

# ZGRZEWANIE PUNKTOWE BLACH ZE STOPU ALUMINIUM 7075-T6

## *Spot welding metal sheets of aluminum alloy 7075-T6*

Rafał KLUZ, Andrzej KUBIT, Dawid WYDRZYŃSKI

**S t r e s z c z e n i e:** Punktowe zgrzewanie tarciove z przemieszaniem jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym. Możliwość łączenia elementów wykonanych ze stopów aluminium pozwala na stosowanie tej metody przy produkcji struktur lotniczych, przy jednoczesnym obniżeniu pracochłonności, kosztów i ich ciężaru, zachowując porównywalne lub wyższe parametry wytrzymałościowe w porównaniu do klasycznych metod łączenia elementów. Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak doboru parametrów procesu zgrzewania, tj.: prędkości obrotowej narzędzia, zagłębienia narzędzia oraz czasu zgrzewania. W pracy zaprezentowano wyniki badań procesu zgrzewania blach aluminiowych 7075-T6 o grubości 1,8 i 0,8 mm. Testy zgrzewania przeprowadzono na dedykowanej maszynie do zgrzewania punktowego, natomiast badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę ścinania. W końcowej części artykułu dokonano analizy porównawczej nośności połączenia i budowy spoiny uzyskanej metodą RFSSW przy najkorzystniejszych parametrach ze zgrzeiną wykonaną metodą zgrzewania oporowego.

**S ł o w a k l u c z o w e:** zgrzewanie tarciove punktowe z przemieszczaniem, aluminium 7075-T6, parametry procesu

**A b s t r a c t:** Friction Stir Spot Welding is one of the most contemporary methods of joining metals and alloys in their solid state. The ability to join elements made of aluminum alloys allows for utilizing this method in the manufacturing of aircraft structures while lowering the work load, costs, and weight, without sacrificing or even having better strength parameters than classic methods of joining elements. It ensures constant joint parameters, however it requires the use of optimal welding parameters such as: the rotational speed of the tool, tool delve depth, and welding time. The work presents the results of experiments conducted on 7075-T6 aluminum sheet metal that was 1.8 and 0.8 mm thick. The welding tests were done on a dedicated spot welding machine, while the strength tests consisted of static tensile strength tests. In the final part of the article comparative analysis was made of strength of joint made by RFSSW method and obtained from the resistance welding.

**K e y w o r d s:** friction stir spot welding, aluminium 7075-T6, process parameters

## Wprowadzenie

Konstrukcje lotnicze ze względu na wyjątkową odpowiedzialność muszą spełniać najwyższe wymagania w zakresie bezpieczeństwa technicznego. Jest to zagadnienie niezmiernie złożone, ponieważ muszą łączyć w sobie najmniejszą możliwą masę, akceptowalny koszt wytworzenia, trwałość i odpowiednią wytrzymałość [4].

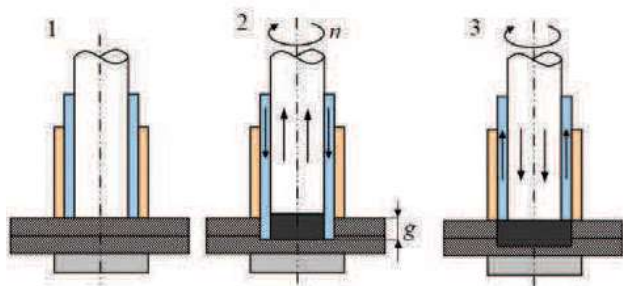
Ze względu na dużą wytrzymałość przy małej gęstości stopy aluminium należą do intensywnie badanej i szeroko stosowanej grupy materiałów. Znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie potrzebna jest duża wytrzymałość konstrukcji przy możliwie najmniejszej masie. Bardzo ważnym czynnikiem, który decyduje o zastosowaniu stopu aluminium na elementy konstrukcyjne samolotów jest możliwość wykonania połączenia o wysokiej wytrzymałości [12, 10, 3]. Stopy aluminium można łączyć za pomocą spawania, zgrzewania, lutowania i klejenia oraz połączeń mechanicznych (nitowanie, łączenie śrubami). Metody tradycyjne jak nitowanie czy klejenie zapewniają możliwość uzyskania wymaganych właściwości funkcjonalnych, jednak przy dużej pracochłonności wykonania. Powszechne zastosowanie w łączeniu cienkich blach znajduje metoda zgrzewania rezystancyjnego punktowego. Proces ten polega na wydzielaniu ciepła w wyniku ograniczonego przepływu prądu elektrycznego, wywołanego opornością

elektryczną elementów ułożonych na zakładkę [3]. Wydzielanie ciepła powoduje miejscowe stopienie materiału w miejscu styku i utworzenie jądra ciekłego metalu, które krzepnąc pod dociskiem elektrod tworzy zgrzeinę. W procesie zgrzewania rezystancyjnego punktowego ważne jest zapewnienie podparcia i osiowego docisku elementów w miejscu wykonywania połączenia z obu stron złącza. Dla uzyskania odpowiedniej jakości zgrzein konieczne jest zastosowanie odpowiednio dużej siły docisku łączonych elementów [7]. Stopy aluminium mają skłonność do pokrywania warstwą trudnoopłowego tlenku, co sprawia trudności podczas procesu zgrzewania. Ponadto dobra przewodność cieplna i elektryczna aluminium powoduje konieczność stosowania urządzeń o dużej mocy. Dodatkowym problemem w tym procesie jest zmiana objętości w czasie krzepnięcia oraz wynikające z tego odkształcenia cieplne, powodujące deformację zgrzewanych konstrukcji. Jednocześnie na powierzchni złącza z obu stron pozostają wgłębienia obniżające wytrzymałość zmęczeniową połączenia [3].

Krytycznym wymaganiem stojącym przed przemysłem lotniczym jest opracowanie taniej metody łączenia stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo, która zapewni dużą wytrzymałość połączeń przy zmniejszonej pracochłonności procesu w porównaniu do metod tradycyjnych.

W przemyśle motoryzacyjnym trudności w wykonywaniu wysokiej jakości spoin klasycznymi metodami zostały częściowo przezwyciężone w nowej technice łączenia – punktowym zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem RFSSW (RFSSW – Refill Friction Stir Spot Welding). Metoda ta polega na miejscowym (punktowym) nagrzeniu tarcim obszaru złącza przez obrotowe narzędzie. Proces zgrzewania blach metodą RFSSW składa się z trzech zasadniczych faz [5, 9] (rys. 1). 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. Następnie sworzeń i tuleja są przyspieszane do swojej nominalnej prędkości obrotowej. Jednocześnie obrót i docisk trzpienia i tulei wewnętrznej generuje ciepło tarcia, które nagrzewa i uplastycznia metal w strefie łączenia.

Faza druga obejmuje penetrację złącza przez tuleję, która zagłębiając się w materiał powoduje jego uplastycznienie. W tym samym czasie trzpień jest wycofany, zapewniając przestrzeń dla przemieszczanego materiału. W dalszej fazie następuje przeciwny ruch trzpienia i tulei, który wyciska uplastyczniony metal w kierunku złącza. W końcowej części procesu tuleja i trzpień ustawiane są w pierwotnej pozycji, po czym następuje odsunięcie narzędzia od spoiny.



Rys. 1 Etapy zgrzewania metodą RFSSW  
Fig. 1. Steps of Refill Friction Stir Spot Welding [5]

Zgrzewanie punktowe obecnie wypiera nitowanie i klejenie stopów lekkich ze względu na to, że [5]:

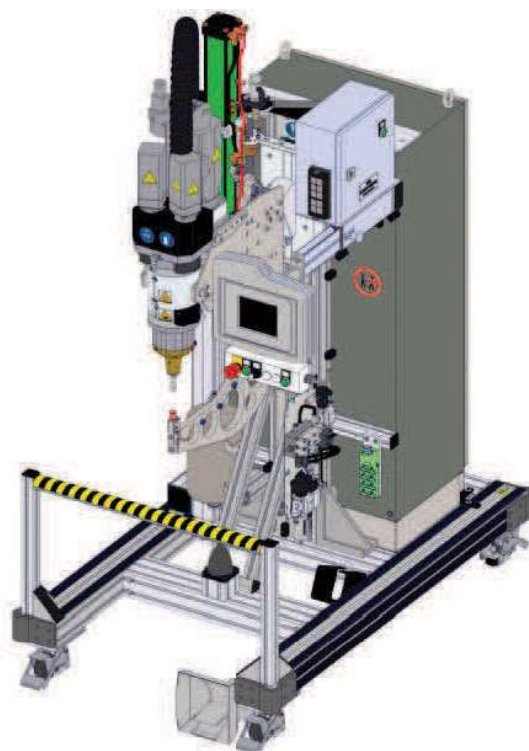
- nie wymaga nawiercania elementów i stosowania nitów jako dodatkowych elementów łącznikowych,
- nośność zgrzein może osiągać wartości wyższe od połączenia nitowego,
- złącza zgrzewane zachowują wysoką odporność korozyjną ze względu na nieobecność elementów o innym od materiałów rodzimych potencjale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

Stan wiedzy dotyczący zjawisk zachodzących podczas procesu zgrzewania nie jest jednak do końca zadowalający, co skutkuje trudnościami w doborze

optymalnych warunków prowadzenia procesu dla konkretnych stopów lotniczych [11, 6, 8, 1, 2]. Dlatego celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu parametrów ustawczych procesu zgrzewania metodą RFSSW na nośność połączeń zakładkowych wykonanych ze stopu aluminium 7075-T6 powszechnie wykorzystywanego w konstrukcjach lotniczych.

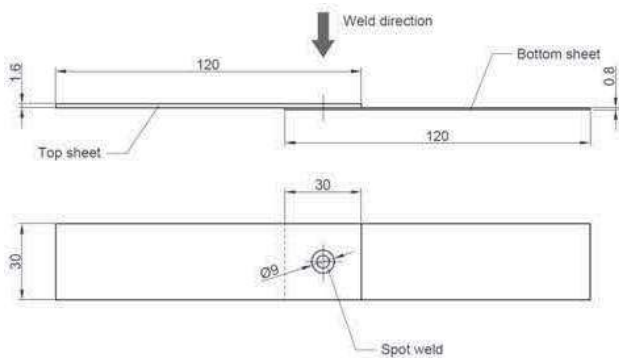
## Metodyka badań

Badania procesu zgrzewania blach przeprowadzono na maszynie do punkowego zgrzewania tarciovego z przemieszaniem RPS 100 VA11 (rys. 2). Przedmiotem badań były złącza zakładkowe blach ze stopu aluminium 7075-T6 o grubości 1,8 i 0,8 mm. Stop ten ma wysoką wytrzymałość mechaniczną – porównywalną do stali konstrukcyjnych oraz bardzo wysoką wytrzymałość zmęczenia. Jest bardzo dobrym materiałem do obróbki skrawaniem, także głębokich wybrań, ma średnią odporność na korozję, bardzo dobrze nadaje się do szlifowania, polerowania oraz obróbki elektroerozyjnej. Stosowany jest na formy rozdmuchowe, formy na tworzywa piankowe, elementy tłoczników i wykrojników oraz w przemyśle lotniczym na obciążone elementy konstrukcyjne.



Rys. 2. Stanowisko do zgrzewania tarciovego z przemieszaniem RPS 100 VA11  
Fig. 2. Refill friction stir spot welding workstation RPS 100 VA11

Próby zgrzewania prowadzono na arkuszach blachy 7075-T6 z których wykonywano próbki do statycznej próby ścinania o długości i szerokości zakładki wynoszącej 30 mm (rys. 3).



Rys.3. Parametry próbek do statycznej próby ścinania  
Fig. 3. Parameters of samples for static strength test

W trakcie prób zgrzewania dokonywano zmian:

- prędkości obrotowej narzędzia  $n$  (2000–3000 obr./min),
- wartości zagłębienia narzędzia  $g$  (1,3–1,7 mm),
- czasu zgrzewania  $t$  (1–1,5 s).

Badania nośności połączenia w próbie statycznego ścinania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z-100 przy prędkości posuwu szczęk 5 mm/min.

### Wyniki badań i analiza

Podczas badań zgrzewania punktowego tarcowego z ruchomym trzpieniem RFSSW uzyskano zgrzeiny punktowe bezkraterowe o powierzchni charakteryzującej się dwoma koncentrycznymi obszarami wymieszanego tarcowo metalu (rys. 4). Nośność uzyskanych spoin zawierała się w przedziale do 2221 kN do 4,09 kN.

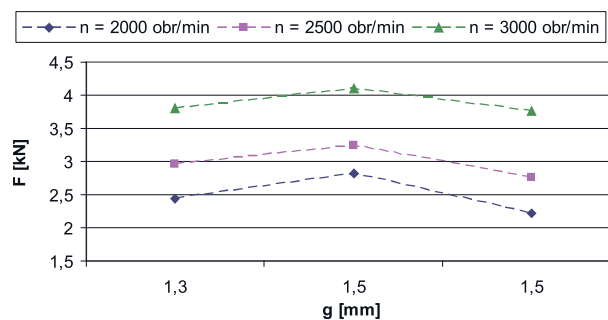


Rys. 4. Powierzchnia typowej spoiny wykonanej metoda RFSSW  
Fig. 4. The surface of the weld made method RFSSW

W pierwszym etapie badań skoncentrowano się na analizie wpływu zagłębienia narzędzia na nośność połączenia. W tym celu wykonano spoiny przy zagłębieniu narzędzia równym 1,3; 1,5 i 1,7 mm, z trzema różnymi prędkościami obrotowymi narzędzia (2000, 2500 i 3000 obr./min) (rys. 5).

W trakcie analizy wykresu przedstawiającego zależność maksymalnej siły przenoszonej przez złącze od wartości zagłębienia narzędzia (rys. 5) można zauważyć, że krzywe przyporządkowane odpowiednim prędkościom obrotowym wykazują tę samą tendencję. Niezależnie od przyjętej prędkości obrotowej największą wytrzymałość połączenia zaobserwowano dla zagłębienia narzędzia wynoszącego 1,5 mm. Po przekroczeniu tej wartości wszystkie charakterystyki wykazują trend obniżania się

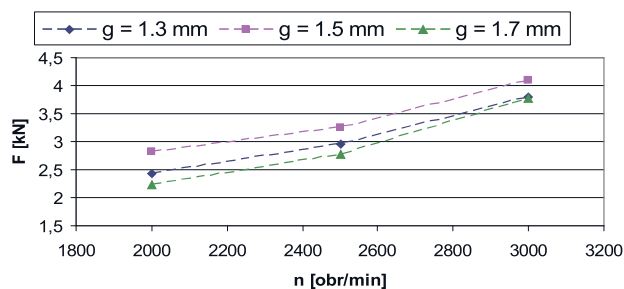
wytrzymałości złącza wraz ze wzrostem zagłębienia narzędzia. W przypadku krzywej odpowiadającej prędkości obrotowej 3000 obr./min odnotowano początkowy znaczący wzrost wytrzymałości zgrzeiny, osiągający wartość maksymalną wynoszącą 4,09 kN dla zagłębienia 1,5 mm, po czym wraz ze wzrostem zagłębienia narzędzia trend się odwraca i wytrzymałość połączenia maleje. Największy spadek wytrzymałości zgrzeiny zanotowano dla próbek wykonanych z prędkością obrotową wynoszącą 2000 obr./min (21,35%). Zmniejszenie wytrzymałości połączenia wraz ze wzrostem zagłębienia narzędzia spowodowane jest wynikiem osłabienia dolnej części połączenia przez tuleję pracującą w drugim etapie wytwarzania złącza, prowadzącego do całkowitego wrywania fragmentu cieńszej z blach w trakcie statycznej próby ścinania.



Rys. 5. Zależność siły przenoszonej przez złącze od wartości zagłębienia narzędzia

Fig. 5. The dependence of the force transmitted through the joint versus the tool cavity

W dalszej części badań skupiono na określeniu wpływu prędkości obrotowej narzędzia na nośność uzyskanych spoin. Wyniki badań przedstawiono na rys. 6.



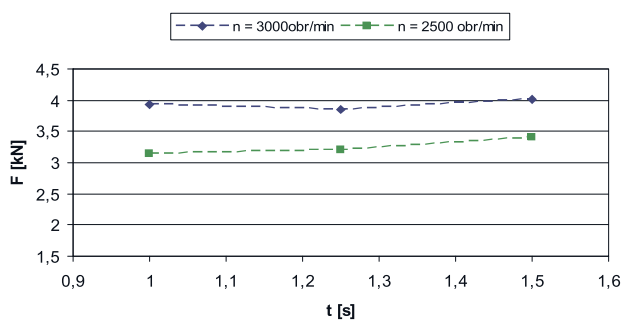
Rys. 6. Zależność siły przenoszonej przez złącze od prędkości obrotowej narzędzia

Fig. 6. The dependence of the force transmitted through the joint versus the tool rotational speed

Analiza rys. 6 wskazuje, że niezależnie od przyjętej wartości zagłębienia narzędzia wzrost prędkości obrotowej prowadzi do wzrostu nośności połączenia. Największy jednak wzrost odnotowano dla połączeń wykonywanych przy zagłębieniu wynoszącym 1,7 mm. W rozpatrywanym przypadku wzrost prędkości obrotowej narzędzia umożliwił zwiększenie nośności połączenia z 2,23 kN do 3,76 kN, a więc o 70,13%. Wzrost prędkości obrotowej narzędzia powodował również wzrost temperatury

w obrębie złącza, prowadząc do lepszego uplastycznienia materiału i wzrostu wytrzymałości połączenia. Jednocześnie zauważono zwiększenie podatności narzędzia do zabrudzenia. W trakcie prób ze zwiększonymi prędkościami obrotowymi uplastyczniony materiał należało się na elementy robocze narzędzia, powodując konieczność jego częstego czyszczenia, zwiększając pracochłonność procesu. Nalepiony materiał utrudniał również uzyskanie założonej głębokości pracy narzędzia, w wyniku czego uzyskiwano znacznie większy rozrzut wyników badań niż w przypadku złącz wykonywanych przy niższej prędkości obrotowej.

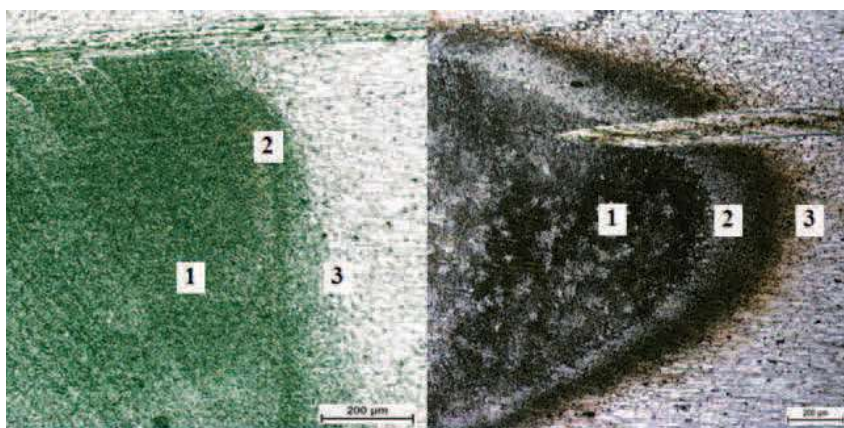
W trakcie badań wykonano również spoiny przy trzech różnych czasach zgrzewania (1, 1,25 i 1,5 s) (rys. 7). W przypadku spoin wykonywanych z prędkością 3000 obr./min nie zauważono istotnego wpływu zmian czasu zgrzewania na nośność połączenia. Nieznaczny wpływ zauważono jednak przy próbach wykonywanych z prędkością obrotową równą 2500 obr./min. W rozpatrywanym przypadku po zwiększeniu czasu zgrzewania z 1 s do 1,5 s odnotowano wzrost nośności połączenia o 7,86%.



Rys. 7. Zależność siły przenoszonej przez złącze od czasu wykonywania zgrzeiny

Fig 7. The dependence of the force transmitted through the joint versus the run-time weld

W trakcie badań największą nośność połączenia uzyskano przy prędkości obrotowej narzędzia wynoszącej 3000 obr./min, zagłębieniu 1,5 mm i czasie zgrzewania 1,5 s. Wartość siły potrzebnej do zerwania próbki wyniosła 4,09 kN. Po zastosowaniu specjalnego uchwytu



Rys. 8. Budowa spoiny wykonana metodą: a) RFSSW, b) zgrzewania oporowego

Fig. 8. Construction of the weld formed by: a) RFSSW, b) resistance welding

zabezpieczającego próbkę przed wyginaniem, zapewniającego zniszczenie próbki jedynie pod działaniem siły ścinającej, nośność połączenia wykonanego przy tych samych parametrach wzrosła do 7,2 kN. Nośność połączenia wykonanego metodą zgrzewania oporowego o porównywalnym polu powierzchni spoiny, zerwanego w tych samych warunkach była o 43,33% mniejsza. Powodu takiego stanu rzeczy należy upatrywać przede wszystkim w budowie spoiny. Spoina wykonana metodą RFSSW składa się z trzech zasadniczych części: jądra spoiny (1), strefy rozdziału (2) – będącej następstwem pracy tulei narzędzia oraz strefy wpływu ciepła (3) (rys. 8a). Jądro spoiny ma strukturę drobnoziarnistą o lepszych właściwościach mechanicznych w porównaniu do materiału rodzimego.

W spoinie wykonanej metodą zgrzewania oporowego (rys. 8b) również można wyodrębnić trzy zasadnicze części: jądro spoiny (1) mające budowę dendrytyczną, obszar przetopu (2) oraz strefę wpływu ciepła (3). Nierównomierne odprowadzanie ciepła podczas procesu krzepnięcia materiału powoduje, że zarodki krystalizacji w obrębie jądra spoiny rozrastają się nierównomiernie i rosną w jednych kierunkach szybciej, a w innych wolniej. Powstająca w ten sposób struktura dendrytyczna charakteryzuje się znacznie gorszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu do struktury uzyskiwanej metodą zgrzewania tarcowego. Świadczy to o wysokim potencjale metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem RFSSW w stosunku do metody zgrzewania oporowego.

## Podsumowanie

Punktowe zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem stanowi jedną z nowocześniejszych metod łączenia stopów aluminium. Przeprowadzone badania wykazały, że metodę tę można z powodzeniem wykorzystać w przemyśle lotniczym ze względu na możliwość zapewnienia dużej wytrzymałości połączeń przy jednoczesnym zmniejszeniu pracochłonności procesu montażu. Wymaga to jednak dokładnego doboru parametrów ustawczych procesu, tj. prędkości obrotowej, zagłębienia narzędzia oraz czasu wykonywania zgrzeiny. Badania przeprowadzone w pracy wykazały, że największą nośność połączenia można uzyskać przy prędkości obrotowej wynoszącej 3000 obr./min i zagłębieniu narzędzia wynoszącym 1,5 mm przy czasie zgrzewania 1,5 s. Uzyskana w ten sposób zgrzeina ma korzystniejsze właściwości mechaniczne od zgrzein wykonanych metodą zgrzewania oporowego. W badanym przypadku nośność spoiny wykonywanych metodą RFSSW była większa od wykonywanych metodą zgrzewania oporowego o ok. 43%.

## LITERATURA

- [1] Badarinarayan H., Q. Yang, S. Zhu. 2009. "Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (49): 142–148.
- [2] Buffa G., L. Fratini, M. Piacentini. 2008. "On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys". *Journal of Materials Processing Technology* (208): 309–317.
- [3] Han L. et. al. 2010. "Effect of aluminium sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, (8): 1076–1082.
- [4] Kuczmaszewski J. 2011. „Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu”. Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie red. R. Knosala, Opole Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją (7–18).
- [5] Kudła K., K. Wojsyk, K. Adamus. 2013. "The properties of spot-welded joints produced by the FSSW and RFSSW methods". *Obróbka Plastyczna Metali* Vol. XXIV (3): 193–203.
- [6] Montag T. et. al. 2014. "Influence of Tool Wear on Quality Criteria for Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) Process". *Procedia CIRP* (24): 108–113.
- [7] Rudawska A., A. Góra, T. Warda. 2014. „Wybrane zagadnienia wytrzymałości połączeń zgrzewanych blach aluminiowych i tytanowych”. *Technologia i Automatyżacja Montażu* (2): 61–65.
- [8] Tutar M. et. al. 2014. "The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array". *Materials and Design* (63): 789–797.
- [9] Yang H.G., H.J. Yang. 2013. "Experimental Investigation on Refill Friction Stir Spot Welding Process of Aluminum Alloys". *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 345, 243–246.
- [10] Yang X.W., T. Fu, W.Y. Li. 2014. "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro and Microstructure, Property and Process Modelling". *Advances in Materials Science and Engineering Volume*, Article ID 697170.
- [11] Yanga Q. et. al. 2010. "Material flow during friction stir spot welding". *Materials Science and Engineering* (527): 4389–4398.
- [12] Zhang Z. et. al. 2011. "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy". *Materials and Design* (32): 4461–4470.

---

dr inż. Rafał Kluz – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkkmiop@prz.edu.pl

dr inż. Andrzej Kubit – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: akubit@prz.edu.pl

dr inż. Dawid Wydrzyński – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl