



## Możliwości łączenia cienkich blach ze stopów Al, Mg oraz tytanu GRADE 3 w procesie FSW

### *Possibility of joining thin sheets of Al, Mg alloys and Ti GRADE 3 in FSW process*

(1) Piotr Myśliwiec\*, (2) Romana Ewa Śliwa, (3) Robert Ostrowski

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Przeróbki Plastycznej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-329 Rzeszów, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 6.10.2017

Recenzja: 23.10.2017

Akceptacja: 15.12.2017

#### Wkład autorów

- (1) Program i warunki realizacji badań, projekt i wykonanie elementów oprzyrządowania, opracowanie wyników i manuskryptu
- (2) Koncepcja, założenia, metody realizacji przeprowadzonych badań, analiza wyników, opracowanie manuskryptu
- (3) Koncepcja konstrukcji narzędzi do FSW oraz realizacji projektu

#### Streszczenie

Procesy oparte na łączeniu materiałów w stanie stałym stanowią skuteczne rozwiązanie pod względem aspektów wytrzymałościowych i trwałości wykonanego elementu. W ostatnich latach nastąpiło duże zainteresowanie środowisk naukowo-badawczych i przemysłu rozwijaniem niekonwencjonalnych metod łączenia materiałów konstrukcyjnych w przemyśle transportowym, w tym metodami zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW (*Friction Stir Welding*). W pracy przedstawiono charakterystykę procesu FSW na podstawie złączy cienkich blach metalicznych stopów Al Mg i czystego technicznie tytanu GRADE 3 (AMS-T-9046 / AMS 4900) grubości 0,4 i 0,5 mm. Analizując omawiane właściwości połączeń oraz modyfikacje metalurgiczne strefy złączy, poprzez wpływ głównych zmiennych procesowych, co ma wpływ na jakość złączy FSW. Proces zgrzewania zrealizowano na 3 osiowej pionowej frezarce sterowanej numerycznie, wyposażonej w specjalnie przygotowany uchwyt mocujący, z wykorzystaniem narzędzi z węglika wolframu oraz ceramiki narzędziowej. Parametry geometryczne dostosowano do grubości blachy na podstawie algorytmu wg danych literaturowych [12]. Podczas procesu realizowano pomiar sił osiowych i promieniowych, wykorzystując precyzyjny siłomierz piezoelektryczny, w celu analizy efektu uplastycznienia łączonych blach. Wytrzymałość połączeń FSW wyznaczono na podstawie statycznej próby rozciągania w temperaturze pokojowej. Na tej podstawie zdefiniowano efektywność złączy w porównaniu do materiału rodzimego. Wykazano, że metoda FSW pozwala na wykonywanie wysokiej jakości wolnych od wad zgrzein cienkich blach metalicznych, zarówno z metali nieżelaznych, jak i z czystego technicznie tytanu GRADE 3 (AMS-T-9046 / AMS 4900). Efektywność wykonanych połączeń FSW znacznie przekraczała 80% wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego. Wykazano, że proces FSW może stanowić alternatywę dla procesu spawania łukowego, nitowania lub zgrzewania oporowego RSW.

**Słowa kluczowe:** zgrzewania tarcowego z przemieszaniem, stopy magnezu, stopy aluminium AZ31B, cienka blacha, tytan GRADE 3

#### Article info

Received: 6.10.2017

Reviewed: 23.10.2017

Accepted: 15.12.2017

#### Authors' contribution

- (1) Program and conditions of research implementation, design and implementation of

#### Abstract

Processes based on a joining of materials in the solid state, constitute an effective solution to the aspects of strength and durability of the produced element. In recent years there has been a great interest of research and industry to develop unconventional methods of joining construction materials in the transport industry, including Friction Stir Welding. This paper presents the characteristics of the FSW process based on the joints of thin sheet of Al and Mg alloys and technically pure GRADE 3 titanium (AMS-T-9046 / AMS 4900) of 0.4 and 0.5 mm in thicknesses. Analyzing the joints properties and metallurgical modifications through the influence of the main process variables, which

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 17 743 20 13; e-mail: p.mysliwiec@prz.edu.pl

\* Corresponding author. Tel.: Tel.: +48 17 743 20 13; e-mail: p.mysliwiec@prz.edu.pl

*instrumentation elements, preparation of results and manuscript*

- (2) *Concept, assumptions and methods of carrying out the research, analysis of the results, preparation of manuscript*
- (3) *Concept of tool design for FSW and of project implementation*

*affects the quality of the FSW joints. The welding process was carried out on a 3 axial vertical numerically controlled milling machine, equipped with a specially prepared fixing device, using tungsten carbide tools and ceramics tool. Geometric parameters were adjusted to the thickness of the sheet using the algorithm according to literature [12]. During the process, axial and radial forces were measured using a precision piezoelectric dynamometer to analyze the effect of the plasticization in the joined area. The ultimate tensile strength (UTS) of FSW joints was determined by the static tensile test at room temperature. On this basis, the efficiency of the joint was determined as compared to the parent material (PM). It has been shown that the FSW method allows for the production of high quality defect free joints both from non-ferrous metals as well as from pure GRADE 3 titanium (AMS-T-9046 / AMS 4900). Efficiency of FSW connections exceeds 80% of the tensile strength of parent material. It has been shown that the FSW process can be an alternative for arc welding, riveting or RSW welding.*

**Keywords:** *FSW welding, magnesium alloys, aluminum alloys AZ31B, thin sheet, titanium GRADE 3*

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach intensywny rozwój technologii wytwarzania szeroko korzysta z innowacyjnych materiałów konstrukcyjnych, wykorzystywanych w wielu gałęziach przemysłu. Stopy lekkie mianowicie jak stopy aluminium, magnezu, tytanu charakteryzuje wysoki stosunek wytrzymałości do masy. Dzięki tej własności możliwa jest budowa wytrzymałych struktur bez użycia bardzo drogich materiałów kompozytowych. Szczególnie te cechy są doceniane przez przemysł transportowy, gdyż zmniejszanie masy konstrukcji wpływa bezpośrednio na zmniejszenie zużycia paliwa, a co za tym idzie na mniejszą emisję spalin. Jednak produkcja zaawansowanych struktur dla przemysłu transportowego wymaga innowacyjnych metod łączenia poszczególnych elementów. Szeroko stosowane od lat technologie łączenia, to: nitowanie, klinczowanie, klejenie oraz tradycyjne technologie spawalnicze. Metody te jednak posiadają szereg wad, są nierozłączne, wymuszają ułożenie blach na zakładkę jak, również nie dają pełnej szczelności złącza. Konwencjonalne techniki spawalnicze wymagają stosowanie gazów osłonowych, aby zapobiec utlenianiu się materiału złącza. Występują także inne niekorzystne zjawiska, podczas krzepnięcia materiału takie, jak duże naprężenia szczątkowe, rekrytalizacja, tworzenie się faz międzymetalicznych, porowatość. Występowanie tych zjawisk często dyskwalifikuje

## 1. INTRODUCTION

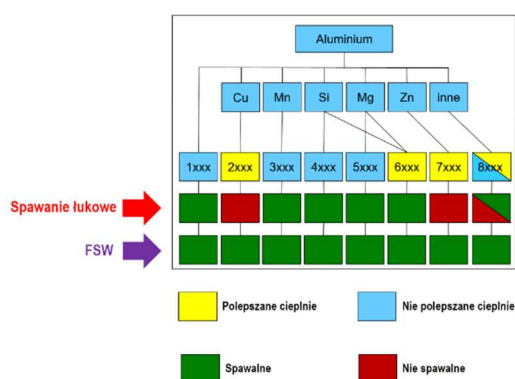
*In recent years, the intensive development of manufacturing technology has made extensive use of innovative construction materials used in many industries. Light alloys such as aluminum, magnesium and titanium alloys are characterized by a high ratio of strength to weight. This property is capable of building robust structures without the use of very expensive composite materials. Particularly, these characteristics are appreciated by the transport industry as the reduction of the weight of the structure directly affects the reduction of fuel consumption and consequently the lower emissions. However, the production of advanced structures for the transport industry requires innovative methods of joining components. Widely used for years joining technologies are: riveting, clinching, gluing and traditional welding technologies. These methods have some limitations, they are inseparable, they require laying sheets on the lap as well, also do not give full tightness of the joint. Conventional welding techniques require the use of shielding gases to prevent oxidation of the joint material. There are also other unfavorable phenomena during solidification such as high residual stresses, recrystallization, formation of intermetallic phases, porosity. Occurrence of these phenomena often disqualifies the joint through low strength and significantly lowers its*

złącze od strony wytrzymałościowej oraz znacznie obniża jego odporność korozyjną. Wszystkie te kwestie są bardzo istotne podczas spawania stopów lekkich.

Od wielu lat umacniane wydzieleniowo stopy aluminium uważane były za niespawalne metodami konwencjonalnymi, skutkiem tworzenia się  $Al_2O_3$  tritlenku diglinu podczas procesu.  $Al_2O_3$  zwyczajowo zwany tlenkiem glinu, w którym glin występuje na III stopniu utlenienia, pokrywa zgrzeinę podczas działania wysokiej temperatury powodując defekty złącza. Rozwój technologii TIG (*Tungsten Inert Gas*) metody spawania nietopliwą elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych i MIG (*Metal Inert Gas*) spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych, częściowo rozwiązuje ten problem. Jednakże powstaje wiele innych źródeł wadliwości złącza takie, jak: gorące pękanie, tworzenie się porowatości spowodowanej uwieszeniem pęcherzyków wodoru w spawie (wodór charakteryzuje się różną rozpuszczalnością w stałym i roztopionym aluminium). W konsekwencji niektóre stopy aluminium uważane są za niespawalne metodami wykorzystującymi zjawisko topienia materiału (rys. 1).

*corrosion resistance. All these issues are very important when welding metallic light alloys.*

*For many years, the precipitated aluminum alloys have been considered non-weldable by conventional methods, resulting in the formation of  $Al_2O_3$  digix trioxide during the process.  $Al_2O_3$  is commonly referred to as alumina, in which aluminum is present in the III oxidation stage, covers the weld during high temperature, causing defects in the joints. The development of TIG (*Tungsten Inert Gas*) welding methods with tungsten electrolyte in inert gas and MIG (*Metal Inert Gas*) welding with inert gas in the inert gas shield partly solves this problem. However, many other sources of defect in the joint are produced such as hot cracking, formation of porosity due to trapping of hydrogen bubbles in the weld (hydrogen is characterized by different solubility in solid and melted aluminum). As a consequence, some aluminum alloys are considered non-weldable using the melting process (Fig. 1).*



Rys. 1. Spawalność stopów aluminium [9]

Fig. 1. Weldability of aluminum alloys [9]

Stopy magnezu mogą być spawane przy użyciu MIG, TIG i technologii laserowych. W szczególności stopy Al-Mg są uważane za najbardziej spawalne, podczas gdy spawanie stopów Mg-Zn często jest dotknięte wadami wynikłymi ze zjawiska gorącego pęknięcia. Spawanie stopów tytanu jest najbardziej złożone ponieważ wodór i para wodna tworzą powyżej 250°C kruche struktury. Dlatego konieczne jest

*Magnesium alloys can be welded using MIG, TIG and laser technology. In particular, Mg-Al alloys are considered the most welded while welding Mg-Zn alloys are often affected by defects arising from the phenomenon of hot cracking. Welding of titanium is the most complex because of hydrogen and steam form above 250°C, brittle structure. Therefore, it is necessary to provide a controlled atmosphere. Other innovative*

zapewnienie kontrolowanej atmosfery. Innymi innowacyjnymi technologiami spawania stopów lekkich, są: spawanie wiązką elektronów EBW (*Elektron Beam Welding*) i wiązką laserową LBW (*Laser Beam Welding*). Jednak procesy te nie dają satysfakcjonujących właściwości mechanicznych złączy z powodu odparowania magnezu i cynku [2].

### 1.1. Metody łączenia w stanie stałym

Dotychczas opracowano kilka technologii łączenia oparte na spawaniu łukowym. Należą do nich technologie łączenia materiałów w stanie stałym bez osiągnięcia temperatury topnienia materiału bazowego. Metody łączenia w stanie stałym opierają się na zjawisku uplastycznienia łączonego materiału. W efekcie płynięcia plastycznego materiału, gdzie efekt uplastycznienia następuje w wyniku przekroczenia poziomu naprężeń uplastyczniających, w strefie złącza blach następuje trwałe połączenie materiałów [4].

Proces łączenia w stanie stałym zależy od mechanizmu generowania strumienia ciepła potrzebnego do uplastycznienia materiałów. Najczęściej źródłem energii jest praca sił tarcia. Z tym mechanizmem związane są następujące procesy: FSW (*Friction Stir Welding*), LFW (*Linear Friction Welding*), RFW (*Rotary Friction Welding*) oraz UW (*Ultrasonic Welding*). Wymienione procesy są powszechnie stosowane w przemyśle jednak ich inżynieria jest wciąż niekompletna i opiera się głównie na danych empirycznych, rzadziej na solidnej wiedzy dotyczącej zjawisk, które je kontrolują [5].

Spośród procesów łączenia materiałów w stanie stałym coraz szerzej stosowana jest metoda FSW. Względnie prosta, pozwala na uzyskanie złączy o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych, o efektywności połączenia na poziomie 80–90%, w porównaniu z materiałem rodzimym. Jest już z powodzeniem stosowana w przemyśle samochodowym, lotniczym, stoczniowym, kosmicznym czy elektronicznym. Pierwotnie opracowana była z myślą o łączeniu niespawalnych lub trudno spawalnych stopów aluminium serii 2xxx i 7xxx. Proces FSW znalazł szerokie zastosowanie w łączeniu niemal wszystkich metalicznych materiałów inżynierskich,

*technologies for light alloy welding are EBW (Electron Beam Welding) and LBW (Laser Beam Welding). However, these processes do not provide satisfactory mechanical properties of the joint due to the evaporation of magnesium and zinc [2].*

### 1.1. A solid state joining methods

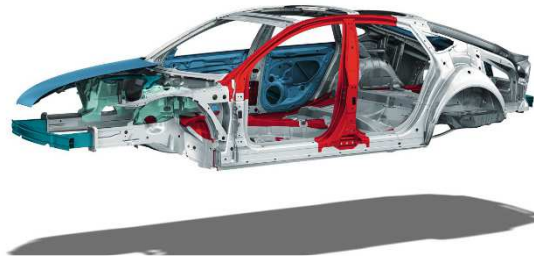
*Several coupling technologies have been developed based on arc welding. These include solid state joining technologies without the melting point of the base material. Solid state joining methods are based on the phenomenon of plasticization of the joined material. As a result of the plastic material flow, where the effect of plasticization occurs as a result of exceeding the level of plasticizing stresses, there is a permanent connection of the materials [4].*

*The solid state process depends on the mechanism of generating the heat flux needed to plasticize the materials. The most common source of energy is the work of friction forces. The following processes are related to this mechanism: FSW (Friction Stir Welding), LFW (Linear Friction Welding), RFW (Rotary Friction Welding) and UW (Ultrasonic Welding). These processes are commonly used in industry but their engineering is still incomplete and is based mainly on empirical data, less on solid knowledge of the phenomena that control them [5].*

*Among the solid state materials, FSW is increasingly used. Relatively simple, it allows to obtain joints with very good mechanical properties, with a joints efficiency of 80–90% compared to parent material. It has been successfully used in the automotive, aerospace, shipbuilding, space and electronic industries. Originally designed to combine non-weldable or hard-weldable 2xxx and 7xxx aluminum alloys. FSW has found a wide application in joining almost all metallic engineering materials, plastics and non-ferrous materials such as aluminum – magnesium, aluminum – copper, aluminum. An additional advantage of the method is the lack of fasteners,*

tworzyw sztucznych oraz materiałów różniamiennych, jak np. aluminium – magnez, aluminium – miedź, aluminium – stal. Dodatkową zaletą metody jest brak łącznika, co bezpośrednio przyczynia się do obniżenia masy konstrukcji [8]. Przykład zastosowania metody FSW w konstrukcji karoserii samochodu pokazano na rys. 2.

*which directly contributes to lowering the weight of the structure [8]. An example of the application of the FSW method in car body design is shown in Fig. 2.*



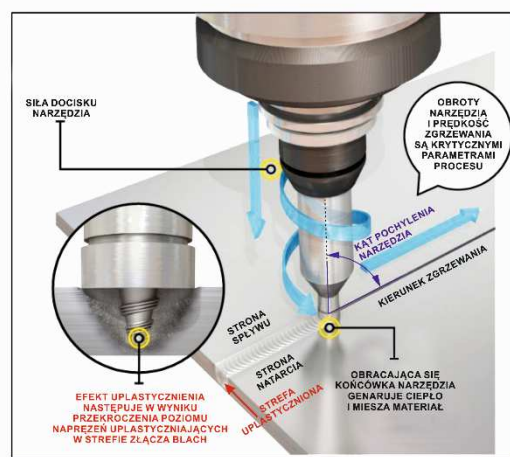
Rys. 2. Audi Space Frame; rama przestrzenna samochodu Audi A7 wykonana ze stopów aluminium i magnezu łączona technologią FSW [3]

Fig. 2. Audi Space Frame; Audi A7 space frame made of aluminum alloy and magnesium alloy with FSW technology [3]

Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem materiału zgrzeiny FSW jest procesem łączenia materiałów w stanie stałym. Został opracowany i opatentowany przez Instytut Spawalnictwa (TWI – *The Welding Institute*) Uniwersytetu w Cambridge w 1991 roku [1]. FSW jest procesem termomechanicznym, w którym poprzez wpływ podwyższonej temperatury pochodzącej od tarcia narzędzia o powierzchnie łączonych materiałów, uplastycznione materiały są ze sobą łączone na skutek plastycznego płynięcia. Specjalne obrotowe narzędzie jest zagłębiane pomiędzy łączone materiały, a następnie przesuwane wzdłuż linii styku blach. Narzędzie składa się z dwóch elementów: wieńca opory i trzpienia. Od czasu wynalezienia metody powstało wiele różnych i złożonych geometrii narzędzi. Zostały one opracowane w celu optymalizacji procesu generowania ciepła, a co za tym idzie plastycznego przepływu materiałów. Proces FSW umożliwia łączenie różnych materiałów inżynierskich w szerokim zakresie od 0,4 nawet do 50 mm grubości. Metoda nie wymaga dodatkowego łącznika, a temperatura procesu nie może przekraczać 90% temperatury topnienia łączonego materiału, dzięki czemu unika się kwestii związanych z ewentualnym topieniem, a następnie ponownym krzepnięciem materiału tak, jak to ma miejsce podczas spawania łukowego. Na rys. 3 pokazano schemat procesu FSW [6].

*Friction stir welding FSW is a solid state joining process. It was developed and patented by The Welding Institute (TWI) of the University of Cambridge in 1991 [1]. FSW is a thermomechanical process in which, due to the influence of the elevated friction temperature of the tool on the surfaces of the materials to be joined, the plasticized materials are joined together by the plastic flow. A special rotary tool is inserted between the joined materials and then moved along the sheet contact line. The tool consists of two components: the shoulder and pin. Since the invention of the method many different and complex geometries have been created. They have been developed to optimize the heat generation process and thus the plastic flow of materials. The FSW enables the joining of various engineering materials in a wide range of 0.4 to 50 mm thick. The method does not require an additional connector and the process temperature cannot exceed 90% of the melting temperature of the joined material, thereby avoiding issues related to possible melting and subsequent re-solidification of the material, as is the case during arc welding. Figure 3 shows the FSW process diagram [6].*



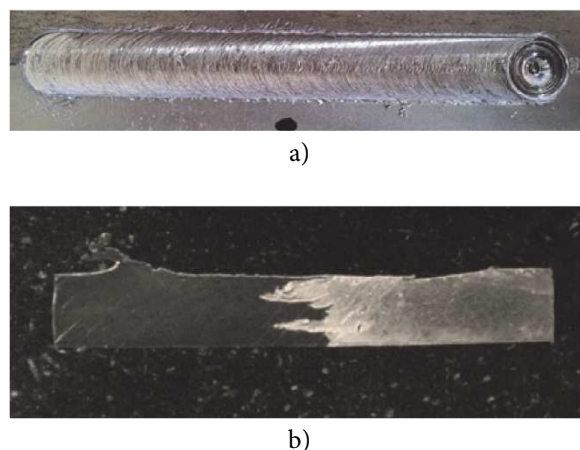


Rys. 3. Schemat procesu FSW w konfiguracji doczołowej [1]

Fig. 3. FSW process configuration in butt-shaped configuration [1]

Otrzymana zgrzeina w procesie FSW nie jest symetryczna. Jest to związane z asymetryczną naturą przepływu materiału. Dlatego w zgrzeinie można zidentyfikować dwie różne strefy: stronę natarcia i stronę spływu. Na rys. 4 została pokazana zgrzeina FSW od strony lica i przekroju poprzecznego 2 milimetrowych blach stopu aluminium 6061 oraz magnezu AZ31B [7].

The resulting FSW weld in the process is not symmetrical. This is related to the asymmetric nature of the material flow. Therefore, two different zones can be identified in the weld: the advancing side and the retreating side. Fig. 4 shows the FSW weld on the face and cross section of 2 mm aluminum alloy plates 6061 and magnesium AZ31B [7].



Rys. 4. Widok zgrzeiny FSW stopu Al 6061 i Mg AZ31B o grubości 2 mm: a) strona lica, b) przekrój poprzeczny [5]

Fig. 4. View of FSW joint Al 6061 and Mg AZ31B 2 mm in thickness: a) face, b) cross section [5]

Zgrzewanie cienkich blach poniżej 0,8 mm grubości techniką FSW wiąże się z występowaniem wielu problemów technologicznych. Związane jest to z rodzajem materiału oraz wrażliwością procesu FSW na parametry zgrzewania, co bezpośrednio wpływa na zmiany mikrostruktury materiału zgrzeiny oraz jej wytrzymałość. Dodatkowo na podstawie analizy literatury stwier-

Welding of thin sheets below 0.8 mm by FSW technology involves a number of technological problems. This is related to the type of material and the sensitivity of the FSW process to the welding parameters, which directly influences the changes in microstructure of the weld material and its strength. In addition, based on the analysis of literature, there have been no stu-

dzono brak opracowań dotyczących zgrzewania cienkich blach, w szczególności stopów tytanu, oraz brak odpowiednich norm dotyczących realizowania procesu FSW.

## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W pracy przedstawiono możliwości metody FSW w łączeniu cienkich blach ze stopu aluminium 2024-T3 grubości 0,5 mm, stopu magnezu AZ31B o grubości 0,5 mm oraz tytanu GRADE 3 grubości 0,4 mm. Złącza liniowe FSW wykonano na odpowiednio przygotowanych próbkach blach o wymiarach 100x200 mm łączonych w sposób doczołowy, wzdłuż kierunku walcowania. Przed przystąpieniem do zgrzewania FSW powierzchnie blach zostały oczyszczone etanolem. Proces zgrzewania realizowano 3-osiową frezarkę numeryczną wyposażoną w odpowiednie oprzyrządowanie mocujące, pokazane na rys. 5. Wszystkie rodzaje blach zgrzewano, wykorzystując taką samą geometrię narzędzia. Dla blach ze stopu aluminium i magnezu narzędzie wykonano z węgla wolframu, natomiast dla stopu tytanu narzędzie wykonano ze specjalnej ceramiki narzędziowej. Dodatkową modyfikacją stanowiska było zastosowanie specjalnej wkładki ceramicznej w uchwycie mocującym podczas zgrzewania blach tytanowych. Parametry geometryczne narzędzi dostosowano do grubości blach wg następującej zależności [12]:  $\varnothing$  kołnierza:  $\sim 2.2 \times \text{gr. mat.} + 7.3$ ,  $\varnothing$  trzpienia:  $\sim 0.8 \times \text{gr. mat.} + 2.2$ . Narzędzie pokazano na rys. 6. Podczas zgrzewania FSW zrealizowano pomiar sił osiowych i promieniowych, wykorzystując do tego celu siłomierz piezoelektryczny.

*dies on the welding of thin sheets, in particular titanium alloys, and the lack of appropriate standards for the FSW process.*

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

*The paper presents the possibilities of the FSW method in joining thin sheets of aluminum alloy 2024-T3 of 0.5 mm in thickness, magnesium alloy AZ31B of 0.5 mm in thickness and GRADE 3 titanium of 0.4 mm in thickness. FSW line joining were made on well prepared samples of 100x200 mm sheets butt jointed along the rolling direction. Before FSW metal surfaces have been cleaned with ethanol. The welding process was carried out with a 3-axis numerical milling machine equipped with the appropriate fixture, shown in Fig. 5. All types of welds were welded using the same tool geometry. For the aluminum alloy and magnesium alloy, the tool was made of tungsten carbide, while for the titanium alloy the tool was made of special ceramics. An additional modification of the stand was the use of a special ceramic insert install inside the fixture during the welding of titanium plates. The geometry parameters of the tools were adjusted to the thickness of the sheets according to the following relationship [12]:  $\varnothing$  shoulder:  $\sim 2.2 \times \text{mat. thick.} + 7.3$ ,  $\varnothing$  pin:  $\sim 0.8 \times \text{mat. thick.} + 2.2$ . The tool is shown in Fig. 6. During FSW welding, axial and radial forces were measured using a piezoelectric dynamometer.*



Rys. 5. Stanowisko zgrzewania FSW

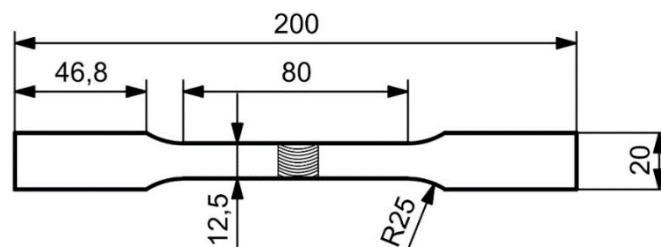
Fig. 5. FSW welding station



Rys. 6. Narzędzie z węglika wolframu zastosowane w procesie FSW przy zgrzewaniu blach stopu Al i Mg  
 Fig. 6. Tungsten carbide tool used in the FSW process for welding Al and Mg alloy

W celu oceny jakości złącza z materiału rodzimego oraz zgrzein FSW wycięto próbki do badań w statycznej próbie rozciągania. Wyznaczono stosunek maksymalnej siły zrywającej złącze FSW do materiału rodzimego. Wymiary próbki pokazano na rys. 7. Statyczną próbę rozciągania wykonano zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2009 na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100, w temperaturze pokojowej. Próbki do badań wytrzymałościowych zostały wycięte z początku, środka oraz końca zgrzeiny. Wyniki prób rozciągania z poszczególnych obszarów zgrzeiny zostały uśrednione.

*The samples for testing in a static tensile test were cut from the native material and FSW welds. The ratio of the maximum breaking force of the FSW joints to the native material was determined. The dimensions of the sample shown in Fig. 7. Static tensile test was performed in accordance with BS EN ISO 6892-1: 2009 using universal testing machine Zwick / Roell Z100 at room temperature. The test specimens were cut from the beginning, middle and end of the weld. The tensile test results from the individual weld areas were averaged.*



Rys. 7. Geometria próbek do wykonania statycznej próby rozciągania  
 Fig. 7. Geometry of specimen for static tensile test

Wartość siły osiowej i promieniowej, parametry siłowe procesu dla poszczególnych materiałów, jak również stabilność procesu, wiążą się z osiągnięciem odpowiednich naprężeń uplastyczniających.

Parametry technologiczne procesu takie, jak prędkość obrotowa narzędzia i prędkość zgrzewania, czyli posuw narzędzia, zostały tak dobrane, aby jakość i wytrzymałość zgrzein była jak największa. Na wartość parametrów zgrzewania wpływa grubość i gatunek materiału oraz typ złącza.

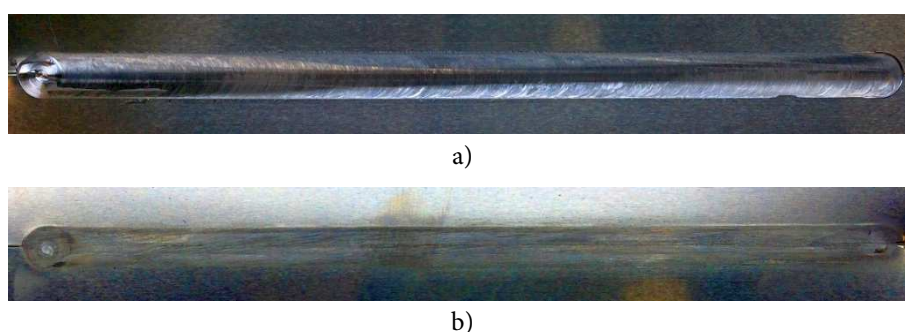
*The value of axial and radial force, the process's strength parameters for individual materials, as well as the stability of the process, are related to the attainment of appropriate plasticizing stresses.*

*Technological parameters of the process such as tool rotation speed and welding speed, the welding speed, are chosen so that the quality and strength of the welds are as great as possible. The value of the welding parameters depends on the thickness and type of material and the type of joint.*



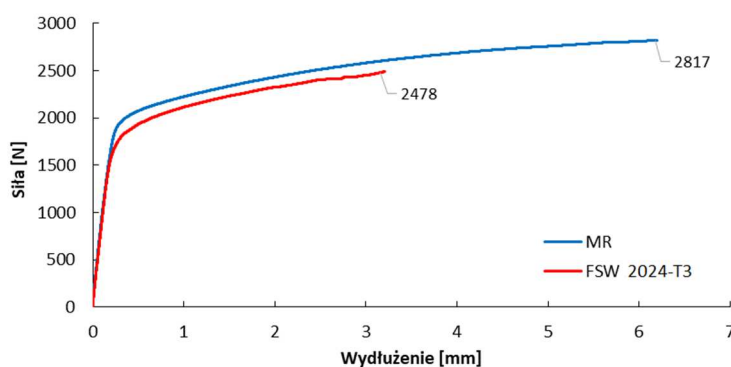
## 2.1. Łączenia doczołowe blach ze stopu aluminium 2024-T3

Na rys. 8 pokazano zgrzeinę FSW stopu aluminium 2024-T3 grubości 0,5 mm. Na podstawie wizualnej oceny powierzchni zgrzeiny można stwierdzić, że złącze jest jednorodne i wolne od wad na całej długości zarówno od strony lica i grani. Złącze zostało wykonane narzędziem z węgla wolframu z następującymi parametrami technologicznymi: obroty narzędzia w przedziale 1500–3000 obr/min, prędkość zgrzewania w przedziale 50–100 mm/min, czas uplastycznienia (*dewll time*) 20 s.



Rys. 8. Złącze FSW blach stopu 2024-T3 grubości 0,5 mm: a) lico, b) grań  
Fig. 8. FSW joint of 2024-T3 alloy sheet 0.5 mm in thickness: a) face, b) rim

Rys. 9 przedstawia wykres rozciągania dla materiału rodzimego (MR) oraz zgrzeiny FSW stopu 2024-T3.



Rys. 9. Wykres rozciągania stopu aluminium 2024-T3 grubości 0,5 mm  
Fig. 9. Tensile tests results for parent material and FSW welds of 2024-T3 alloy

Materiał rodzimy charakteryzował się wytrzymałością na rozciąganie wynoszącą 460 MPa, natomiast złącze FSW 408 MPa. Efektywność złącza obliczona na podstawie zależności (1) wynosiła 88%.

## 2.1. FSW butt joint of 2024-T3 aluminum alloys sheet

Fig. 8 shows the FSW weld 2024-T3 aluminum alloy 0.5 mm in thickness. Based on a visual assessment of the weld surface, it can be concluded that the joint is homogeneous and free of defects all along the face. The joint was made with tungsten carbide tool with the following technological parameters: tool rotation in the range of 1500–3000 rpm, welding speed in the range of 50–100 mm/min, dwell time 20 s.

Fig. 9 shows the graph of maximal braking force versus elongation for parent material (PM) and FSW joint of 2024-T3 alloy.

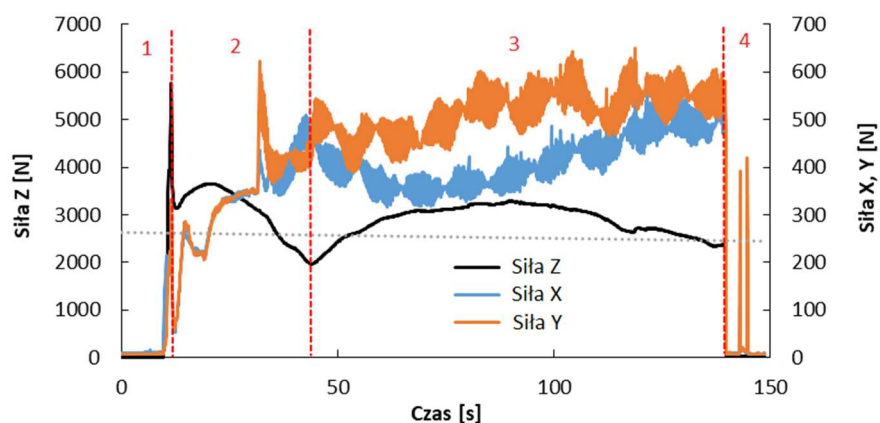
The parent material has a ultimate tensile strength (UTS) of 460 MPa and a FSW joint 408 MPa. The joint efficiency calculated according to the formula (1) was 88%.

$$EP = \frac{R_{m \text{ złącza}}}{R_{m \text{ mat. rodz.}}} * 100\% \quad (1)$$

$$EP = \frac{R_{m \text{ złącza}}}{R_{m \text{ mat. rodz.}}} * 100\% \quad (1)$$

Dokonano pomiaru sił osiowych i promieniowych. Na rys. 10 przedstawiono przebiegi tych sił dla złącza wykonanego z parametrami: obroty narzędzia 1500 obr/min i posuwem narzędzia wynoszącym 100 mm/min. Na podstawie przebiegu sił możliwe jest określenie etapów charakterystycznych dla procesu FSW takich, jak: 1. zagłębienie narzędzia (*tool plunging*), 2. zapoczątkowanie uplastycznienia (*tool dwelling*), 3. zgrzewanie (*welding*), 4. wyjście narzędzia (*tool pulling out*), oraz ocenę stabilności procesu zgrzewania. Etap 1 i 2 pokazany na wykresie siły jest typowy dla procesu FSW. Zagłębianie się obracającego narzędzia w materiale powoduje stosunkowo duży wzrost siły w szczególności z osi Z. Następnie obracające się narzędzie pozostaje w materiale przez określony czas w celu jego odpowiedniego zmiękczenia tak, aby mogło nastąpić zjawisko plastycznego płynięcia materiału. W miarę upływu czasu materiał będzie się uplastyczniał, a co za tym idzie, siła osiowa będzie malała. Najważniejszym z punktu widzenia realizacji procesu jest etap 3 – zgrzewanie. Dąży się do uzyskania stałej wartości siły podczas zgrzewania. Na tej podstawie jesteśmy w stanie określić jednorodność złącza na całej długości. Na rys. 10 przebieg siły podczas zgrzewania ulega niewielkim wahaniom. Nie wpływają one w znaczący sposób na jakość uzyskanego złącza FSW.

*Axial and radial forces were measured. Fig. 10 shows the graphs of these forces for the FSW joint made with the following parameters: tool speed 1500 rpm and welding speed 100 mm/min. On the basis of the strength chart it is possible to determine the characteristic stages for the FSW process such as: 1. tool plunging, 2. tool dwelling, 3. welding, 4. tool pulling out, and assessment of the stability of the welding process. Step 1 and 2 shown in the graph of force is typical of the FSW process. The plunging of a rotating tool in the material results in a relatively high increase of the force, in particular of the Z axis. The rotating tool then remains in the material for a certain period of time to soften it so that the material can flow. As time goes by, the material will become plastic and the resulting axial force will decrease. The most important from the point of view of process implementation is stage 3 – welding. Constant force values are achieved during welding. On this basis we are able to determine the homogeneity of the joint over its entire length. In Fig. 10, the graph of force during welding is slight. They do not significantly affect the quality of the resulting FSW joints.*



Rys. 10. Przebieg siły osiowej Z oraz promieniowej w osi X i Y w czasie złącza FSW stopu 2024-T3 grubości 0,5 mm

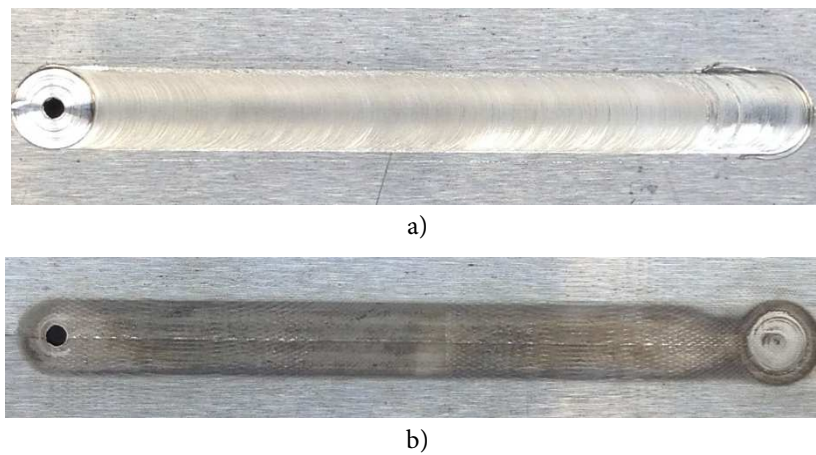
Fig. 10. Axis and radial force graph during the FSW of 2024-T3 alloy of 0.5 mm in thickness

## 2.2. Łączenie doczołowe blach ze stopu magnezu AZ31B

Na rys. 11 przedstawiono zgrzeinę FSW wykonaną na blachach ze stopu magnezu AZ31B grubości 0,5 mm. Wizualna ocena złącza nie wykazuje wad. Do wykonania zgrzeiny posłużyło narzędzie takie samo jak dla stopu aluminium. Parametry technologiczne procesu zgrzewania oscylowały w granicach: obroty narzędzia od 1500 do 3000 obr/min, prędkość zgrzewania od 50 do 100 mm/min. Czas uplastycznienia (*dwell time*) wynosił 20 s.

## 2.2. FSW butt joint of AZ31B magnesium alloys sheet

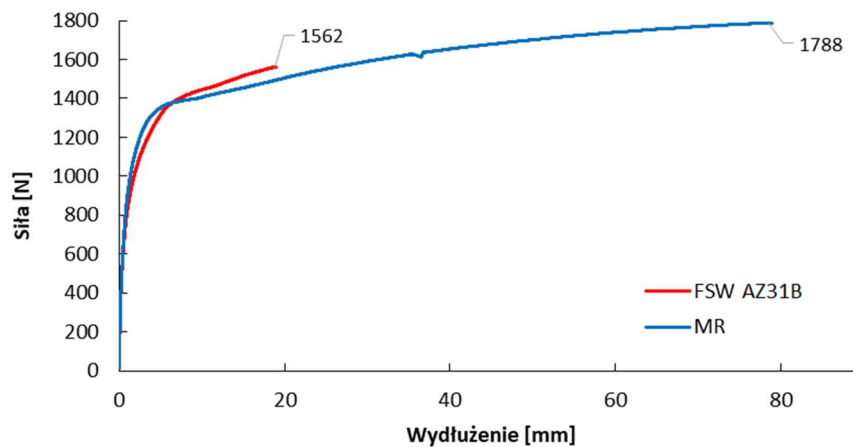
*Fig. 11 shows the FSW weld made on magnesium alloy sheets AZ31B of 0.5 mm in thickness. Visual evaluation of the joints does not show any defects. Used tool was the same like for aluminum alloy. The technological parameters of the welding process oscillated within: the tool speed from 1500 to 3000 rpm, the welding speed from 50 to 100 mm/min. The dwell time was 20 s.*



Rys. 11. Złącze FSW blach stopu AZ31B grubości 0,5 mm: a) lico, b)grzań  
 Fig. 11. FSW joint of AZ31B alloy sheet 0.5 mm in thickness: a) face, b) ridge

Na rys. 12 przedstawiono wykres rozciągania dla materiału rodzimego (MR) oraz zgrzeiny FSW stopu AZ31B.

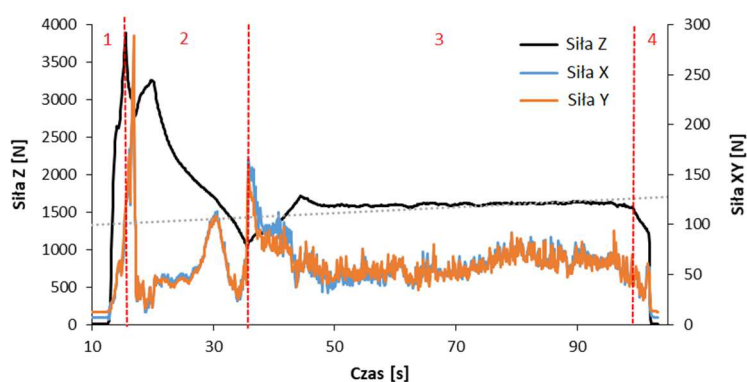
*Fig. 12 shows the graph of maximal braking force versus elongation for parent material (PM) and FSW joint of AZ31B alloy.*



Rys. 12. Wykres rozciągania stopu magnezu AZ31B grubości 0,5 mm  
 Fig. 12. Tensile tests results for parent material and FSW welds of AZ31B alloy

Stop magnezu AZ31B charakteryzuje się wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$  288 MPa, natomiast złącze FSW ok. 260 MPa. Efektywność złącza FSW – stopu magnezu AZ31B wynosi ponad 90%. Należy zauważyć, że złącze FSW wykazało 4-krotnie mniejsze wydłużenie w zakresie odkształceń plastycznych, w porównaniu do materiału rodzimego. Dla omawianego złącza FSW także realizowano pomiar sił, co pokazano na rys. 13. Analizując etap 3 – zgrzewania zauważamy, że przebieg siły jest stały na całej długości. Skutkuje to otrzymaniem zgrzeiny o jednakowych właściwościach na całej długości. Parametry procesu pozwolił na uzyskanie optymalnego poziomu uplastycznienia zgrzewanych blach.

*The magnesium alloy AZ31B is characterized by a ultimate tensile strength of  $R_m$  288 MPa and a FSW joint approx. 260 MPa. The efficiency of the FSW – magnesium alloy AZ31B joint is over 90%. It should be noted that the FSW joints showed a 4 times lower elongation in the plastic deformation range compared to the parent material. For the FSW joint, force measurement is also performed, as shown in Fig. 13. When analyzing stage 3 – welding, we observe that the force curve is constant over the entire length. This results in a weld of uniform properties over the entire length. The process parameters allowed the optimum level of plasticization of the welded sheets.*



Rys. 13. Przebieg siły osiowej Z oraz promieniowej w osi X i Y w czasie złącza FSW stopu AZ31B grubości 0,5 mm

*Fig. 13. Axis and radial force graph during the FSW of AZ31B alloy of 0.5 mm in thickness*

### 2.3. Łączenie doczołowe blach tytanowych GRADE 3 (AMS 4900)

Odmiennego podejścia do realizacji procesu FSW wymagają blachy tytanowe. Związane jest to z zakresem temperatury wymaganej do uplastycznienia materiału blach, w granicach 1000°C. Wymaga to stosowania specjalnych materiałów narzędziowych oraz gazów osłonowych w celu zapobiegnięcia utleniania się zgrzeiny [13].

Na rys. 14 przedstawiono zgrzeinę liniową FSW tytanu GRADE 3 grubości 0,4 mm. Wizualna ocena złącza także w tym przypadku nie wykazuje wad powierzchniowych. Do wykonania zgrzeiny posłużyło narzędzie zbliżone geometrią do narzędzia użytego podczas zgrzewania stopu Al i Mg, jednak wykonane ze specjalnej ceramiki narzędziowej zdolnej pracować w temperaturze powyżej 1000°C. Parametry techno-

### 2.3. FSW butt joint of titanium GRADE 3 (AMS 4900) sheet

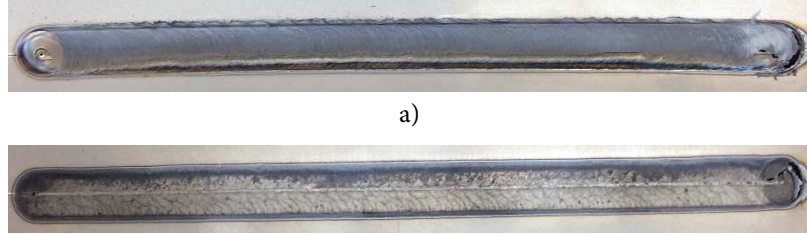
*A different approach to the FSW process requires a titanium sheet. This is related to the temperature range required to plasticize the sheet material, within 1000°C. This requires the use of special tooling materials and shielding gases to prevent oxidation of the weld [13].*

*Fig. 14 shows a linear weld of FSW titanium GRADE 3 with of 0.4 mm in thickness. Visual evaluation of the joint also in this case does not show surface defects. To make the weld, a tool has a similar geometry like for welding Al and Mg, but made from special tool ceramics capable of working at temperatures above 1000°C. The technological parameters of the welding process are: spindle speed from 4000 to 5500 rpm,*



logiczne procesu zgrzewania to: obroty narzędzia od 4000 do 5500 obr/min, prędkość zgrzewania – 100 mm/min oraz czas uplastycznienia (*dwell time*) 20s. Proces zgrzewania realizowano w osłonie argonu.

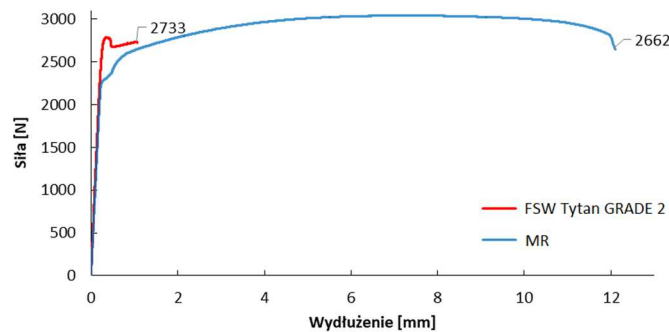
welding speed – 100 mm/min and dwell time 20 s. The welding process was carried out in argon shielding.



Rys. 14. Złącze FSW blach tytanu GRADE 3 grubości 0,4 mm: a) lico, b) grań  
Rys. 14. FSW joint of titanium GRADE 3 sheet of 0.5 mm in thickness: a) face, b) ridge

Wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej czystego technicznie tytanu  $\alpha$  GRADE 3 wynosi ok. 600 MPa, natomiast zgrzeiny FSW ok. 505 MPa, co daje efektywność złącza na poziomie 84%. Wykres rozciągania złącza FSW i materiału rodzimego pokazano na rys. 15.

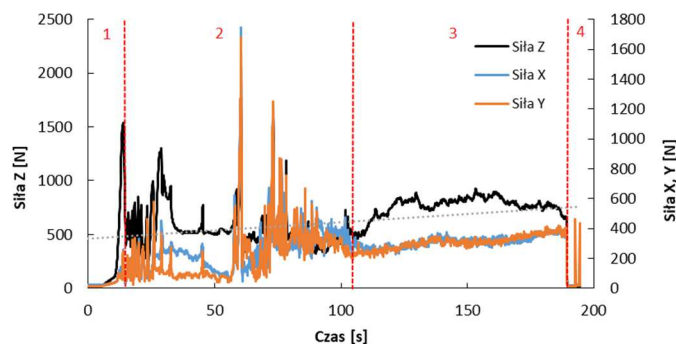
The tensile strength of the technically pure titanium  $\alpha$  GRADE 3 is about 600 MPa, while the FSW welds are about 505 MPa, which results in a 84% efficiency of the joint. The FSW and parent material stretching diagram is shown in Fig. 15.



Rys. 15. Wykres rozciągania materiału rodzimego oraz złącza FSW stopu tytanu GRADE 2 grubości 0,4 mm  
Rys. 15. Tensile tests results for parent material and FSW welds of titanium GRADE 3

Rezultaty pomiaru siły osiowej i promieniowej zostały pokazane na rys. 16.

The results of axial and radial force measurements are shown in Fig. 16.



Rys. 16. Przebieg siły osiowej Z oraz promieniowej w osi X i Y w czasie złącza FSW stopu tytanu GRADE 2 grubości 0,4 mm; 1, 2, 3, 4 – etapy procesu FSW  
Rys. 16. Axis and radial force graph during the FSW of titanium GRADE 3 of 0.4 mm in thickness; 1, 2, 3, 4 – stages of FSW process

Przeprowadzone próby zgrzewania tarcio-  
wego z przemieszaniem materiału zgrzeiny cien-  
kich blach stopów aluminium, magnezu i tytanu  
potwierdzają skuteczność metody. Średnia efek-  
tywność złączy, w odniesieniu do materiału ro-  
dzimego, zawierała się w przedziale 80–90%.  
Związane jest to w znacznej mierze z odpowied-  
nio dobranymi parametrami technologicznymi  
procesu. Ważne jest również zbudowanie odpo-  
wiedniego stanowiska mocującego, w szczegól-  
ności zastosowanie materiałów mogących pracować  
w podwyższonych temperaturach. W przy-  
padku zgrzewania stopów tytanu konwencjonalne  
materiały narzędziowe nie spełniają oczekiwań,  
stąd potrzeba korzystania z zaawansowanych  
materiałów ceramicznych zdolnych pracować  
w temperaturze przekraczającej 1000°C i wa-  
runkach dużego obciążenia mechanicznego. Nar-  
zędzie wykonane z węgla wolframu znakomicie  
nadaje się do zgrzewania metali nieżelaznych.  
Po wykonaniu 20 zgrzein o długości 200 mm  
nie stwierdzono zużycia narzędzia.

Statyczna próba rozciągania ujawniła, że  
obszar centralny zgrzeiny FSW posiada  
większą wytrzymałość, w stosunku do  
materiału rodzimego. Zerwanie próbek dla  
stopów aluminium i magnezu, następowało  
zawsze po stronie spływu w strefie TMAZ –  
termomechanicznie odkształconego materiału.  
Można zatem stwierdzić że obszar pomiędzy  
strefą wpływu ciepła a jądrem zgrzeiny, czyli  
obszar termomechanicznie odkształconego mate-  
riału stanowi swego rodzaju karb strukturalny.  
Na rys. 17 pokazano próbki dla poszczególnych  
materiałów po wykonaniu statycznej próby jedno-  
osiowego rozciągania. Zerwanie próbek nastąpiło  
w tym samym obszarze zgrzeiny [9, 10, 11].

*The FSW tests of thin aluminum, magne-  
sium and titanium alloys confirm the effective-  
ness of the method. The average efficiency of the  
joints, in relation to the native material, ranged  
between 80 and 90%. This is related to the  
suitably selected technological parameters of the  
process. It is also important to build a suitable  
fixing stand, in particular the use of materials  
that can work at elevated temperatures. In the  
case of welding of titanium alloys, conventional  
tool materials do not meet expectations, hence  
the need for advanced ceramic materials capable  
of operating at temperatures exceeding 1000°C  
and high mechanical load conditions. Tool made  
of tungsten carbide is excellent for welding non-  
ferrous metals. After 20 welds of 200 mm length,  
no tool wear was found.*

*The static tensile test revealed that the cen-  
tral area of the FSW weld has a higher strength  
compared to the parent material. Tensile break-  
down of aluminum and magnesium alloys al-  
ways occurred at the retreating side of the  
TMAZ zone – thermo-mechanically deformed ma-  
terial. It can be concluded that the region be-  
tween the heat affected zone and the weld nug-  
get, the area of the thermo-mechanically de-  
formed material is a kind of a structural notch.  
Fig. 17 shows samples after performing a static  
uniaxial stretch test. All samples brake in the  
same area of the weld [9, 10, 11].*



Rys. 17. Widoki próbek po wykonaniu badań wytrzymałościowych; dla wszystkich próbek zerwanie nastąpiło po stronie spływu  
*Fig. 17. Views of sample after performing strength tests. For all samples, break on the retreating side*

W przypadku, gdy materiałem łączonym jest stop tytanu, zerwanie materiału następowało także po stronie spływu, w strefie wpływu ciepła. Spowodowane jest to zjawiskiem „zaciągania” materiału (rys. 17) w kierunku strony spływu, co także wpływa na utworzenie karbu strukturalnego. Budowa złącza FSW dla omawianych materiałów jest silnie niesymetryczna. Zjawisko „zaciągania materiału” widoczne od strony lica zgrzeiny FSW blachy tytanowej GRADE 3 pokazane na rys. 18 [11].



Rys. 18. Widoczne zaciąganie materiału w kierunku strony spływu zgrzeiny FSW stopu tytanu GRADE 2 grubości 0,4 mm

*Fig. 18. Visible material flow towards retreating side of FSW weld titanium GRADE 3 of 0.4 mm in thickness*

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych sformułowano niżej wymienione wnioski.

1. Metoda FSW pozwala na wykonywanie wysokiej jakości, wolnych od wad połączeń cienkich blach metalicznych ze stopów metali nieżelaznych takich, jak: stop Al 2024-T3 i Mg AZ31B grubości 0,5 mm, jak również tytanu GRADE 3 grubości 0,4 mm.
2. Efektywność połączenia, mierzona na podstawie statycznej próby rozciągania złącza FSW, w odniesieniu do materiału rodzimego dla stopu aluminium, wynosiła 88%, dla stopu magnezu – 90%, natomiast dla tytanu – 84%.
3. Zerwanie próbek FSW, podczas wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ), następowało dla stopów Al i Mg po stronie spływu w obszarze termomechanicznie odkształconego materiału – (karb strukturalny). W przypadku tytanu GRADE 3 zerwanie nastąpiło także po stronie spływu, w obszarze strefy wpływu ciepła. W złączach FSW stopów tytanu nie stwierdzono występowania strefy termomechanicznie odkształconego materiału.

### 3. CONCLUSIONS

*Based on experimental studies, the following conclusions were made.*

1. The FSW method allows for the production of high quality joints of non-ferrous metal alloys such as: Al 2024-T3 and Mg AZ31B of 0,5 mm in thickness as well as titanium GRADE 3 of 0.4 mm in thickness.
2. The FSW joint effectiveness, compared to parent material was 88% for the aluminum alloy, 90% for the magnesium alloy, and 84% for the titanium alloy.
3. Fracture of FSW samples, when determining ultimate tensile strength ( $R_m$ ), were observed for Al and Mg alloys at the retreating side of the thermomechanically deformed material (structural notch). In the case of titanium GRADE 3 the fracture also occurred on the retreating side, in the area of the heat-affected zone. In the FSW joints of titanium alloys, no thermomechanically deformed material zone has been found.

4. Złącza FSW blach cienkich ze stopów Al, Mg oraz Ti charakteryzują się znacznie mniejszą plastycznością w porównaniu do materiału rodzimego. Wytrzymałość w centralnej strefie zgrzeiny FSW (tzw. jądrze zgrzeiny) jest większa od wytrzymałości materiału rodzimego.
  5. Narzędzie wykonane z węgliku wolframu przeznaczone do zgrzewania blach stopów metali nieżelaznych nie wykazywało zużycia po wykonaniu 20 zgrzein o długości 200 mm.
  6. Temperatura procesu FSW blach tytanowych oscyluje w granicach 1000°C [13]. Istnieje więc potrzeba stosowania zaawansowanych materiałów narzędziowych (np. specjalnej ceramiki narzędziowej) lub stosowanie specjalnych układów chłodzących; zarówno narzędzie, jak i przyrząd mocujący.
  7. Jakość złączy FSW silnie zależy od parametrów technologicznych procesu, gatunku i grubości materiału blachy oraz od zastosowanej atmosfery gazów osłonowych.
  8. Na podstawie pomiaru siły osiowej i promieniowej podczas realizacji procesu FSW, można określić stopień uplastycznienia łączonego materiału. Na podstawie przebiegu siły – wnioskować o jednorodność struktury złącza na całej długości i grubości.
4. *The FSW joints of Al, Mg, and Ti alloy sheets are characterized by significantly lower plasticity compared to the parent material. The strength in the central area of the weld zone (so-called weld nugget) is greater than the strength of the parent material.*
  5. *A tool made of tungsten carbide for welding non-ferrous metal sheets showed no wear after 20 welds of 200 mm length.*
  6. *The FSW process temperature for titanium sheets oscillates within 1000°C [13]. There is a need for advanced tooling materials (e.g. special tooling ceramics) or use a special cooling systems, both for tool and fixing device.*
  7. *The quality of FSW joints strongly depends from the technological parameters of the process, the type and thickness of the welded materials and from the welding shielding atmosphere.*
  8. *Based on the measurement of axial and radial force during the FSW process, the degree of plasticization of the joined material can be determined. On the basis of the force graph we can infer the uniformity of the joint structure over its entire length and thickness.*

## PODZIĘKOWANIA

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## LITERATURA

- [1] Thomas W.M., E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes. *Friction Stir Butt Welding*. International Patent Application PCT/GB92/02203, GB Patent Application 9125978.8. 6 Dec. 1991 and US Patent 5,460,317.

## ACKNOWLEDGEMENTS

*Financial support of Structural Funds in the Operational Programme – Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund – Project “Modern material technologies in aerospace industry”, No.. POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.*

## REFERENCES

- [1] Thomas W.M., E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes. *Friction Stir Butt Welding*. International Patent Application PCT/GB92/02203, GB Patent Application 9125978.8. 6 Dec. 1991 and US Patent 5,460,317.



- [2] Malarvizh S., V. Balasubramanian. 2012. "Influences of tool shoulder diameter to plate thickness ratio (D/T) on stir zone formation and tensile properties of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminium-AZ31B magnesium alloys". *Materials and Design* 40: 453–460.
- [3] Audi (2013), Audi Space Frame, text and pictures available at: <http://www.audi.co.uk/new-cars/a8/a8/safety/audi-space-frame.html>.
- [4] Lacki P., Z. Kucharczyk, R.E. Śliwa, T. Gałczyński. 2013. "Effect of tool shape on temperature field in friction stir spot welding". *Archives of Metallurgy and Materials* 58: 597–601. DOI: 10.2478/amm-2013-0043.
- [5] Baffari D., G. Buffa, D. Campanella, L. Fratini, F. Micari. 2014. "Friction based solid State welding techniques for transportation industry applications". International Conference on Manufacture of Light-weight Components – ManuLight2014.
- [6] Myśliwiec P., R.E. Śliwa. 2016. "Linear FSW Technology for Joining Thin Sheets of Aluminium and Magnesium Alloys". International Scientific Conference PRO-TECH-MA 2016, Bezmiechowa 2016.
- [7] Mishra R.S, Z.Y. Ma. 2005. „Friction stir welding and processing”. *Materials Science and Engineering R* 50: 1–78.
- [8] Balawender T., R.E. Śliwa, T. Gałczyński. 2014. „Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem blach ze stopu aluminium 2024”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 81 (7): 450–455.
- [9] Śliwa R.E., Myśliwiec P. 2016. „Friction Stir Welding of Thin Sheets of Aluminium and Magnesium Alloys”. Advanced Metal Forming Process in Automotive Industry, AutoMetForm 2016, Wrocław 2016.
- [10] Myśliwiec P., R.E. Śliwa. 2016. „Analiza teoretyczna i eksperymentalna zjawiska uplastycznienia w strefie połączenia materiałów w procesie liniowego zgrzewania tarciovego z przemieszaniem (FSW)”. X Jubileuszowe Seminarium Naukowe Zintegrowane Studia Podstaw Deformacji Plastycznej Metali, Łańcut 2016.
- [11] Myśliwiec P., Śliwa R.E., Buszta S. 2017. „Możliwości wykorzystania materiałów ceramicznych na narzędzia do realizacji procesu zgrzewania tarciovego z przemieszaniem cienkich blach tytanowych”. XIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa – Tytan i jego stopy, Janów Podlaski, 24–27.09.2017.
- [12] Zhang Y.N., X. Cao, S. Larose, P. Wanjara. 2012. "Review of tools for friction stir welding and processing". *Canadian Metallurgical Quarterly* 51 (3): 250–261.
- [13] Fratini L., F. Micari, G. Buffa, V.F. Ruisi. 2010. "A new fixture for FSW process of titanium alloys". *Manuf. Technol.* 59: 271–274.
- [2] Malarvizh S., V. Balasubramanian. 2012. "Influences of tool shoulder diameter to plate thickness ratio (D/T) on stir zone formation and tensile properties of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminium-AZ31B magnesium alloys". *Materials and Design* 40: 453–460.
- [3] Audi (2013), Audi Space Frame, text and pictures available at: <http://www.audi.co.uk/new-cars/a8/a8/safety/audi-space-frame.html>.
- [4] Lacki P., Z. Kucharczyk, R.E. Śliwa, T. Gałczyński. 2013. "Effect of tool shape on temperature field in friction stir spot welding". *Archives of Metallurgy and Materials* 58: 597–601. DOI: 10.2478/amm-2013-0043.
- [5] Baffari D., G. Buffa, D. Campanella, L. Fratini, F. Micari. 2014. "Friction based solid State welding techniques for transportation industry applications". International Conference on Manufacture of Light-weight Components – ManuLight2014.
- [6] Myśliwiec P., R.E. Śliwa. 2016. "Linear FSW Technology for Joining Thin Sheets of Aluminium and Magnesium Alloys". International Scientific Conference PRO-TECH-MA 2016, Bezmiechowa 2016.
- [7] Mishra R.S, Z.Y. Ma. 2005. „Friction stir welding and processing”. *Materials Science and Engineering R* 50: 1–78.
- [8] Balawender T., R.E. Śliwa, T. Gałczyński. 2014. „Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem blach ze stopu aluminium 2024”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 81 (7): 450–455.
- [9] Śliwa R.E., Myśliwiec P. 2016. „Friction Stir Welding of Thin Sheets of Aluminium and Magnesium Alloys”. Advanced Metal Forming Process in Automotive Industry, AutoMetForm 2016, Wrocław 2016.
- [10] Myśliwiec P., R.E. Śliwa. 2016. „Analiza teoretyczna i eksperymentalna zjawiska uplastycznienia w strefie połączenia materiałów w procesie liniowego zgrzewania tarciovego z przemieszaniem (FSW)”. X Jubileuszowe Seminarium Naukowe Zintegrowane Studia Podstaw Deformacji Plastycznej Metali, Łańcut 2016.
- [11] Myśliwiec P., Śliwa R.E., Buszta S. 2017. „Możliwości wykorzystania materiałów ceramicznych na narzędzia do realizacji procesu zgrzewania tarciovego z przemieszaniem cienkich blach tytanowych”. XIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa – Tytan i jego stopy, Janów Podlaski, 24–27.09.2017.
- [12] Zhang Y.N., X. Cao, S. Larose, P. Wanjara. 2012. "Review of tools for friction stir welding and processing". *Canadian Metallurgical Quarterly* 51 (3): 250–261.
- [13] Fratini L., F. Micari, G. Buffa, V.F. Ruisi. 2010. "A new fixture for FSW process of titanium alloys". *Manuf. Technol.* 59: 271–274.

