

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.:

***„Analiza wpływu parametrów zgrzewania tarcowego z przemieszaniem na właściwości połączenia zakładkowego blach ze stopu Al 7075-T6”***

Autor: mgr inż. **Rafał Burek**

### Uwagi ogólne

Praca przedstawiona do opinii to interesujące i udane podejście do analizy zjawisk zgrzewania tarcowego z przemieszaniem elementów ze stopu aluminium pokrytych warstwą plateru, w odniesieniu do parametrów sterujących procesem i własności materiału. Autor przedstawił wyniki badań doświadczalnych, które wykazały skuteczność i wiarygodność doboru parametrów procesu, umożliwiającego wykonanie złączy o wysokich właściwościach eksploatacyjnych, możliwych do zastosowania w przemyśle lotniczym, co w pełni uzasadnia temat pracy *„Analiza wpływu parametrów zgrzewania tarcowego z przemieszaniem na właściwości połączenia zakładkowego blach ze stopu Al. 7075-T6”*

W przemyśle lotniczym szuka się ciągle nowych rozwiązań technologicznych, mających na celu poprawę jakości i konkurencyjności i jednocześnie obniżenie kosztów zarówno produkcyjnych, jak i eksploatacyjnych. Konstrukjom lotniczym stawia się wysokie wymagania dotyczące gwarancji długoletniej, bezpiecznej i bezawaryjnej eksploatacji. Badania prowadzi się w zakresie doboru materiałów, jak również ich sposobu łączenia, ponieważ elementy struktur lotniczych muszą się charakteryzować przede wszystkim wysoką wytrzymałością na zmęczenie, a także odpornością na korozję. Wśród nowych trendów w technologii łączenia elementów konstrukcji jest zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem, którym jest duże zainteresowanie i z dużym powodzeniem stosuje się do łączenia struktur samolotów.

W konstrukcji samolotów, mimo coraz większego udziału materiałów kompozytowych, w dalszym ciągu duży udział mają stopy aluminium, między innymi ze

względu na wysokie własności mechaniczne, jak również łatwość wytwarzania i podatność do przeróbki plastycznej. Eksploatacja statków powietrznych odbywa się w warunkach zmiennej temperatury i różnej wilgotności, które sprzyjają procesom korozyjnym. Przeciwdziałanie korozji jest nieodzowną częścią procesu produkcyjnego ze względu na wysokie wymagania eksploatacyjne. Skuteczną metodą poprawiającą właściwości antykorozyjne jest platerowanie, które jednocześnie utrudnia proces łączenia. Zasadne jest więc podjęcie tematyki łączenia metodą FSW elementów ze stopów aluminium, w aspekcie doboru parametrów procesu i ich wpływu na własności połączeń.

Autor w swojej rozprawie doktorskiej podjął badania nad zastosowaniem zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) do wykonania połączeń zakładkowych elementów ze stopu aluminium Al 7075-T6 pokrytych warstwą plateru.

Temat rozprawy jest interesujący i aktualny, a znaczenie praktyczne zaprezentowanej przez Autora problematyki rozprawy jest ważne dla przemysłu lotniczego. Analizie poddano przydatność tej metody łączenia w produkcji statków powietrznych.

### **Zakres pracy**

Praca składa się z sześciu rozdziałów, spisu literatury oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Dodatkowo praca uzupełniona jest pięcioma załącznikami.

W krótkim wstępie poprzedzającym rozdział pierwszy zamieszczono ogólną charakterystykę technologii łączenia stosowanych w lotnictwie i genezę podjęcia tematu pracy.

Rozdział pierwszy na bazie danych literaturowych, zawiera opis metod łączenia struktur lotniczych, materiałów stosowanych do ich budowy oraz narzędzi.

W rozdziale drugim podano cel i zakres pracy, uzasadnienie postawionego celu i zakresu badań w oparciu o dane literaturowe oraz plan badań własnych. Sformułowano tezę pracy.

Rozdziały trzeci i czwarty zawierają dobór narzędzia i materiału. Wyczerpująco przedstawiono metodykę i plan badań własnych. Doktorant skupił się na analizie wpływu poszczególnych parametrów procesu i przeprowadził dobór parametrów w aspekcie uzyskania jak najlepszych właściwości mechanicznych. Prowadzone badania wstępne wyczerpująco zostały udokumentowane wynikami badań doświadczalnych.

Wyniki badań zasadniczych zamieszczono w rozdziale piątym. Na podstawie wyników badań wstępnych przyjęto do badań parametry sterujące procesem i określono ich

wpływ na właściwości mechaniczne w procesie zgrzewania metodą FSW na zakładkę cienkich blach platerowanych. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników.

Rozdział szósty zawiera wnioski i podsumowanie przeprowadzonych badań oraz kierunek dalszych badań nad technologią FSW.

Pracę o objętości 132 stron zakończono spisem literatury zawierającym 161 pozycji, dołączono 5 załączników zawierających wyniki badań doświadczalnych oraz streszczenia pracy w języku polskim i angielskim.

Zakres pracy stanowi spójną całość. Przegląd literatury dotyczy zagadnień rozwiązywanych w pracy. Większość informacji dobrze przygotowuje do analizy wyników badań własnych. Odczuwa się natomiast brak danych literaturowych, dotyczących bezpośrednio problematyki zgrzewania stopów aluminium metodą FSW, jak również innymi metodami. Takie prace są i zawierają problemy podobne, zarówno w zakresie teorii, jak i badań doświadczalnych. Przedstawiona za literaturą analiza pokrewnych zagadnień z całą pewnością umożliwiłaby bardziej ocenę aspektów poznawczych i naukowych tej pracy.

Na uwagę zasługuje przejrzyste prowadzony plan badań własnych, zarówno wstępnych, jak i zasadniczych oraz duża liczba wykonanych prób i pomiarów. Świadczy to o dużym zaangażowaniu Doktoranta w badaniach i dobrym rozeznaniu problematyki badawczej.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Problematyka przedstawiona w pracy jest istotna z naukowego i użytkowego punktu widzenia. Doktorant udowodnił w pracy, zamieszczając bogaty materiał badawczy, że zastosowanie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem może być zastosowane do łączenia cienkościennych elementów ze stopu aluminium, pokrytych warstwą plateru. Celem potwierdzenia postawionej tezy pracy Doktorant wykonał bardzo różnorodne badania, dobrze je udokumentował i podsumował ich analizą. Wykazał na podstawie połączeń zakładkowych elementów platerowanych ze stopu aluminium Al 7075-T6, że po zastosowaniu odpowiednich parametrów procesu uzyskuje się złącza o wysokich właściwościach eksploatacyjnych, spełniających warunki stawiane konstrukcjom lotniczym. Realizacja wymagała wielu badań doświadczalnych. Doktorant wykonał dużą liczbę badań, opracował je, a wyniki zamieścił w pracy w postaci wykresów i tabel. Część wyników zamieścił w załącznikach.

Na uwagę zasługują starannie zaplanowane i przeprowadzone badania wstępne, w trakcie których został przebadany wpływ różnych parametrów procesu na własności mechaniczne i zachowanie materiału. Przedstawiona za literaturą analiza istotności wpływu

parametrów według programu statystycznego wraz z badaniami doświadczalnymi pozwoliły określić stopień wpływu poszczególnych parametrów na efekt końcowy.

Na podstawie badań wstępnych Doktorant przyjął do dalszych badań dwa parametry, prędkość obrotową narzędzia i prędkość zgrzewania, jako parametry mające kluczowe znaczenie na przebieg procesu zgrzewania. Przy wyborze kombinacji tych parametrów jako kryterium wyboru zostały przyjęte własności mechaniczne oraz jakość złącza. Analiza uzyskanych wyników potwierdza prawidłowość przyjętych przez Doktoranta zarówno parametrów, jak podejścia badawczego. Zagadnienie jest złożone, bowiem mamy do czynienia z cienkimi elementami ulegającymi deformacji na skutek działania temperatury i pokryciem antykorozyjnym o innych właściwościach niż materiał rodzimy. W przypadku zgrzewania blach platerowanych, znajdujący się plater na powierzchni blachy jest dużym utrudnieniem w osiągnięciu połączenia wolnego od wad. Badania zmęczeniowe wykazały, że główną przyczyną osłabienia połączenia i miejscem inicjacji zniszczenia jest nagromadzona warstwa plateru, co potwierdzają obserwacje mikrostrukturalne przełomów zmęczeniowych.

Realizacja poszczególnych zadań była podporządkowana ogólnemu celowi o charakterze utylitarnym, a mianowicie wykonanie połączenia o właściwościach, które spełnia oczekiwania konstruktorów pojazdów lotniczych. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano cenne informacje oraz wytyczne do poprawnego prowadzenia procesu zgrzewania. Na uwagę zasługuje fakt, że do badań nad procesem zgrzewania przyjęto klasyczne narzędzie handlowe o walcowej geometrii trzpienia. W ten sposób wykazano z jednej strony możliwość praktycznego zastosowania metody do zgrzewania cienkich blach stosowanych w lotnictwie, z drugiej zaś strony pozwoliło na klarowną ocenę wpływu dwóch istotnych parametrów procesu. To inżynierskie podejście nie jest pozbawione również aspektów naukowych, które przejawiają się podczas badań i analizy wyników. Dotyczą zarówno procesu, jak i zachowania materiału. Szkoda, że słabo wyeksponowane. Przedstawione w pracy wyniki badań, uzyskane na drodze drogich i czasochłonnych prac mogą posłużyć nie tylko jako wytyczne dla technologów i konstruktorów, ale mogą stanowić cenny materiał i bazę danych dla symulacji komputerowych. Największą zaletą metody FSW jest łączenie metali, w stanie stałym, czyli w temperaturze znacznie poniżej temperatury topnienia materiału elementów zgrzewanych, polegające na wymieszaniu stref uplastycznionych łączonych elementów, gdzie wyjaśnienie tego mechanizmu leży na gruncie mechaniki materiałów i metaloznawstwa. Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem jest optymalnym procesem łączenia metali nieżelaznych o niskiej temperaturze topnienia oraz metodą tworzenia mieszanych złączy metalicznych. Przedstawiona praca wychodzi naprzeciw

oczekiwaniom przemysłu lotniczego. Producenci samolotów i śmigłowców wciąż poszukują m.in. alternatywnych metod łączenia metalowych, cienkościennych struktur lotniczych, mając na uwadze zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości połączenia, zmniejszenia masy konstrukcji, obniżenie pracochłonności oraz obniżenie kosztów produkcji.

### **Uwagi**

Struktura rozprawy jest prawidłowa. Praca jest napisana czytelnie, zdarzają się jednak drobne potknięcia edytorskie. Dla czytelności pracy w tematach głównych, lub w pierwszym wierszu pod tematem, oprócz powszechnie znanych skrótów nazw metod zgrzewania zaleca się podanie pełnej ich nazwy oraz nazwy angielskiej, skąd pochodzą te skróty. Nasuwają się również uwagi dotyczące niektórych przedstawionych wyników badań. W analizie wyników zbyt mało jest powołań i odniesień do konkretnych wyników badań. Lokalnie podane są co prawda wnioski wypływające z porównania otrzymanych wielkości, ale brak jest odniesienia dla ich interpretacji oraz porównań potwierdzających formułowane wnioski. Niektóre rysunki i tabele są słabo objaśnione w tekście. Pojawiają się nieścisłości w opisach i interpretacji, nie wyjaśniają tego również jednoznacznie ich podpisy. Przykładowo: biorąc pod uwagę podpisy tabel 4.3 i 4.5 nasuwa się pytanie czym się różnią. Dla wyjaśnienia czytelnik musi każdorazowo odszukiwać schemat oznaczeń. Dotyczy to niektórych tabel, jak i rysunków czy obrazów mikrostruktury, np. załącznik 2, wyniki badań metalograficznych są przedstawione przecież w celu interpretacji wpływu prędkości obrotowej narzędzia na kształt i wielkość zgrzeiny. Takie informacje powinny znaleźć się w podpisie. Taka informacja ułatwiłaby analizę wyników. Rysunki 4.8. i 5.3 są nieczytelne.

Doktorant w pracy różnie opisuje wyniki prób wytrzymałościowych. Analogiczne wykresy mają różne podpisy por. 5.8, 5.9 i odpowiednie wykresy zamieszczone w załączniku 1. W przypadku tych samych wielkości powinny być analogiczne podpisy, pomimo, a może zwłaszcza dlatego, że dotyczą tych samych wielkości ale w tabeli i na rysunku (por. np. rys. 5.8 i tabela 5.2). Nasuwa się sugestia, że w tabelach, w których zamieszczono wyniki badań wytrzymałościowych dobrze byłoby podać obok siły, wielkość wytrzymałości materiału  $R_m$ , przynajmniej odpowiednio dla siły średniej, ponieważ tą wielkością posługuje się Doktorant w analizie wyników, jak również porównuje z wielkościami podanymi w normie. Różne są też oznaczenia osi na wykresach otrzymanych ze statycznej próby rozciągania, gdzie według normy są odpowiednio wydłużenie (przemieszczenie) i siła. W przypadku korzystania z danych literaturowych (str.63., wzór 3)

zamiast skierowania do źródła, korzystniej było podać tabelę 7, lub przynajmniej wypis przykładowych wielkości.

Szczegółowa analiza rozprawy przyniosła trochę uwag szczegółowych, nie wpływających jednak na ocenę ogólną rozprawy.

### **Wniosek końcowy**

Praca doktorska mgra inż. Rafała Burka stanowi wartościowy wkład zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i użytecznego do rozwoju nowych technologii łączenia metali i stopów metali. Doktorant sformułował tezę pracy, przeprowadził bardzo dużą liczbę prób i zgromadził bardzo bogaty materiał badawczy. Wykazał szeroką wiedzę w zakresie prowadzonych badań i podał ciekawe wnioski.

Podjęta przez Doktoranta tematyka jest ciekawa i aktualna i stanowi, co trzeba podkreślić, podstawy do zastosowania praktycznych wyników badań w przemyśle. Należy mieć nadzieję, że przedstawione w pracy wyniki badań zainteresują producentów konstrukcji i technologów, zwłaszcza w przemyśle lotniczym.

W mojej ocenie, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Burka spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w świetle obowiązującej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i wnioskuję jej dopuszczenie do publicznej obrony.

*Wielhorski*