

# Mikrostruktura i właściwości połączeń stopów aluminium wykonanych metodą zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny

## Microstructure and properties of friction stir welded aluminum alloys

### Streszczenie

Stop aluminium 7136 należy do stopów Al-Zn-Mg-Cu umacnianych wydzieleniowo. Stopy te mają dobre właściwości, tj. wysoką wytrzymałość przy wysokiej odporności korozyjnej, dzięki czemu są odpowiednim materiałem do zastosowań lotniczych. Ograniczone zastosowanie tych stopów wynika z problemów pojawiających się podczas ich łączenia. Stopy Al-Zn-Mg-Cu uznawane są za stopy niespawalne. W pracy podjęto próbę określenia jakości i właściwości złączy stopu 7136-T76 wykonanych metodą zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (z ang. *Friction Stir Welding* – FSW). Istotą zaprezentowanych badań było szczegółowe zbadanie właściwości mechanicznych oraz mikrostruktury złączy FSW. Wykazano, że zgrzewanie tarcowe z mieszaniem materiału zgrzeiny jest odpowiednią techniką łączenia stopów Al-Zn-Mg-Cu. Otrzymane złącza FSW charakteryzują się dobrą jakością oraz wysokimi właściwościami mechanicznymi. Wykonane badania złączy wytworzonych przy różnych prędkościach obrotowych narzędzia wykazały, że odpowiednią jakość złączy, zarówno pod względem mikrostruktury, jak i właściwości, można uzyskać przy stosunkowo szerokim zakresie parametrów procesu. Zastosowane w pracy prędkości obrotowe narzędzia podczas procesu zgrzewania nie miały istotnego wpływu na jakość zgrzeiny.

### Abstract

The alloy 7136 belongs to the Al-Zn-Mg-Cu age hardenable class of aluminum alloys. These alloys offer very good properties, i.e. high strength and simultaneously good corrosion resistance. Thanks to these properties Al-Zn-Mg-Cu alloys are very attractive to aerospace applications. However application of these alloys is limited due to problems associated with their welding. Al-Zn-Mg-Cu alloys are classified as non-weldable. The aim of the work is characterization of quality and properties of friction stir welded 7136-T76 extrusions. This research addresses the detailed investigation microstructure and mechanical properties of FSW welds. These studies demonstrated that friction stir welding applied to the Al-Zn-Mg-Cu alloys produces high quality, sound welds. The FSW joints are fundamentally defect-free and display high mechanical properties and good corrosion resistance. The performed investigations show relatively large range of process parameters, which allow to obtain good quality of welds, both in respect of microstructure and properties. The applied tool rotation speeds do not have influence on quality welds.

### Wstęp

W konstrukcjach lotniczych powszechnie stosowane są stopy aluminium. Ze względu na swoje właściwości

**Dr inż. Izabela Kalemba, dr hab. inż. Stanisław Dymek, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.**

są one atrakcyjnym materiałem do zastosowań, w których głównym wymaganiem jest wysoki stosunek wytrzymałości do gęstości. Dzięki temu możliwe jest projektowanie wytrzymałych lekkich konstrukcji. Wzrost wymagań konstruktorów oraz konkurencja innych materiałów (np. kompozytów) wymuszają rozwój zaawansowanych stopów Al o wyższej wytrzymałości, lepszych właściwościach korozyjnych, mniejszej gęstości itd. Do takich materiałów należy stop

aluminium 7136 wyprodukowany przez Universal Alloy Corporation. Za największą wadę stopów aluminium uznaje się niskie właściwości mechaniczne połączeń, co sprawia, że stopy aluminium, szczególnie te umacniane wydzieleniowo, do których należy stop 7136, uznawane są za trudno spawalne lub niespawalne [1, 2].

Możliwość wdrażania nowych stopów związana jest z obniżaniem kosztów produkcyjnych komponentów i ich montażu. W przypadku stopów 7xxx z powodu niemożności ich spawania przy użyciu konwencjonalnych technik, ze względu na nieodpowiednią mikrostrukturę po krzepnięciu oraz porowatość w strefie złącza, szczególnie ważny jest rozwój metod ich łączenia. Jedną z najnowszych technologii jest metoda zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (z ang. *Friction Stir Welding* – FSW). W odróżnieniu od metod tradycyjnych, metoda FSW przebiega bez udziału fazy ciekłej metalu. Proces łączenia wykonywany jest w dużo niższej temperaturze niż w metodach konwencjonalnych, nie występuje topnienie materiału, a dodatkowo proces jest przyjazny dla środowiska [3, 4].

Metoda FSW jest przedmiotem wielu badań. W Polsce prace nad tą metodą są prowadzone od kilku lat w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach [5÷7] oraz w Krakowie w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN we współpracy z Uniwersytetem Pedagogicznym [8, 9], lecz ze względu na skalę problemu ograniczone są do zaledwie kilku lub kilkunastu stopów.

Proces FSW polega na wprowadzeniu obracającego się trzpienia (specjalnie zaprojektowanej końcówki narzędzia) pomiędzy stykające się krawędzie łączonych płyt i przemieszczaniu go wzdłuż linii styku. Powstające podczas procesu ciepło zmiękcza materiał, a przemieszczające i obracające się narzędzie wymusza mieszanie materiału z łączonych płyt. Towarzyszące temu znaczne odkształcenie plastyczne powoduje zmianę mikrostruktury złącza [3, 4].

Celem podjętych badań była analiza wpływu warunków procesu FSW na mikrostrukturę i właściwości zgrzeiny stopu 7136.

## Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań były złącza płyt stopu aluminium 7136-T76 wykonane metodą zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW). Skład chemiczny stopu 7136 podano w tablicy I. Standardowa obróbka cieplna tego stopu (T76) składa się z przesykania z temperatury 471°C oraz dwustopniowego starzenia: w temp. 121°C przez 24 h i w temp. 157°C przez 9 h. Taka obróbka cieplna zapewnia wysoką wytrzymałość

przy jednoczesnej dobrej odporności na pełzanie i korozję warstwową.

Płyty ze stopu 7136 o grubości 6,35 mm zostały połączone doczołowo metodą zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny. Proces zgrzewania wykonano w Edison Welding Institute w Columbus, Ohio, USA. Zastosowane narzędzie składało się ze spiralnego wieńca opory i nagwintowanego trzpienia w kształcie stożka. Zgrzewanie wykonano przy parametrach: prędkości posuwu narzędzia 2,1 mm/s, sile nacisku docisku wieńca opory na materiał 26,7 kN i prędkości obrotowej narzędzia 175, 250 i 400 obr/min.

Otrzymane złącza poddano analizie pod względem właściwości mechanicznych (pomiar twardości i próba rozciągania) oraz mikrostrukturalnym. Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa na przekroju prostopadłym do kierunku zgrzewania. Zastosowano obciążenie wgłębnika siłą 9,81 N przez 10 s. Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiła 1 mm. Próbie rozciągania poddano próbki z materiału rodzimego (wycięte prostopadle i równoległe do kierunku wyciskania) oraz próbki po zgrzewaniu FSW. Próbki z materiału zgrzewanego wycięto w taki sposób, że oś rozciągania była prostopadła do zgrzeiny, a zgrzeina znajdowała się w środku długości pomiarowej próbki. Próbie poddano także próbki wycięte wzdłuż zgrzeiny, zawierające tylko materiał ze zgrzeiny.

Do obserwacji mikrostruktury wykorzystano mikroskopię świetlaną oraz skaningową mikroskopię elektronową (SEM). Próbki do badań metalograficznych przygotowano z przekroju poprzecznego złącza. Wycięte próbki zostały wstępnie wyszlifowane, wypolerowane elektrolitycznie oraz wytrawione. SEM zastosowano do badań fraktograficznych oraz do analizy EBSD (z ang. *Electron Back-Scattered Diffraction*) – analizy z wykorzystaniem dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych. Analiza EBSD dostarczyła informacji o charakterze granic ziaren.

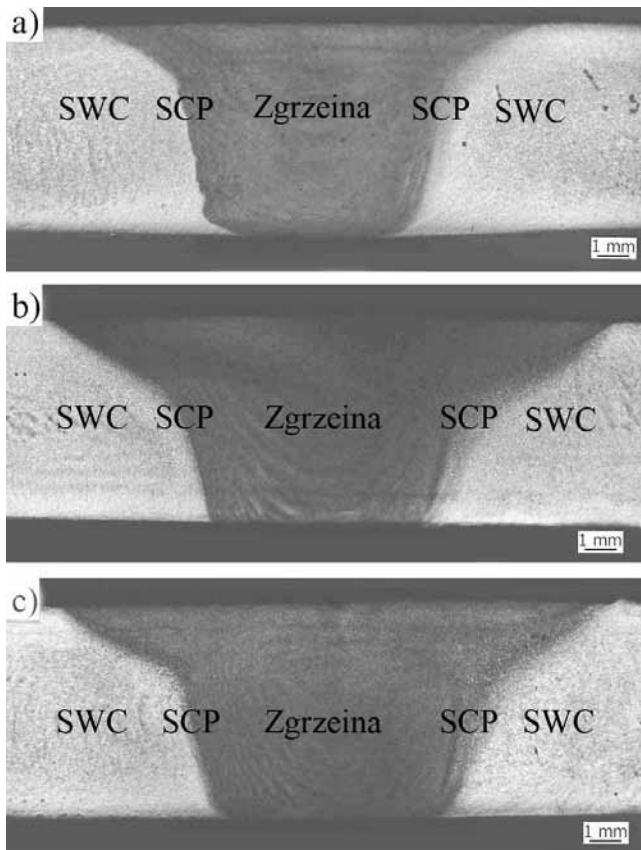
## Wyniki badań

### Jakość złączy

Jakość złączy FSW zależy od zastosowanych parametrów procesu, tj. prędkości obrotowej narzędzia, prędkości zgrzewania oraz siły docisku [5]. W pracy badaniom poddano złącza wykonane z różną prędkością obrotową; prędkość zgrzewania oraz siła docisku były stałe. Na rysunku 1 przedstawiono makrostrukturę złączy wraz z zaznaczonymi charakterystycznymi strefami występującymi we wszystkich połączeniach wykonanych metodą FSW [3÷10].

Tablica I. Skład chemiczny stopu aluminium 7136  
Table I. Chemical composition of 7136 aluminum alloy

Pierwiastek	Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Si	Ti	Mn	Cr	Ni	Al
% mas.	7,94	1,99	1,93	0,149	0,065	0,048	0,028	0,016	0,018	0,021	reszta



**Rys. 1.** Makrostruktura złączy stopu 7136 wykonanych z prędkościami obrotowymi: a) 175 obr/min, b) 250 obr/min, c) 400 obr/min, SCP – strefa cieplno-plastyczna, SWC – strefa wpływu ciepła  
**Fig. 1.** Macrostructure of 7136 aluminum alloy weld made with rotation speed: a) 175 rpm, b) 250 rpm, c) 400 rpm, SCP – thermomechanically affected zone, SWC – heat affected zone

Zastosowane prędkości obrotowe narzędzia (175, 250 i 400 obr/min) pozwoliły na uzyskanie jednolitych złączy. Złącza nie zawierały żadnych niezgodności (porów, pęknięć). Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej narzędzia zaobserwowano jedynie zmianę budowy i kształtu zgrzeiny. Dla najmniejszej badanej prędkości 175 obr/min zgrzeina jest węższa i różni się kształtem od zgrzein wykonanych przy większych prędkościach. Spowodowane jest to tym, że prędkość obrotowa bezpośrednio wpływa na ilość generowanego ciepła, a dominującą rolę pełni tu trzpień. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej narzędzia ilość ciepła wytwarzanego przez wieniec opory wzrasta. Na makrofotografiach złączy wykonanych z prędkościami 250 i 400 obr/min zaobserwowano poszerzenie zgrzeiny przy powierzchni, czego nie można zauważyć dla prędkości 175 obr/min.

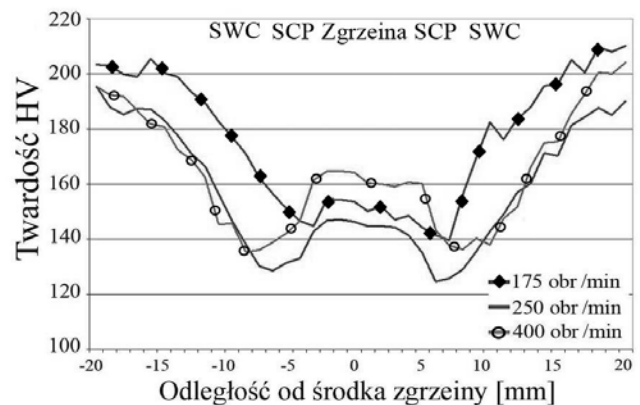
Charakterystyczną cechą złączy jest *struktura pierścieni cebuli*, najczęściej obecna w jądrze zgrzein. W zgrzeinach stopów 7136 nie zaobserwowano wyraźnego, charakterystycznego jądra, widocznego w innych stopach aluminium zgrzewanych metodą FSW [5÷10]. Mimo braku wyraźnego jądra w dolnej części zgrzeiny można zauważyć delikatne ślady charakterystycznej struktury złączy FSW, tzn. obecność pierścieni cebuli. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej

narzędzia, taka struktura w zgrzeinie staje się wyraźniejsza. Powstawanie struktury pierścieni cebuli związane jest ze złożonym płynięciem materiału podczas procesu. Istotny wpływ na obecność wspomnianej struktury ma generowane ciepło podczas procesu, którego ilość zależy od parametrów procesu [11]. Jako wskaźnik ilości generowanego ciepła przyjmuje się stosunek prędkości obrotowej do prędkości zgrzewania [12]. W przypadku analizowanych złączy wykonanych przy różnych prędkościach obrotowych (prędkość zgrzewania była stała), stosunek prędkości obrotowej do prędkości zgrzewania był większy dla złączy zgrzewanych z większą prędkością obrotową. Zatem więcej ciepła wytworzyło się w złączu wykonanym z większą prędkością obrotową. Więcej wprowadzonego ciepła może spowodować burzliwy przepływ materiału wokół trzpienia narzędzia z powodu nadmiaru uplastycznionego materiału pod wieniec opory, powodując powstanie niejednorodnej mikrostruktury zgrzeiny, np. w postaci pierścieni cebuli.

## Właściwości mechaniczne złączy

Na rysunku 2 zaprezentowano profile twardości złączy wykonanych z prędkościami: 175, 250 oraz 400 obr/min.

Każda krzywa umożliwia wyróżnienie środkowego obszaru, który odpowiada szerokości zgrzeiny. Przesuwając się na zewnątrz od środka, krzywa opada przez strefę cieplno-plastyczną, osiągając minimum (ok. 120÷140 HV) w strefie wpływu ciepła i następnie stopniowo powraca do poziomu twardości materiału rodzimego (ok. 200 HV). Najmniejszy spadek twardości w SWC obserwowany jest w złączu wykonanym z najmniejszą prędkością, tj. 175 obr/min. Wszystkie krzywe twardości mają charakterystyczny dla złączy FSW kształt litery W, obserwowany w większości stopów aluminium obrabianych cieplnie [4, 9, 10].



**Rys. 2.** Profile twardości dla złączy FSW stopu 7136 wykonanych z różnymi prędkościami obrotowymi

**Fig. 2.** Distribution of hardness in the 7136 alloy FSW joints made with different rotational speeds

**Tablica II.** Wyniki próby rozciągania  
**Table II.** The results of tensile strength test

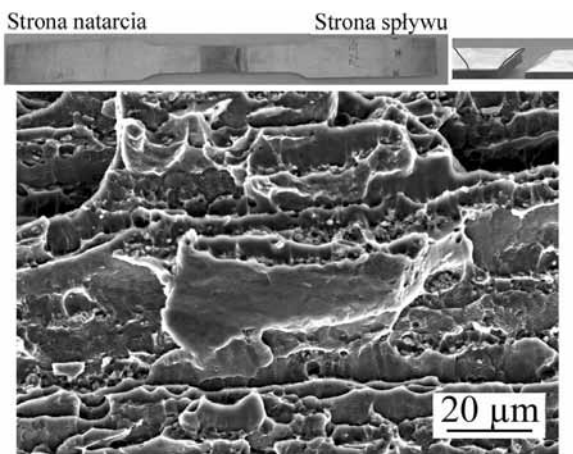
Próbka	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$	Granica plastyczności $R_{02}$	Wydłużenie $A$	Wydajność	
	MPa	MPa	%	%	
Materiał rodzimy (L*)	641	614	10,5	-	
Materiał rodzimy (LT**)	635	607	10,9	-	
Ze zgrzeina	175 obr/min***	443	354	5,5	69,1
	250 obr/min***	448	340	4,1	69,9
	400 obr/min***	454	352	5,4	70,8
Zgrzeina	490	383	14,2	-	

\*L – próbka wycięta równolegle do kierunku wyciskania  
\*\*LT – próbka wycięta prostopadle do kierunku wyciskania  
\*\*\* – prędkość obrotowa narzędzia, przy której wykonano zgrzeinę

Na podstawie przedstawionych profili twardości można zauważyć, że wzrost prędkości obrotowej powoduje przesunięcie minimów krzywej w kierunku od środka zgrzeiny. Im większa prędkość obrotowa, tym obszar SWC o najmniejszej twardości jest bardziej oddalony od osi zgrzeiny.

W tablicy II zestawiono wyniki próby rozciągania próbek z materiału rodzimego, próbek ze zgrzeiną dla różnych prędkości obrotowych narzędzia oraz próbek wyciętych wzdłuż zgrzeiny. Próbki ze stopu 7136 wycięte zarówno zgodnie z kierunkiem wyciskania, jak i w poprzek wykazują wytrzymałość na rozciąganie ponad 635 MPa, a granicę plastyczności powyżej 607 MPa.

Próbki z materiału zgrzanego mają w stosunku do próbek z materiału rodzimego mniejszą wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  oraz mniejszą granicę plastyczności  $R_{02}$ , odpowiednio o ok. 30% i 40%. Z porównania wydłużenia wynika, że wydłużenie próbki ze zgrzeiną jest o połowę mniejsze niż materiału rodzimego. Wydłużenie próbek średnio wynosi 5%. Biorąc pod uwagę wydłużenie



**Rys. 3.** Miejsce pęknięcia próbki wytrzymałościowej wraz z charakterem przełomu

**Fig. 3.** Place of the tensile strength sample crack and the fracture character

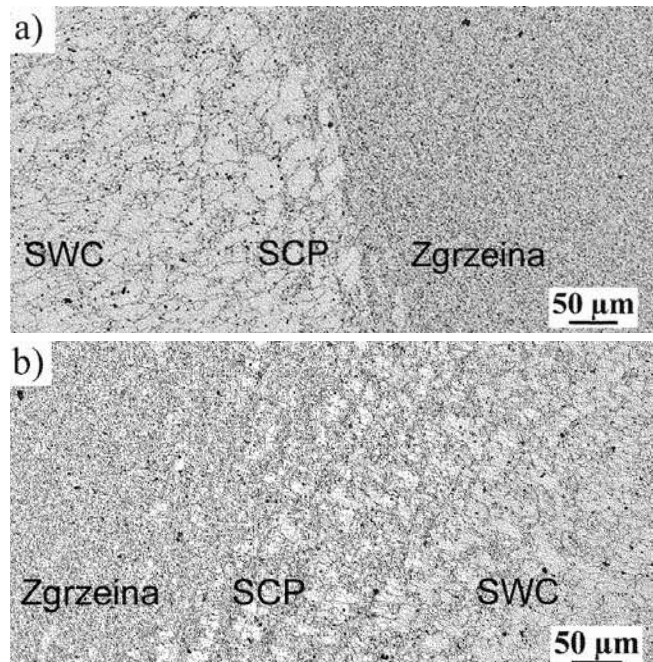
samej zgrzeiny zauważono, że osiąga ono wartość wyższą niż wydłużenie materiału rodzimego. Zgrzeina jest bardzo plastyczna ( $A \approx 14\%$ ), a dodatkowo wykazuje stosunkowo wysokie właściwości wytrzymałościowe.

Badane złącza wykonane były z różną prędkością obrotową narzędzia. Jednak nie zaobserwowano liniowej zależności pomiędzy prędkością a właściwościami złącza (tabl. II). Wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności oraz wydłużenie próbek wyciętych w poprzek zgrzein wykonanych przy różnych prędkościach wykazywały zbliżone wartości.

Próbki wytrzymałościowe ze złączem pękały zawsze po stronie spływu, w miejscu odpowiadającym najmniejszej twardości, na granicy SCP i SWC. Oznacza to, że właściwości mechaniczne złącza nie są takie same po obu stronach zgrzeiny – po stronie spływu są gorsze niż po stronie natarcia. Pęknięcie nastąpiło przez ścięcie. Charakter przełomu próbek był ciągliwy (rys. 3).

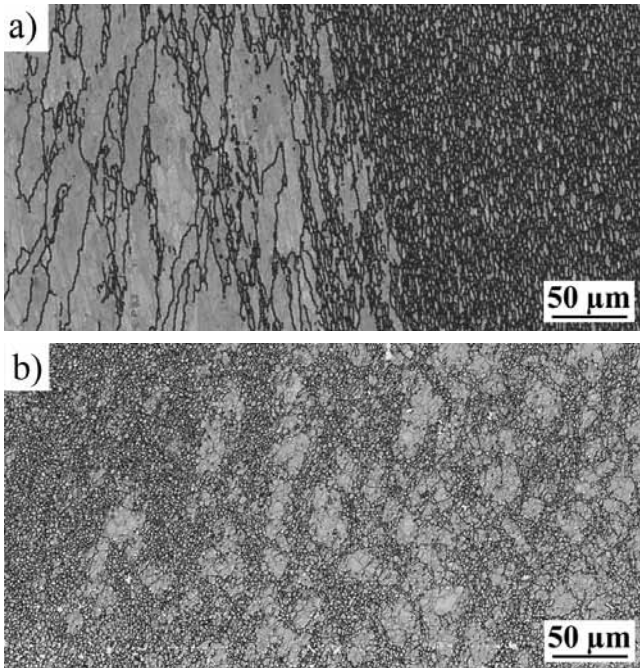
### Mikrostruktura złączy

Otrzymane wyniki właściwości mechanicznych złącza można bezpośrednio odnieść do jego mikrostruktury, a dokładnie do obecności różniących się mikrostrukturą stref złącza. Poprzeczne profile twardości są istotnym początkowym punktem do interpretacji zmian pojawiających się podczas zgrzewania (rys. 2). Na ich podstawie można wyróżnić poszczególne strefy złącza (rys. 1). Otrzymane złącza FSW charakteryzują się typową dla FSW zmianą mikrostruktury na przekroju złącza [3÷10]. Wyróżniono charakterystyczne obszary złącza, tj. zgrzeinę, strefę cieplno-plastyczną oraz strefę wpływu ciepła (rys. 4) i materiał rodzimy.



**Rys. 4.** Strefy mikrostrukturalne na przekroju poprzecznym złącza FSW: a) strona natarcia, b) strona spływu

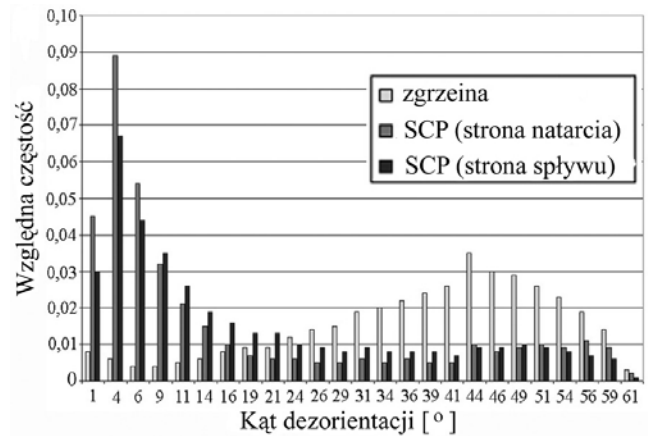
**Fig. 4.** Microstructure zones in the cross section of FSW joint: a) retreating side, b) advancing side



**Rys. 5.** Mapy rozkładu granic ziaren: linie jasne – granice małego kąta (kąt dezorientacji <math>< 15^\circ</math>); linie ciemne – granice dużego kąta (kąt dezorientacji >math>> 15^\circ</math>); a) strona natarcia, b) strona spływu  
**Fig. 5.** Maps of the distribution of grain boundaries: clear lines – the small angle boundaries (disorientation angle <math>< 15^\circ</math>), dark lines – high angle boundaries (disorientation angle >math>> 15^\circ</math>), a) retreating side, b) advancing side

Strefy różnią się wielkością i kształtem ziarna. Różnice te wynikają z różnej ciepłno-plastycznej historii poszczególnych obszarów. Zgrzeina ma względnie jednorodną mikrostrukturę, cechującą się małymi równoosiowymi ziarnami o średnicy ok. 6 µm. Taka mikrostruktura jest wynikiem znacznego odkształcenia plastycznego połączonego z fizycznym przepływem materiału wokół trzpienia (mieszaniem) i istotnego wzrostu temperatury. Strefa ciepłno-plastyczna charakteryzuje się ziarnami zdecydowanie większymi i wydłużonymi. Obszary w najbliższym sąsiedztwie zgrzeiny poddawane są znacznemu odkształceniu, jednak materiał w tej strefie nie jest mieszany. Strefę tę charakteryzuje gradient obecnego tu odkształcenia, jak również gradient temperatury. Natomiast wielkość ziarna w strefie wpływu ciepła jest podobna do wielkości ziaren materiału rodzimego. Strefa wpływu ciepła to obszar, w którym nie występuje odkształcenie plastyczne. Na mikrostrukturę ma tu wpływ tylko temperatura.

Na rysunku 4 przedstawiono różnicę w mikrostrukturze po stronie natarcia i po stronie spływu złącza. Strona natarcia charakteryzuje się wyraźną granicą, która oddziela obszar o drobnym ziarnie od obszaru o wydłużonym większym ziarnie. Natomiast po stronie spływu nie ma wyraźnej granicy. Mikrostruktura jest bardziej złożona. Występuje tu stopniowe przejście



**Rys. 6.** Histogram rozkładu granic ziaren w zgrzeinie i strefie ciepłno-plastycznej po stronie natarcia i stronie spływu  
**Fig. 6.** Histogram of grain boundaries distribution in stirred zone and thermomechanical affected zone on the retreating and advancing side

od mikrostruktury zgrzeiny do mikrostruktury strefy ciepłno-plastycznej.

Oprócz wielkości ziarna istotnie różnią się rozkłady dezorientacji granic ziaren w analizowanych obszarach. Za pomocą metody EBSD uzyskano mapy rozkładu granic ziaren w zgrzeinie i SCP po stronie natarcia i po stronie spływu (rys. 5). W zgrzeinie większość granic ziaren ma charakter dużego kąta.

Udział poszczególnych granic ziaren w poszczególnych obszarach przedstawiono w postaci histogramu (rys. 6). W strefie ciepłno-plastycznej zaobserwowano duży udział granic małego kąta (2÷20°). SCP po stronie natarcia wykazuje wysoką częstość występowania granic małego kąta (<math>< 8^\circ</math>), natomiast SCP po stronie spływu większą częstość granic średniego kąta (8÷30°). W zgrzeinie dominują granice ziaren o kącie dezorientacji 22÷60°.

Analiza mikrostruktury może stanowić uzasadnienie właściwości mechanicznych zgrzewanych tarciowo stopów. Próbkę wytrzymałościowe ze zgrzeiny wykazują także wyższą granicę plastyczności i wyższą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu z próbkami prostopadłymi do złącza. To sugeruje, że najbardziej podatna na uszkodzenia część zgrzanego materiału jest na zewnątrz zgrzeiny, po stronie spływu, gdzie wartości twardości są najniższe i gdzie następuje zerwanie próbki. Pęknięcie próbki po stronie spływu podczas próby rozciągania jest częstym zjawiskiem, które było wielokrotnie dyskutowane w pracach dotyczących połączeń FSW stopów aluminium [10, 13, 14]. Częściowe wyjaśnienie takiego zachowania może leżeć w różnym rozkładzie granic ziaren dużego i małego kąta po stronie natarcia i spływu. Po stronie spływu gęstość granic ziaren małego kąta jest wyższa. To może ułatwiać proces odkształcenia i w ten sposób przyczyniać się do spadku twardości.

## Wnioski

Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału spoiny jest odpowiednią techniką łączenia stopu 7136. Otrzymane złącza charakteryzują się brakiem nieciągłości w postaci porów lub pęknięć oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi.

Wykonane badania złączy wytworzonych przy różnych prędkościach obrotowych narzędzia (175, 250 i 400 obr/min) wykazały, że odpowiednią jakość złączy zarówno pod względem mikrostruktury, jak i właściwości można uzyskać przy stosunkowo dużym zakresie parametrów procesu. Zastosowane w pracy prędkości obrotowe narzędzia podczas procesu zgrzewania nie miały istotnego wpływu na jakość

zgrzeiny. Wszystkie użyte prędkości pozwoliły na uzyskanie jednorodnych złączy bez widocznych wad, ze zbliżonymi właściwościami mechanicznymi.

Pęknięcie próbek wytrzymałościowych ze złączem zawsze następuje po stronie spływu, w miejscu, gdzie pojawia się minimum twardości (SWC przy granicy z SCP).

Istnieje różnica w odkształceniu i przepływie materiału po stronach natarcia i spływu. Potwierdzają to obserwacje mikrostrukturalne, rozkład kąta dezorientacji granic ziaren oraz pomiary twardości.

Zgrzeina wykazuje jednorodną drobnoziarnistą mikrostrukturę, bez wyraźnego jądra.

## Literatura

- [1] Williams S.W.: Welding of Airframes using Friction Stir; Air&Space Europe, 3, 3/4, 2001, str. 64.
- [2] Liu J.: Advanced Aluminum and Hybrid Aerostructures for Future Aircraft; Materials Science Forum, 519-521, 2006, str. 1233.
- [3] Mishra R.S., Mahoney M.W.: Friction Stir Welding and Processing, ASM International, Ohio 2007.
- [4] Threadgill P.L. i in.: Friction stir welding of aluminium alloys; International Materials Reviews, 54, 2, 2009.
- [5] Pietras A., Zadroga L., Łomozik M.: Charakterystyka zgrzeiny utworzonej metodą zgrzewania z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW); Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 47, 2003, str. 34.
- [6] Miara D., Pietras A., Bogucki R.: Własności i budowa strukturalna różnego typu złączy wykonanych metodą FSW; Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 5, 2008, str. 166.
- [7] Węglowski M.S., Pietras A., Bogucki R., Węglowska A.: Własności złączy FSW ze stopów aluminium; Rudy Metale, 53, 11, 2008 nr str. 739.
- [8] Mroczka K., Pietras A., Dutkiewicz J.: Struktura i właściwości połączeń kształowników stopu 2017A spajanych metodą zgrzewania tarciovego FSW; Inżynieria Materiałowa, 3, 151, 2006, str. 213.
- [9] Mroczka K., Dutkiewicz J., Pietras A.: Microstructure of friction stir welded joints of 2017A aluminium alloy sheets; Journal of Microscopy, 237, 2010, str. 521.
- [10] Dymek S., Hamilton C., Blicharski M.: Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminium 6101-T6 extrusions; Inżynieria Materiałowa; 28, 3–4, 2007, str. 527.
- [11] Biallas G. i in.: Mechanical properties and corrosion behaviour of friction stir welded 2024-T3; 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, czerwiec 1999, TWI.
- [12] Krishnan K.N.: On the formation of onion rings in friction stir welds; Materials Science and Engineering A, 327, 2002, str. 246.
- [13] Mahoney M.W. i in.: Properties of friction stir welded 7075 T651 aluminium; Metallurgical & Materials Transactions A, 29, 1998, str. 1955.
- [14] Sato Y.S. i in.: Microtexture in the friction stir weld of an aluminium alloy; Metallurgical & Materials Transactions A, 32, 2001, str. 941.

### Podziękowania

Praca finansowana w ramach prac statutowych AGH nr 11.11.110.792. Autorzy wyrażają serdeczne podziękowania dr. Carterowi Hamiltonowi (Miami University, Oxford, Ohio, USA) za dostarczenie materiału do badań oraz dr. inż. Krzysztofowi Muszce (AGH Kraków) za pomoc w wykonaniu analizy EBSD.