

Dr inż. Krzysztof KUDŁA, dr inż. Kwiryn WOJSYK, mgr inż. Konrad ADAMUS
Politechnika Częstochowska, Częstochowa
Kontakt: kkudla@o2.pl

Własności złączy zgrzewanych punktowo metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSSW i RFSSW

The properties of spot-welded joints produced by the FSSW and RFSSW methods

Streszczenie

Praca przedstawia badania eksperymentalne łączenia stopów aluminium za pomocą punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszaniem. Celem prowadzonych prób doświadczalnych było uzyskanie informacji jaki jest mechanizm zniszczenia złącza zakładkowego zgrzewanego tarcowo z przemieszaniem materiału, poddanego obciążeniu wywołującemu ścinanie. Ocenie poddano stosunek wytrzymałości złączy zgrzewanych do wytrzymałości materiału rodzimego wykonanych z zastosowaniem technologii zgrzewania punktowego (FSSW) oraz zgrzewania punktowego bezkraterowego (RFSSW). Zastosowanie zmodyfikowanego narzędzia do zgrzewania metodą RFSSW zmienia sposób tworzenia zgrzeiny, charakteryzującej się symetrycznym połączeniem, pozbawionym obszarów, w których występuje zmniejszenie gęstości stopu i tworzenia niesymetrycznego przejścia linii styku (retreating thinning). Zniszczenie połączenia występuje w obszarze materiału rodzimego w zakresie wytrzymałości odpowiadającej wytrzymałości materiału rodzimego. Cecha ta pozwala, przy właściwie zaprojektowanym rozmieszczeniu zgrzein, uzyskać pełną nośność złącza i zastąpić obecnie stosowane technologie łączenia punktowego za pomocą nitowania lub zgrzewania oporowego.

Abstract

This paper presents experimental research into joining aluminum alloys using friction stir spot welding. The goal of the experimental tests was to obtain information about failure mechanism of a friction stir spot welded overlap joint that is subject to shear load. The ratio of welded joint strength to base material strength was analyzed. The joints were created using friction stir spot welding (FSSW), and refill friction stir spot welding (RFSSW), technologies. The application of the modified tool to RFSSW changes the mechanism of weld creation. The RFSSW weld is characterized by symmetrical joint that is free from areas of lower density and occurrence of asymmetrical joining line (retreating thinning). The joint failure occurs in base material and corresponds to the strength of base material. The appropriate design of weld distribution allows for obtaining full load capacity and replacing currently applied resistance spot welding and riveting technologies.

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarcowe punktowe z przemieszaniem, aluminium, parametry procesu, narzędzie

Keywords: friction stir spot welding, aluminium, process parameters, tool

1. WPROWADZENIE

Jedną z odmian procesów wykorzystujących tarcowe nagrzewanie metali w stanie stałym do ich łączenia lub zmiany właściwości warstwy wierzchniej jest punktowe zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem (FSSW - Friction Stir Spot Welding). Metoda ta polega na miejscowym (punktowym) nagrzaniu tarcem ob-

1. INTRODUCTION

One of the variants of processes using friction heating of solid-state metals for their joining or changing the properties of their top layer is the Friction Stir Spot Welding (FSSW) method. This method consists in localized (spot) friction heating of the joint by a rotary tool.

szaru złącza przez obrotowe narzędzie. Zgrzewanie punktowe obecnie wypiera nitowanie i klejenie stopów lekkich ze względu na swoje, w stosunku do nich, liczne zalety takie jak:

- nie wymaga nawiercania elementów i stosowania nitów jako dodatkowych elementów łącznikowych,
- nośność zgrzein może osiągać wartości wyższe od połączenia nitowego,
- złącza zgrzewane zachowują wysoką odporność korozyjną ze względu na nieobecność elementów o innym od materiałów rodzimych potencjale elektrochemicznym,
- istnieje możliwość prostej naprawy złącza,
- żaden element zgrzeiny nie wystaje ponad powierzchnie łączonych elementów,
- zostaje wyeliminowana możliwość utraty szczelności przez złącze.

Zgrzewanie może odbywać się zarówno z pozostawieniem wgłębienia po trzpieniu narzędzia FSSW (FSSW - Friction Stir Spot Welding), jak i z zamykaniem krateru (RFSSW - Refill Friction Stir Spot Welding [1]). Istotnym udoskonaleniem tej metody spajania punktowego jest zgrzewanie dzielonym narzędziem, umożliwiającym uzyskanie bezkraterowej zgrzeiny zrównanej o powierzchni równej z powierzchnią łączonych elementów.

Metoda jest efektywna, lecz wymaga dokładnie wykonanych narzędzi i kompleksowej kontroli parametrów w celu uzyskania optymalnych właściwości zgrzeiny [2]. Zasadę tego typu zgrzewania przedstawia rysunek 1.

Sekwencja zgrzewania RFSSW:

- w pierwszej fazie następuje pozycjonowanie trzpienia mieszającego i tulei na płaszczyźnie górnej blachy złącza. Tuleja zewnętrzna wywiera ciągły docisk, zabezpieczając materiały łączone przed niekontrolowanym przesunięciem. Jednoczesny obrót i docisk trzpienia i tulei wewnętrznej generuje ciepło tarcia, które nagrzewa i uplastycznia metal w strefie łączenia,
- druga faza obejmuje penetrację złącza przez trzpień, który zagłębiając się w materiał uplastycznia go i wyciska poza obręb czoła trzpienia. Powoduje to wyciskanie uplastycznionego metalu na zewnątrz trzpienia w miejsce utworzone przez cofniętą tuleję. Przed niekontrolowanym wypłynięciem metalu chroni obwodowy

Spot welding is currently replacing the riveting and bonding of light alloys thanks to its numerous advantages, such as:

- *it does not require spot drilling of parts to be joined and using rivets as additional fasteners,*
- *the load capacity of welds may attain values higher than that of a riveted joint,*
- *welded joints retain high corrosion resistance due to the absence of elements with an electrochemical potential different from that of the parent materials,*
- *there is a possibility of making a simple repair of the joint,*
- *no weld element stick out above the surface of the joined parts, and*
- *the possibility of the joint losing its tightness is eliminated.*

Welding can be done either with retaining the cavity left after the tool mandrel – by so called Friction Stir Spot Welding (FSSW), or with closing the crater – by Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) [1]. An important improvement of this spot welding method is welding using a split tool that enables a craterless weld of a surface flush with the surface of the joined parts to be obtained.

This method is effective, but it requires accurately made tools and the comprehensive control of parameters in order to obtain the optimal parameters of the weld [2]. The concept of this method of welding is illustrated in Figure 1.

The RFSSW welding sequence is as follows:

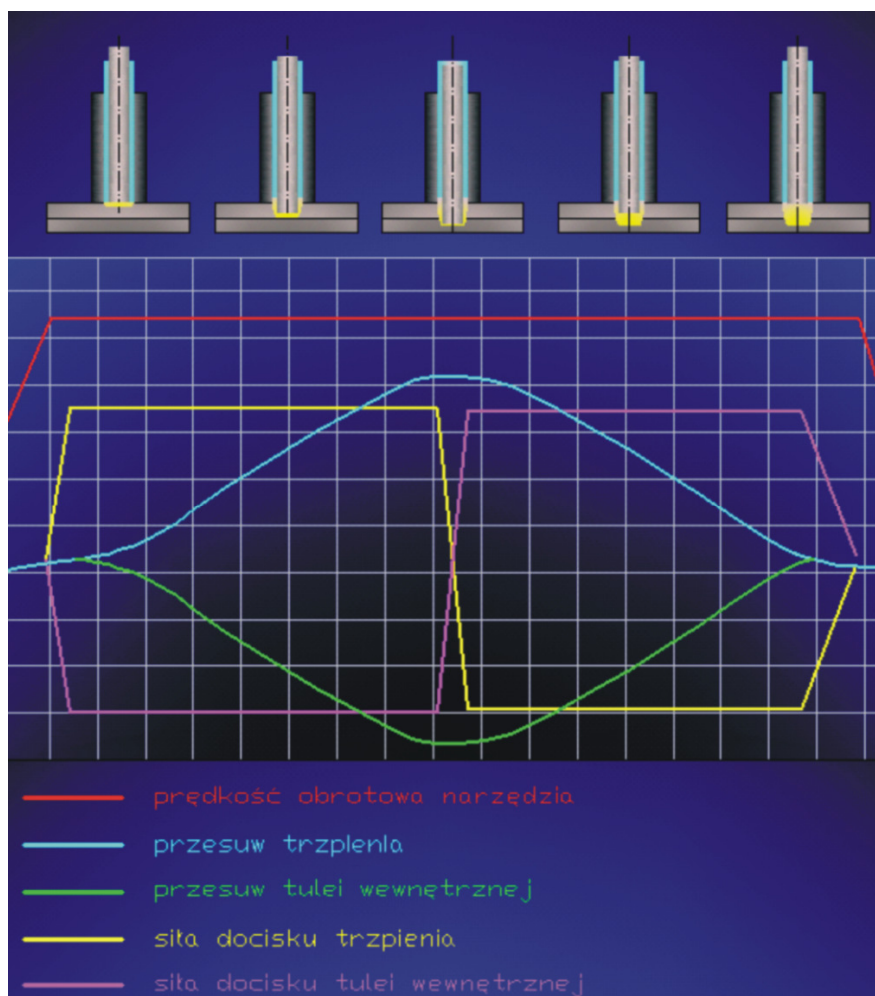
- *in the first phase, the stirring mandrel and the sleeve are positioned in the plane of the upper joint plate. The outer sleeve applies continuous pressure, thus securing the joined materials against any uncontrolled displacement. The simultaneous rotation and pressure on the mandrel and the sleeve generate friction heat that heats up and plasticizes the metal in the joint area;*
- *the second phase includes the penetration of the joint by the mandrel which, by sinking into the material, plasticizes it and squeezes it out beyond the mandrel face. This causes the plasticized metal to be extruded outside the mandrel to the place formed by the re-*

docisk tulei zewnętrznej, opierającej się o powierzchnię górną złącza,

- w dalszej fazie trzpień zagłębia się w złącze poza linię styku blach, a tuleja wewnętrzna przesuwana jest ku górze,
- w kolejnej fazie następuje przeciwbieźny ruch trzpienia i tulei, która wyciska uplastyczniony metal w kierunku złącza,
- celem uzyskania zgrzeiny o wysokiej jakości powierzchni następuje krótkotrwałe pozycjonowanie narzędzia na powierzchni górnej blachy w złączu zakładkowym.

racted sleeve. Protection against the uncontrolled outflow of the metal is provided by the circumferential pressure on the outer sleeve that rests against the upper joint surface;

- *in the next phase, the mandrel penetrates into the joint beyond the contact line between the plates, while the inner sleeve is moved upwards;*
- *subsequently the mandrel and the sleeve move in the backward direction, whereby the latter extrudes the plasticized metal towards the joint;*
- *in order to obtain a weld of high surface quality, short-lasting positioning of the tool on the upper plate surface in the overlap joint takes place.*



Rys. 1. Charakterystyka zgrzewania tarcowego RFSSW i przebieg zmian podstawowych parametrów procesu [3]

Fig. 1. Characteristic of RFSSW friction welding and the variation of the basic process parameters [3]

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Wobec wprowadzania różnych technologii tarcowego zgrzewania punktowego: monolitycznymi i dzielonymi narzędziami, istotne jest wyjaśnienie, w jakim stopniu doskonalsze narzędzia i kontrola parametrów zgrzewania może wpłynąć na poziom nośności i charakter zniszczenia zgrzein punktowych. W tym celu w Zakładzie Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej wykonano próbki z płaskowników ze stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym. Próbki te łączono zarówno narzędziem dzielonym firmy Harms &Wende jak i monolitycznym narzędziem o trzpieniu stożkowym – według własnego projektu. Zgrzeiny wykonywano z zastosowaniem zróżnicowanych parametrów, a weryfikacja jakości następowała przez wykonanie prób czystego ścinania złączy.

Głównym celem prób eksperymentalnych było uzyskanie informacji jaka jest nośność złącza zakładkowego zgrzewanego tarcowo z przemieszaniem materiału, poddanego obciążeniu wywołującemu ścinanie.

Wykonano badania łączenia stopów lekkich grupy D16T (GOST) za pomocą punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszaniem. Zgrzewano zakładkowo blachy o grubości 0,6 mm narzędziem monolitycznym (rys. 2). Dodatkowo przeprowadzono próby łączenia punktowego z zamykaniem krateru blach o grubości 2,5 mm ze stopu aluminium 7075 T6, na stanowisku wyposażonym w głowicę RPS 100 (Harms&Wende) (rys. 3).

Ocenie poddano wytrzymałość względną złącza mierzoną stosunkiem wytrzymałości złącz zgrzewanych do wytrzymałości materiału rodzimego wykonanych z zastosowaniem technologii zgrzewania punktowego FSSW oraz zgrzewania punktowego bezkraterowego RFFSW.

W procesie zgrzewania FSSW zgrzeiny wykonywano przy prędkościach obrotowych 1000 i 1500 obr/min. Z analizy literatury wynika, że głównymi parametrami odpowiedzialnymi za wytrzymałość złącza zgrzewanego tarcowo narzędziem konwencjonalnym są wielkość zagłębienia trzpienia w materiał oraz czas zgrzewania [4, 5].

2. EXPERIMENTAL

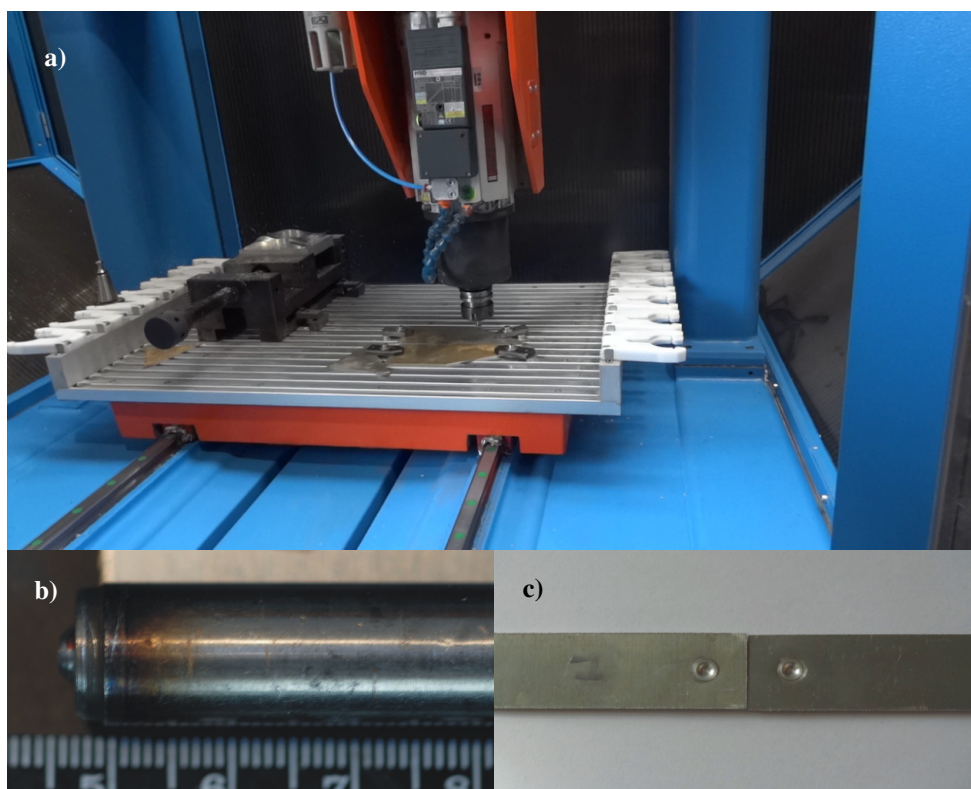
Due to the introduction of various friction stir spot welding technologies, which use fixed and adjustable tools, it is essential to determine the degree to which improvements in tools and control of welding parameter can impact on the joint capacity and the character of joint failure. For this purpose specimens in a form of flat bars made of aluminum alloys used in aerospace industry were prepared in Welding Department of the Czestochowa University of Technology. The specimens were joined using both adjustable tool designed by Harms &Wende and fixed cone-shaped tool of own design. The welds were produced using different sets of parameters. In order to verify their quality pure shear tests were performed.

The primary purpose of the experimental tests was to obtain the information about the load capacity of the overlap metal displacement friction welded joint subjected to shear-generating loading.

The joining of lightweight alloys from D16T (GOST) group using friction stir spot welding was researched. The 0.6 mm thick sheets were joined using the fixed tool (Fig. 2). Additionally 2.5 mm thick sheets made of 7075 T6 aluminum alloy were joined in refill variant using RPS 100 head designed by Harms &Wende (Fig. 3).

Relative strength of joints produced using friction stir spot welding (FSSW) and refill friction stir spot welding (RFFSW) methods was evaluated. The relative strength was defined as the ratio of welding joint strength to parent material strength.

In the FSSW welding process, welds were made at a rotational speeds of 1000 and 1500 rpm, respectively. It is known from literature that the main parameters responsible for the strength of a friction welded joint made with a conventional tool are the magnitude of mandrel penetration into the material and the welding duration [4, 5].



Rys. 2. Stanowisko do zgrzewania tarcowego FSW i FSSW

a) głowica, b) narzędzie, c) widok zgrzein punktowych

Fig. 2. The FSW and FSSW friction welding testing stand

a) head, b) tool, c) view of the spot welds

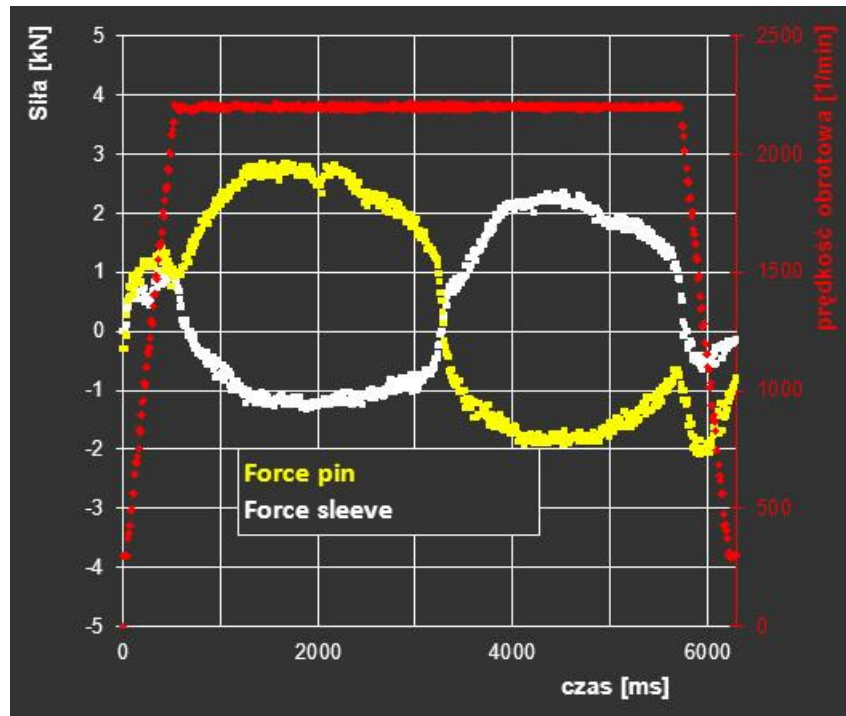


Rys. 3. Stanowisko do zgrzewania tarcowego RFSSW:

a) głowica RPS 100 (Harms&Wende), b) narzędzie podczas wykonywania zgrzeiny, c) widok zgrzein punktowych

Fig. 3. The RFSSW friction welding testing stand:

a) RPS 100 head (Harms&Wende), b) tool during welding, c) view of the spot welds



Rys. 4. Przebieg zmian prędkości obrotowej i siły docisku trzpienia oraz tulei podczas zgrzewania RFSSW
 Fig. 4. Variation of rotational speed and the mandrel and sleeve pressure force during RFSSW welding

Podczas realizacji badań zmieniano głębokość wnikania narzędzia od 0,7 do 1,1 mm co 0,1 mm i czas od 1,0 s do 3,0 s.

W trakcie prób rejestrowano prędkość i moment obrotowy działający na narzędzie. Dodatkowo w procesie RFSSW monitorowano przemieszczenia trzpienia i tulei oraz siłę docisku wywieraną na trzpień i tuleję (rys. 4).

Zakres parametrów pracy głowicy RPS 100:

- prędkość obrotowa narzędzia 0-3300 obr./min,
- siła docisku trzpienia i tulei 0-11 kN (15 kN),
- przemieszczenie pionowe narzędzia 0-10 mm,
- prędkość wnikania narzędzia 1 mm/s.

Złącza wykonywano na zakładkę z jedną zgrzeiną z użyciem zarówno litego konwencjonalnego narzędzia z wystającym poza oporę trzpieniem stożkowym, jak i z narzędziem dzielonym. Dla oceny efektu zgrzewania złącza te poddano ścinaniu, wywołując rozrywanie zgrzein. Parametry dobrano w ten sposób, by uzyskać wyłuskanie (wyrwanie) jądra zgrzeiny. Złącza blach o grubości 0,6 mm z pozostawieniem krateru ulegały zniszczeniu po obciążeniu siłą około 1,15-1,20 kN, zawsze w górnej płycie (rys. 5).

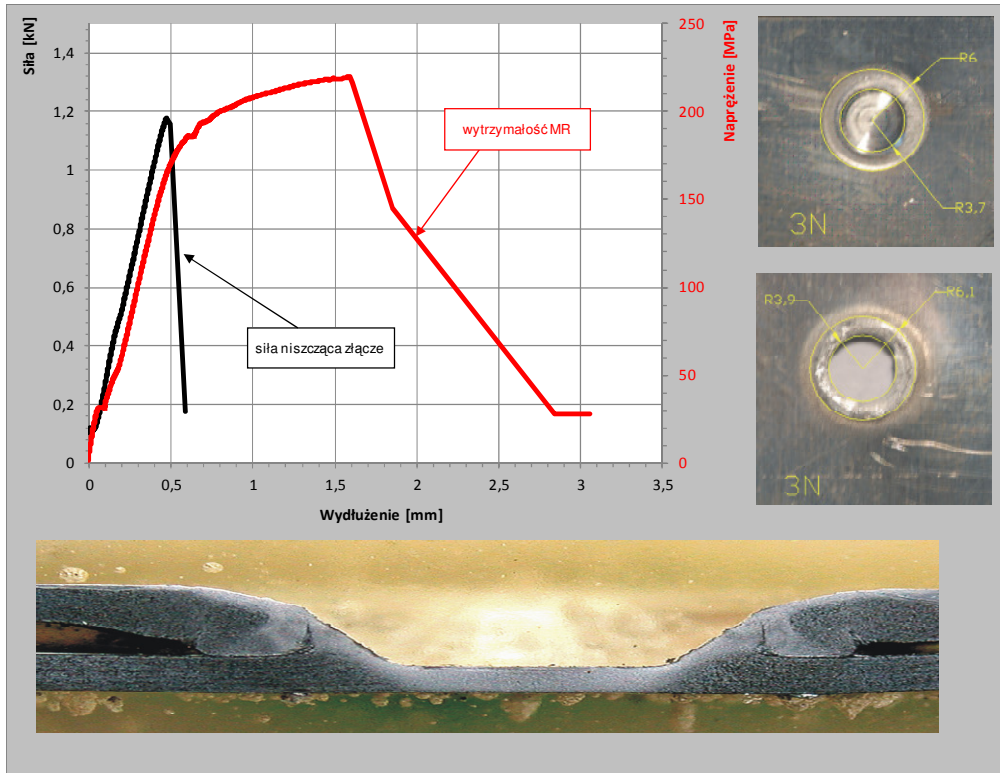
During the tests, the tool penetration depth was varied from 0.7 to 1.1 mm with a step of 0.1 mm and the welding duration from 1.0 s to 3.0 s.

The velocity and the turning moment acting upon the tool were recorded during testing. Additionally in the RFSSW process, mandrel and sleeve displacements and the pressure force acting on the mandrel and the sleeve were monitored.

The range of RPS 100 head operation parameters:

- *tool rotational speed, 0-3300 rpm,*
- *mandrel and sleeve pressure force, 0-11 kN (15 kN),*
- *vertical tool displacement, 0-10 mm,*
- *tool penetration speed, 1 mm/s.*

The joints were made with an overlap, with one weld being made using both a solid conventional tool with a tapered mandrel protruding beyond the back-up, and with a split tool. In order to assess the welding results the joints were subjected to shearing, causing the welds to break. The parameters were selected so that the weld nugget was pulled out. The 0.6 mm-gauge sheet joints with the crater retained would fail under loading with a force of approx. 1.15-1.20 kN, with the failure always occurring in the upper plate (Fig. 5).



Rys. 5. Wytrzymałość zgrzein punktowych w procesie FSSW: a) wykresy siła-wydłużenie, wytrzymałość-wydłużenie, b) wygląd złącza po próbie ścinania, c) zgląd metalograficzny złącza

Fig. 5. The strength of FSSW spot weld: a) force-elongation and strength-elongation graphs, b) view of a joint after the shearing test, c) metallographic microsection of the joint

Zgrzeiny z wypełnionym jądrem, łączące blachy o grubości 2,5 mm pękały obwodowo wokół zgrzein pod obciążeniem na poziomie 6,4 kN (rys. 7). Osiągnięte poziomy niszczenia pojedynczej zgrzeiny zależą zatem od długości jej obwodu, grubości zgniezionej blachy w najsłabszym miejscu i powstałej struktury wokół zgrzeiny, co uzależnione jest od kształtu trzpienia narzędzia i zastosowanych parametrów zgrzewania, a więc w przeciwieństwie od połączeń nitowych i nitowo-klejonych mogą być zbliżone do wytrzymałości materiałów rodzimych.

W przypadku zgrzewania punktowego FSSW, szczególnie cienkich blach, dochodzi do tworzenia zgrzein kraterowych, w których metaliczne połączenie zależy w dużym stopniu od kształtu narzędzia i parametrów procesu. Nieprawidłowo dobrane wielkości wejściowe powodują występowanie niezgodności [7] oraz zmniejszają przekrój przenoszący obciążenia zewnętrzne. Do najczęściej występujących niezgodności zaliczyć należy unoszenie blach w obrębie wypieranego metalu (rys. 5c) w strefie

Welds with the filled nugget, joining 2.5 mm gauge sheets, would break circumferentially around the weld under loading at a level of 6.4 kN (Fig. 7). The obtained levels of a single weld disintegration depend on the weld circumference, the sheet thickness in the weakest point and the material microstructure around the weld. These parameters depend on tool shape and the welding parameters. Thus, unlike riveted and hybrid adhesive bonded and riveted joints, friction stir spot welded joints can have strength close to the strength of parent material.

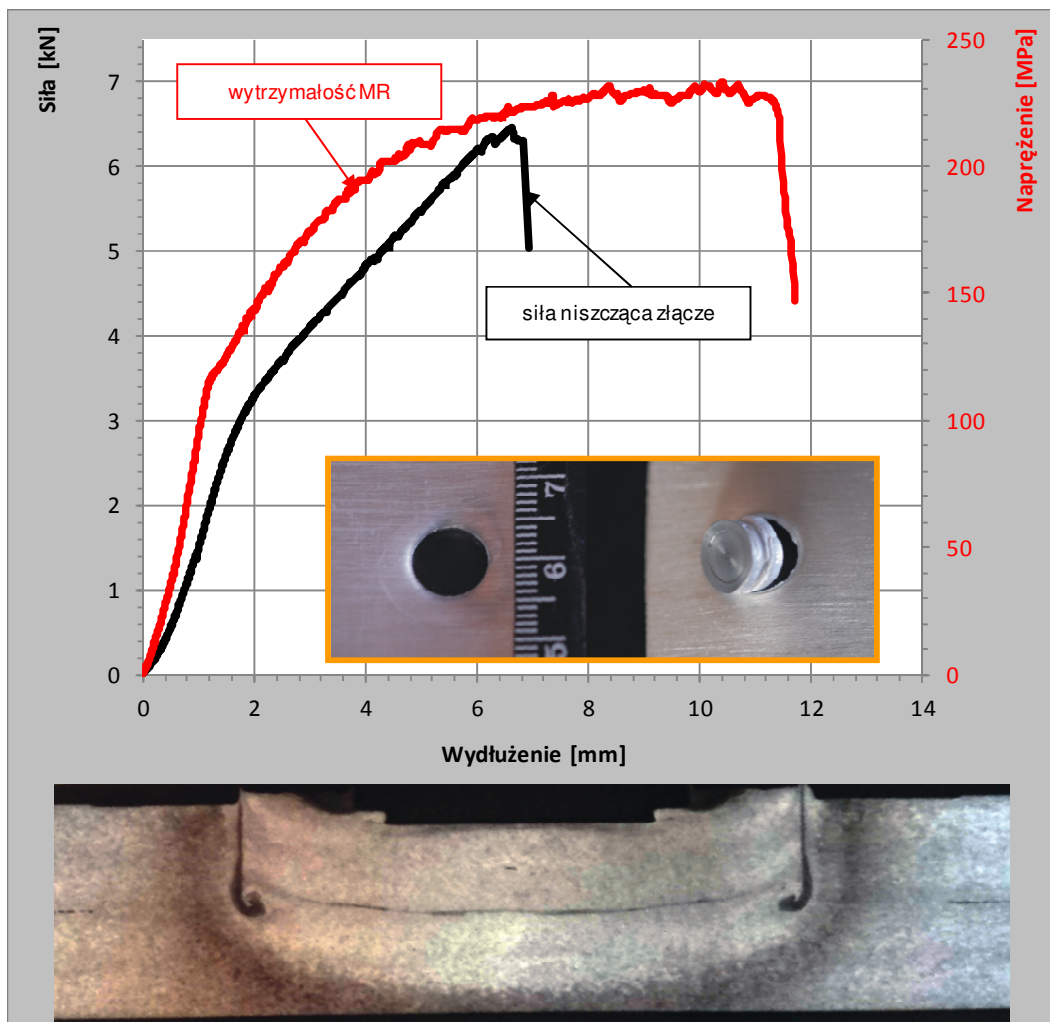
In the case of FSSW spot welding, especially thin sheets, crater welds will form, in which the metallic bonding depends largely on the tool shape and process parameters. Incorrectly selected initial quantities will cause occurrence of nonconformities and reduce the cross-section carrying external loads. The most often occurring nonconformities include raised sheets within the displaced metal (Fig. 5c) in the joint area, and no meta-

złącza oraz brak spoiny metalicznej po stronie spływu (rys. 6). Unoszenie blachy górnej występowało przy większej głębokości penetracji narzędzia. Jednocześnie obserwowano poszerzenie strefy wymieszania w wyniku zwiększonego nacisku oraz przenoszenie większych sił podczas prób ścinania złączy.

llic bonding on the run-off side (Fig. 6). A raised upper sheet occurred with a greater depth of tool penetration. At the same time, a stirring zone widening due to the increased pressure and larger forces carried during joint shearing tests were observed.



Rys. 6. Asymetria połączenia metalicznego w punktowym złączy zgrzewanym FSSW
 Fig. 6. Asymmetry of the metallic bond in an FSSW spot welded joint



Rys. 7. Test wytrzymałości na ścinanie materiału rodzimego (MR) i złącza zgrzewanego tarciovo metodą RFSSW:
 a) wykresy siła-wydłużenie, wytrzymałość-wydłużenie, b) wygląd złącza po zerwaniu,
 c) zgląd metalograficzny złącza

Fig. 7. Shear test for parent material (PM) and the RFSSW friction welded joint: a) force-elongation and strength-elongation graphs, b) view of a joint after breaking, c) metallographic microsection of the joint

Mimo ogólnego, wysokiego poziomu wytrzymałości złącza, w zgrzeinie może wstąpić szereg niejednorodności, wywołanych asymetrycznym płynięciem materiału wokół pionowej osi zgrzeiny (po stronie strefy natarcia i spływu). Niezgodności te mogą znacząco obniżyć właściwości zmęczeniowe złącza.

Podczas zgrzewania punktowego tarcowego z ruchomym trzpieniem RFSSW, uzyskuje się zgrzeiny punktowe bezkraterowe. Powierzchnia uzyskanej zgrzeiny charakteryzuje się dwoma koncentrycznymi obszarami wymieszanego tarcio metalu (rys. 8). Średnica zgrzeiny wynika bezpośrednio ze średnicy narzędzia dającego minimalny rozrzut wymiaru zgrzeiny. Cecha ta powoduje, że zgrzewanie RFSSW nadaje się do łączenia materiałów, w których wymagana jest wysoka precyzja i powtarzalność parametrów wytrzymałościowych złączy, co potwierdziły przeprowadzone próby eksperymentalne.

Wyższa wytrzymałość złączy wykonanych za pomocą narzędzia z ruchomym trzpieniem wynika bezpośrednio z większej powierzchni czynnej przenoszącej obciążenie zewnętrzne. Charakter zniszczenia złącza przedstawiono na rysunku 9.

Notwithstanding the high level of the joint's strength, a number of inhomogeneities can occur in the weld, which are caused by the asymmetric material flow around the vertical weld axis (on the approach and run-off zone sides). These nonconformities may significantly reduce the fatigue properties of the joint.

During RFSSW welding with a movable mandrel, craterless spot welds are obtained. The surface of thus obtained weld is characterized by two concentric regions of friction stirred metal (Fig. 8). The weld diameter results directly from the diameter of the tool providing a minimal weld dimension scatter. This feature makes RFSSW welding suitable for joining materials, from which the high precision and repeatability of the strength parameters of joints is required, which has been confirmed by the experimental tests carried out.

The higher strength of joints made using the movable mandrel tool results directly from the larger active area carrying external loading. The pattern of joint failure is shown in Figure 9.



Rys. 8. Lico zgrzeiny punktowej wykonanej z zastosowaniem narzędzia z ruchomym trzpieniem. Średnica trzpienia 5,2 mm, średnica tulei zewnętrznej 9,0 mm

Fig. 8. The face of a spot weld made using the movable mandrel tool. Mandrel diameter, 5.2 mm; outer sleeve diameter, 9.0 mm



Rys. 9. Makrostruktury złącza zgrzewanego tarciowo RFSSW (parametry – rys. 3):
a) złącze A7075, 2,5+2,5 mm; b) złącze po próbie ścinania

Fig. 9. The microstructure of an RFSSW welded joint (parameters – Fig. 3):
a) A7075 joint, 2.5+2.5 mm; b) joint after the shearing test

3. WNIOSKI

- Podczas ścinania złączy punktowych cienkościennych materiałów wykonanych z zastosowaniem klasycznych narzędzi stosowanych w metodzie FSW występują niezgodności, do których zaliczyć należy unoszenie blach w obrębie wypieranego metalu w strefie złącza oraz brak spojenia metalicznego po stronie spływu. Główną wadą jest przede wszystkim tworzenie krateru, który istotnie zmniejsza wytrzymałość połączenia. Mimo to złącza te mają wyższą wytrzymałość od oczekiwanej na ścinanie w stosunku do połączenia nitowanego.
- Zgrzewanie punktowe tarciove z ruchomym trzpieniem RFSSW - Refile Friction Stir Spot Welding, zmienia sposób tworzenia zgrzeiny, charakteryzującej się symetrycznym połączeniem, pozbawionym obszarów, w których występuje zmniejszenie gęstości stopu i tworzenia niesymetrycznego przejścia linii styku (retreating thinning). Zniszczenie połączenia występuje w obszarze materiału rodzimego w zakresie wytrzymałości odpowiadającej wytrzymałości materiału rodzimego.
- Projektując odpowiednie szwy złożone z szeregu równoległe lub przemiennie położonych punktów zgrzewania, uzyskać można pełną nośność złącza, tzn. uzyskać zerwanie w materiale litym na poziomie wytrzymałości materiału rodzimego.

3. CONCLUSIONS

- *During shearing of thin-walled material spot welded joints made using classic tools used in the FSW method, nonconformities occur, which include raised sheets within the displaced metal in the joint zone, and the absence of metallic bonding on the run-off side. The main defect is, above all, the formed crater, which substantially reduced the strength of the joint. In spite of this, these joints have shear strength higher than that expected from riveted joints.*
- *Refilled friction stir spot welding (RFSSW) with a movable mandrel changes the way in which the weld is formed; the obtained weld is distinguished by a symmetric bond, free from any regions with a reduced alloy density and the formation of asymmetric retreating thinning. The failure of the joint occurs within the parent material in the range of strength corresponding to the strength of the parent material.*
- *By designing appropriate seams made up of a series of parallel or alternately situated welding spots, the full load-carrying capacity can be obtained, i.e. the break will occur in the solid material at a strength level equal to that of the parent material.*

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG 0101.02-00-015/08-00 w Programie Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

The paper was prepared within the framework of Project No. POIG 0101.02-00-015/08 within the Innovative Economy Programme (POIG). The project was co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Eggers J.: Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW). Welding aluminium accurately and consistently. HWI Weld Times 5/2012, s. 3.
- [2] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney: Friction Stir Welding and Processing. ASME International 2007, s. 1-37.
- [3] ReibPunkt Schweissen Das Neue Verfahren Harms+Wende GmbH&Co Artikelnummer 29542 October 2009.
- [4] Chang-Yong Lee, Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon, Keun Song, Jeong-Hoon Moon, Jung-Gu Kim, Seung-Boo Jung: Joint Characteristic of Spot Friction Stir Welded 5052 Al Alloy Sheet. Advanced Materials Research 2007 vol. 15-17, s. 345-350.
- [5] Yutaka S. Sato, Mitsuo Fujimoto, Natsumi Abe, Hiroyuki Kokawa: Friction Stir Spot Welding Phenomena in Al Alloy 6061. Materials Science Forum 2009.
- [6] Kudła K.: Raport nt. Badania doświadczalne i analiza jakości złączy zakładkowych zgrzewanych punktowo metodą FSSW. Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym. Zadanie badawcze 15: Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych (niepublikowany).
- [7] PN-EN 26520 (PN ISO 6520) „Klasyfikacja niezgodności spawalniczych w złączach spawanych metali wraz z objaśnieniami”.