Dr hab. inż. Janina ADAMUS, prof. PCz
Politechnika Częstochowska

Częstochowa, 24.11.2015

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Tomasza Gałaczyńskiego**
nt. **„Łączenie cienkościennych struktur lotniczych ze stopów aluminium metodą zgrzewania tarciowego z przemieszaniem"**

Opinię opracowano na podstawie pisma Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej - prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa nr RM-530-23-03-2015 z dnia 16.10.2015r.

Recenzowaną rozprawę doktorską napisano pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Romany Ewy Śliwy z Politechniki Rzeszowskiej.

1. Aktualność podjętego tematu

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje udane podejście do problemu łączenia cienkościennych struktur aluminiowych metodą zgrzewania tarciowego z mieszaniem. Mimo iż, procentowy udział stopów aluminium w budowie statków powietrznych maleje na rzecz kompozytów, to nadal jest on znaczący i kwestie łączenia struktur aluminiowych są wciąż aktualne. Ponieważ niektóre stopy aluminium należą do materiałów trudno spawalnych lub niespawalnych poszukuje się nowych technologii łączenia, a jedną z nich jest zgrzewanie tarciowe z mieszaniem (friction stir welding – FSW). Choć jest to technologia znana od niemal ćwierć wieku, to ciągle jeszcze brak jest wiedzy i doświadczenia w zakresie łączenia blach o grubości mniejszej niż 1,0 mm, a właśnie takie blachy są często stosowane w przemyśle lotniczym i są one przedmiotem rozważań Autora rozprawy doktorskiej. Ponadto z uwagi na fakt, że złącza wprowadzają odkształcenia w łączonych materiałach, które mogą powodować znaczne naprężenia, prowadzące nawet do zniszczenia złącza, to bardzo ważną kwestią jest właściwa analiza deformacji połączeń elementów konstrukcyjnych, bowiem daje ona informacje o tym, jak unikać nieprawidłowości i jak im zapobiegać. W związku z powyższym, tematykę pracy uważam za celową i aktualną z naukowego punktu widzenia, a ponadto wychodzącą naprzeciw oczekiwaniom przemysłu lotniczego. Aktualność podejmowanej tematyki potwierdzają polskie i europejskie programy badawcze finansujące projekty w zakresie nowoczesnych technologii materiałowych stosowanych w przemyśle lotniczym (np. Projekt Kluczowy PKAERO, Program INNOLOT – Innowacyjne Lotnictwo, Program Clean Sky).

Zakres opiniowanej pracy

Z informacji prezentowanej w pracy wynika, że została ona zrealizowana przy wsparciu finansowym Projektu Kluczowego POIG.01.01.02-00-015/08-00 nt.: „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego. Pracę zrealizowano w ramach zadania badawczego ZB15 „Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji

lotniczych". Na podkreślenie zasługuje fakt, że praca została zrealizowana przy użyciu nowoczesnych urządzeń technologicznych i badawczych, co wymagało od Autora rozprawy opanowania niestandardowej metodyki badawczej. Ze względu na przyjętą metodykę badań i liczbę próbek, szczególnie w przypadku badań wytrzymałościowych, można ocenić, że praca została wykonana przy dużym nakładzie czasu i środków finansowych.

Struktura pracy obejmuje dwie zasadnicze części: *teoretyczną,* omawiającą podstawowe zagadnienia związane z łączeniem cienkościennych struktur lotniczych ze stopów aluminium, ze szczególnym uwzględnieniem zgrzewania tarciowego z mieszaniem oraz *badawczą,* obejmującą badania własne połączeń zgrzewanych tarciowo z mieszaniem, w tym badania wytrzymałościowe i ocenę metalograficzną. Ponadto praca zawiera spis treści, wstęp, spis literatury i dwa streszczenia: w języku polskim i angielskim. Objętość pracy wynosi 202 strony. Spis literatury obejmuje 174 pozycje.

Praca rozpoczyna się *wstępem*, w którym autor wprowadza czytelnika w zagadnienie zgrzewania tarciowego z mieszaniem, będącego alternatywą dla konwencjonalnych metod łączenia, takich jak spawanie, zgrzewanie oporowe czy łączenie za pomocą łączników. We wstępie Autor rozprawy podkreśla zalety zgrzewania tarciowego z mieszaniem, które skutkują dużym zainteresowaniem nie tylko firm krajowych, ale również światowych koncernów z branży lotniczej, co w efekcie stanowi genezę podjęcia tematu pracy.

Część pierwsza pracy, tj. teoretyczna obejmuje cztery rozdziały główne. *Rozdział pierwszy* dotyczy analizy metod łączenia i materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym, ze szczególnym uwzględnieniem stopów aluminium. Autor szczegółowo omawia poszczególne elementy strukturalne statków powietrznych, rodzaje konstrukcji kadłuba i w związku z tym możliwe do zastosowania techniki łączenia elementów strukturalnych statków powietrznych. Przedstawione w rozprawie liczne odniesienia do literatury przedmiotu wskazują aktualne problemy związane z łączeniem cienkościennych struktur lotniczych ze stopów aluminium i możliwość ich wyeliminowania poprzez zastosowanie zgrzewania tarciowego z mieszaniem w dwóch wariantach: punktowego - FSSW (Friction Stir Spot Welding) i liniowego – FSW (Friction Stir Welding). *Rozdział drugi* dotyczy analizy metalowej struktury samolotu M28-05, w którym ewentualnie można zastosować oba warianty łączenia: FSW i FSSW. W wyniku krytycznej analizy stanu zagadnienia przedstawionej w *rozdziale trzecim*, wskazującej na liczne usterki montażowe struktur lotniczych za pomocą łączników i możliwość ich wyeliminowania za pomocą tzw. technologii „wolnych od łączników" (Free Fasteners Aerostructures lub Less Fasteners Aerostructures). W *rozdziale czwartym* Autor rozprawy przedstawia cel pracy. Z uwagi na fakt, że aktualny stan badań dla potrzeb przemysłu lotniczego sprowadza się do łączenia za pomocą zgrzewania tarciowego z mieszaniem blach o grubościach 2÷5 mm, a jak wynika z analiz istnieje zapotrzebowanie na łączenie blach o grubościach mniejszej niż 1,0 mm za cel pracy postawiono sobie dokonanie:

- teoretyczno-doświadczalnej analizy możliwości łączenia cienko-ściennych struktur lotniczych ze stopów aluminium metodą zgrzewania tarciowego z mieszaniem (FSW i FSSW) o grubościach 0,6÷2,0 mm,
- analizy charakterystycznych połączeń struktury cienkościennej samolotu, uwzględniającej rodzaj i grubość łączonych materiałów oraz typ połączeń,

- doboru parametrów technologicznych procesu FSW i FSSW dla wytypowanych rodzajów połączeń,
- oceny właściwości mechanicznych i mikrostruktury połączeń FSW i FSSW,
- oceny parametrów technologicznych w oparciu o wyniki badań wytrzymałościowych oraz rozkładu odkształceń plastycznych i występowania pęknięć w złączach FSW/FSSW za pomocą systemu optycznej analizy deformacji ARAMIS firmy GOM.

Część druga pracy, tj. badawcza obejmuje cztery rozdziały główne. *Rozdział piąty* definiuje cel, zakres i program badań. Jako cel utylitarny pracy Autor rozprawy stawia sobie ocenę możliwości stosowania połączeń FSW/FSSW w aluminiowych cienkościennych strukturach lotniczych. Do badań wytypowano trzy rodzaje połączeń: zakładkowe i doczołowe połączenia liniowe FSW oraz zakładkowe połączenia punktowe RFSSW (Refill Friciton Stir Spot Welding). Analizowano połączenia blach aluminiowych serii 2024 T3 oraz 6061 T6 o grubościach 0,8, 1,0 i 1,6 mm. *Rozdział szósty* przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych poszczególnych złączy, analizę rozkładu odkształceń plastycznych w wyniku procesu rozciągania i ścinania połączeń wykonanych metodą liniowego i punktowego zgrzewania tarciowego z mieszaniem oraz ocenę metalograficzną połączeń. W rozdziale tym Autor przedstawił również technologię wykonywania złączy i metodykę badawczą dla każdego rodzaju badań realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej. W *rozdziale siódmym* Autor rozprawy podejmuje dyskusję dotyczącą uzyskanych wyników badań. Analizuje wyniki prób wytrzymałościowych (statycznej próby rozciągania dla złączy doczołowych i próby ścinania dla złączy zakładkowych) oraz dokonuje analizy stanu odkształceń plastycznych dzięki zastosowaniu systemu Aramis. Oceny mikrostruktury złączy dokonano na podstawie obserwacji i zdjęć metalograficznych, wykonanych na próbkach w stanie trawionym przy użyciu mikroskopu metalograficznego NIKON EPIPHOT 300 przy powiększeniu 200x, jak również elektronowego mikroskopu skaningowego. *Rozdział ósmy* jest podsumowaniem pracy, w którym Autor rozprawy stwierdza, że połączenia zakładkowe i doczołowe wykonane metodą zgrzewania tarciowego z mieszaniem materiału mogą stanowić alternatywę dla konwencjonalnych metod łączenia cienkościennych struktur lotniczych ze stopów aluminium. Wyniki swoich badań Autor podsumowuje 12 szczegółowymi wnioskami.

Ocena merytoryczna rozprawy

Postawiony cel pracy, tj. ocena możliwości zastosowania połączeń wykonywanych metodą zgrzewania tarciowego z mieszaniem FSW w aluminiowych cienkościennych strukturach lotniczych, wychodzi naprzeciw oczekiwaniom praktyki przemysłowej, poszukującej bardziej ekonomicznych rozwiązań. Z tego względu podjęcie przez Autora rozprawy badań dotyczących określenia wpływu parametrów procesu na jakość połączeń FSW/RFSSW, których wyniki mogą przyczynić się do skrócenia czasu wytwarzania złączy oraz obniżenia kosztów produkcji przy uzyskaniu dotychczasowych lub wyższych parametrów wytrzymałościowych, stanowi mocne podwaliny do dalszych rozważań. Na podkreślenie

zasługuje fakt, iż postawione przez Autora rozprawy zadanie ma w pełni aplikacyjny charakter, a rezultaty pracy mogą stanowić podstawę dalszych badań przemysłowych. Zaprezentowane w pracy wyniki badań wytrzymałościowych i metalograficznych, w pełni uzasadniają przyjęty temat rozprawy doktorskiej: „Łączenie cienkościennych struktur lotniczych ze stopów aluminium metodą zgrzewania tarciowego z przemieszaniem".

Przedstawiony przez Doktoranta przegląd literatury dotyczy problematyki rozważanej w pracy i umożliwia ocenę aspektów poznawczych i naukowych pracy. Cytowane prace są aktualne i dobrze dobrane, w dużej części są to publikacje z uznanych czasopism. Wśród cytowanych publikacji są również prace, w których Doktorant jest autorem (jeden raz) bądź współautorem (8 razy, w tym jedna praca została opublikowana w czasopiśmie wyróżnionym w Journal Citation Reports (JCR) z tzw. listy A). Jak wynika z przeprowadzonej przez Autora rozprawy analizy stanu zagadnienia brak jest publikacji poświęconych badaniom nad łączeniem blach aluminiowych o grubości mniejszej niż 1,0 mm. Rzetelny przegląd literatury był podstawą zdefiniowania celu pracy (przytoczonego przeze mnie już wcześniej), do realizacji którego przyjęto odpowiedni program badań i analiz.

Podstawą prac badawczych było wykonanie złączy FSW/FSSW, a następnie ocena wytrzymałości złączy na podstawie próby rozciągania i ścinania oraz analiza odkształceń plastycznych przy pomocy systemu Aramis. Autor rozprawy zwraca uwagę, że wykonane liniowe złącza zakładkowe FSW charakteryzują się występowaniem tzw. wypływki, zwłaszcza po stronie spływu zgrzeiny oraz wyjaśnia, które parametry mają wpływ na jej wielkość. Na podstawie analizy wyników Autor stwierdza, że wszystkie złącza osiągnęły zadowalający poziom wytrzymałości na ścinanie w odniesieniu do ekwiwalentnego złącza nitowego lub zgrzewanego metodą rezystancyjną. Niestety zaobserwowano różnice w powtarzalności wyników pomiędzy poszczególnymi próbami wynoszące ponad 30% (str. 179, 189). *Ponieważ Autor nie podaje przyczyny tych rozbieżności proszę o ich wyjaśnianie*. Ponadto Autor zauważa, że spadek nośności złączy FSW jest związany z równoczesnym zwiększeniem prędkości obrotowej i liniowej narzędzia FSW. Niestety Autor nie był w stanie jednoznacznie stwierdzić jaki powinien być stosunek obu prędkości. *Jak według Autora poszczególne parametry procesu wpływają na wytrzymałość na rozciąganie/ścinanie złączy?* Autor bada złącza wykonane za pomocą narzędzi o różnej geometrii, ale nie podaje jednoznacznej ich oceny. *Proszę o wyjaśnienie jak geometria narzędzia wpływa na jakość zgrzeiny.*

Cechą charakterystyczną złączy punktowych, jak zauważa Autor rozprawy, było występowanie pęknięcia po stronie lica zgrzeiny, w strefie wypływki na krawędzi natarcia zgrzeiny oraz to, że w wyniku mimośrodowego obciążenia, spowodowanego budową złącza i różnicą w grubości blach, wszystkie próbki w trakcie próby ścinania ulegały przemieszczeniu (odgięciu).

W przypadku liniowych złączy doczołowych zaobserwowano, że inicjacja pęknięcia występuje w miejscu maksymalnych odkształceń plastycznych poza zgrzeiną, a wytrzymałość na rozciąganie wynosi około 90% wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego.

Dodatkowo Autor zaobserwował na podstawie analizy makro- i mikrostrukturalnej, że złącza o małej wytrzymałości na rozciąganie/ścinanie charakteryzują się występowaniem niewielkiej strefy uplastycznienia łączonych materiałów. W złączach wyróżniano trzy strefy:

1) jądro zgrzeiny o drobnej zrekrystalizowanej (zdrowienie dynamiczne) mikrostrukturze, 2) strefę uplastycznienia, charakteryzującą się silnie odkształconym ziarnem i 3) bardzo cienką (poniżej 0,01 mm) strefę wpływu ciepła. W przypadku występowania nieciągłości materiału Autor zauważa, że lokalizują się one w pobliżu dna zgrzeiny, na granicy strefy wpływu ciepła z materiałem rodzimym.

Z przedstawionej pracy wynika, że Autor posiada dużą wiedzę na temat procesu zgrzewania tarciowego z mieszaniem, doboru parametrów poszczególnych procesów zgrzewania oraz metod badawczych pozwalających na ocenę jakości złączy. W większości zastosowano standardowe lub znormalizowane procedury badawcze zgodnie z ich przeznaczeniem. Wyniki badań nie budzą zastrzeżeń, a ich opis i dyskusja świadczą o znajomości poruszanego problemu. Wyniki badań mikrostruktury są czytelne. Cennym uzupełnieniem i udokumentowaniem badań są zdjęcia ilustrujące miejsca, w których wykonywano badania. *Proszę o wyjaśnienie na jakiej podstawie dobrano geometrię oraz lokalizację próbek do badań wytrzymałościowych i metalograficznych wzdłuż linii zgrzeiny (str. 93, rys. 102-103).*

W podsumowaniu rozprawy doktorskiej zawarto syntezę przeprowadzonych badań i wypunktowano najważniejsze wnioski. Przytoczono i podkreślono wyniki badań potwierdzające słuszność założonego celu rozprawy.

Interesującym zagadnieniem dla technologów projektujących proces technologiczny zgrzewania FSW/FSSW byłoby przedstawienie w sposób zbiorczy (np. w postaci tabeli lub wykresu) *jak poszczególne parametry procesu zgrzewania wpływają na jakość otrzymywanych zgrzein?* W moim przekonaniu we wnioskach końcowych, jak i w dyskusji wyników zabrakło jednoznacznego określenia, *które parametry mają kluczowe znaczenie dla uzyskania dobrych jakościowo zgrzein.*

Chociaż stwierdzam, iż generalnie praca napisana jest poprawnie i ma prawidłową strukturę, to Autor nie ustrzegł się pewnych błędów, które jednak nie mają wpływu na merytoryczną stronę pracy. Są to m.in.:

- *błędy językowe (np. str. 94: jest „z złączami" – powinno być „ze złączami", str. 100, 113, 119, 129, 135 itd.: jest: „z stopu" powinno być: „ze stopu", str. 124, 134: jest „z szczęk" powinno być „ze szczęk", niepoprawna odmiana słowa złącze w dopełniaczu liczby mnogiej), w tym interpunkcyjne,*

- *rozdziały 4 i 5 powinny, według mnie, stanowić jeden rozdział; różnica pomiędzy celem pracy i celem badań własnych jest znikoma, a badania służą realizacji celu pracy,*

- *na str. 65 opisano różnice pomiędzy technologiami FSSW i RFSSW. W celu pracy (str. 85) wyszczególniono zarówno badania połączeń FSSW i RFSSW, natomiast przedstawione wyniki badań dotyczą wyłącznie połączeń RFSSW, prawdopodobnie mamy do czynienia z niekonsekwencją w zastosowanym nazewnictwie,*

- *str. 90 napisano, że „Narzędzia FSW wprowadzano od strony blachy grubszej (2024T4 grubość 1,0 mm). Złącza wykonano z dokładnością ± 1,0 mm.", podobne*

stwierdzenie znajduje się na str. 98 odnośnie złączy RFSSW dla łączenia blach o grubościach: 2,0 i 0,8 mm. Proszę o wyjaśnienie co oznacza stwierdzenie: z dokładnością ± 1,0 mm,

- *str. 91, tab. 10: proszę o wyjaśnienie czym Autor kierował się przy wyborze takich a nie innych parametrów zgrzewania liniowego zakładkowego,*
- *str. 91 tab. 10, 92 tab. 11 – co oznaczają: V1, Z1, V3, Z3,*
- *str.105: jest „Jedną z nich jest natryskanie na mierzony obiekt dwukolorowego stochastycznego wzoru przy pomocy spray'ów" lepiej byłoby: napylanie/nanoszenie/ nakładanie itp.,*
- *rysunki 125-158 Autor podpisuje jako „Wykres przemieszczenie-siła" a w tekście opisuje je jako „Wykres siła –przemieszczenie".*
- *str. 124: napisano „W tabeli 18 zamieszczono wyniki z prób materiału rodzimego do analizy", o jakie próby chodzi?*
- *str. 124 tab. 18 w kolumnie „Nr złącza" podano oznaczenia MR-1, MR-2, MR-3. Czy chodzi o złącze czy o materiał rodzimy, jeśli tak to o jaki materiał chodzi?*
- *w opisie rysunków 197-205, 213-220 powinno być chyba makrostruktura zamiast mikrostruktura,*
- *str. 179: proszę wyjaśnić dlaczego analizując wyniki badań wytrzymałościowych liniowych złączy FSW Autor odnosi je do wytrzymałości punktowych połączeń nitowanych i zgrzewanych. A może chodziło o zgrzeinę punktową RFSSW?*
- *na str.181 Autor klasyfikuje występujące wady w trzech grupach, ze względu na ich rozmiary względem zgrzeiny, tj. wady o małych, średnich i dużych rozmiarach. Szkoda, że Autor nie podaje konkretnych wartości.*
- *str. 182: napisano: „Warstwa aluminium, którą pokryta jest blacha..." - proszę wyjaśnić o jaką warstwę chodzi.*
- *Str. 192, wniosek 5: wytrzymałość na rozciąganie wyrażano jako 14,2 kN, podczas gdy wytrzymałość wyrażamy w MPa.*

Wniosek końcowy

Reasumując, stwierdzam, iż opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Gałaczyńskiego stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie technologii łączenia metali „wolnych od łączników" pozwalając na efektywną poprawę technologii łączenia. Należy podkreślić, że rozprawa ta wychodzi naprzeciw problemom zgłaszanym przez firmy z CZT AERONET – Dolina Lotnicza, a zwłaszcza PZL Mielec. Autor osiągnął założony cel wykazując się znajomością zagadnień technologicznych, nowoczesnej metodyki i technik

badawczych, zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W mojej ocenie przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Gałaczyńskiego w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.