

Dr hab. inż. Piotr LACKI, prof. PCz, mgr inż. Anna DERLATKA
Politechnika Częstochowska, Częstochowa
Kontakt: piotr@lacki.com.pl

Zastosowanie technologii FSW w strukturach aluminiowych

The application of FSW technology in aluminum structures

Streszczenie

W pracy omówiono zastosowanie technologii zgrzewania tarcowego z mieszaniem do budowy aluminiowych struktur lotniczych. Przedstawiono sposób badania złączy FSW w celu określenia wytrzymałości na rozciąganie. Dokonano oceny mikrostruktury złącza. W celu określenia obciążeń działających na złącze FSW przeprowadzono obliczenia numeryczne. W pracy podano wyniki analizy numerycznej fragmentu struktury aluminiowej stosowanej w konstrukcjach lotniczych. Analizę numeryczną przeprowadzono dla dwóch kategorii struktur, różniących się geometrią. Pierwsza analizowana struktura zbudowana jest z arkusza blachy, ramek, podłużnic i podpórek. Druga analizowana struktura składa się z blachy, podłużnic i podpórek. W każdej kategorii analizowanych struktur rozważano model powierzchniowy i objętościowy. Oceniano przemieszczenia oraz naprężenia w warunkach obciążenia ciśnieniem działającym prostopadle do powierzchni blachy.

Abstract

The paper discusses the application of friction stir welding technology for the construction of aluminum aircraft structures. The method of testing FSW welds to determine their tensile strength is presented. An assessment of the weld microstructure was conducted. To determine the loads acting on the FSW weld, numerical calculations were carried out. This paper presents the results of numerical analysis of a part of the aluminum structure used in aircraft construction. Numerical analysis was carried out for two categories of structures with different geometry. The first analyzed structure is made of sheet metal, frames, stringers and supports. The second analyzed structure consists of sheet metal, stringers and supports. Within each of the analyzed structures, surface and volume models were considered. Displacement and stress were evaluated in conditions of pressure load acting perpendicularly to the sheet surface.

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarcowe z mieszaniem, struktury lotnicze, obliczenia numeryczne MES, aluminium, mikrostruktura

Keywords: *friction stir welding, aircraft structure, FEM numerical calculations, aluminum, microstructure*

1. WPROWADZENIE

Zgrzewanie tarcowe z mieszaniem (FSW) jest stosowane między innymi do łączenia stopów aluminium. Materiał ten, ze względu na małą gęstość oraz stosunkowo wysokie właściwości mechaniczne znajduje szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w szczególności w przemyśle transportowym [1]. Technologia zgrzewania tarcowego nadaje się również do łączenia innych materiałów, takich jak: stopy tytanu i stali.

1. INTRODUCTION

Friction stir welding (FSW) is applied, inter alia, to weld aluminum alloys. These materials, because of their low density and relatively high mechanical properties are widely used in many industries, in particular in the transport industry [1]. Friction welding technology is also suitable for welding other materials such as titanium and steel.

Nie ma danych literaturowych na temat łączenia materiałów o różnych właściwościach mechanicznych za pomocą technologii FSW. Takie możliwości daje klasyczne zgrzewanie tarcowego. Pozwala łączyć ze sobą stopy o różnych właściwościach np. stop tytanu i aluminium [2, 3]. Możliwości łączenia klasyczną metodą ograniczają się tylko do prętów.

Technologia zgrzewania tarcowego FSW jest stosunkowo nową metodą. Jej zastosowanie w przemyśle rośnie z każdym rokiem. Metodę FSW stosuje się w przemyśle motoryzacyjnym do produkcji części samochodów takich jak: silniki, układy jezdne, felgi. W przemyśle budowlanym metoda ta jest stosowana do konstrukcji podłóg, masztów, rur, ram okiennych itp. W przemyśle kolejowym spawa się cysterny, wagony, zbiorniki [4].

Największe perspektywy zastosowania tej technologii związane są z przemysłem lotniczym. Obecnie istnieją przykłady stosowania FSW do łączenia struktur lotniczych. Metoda FSW jest używana do zgrzewania skrzydeł, kadłubów, zbiorników paliwa lotniczego oraz naprawy uszkodzonych spawów MIG [5]. W większości współczesnych samolotów, kadłuby są wykonywane z paneli ze stopów aluminium. Ich usztywnienie zapewniają ramki oraz podłużnice. Przykładowy schemat aluminiowych paneli przedstawiono na rys. 1.

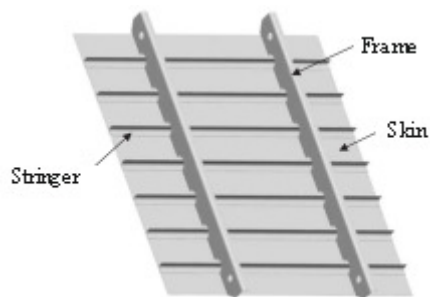
Na rys. 2 pokazano strukturę lotniczą powstałą w wyniku połączeń metodami laserowymi oraz metodą FSW. Zastosowanie nowych metod łączenia do budowy aluminiowych struktur lotniczych stwarza nowe możliwości konstruowania. Powstałe w ten sposób struktury integralne umożliwią wdrożenie nowych typów konstrukcji lotniczych [6].

Nevertheless, there is no literature data on welding materials with different mechanical properties using FSW technology. Classical friction welding gives the possibility of welding alloys of different properties such as titanium and aluminum alloys [2, 3]. However, the possibility of welding by the classical method is limited only to bars.

The FSW technology of friction welding is a relatively new method, yet, its use in industry is growing every year. The FSW method is used in the automotive industry for the production of car parts such as engines, drivetrains and wheel rims. In the construction industry, this method is used to construct floors, poles, pipes, window frames, etc, while in the rail industry, cisterns, wagons and tanks are welded [4].

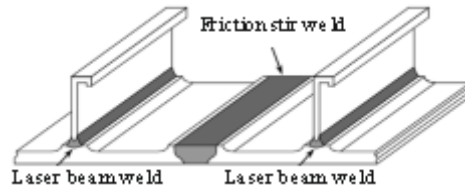
Nonetheless, the best prospects of the technology are related to the aviation industry. Currently, there are examples of the application of FSW to weld aircraft structures. The FSW method is used to seal the wings, hulls, aircraft fuel tanks, and repair damaged MIG welding [5]. In most modern aircraft, the hulls are made of aluminum alloy panels, in which frames and stringers provide their rigidity. An exemplary aluminum panel diagram is shown in Fig. 1.

Figure 2 shows an aircraft structure arising from laser welding methods and FSW. The use of new welding methods to fabricate aluminum aircraft structures opens up new possibilities of construction. The resulting integrated structure will enable the implementation of new types of aircraft structures [6].



Rys. 1. Schemat fragmentu struktury kadłuba samolotu

Fig. 1. Schematic structure of fuselage section



Rys. 2. Schemat spawanego fragmentu struktury kadłuba samolotu

Fig. 2. Schematic structure of welded portion of fuselage

W technologii FSW decydujący wpływ na jakość zgrzewania mają parametry narzędzia, które powoduje uplastycznienie i mieszanie materiału w obszarze zgrzeiny [7]. Najważniejszym elementem narzędzia jest wyprofilowany trzpień osadzony w wieńcu opory [8, 9]. W metodzie FSW, do nagrzania i uplastycznienia materiału, wykorzystuje się narzędzie wykonujące ruch obrotowy. Narzędzie na skutek tarcia generuje ciepło i miesza materiał wzdłuż linii zgrzewania. Podczas obrotu narzędzia nagrzany i uplastyczniony materiał przemieszcza się wokół trzpienia ku tyłowi, gdzie zostaje wymieszany i zagęszczony zgniotowo [10]. Połączenie zachodzi w wyniku wymieszania materiałów przy jednoczesnym rozbiciu i równomiernym rozłożeniu tlenków pochodzących z powierzchni zgrzewanych elementów [11].

Do podstawowych parametrów zgrzewania metodą FSW należą: prędkość obrotowa narzędzia, liniowa prędkość zgrzewania oraz kąt nachylenia narzędzia do powierzchni zgrzewanej blachy. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej zmienia się budowa zgrzeiny. Przy małych prędkościach obrotowych na proces nagrzewania i uplastyczniania materiału w obszarze zgrzewania wpływa wieńiec opory. Zgrzeina przybiera postać trapezoidalną, a w jej strukturze można zauważyć linię tlenkową, wzdłuż której złącze może ulec zniszczeniu [12].

W przypadku procesu prowadzonego z dużą prędkością obrotową, zgrzeina ma bardziej regularny kształt o charakterystycznej cebulowej budowie jądra zgrzeiny. Tlenki z powierzchni płyt są równomiernie rozmieszczone w obszarze zgrzeiny. Zniszczenie złącza o takiej budowie przebiega najczęściej w obszarze styku strefy wpływu ciepła i strefy termomechanicznego odkształcenia materiału [13, 14].

In FSW technology, the parameters of the tool that causes plasticization and mixing of the material in the weld area have a decisive influence on the quality of the weld [7]. The most important part of the tool is a contoured pin embedded in the shoulder [8, 9]. In the FSW method, a rotary motion tool is used for heating and plasticizing the material. Owing to friction, the tool generates heat and stirs the material along the welding line. During rotation of the tool, the heated and plasticized material is moved backwards around the pin where it is mixed and press compacted [10]. Welding takes place by mixing materials while simultaneously breaking down and evenly distributing oxides from the surface of the welded components [11].

The basic parameters of FSW welding include tool rotary speed, linear welding speed as well as the angle of the tool to the surface of the welded metal. With increasing speed, the construction of the weld changes. At low rotational speeds, the shoulder has an impact on the process of heating and plasticizing material in the welding zone. The weld takes the form of a trapezoid, and in its structure an oxide line can be seen, along which the weld may be damaged [12].

If the process is carried out at a high speed, the weld has a more regular shape with a characteristic onion construction of the weld nugget. Oxides from the surface of the plates are uniformly distributed in the weld. Damage in such a weld structure occurs mostly in the contact area of the HAZ and thermo-mechanical deformation zone of the material [13, 14].

Przy bardzo dużych prędkościach obrotowych i prędkościach zgrzewania, w strukturze zgrzeiny pojawiają się wady w postaci pustek i nieciągłości, usytuowane w obszarze lica zgrzeiny po stronie natarcia.

Według [4] poszczególne obszary zgrzeiny mają różną wytrzymałość - najmniejszą od strony spływu. Ponadto złącza charakteryzują się dobrą wytrzymałością zmęczeniową, większą od wytrzymałości złączy spawanych łukowo.

Największe korzyści ze stosowania metody FSW w warunkach przemysłowych wynikają z możliwości łączenia blach aluminiowych bez specjalnego przygotowania powierzchni zgrzewanych. W trakcie zgrzewania nie ma dymu ani kurzu, zgrzeina nie wykazuje porowatości i pęknięć, jak to ma miejsce w przypadku spawania metodą TIG [15]. Z badań [16, 17] wynika, iż zgrzeina FSW posiada znacznie lepsze właściwości mechaniczne niż spoina TIG i MIG. FSW jest bardziej efektywna niż tradycyjne sposoby spawania, gdyż eliminuje konieczność spawania wielowarstwowego. Nie jest konieczne stosowanie osłon gazowych. Łączone elementy ze względu na mniejszą temperaturę procesu wykazują minimalną deformację konstrukcji ze względu na temperaturę.

2. BADANIA ZŁĄCZY FSW

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe połączenie doczołowe, wykonane metodą FSW. Tego typu połączenia stanowią podstawę złożonych struktur aluminiowych. Wytrzymałość połączeń FSW zależy głównie od doboru odpowiednich parametrów roboczych procesu. Właściwie wykonane połączenie pozwala na osiągnięcie parametrów wytrzymałościowych na poziomie materiału rodzimego.



Rys. 3. Złącze doczołowe wykonane metodą FSW

Fig. 3. Butt joint made by FSW

At very high rotational and welding speeds, defects in the structure of the weld appear in the form of voids and discontinuities located in the area of retreating side of weld.

According to [4], individual areas have different weld strength - the smallest at the runoff. In addition, the welds have good fatigue strength, greater than that of arc welds.

The greatest benefit of the FSW method in the industrial environment arises from the possibility of welding aluminum sheets without special preparation of the surface to be welded. During welding, there is no smoke or dust, nor the weld does have porosity or cracks as in the case of TIG welding [15]. Studies [16, 17] show that the FSW weld has significantly better mechanical properties than TIG and MIG welds. FSW is more effective than traditional welding methods because it eliminates the need for multi-layer welding, nor is necessary to use shield gas. Welded elements owing to lower process temperature display minimal structure deformation due to temperature.

2. TESTING FSW WELDS

Figure 3 provides an example of butt joints made by FSW. These types of welds are the basis of complex aluminum structures. The FSW weld strength mainly depends on the selection of appropriate operating parameters of the process. A properly made weld allows one to obtain strength parameters at the level of the base material.

W celu oceny właściwości mechanicznych złącza przeprowadzono jednoosiową statyczną próbę rozciągania złącza doczołowego. Stwierdzono, że wytrzymałość zgrzeiny na rozciąganie jest porównywalna z wytrzymałością materiału rodzimego. Różnice w wartościach otrzymanych dla materiału rodzimego i zgrzeiny są w granicach błędu pomiaru. Ze względu na działanie temperatury i mechaniczną deformację zgrzewany obszar ma niejednorodną strukturę i właściwości mechaniczne. W celu oceny niejednorodności struktury materiału wykonano badania metalograficzne.

Na rysunku 4 przedstawiono mikrostrukturę próbki wykonanej z materiału 2017A. Zastosowano następujące parametry robocze: prędkość posuwu 7 mm/s, liczba obrotów 10^4 obr/min. Widoczna pustka to następstwo niedostatecznego zagęszczenia materiału w obszarze roboczym. Poszczególne pasma, prostopadłe do osnowy są wynikiem działania narzędzia. W obszarach zgrzeiny występują drobne, regularne ziarna, będące efektem procesu mieszania i rekrytalizacji. Brak ziaren rozrośniętych sugeruje krótki czas rekrytalizacji. Wydłużone ziarna w materiale rodzimym są pochodną procesu walcowania na zimno blachy aluminiowej.

Rysunek 5 przedstawia mikrostrukturę złącza doczołowego. Zastosowany materiał to 2017A. Parametry robocze: prędkość posuwu 8 mm/s, ilość obrotów 10^4 obr/min. Na zdjęciu widać przejście pomiędzy materiałem rodzimym a zgrzeiną. Zaobserwowano zmniejszenie wielkości ziarna po mieszanii i rekrytalizacji, co powoduje wzrost własności wytrzymałościowych zgrzeiny w stosunku do materiału rodzimego.

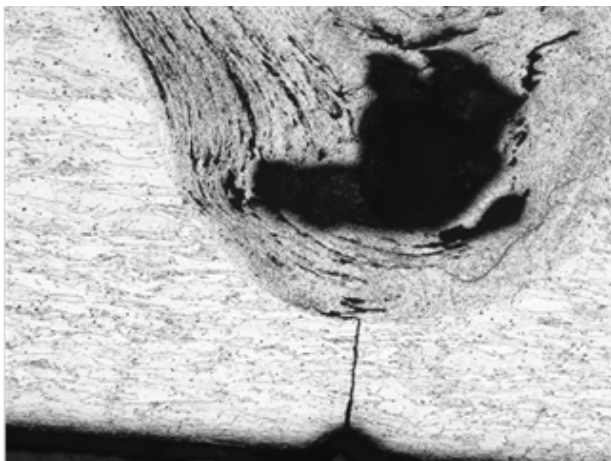
Właściwości złączy zgrzewanych tarciovo z mieszanii zależą od parametrów roboczych narzędzia. Odpowiedni ich dobór umożliwia osiągnięcie zbliżonej wytrzymałości złącza do materiału rodzimego. Wprawdzie mniejsza wielkość ziarna w obszarze zgrzewania na skutek mieszania i rekrytalizacji prowadzi do polepszenia właściwości mechanicznych, to tlenki i zanieczyszczenia z powierzchni łączonych elementów obniżają parametry mechaniczne złącza.

In order to evaluate the mechanical properties of the joints, a uniaxial static tensile test of the butt joint was conducted. It was found that the tensile strength of the weld is comparable to the strength of the base metal. The differences in the values obtained for the base metal and the weld were within the limits of measurement error. Due to the effect of heat and mechanical deformation, the weld area has a inhomogeneous structure and mechanical properties. In order to assess the inhomogeneity of the material structure, metallographic analysis was carried out.

Figure 4 shows the microstructure of a sample made of material 2017A employing the following operating parameters: feed rate 7 mm/s, speed 10^4 rev./min. The visible void is a consequence of insufficient density of the material in the work area. The individual strands perpendicular to the base are a consequence of the tool operation. In the weld areas there are small, regular grains, the effect of the mixing process and recrystallization. The lack of overgrown grains suggests a short time recrystallization. The elongated grains in the base material are derived from the cold rolling process of the aluminum sheet.

Figure 5 shows the microstructure of the butt joint. The material is 2017A, with operating parameters: feed rate 8 mm/s, revolutions 10^4 obr/min. The image shows the transition between the base material and the weld. Reduction of the particle size was observed after agitation and recrystallization, which increases the mechanical properties of the weld relative to the base metal.

The properties of FSW welds depend on the operating parameters of the tool. Their appropriate selection enables the joint to attain strength relative to the base material. Although a smaller grain size in the weld as a result of mixing and recrystallization leads to improved mechanical properties, the oxides and contaminants from the surface of the joined elements reduce the mechanical parameters of the joint.



Rys. 4. Mikrostruktura zgrzeiny od strony wyjścia narzędzia, powiększenie 50x

Fig. 4. Microstructure of weld on tool output side, 50x magnification

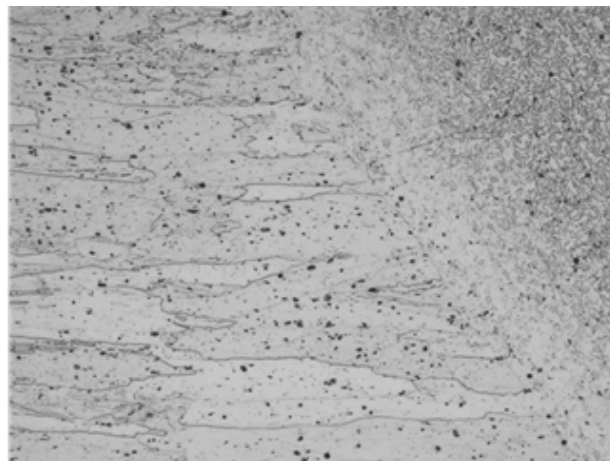
Badania metalograficzne wykazały zróżnicowaną strukturę materiału w obszarze zgrzeiny, co prowadzi do niejednorodnych właściwości mechanicznych. Nawet niewielka niejednorodność właściwości mechanicznych prowadzi do koncentracji naprężeń, szczególnie w złożonym stanie obciążenia.

Lotnicze struktury aluminiowe poddane są różnym typom obciążenia. W celu określenia obciążenia i deformacji zgrzein występujących w strukturach lotniczych należy określić stan naprężenia i deformację fragmentu obciążonej struktury lotniczej. Można to zrealizować przy użyciu metod numerycznych.

Analiza numeryczna przedstawiona w dalszej części pracy będzie podstawą badań i analiz zmierzających do oceny zgrzein uzyskanych za pomocą technologii FSW. Celem tej analizy będzie zamodelowanie typowej struktury aluminiowej poddanej obciążeniu. Uzyskane wyniki w postaci rozkładu przemieszczeń i naprężeń będą mogły być wykorzystane do szczegółowej analizy złącza FSW.

3. MODEL OBLICZENIOWY

Przedmiotem analiz były aluminiowe fragmenty struktury kadłuba samolotu. Analizowano dwie kategorie struktur aluminiowych, różniące się kształtem. Do analizy złączy zgrzewanych zastosowano metodę elementów skończonych MES, która jest powszechnie stosowanym narzędziem analizy numerycznej.



Rys. 5. Mikrostruktura złącza materiału rodzimego i zgrzeiny, powiększenie 200x

Fig. 5. Microstructure of base material and weld joint, 200x magnification

The metallographic analysis showed a varied material structure in the weld area, which leads to inhomogeneous mechanical properties. Even a small heterogeneity of the mechanical properties leads to stress concentrations, especially in complex load conditions.

Aircraft aluminum structures are subjected to different types of load. In order to determine the weld load and deformation occurring in aircraft structures, it is necessary to determine the state of stress and deformation of the part of the loaded aircraft structure. This can be done by using numerical methods.

The numerical analysis presented later in this work will be the basis of research and analysis aimed to evaluate welds obtained by FSW technology. The aim of this study is to model typical aluminum structures subjected to load. The results obtained in the form of displacement and stress distributions could be used for detailed analysis of FSW joints.

3. CALCULATION MODEL

The subject of the analysis were aluminum fuselage structure parts. Two types of aluminum structures which differ in shape were analyzed. For analysis of the welded joints, the finite element method FEM was used, which is a commonly used tool for numerical analysis.

Wszystkie modele składają się z pojedynczych kwadratowych paneli o grubości 2,4 mm przenoszących obciążenie. Każdy panel ma wymiar 0,2 x 0,2 m. Panele, w zależności od struktury, wsparto na ramkach oraz podłużnicach. Ramki i podłużnice są w kształcie kątowników o wymiarach 0,02 m x 0,015 m. Na każdy z paneli działała siła 1 kN rozłożona proporcjonalnie. Przyjęto następujące parametry materiałowe dla zgrzeiny, strefy wpływu ciepła oraz materiału rodzimego: Moduł Younga $E = 68,9 \text{ GPa}$, współczynnik Poissona $\nu = 0,33$, gęstość $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$.

Zakres analizy numerycznej zakłada, że każda z dwóch struktur aluminiowych zostanie zamodelowana przy użyciu elementów powierzchniowych typu shell i przy użyciu elementów objętościowych typu 3D Solid. Obliczenia zostaną przeprowadzone przy założeniu liniowych właściwości materiału w stanie sprężystym.

Fragmety struktury zbudowane z blachy, ramki, podłużnicy i podpórki zaprojektowano z dwóch rzędów paneli. Na rys. 6 przedstawiono modele numeryczne analizowanych struktur aluminiowych w wariacie powierzchniowym i objętościowym. Warunki brzegowe w postaci sztywnego umocowania zadano na zewnętrznych krawędziach struktury aluminiowej. Graficzną reprezentację warunków brzegowych pokazano na rys. 7. Model powierzchniowy zbudowano z 16-węzłowych elementów typu shell, wszystkich elementów skończonych w strukturze było 1120, co daje 10201 węzłów w całym modelu powierzchniowym. Model objętościowy zbudowano z 27-węzłowych elementów typu 3D solid; wszystkich elementów skończonych w strukturze było 4019, co daje 38601 węzłów w całym modelu objętościowym.

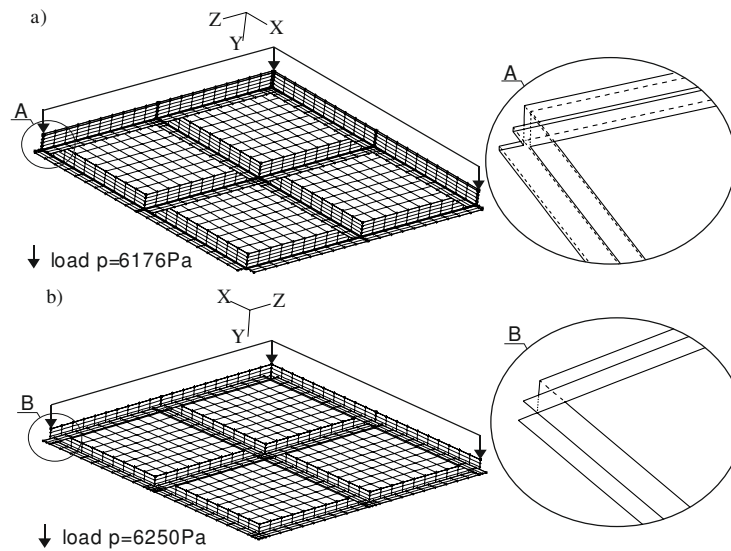
Fragmety struktury składającej się z blachy, podłużnicy i podpórki zbudowano z jednego rzędu paneli w kształcie prostokąta. Na rys. 8 przedstawiono modele numeryczne analizowanych struktur aluminiowych w wariacie powierzchniowym i objętościowym. Warunki brzegowe w postaci sztywnego umocowania zadano na zewnętrznych krawędziach struktury aluminiowej.

All the models consist of single square, 2.4 mm thick, load-bearing panels. Each panel has the dimensions 0.2 x 0.2 m. The panels, depending on the structure, were supported on frames and stringers. The frames and stringers are in the L shape of dimensions 0.02 m x 0.015 m. A proportionally distributed force of 1 kN was exerted on each of the panels. The following material parameters for the weld, heat-affected zone and base material were adopted: Young's modulus $E = 68.9 \text{ GPa}$, Poisson's ratio $\nu = 0.33$, density $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$.

The scope of the numerical analysis assumes that each of the two aluminum structures is modeled using shell surface elements and 3D Solid volume elements. The calculations are performed assuming linear properties of the material in the elastic state.

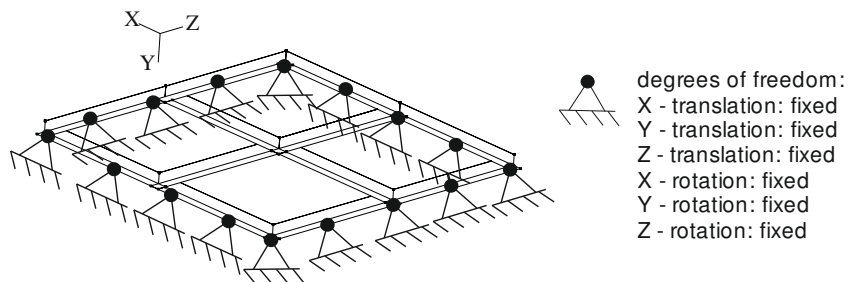
The parts of the structures made of sheet metal, frame, stringers and supports was designed with two rows of panels. Figure 6 shows the numerical models of the aluminum structures regarding surface and volume. The boundary conditions in the form of rigid fixing were set on the outer edges of the aluminum structure. A graphical representation of the boundary conditions is shown in Figure 7. The surface model was built with 16-node shell elements, there was a total of 1120 finite elements in the structure, resulting in 10,201 nodes throughout the surface model. The volume model was created with 27-node 3D Solid elements, there was a total of 4019 finite elements in the structure, resulting in 38,601 nodes throughout the volume model.

The parts of the structure consisting of sheet metal, stringers and supports were constructed with a single row of panels in the shape of a rectangle. Figure 8 shows the numerical models of the aluminum structures regarding surface and volume. The boundary conditions in the form of rigid fixing were set on the outer edges of the aluminum structure.

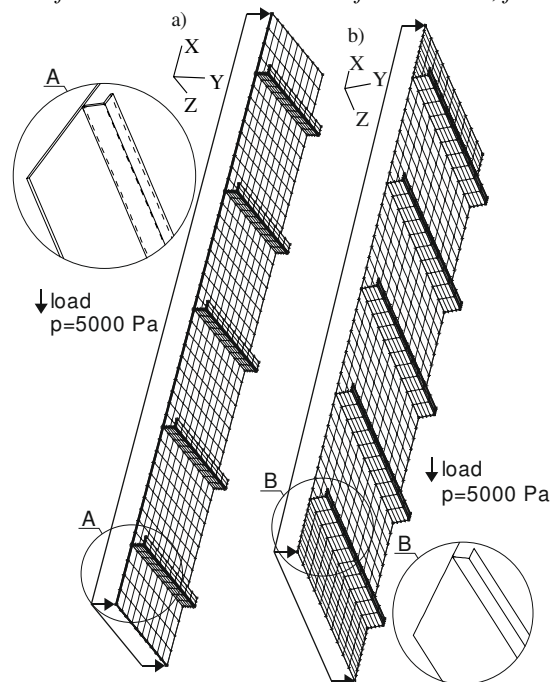


Rys. 6. Modele numeryczne struktury aluminiowej zbudowanej z blachy, ramek, podłużnic i podpórek:
a) model objętościowy, b) model powierzchniowy

Fig. 6. Numerical models of aluminum structures built of sheet metal, frames, stringers and supports:
a) volume model, b) surface model

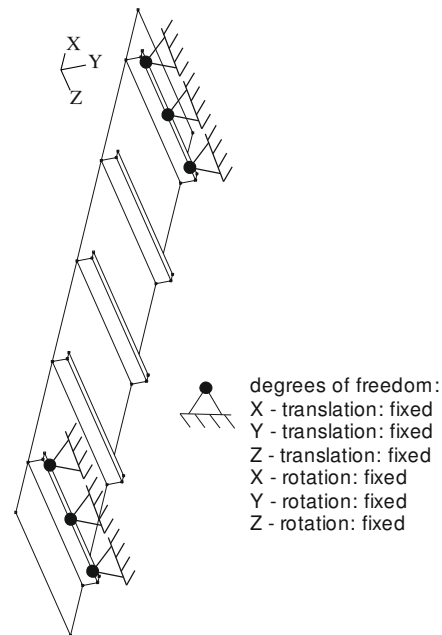


Rys. 7. Warunki brzegowe struktury aluminiowej zbudowanej z blachy, ramek, podłużnic i podpórek
Fig. 7. Boundary conditions of aluminum structure built of sheet metal, frames, stringers and supports



Rys. 8. Modele numeryczne struktury aluminiowej zbudowanej z blachy, podłużnic i podpórek:
a) objętościowy, b) powierzchniowy

Fig. 8. Numerical models of aluminum structures built of sheet metal, stringers and supports: a) volume, b) surface



Rys. 9. Warunki brzegowe struktury aluminiowej zbudowanej z blachy, podłużnic i podpórek

Fig. 9. Boundary conditions of aluminum structure built of sheets, stringers and supports

Graficzną reprezentację warunków brzegowych pokazano na rys. 9. Model powierzchniowy zbudowano z 16-węzłowych elementów typu shell, wszystkich elementów skończonych w strukturze było 1000, co daje 9331 węzłów w całym modelu powierzchniowym. Model objętościowy zbudowano z 27-węzłowych elementów typu 3D solid, wszystkich elementów skończonych w strukturze było 1960, co daje 20685 węzłów w całym modelu objętościowym.

Celem stosowania różnych elementów skończonych (powierzchniowych i objętościowych) do modelowania struktury aluminiowej jest określenie różnicy w wynikach pomiędzy nimi. Z analizy ilości węzłów w modelu numerycznym wynika, że w modelu objętościowym jest ich kilkakrotnie więcej. Rozbieżność w ilości węzłów pomiędzy modelami wynika między innymi z rodzaju elementu skończonego użytego do zbudowania siatki MES. Modele powierzchniowe, z elementami typu shell, o mniejszej liczbie węzłów, są korzystniejsze ze względu na krótszy czas obliczeń, co nie jest bez znaczenia w przypadku modelowania złożonych struktur. Elementy skończone typu shell w większym stopniu upraszczają model fizyczny niż elementy typu 3D solid. Zwykle modele powierzchniowe są nieco mniej sztywne niż modele objętościowe przy porównywalnej gęstości siatki MES.

A graphical representation of the boundary conditions is shown in Figure 9. The surface model was constructed with 16-node shell elements, there was a total of 1000 finite elements in the structure, which gives 9331 nodes in the entire model of the surface. The volume model was made with 27-node 3D Solid elements, there was a total of 1960 finite elements in the structure, resulting in 20,685 nodes throughout the volume model.

The purpose of using different finite elements (surface or volume) for the aluminum structure modeling is to determine the difference in the results between the two. Analysis of the number of nodes in the numerical model shows that in the volume model there are several times more. The discrepancy in the number of nodes between models is due to, inter alia, the type of finite element used to build the FE mesh. The surface models, composed of shell elements, with a smaller number of nodes, are preferred due to the shorter the computation time, which is important in the case of modeling complex structures. Shell finite elements to a greater extent simplify the physical model than 3D Solid elements. Simple surface models are slightly less rigid than volume models at a comparable FE mesh density.

Stosowanie modeli objętościowych do analizy struktur jest ograniczone czasem obliczeń. Przy zbyt dużej ilości węzłów obliczenia są mało wydajne.

The use of volume models for the analysis of structures is limited by calculations, as when there are too many nodes, the calculations are inefficient.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że maksymalne przemieszczenie modelu objętościowego zbudowanego z blachy, ramek, podłużnic i podpórek wyniosło 0,0405 mm. Dla modelu powierzchniowego maksymalne przemieszczenie wyniosło 0,0442 mm. Względna różnica pomiędzy modelami wynosi 9%. Maksymalne przemieszczenie elementu objętościowego zbudowanego z blachy, podłużnic i podpórek wyniosło 11,73 mm a dla elementu powierzchniowego 12,0 mm. Względna różnica jest mniejsza niż w poprzednich modelach i wynosi 2%.

W obu przypadkach różnica pomiędzy modelami jest wynikiem przyjętych elementów skończonych. Mniejszą, 2% różnicę w przypadku struktury bez ramek należy tłumaczyć mniejszą sztywnością tej struktury. Dla struktury z ramką, która jest sztywniejsza, uzyskujemy zdecydowanie mniejsze wartości przemieszczeń ale większą względną różnicę pomiędzy modelami. Porównując bezwzględne wartości, mniejszą różnicę 0,0035 mm otrzymujemy dla modelu sztywniejszego, natomiast dla modelu mniej sztywnego różnica bezwzględna jest większa i wynosi 0,27 mm. Ze-stawienie wartości maksymalnych przemieszczeń pokazano w tabeli 1.

4. CALCULATION RESULTS

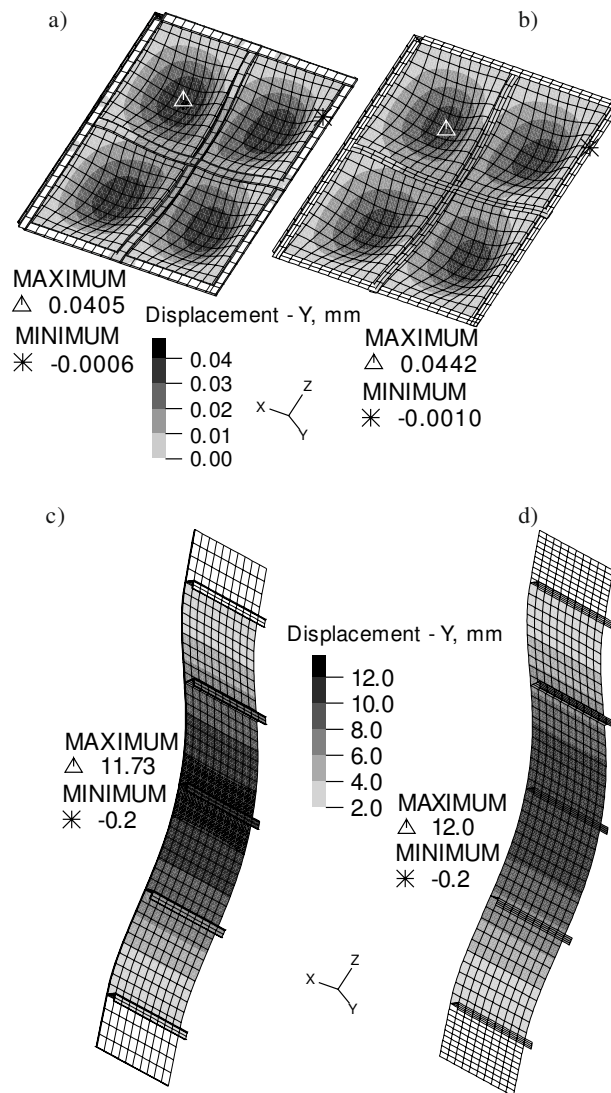
The conducted numerical analysis showed that the maximum displacement of the volume model constructed of sheet metal, frames, stringers and supports was 0.0405 mm. For the surface model the maximum displacement was 0.0442 mm. The relative difference between the models is 9%. The maximum displacement of the volume model made up of sheet metal, stringers and supports was 11.73 mm, and 12.0 mm for the surface model. The relative difference is smaller than the previous models and equals 2%.

In both cases, the difference between the models is due to the adopted finite elements. The smaller, 2% difference in the structure without frames can be explained by the lower rigidity of the structure. For a structure with a frame that is rigid, much smaller displacement values are obtained but there is a greater relative difference between the models. When comparing the absolute value, for the rigid model the difference is smaller - 0.0035 mm, while for the less rigid model the absolute difference is greater and equals 0.27 mm. A summary of the maximum displacement shown in Table 1.

Tabela 1. Maksymalne wartości przemieszczeń dla modeli struktur aluminiowych, mm

Table 1. Maximum displacement values for models of aluminum structures, mm

	Model składający się z blachy, ramek, podłużnic i podpórek, mm <i>Model consisting of sheet, frames, stringers and supports, mm</i>	Model składający się z blachy, podłużnic i podpórek mm, <i>Model consisting of sheet, stringers and supports, mm</i>
Model objętościowy <i>Volume model</i>	0,0405	11,73
Model powierzchniowy <i>Surface model</i>	0,0442	12,00



Rys. 10. Rozkład przemieszczeń, mm względem osi Y: a) model objętościowy składający się z blachy, ramek, podłużnic i podpórek, b) model powierzchniowy składający się z blachy, ramek, podłużnic i podpórek, c) model objętościowy zbudowany z blachy, podłużnic i podpórek, d) model powierzchniowy zbudowany z blachy, podłużnic i podpórek

Fig. 10. Displacement distribution, mm Y-axis: a) body model consisting of sheet metal, frames, stringers and supports, b) surface model consisting of sheet metal, frames, stringers and supports, c) volume model built from sheet metal, stringers and supports, d) surface model constructed from sheet metal, stringers and supports

We wszystkich czterech analizowanych wariantach obliczeń największe wartości przemieszczeń obserwowano w miejscu najdalej położonym od utwierdzenia. Na rys. 10 pokazano rozkład przemieszczeń w kierunku Y wraz z zaznaczeniem wartości maksymalnego przemieszczenia.

Maksymalne naprężenia zredukowane dla struktury aluminiowej zbudowanej z blachy, ramek, podłużnic i podpórek wynoszą odpowiednio: dla modelu objętościowego 12,03 MPa, a dla modelu powierzchniowego 17,99 MPa.

In all the four analyzed sets of calculations, the largest displacement values were observed at the place located far from the fixing. Figure 10 shows the displacement distribution in the Y direction, together with an indication of the maximum displacement.

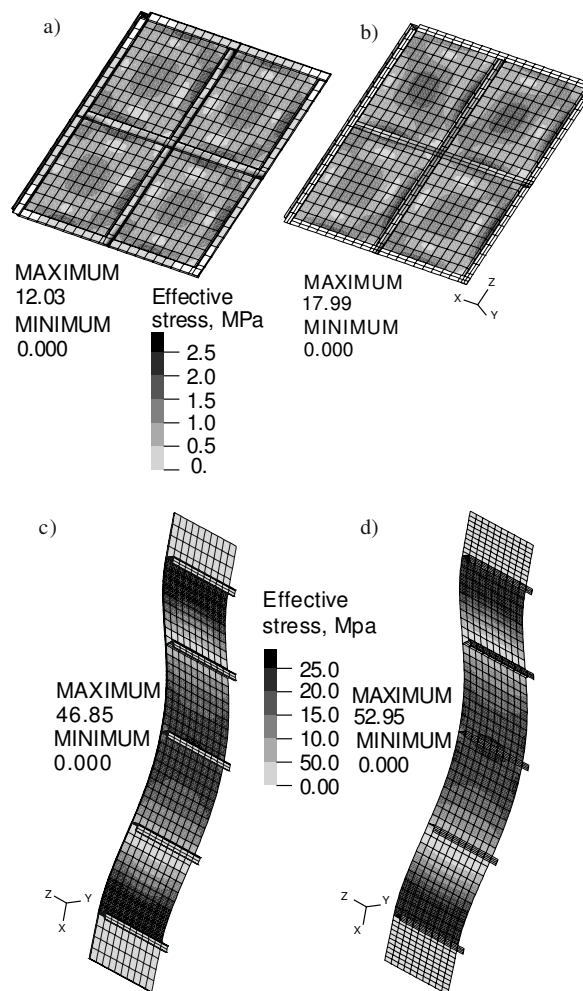
The maximum effective stresses for the aluminum structures built of sheet metal, frames, stringers and supports are as follows: volume model 12.03 MPa and surface model 17.99 MPa.

Maksymalne naprężenie zredukowane modelu objętościowego składającego się z blachy, podłużnic i podpórek wynosi 46,85 MPa, a modelu powierzchniowego 52,95 MPa. Charakter i rozkład naprężeń zredukowanych dla wszystkich analizowanych modeli pokazano na rysunku 11.

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że charakter rozkładu naprężeń zredukowanych jest inny niż dla rozkładu przemieszczeń. Maksymalne wartości występują w miejscu łączenia blachy z ramkami i podłużnicami. Obliczone wartości naprężeń zredukowanych nie przekraczają granicy plastyczności materiału.

The maximum effective stress for the volume model consisting of sheet metal, stringers and supports equals 46.85 MPa and 52.95 MPa for the surface model. The nature and distribution of the effective stresses for all the analyzed models is shown in Figure 11.

Based on the results, it can be concluded that the nature of the effective stress distribution is different from the displacement distribution. The maximum values occur at the junction of sheet metal frames and stringers. The calculated effective stress values do not exceed the yield strength of the material.



Rys. 11. Rozkład naprężeń zredukowanych, MPa: a) model objętościowy składający się z blachy, ramek, podłużnic i podpórek, b) model powierzchniowy składający się z blachy, ramek, podłużnic i podpórek, c) model objętościowy zbudowany z blachy, podłużnic i podpórek, d) model powierzchniowy zbudowany z blachy, podłużnic i podpórek

Fig. 11. Effective stress distribution, MPa: a) volume model consisting of sheet metal, frames, stringers and supports, b) surface model consisting of sheet metal, frames, stringers and supports, c) volume model constructed from sheet metal, stringers and supports, d) surface model constructed from sheet metal, stringers and supports

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych można stwierdzić, że największe wartości naprężeń zredukowanych będą się pojawiać w miejscu zgrzein FSW. Naprężenia zredukowane wzdłuż linii zgrzewania nie są jednorodne a obraz przemieszczeń wskazuje że struktury są zginane co powoduje występowanie naprężeń ściskających i rozciągających.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników analizy numerycznej wykazano, że modele struktur aluminiowych z użyciem elementów 3D solid są sztywniejsze niż modele z użyciem elementów typu shell. Elementy te w porównaniu do elementów typu shell dają pełniejszy obraz stanu naprężenia w obszarze zgrzeiny FSW. Zastosowanie elementów typu 3D solid jest jednak ograniczone ze względu na liczbę węzłów i długie czasy obliczeń numerycznych.

Przeprowadzona analiza numeryczna pokazała, że maksymalne wartości naprężeń zredukowanych pojawiają się w obszarze występowania zgrzein FSW. Takie usytuowanie lokalnych koncentracji naprężeń wskazuje, że zgrzeiny FSW stają się kluczowe w ocenie wytrzymałości całej struktury aluminiowej.

Ocena zgrzein FSW poprzez statyczną próbę rozciągania prowadzi do wniosku, że ich wytrzymałość jest porównywalna do wytrzymałości materiału rodzimego. Jednoosiowy stan naprężenia uzyskiwany w tej próbie jest jednak dużym uproszczeniem w ocenie zgrzeiny. Próba nie jest wystarczająca do oceny złącza FSW ponieważ nie uwzględnia złożonego stanu naprężenia mogącego wystąpić w obszarze zgrzeiny. Badania metalograficzne wykazały że, w zgrzeinie FSW struktura i właściwości mechaniczne nie są jednorodne. Ponadto obliczenia pokazały, że stan naprężenia występujący w strukturach aluminiowych nie jest jednoosiowy. Dlatego dalsze prace badawcze należy prowadzić w kierunku oceny złączy FSW w innych stanach naprężenia. Do dokładnej oceny niezbędne będzie ich zamodelowanie z uwzględnieniem zróżnicowanej struktury i właściwości mechanicznych w przekroju poprzecznym.

Based on the results of the numerical calculations, it can be concluded that most of the effective stress will appear in the place of the FSW welds. The effective stresses along the weld lines are not uniform and the displacement diagram indicates that the structures are bent, which causes the occurrence of tensile and compressive stresses.

5. CONCLUSIONS

Based on the results of the numerical analysis, it occurred that the models of aluminum structures using 3D Solid elements are stiffer than the shell models. These elements compared to the shell elements give a fuller picture of the state of stress in FSW welds. However, the use of 3D solid elements is limited due to the number of nodes and the long time for numerical calculations.

The conducted numerical analysis showed that the maximum values of effective stress occur at the site of FSW welds. Such locations of local stress concentration indicate that FSW welds are crucial in assessing the strength of the whole aluminum structure.

Assessing FSW welds by a static tensile test leads to the conclusion that their strength is comparable to the strength of the base material. The uniaxial stress state obtained in this test, however, is a major simplification in the evaluation of the weld, therefore, this test is not sufficient to assess the FSW weld because it does not take into account the complex state of stress which may occur in the welds. The metallographic analysis showed that in the FSW weld, the structure and mechanical properties are not uniform. Furthermore, the calculations showed that the state of the stresses occurring in the aluminum structures is not uniaxial. Therefore, further research should be carried out so as to evaluate FSW welds in other states of stress. For accurate modeling, taking into account their different structure and the mechanical properties of the cross-section will be required.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-15/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

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", Nr. POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Kaczmarek Ł., Kula P., Armand S., Castro T., Kruszczyński P., Rochel A., New possibilities of applications aluminum alloys in transport, *Metalurgy and Materials* 54 (2009), s. 1199-1205.
- [2] Nitkiewicz Z., Gwoździk M., Gajda M., Wojsyk K., Charakterystyka mikrostruktury oraz właściwości złącza stopu AlMg2 z tytanem, *Inżynieria Materiałowa* 6 (178) rok XXXI listopad-grudzień 2010, s. 1418-1421.
- [3] Kudła K., Wojsyk K., Lacki P., Śliwa R., The friction welding of alloys of titanium with aluminium, *Inżynieria Materiałowa* 5 (2009), s. 306-309.
- [4] Krasnowski K., Sedek P., Łomozik M., Pietras A., Impact of selected FSW process parameters on mechanical properties of 6082-t6 aluminium alloy butt joints, *Metallurgy and Materials* 56 (2011), s. 965-973.
- [5] Simmons M.C., Schleyer G.K., Pulse pressure loading of aircraft structural panels, *Thin-Walled Structures* 44 (2006), s. 496-506.
- [6] Zerbst U., Heinemann M., Dalle Donne C., Steglich D., Fracture and damage mechanics modelling of thin-walled structures – An overview, *Engineering Fracture Mechanics* 76 (2009), s. 5-43.
- [7] Lacki P., Kucharczyk Z., Śliwa R.E., Gałczyński T., Influence of selected parameters of friction stir welding process on the temperature, *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 57 2012 nr 8, s. 524-531.
- [8] Rai R., De A., Bhadeshia H.D.D. H., DebRoy T., Review: friction stir welding tools, *Science and Technology of Welding and Joining* 4 (2011), s. 325-342.
- [9] Miara D., Pietras A., Bogucki R., Właściwości i budowa strukturalna różnego typu złączy wykonanych metodą FSW, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 5/2008, s. 166-170.
- [10] Mishra R.S., Ma Z.Y., Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering* 50 (2005), s. 1-78.
- [11] David S.A., Feng Z., Friction Stir Welding of Advanced Materials: Challenges, Metals and Ceramics Division Oak Ridge, TN., Austria, 2004.
- [12] Kudła K., Wojsyk K., Welding energy and heat input in welding process, *Przegląd Spawalnictwa* 12 (2010), s. 21-25.
- [13] Kudła K., Wojsyk K., Ocena ilości ciepła wprowadzanego w procesach spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach* 5 (2010), s. 121-126.
- [14] He Z., Peng Y., Yin Z., Lei X., Comparison of FSW and TIG welded joints in Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy plates, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 21 (2011), s. 1685-1691.
- [15] Hamilton C., Dymek S., Blicharski M., Mechanical properties of Al 6101-t6 welds by friction stir welding and metal inert gas welding, *Metallurgy and Materials* 52 (2007), s. 67-72.
- [16] Squillac A., De Fenzo A., Giorleo G., Bellucci F., A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints, *Journal of Materials Processing Technology* 152 (2004), s. 97-105.
- [17] Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications, American National Standards Institute, 2009.