

Dr inż. Krzysztof KUDŁA, dr inż. Kwiryn WOJSYK, dr inż. Zygmunt KUCHARCZYK
Politechnika Częstochowska, Częstochowa
Kontakt: kkudla@o2.pl

Własności zakładkowych złączy spajanych metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW - Friction Stir Welding)

Properties of overlap joints welded by the Friction Stir Welding Method

Streszczenie

Praca dotyczy problemu łączenia złączy zakładkowych wykonanych ze stopów aluminium technologią zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW. Analizie poddano budowę złącza w strefach: natarcia, wpływu ciepła oraz spływu. Wykazano dużą niejednorodność i asymetrię złącza, charakteryzującą się wyraźną granicą między materiałem po rekrytalizacji i odkształceniu termomechanicznym. Próby ścinania ujawniły występowanie obszaru w strefie spływu, w którym występują przyklejenia między łączonymi elementami, obniżając jego wytrzymałość. W obszarze natarcia elementem decydującym o charakterze zniszczenia jest kształt linii styku łączonych materiałów. Dokonano analizy siły docisku oraz położenia narzędzia na jakość zgrzein. Wykazano, że najlepsze efekty łączenia uzyskuje się prowadząc proces zgrzewania z kontrolowaną siłą docisku i z zachowaniem odpowiedniego ustawienia kąta pochylenia oraz głębokości jego zanurzenia w materiale.

Abstract

This paper regards the problem of creating overlap joints made of aluminum alloys using the technology of friction stir welding, FSW. The structure of a joint was analyzed in the advancing zone, the heat affected zone and the retreating zone. It was shown that the joint is nonuniform and asymmetric. The nonuniformity and asymmetry of the joint are characterized by a distinct border between material that was recrystallized and thermomechanically deformed. Shear tests demonstrated the existence of the area in the retreating zone where bonding between joined elements occurs. This reduces the joint strength. In the advancing zone, the shape of the boundary line between joined materials is the factor determining the character of material failure. The work analyzes the impact of downward force and tool position on the quality of welds. It was shown that for the welding process the best results can be achieved by controlling downward force and maintaining appropriate tilt angle and depth of tool penetration.

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarcowe przemieszaniem, aluminium, złącza zakładkowe, strefa natarcia, strefa spływu

Keywords: friction stir welding, aluminium, overlap joints, advancing zone, retreating zone

1. WPROWADZENIE

Metoda zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) wraz z jej coraz liczniejszymi odmianami jest najdynamiczniej rozwijającą się technologią spajania termicznego w stanie stałym. Wynika to z licznych jej zalet nie tylko w stosunku do nitowania i klejenia lecz również do spawania, lutowania, a także innych metod zgrzewania.

1. INTRODUCTION

The Friction Stir Welding method – together with its more and more numerous variants – is a thermal solid-state joining technology that has witnessed dynamic development. This is due to the numerous advantages offered by this method, not only compared to riveting and gluing, but also to welding, soldering and other bonding methods.

Zgrzewanie tarciove FSW przebiega w stanie stałym przy stosunkowo niewielkim wprowadzeniu ciepła do łączonych metali w obecności (co jest niekonwencjonalną cechą procesu) nie siły mechanicznej powodującej wzajemny docisk elementów, lecz siły wywieranej na łączone elementy przez wirujące w środowisku metalicznym narzędzie wprowadzone do strefy tworzonego złącza. Ten sposób kształtowania i łączenia metali powoduje uzyskanie wysokowytrzymałych połączeń wchodzących w skład wytwarzanych wyrobów. Podstawowe zalety tego typu złączy to m.in.:

- brak skurczu krzepnięcia metali,
- nieprzeegrzewanie stref wpływu ciepła, a zatem ich nieosłabianie efektami zmiękczenia,
- brak charakterystycznych dla mogących powstać w wyniku spawania pęknięć krystalizacyjnych tzw. pęknięć gorących,
- niewystępowanie w złączu segregacji pierwiastków stopowych i faz międzymetalicznych,
- brak porów, wtrąceń tlenkowych i innych karbów metalurgicznych, przy prawidłowym przygotowaniu materiałów podstawowych,
- estetyczny wygląd lica zgrzein i często brak konieczności dalszej ich obróbki,
- bardzo wysokie statyczne i dynamiczne właściwości wytrzymałościowe, wyższe od osiągniętych metodami spawania łukowego,
- elementy nie wymagają nawiercania oraz dodatkowych łączników, jak podczas nitowania,
- wyższa odporność złącza na kruche pękanie niż rodzime materiały łączone, zarówno w zgrzeinie jak i w SWC (strefie wpływu ciepła) oraz SOPL (strefie odkształcenia plastycznego),
- bardzo wysoki współczynnik pewności technologicznej tzn. bardzo mały rozrzut właściwości mechanicznych.

Ponadto metoda FSW jest ekologiczna, niewytwarzająca promieniowania ultrafioletowego, gazów i pyłów spawalniczych. Jest również energooszczędna, gdyż ciepło powstaje jedynie w miejscu łączenia, wewnątrz łączonych metali i zwykle nie wymaga stosowania dodatkowych atmosfer ochronnych.

Friction Stir Welding proceeds in a solid state, while relatively low amounts of heat are introduced into the metals to be joined, and it does so (this is an unconventional characteristic of the process) in the presence not of a mechanical force that presses elements against each other, but of a force exerted on the elements to be joined by a tool that is rotating in the metallic environment and is introduced into the zone of a created joint. This method of shaping and joining metals allows one to acquire highly resistant joints that form parts of manufactured products. The basic advantages of this type of joint include:

- *no contraction due to metal solidification,*
- *heat-affected zones do not get overheated, and therefore they are not weakened by softening effects,*
- *no solidification cracking, also known as hot cracking, that is characteristic to a welding processes,*
- *no segregation of alloy elements and intermetallic phases in a joint,*
- *no blowholes, oxide inclusions and other metallurgical notches for component materials that are properly prepared,*
- *aesthetic appearance of welds and, frequently, no need for further machining,*
- *high static and dynamic strength characteristics, higher than those obtained by arc welding methods,*
- *elements to be joined do not require boreholes or additional connecting pieces, as in the case of riveting,*
- *higher resistance to brittle fractures compared to parent material, in the weld as well as in the HAZ (heat affected zone) and TMAZ (thermomechanically affected zone),*
- *very high coefficient of technological reliability, i.e. mechanical properties of joints are within a low scatter range.*

Furthermore, the FSW method is ecological, as it does not generate UV radiation, welding gases or particulates. It is also cost-efficient, as heat is generated exclusively in the joint, within the joined metals, and no additional shielding gases are required.

Proces FSW i jego odmiany występujące jako procesy zmechanizowane i zautomatyzowane znajdują swoje zastosowanie również w aplikacjach zrobotyzowanych umożliwiając wykonywanie elementów w przestrzeni 3D [7], zarówno do ich łączenia jak i modyfikowania warstwy wierzchniej [5, 6].

Ciągły rozwój metody prowadzi do powiększania puli wzajemnie zgrzewalnych stopów, nie tylko wytwarzanych różnymi metodami (np. odlewanych lub przerabianych plastycznie) lecz również o zdecydowanie odmiennych składach chemicznych czy też właściwościach mechanicznych. Zgrzewane mogą być niektóre stopy, powszechnie uznawane za niespawalne.

2. ANALIZA MIKROSTRUKTURY ZŁĄCZA W STREFIE NATARCIA

Przebieg zjawisk fizycznych związany z przepływem metalu podczas zgrzewania tarcowego z przemieszaniem zależny jest od termicznego oddziaływania części oporowej i mieszającej narzędzia roboczego, wpływając bezpośrednio na kształt, uplastycznienie i cechy geometryczne złącza. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę złącza zgrzewanego od strony natarcia narzędzia oraz charakterystyczne jego elementy. Przepływ metalu i parametry procesu decydują o jakości połączenia – w tym o przejściu z obszaru łączonych oddzielnych elementów do strefy spojenia. Podczas zgrzewania złączy zakładkowych w obszarze natarcia powstaje niesymetryczne przejście między wymienionymi wyżej strefami. Objawia się ono zakrzywieniem linii styku między strefą wpływu ciepła a zgrzeiną w kształcie charakterystycznego haka (rys. 1).

To niekorzystne geometrycznie spojenie wynika z wzajemnego udziału formowania zgrzeiny przez tarcie powierzchnią oporową oraz mieszania materiału przez trzpień, który przesuwa uplastyczniony metal od strony spływu do obszaru natarcia. Trzpień mieszający jednocześnie przesuwa metal pionowo od dołu do góry po stronie natarcia. Efektem tego jest uniesienie pierwotnej linii styku ku górze.

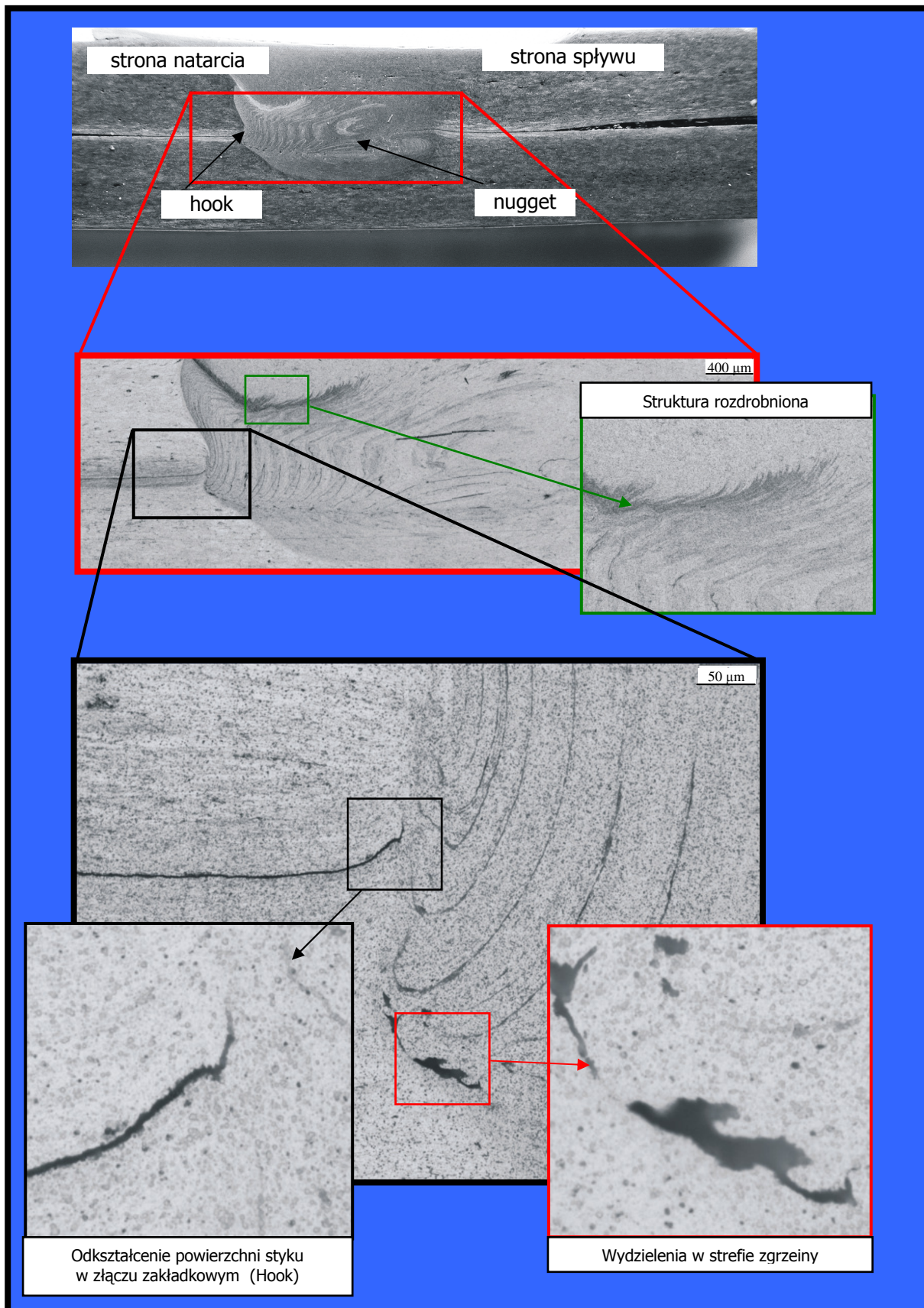
The FSW process and its variants, in the form of mechanised or automated processes, are also used in robotized applications, allowing elements to be manufactured in 3D space [7], where they are used both to join sub-components and to modify their surface layer [5, 6].

Constant development of the method generates a continuously extended set of mutually-weldable alloys, not only produced by various methods (e.g. cast or cold worked), but also characterized by highly diverging chemical compositions or mechanical properties. The method can be used to weld certain alloys that are commonly considered to be unweldable.

2. ANALYSIS OF JOINT MICROSTRUCTURE IN THE ADVANCING ZONE

The course of physical phenomena related to metal flow during friction stir welding depends on the thermal interaction of the shoulder part and the stirring part of the working tool, which directly influences the shape, plasticization and geometrical characteristics of a joint. Figure 1 presents the structure of a welded joint on the side of the advancing tool and its characteristic elements. The flow of metal and the process parameters are decisive for joint quality, including the transition from the area of separate elements to be joined to the joint zone. During the process of welding overlap joints, an asymmetric transition between the above-mentioned zones appears in the advancing zone. This involves curving of the contact line between the heat-affected zone and the weld in the shape of a characteristic hook (Fig. 1).

This geometrically disadvantageous joint results from the share taken in weld formation by friction of the shoulder surface and mixing of the material by the probe that moves through plasticized metal from the retreating side to the advancing side. Simultaneously, the stirring probe shifts metal vertically, from below upwards, on the advancing side. As a result, the original contact line is lifted upwards.



Rys. 1. Struktura złącza zakładkowego od strony natarcia zgrzewanego tarciowo z przemieszaniem (mikroskop odwrócony Olympus GX51, pow. 50x, 200x, 500x)

Fig. 1. Structure of an FSW overlap joint on the advancing side (Olympus GX51 inverted microscope, magnification: 50x, 200x, 500x)

Stopień tego odkształcenia jest ściśle związany z generowanym ciepłem i poziomem naprężeń w złączy [1].

Wytrzymałość zmęczeniowa złącza zależy od obecności i liczby punktów inicjacji pęknięć. Wyniki przeprowadzonych badań pokazują ścisły związek między tzw. linią hakową a osłabieniem w strefie wtopienia po stronie natarcia. W przypadku kiedy linia ta jest miejscem między łączonymi blachami, w którym istnieje przestrzeń niemetaliczna lub połączenie ma charakter przyklejenia, wtedy ścięcie próbki następuje w jej obszarze. Inicjacja i propagacja pęknięcia następuje na linii styku materiałów łączonych i zgrzeiny, a jej przebieg jest zgodny z kształtem zakończenia tej linii.

Ponieważ wzrost prędkości obrotowej trzpienia zwiększa stopień zmiękczenia metalu, powstawanie pęknięć możliwe jest przy mniejszych obciążeniach. Wzrost obrotów narzędzia może mieć wpływ na stopień wymieszania i wywoływać większe zakrzywienie płaszczyzny styku po stronie natarcia i w efekcie może prowadzić do zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej złącza.

3. WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZA W STREFIE SPŁYWU

Analizując strefę spływu obserwuje się sytuację podobną do opisywanej w przypadku strefy natarcia tylko w części dochodzącej do strefy wpływu ciepła (rys. 2). Kiedy przepływ metalu w strefie spływu wywołany oddziaływaniem opory i trzpienia osiąga wysokie wartości, powierzchnia styku łączonych blach zostaje unoszona a następnie rozciągana.

W obszarze spływu, w którym kierunek ruchu obrotowego narzędzia jest przeciwny do kierunku zgrzewania, przepływ metalu skutkuje: wzrostem gęstości dyslokacji, utratą spójności między ziarnami, koherencji metalicznej, co może wywoływać istotne zmiany wytrzymałości w tym obszarze.

Obciążenie strony spływu pokazuje, że inicjacja pęknięcia ma miejsce w tym obszarze, jednak droga propagacji pęknięcia nie jest symetryczna do jego przebiegu po stronie natarcia.

The degree of this deformation is strictly related to the generated heat and the stress level inside the joint [1].

The fatigue strength of the joint depends on the presence and number of crack-initiating points. The results of performed examinations show a direct connection between the so-called hook line and the weakening in the fusion zone on the advancing side. In the case when the line is placed between the joined sheets, where there is a non-metallic space, or the joint is characterized by incomplete fusion, the sample is sheared in the area of the line. Crack initiation and propagation proceed along the contact line of the materials to be joined, and the weld and its development coincides with the shape of the end of this line.

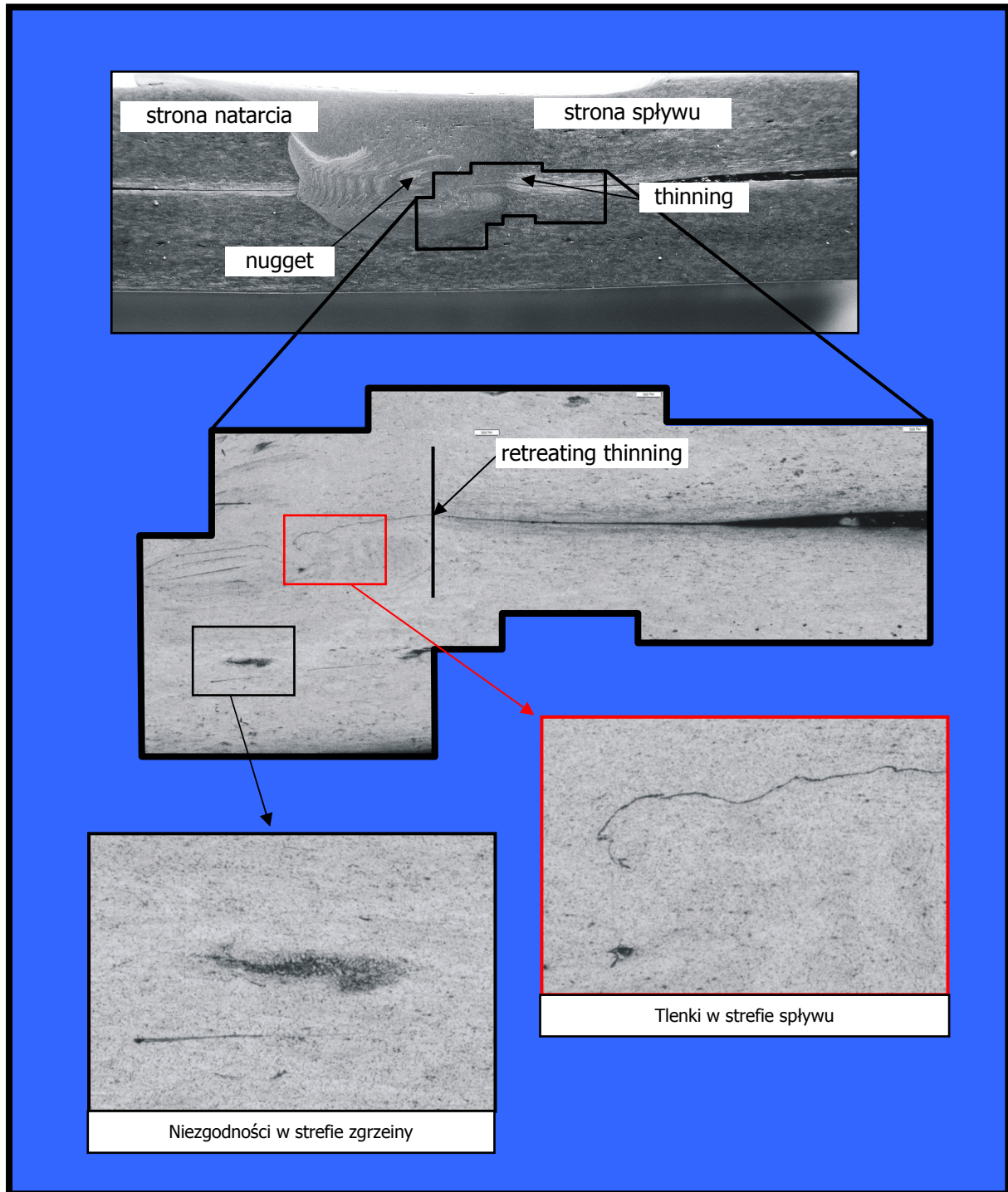
As an increase of the speed of rotation of the probe increases the degree of metal softening, it is possible for cracks to appear at lower loading. An increase in the rotation speed of the tool may have an impact on the degree of mixing, and this may result in a more curved contact plane on the advancing side, and consequently it may lead to decrease in fatigue strength of a joint.

3. PROPERTIES OF A JOINT IN THE RETREATING ZONE

When analysing the retreating zone, one observes a situation similar to the one described above (for the advancing zone) only in the part adjacent to the heat-affected zone (Fig. 2). When the metal flow in the retreating zone caused by the interaction of the shoulder and the probe reaches high values, the contact surface of the metal sheets to be joined is lifted up and then stretched.

In the retreating zone, where the movement direction of the rotary tool is opposite to the welding direction, the metal flow results in: increase in dislocation density, loss of material continuity between grains, metallic cohesion, which may cause substantial changes of strength in this area.

Loading of the retreating zone shows that crack initiation occurs in this area. However, the crack propagation line is asymmetrical to the course of the line at the advancing side.



Rys. 2 . Złącze zakładkowe zgrzewane metodą FSW. Mikrostruktura złącza od strony spływu (mikroskop odwrócony Olympus GX51, pow. 50x, 200x, 500x)

Fig. 2 . An overlap joint welded by the FSW method. The microstructure of the joint on the retreating side (Olympus GX51 inverted microscope, magnification: 50x, 200x, 500x)

Rozprzestrzenianie pęknięcia ma charakter losowy w odniesieniu do całkowitej wytrzymałości złącza.

Przeprowadzone próby wytrzymałościowe wykazały istnienie obszarów krytycznych w szczególności w tzw. strefie wpływu ciepła (SWC) zgrzeiny. Zniszczenie złączy następo-

Crack propagation is of random character with reference to the total strength of the joint.

Performed strength tests showed that critical areas exist, especially in the so-called heat-affected zone (HAZ) of a weld. Joints were destroyed, both in their bottom parts and in their

wało zarówno w częściach dolnych jak i górnych złączy (od strony narzędzia lub stronie przeciwnej).

Bardziej wrażliwą na pęknięcie jest strefa natarcia, gdyż tam występuje miejsce, w którym istnieje duże prawdopodobieństwo powstania niekorzystnego mieszania materiałów tworzących złącze zgrzewane.

4. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI ZŁĄCZY ZAKŁADKOWYCH ZGRZEWANYCH METODĄ FSW

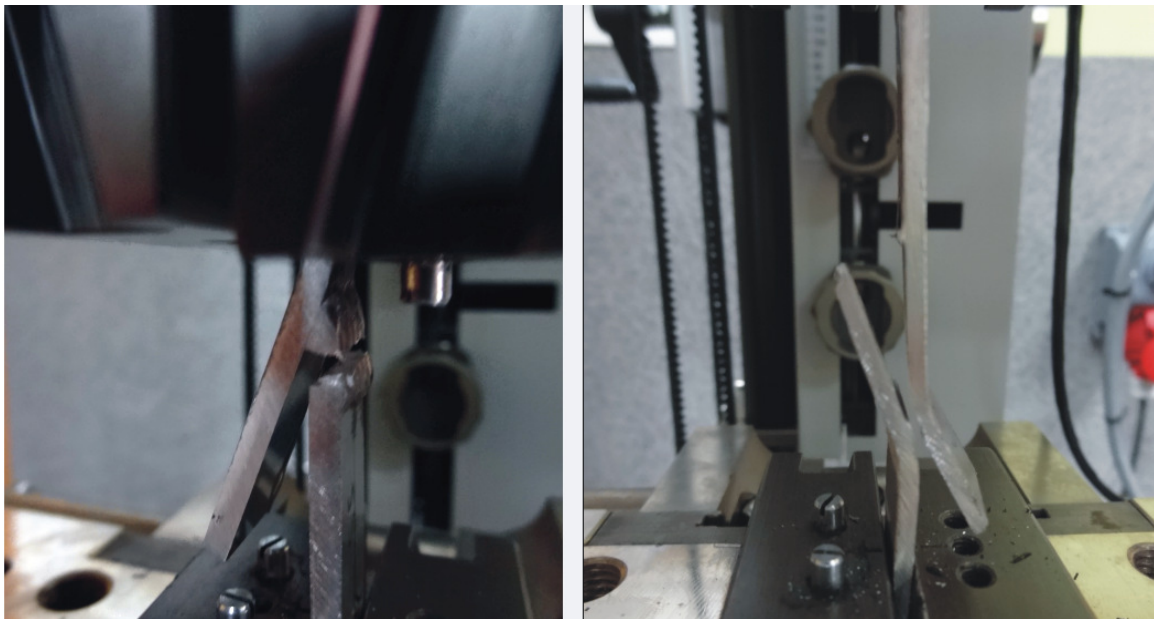
Próby wytrzymałościowe przeprowadzono zgodnie z zaleceniami zamieszczonymi w dokumencie [4] celem ustalenia odporności na ścinanie i wyznaczenia twardości zakładkowego złącza zgrzewanego FSW. Próby ścinania złączy zgrzewanych (rys. 3) ujawniły występowanie w strefie spływu obszaru, w którym wystąpiły przyklejenia między łączonymi częściami.

top parts (on the tool side or on the opposite side).

The advancing zone is more sensitive to cracking, because this is where it is highly probable for materials establishing the welded joint to be mixed in a disadvantageous manner.

4. STRENGTH TESTS OF OVERLAP JOINTS WELDED BY THE FSW METHOD

Strength tests were carried out in compliance with the recommendations provided in document [4], in order to determine the resistance to shear and the hardness of an FSW overlap joint. Shearing tests of welded joints (Fig. 3) showed that an area existed in the retreating zone where the elements to be joined were incompletely fused.

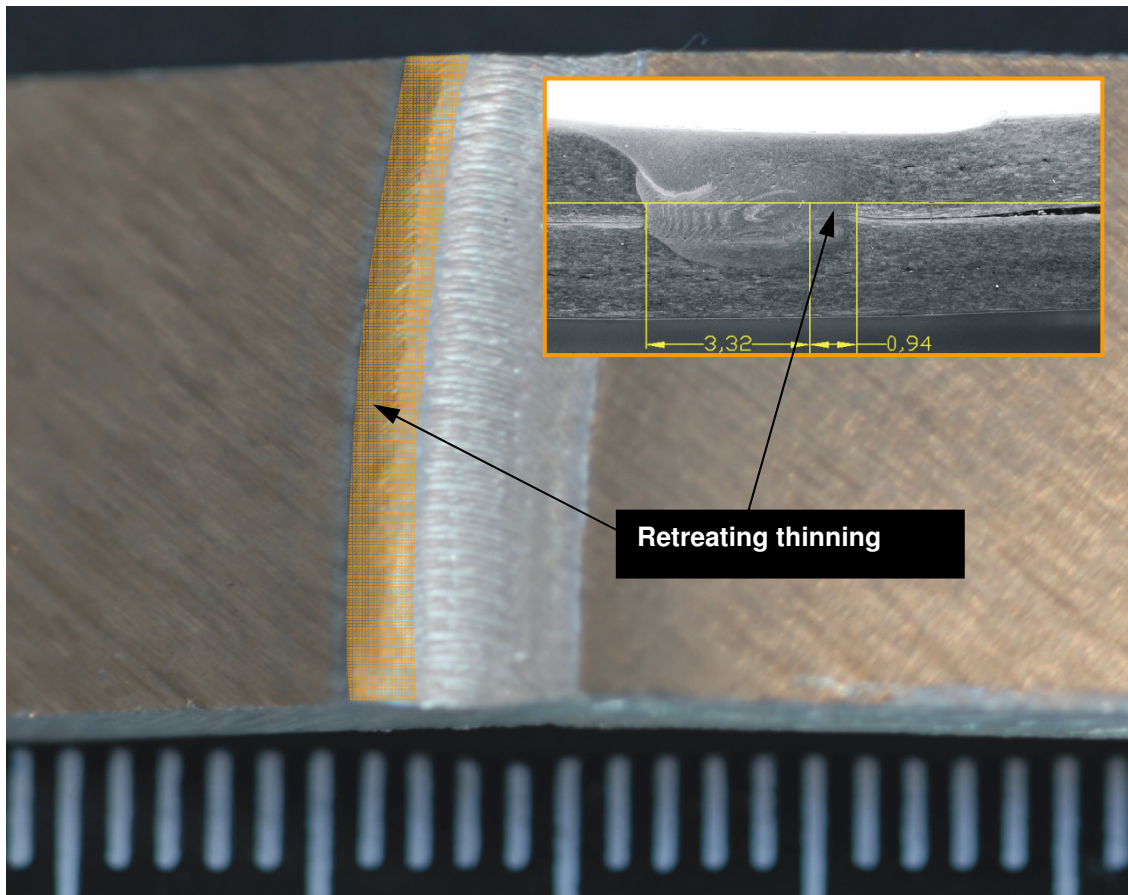


a)

b)

Rys. 3. Charakter zniszczenia w ścinanych złączach zakładkowych: a) spawanych łukowo metodą CMT i b) zgrzewanych tarcowo metodą FSW

Fig. 3. The character of the damage in sheared overlap joints: a) arc welded by the CMT method, and b) friction welded by the FSW method



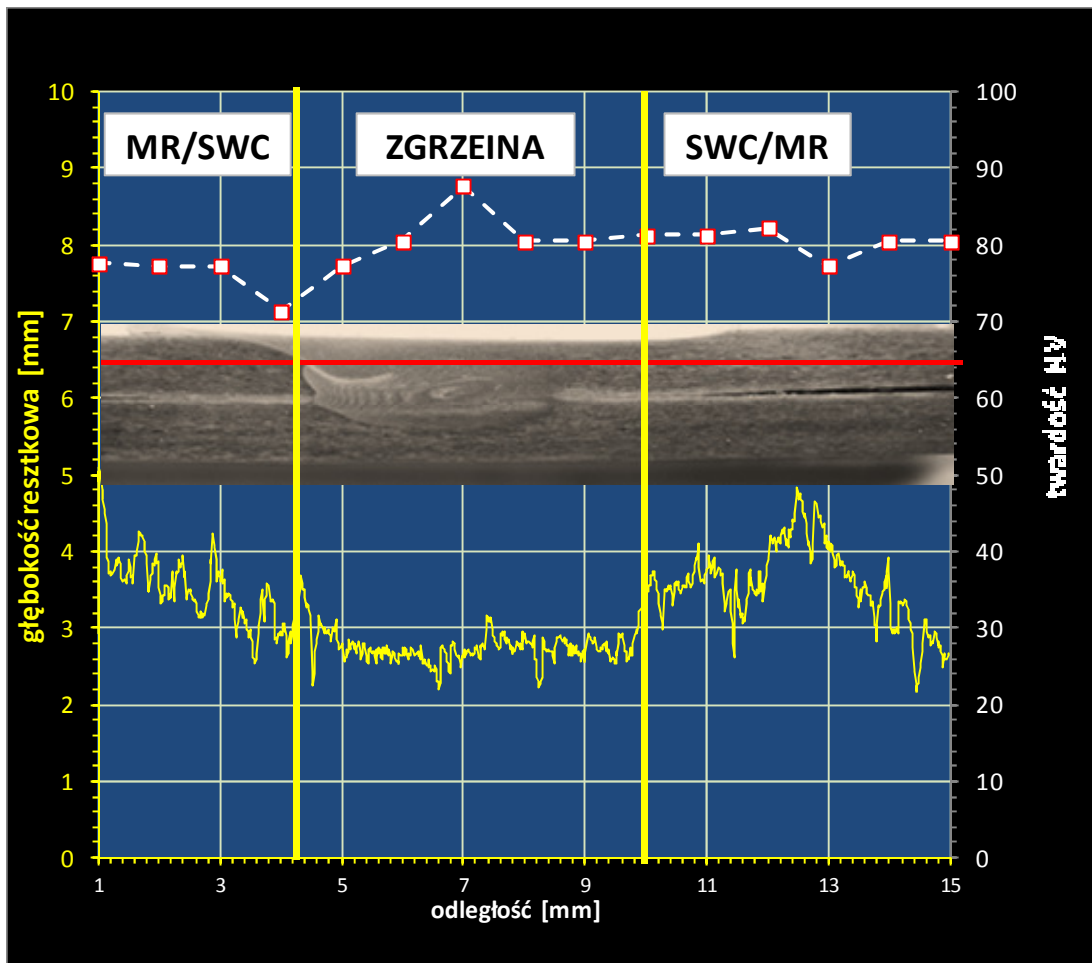
Rys. 4. Zmniejszenie czynnego obszaru przenoszącego obciążenie zewnętrzne w obrębie retreating thinning
 Fig. 4. Reduction of the active external load-bearing area within the retreating thinning

Obszar ten stanowił do 25% powierzchni nośnej złącza, zmniejszając jego wytrzymałość. Prawdopodobną przyczyną tego stanu może być nadmierny przepływ metalu, który unosi i rozciąga linię styku powodując rozrywanie pierwotnie utworzonych styków (zrywanie mostków po szczeniu metalicznym) przy zmniejszonej gęstości stopu w tym obszarze „retreating thinning” (rys. 4). Od strony natarcia inicjacja pęknięcia następuje od końca linii hakowej, a propagacja linii zniszczenia pokrywa się z jego kierunkiem.

Podobnie jak w przypadku złączy doczołowych [8] zmiany twardości mają złożony charakter. Obszar zgrzeiny charakteryzuje się największą twardością, która przewyższa o około 5-10% twardość materiału rodzimego. W strefie wpływu ciepła następuje niewielkie obniżenie twardości, szczególnie w strefie natarcia, w stosunku do twardości MR. Uzyskane wyniki potwierdzają również przeprowadzone badania z zastosowaniem Scratch testu (rys. 5).

This area covered up to 25% of the bearing surface of the joint, which reduced its strength. This state may be caused by excessive metal flow that lifts up and stretches the contact line, which leads to disrupting the originally established points of contact (breaking of the bridges after metallic bonding), while the alloy density in this area of “retreating thinning” is reduced (Fig. 4). On the advancing side the cracking is initiated at the end of the line of the so-called hook, while the destruction line propagation coincides with its direction.

As in the case of butt joints [8] the changes of hardness are of a complex character. The weld area is characterized by the highest hardness, which surpasses the hardness of the parent material by about 5-10%. In the heat-affected zone, especially in the advancing zone, hardness is slightly reduced compared to the hardness of the parent material. The acquired results are also confirmed by the performed scratch tests (Fig. 5).



Rys. 5. Rozkład twardości i resztkowej głębokości w złączy zakładkowym zgrzewanym metodą FSW (Scratch test - typ wgłębnika Rockwell stożek diamentowy o promieniu 200 μm)

Fig. 5. Distribution of hardness and residual depth values in an overlap joint welded by the FSW method (Scratch test – Rockwell pyramid diamond indenter with a radius of 200 μm)

Stosując długość trzpienia mieszającego niewiele większą niż grubość blachy, od strony opory narzędzia uzyskuje się wysoką wytrzymałość na ścinanie złączy zakładkowego przy jednocześnie ograniczonej prędkości procesu. Przy zastosowaniu podobnych warunków procesu i jednoczesnym wydłużeniu trzpienia mieszającego nie obserwuje się zwiększenia wytrzymałości mimo zachowania właściwego wymieszania złącza.

O ile uzyskanie złączy zgrzewanych technologią FSW o wysokiej jakości nie stanowi problemu, to jednak zastosowanie tradycyjnych urządzeń i narzędzi może powodować pewne komplikacje. Ujawnia się to szczególnie w fazie początkowej i końcowej procesu zgrzewania, skutkując koniecznością stosowania płyt dobiegowych i wybiegowych.

When the length of the implemented stirring probe is slightly larger than the thickness of the metal sheet, high strength is acquired on the wall of the overlapping joint on the side of the tool shoulder, while the rate of the process is limited. When the process proceeds in similar conditions, while the stirring probe is longer, one does not observe strength increase, in spite of the fact that proper mixing of the joint is maintained.

Although it is not a problem to produce high-quality joints welded in the FSW technology, implementation of traditional devices and tools may still lead to certain setbacks. This becomes particularly manifest in the initial and final phases of the welding process, and results in the need to implement run-on and run-off plates.

Aby uniknąć karbu geometrycznego, który związany jest z powstającym kraterem na końcu złącza po wyjściu narzędzia z materiału należy stosować narzędzie z ruchomym trzpieniem (bobbin tool) [2, 3].

5. WPŁYW RODZAJU STEROWANIA NARZĘDZIEM NA JAKOŚĆ ZGRZEIN

Badania jakości złączy doczołowych wykonano stosując sterowanie głównym ruchem narzędzia i siłą docisku oraz w drugim wariantcie – kontrolując jedynie położenie narzędzia. Zauważono, że zmiana składu chemicznego materiału z czystego aluminium na stopy z większą ilością składników stopowych wymaga zastosowania większych sił docisku narzędzia do materiału dla tych samych grubości. Zmiana szybkości zgrzewania z 2 m/min do 7 m/min podczas zgrzewania aluminium serii 6000 wymaga zwiększenia siły docisku nawet 10 razy.

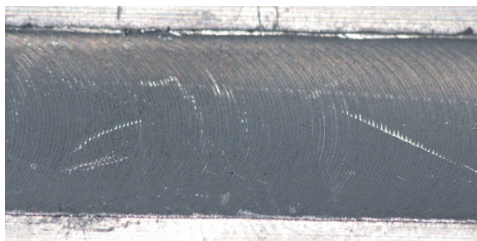
Porównując wygląd złączy wykonanych z kontrolą siły docisku obserwuje się wzrost jakości powierzchni przez uzyskanie gładkiego lica zgrzeiny (rys. 6a). W przypadku złącza wykonanego bez kontroli siły docisku powierzchnia jest nieregularna o niższej jakości (rys. 6b). Obniżenie jakości wywołane jest niewłaściwym kontaktem powierzchni czołowej narzędzia z powierzchnią materiałów i występującymi drganiami.

To avoid the geometric notch that is related to the crater created at the end of a joint once the tool leaves the material, one should implement a bobbin tool [2, 3].

5. INFLUENCE OF THE TYPE OF TOOL CONTROL ON THE QUALITY OF WELDS

Quality tests of butt joints were performed using one variant where the main tool motion and downward force were controlled and the other variant where only the position of the tool was controlled. It was found out that a change of the chemical composition of the parent material from pure aluminium to alloys with higher alloying elements content required the application of higher forces pressing the tool to material of the same thickness. The change of the welding rate from 2 m/min to 7 m/min during the process of welding aluminium of series 6000 requires the pressing force to be increased by up to 10 times.

When comparing the appearance of joints made with controlled pressing force, an increase in the quality of the surface, i.e. obtaining smooth weld face, can be observed (Fig. 6a). In the case of a joint made without controlled pressing force, the surface is irregular and its quality is lower (Fig. 6b). The quality deterioration is caused by inadequate contact between the face surface of the tool and the surface of processed materials, as well as by generated vibrations.



a)



b)

Rys. 6. Widok lica zgrzeiny wykonanego z użyciem: a) kontroli siły docisku, b) kontroli położenia narzędzia

Fig. 6. View of weld face made with a) controlled pressing force, b) controlled tool orientation

Przeprowadzone próby wykazują, że lepsza jakość złączy przy zastosowaniu takiego ustalenia narzędzia, aby jego powierzchnia czołowa znajdowała się poniżej powierzchni materiału w zakresie od 0,15-0,4 mm. Powoduje to przyspieszenie nagrzewania metalu i zwiększenie ciśnienia wywieranego na metal w stanie półplastycznym. Dodatkowe polepszenie jakości złącza uzyskuje się przez zwiększenie kąta pochylenia narzędzia tak, aby tylna część wieńca opory była bardziej zagłębiona niż część przednia. Najlepsze efekty uzyskuje się prowadząc proces z kontrolowaną, stałą siłą docisku.

Ważnym zagadnieniem w procesie zgrzewania jest odpowiednie przygotowanie powierzchni przed zgrzewaniem, szczególnie jeżeli powierzchnia jest nadmiernie utleniona. Tlenki mogą być powodem powstawania braku ciągłości metalicznej, co przypomina pęknięcia. Warstwa utleniona powoduje utrudnienie dokładnego wymieszania metali łączonych co często uniemożliwia powstanie połączenia metalicznego. Ciepło generowane przez tarcie trzpienia o zgrzewane metale stanowi do 20% ciepła generowanego w procesie; resztę stanowi ciepło wydzielane w wyniku tarcia z powierzchnią czołową kołnierza oporowego. Dlatego dla uzyskania efektu podwyższenia temperatury i wymieszania tlenków - wymagany jest wzrost albo prędkości obrotowej narzędzia, albo siły docisku, albo obu parametrów jednocześnie.

6. WNIOSKI

- Złącze zgrzewane metodą FSW charakteryzuje się dużą niejednorodnością strukturalną i asymetrią wielkości i ukierunkowania ziaren. W strefie natarcia widoczne są liczne, silnie rozdrobnione wielokierunkowe pasma w stosunku do otaczającego je obszaru wymieszania.
- Przeprowadzone próby wykazują lepszą jakość złączy przy zastosowaniu takiego ustalenia narzędzia aby jego powierzchnia czołowa znajdowała się poniżej powierzchni materiału w zakresie od 0,15-0,4 mm.

Performed tests show that better quality of joints is acquired when the tool is set to ensure its face surface is between 0.15 and 0.4 mm below the material surface. This results in accelerated metal heating and increased pressure exerted on the metal in a semi-plastic state. Additional improvement of joint quality is achieved by increasing the tool incidence angle, so that the back part of the shoulder flange enters deeper into the metal than the front part. The best results are achieved when the process is carried out with controlled, constant pressing force.

Proper surface preparation before welding - especially if the surface is excessively oxidized - is an important issue for the welding process. Oxides may lead to metallic discontinuities that resemble cracks. An oxidized layer hinders the process of thorough mixing of the metals to be joined, which makes it difficult or impossible to produce a metallic joint. The heat generated due to friction between pin and welded metals constitutes up to 20% of the heat generated in the process. The remaining heat is the heat emitted due to friction between the welded metals and the shoulder flange. Therefore, in order to acquire the effect of higher temperature and stirring of oxides it is required to increase either the rotation speed of the tool, or the pressing force, or both parameters simultaneously.

6. CONCLUSIONS

- Joints welded by the FSW method are characterized by high structural heterogeneity and asymmetry of grain size and grain orientation. In the advancing zone one can see numerous, highly fragmented streaks that are multidirectional with respect to the surrounding mixing area.
- Performed tests show that a better quality of joints is acquired when the tool is set to ensure its face surface is between 0.15 and 0.4 mm below the material surface.

Powoduje to przyspieszenie nagrzewania metalu i zwiększenie ciśnienia wywieranego na metal w stanie półplastycznym. Dodatkowe polepszenie jakości złącza uzyskuje się przez zwiększenie kąta pochylenia narzędzia tak, aby tylna część wieńca opory była bardziej zagłębiona niż część przednia.

- Najwyższą jakość złącza uzyskuje się prowadząc proces z zastosowaniem technologii wykorzystującej kontrolę siły docisku narzędzia do powierzchni metalu.
- Celem uzyskania wysokojakościowych zgrzein należy przestrzegać zaleceń technologicznych, związanych z usunięciem warstwy tlenków z powierzchni bezpośrednio przed procesem zgrzewania oraz właściwym przedmontażem elementów.
- Badania mikrostruktury złącza wykazały istnienie wyraźnych różnic wielkości i kierunków ziaren na granicy materiału łączonego, strefy uplastycznienia (SOPL) i strefy wpływu ciepła (SWC). W wyniku niedostatecznego uplastycznienia materiału w obszarze złącza powstają nieciągłości na linii styku blach.
- Mimo, że dobór parametrów procesu i geometrii narzędzi na obecnym etapie rozwoju technologii nie stanowi problemu, to jednak nie można wyeliminować towarzyszących procesowi FSW niedogodności i związanych z tym problemów technologicznych. Konieczne zatem jest zastosowanie takich rozwiązań, które w pierwszym rzędzie usuną występującą niekorzystną asymetrię złącza.

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.

This results in accelerated metal heating and increased pressure exerted on the metal in a semi-plastic state. Additional improvement of joint quality is achieved by increasing the tool incidence angle, so that the back part of the shoulder flange enters deeper into the metal than the front part.

- *The highest quality of joints is acquired by carrying out the process when the technology is enhanced by controlled force that presses the tool against the metal surface.*
- *In order to acquire high-quality welds one should comply with technological specification related to the removal of the oxide layer from surfaces directly before the welding process, and to proper preassembly of elements.*
- *Examinations of joint microstructure identified distinct differences in size and orientation of grains at the boundaries between joined material, thermomechanically affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ). As a result of insufficient plasticization of the material in the joint area discontinuities appear along the line of contact of the metal sheets.*
- *Although the selection of process parameters and tool geometry does not pose any problems at the present stage of technology development, it is impossible to eliminate inconveniences accompanying the FSW process and the related technological problems. Therefore, it is necessary to implement such solutions that shall first of all remove the undesirable joint asymmetry.*

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] Yazdanian S., Chen Z.W.: Effect of friction stir lap welding conditions on joint strength of aluminium alloy 6060. *Materials Science and Engineering 4* (2009).
- [2] Hilgert J., Schmid H., Dos Santos J.: *Bobbin Tool Friction Stir Welding: A Moving Geometry Model*. GKSS Forschungszentrum GmbH, Geesthacht, Germany.

-
- [3] Dalder E.N.C., Pastrnak J.W., Engel J., Forrest R.S., Kokko E., Mc Ternan K., Waldron D.: D. Bobbin-Tool Friction-Stir Welding of Thick-Walled Aluminum Alloy Pressure Vessels. *Welding Journal* 8/2007.
 - [4] AWS D17.3/D17.3M:200X. Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware. American Welding Society.
 - [5] Węglowski M.: Technologia Friction Stir Processing. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 2/2011, s. 25-31.
 - [6] Węglowski M., Hamilton C.: Badanie procesu tarcowej modyfikacji warstw wierzchnich (Friction Stir Processing - FSP). *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 1/2013, s. 35-44.
 - [7] ESAB LEGIO™ A modular Friction Stir Welding System.
 - [8] Kudła K.: Raport. nt. „Badania doświadczalne i analiza jakości złączy zakładkowych zgrzewanych metodą FSW materiałów stosowanych na konstrukcje lotnicze”. *Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym. Zadanie badawcze 15: Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych* (niepublikowany).