



Łączenie doczołowe cienkich blach ze stopów tytanu metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW)

Butt welding of thin titanium sheets using friction stir welding (FSW) technology

(1) Grzegorz Luty¹, (2) Romana Ewa Śliwa*², (3) Piotr Myśliwiec², (4) Tomasz Gałaczyński¹

¹ Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o., ul. Wojska Polskiego 3, 39-300 Mielec, Poland

² 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: 23.05.2018

Recenzja: 14.06.2018

Akceptacja: 28.09.2018

Wkład autorów

- (1) Współautor programu realizacji badań, opracowanie i analiza wyników, opracowanie manuskryptu
- (2) Autor koncepcji, założeń i metod, opracowanie i analiza wyników i opracowanie manuskryptu
- (3) Opracowanie programu i warunków realizacji badań, autor projektu elementów oprzyrządowania i ich wykonawca, opracowanie wyników badań i opracowanie manuskryptu
- (4) Opracowanie i analiza wyników i opracowanie manuskryptu

Streszczenie

Publikacja dotyczy analizy charakterystyki dynamicznej procesu FSW opartego na efekcie uplastycznienia łączonych elementów ze stopów tytanu i efektu ich wymieszania w strefie zgrzewania ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki łączenia cienkich blach. Wykazano efekt wpływu parametrów procesu takich, jak m.in.: obroty i posuw narzędzia (prędkość zgrzewania), geometria i materiał narzędzia, temperatura. Upłastycznienie w strefie połączenia wymaga odpowiedniego poziomu naprężeń ścinających dla uruchomienia mechanizmu plastycznego płynięcia. Wielkością, która reprezentuje odpowiedź materiału na obciążenia zewnętrzne powodujące jego uplastycznienie, jest wartość sił osiowej i promieniowej występujących podczas zgrzewania. Temperatura procesu FSW blach tytanowych oscyluje w granicach 1000°C. Istnieje potrzeba stosowania zaawansowanych materiałów narzędziowych (np. specjalnej ceramiki narzędziowej) i stosowanie specjalnych układów chłodzących, zarówno narzędzie, jak i przyrząd mocujący. W pracy przedstawiono wyniki zgrzewania cienkich blach ze stopu tytanu GRADE 3 o grubości 0,5 mm w połączeniach doczołowych, za pomocą narzędzi wykonanych z węgliku spiekane go oraz ze specjalnej ceramiki narzędziowej, o wymiarach dostosowanych do grubości blachy. Podczas zgrzewania rejestrowano wartości siły osiowej i promieniowej. Jakość złącza oceniano na podstawie badań właściwości mechanicznych złącza oraz analizy mikrostruktury. Wykazano, że odpowiednio dobrane parametry technologiczne i geometryczne procesu FSW wraz z odpowiednimi narzędziami, skutkują otrzymaniem połączeń wysokiej jakości i dużej powtarzalności. Najlepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu narzędzia ceramicznego, prędkości obrotowej narzędzi 4000 obr/min i prędkości posuwu 100 mm/min. Warunki te zapewniają otrzymanie zgrzeiny o efektywności złącza na poziomie 84% wytrzymałości materiału rodzimego.

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem, FSW, łączenie blach tytanowych, ceramika narzędziowa, węgiel spiekany

Article info

Received: 23.05.2018

Reviewed: 14.06.2018

Accepted: 28.09.2018

Abstract

The publication concerns the analysis of dynamic characteristics of the FSW process based on the effect of plasticization of joined elements from titanium alloys and the effect of their mixing in the welding zone, with particular emphasis on the specificity of joining thin sheets. The effect of the parameters such as tool rotational and travel speed (welding speed), geometry and material of the tool, temperature, was shown. Plasticization in the

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 78 651 15 17; e-mail: rslwiwa@prz.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 78 651 15 17; e-mail: rslwiwa@prz.edu.pl

Authors' contribution

- (1) Co-author of the research implementation program, development and analysis of results, manuscript preparation
- (2) Author of concept, conditions and methodology, development and analysis of the test results and the manuscript preparation
- (3) Development of the program and conditions for the implementation of the research, author of the tools' elements design and their manufacturer, development of the test results and the manuscript preparation
- (4) Development and analysis of the test results and the manuscript preparation

welding zone requires an appropriate level of shear stress to activate the flow plasticity mechanism. The value that represents the material's response to external loads causing its plasticization is the value of axial and radial forces during welding. The temperature of the FSW process for titanium sheets oscillates around 1000°C. There is a need to use advanced tool materials (e.g. special tool ceramics) and the use of special cooling systems for tool and the fixtures. The paper presents the results of welding thin GRADE 3 titanium sheets with a thickness of 0.5 mm in butt joints, using tools made of sintered carbide and a special tool ceramic, with dimensions adapted to the thickness of the sheet. During the welding, the values of axial and radial force were recorded. The quality of the joint was evaluated based on the mechanical properties of the joint and microstructure analysis. It was shown that the appropriately selected technological and geometric parameters of the FSW process together with the appropriate tools resulted in obtaining high quality connections and high repeatability. The best results were obtained using a ceramic tool, a rotational speed of tool at 4000 rpm and a travel speed of 100 mm/min. These conditions ensure that the weld has joint efficiency on 84% level compared to parent material.

Keywords: friction stir welding, FSW, titanium sheet joining, tools ceramic, sintered carbide

1. WPROWADZENIE

Wysoka wytrzymałość, niska gęstość i doskonała odporność na korozję to główne właściwości, które sprawiają, że stopy tytanu są atrakcyjnym materiałem konstrukcyjnym dla różnych zastosowań technicznych. Tytan i jego stopy znajdują zastosowanie w konstrukcjach statków powietrznych (wysoka wytrzymałość w połączeniu z niską gęstością), silnikach lotniczych (wysoka wytrzymałość, niska gęstość i dobra odporność na pęcznienie do około 550°C), urządzeniach biomedycznych (odporność na korozję i dużą wytrzymałość) oraz elementach urządzeń w przemyśle chemicznym, petrochemicznym i energetycznym (odporność na korozję).

Połączenie wysokiej wytrzymałości mechanicznej i małej gęstości sprawia, że tytan i stopy tytanu przewyższają pod tym względem niemal wszystkie metale, znajdując zastosowanie tam, gdzie ciężar i wytrzymałość konstrukcji mają istotne znaczenie. Wciąż rosnące zainteresowanie tytanem i stopami tytanu wiąże się z koniecznością rozwiązywania wielu problemów technologicznych, które pojawiają się podczas ich kształtowania oraz łączenia.

Elementy z tytanu i jego stopów łączy się głównie poprzez zgrzewanie elektrooporowe,

1. INTRODUCTION

High strength, low density and excellent corrosion resistance are the main properties that make titanium alloys an attractive construction material for various technical applications. Titanium and its alloys are used in aircraft construction (high strength combined with low density), aerospace engines (high strength, low density and good creep resistance up to about 550°C), biomedical devices (corrosion resistance and high strength) and elements of equipment in the chemical, petrochemical and energy industries (corrosion resistance).

The combination of high mechanical strength and low density makes titanium and titanium alloys outnumber almost all metals in this respect, finding applications where weight and structural strength are important. The growing interest in titanium and titanium alloys is associated with the need to solve many technological problems that arise during their forming and joining.

Elements made of titanium and its alloys are mainly connected by electrofusion welding, arc welding with consumable or non-consumable

spawanie łukowe elektrodą topliwą lub nietopliwą w osłonach gazów obojętnych (TIG), łukiem krytym, elektro-żużlowo oraz impulsowo elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych. Innymi metodami łączenia są również spawanie wiązką elektronów w próżni, laserowe, dyfuzyjne, tarciove, ultradźwiękowe, wybuchowe, zgniotowe w próżni lub osłonie gazowej. Każda z tych metod niesie za sobą pewne ograniczenia, a największym problemem przy spawaniu tytanu oraz stopów tytanu jest występowanie pęcherzyków oraz kruchości zanieczyszczeniowej wywołanej powietrzem, z tego powodu metoda FSW jest korzystną alternatywą przy łączeniu elementów tytanowych.

Metoda zgrzewania tarciowego z przemieszaniem (*Friction Stir Welding* – FSW) została opracowana w roku 1991 w Instytucie TWI (*The Welding Institute*) w Wielkiej Brytanii, początkowo, w szczególności do łączenia aluminium i jego stopów [1]. Proces ten polega na łączeniu materiałów w stanie stałym, co eliminuje problemy związane z topieniem materiału i jego ponownym zestalaniem, tj. pęknięcia, naprężenia szczątkowe i zniekształcenia powstałe podczas konwencjonalnego spawania [6].

Wśród najważniejszych zalet wynikających z zastosowania do łączenia metody FSW należy wymienić jego stosunkowo łatwą automatyzację (niejednokrotnie możliwe jest zastosowanie konwencjonalnych obrabiarek numerycznych), mniejsze naprężenia szczątkowe powstałego złącza oraz bardzo dobre właściwości mechaniczne złącza (często przekraczające właściwości mechaniczne złącza spawanych lub też nitowanych).

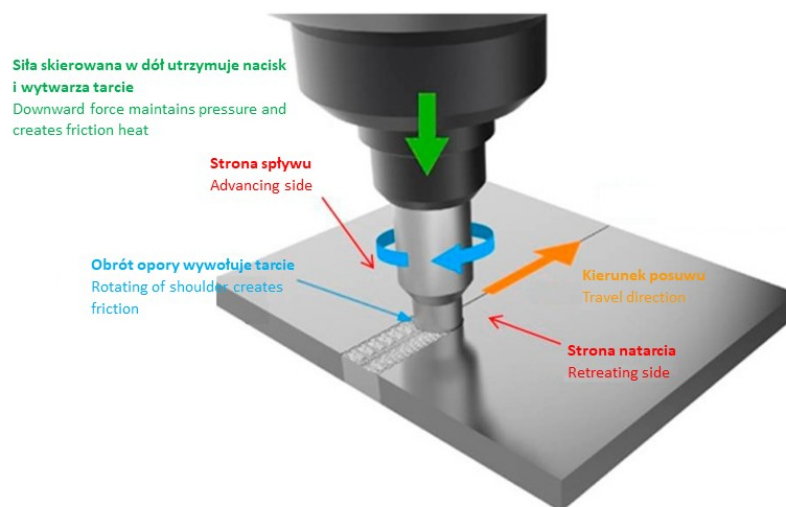
W tym procesie ciepło pozwalające na uplastycznienie materiału jest wytwarzane przez obracające się narzędzie złożone z opory i trzpienia, który zagłębia się w materiale bazowym poprzez wprowadzenie go w obrót, a następnie narzędzie przesuwają wzdłuż linii zgrzewania (rys. 1).

electrode in inert gas shields (TIG), submerged arc, electroslag and impulse melting electrode in protective gas shielding. Other methods of joining are also electron beam welding in vacuum, laser welding, diffusion bonding, friction stir welding, ultrasonic welding, explosive welding, crumple welding in a vacuum or gas shield. Each of these methods has some limitations, and the biggest problem when welding titanium and titanium alloys is the occurrence of bubbles and embrittlement caused by air, for this reason the FSW method is a beneficial alternative when joining titanium elements.

Friction Stir Welding (FSW) method was developed in 1991 at the TWI Institute in Great Britain, initially, in particular for joining aluminum and its alloys [1]. This process involves combining solid materials, which eliminates the problems of melting the material and re-solidifying it, such as: cracks, residual stresses and distortions caused during conventional welding [6].

The most important advantages resulting from the use of FSW method is relatively easy automation (often it is possible to use conventional numerical machine tools), lower residual stress of the resulting joint and very good mechanical properties of the joint (often exceeding the mechanical properties of welded or riveted joints).

In this process, the heat for plasticizing the material is generated by a rotating tool consisting of a shoulder and a pin that penetrates into the base material by rotating it, and then the tool moves along the welding line (Fig. 1).



Rys. 1. Schemat prowadzenia procesu FSW [2]

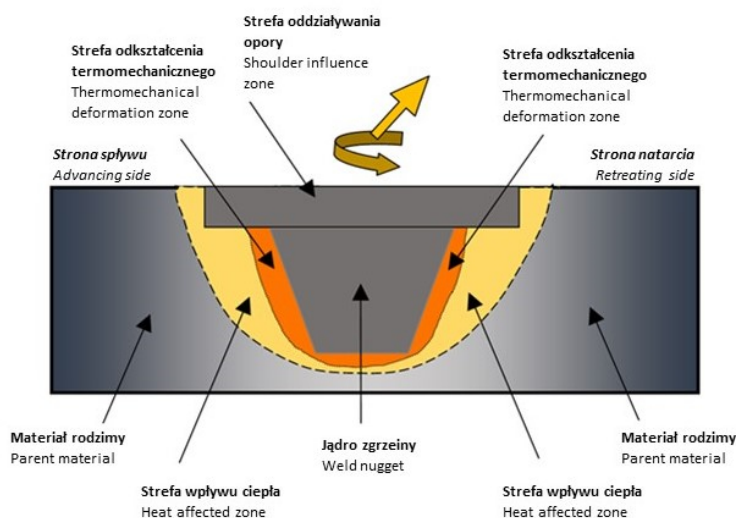
Fig. 1. Schematic diagram of the FSW process [2]

Głównym czynnikiem wpływającym na wynik łączenia jest ilość ciepła powstającego na skutek tarcia obracającego się narzędzia w warstwie zgrzewanych materiałów, wywołująca efekt uplastycznienia, przemieszanie materiału bazowego i powstanie zgrzeiny. Ilość wydzielonego w procesie ciepła ma wpływ na występowanie ewentualnych defektów, poziom sił w procesie, wynikową makro- i mikrostrukturę w strefie zgrzeiny oraz rozmiar i właściwości fizykochemiczne stref charakterystycznych w złączy. Dodatkowo uplastycznienie w strefie łączenia wymaga zapewnienia odpowiedniego poziomu naprężeń ścinających dla uruchomienia mechanizmu plastycznego płynięcia.

Wielkością, która reprezentuje odpowiedź materiału na obciążenia zewnętrzne, powodujące uplastycznienie materiału, jest wartość siły osiowej i promieniowej podczas zgrzewania. W trakcie procesu FSW ciepło jest generowane poprzez tarcie pomiędzy narzędziem a zgrzewanymi elementami i odkształceniem plastycznym zachodzącym w strefie TMAZ (*thermomechanical deformation zone*) (rys. 2).

The main factor affecting the result of joining is the amount of heat generated as a result of friction of the rotating tool in the layer of welded materials, causing the effect of plasticizing, mixing of the base material and the formation of a weld. The amount of heat generated in the process affects the occurrence of defects, the level of forces in the process, the resulting macro- and microstructure in the welding zone, and the size and physicochemical properties of the characteristic zones in the joint. In addition, the plasticity in the welding zone requires providing a proper level of shear stress to activate the plastic flow mechanism.

*The value that represents the material's response to external loads causing the material to become plasticized is the value of axial and radial force during welding. During the FSW process, heat is generated by the friction between the tool and the welded elements and the plastic deformation occurring in the TMAZ (*thermomechanical deformation zone*) (Fig. 2).*



Rys. 2. Schemat stref w złączeniu FSW

Fig. 2. FSW joint cross section scheme

W trakcie procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem powstają stałe, odrębne strefy o różnej charakterystyce mikrostrukturalnej [3, 4]: strefa materiału rodzimego (*parent material*) pozostaje nienaruszona, strefa wpływu ciepła (*heat affected zone* – HAZ), strefa deformacji termomechanicznej (*thermomechanical deformation zone* – TMAZ), strefa przemieszania często zwana jądrem zgrzeiny (*weld nugget*) lub strefą całkowitej dynamicznej rekrytalizacji (*dynamically recrystallized zone* – DXZ).

Energia odkształcenia plastycznego jest magazynowana w strefie przetworzonej termomechanicznie pod wpływem zwiększonej ilości defektów struktury. W spoinie zjawiska zdrowienia i rekrytalizacji występują jednocześnie.

W trakcie realizacji procesu, przy nieodpowiednim doborze parametrów, mogą powstawać wady połączeń. Głównymi wadami połączeń FSW, które można podzielić na zewnętrzne wady powierzchniowe (możliwe do wykrycia poprzez badania wizualne) oraz porowatość i pustki (które nie są możliwe do wykrycia poprzez badania wizualne i wymagają zastosowania innych technik badawczych) [5]. Do głównych wad powierzchniowych należą:

During the friction stir welding process, permanent, separate zones with different microstructural characteristics are created [3, 4]: parent material zone is remains intact, heat affected zone (HAZ), thermomechanical deformation zone (TMAZ), zone of mixing often called weld nugget or dynamically recrystallized zone (DXZ).

Energy of plastic deformation is stored in the thermomechanical processed zone under the influence of an increased number of structural defects. In the weld, the phenomenon of recovery and recrystallization occur simultaneously.

During the process, in incorrect selection of process parameters may result in joints defects. The main disadvantages of FSW joints, which can be divided into external surface defects (detectable by visual inspection) and porosity and voids (which are not detectable by visual examination and require the use of other research techniques) [5]. The main surface defects include:

- krater, który powstaje po stronie natarcia, a jest efektem zastosowania w procesie zgrzewania zbyt dużej prędkości posuwu narzędzia w stosunku do prędkości obrotowej, a tym samym do obszaru zgrzewania dostarczana jest zbyt mała ilość ciepła;
 - nieregularna szerokość lica zgrzeiny, spowodowana dostarczeniem zbyt małej ilości ciepła do obszaru zgrzewania, będąca następstwem niewłaściwego styku pomiędzy powierzchnią opory narzędzia a materiałem zgrzewanym (zbyt mała siła docisku i brak osiowości w ruchu narzędzia w osi pionowej);
 - wtrącenia w strefie mieszania, będące następstwem niewłaściwego wykonania i użytkowania narzędzia (uszkodzenia trzpienia lub opory);
 - nadmierne pocienienie materiału, powstające w skutek zastosowania zbyt dużej siły działającej w osi pionowej lub zbyt dużego zagłębienia narzędzia, a tym samym nadmiernej penetracji materiału zgrzewanego przez oporę narzędzia;
 - zatarcia powierzchni lica zgrzeiny, powstające na skutek przyklejenia materiału zgrzewanego do powierzchni opory;
 - wypływka, powstająca na skutek zastosowania zbyt dużego zagłębienia narzędzia lub siły pionowej działającej na narzędzie, przez co uplastyczniony materiał jest wyciskany poza obwód opory, powyżej powierzchni złącza.
- Do wad wewnętrznych zalicza się:
- nieciągłości liniowe (tzw. *worm hole*), spowodowane zbyt niską temperaturą w obszarze zgrzewania, co powoduje niedostateczne uplastycznienie materiału i jego niestabilny ruch wokół trzpienia narzędzia;
 - przyklejenia (tzw. *cold lap*, hakowatość), czyli deformacja linii styku zgrzewanych elementów, powstająca po stronie natarcia lub spływu, wynikająca bezpośrednio z zastosowania nieodpowiednich parametrów: prędkości liniowej, prędkości obrotowej oraz zagłębienia trzpienia, jak również związana z geometrią trzpienia;
- *crater, which is created on the retreating side, and is the result of using too high tool travel speed in relation to the rotational speed in the welding process, and therefore too low heat is delivered to the welding area,*
 - *irregular width of weld face, caused by the delivery of too low heat to the welding area, resulting from the improper contact between the surface of the tool shoulder and the welded material (too low pressure and lack of axiality in the tool movement in the vertical axis),*
 - *inclusions in the mixing zone, resulting from improper execution and use of the tool (damage to the pin or shoulder),*
 - *excessive thinning of material, caused by applying too high force acting in the vertical axis or too much of the tool plunging, and thus excessive outflow of the material welded by the tool shoulder,*
 - *rubbing of the surface of weld face, created as a result of sticking welded material to shoulder surface,*
 - *flash, resulting from the application of too high tool plunging or vertical force acting on the tool, so that the plasticized material is pressed out of the shoulder circuit above the surface of the joint.*
- Internal defects include:*
- *worm hole, due to too low temperature in the welding area, which results in insufficient plasticity of the material and its unstable movement around the tool pin,*
 - *cold lap and hooking, that is deformation of the contact line between welded elements, arising on advancing or retreating side, resulting directly from use of inaccurate parameters: travel speed, rotational speed and plunging depth, as well as related to the geometry of the pin,*

– wtrącenia, spowodowane obecnością są zbyt dużej ilości tlenków na powierzchni elementów zgrzewanych, które nie zostały usunięte przed procesem zgrzewania, a warunki prowadzenia procesu zgrzewania nie zapewniły ich równomiernego rozprowadzenia w obszarze przemieszania materiału.

Rodzaj materiału blach podlegających łączeniu techniką FSW ma szczególne znaczenie w doborze geometrii i rodzaju narzędzia, oprzyrządowania i parametrów procesu, mając na uwadze fakt warunków uplastycznienia w strefie złącza i transformacji mikrostruktury mających wpływ na efekt połączenia i jego jakość [2–19].

Wysoka temperatura wynikająca ze specyfiki procesu łączenia materiałów tytanowych, głównie bardzo wysoka temperatura rzędu 1000°C, wymaga stosowania narzędzi wykonanych ze specjalnych materiałów [14, 15, 17].

Stopy o wysokiej temperaturze uplastycznienia wymagają użycia narzędzi, które powinny przenieść wystarczającą ilość ciepła na powierzchnię, a jednocześnie przenosić znaczne naprężenia normalne i uderowe. Wystąpienie w jednym czasie dużej ilości ciepła i dużego naprężenia może prowadzić do zniekształceń i szybkiego zużycia narzędzia. Z tego powodu wybór materiału narzędziowego i dobór kształtu stanowią kluczowe czynniki zgrzewania tarcowego z przemieszaniem, dla materiałów o wysokiej temperaturze uplastycznienia.

Przed materiałami przeznaczonymi na narzędzia do zgrzewania tarcowego tytanu stawia się następujące wymagania: wysoka wytrzymałość na ściskanie w podwyższonych temperaturach, odporność na pełzanie, odporność na zużycie, brak reaktywności materiału z materiałem zgrzewanym, odporność na pękanie.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE ZGRZEWANIA CIENKICH BLACH TYTANOWYCH

Celem podjętych w ramach niniejszej pracy badań były:

– analiza efektów procesu FSW w różnych warunkach;

– inclusions, due to the presence of too much oxide on the surface of welded elements, which were not removed before the welding process, and the conditions of conducting the welding process did not ensure their even distribution in the area of material mixing.

The type of joined materials using FSW is of particular importance in the selection of the geometry and type of tool, fixtures and process parameters, bearing in mind the plasticization conditions in the joint zone and microstructure transformation affecting the joint effect and its quality [2–19].

High temperature resulting from the specificity of the process of joining titanium materials, mainly very high temperature of 1000°C, requires the use of tools made of special materials [14, 15, 17].

Alloys with high temperature of plasticizing require the use of tools that should transfer sufficient heat to the surface, while at the same time transferring significant normal and impact stresses. Occurrence of a large amount of heat and high stress at one time can lead to distortions and rapid wear of the tool. For this reason, choice of tool material and shape selection are the key factors for friction stir welding process for materials with a high plasticizing temperature.

Main requirements applying to materials intended for friction stir welding tools of titanium are: high compressive strength at elevated temperatures, creep resistance, wear resistance, lack of material reactivity with welded material, resistance to cracking.

2. EXPERIMENTAL RESEARCH OF WELDING OF THIN TITANIUM SHEETS

The purpose of the research undertaken as part of this work was:

– analysis of the effects of the FSW process in various conditions;

- dobór najkorzystniejszych parametrów procesu zgrzewania (prędkość zgrzewania, obroty, system chłodzenia, atmosfera ochronna etc.) w celu uzyskania złącza o dobrej jakości (wolnego od wad, o stosunkowo dużej wytrzymałości w porównaniu do materiału rodzimego);
- odniesienie do istniejących rozwiązań, do rodzajów i geometrii narzędzi przeznaczonych do zgrzewania FSW cienkich blach z tytanu i stopów tytanu oraz ocena przydatności narzędzi wykonanych z węglika wolframu i specjalnej ceramiki narzędziowej do zgrzewania FSW tytanu i jego stopów.

Na podstawie analizy literatury oraz specyfikacji procesu, a przede wszystkim grubości łączonych materiałów (tytan GRADE 3 o grubościach 0,5 mm), do zgrzewania wybrano dwa rodzaje narzędzia o tych samych parametrach geometrycznych, a wymiary dobrano wg wzorów poniżej [13]:

Średnica opory = ($\sim 2,2 \cdot \text{gr. materiału}$) + 7,3 mm

Średnica trzpienia = ($\sim 0,8 \cdot \text{gr. materiału}$) + 2.2 mm

Narzędzia o takiej samej geometrii wykonano ze specjalnej ceramiki narzędziowej i spiekane węgla wolframu.

Stanowisko badawcze do realizacji procesu zgrzewania realizowano na odpowiednio przygotowanej maszynie numerycznej Makino PS95 (rys. 3).

- *selection of the most favorable parameters of the welding process (tool travel speed, tool rotation speed, cooling system, protective atmosphere, etc.) to obtain a joints with good quality (free from defects, with relatively high strength compared to parent material);*
- *reference to existing solutions, to types and geometries of tools for FSW of thin titanium and titanium alloys sheets and the evaluation of the suitability of tools made of tungsten carbide and special ceramic tools for FSW of titanium and its alloys.*

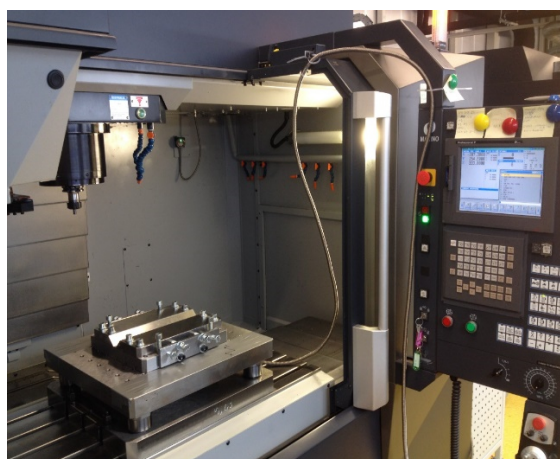
Based on the analysis of the literature and the specifics of the process, and above all, the thickness of the combined materials (titanium GRADE 3 about thicknesses 0.5 mm), two types of tools with the same geometrical parameters were selected for welding, and the dimensions were chosen according to formulas below [13]:

Shoulder diameter = ($\sim 2.2 \cdot \text{material thk.}$) + 7.3 mm

Pin diameter = ($\sim 0.8 \cdot \text{material thk.}$) + 2.2 mm

Tools with the same geometry were made of special tool ceramics and sintered tungsten carbide.

The test stand for the implementation of the welding process was carried out on a properly prepared on Makino PS95 numerical machine (Fig. 3).

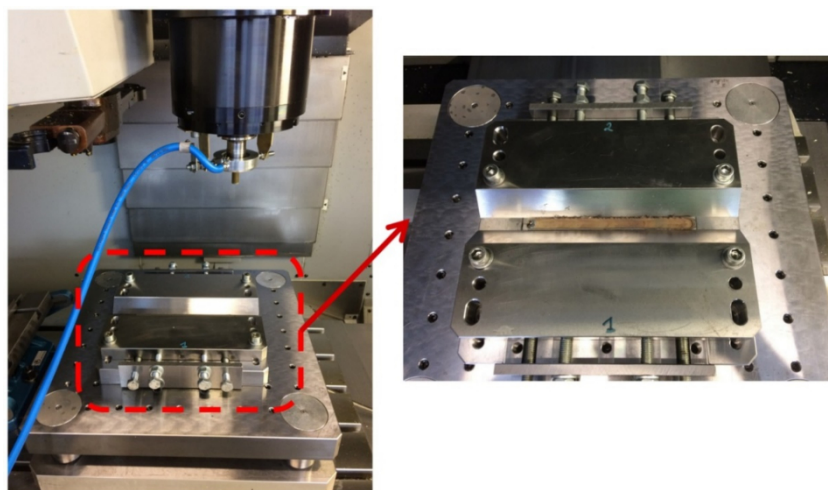


Rys. 3. Widok ogólny 3-osiowej maszyny CNC zaadaptowanej do prowadzenia procesu FSW

Fig. 3. General view of 3-axis CNC machine adopted for FSW process

Doczołowe złącza liniowe FSW blach tytanowych stopu GRADE 3 wykonano na próbkach blach o wymiarach 100 x 200 x 0,5 mm. Zgrzeiny FSW wykonano wzdłuż kierunku walcowania blach. Przygotowane blachy oczyszczono etanolem celem usunięcia zanieczyszczeń. Do stabilnego zamocowania zgrzewanych blach wykonano specjalne mocowanie pokazane na rys. 4.

FSW butt joints made of GRADE 3 titanium alloy sheets were made on 100 x 200 x 0.5 mm sheet metal samples. FSW welds were made along sheet rolling direction. Prepared plates were cleaned with ethanol to remove impurities. To stable fixing of welded sheets was made a special fixture as shown on Fig. 4.



Rys. 4. Szczegółowy widok przyrządu stosowanego w procesie FSW i dynamometru piezoelektrycznego
 Fig. 4. Detailed view of mounting device used in FSW process, and piezoelectric dynamometer

Zgrzewanie realizowano w atmosferze powietrza oraz w osłonie argonu, co zapobiegało utlenianiu się łączonego obszaru blach. W badaniach wykorzystano narzędzia o takiej samej geometrii, lecz wykonanych z różnych materiałów. Była to specjalna ceramika narzędziowa oraz węgiel wolframu. Podczas realizacji procesu wykonano pomiar siły osiowej i promieniowej, wykorzystując do tego celu siłomierz piezoelektryczny firmy Kistler. Pomiar realizowano z próbkowaniem 1 kHz.

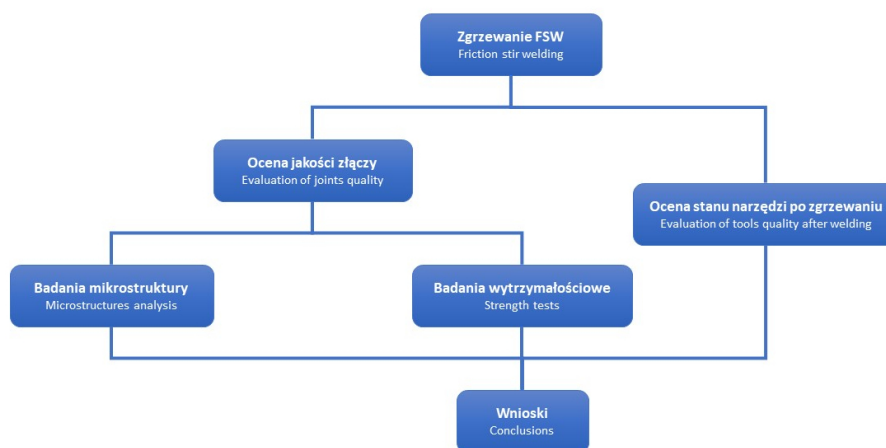
Welding was carried out in an air atmosphere and in an argon shield, which prevented the oxidation of the joined metal sheet area. In the researchers used tools of the same geometry but made of different materials. It was a special tool ceramic and sintered tungsten carbide. During the process, an axial and radial force measurement was carried out using Kistler piezoelectric dynamometer for this purpose. The measurement was carried out with 1 kHz sampling.

3. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Schemat przebiegu badań został przedstawiony na rys. 5. Zgrzewanie FSW przeprowadzono z zastosowaniem blach tytanowych ze stopu GRADE 3 o grubości 0,5 mm, którego skład chemiczny i właściwości przedstawiono w tab. 1.

3. MATERIALS AND RESEARCH METHODOLOGY

Scheme of the research is shown on Fig. 5. FSW joining was carried out with the use of 0.5 mm thick GRADE 3 titanium sheets, whose chemical composition and properties are presented in the Tab. 1.



Rys. 5. Schemat przebiegu badań

Fig. 5. Research scheme

Tab. 1. Skład chemiczny i podstawowe właściwości stopu tytanu GRADE 3

Tab. 1. Chemical composition and main properties of GRADE 3 titanium alloy

Skład chemiczny / Chemical composition					
C [%]	N [%]	Ti [%]	Fe [%]	O [%]	H [%]
≤0.08	≤0.05	reszta / other	≤0.30	≤0.35	≤0.015
Podstawowe właściwości / Main properties					
Twardość Hardness [HB/30]	0.2% Granica plastyczności Yield strength R_p [N/mm ²]	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength R_m [N/mm ²]	Wydłużenie Elongation A5 [%]	Moduł sprężystości Young module [kN/mm ²]	Gęstość Density [g/cm ³]
170	380	≥450	18	105	4.51
Temperatura topnienia Melting temperature [°C]	Temperatura rekrytalizacji Recrystallization temperature [°C]				
1668	>500				

Proces przeprowadzono w atmosferze powietrza i argonu. Przed przystąpieniem do zgrzewania każdego kolejnego pakietu blach, temperatura narzędzia była wyrównana do temperatury otoczenia. Parametry zgrzewania przedstawiono w tab. 2. Po wykonaniu zgrzewania, złącza poddano wstępnej ocenie wizualnej. Zgrzeiny nie posiadały zauważanych wad oraz nieciągłości. Wybrane zgrzeiny pokazano na rys. 6.

Process was carried out in an atmosphere of air and argon. Before welding of each subsequent sheet pack, the tool temperature was equalized to the ambient temperature. Welding process parameters are presented in the Tab. 2. After welding, joints were subjected to a preliminary visual assessment. The welds did not have any visible defects or discontinuities. Selected welds are shown on Fig. 6.

Tab. 2. Parametry technologiczne zgrzewania, właściwości mechaniczne złącza i materiału rodzimego oraz wyniki eksperymentalne zgrzewania blach ze stopu tytanu GRADE 3 o grubości 0,5 mm

Tab. 2. Linear FSW technological parameters, joints and parent material mechanical properties and experimental results of titanium alloys GRADE 3 of 0.5 mm in thickness

Lp./narzędzie/atmosfera No./tool/atmosphere	Obroty Tool rotational speed [obr/min]	Prędkość zgrzewania Tool travel speed [mm/min]	R_m [MPa]	Wydłużenie Elongation [%]	Efektywność złącza Joint efficiency [%]
1. Ceramika, Ar	4000	100	505	2	84
2. Ceramika, Ar	4500		400	0,4	66
3. Ceramika, Ar	5000		360	0,38	60
4. Ceramika, O ₂	4000		250	0,19	42
5. VHM, O ₂	4000		380	0,42	63
Materiał rodzimy / Parent material			600	24	

Pełną ocenę jakości złączy dokonano w oparciu o badania wytrzymałości połączenia (statyczna próba rozciągania), analizę makro- i mikrostruktury cech strefy połączenia, identyfikacja ewentualnych wad metodą rentgenograficzną.

Ze złączonych blach zostały przygotowane próbki szerokości o 12,5 mm, na których przeprowadzono statyczną próbę rozciągania, na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100. Odnosząc maksymalną wytrzymałość złącza FSW do wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego, wyznaczono nośność złącza FSW lub – inaczej mówiąc – efektywność połączenia wyrażoną w procentach w odniesieniu do materiału rodzimego (1).

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

Jak wykazano w Tab. 2, najwyższą efektywność złącza (84%) uzyskano przy zastosowaniu narzędzia ceramicznego, prędkości obrotowej 4000 obr/min, prędkości posuwu 100 mm/min i przy zastosowaniu atmosfery ochronnej argonu. Przeprowadzone badania wykazały, że zgrzewanie tarciove z przemieszaniem stopów tytanu bez zastosowania atmosfery ochronnej dają niezadowalające rezultaty. Kluczowym parametrem jest również prędkość obrotowa narzędzia, która w najkorzystniejszym, badanym wariantcie wynosiła 4000 obr/min. Należy również zwrócić uwagę, że zwiększanie prędkości obrotowej powoduje spadek wartości efektywności złącza, co jest efektem wydzielenia zbyt dużej ilości ciepła w strefie łączenia.

Full assessment of quality of joints was made basis on joint strength tests (static tensile test), macro- and microstructure analysis of the features of the welding zone, and identification of possible defects by X-ray method.

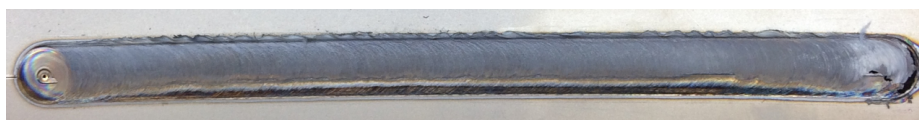
From the joined sheets, a 12.5 mm wide sample was prepared on which a static tensile test was carried out on a Zwick/Roell Z100 universal testing machine.

Referring maximum strength of FSW joint to tensile strength of parent material, load capacity of FSW joint was determined, or in other words, efficiency of joints expressed as a percentage in relation to parent material (1).

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

As shown in the Tab. 2, the highest joint efficiency (84%) was obtained using a ceramic tool, tool rotational speed of 4000 rpm, tool travel speed of 100 mm/min and using a protective atmosphere of argon. Research have shown that friction stir welding of titanium alloys without use of a protective atmosphere gives unsatisfactory results. The key parameter is also the rotational speed of the tool, which in the best tested variant was 4000 rpm. It should also be noted that increasing the rotational speed causes the joint efficiency value to drop, which is the effect of generating too much heat in the welding zone.

Tytan GRADE 3 próbka nr 3 / Titanium GRADE 3 sample no. 3



a)

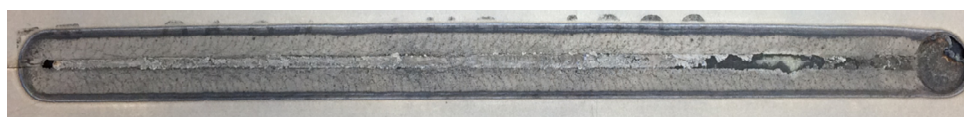


b)

Tytan GRADE 3 próbka nr 4 / Titanium GRADE 3 sample no. 4



c)



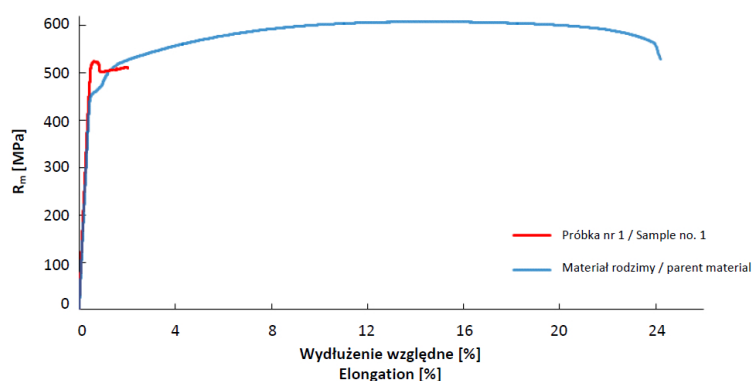
d)

Rys. 6. Zdjęcia złączy FSW ze stopu tytanu GRADE 3, a), c) lico zgrzeiny, b), d) grań zgrzeiny

Fig. 6. Photographic view obtained FSW joint of the titanium alloys GRADE 3, a), c) face of joint, b), d) ridge of joint

Wybraną charakterystykę wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do wydłużenia względnego dla tytanu GRADE 3 (zgrzeiny FSW i materiału rodzimego) pokazano na rys. 7.

The selected tensile strength characteristics relative to elongation for GRADE 3 titanium (FSW weld and native material) are shown in the Fig. 7.



Rys. 7. Wyniki prób rozciągania złączy FSW i materiału rodzimego ze stopu tytanu GRADE 3

Fig. 7. Tensile tests results of FSW joint and parent material of titanium alloys GRADE 3

Analizę powierzchni i mikrostruktury zgrzeiny FSW przedstawiono, prezentując wybrane wyniki badań. W przypadku wszystkich badanych próbek powierzchnia zgrzeiny, zarówno od strony lica, jak i grani, jest w dużym stopniu utleniona, przy czym np. zgrzeina numer 4 (rys. 8)

Analysis of the surface and microstructure of FSW welds is presented by presenting selected research results. In the case of all tested samples, the surface of the weld, both on advancing and retreating side, is largely oxidized with, for example, weld number 4 (Fig. 8) is distinguished by

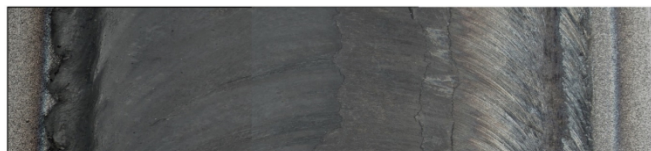
wyróżnia się znacznie większym stopniem utlenienia w porównaniu pozostałych, co jest związane z brakiem atmosfery ochronnej podczas prowadzenia procesu. W obszarach brzegowych zgrzein obserwuje się obecność nalotu temperaturowego, typowego dla strefy wpływu ciepła (HAZ). Na powierzchniach lica występują słabo widoczne i nieregularne, półkoliste linie tzw. *onion rings*. W obszarze lica obserwuje się również wyraźne „zaciągnięcia” materiału (rys. 9). Na powierzchni zgrzeiny brak jest wad typu pory, pęknięcia czy inne nieciągłości.

a much higher degree of oxidation compared to the others, which is due to the lack of atmosphere protective during the process. In the weld boundary areas, the presence of a temperature deposit, typical of the heat affected zone, is observed (HAZ). On weld face surface there are weakly visible and irregular semicircular lines of the so-called „onion rings”. In weld face area there are also visible “taking” of material (Fig. 9). There are no porosity, cracks or other discontinuities on the surface of the weld.



Rys. 8. Zgrzeina nr 4 – powierzchnia lica

Fig. 8. Joint no 4 – face of joint



Rys. 9. Zgrzeina nr 3 – powierzchnia lica – widoczne „zaciągnięcia” materiału

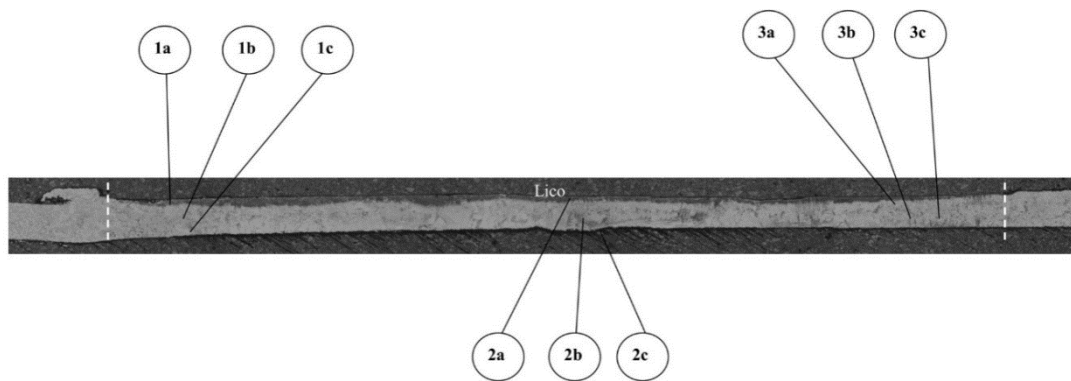
Fig. 9. Joint no 3 – face of joint – visible “puffs” of material

W przypadku wszystkich badanych połączeń (np. od numeru 2 do 4) mikrostruktura w odpowiadających sobie obszarach (1-2-3 – rys. 10) jest bardzo podobna (rys. 11). W całym przekroju nie zaobserwowano odkształconych ziaren dla wszystkich badanych połączeń są one równoosiowe, jednak charakteryzują się relatywnie dużym rozmiarem ziaren w porównaniu do obszaru blachy, tj. materiału rodzimego. Wzdłuż osi zgrzeiny (od lica do grani) występuje niejednorodność rozkładu ziaren pod względem ich rozmiaru – od strony lica (do głębokości ok. 1/6 grubości blachy – 60 μm) ziarna są najmniejsze (średni rozmiar 30–50 μm). Następnie w strefie środkowej w kierunku grani, rozmiar ziarn zwiększa się (do 100–250 μm w obszarze grani).

For all tested joints (e.g. from 2 to 4) microstructure in the corresponding areas (1-2-3 – Fig. 10) it is very similar (Fig. 11). Throughout the cross-section, no deformed grains were observed, for all tested joints they are equiaxed, but they are characterized by a relatively large grain size in comparison to the sheet area, i.e. the parent material. Along the axis of weld (from face to ridge) there is a heterogeneity of grain distribution in terms of their size – from the face (up to a depth of about 1/6 of sheet thickness – 60 μm) the grains are the smallest (average size 30–50 μm). Then, in central zone towards ridge, size of grain increases (up to 100–250 μm in ridge area).

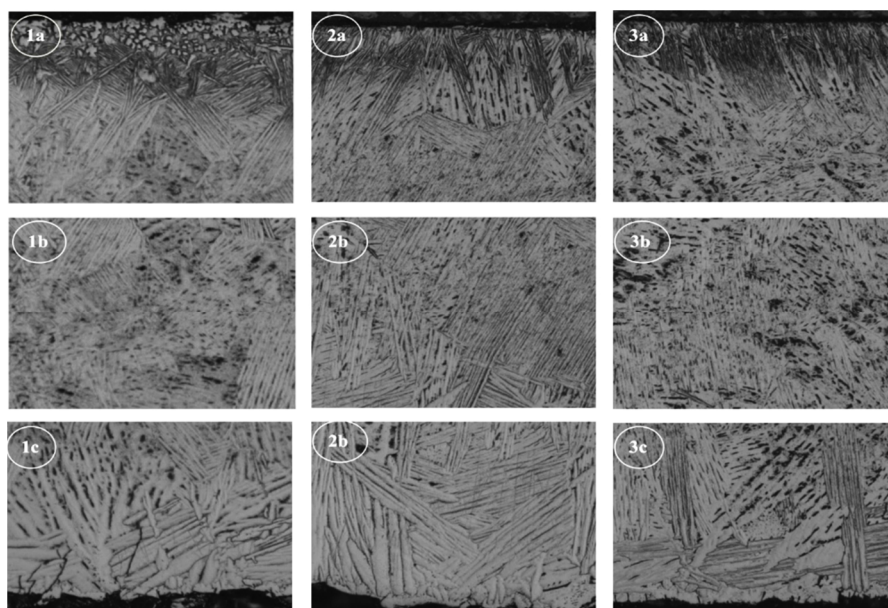
Mikrostrukturę w obszarze zgrzeiny stanowią zrekrystalizowane ziarna pierwotnej fazy β wypełnione koloniami równoległych płytek fazy martenzytycznej α' (α_{\parallel}). Zróżnicowanie rozmiarów płytek faz α' (α_{\parallel}) wywołane jest różną prędkością chłodzenia poszczególnych obszarów połączenia zgrzewanego. W strefie przypowierzchniowej, od strony lica, występują ziarna fazy powstałej w wyniku stabilizacji tytanu α tlenem. W przypadku zgrzeiny nr 2–4 są to przeważnie pojedyncze ziarna. Świadczy to tym, że temperatura w obszarze zgrzeiny osiągnęła wartość wyższą od temperatury przemiany $\alpha \rightarrow \beta$.

The microstructure in the area of the weld is recrystallized grains of the original β phase filled with parallel-field colonies of martensitic α' (α_{\parallel}) phase. Differentiation of the size of the α' (α_{\parallel}) phase plates is caused by the different cooling rates of the individual areas of the welded joint. In the surface zone, from the weld face side, there are grains of the phase resulting from the stabilization of α titanium by oxygen. In case of welds no. 2–4, these are usually single grains. This shows that the temperature in the weld area has reached a value higher than $\alpha \rightarrow \beta$ transformation temperature.



Rys. 10. Zgrzeina nr 3 – makrostruktura – obszary obserwacji mikrostruktury, pow. $\sim 20\times$

Fig. 10. Joint no 3 – macrostructure – area of microstructure observation, zoom $\sim 20\times$



Rys. 11. Zgrzeina nr 3 – mikrostruktura, pow. $200\times$

Fig. 11. Joint no 3 – microstructure, zoom $200\times$

W przypadku każdej z badanych zgrzein nie zidentyfikowano wyraźnej obecności strefy TMAZ (*termomechanically affected zone*). Nie zaobserwowano również obecności typowej dla procesu zgrzewania, strefy wpływu ciepła (HAZ). Obszar, który w skali makroskopowej określono jako HAZ (rys. 2), w skali mikroskopowej jest jedynie granicą rozdziału – materiał rodzimy blachy/zgrzeina. Strefa ta charakteryzuje się mikrostrukturą podobną do mikrostruktury w obszarze centralnym zgrzeiny, tj. równoosiowymi ziarnami o dużych rozmiarach.

Mikrostrukturę blachy stanowi faza α wydzielona w postaci drobnych, równoosiowych ziaren (średni rozmiar ziaren ok. 20 μm).

4. SIŁY W PROCESIE FSW

Siła pionowa (oś Z) i siły poziome (osie X, Y) występujące podczas procesu FSW zostały zmierzone za pomocą dynamometru piezoelektrycznego o wysokiej czułości, opracowanego przez firmę Kistler (rys. 4). Dynamometr składa się z czterech piezoelektrycznych czujników siły wykalibrowanych w zakresie od 0 do 60 kN. Czujniki zamontowano pomiędzy dwiema sztywnymi płytami o wymiarach 400 x 400 mm i grubość 50 mm każda.

Wszystkie czujniki zostały połączone za pomocą sumatora do pojedynczego wzmacniacza. Mierzone siły uzyskano przy maksymalnej częstotliwości próbkowania 200 kHz na kanał i 16-bitowej rozdzielczości. Częstotliwość próbkowania używana podczas rejestracji danych wynosiła 1 kHz.

Wykres przedstawiony na rys. 12 przedstawia dane dla złącza FSW charakteryzującego się najlepszymi właściwościami mechanicznymi, na którym można rozróżnić cztery różne etapy procesu FSW: (1) zagłębianie narzędzia, (2) przemieszanie, (3) zgrzewanie, (4) wyjście narzędzia.

In the case of each weld, no clear presence was identified termomechanically affected zone (TMAZ). Presence of typical for the welding process heat affected zone (HAZ) was also not observed. The area, which in the macroscopic scale was referred to as HAZ (Fig. 2), is only the boundary of on the microscopic scale – parent material/weld. This zone is characterized by a microstructure similar to microstructure in central region of weld, i.e. equiaxed grains of large dimensions.

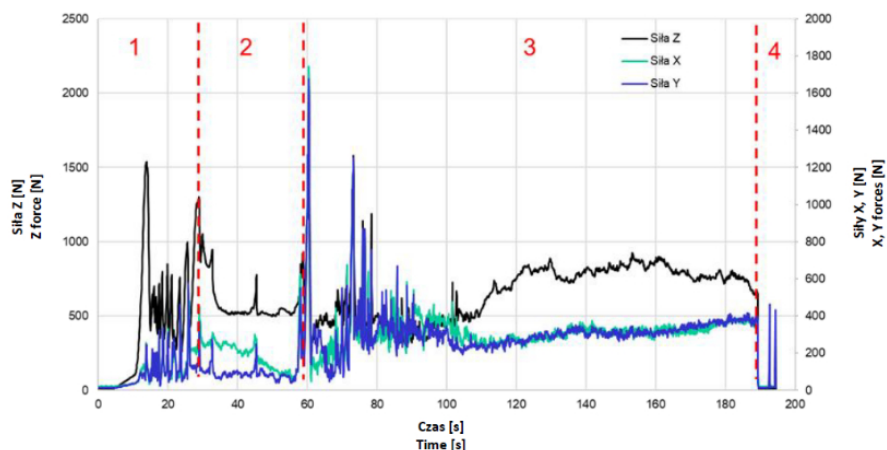
Microstructure of the sheet is α phase separated in the form of fine, equiaxial grains (average grain size of approx. 20 μm).

4. FORCES IN FSW PROCESS

The vertical (Z axis) and horizontal (X, Y axis) forces occurring during linear FSW process was measured by high sensitive piezoelectric dynamometer developed by Kistler (Fig. 4). It consists of four piezoelectric force sensor calibrated in range from 0 to 60 kN. Sensors was fitted between two rigid plates with dimensions 400 x 400 mm and a thickness of 50 mm each.

The all sensors were connected via adder to a single charge amplifier. The force data were acquired with a maximum sample rate per channel of 200 kHz and 16-bit resolution. The actual sample rate used during the data recording was 1 kHz.

Graph presented on Fig. 12 shows the FSW joint characterized by the best mechanical properties where can be recognized four different stages of the FSW process: (1) tool plunging, (2) tool dwelling, (3) welding, (4) tool pulling out.



Rys. 12. Typowy wykres sił osiowych w funkcji czasu w procesie FSW blach ze stopu tytanu GRADE 3 dla $\omega = 4000$ obr./min., $v = 100$ mm/min z wyszczególnionymi etapami

Fig. 12. Typical graph of the axial and translational forces versus time during FSW of titanium GRADE 3 alloy sheet for $\omega = 4000$ rpm, $v = 100$ mm/min with marked stages

W pierwszym etapie procesu, narzędzie zagłębia się w łączony materiał, sukcesywnie zwiększając uplastycznioną objętość materiału. Siła osiowa i promieniowa działająca na narzędzie szybko rośnie adekwatnie do wytrzymałości łączonego materiału, który jest poddawany narastającemu oddziaływaniu obracającego się narzędzia poprzez tarcie kołnierza o powierzchnie blach oraz mieszanii uplastycznionego materiału za pomocą obracającego się trzpienia. Miejscowe uplastycznienie zgrzewanego materiału szybko staje się efektem dominującym i powoduje stopniowe zmniejszenie siły osiowej i promieniowej. Etap 2 przeprowadzony jest celem zapewnienia odpowiedniego nagrzania, a co za tym idzie osiągnięcia odpowiedniego uplastycznienia łączonego materiału, zanim zostanie załączony ruch posuwowy narzędzia. Inaczej można to nazwać czasem przestoju narzędzia w materiale lub czasem uplastycznienia łączonych elementów. Podczas wykonywania eksperymentu czas ten wynosił 20 s.

5. OCENA STANU NARZĘDZI

Złącza FSW blach tytanowych GRADE 3 wykonano, stosując narzędzia ze specjalnej ce-

During first stage tool plunges into the workpiece with an increase in the deformed volume. Both vertical and horizontal forces rise quickly owing to the strength of the deforming material to the pin penetration that prevails on the softening due to the heat generated by the stirring action of the rotating pin. The local softening of the welded material promptly becomes the predominant effect and produces a decrease both vertical and horizontal forces. Stage 2 is performed to assure an adequate heating of the blank material before welding. During the experiment dwelling time was constant and was 20 s.





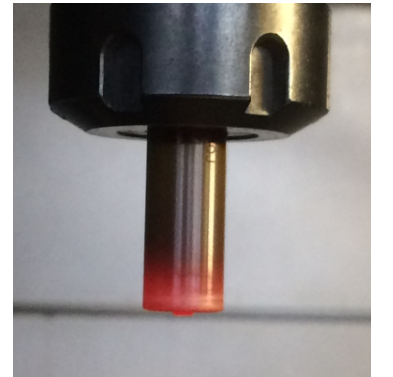
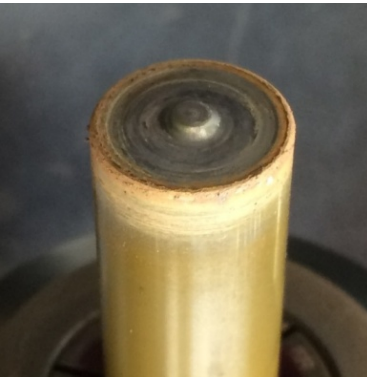
5. EVALUATION OF THE CONDITION OF TOOLS

FSW joints of GRADE 3 titanium sheets were made using tools from special tool ceramics

ramiki narzędziowej oraz węgla wolframu. Narzędzie wykonane z VHM zdolne było wykonać tylko jedną zgrzeinę. Wskutek wysokiej temperatury (szacunkowo w granicach 1000°C) i w warunkach dużego obciążenia działającego w osi, narzędzie doznało trwałego odkształcenia, uniemożliwiając dalszą jego pracę (tab. 3c). Zastosowana ceramika narzędziowa umożliwiła realizację procesu FSW na blachach tytanowych. Narzędzie wykonało łącznie ok. 10 sztuk 200 mm złączy FSW, po czym zauważone zostało zużycie ściernie narzędzia (tab. 3f).

and sintered tungsten carbide. The tool made of VHM was able to perform only one weld. Due to the high temperature (estimated at 1000°C) and under conditions of high load acting in the axis, tool experienced permanent deformation preventing its further work (Tab. 3c). The tool ceramic used enables the FSW process to be carried out on titanium sheets. This tool made a total of about 10 samples of 200 mm FSW joints, after which the abrasive wear of the tool was noticed (Tab. 3f).

Tab. 3. Widok narzędzi do FSW: a), d) przed procesem, b), e) w trakcie procesu, c), f) po procesie
Tab. 3. General view of FSW tool a), d) before the process, b), e) during the process, c), f) after the process.

Widok narzędzi do FSW / View of FSW tool				
		przed procesem before the process	w trakcie procesu during the process	po procesie after the process
		a)	b)	c)
Narzędzie węglkowe Tungsten carbide tool				
		d)	e)	f)
				

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Analiza możliwości łączenia cienkich blach tytanowych, dokonana na podstawie wyników badań połączeń liniowych cienkich blach ze stopów tytanu (tu: GRADE 3) zgrzewanych doczołowo w procesie FSW, pozwala stwierdzić, że:

1. metoda FSW umożliwia wykonywanie wysokiej jakości, wolnych od wad połączeń liniowych doczołowych cienkich blach metalicznych ze stopów tytanu GRADE 3 o grubości 0,5 mm;
2. proces realizowany jest w bardzo trudnych warunkach, w temperaturze ponad 1000°C, co skutkuje koniecznością doboru narzędzia z odpowiedniego materiału zapewniającego funkcjonowanie w tych warunkach eksploatacji i uzyskanie trwałego, wolnego od wad połączenia; istnieje potrzeba stosowania zaawansowanych materiałów narzędziowych (np. specjalnej ceramiki narzędziowej) i stosowanie specjalnych układów chłodzących zarówno narzędzie, jak i przyrząd mocujący;
3. analiza mikrostruktury złącza cienkich blach z GRADE 3 nie wykazuje obecności strefy TMAZ (*termomechanically affected zone*), jak też obecności typowej dla procesu zgrzewania, strefy wpływu ciepła (HAZ); obszar, który w skali makroskopowej określono jako HAZ (rys. 2), w skali mikroskopowej jest jedynie granicą rozdziału – materiał blachy/ /zgrzeina; strefa ta charakteryzuje się mikrostrukturą podobną do mikrostruktury w obszarze centralnym zgrzeiny, tj. równoosiowymi ziarnami o dużych rozmiarach; mikrostrukturę blachy stanowi faza α w postaci drobnych, równoosiowych ziaren;
4. efektywność połączenia mierzona na podstawie statycznej próby rozciągania złącza FSW, w odniesieniu do materiału rodzimego dla stopu GRADE 3, uzyskano na poziomie 84%; zerwanie próbek FSW stopu tytanu GRADE 3 nastąpiło po stronie spływu w obszarze strefy wpływu ciepła; złącza te charakteryzują się znacznie mniejszą plastycznością w porównaniu do materiału rodzimego;

6. CONCLUSIONS

Analysis of the possibility of joining thin titanium sheets, based on the results of tests on butt-welded thin sheets of titanium alloys (here: GRADE 3) in the FSW process allows to conclude that:

1. *FSW method makes it possible to produce high quality, defect-free butt joints of thin metallic sheets made by GRADE 3 titanium alloys with a thickness of 0.5 mm;*
2. *process is carried out in very difficult conditions, at a temperature of over 1000°C, which results in the necessity of choosing a tool from a suitable material ensuring functioning in these operating conditions and obtaining a durable, fault-free joint; there is a need to use of advanced tool materials (e.g. special tool ceramics) and the use of special cooling systems for tool and fixture device;*
3. *analysis of the microstructure of thin joined sheet made by GRADE 3 does not show the presence of the thermomechanically affected zone (TMAZ), as well as the presence of a heat affected zone (HAZ) typical for the welding process. The area, which in the macroscopic scale was referred to as HAZ (Fig. 2), is only the boundary of on the microscopic scale – parent material/weld; this zone is characterized by a microstructure similar to the microstructure in the central area of the weld, i.e. equi-axial grains of large dimensions; microstructure of the sheet is α phase in the form of fine, equi-axial grains;*
4. *joint efficiency, measured on the basis of static tensile test of FSW joint, in relation to parent material for GRADE 3 alloy, was obtained at the level of 84%; breakage of FSW samples of GRADE 3 titanium alloy occurred on the advancing side in the area of heat affected zone; these joints are characterized by a much lower plasticity compared to parent material;*

5. jakość złączy FSW silnie zależy od odpowiednio dobranych parametrów technologicznych procesu, odpowiednio dobranych do gatunku i grubości blachy ze stopu Ti oraz odpowiedniej atmosfery gazów osłonowych.

[1] *quality of FSW joints depends strongly on the suitably selected technological parameters of the process, suitably selected for the grade and thickness of Ti-alloy sheet and appropriate atmosphere of shielding gases.*

PODZIĘKOWANIA

Działalność statutowa Katedry Przeróbki Plastycznej Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej – DS.MP.18.001.

ACKNOWLEDGEMENTS

Statutory work of Department of Materials Forming and Processing of the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics of Rzeszow University of Technology – DS.MP.18.001.

LITERATURA

- [1] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C., Murch M. G., Templesmith P., Dawes C. J.: „Friction Stir Butt Welding”. Int. Patent App. PCT/GB92/02203 and GB Patent App. 9125978.8, Dec. 1991. U.S. Patent No. 5,460,317, Oct. 1995.
- [2] Ciro De Filippis L. A., Serio L. A., Facchini F., Mummolo G., Ludovico A. D.: „Prediction of the Vickers Microhardness and Ultimate Tensile Strength of AA5754 H111 Friction Stir Welding Butt Joints Using Artificial Neural Network”. *Materials* 2016, 9, 915.
- [3] Mishra R. S., Mahoney M. W.: „Friction stir welding and processing”. Materials Park, OH, 2007, ASM International.
- [4] Arbegast W. J.: „Modeling Friction Stir Joining as a Metalworking Process”. Hot Deformation of Aluminium Alloys III, TMS Annual Meeting, San Diego, CA, 2-6 March 2003, pp. 313-327.
- [5] Iordachescu M., Iordachescu D., Ocaña J. L., Vilaça P., Scutelnicu E.: „Contribution to the Classification of the Characteristic Flaws in Friction Stir Welded Aluminium Butt Joints”. Proceedings of the IIV International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies, 2009, pp. 269-264.

REFERENCES

- [1] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C., Murch M. G., Templesmith P., Dawes C. J.: „Friction Stir Butt Welding”. Int. Patent App. PCT/GB92/02203 and GB Patent App. 9125978.8, Dec. 1991. U.S. Patent No. 5,460,317, Oct. 1995.
- [2] Ciro De Filippis L. A., Serio L. A., Facchini F., Mummolo G., Ludovico A. D.: „Prediction of the Vickers Microhardness and Ultimate Tensile Strength of AA5754 H111 Friction Stir Welding Butt Joints Using Artificial Neural Network”. *Materials* 2016, 9, 915.
- [3] Mishra R. S., Mahoney M. W.: „Friction stir welding and processing”. Materials Park, OH, 2007, ASM International.
- [4] Arbegast W. J.: „Modeling Friction Stir Joining as a Metalworking Process”. Hot Deformation of Aluminium Alloys III, TMS Annual Meeting, San Diego, CA, 2-6 March 2003, pp. 313-327.
- [5] Iordachescu M., Iordachescu D., Ocaña J. L., Vilaça P., Scutelnicu E.: „Contribution to the Classification of the Characteristic Flaws in Friction Stir Welded Aluminium Butt Joints”. Proceedings of the IIV International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies, 2009, pp. 269-264.

- [6] Givi M. K. B., Asadi P.: „Advances in Friction Stir Welding and Processing”. Woodhead Publishing, United Kingdom, 2014.
- [7] Posada M., DeLoarch J., Reynolds A.P., Skinner M., Halpin J. P.: „Friction stir weld evacuation of DH-36 and stainless steel weldments”. Friction stir welding and processing, TMS, 2001.
- [8] Lienert T. J., Stellwag W. L., Griment B. B. jr, Warke R. W.: „Friction stir welding studies on mild steel”. Supplement to The Welding Journal, 2003.
- [9] Colligan K.: „Material flow behavior during Friction Stir Welding of Aluminium”. Supplement to The Welding Journal, 1999, pp. 229-237.
- [10] Meilinger A., Tórok I.: „The importance of Friction stir welding tool”. Production Processes and Systems, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 25-34.
- [11] Mishra R. S., Ma Z. Y.: „Friction stir welding and processing”. Mater. Sci. Eng. R, 2005, 50R, pp. 1-78.
- [12] Colligan K. J., Pickens J. R.: „Friction stir welding of aluminum using a tapered shoulder tool”. Friction stir welding and processing III, 161-170; 2005, San Francisco, CA, TMS.
- [13] Zhang Y. N., Cao X., Larose S., Wanjara P.: „Review of tools for friction stir welding and processing”. The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science, Volume 51, 2012, pp. 250-261.
- [14] Luty G., Śliwa R. E., Myśliwiec P., Gałaczyński T.: „Analiza wpływu rodzaju narzędzia stosowanego w technologii FSW w łączeniu doczołowym blach ze stopów tytanu”. XIII Ogólnopolska konferencja: Tytan i jego stopy, Janów Podlaski, 24-27 września 2017.
- [15] Buszta S., Śliwa R. E., Myśliwiec P., Ostrowski R.: „Wpływ warunków procesu zgrzewania tarcioowego z przemieszaniem (FSW) na inicjację uplastycznienia strefy połączenia liniowego cienkich blach”. XII Konferencja naukowa: Odkształcalność metali i stopów, Łańcut, 21-24 listopada 2017.
- [16] Śliwa R. E., Myśliwiec P., Ostrowski R.: „Wpływ warunków realizacji procesu FSW na efekt łączenia cienkich blach ze stopu 2024-T3”. XII Konferencja naukowa: Odkształcalność metali i stopów, Łańcut, 21-24 listopada 2017.
- [6] Givi M. K. B., Asadi P.: „Advances in Friction Stir Welding and Processing”. Woodhead Publishing, United Kingdom, 2014.
- [7] Posada M., DeLoarch J., Reynolds A.P., Skinner M., Halpin J. P.: „Friction stir weld evacuation of DH-36 and stainless steel weldments”. Friction stir welding and processing, TMS, 2001.
- [8] Lienert T. J., Stellwag W. L., Griment B. B. jr, Warke R. W.: „Friction stir welding studies on mild steel”. Supplement to The Welding Journal, 2003.
- [9] Colligan K.: „Material flow behavior during Friction Stir Welding of Aluminium”. Supplement to The Welding Journal, 1999, pp. 229-237.
- [10] Meilinger A., Tórok I.: „The importance of Friction stir welding tool”. Production Processes and Systems, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 25-34.
- [11] Mishra R. S., Ma Z. Y.: „Friction stir welding and processing”. Mater. Sci. Eng. R, 2005, 50R, pp. 1-78.
- [12] Colligan K. J., Pickens J. R.: „Friction stir welding of aluminum using a tapered shoulder tool”. Friction stir welding and processing III, 161-170; 2005, San Francisco, CA, TMS.
- [13] Zhang Y. N., Cao X., Larose S., Wanjara P.: „Review of tools for friction stir welding and processing”. The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science, Volume 51, 2012, pp. 250-261.
- [14] Luty G., Śliwa R. E., Myśliwiec P., Gałaczyński T.: „Analiza wpływu rodzaju narzędzia stosowanego w technologii FSW w łączeniu doczołowym blach ze stopów tytanu”. XIII Ogólnopolska konferencja: Tytan i jego stopy, Janów Podlaski, 24-27 września 2017.
- [15] Buszta S., Śliwa R. E., Myśliwiec P., Ostrowski R.: „Wpływ warunków procesu zgrzewania tarcioowego z przemieszaniem (FSW) na inicjację uplastycznienia strefy połączenia liniowego cienkich blach”. XII Konferencja naukowa: Odkształcalność metali i stopów, Łańcut, 21-24 listopada 2017.
- [16] Śliwa R. E., Myśliwiec P., Ostrowski R.: „Wpływ warunków realizacji procesu FSW na efekt łączenia cienkich blach ze stopu 2024-T3”. XII Konferencja naukowa: Odkształcalność metali i stopów, Łańcut, 21-24 listopada 2017.

- [17] Myśliwiec P., Śliwa R. E., Ostrowski R.: „Possibility of joining thin sheets of Al, Mg alloys and Ti GRADE 3 in FSW process”. *Metal Forming* vol. XXVIII no. 4 (2017), pp. 263-280.
- [18] Myśliwiec P., Śliwa R. E.: „Friction Stir Welding of thin Sheets of Magnesium Alloy AZ31B”. *Arch. Metall. Mater.* 63 (2018), 1, 45-54.
- [19] Andres J., Wrońska A., Gałaczyński T., Luty G., Burek R.: „Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of RFSSW Lap Joints of Thin Al7075-T6 Sheets”. *Arch. Metall. Mater.* 63 (2018), 1, 39-43.
- [17] Myśliwiec P., Śliwa R. E., Ostrowski R.: „Possibility of joining thin sheets of Al, Mg alloys and Ti GRADE 3 in FSW process”. *Metal Forming* vol. XXVIII no. 4 (2017), pp. 263-280.
- [18] Myśliwiec P., Śliwa R. E.: „Friction Stir Welding of thin Sheets of Magnesium Alloy AZ31B”. *Arch. Metall. Mater.* 63 (2018), 1, 45-54.
- [19] Andres J., Wrońska A., Gałaczyński T., Luty G., Burek R.: „Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of RFSSW Lap Joints of Thin Al7075-T6 Sheets”. *Arch. Metall. Mater.* 63 (2018), 1, 39-43.

