

### **Mgr inż. Rafał Burek**

Development Projects Office DTR/B  
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.  
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland  
E-mail: rafal.burek@lmco.com

### **Dr inż. Dawid Wydrzyński**

Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics  
Rzeszów University of Technology  
al. Powstańców Warszawy 12, 35 – 959 Rzeszów, Poland  
E-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl

### **Prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp**

Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics  
Rzeszów University of Technology  
al. Powstańców Warszawy 12, 35 – 959 Rzeszów, Poland  
E-mail: jsztmiop@prz.edu.pl

### **Dr inż. Wojciech Więckowski**

Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science  
Częstochowa University of Technology  
al. Armii Krajowej 21, 342 – 201 Częstochowa, Poland  
E-mail: wieckowski@itm.pcz.pl

## **Wpływ zużycianarzędzia na jakość połączeń zakładkowych blach ze stopu Aluminium 7075 T6 wykonanych metodą FSW**

**Słowa kluczowe:** *zgrzewanie tarciove z przemieszaniem, FSW, Al 7075 T6alloy*

**Streszczenie:** Opracowanie podejmuje problematykę wpływu zużycia narzędzia na jakość zgrzeiny otrzymanej metodą zgrzewania tarciovego z przemieszaniem FSW. Do badań użyto stopu aluminium Al 7075 T6, stosowanego głównie w przemyśle lotniczym. Badano połączenia zakładkowe blach o grubości 1,0mm i 0,8mm. Zużycie narzędzia oceniano na podstawie pomiarów na maszynie multisensorycznej. Ocenę wpływu zużycia przeprowadzono w oparciu o statyczną próbę rozciągania oraz analizę zgłądów metalograficznych wykonanych połączeń. Trzpień narzędzia pracuje w trudniejszych warunkach i jest bardziej narażony na ścieranie. Wynika to z pracy przy pełnym zagłębieniu w łączonym materiale. Zważywszy również na stosunkowo małe wymiary trzpienia tj. jego średnicę i duże siły występujące w procesie to ten element jest najbardziej narażony na zużycie. W procesie zgrzewania narzędzie ulega zużyciu ściernemu, co jest powodem zmniejszania zagłębienia narzędzia w materiale łączonym. W związku z powyższym konieczna jest ciągła kontrola wysunięcia narzędzia dla uzyskania pożądanych parametrów jakościowych zgrzeiny. Po wykonaniu 200m zgrzeiny zauważono zmniejszenie wytrzymałości zgrzeiny, jak również powtarzalności wyników związanych ze zmianą warunków mieszania materiału. Zmiana wytrzymałości zgrzeiny oraz zużycia narzędzia ma również potwierdzenie w badaniach metalograficznych, z których wynika, iż w związku z postępującą degradacją narzędzia zmniejszeniu ulegają wymiary charakterystyczne strefy termo–plastycznej odpowiedzialnej w głównej mierze za wytrzymałość zgrzeiny.

## 1. Wprowadzenie

Jedną z metod łączenia elementów metalowych, która w ostatnich czasach zyskuje coraz większe znaczenie jest metoda zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW. Zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem zostało opracowane przez Mr. Wayne Thomas w Instytucie Spawalnictwa (UK) w 1991r. na potrzeby łączenia metali lekkich [25]. Technika ta polega na łączeniu materiału w stanie stałym, co pozwala na wytworzenie stałego połączenia materiałów uważanych dotychczas za trudnospawalne bądź niespawalne. W porównaniu z innymi tradycyjnymi technikami łączenia metali metoda ta jest energooszczędna, uniwersalna i przyjazna dla środowiska [6, 17, 20, 28]. Jakość złączy zgrzewanych jest uzależniona od parametrów procesu. W wyniku miejscowego podgrzania materiału przez narzędzie sprawą ruchu obrotowego, wprowadzeniu go na zadaną głębokość oraz przemieszczaniu narzędzia wzdłuż zadanej drogi przejścia z określoną prędkością powstaje zgrzeina. Uplastyczniony materiał w wyniku tarcia materiału i narzędzia przemieszcza się wokół trzpienia. Elementy zostają połączone na wskutek przemieszania tarcowego materiału w stanie półstałym [9]. Ponadto oprócz parametrów technologicznych wymagane jest określenie dodatkowych parametrów takich jak geometria narzędzia, system mocowania, kierunek zgrzewania itd. [5, 21, 27]

Ze względu na wysoką wytrzymałość połączeń FSW, metoda ta może z powodzeniem konkurować z tradycyjnymi metodami łączenia. Zastosowanie tej metody zamiast spawania czy nitowania jest interesujące chociażby z powodu obniżania kosztów produkcji czy też masy produktu. Z powyższych względów FSW zostało zakwalifikowane jako technologia kluczowa dla produkcji kadłuba i skrzydła samolotu [15, 32]. W zestawieniu materiałów stosowanych na elementy poszycia ciągle największe zastosowanie mają stopy aluminium [4, 23, 30]. Stopy aluminium zwłaszcza serii 2xxx oraz 7xxx są trudne do spawania ze względu na słabe krzepnięcie i porowatość w strefie łączenia. Z kolei materiały te są stosunkowo łatwo łączone w procesie FSW [8, 11].

Takie połączenie ma swoje zalety jak choćby brak typowych wad jakie można zaobserwować w tradycyjnych połączeniach spawanych np. pęcherze gazowe, skurcz, pęknięcia termiczne itd. Jak wszystkie połączenia tego typu również metoda FSW ma swoje ograniczenia związane nie tylko z trudnościami wykonania przy skomplikowanych kształtach przedmiotów łączonych, ale również wady związane bezpośrednio z wytrzymałością połączenia oraz powtarzalnością procesu. Podstawowe wady jakie można zaobserwować w tej metodzie, to wady związane z deformacją linii styku, pustki w zgrzeinie, które są związane bezpośrednio z geometrią narzędzia [12–14, 16, 31, ].

Niewiele publikacji porusza zagadnienia związane z problematyką eksploatacji narzędzi w procesie zgrzewania tarcowego. Prace skupione są głównie wokół mechanizmu powstawania zużycia w procesie zgrzewania tarcowego [22, 24, 29], jak również przewidywania zużycia narzędzia na podstawie metod numerycznych [10]. Głównym problemem w zgrzewaniu tarcowym jest zużycie trzpienia narzędzia. Zużycie spowodowane jest przedłużonym stykiem pomiędzy narzędziem a materiałem zgrzewanym. Geometria narzędzia ma znaczący wpływ na odporność na ścieranie narzędzia [3]. Niewątpliwie zagadnienia poruszane w artykułach są ważne z punktu widzenia jakości zgrzeiny, która powinna charakteryzować się jednakowymi parametrami wytrzymałościowymi przez cały okres eksploatacji narzędzia. Zastosowanie powłok PVD do narzędzi FSW jest obiecującym podejściem do poprawy ich wydajności jak również trwałości, a tym samym ekonomiki procesu. Narzędzie powlekane nie wykazywało skłonności do zmiany wymiaru trzpienia w porównaniu do narzędzia niepowlekanego [1].

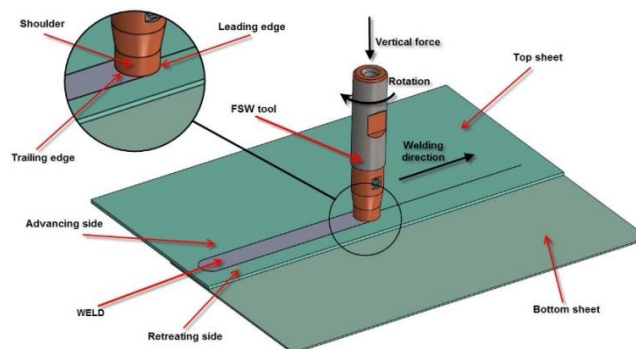
Badania przeprowadzone przez wielu autorów miały na celu w głównej mierze zaprezentowanie zjawisk zachodzących w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem z wykorzystaniem narzędzi wytworzonych z różnych materiałów. Bardziej szczegółowym badaniom poddano trzpień narzędzia, gdyż jak stwierdzono w opracowaniach to trzpień narzędzia pracuje w trudniejszych warunkach i jest bardziej narażony na ścieranie. Badania nie poruszają jednak tematyki tak bardzo ważnej w zastosowaniach przemysłowych, a mianowicie trwałości narzędzia w funkcji przebytej drogi zgrzewania, co niewątpliwie ma istotne znaczenie w produkcji elementów konstrukcyjnie odpowiedzialnych. W konstrukcji samolotu do łączenia elementów poszycia tradycyjnie wykorzystywane jest zgrzewanie rezystancyjne, nitowanie czy klejenie. Wdrożenie nowej metody łączenia blach jaką niewątpliwie jest zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem FSW wymaga przeprowadzenia szeregu badań oraz uzyskania wielu certyfikatów pozwalających dopuścić tę technologię do powszechnego zastosowania. Niewątpliwie znajomość możliwości eksploatacyjnych narzędzi używanych w tym procesie przyczyni się do wdrożenia tej technologii.

W związku z powyższym podstawowym celem badań było określenie długości drogi zgrzewania do chwili osiągnięcia kryterium zużycia. Przewidywanie zużycia narzędzi w funkcji czasu lub drogi zgrzewania jest zadaniem złożonym. Stosowanie stałych parametrów w całym zakresie pracy nie jest jednoznaczne z jednakowym zużywaniem się narzędzia. Liczne zakłócenia są powodem zmiennej trwałości narzędzia. Największy wpływ na trwałość narzędzia ma zużycie trzpienia, które jest wynikiem procesów tribologicznych oraz oddziaływań cieplnych i chemicznych. Założenia pracy związane ze zużyciem trzpienia odnoszą się do ustalenia długości drogi zgrzewania dla utrzymania parametrów wytrzymałościowych w ustalonym zakresie. Powodem takiego kryterium zużycia jest występowanie znacznych deformacji narzędzia wskutek oddziaływania materiału zgrzewanego na trzpień narzędzia. Jest to więc kryterium technologiczne, czyli takie zużycie, do osiągnięcia którego narzędzie pracuje stabilnie, a jakość zgrzeiny odpowiada wymaganiom technologicznym. W przypadku zmiany geometrii narzędzia na skutek zużycia, zmianie ulegają właściwości połączenia, co również byłoby przedmiotem analizy w relacjonowanych badaniach.

## 2. Materiały i metody badań eksperymentalnych

### 2.1 Podstawowe zagadnienia procesu FSW

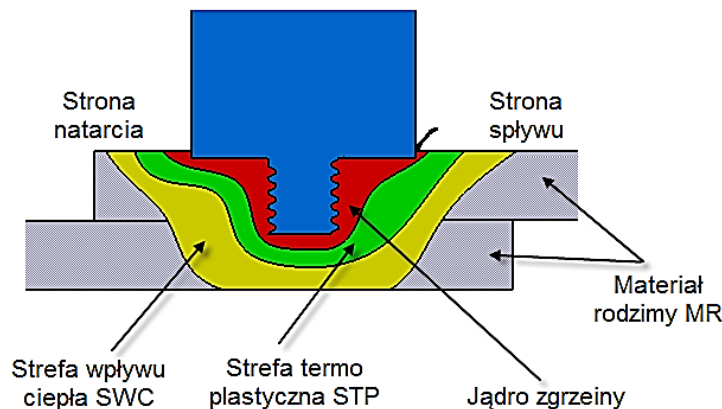
Wykonywanie spoiny metodą FSW polega na wprowadzeniu obracającej się głowicy ze specjalnie zaprojektowanym trzpieniem w miejsce styku dwóch łączonych elementów, a następnie przemieszczaniu jej wzdłuż krawędzi łączonych części. Proces łączenia metodą FSW prezentuje rys. 1.



Rys. 1. Proces zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW

W celu poprawnego wykonania operacji należy sztywno zamocować łączone elementy i mocno docisnąć je do siebie. W trakcie wykonywania zgrzeiny obracający się kołnierz narzędzia pod wpływem tarcia rozgrzewa łączone elementy, a trzpień narzędzia miesza materiał, poprzez co tworzy połączenie. Opisując proces zgrzewania tarcowego należy wyszczególnić pojęcia takie jak strona natarcia i strona spływu. Strona natarcia znajduje się z tej strony, z której kierunku obrotu oraz kierunku posuwu narzędzia są zgodne. Strona spływu sugeruje nam swoją nazwą, że to właśnie w jej kierunku spływa rozgrzany materiał. Jest to strona, po której kierunku obrotu narzędzia jest przeciwny do kierunku posuwu.

W wyniku procesu zgrzewania tarcowego w miejscu połączenia zgrzewanych materiałów powstaje stała spoina. Na jej kształt oraz właściwości ma wpływ kilka czynników, między innymi kształt narzędzia oraz parametry takie jak szybkość posuwu czy prędkość obrotowa narzędzia. W przekroju poprzecznym zgrzeiny można zaobserwować odkształcenie termo–plastyczne. Efektem takich właściwości procesu jest powstanie złożonej mikrostruktury, która ma znaczny wpływ na właściwości mechaniczne połączenia. Zgrzeinę powstałą w wyniku zgrzewania FSW można podzielić na kilka stref mikrostrukturalnych (rys. 2).



Rys. 2. Strefy mikrostrukturalne w procesie FSW.

Wyróżniamy następujące strefy zgrzeiny (rys. 2):

- materiał rodzimy (MR): część materiału najbardziej oddalona od środka spoiny, która nie uległa odkształceniom ani zmianom mechanicznym i strukturalnym;
- strefa wpływu ciepła (SWC): część materiału będąca w sąsiedztwie zgrzeiny, gdzie materiał uległ wpływowi ciepła, przez co jego struktura oraz właściwości mechaniczne uległy zmianie. Strefa ta natomiast nie podlega odkształceniom plastycznym;
- strefa odkształcenia termo–plastycznego: strefa, w której materiał ulega działaniu narzędzia odkształcającego go w wyniku oddziaływania mechanicznego jak i cieplnego. Dla stopów aluminium w tej strefie można uzyskać znaczne odkształcenie plastyczne bez rekrytalizacji materiału. To tutaj znajduje się granica między materiałem nieskrytalizowanym, a jądrem spoiny;
- jądro spoiny: jest to obszar, w którym materiał uległ w pełni rekrytalizacji. Spoina w tym miejscu cechuje się bardzo niewielkim, równoosiowym ziarnem wielkości nawet kilku mikrometrów (w przypadku stopów aluminium). Jest to miejsce, w którym znajdował się trzpień narzędzia zgrzewającego.

Parametry spoiny, takie jak wielkość oraz kształt, także rozmiar poszczególnych stref są zależne głównie od rozmiaru i kształtu narzędzia.

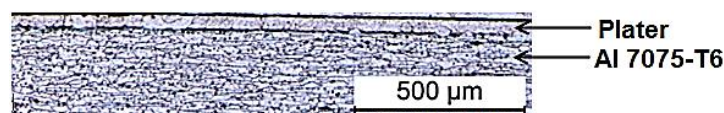
## 2.2 Materiał i próbki do badań

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone z użyciem blach ze stopu 7075-T6 obustronnie platerowanych. Skład chemiczny stopu przedstawia tab. 1. Został on dodatkowo zbadany przy użyciu spektrometru promieniowania rentgenowskiego (EDX). Seria 7xxx stopów aluminium wykazuje większą wytrzymałość w porównaniu do innych klas stopów. Wytrzymałość na ściskanie i odporność na zmęczenie są parametrami krytycznymi w konstrukcji elementów skrzydła, ogona samolotu czy powierzchni usterzenia jak również całego poszycia statków powietrznych. Wysoka wytrzymałość stopu aluminium np. 7075-T6 jest kluczowa w zastosowaniu tego stopu w konstrukcjach lotniczych ze względu na stosunek wytrzymałości do ciężaru, skrawalności i relatywnie niskiego kosztu [7, 26].

Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium 7075-T6 (wt.%) [2].

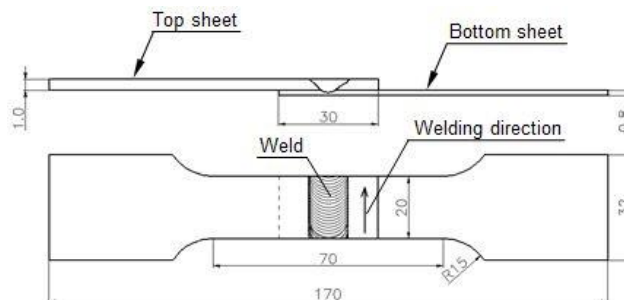
Źródło	Skład chemiczny(wt.%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Inne dodatki Pojedynczo Całościowo	Al	
Standard	max 0.4	max 0.5	1.2~2.0	max 0.3	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.3	0.05	0.15	Reszta
Zmierzone	–	0.10	1.35	0.06	2.61	0.26	5.6	0.05	–	–	Reszta

Stopy aluminium są podatne na korozję, co jak wiadomo wpływa na skrócenie żywotności konstrukcji lotniczych. Zjawiskiem niekorzystnym wpływającym na obniżenie czasu eksploatacji statków powietrznych jest korozja oraz zmęczenie materiału [18]. W związku z powyższym producenci blach ze stopów aluminium stosują platerowanie, czyli pokrycie powierzchni blachy czystym aluminium technicznym w celu zabezpieczenia przed korozją [19]. Grubość warstwy czystego aluminium wynosi 40µm zgodnie z normą AMS-QQ-A-250/13. Mikrostrukturę stopu Al 7075-T6 platerowanego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Mikrostruktura platerowanego stopu aluminium 7075 – T6 [2].

Jednym z etapów badań zużycia narzędzia było określenie jego wpływu na wytrzymałość statyczną połączenia w funkcji przebytej drogi zgrzewania. W celu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych przygotowano próbki, których wymiary charakterystyczne przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Wymiary próbki do połączeń zgrzewanych

Grubość zgrzewanych blach w pakiecie wynosiła odpowiednio: blacha górna 1mm oraz blacha dolna 0,8mm, co odpowiada grubości poszycia samolotu oraz grubości podłużnic.

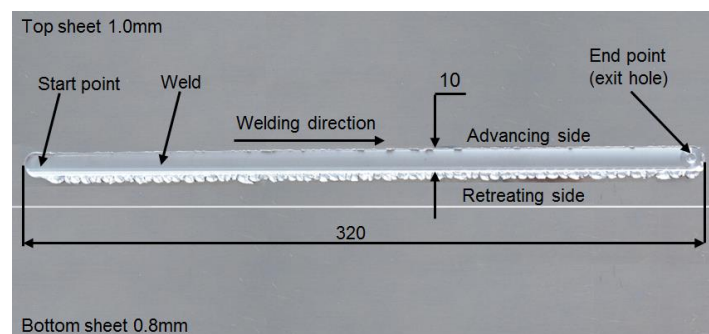
### 3.3 Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzane na maszynie DMC 104V ze stożkiem ISO 40 (rys. 5a) z wykorzystaniem narzędzia handlowego firmy Schilling 10-S-4-Z-G-O którego twardość wynosiła 54÷56HRC (rys. 5b). Narzędzie charakteryzuje się wklęsłą oporą oraz walcowym trzpieniem.



Rys. 5. (a) Obrabiarka DMC 104V, b) narzędzie Schilling.

Próba była przeprowadzana na złączach o długości 320 mm, z których wycięto po cztery próbki do badań wytrzymałościowych oraz jedną do badań mikroskopowych. Przebieg prowadzonego procesu przedstawiono na rys.6.



Rys. 6. Przebieg procesu FSW.

W oparciu badania wstępne dobrano parametry z jakimi przeprowadzono proces:

- prędkość obrotowa – 1000obr/min;
- prędkość posuwu – 200mm/min;
- wysunięcie trzpienia – 1.2mm.

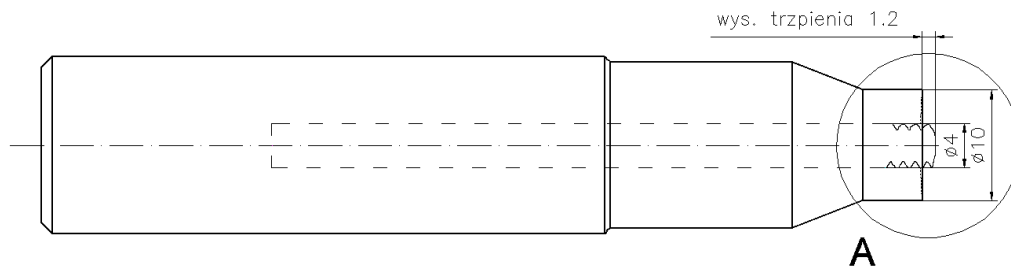
Próbki kontrolne były wykonywane co 20m do wykonania 100m zgrzeiny, następnie co 40 m. Pomiar geometryczny trzpienia był wykonywany co 100m na maszynie multisensorycznej OGP Smart Scope FLASH 200. W celu zapewnienia powtarzalności ustawienia trzpienia do wykonania pomiarów wykonano przyrząd do bazowania

zapewniający pozycjonowanie mierzonego trzpienia. Pomiar wykonano w dwóch płaszczyznach. Po każdym pomiarze do kolejnego etapu badań trzpień był ustawiany z wysunięciem uwzględniającym zużycie się czołowej powierzchni (czyli jego wysunięcie było o tyle mniejsze w stosunku do wartości pierwotnej o ile zmierzono jego skrócenie  $\Delta l$ ) w stosunku do ustawienia początkowego.

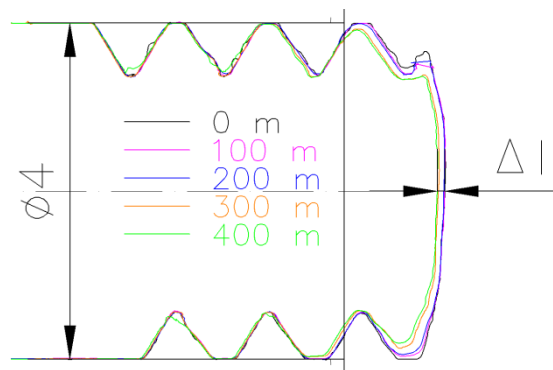
#### 4. Analiza wyników

Pomiary wykazały, iż zużycie wynosi odpowiednio dla 100m $\approx$ 2%; 200m $\approx$ 4% 300m $\approx$ 10%; 400m $\approx$ 12% ubytku materiału trzpienia narzędzia. Uwzględniając pomiary narzędzia i zużywanie się powierzchni czołowej przy przebiegu do 200m nie zauważono dużego ubytku materiału, natomiast przy przebiegu 300m zużycie od czoła wynosiło  $\Delta l \approx 0,06$ mm, a przy 400m  $\Delta l \approx 0,08$  mm (rys. 7).

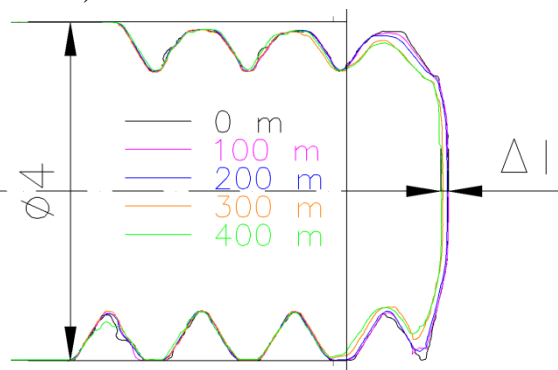
a)



b)

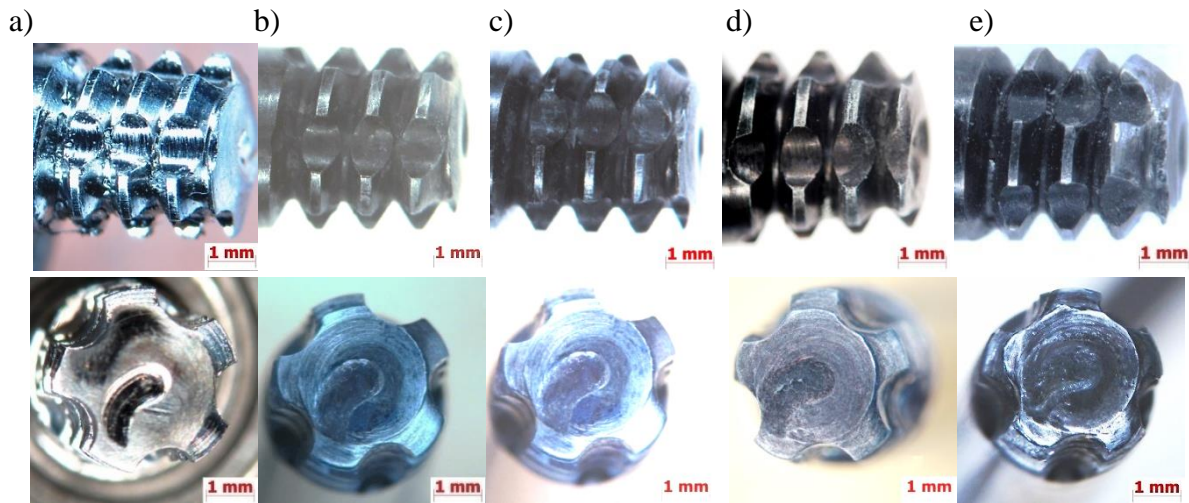


c)



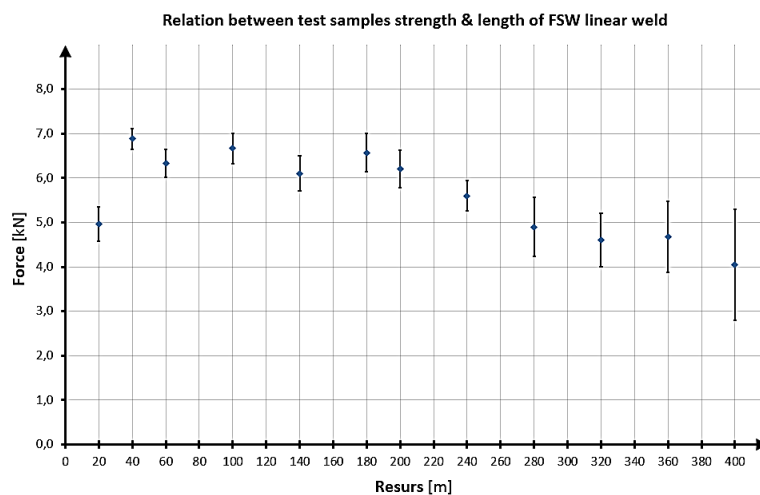
Rys.7. Wyniki pomiarów trzpienia narzędzia: a) wymiary charakterystyczne, b) pomiar w płaszczyźnie 0°, c) pomiar w płaszczyźnie 90°.

W przypadku badanego narzędzia można dokonać korekty ustawienia wysunięcia trzpienia w oporze co pozwoli na zwiększenie jego resursu, jednak nie zmienia to faktu, że kształtowe wybranie na jego czołowej powierzchni ulega ciągle postępującej degradacji (rys. 8).



Rys. 8. Analiza makroskopowa zużycia narzędzia od boku oraz czola dla przebiegu: a) 0m, b) 100m, c) 200m d) 300m, e) 400m.

Zużycie narzędzia ma wpływ na wytrzymałość połączenia, co jest efektem mniejszego udziału trzpienia (jego zagłębienia i średnicy) w mieszaniu materiału (rys. 9).

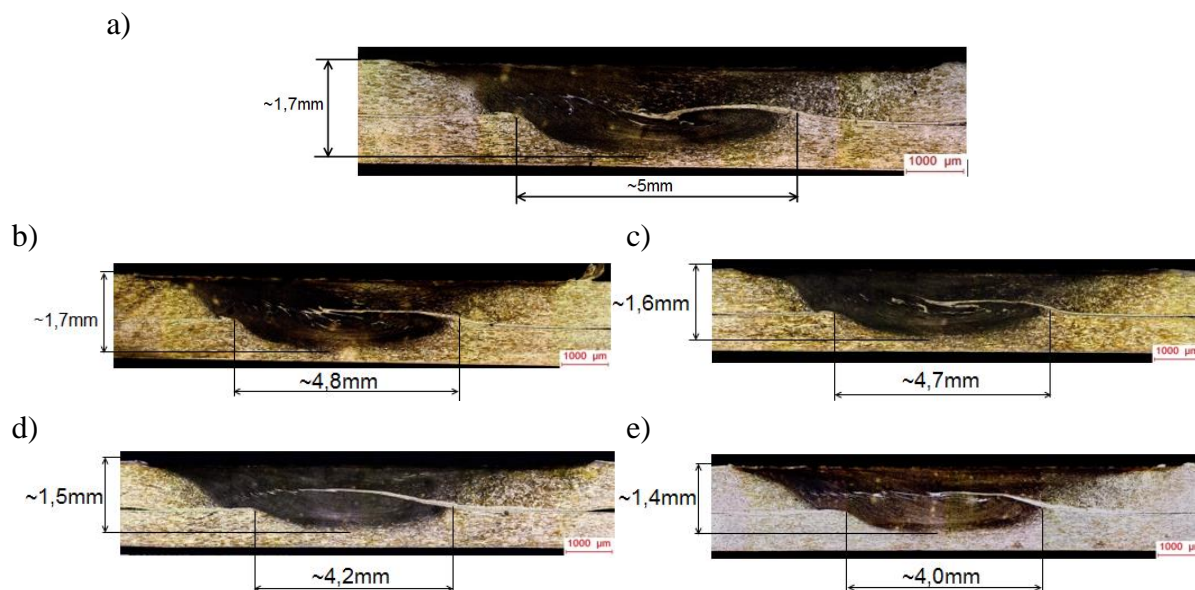


Rys. 9. Wykres siły zrywającej w funkcji przebytej drogi narzędzia.

Wyniki próby wytrzymałościowej wskazują, że w początkowej fazie badania zużycia narzędzia wytrzymałość nieznacznie wzrasta. Ma to związek z dotarciem się narzędzia co ewidentnie widać przy zwiększeniu się wytrzymałości w punkcie kontrolnym przy 20m/40m wykonanej zgrzeiny. Kolejne próbki wykazują stosunkowo porównywalną wytrzymałość do przebiegu około 200m. Po wykonaniu tego przebiegu zmniejsza się wytrzymałość połączenia oraz zaobserwowano spadek powtarzalności (wzrost wartości odchylenia standardowego) siły niszczącej. Ma to związek ze zużyciem się narzędzia, zarówno na linii śrubowej jak na czołowej powierzchni trzpienia.

Zużycie linii śrubowej wpływa również na zmniejszenie się szerokości przemieszania na linii styku, oraz głębokości przemieszania, co zaobserwować można na rys.10.





Rys. 10. Przekrój i mikrostruktura zgrzeiny dla: a) 40m, b) 100m, c) 200m, d) 300, e) 400m.

Łatwo zauważyć wyraźne zmniejszenie szerokości zgrzeiny do 4mm oraz głębokości zgrzeiny do 1,4mm po 400m pracy narzędzia.

Na podstawie powyższych wyników podstawowym celem badań było określenie długości drogi zgrzewania do chwili osiągnięcia kryterium zużycia. Największy wpływ na trwałość narzędzia ma zużycie trzpienia, które jest wynikiem procesów tribologicznych oraz oddziaływań cieplnych i chemicznych. Przyjęte kryterium zużycia jest spowodowane występowaniem znacznych deformacji narzędzia wskutek oddziaływania materiału zgrzewanego na trzpień narzędzia. Jest to więc kryterium technologiczne, czyli takie zużycie, do osiągnięcia którego narzędzie pracuje stabilnie, a jakość zgrzeiny odpowiada wymaganiam technologicznym. Tendencje przedstawione w pracy są tożsame z wynikami przedstawionymi w podobnych publikacjach [1, 3] podejmujących zagadnienia zużycia narzędzia.

## 5. Wnioski

1. Trzpień narzędzia pracuje w trudniejszych warunkach i jest bardziej narażony na ścieranie. Wynika to z pracy przy pełnym zagłębieniu w łączonym materiale. Zważywszy również na stosunkowo małe wymiary trzpienia tj. jego średnicę wynoszącą 4mm i duże siły występujące w procesie (5kN) to ten element jest najbardziej narażony na zużycie. Dodatkowo nacięcie linii śrubowej zwiększa możliwość uszkodzenia, ze względu na dodatkowe osłabienie rdzenia narzędzia.
2. W trakcie procesu zgrzewania zaobserwowano zużycie ściernie narzędzia zarówno na powierzchni czołowej ( $\Delta l$ ) jak i obwodzie trzpienia, proporcjonalne do długości wykonanej zgrzeiny. Skutkiem tego jest konieczność kontroli wartości wysunięcia trzpienia w celu zapewnienia pożądaných parametrów jakościowych zgrzeiny w trakcie realizacji procesu.
3. W początkowej fazie zgrzewania narzędzie ulega dotarciu, pierwsze 40m zgrzeiny charakteryzuje się zmniejszoną wytrzymałością. Po tej długości następuje stabilizacja wytrzymałości, która wynosi  $\sim 6,5\text{kN}$ . Po wykonaniu 200m zgrzeiny zauważono zmniejszenie wytrzymałości zgrzeiny o 30%, jak również pogorszenie powtarzalności wyników związane ze zmianą warunków mieszania materiału (zużycie linii śrubowej

wpływa na zmianę warunku transportu uplastycznionego materiału). Powtarzalność wyników jest niezwykle istotna z punktu widzenia konstrukcji lotniczych.

4. Zmiana wytrzymałości zgrzeiny oraz zużycia narzędzia ma również potwierdzenie w badaniach metalograficznych, z których wynika, iż w związku z postępującą degradacją narzędzia zmniejszeniu ulegają wymiary charakterystyczne strefy termo–plastycznej odpowiedzialnej w głównej mierze za wytrzymałość zgrzeiny. Dla pierwszych 200m wymiary poprzeczne wahają się w zakresie ~1,6mm głębokości oraz ~4,8mm szerokości.
5. Przeprowadzone badania wykazują wpływ zużycia narzędzia na parametry wytrzymałościowe zgrzewanych próbek. Aby możliwe było wykonanie tego typu badań należało wykonać zgrzeiny o łącznej długości 400m, w związku z powyższym badania te były czasochłonne oraz kosztowne.

**Podziękowanie:** Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Unii Europejskiej oraz PZL Mielec A Sikorsky Company w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Projekt pt. „Zaawansowane techniki wytwarzania elementów struktury płatowca przy wykorzystaniu innowacyjnej technologii FSW”, Nr INNOLOT/I/4/NCBR/2013.

## Literatura

1. Adesina A. Y., Gasem Z. M., Al-Badour F. A. Characterization and evaluation of AlCrN coated FSW tool: A preliminary study. *Journal of Manufacturing Processes* 2017; 25: 432–442.
2. AMS-QQ-A-250/13Aluminum Alloy Alclad 7075, Plate and Sheet (2007).
3. Bist A., Saini J. S., Sharma B. A review of tool wear prediction during friction stir welding of aluminium matrix composite. *Transactions Nonferrous Metals Society of China* 2016; 26: 2003–2018.
4. Cascada W., Liu J., Staley J. Aluminium alloys for aircraft structures. *Advanced Materials and Processes* 2002; 160(12):27–9.
5. Colegrove P. Airbus evaluates friction stir welding. <<http://www.comsol.com/academic/papers/1614>> [accessed 20.02.12].
6. Derry C.G., Robson J.D., Characterisation and modelling of toughness in 6013–T6 aerospace aluminium alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2008; 490(1–2): 328–334.
7. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials and Design* 2014; 56: 862–871.
8. Elangovan, K., Balasubramanian V. Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints. *Materials Characterization* 2008; 59(9): 1168–1177.

9. Gibson B. T., Lammlein D. H., Prater T. J., Longhurst W. R., Cox C. X., Ballun M. C., Dharmaraj K. J., Cook G. E., Strauss A. M. Friction stir welding: process, automation and control. *Journal of Manufacturing Processes* 2004;16: 56–73.
10. Hasan A. F., Bennett C. J., Shipway P. H., Cater S., Martin J. A numerical methodology for predicting tool wear in Friction Stir Welding. *Journal of Materials Processing Technology* 2017; 241: 129–140.
11. Heinz B., Skrotzki B. Characterization of a Friction Stir Welded Aluminum Alloy 6013. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2002; 33B: 489–498.
12. Huijie Z., Huijie L. Characteristics and formation mechanisms of welding defects in underwater friction stir welded aluminium alloy. *Metallography, microstructure and analysis* 2012; 1:269–281.
13. JanakiR. P., GaneshN. R., Kailash Satish V., Jayachandra R. Internal defect and process parameter analysis during friction stir welding of Al 6061 sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013; 65: 1515–1528.
14. Kadlec M., Ruzek R., Novakova L. Mechanical behaviour of AA 7475 friction stir welds with the kissing bond defects. *International Journal of Fatigue* 2015;74:7–19.
15. Kafali H., Nuran A. Y. Mechanical Properties of 6013–T6 Aluminium Alloy Friction Stir Welded Plate. 13<sup>th</sup> International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology. ASAT–13–MS–14.
16. Kumar R., Chattopadhyaya S., Hloch S., Krolczyk G., Legutko S. Wear characteristics and defects analysis of friction stir welded joint of aluminium alloy 6061–T6. *Eksploatacja i niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2016; 18(1): 128–135.
17. Mishra R.S., Ma Z. Y., Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 2005; 50(1–2): 1–78.
18. Neculescu D.A. The effects of corrosion on the mechanical properties of aluminum alloy 7075–T6. *Universitatea Politehnica Bucuresti Science Bulletin* 2011; 73(1): 223–229.
19. Pantelakis S.G., Chamos A.N., Kermanidis A. A critical consideration of use of Alcladding for protecting aircraft aluminium alloy 2024 against corrosion. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2012;57:36–42.
20. Rai R., De A., Bhadeshia H. K. D. H., Deb Roy T. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining* 2011; 16(4): 325–342.

21. Rodrigues, D. M., Loureiro A., Leitao C., Leal R. M., Chapparo B. M., Vilaca P. Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016–T4 thin welds. *Materials and Design* 2008. In Press, Corrected Proof.
22. Sahlot P., Jha K., Dey G. K., Arora A. Quantitative wear analysis of H13 steel tool during friction stir welding of Cu–0.8%Cr–0.1%Zr alloy. *Wear* 2017; 378–379: 82–89.
23. Starke E.A., Staley J. T. Application of modern aluminium alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Science* 1996;32:131–72.
24. Tarasov S. Y., Rubtsov V. E., Kolubaev E. A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy. *Wear* 2014; 318: 130–134.
25. Thomas W.M., Nicholas E. D., Needhan J. C., Murch M. G., Templesmith P., Dawes C.J. International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application no. 9125978.9, 1991.
26. Troeger L. P., Starke E.A. Microstructural and mechanical characterization of asuperplastic 6xxx aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A* 2000; 277(1–2): 102–113.
27. Vilaça P., Thomas W. Friction stir welding technology. *Advanced Structural Material* 2011; 8: 85–124.
28. Wang D., Xiao B. L., Ni D. R., Ma Z. Y. Friction Stir Welding of Discontinuously Reinforced Aluminum Matrix Composites: A Review. *Acta Metallurgica Sinica* 2014, 27(5): 816–824.
29. Wang J., Su J., Mishra R. S., Xu R., Baumann J. A. Tool wear mechanisms in friction stir welding of Ti–6Al–4V alloy. *Wear* 2014; 321: 25–32.
30. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, 2003, 51(19): 5775–5799.
31. Won–Bae L., Chang–Yong L., Myoung–Kyun K., Jung–Il Y., Young–Jig K., Yun–Mo Y., Seung–Boo J. Microstructures and wear property of friction stir welded AZ91Mg/SiC particle reinforced composite. *Composites Science and Technology* 2006;66:1513–1520.
32. Zhang Y. N., Cao X., Larose S., Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2012; 51(3): 250–261.