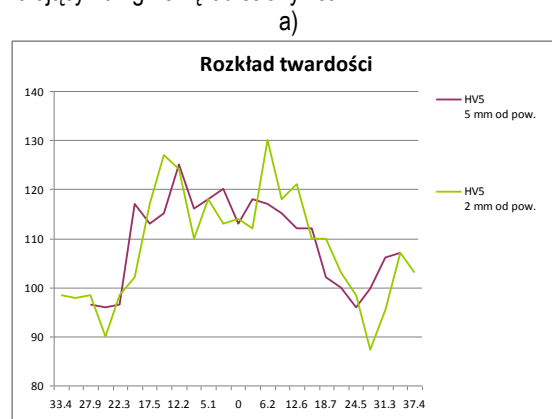
Stop	Właściwości mechaniczne				
	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>0,2</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Z %	HV 5
Materiał rodzimy					
7020	372	317	16		104
Złącze spawane TIG spoiwem SPA20					
7020	355	304	17		85 (spoiny) 104 (SWC)
Złącze spajane FSW					
7020	288	219	9,1	26	104 STMO

Technologia spajania tarciowego prowadzona z dużą prędkością obrotową, powoduje że zgrzeina ma bardziej regularny kształt z charakterystyczną cebulową budową jądra. Tlenki z powierzchni płyt są równomiernie rozmieszczone w obszarze zgrzeiny. Rola trzpienia narzędzia w procesie tworzenia zgrzeiny jest w tym przypadku dominująca. Zniszczenie złącza o takiej budowie przebiega najczęściej w obszarze styku strefy wpływu ciepła i strefy odkształcenia termomechanicznego materiału (rys.2b). Przy bardzo dużych prędkościach obrotowych i prędkościach zgrzewania pojawiają się w strukturze zgrzeiny wady w postaci pustek i nieciągłości (rys.2), usytuowane w obszarze lica zgrzeiny po stronie natarcia. Wady te pogarszają jakość zgrzeiny i właściwości wytrzymałościowe całego złącza.

Porównanie wyników badań właściwości mechanicznych tych połączeń dla dwóch różnych prędkości obrotowych trzpienia spajającego jednoznacznie wskazują na obniżenie jego wytrzymałości ze wzrostem prędkości obrotowej trzpienia przy zachowaniu właściwości plastycznych. Te właściwości mechaniczne są także gorsze od połączeń spawanych tego stopu.

## 3. ROZKŁAD TWARDOŚCI W POŁĄCZENIACH SPAJANYCH TARCIOVO Z PRZEMESZANIEM

Pomiar twardości połączeń spajanych wykonanych przy dwóch różnych prędkościach obrotowych trzpienia na jego obszarach dla wykazał różniące się przebiegi dla złączy badanego stopu 7020. Dla optymalnej prędkości obrotowej (710 obr/min) typowym jest wzrost twardości w centralnych obszarach zgrzeiny (jądra) i zmniejszenie w SWC. Od strony lica zgrzeiny twardość jest nieznacznie większa niż od strony grani. Uwidacznia się w ten sposób wpływ wieńca opory, oddziałujący na zgrzeinę od strony lica.



Rys.4. Rozkład twardości HV5 wyznaczone na dwóch poziomach przekroju poprzecznego w połączeniach spajanych tarciovo (FSW) a) z optymalną prędkością obrotową 710 obr/min. trzpienia b) z podwyższoną prędkością obrotową 1080 obr/min. trzpienia, dla stopu 7020



W przypadku zwiększenia prędkości obrotowej do poziomu 1080 obr/min., powstające nieciągłości w centralnym obszarze połączenia FSW powodują obniżenie twardości średnio o 25% w stosunku do twardości połączeń uzyskanych dla optymalnej prędkości obrotowej.

## PODSUMOWANIE

Niewłaściwa (zawyżona) prędkość obrotowa trzpienia spajającego wymuszająca jednocześnie zwiększenie szybkości posuwu powoduje nieciągłość materiału połączenia w obszarze ZG/STMO-zgrzeiny. Nieciągłość materiałowa obniża wytrzymałość i twardość STMO przez co próbka pęka w osi zgrzeiny.

Wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania zmienia się budowa strukturalna zgrzein, w centralnych obszarach zgrzeiny pojawia się coraz bardziej widoczna, charakterystyczna cebulowa struktura, zwana jądrem zgrzeiny.

Wzrost prędkości obrotowej narzędzia powoduje spadek oddziaływania wieńca narzędzia na proces nagrzewania i odkształcania materiału zgrzeiny co powoduje powstawanie nieciągłości struktury w obszarze lica zgrzeiny i zmniejsza wytrzymałość połączenia.

Zbyt duża szczelina pomiędzy zgrzewanymi płytami powoduje powstawanie nieciągłości struktury w obszarze grani zgrzeiny, co zmniejsza wytrzymałość złącza.

Zaletami zgrzewania tarciovego z przemieszczaniem są niewielkie zniekształcenia nawet w długich spawach, brak topnienia, brak porowatości, mały skurcz, mogą być wykonywane we wszystkich pozycjach, wydajność energetyczna i odznaczająca się doskonałą odpornością mechaniczną na próbę statycznego rozciąganie.

Zgrzewanie tarciove z przemieszczaniem łączy metal poprzez mieszanie jednego fragmentu krawędzi blachy stopu do drugiej krawędzi (zależnie od średnicy wieńca rys.3) i wywołuje skrajną deformację plastyczną. Z porównania technologii połączeniach FSW z technologią spawania w osłonie gazów obojętnych stopów aluminium (TIG) wynika że technologia spajania tarciovego wykazuje niższe temperatury łączenia (poniżej przesycania), wywołane przez ruch narzędzia umożliwiające powstanie obszaru STMO, a tym samym mniejsze odkształcenia łączonego materiału. Unieruchomienie, poprzez określony docisk, łączonych blach w spawaniu do chwili ostygnięcia spoiny zapobiega tylko częściowej deformacji, której nie stwierdza się przy połączeniach FSW.

Dla połączeń FSW, istnieje niewielkie pogorszenie właściwości mechanicznych w jądrze spoiny, obszarze strefy termiczno-mechanicznej obróbki (STMO) z drugiej strony zaobserwowano w strefie oddziaływania ciepła (SWC) lekką poprawę twardości co zawdzięczamy rekrytalizacji i wytworzenia bardzo drobnej struktury ziarnistej. Właściwości mechaniczne spoin FSW są całkiem dobre, są praktycznie takie same jak materiału podstawowego. Rozerwanie przy rozciąganiu zwykle występują z dala od jądra.

Okrętowy stop 7020 podlegający obróbce cieplnej poddany łączeniu technologią FSW posiada lepsze właściwości od łączy spawanych. Powodem tego jest brak możliwości rozpuszczają się tlenków w zgrzeinie (łączenie poniżej temperatury przesycania) co ma miejsce przy spawaniu a powodujące pogorszenie właściwości mechanicznych spoin.

Struktura spoiny zgrzewania tarciovego wykazuje swoją wyższość w stosunku do połączenia spawanego dzięki rekrytalizacji ziaren w wyniku mieszania i kucia materiału rodzimego (łączonego) a wyższe temperatury i duże odkształcenia plastyczne STMO i ZG spowodowały wytworzenie się nieporównywalnie mniejszych ziaren w porównaniu MR".

Na przekroju poprzecznym zgrzewania tarciovego z przemieszczaniem (rys.4), wysoko rafinowane ziarna i równe struktury ziarna znajdują się w jądrze spoiny, z bardzo charakterystyczną zmianą

wielkości ziarna na stronie natarcia i najmniejsza wielkość ziarna na ogół obserwowana jest na górnej powierzchni jądra spoiny, gdzie występuje kontakt z wieńcem narzędzia. Przejście ze strefy termiczno-mechanicznej obróbki (STMO) do strefy oddziaływań cieplnych (SWC) oraz do materiału rodzimego (MR) są stopniowe i nie wyróżnia żadnych ostrych zmian w mikrostrukturze. Zwiększenie liniowej szybkości zgrzewania poniżej 5 in/min jakie miało miejsce przy wykonywaniu połączenia zgrzewanego badanego stopu nie mało wpływu na strukturę i właściwości tego połączenia.

Obserwacja makro połączenia FSW stopu 7020 dla połączeń wykonanych przy różnej prędkości obrotowej wieńca i prędkości zgrzewania oraz innych połączeń FSW, wykazała że strona spływu jest szersza od strony spływu. Powodem tej sytuacji jest rotacja narzędzia powodująca, że materiał wyprzedza go, przechodząc do prawej strony,. Temu zjawisku towarzyszy zapewne inny poziom naprężenia i gradientów temperatury, które są wyższe na stronie natarcia niż na stronie spływu zgrzeiny. Te zagadnienia będą tematem kolejnych badań tych połączeń.

## WNIOSKI

1. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej spajającego trzpienia zmienia się budowa strukturalna zgrzeiny. Przy niższych prędkościach obrotowych na proces nagrzewania i uplastyczniania materiału w obszarze zgrzewania wywiera wpływ wieńca narzędzia spajającego. Zgrzeina przybiera postać trapezoidalną, a w jej strukturze da się zauważyć linię tlenkową, wzdłuż której złącze ulega zniszczeniu.
2. Wzrost prędkości obrotowej urządzenia spajającego o 52% w stosunku do optymalnej jego prędkości (710 obr/min) i towarzyszący 6% wzrost szybkości zgrzewania liniowego powodują obniżają o 30 % wytrzymałość połączenia zgrzewanego tarciovo wysokowytrzymałego stopu 7020.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kristensen J. K., Pietras A. i in., *Properties of Friction Stir Welded Joints in the Aluminium Alloys 2024, 5083, 6082, 6060 and 7075*, in: 5<sup>th</sup> International Friction Stir Welding Symposium, 2004
2. Michel Jacques, *Corrosion of aluminum* Elsevier, 2004.
3. Dudzik K, Charchalis A. Jurczak W, *Microscopic examination of AZn5Mg1 alloy joints welded by FSW and MIG*, Journal of Kones Powertrain Transport, 2012, vol.19.
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. Kalembe, I. "Mikrostruktura i własności połączeń stopów aluminium wykonanych metodą zgrzewania tarciovego z mieszaniem materiału spoiny." *Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków* (2010)
6. Ambroziak A., *Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.

Niektóre wyniki badań wykorzystane w tym artykule były prezentowane w TTS vol. 2012 roku.

# INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FRICTION STIR WELDING ON MECHANICAL PROPERTIES OF 7020 ALLOY JOINTS

## *Abstract*

*The paper presents the results of investigation on mechanical properties of friction stir welded joints of 7020 alloy intended for shipbuilding. The results have been compared for different rotation speed of the mandrel during friction stir welding. Too high rotation speed of the mandrel results in material discontinuities within the joint. This causes the material to crack in these places and its mechanical properties are deteriorated by 30% as compared to correctly accomplished joint.*

Autor:

**Wojciech JURCZAK** – Akademia Marynarki Wojennej, Wydział  
Mechaniczno-Elektryczny