

## OCENA

pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Obrockiego  
pt. „Prognozowanie trwałości łopatek sprężarki silników lotniczych z  
zastosowaniem próby zmęczeniowej i numerycznej analizy obrazów ich  
uszkodzeń”

Opinię niniejszą wykonałem na podstawie pisma Dziekana Wydziału  
Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż.  
Aleksandra Mazurkowa prof. PRz w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny  
Inżynierii Materiałowej z dnia 8.07.2020 roku.

### 1. Charakterystyka ogólna pracy

Opiniowana praca powstała pod kierunkiem prof. Jana Sieniawskiego jako promotora oraz dr inż. Barbary Kościelniak jako promotora pomocniczego i została zrealizowana w ramach projektu LIDER 5 pt. „Analiza obrazu w klasyfikacji uszkodzeń łopatki sprężarki silników lotniczych i prognozowanie ich żywotności”

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy problematyki o istotnej wartości poznawczej i praktycznej związanej z wprowadzeniem nowej metody wizyjnej do kontroli okresowej silników lotniczych, co pozwoli na ustalenie zależności pomiędzy obrazem uszkodzenia łopatki sprężarki i jej rzeczywistymi właściwościami mechanicznymi.

Olbrzymi rozwój lotnictwa w ostatnich latach prowadzi do poszukiwania nowych innowacyjnych rozwiązań spełniających najwyższe standardy bezpieczeństwa. Jednym z newralgicznych zagadnień w tym względzie jest bezpieczna eksploatacja silników, a w szczególności uszkodzenia łopatek turbin. Łopatki sprężarek silników lotniczych pracują jak wiadomo, w warunkach obciążeń dynamicznych i narażone są na zmęczenie w warunkach dużej i małej liczby cykli. Uszkodzenia łopatek turbin powstające w wyniku uderzenia ciała obcego w wirującą łopatkę, może doprowadzić do znaczącego obniżenia ich wytrzymałości zmęczeniowej, a w konsekwencji do awarii silnika. Wynika z tego, że odpowiednia wcześniejsza identyfikacji uszkodzeń łopatek sprężarki

i ich wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma decydujące znaczenie podczas kontroli okresowej silników. Motywacją Doktoranta do podjęcia badań nad doskonaleniem metod badawczych podczas przeglądów okresowych silników lotniczych jest olbrzymi postęp naukowy jaki dokonał się w obszarze analizy obrazu, a w szczególności nowoczesne algorytmy jego przetwarzania, co pozwala na uzyskanie dokładnych informacji dotyczących kształtu i wielkości ewentualnych uszkodzeń badanych łopatek.

Dostępne – zarówno krajowe jak i zagraniczne dane literaturowe traktują to zagadnienie w dość ograniczonym zakresie, aczkolwiek dostępne są publikacje dotyczące badań z wykorzystaniem analizy obrazu w motoryzacji, budowie statków, medycynie czy też w różnego rodzaju urządzeniach elektronicznych. Brak jest jednak opracowań o charakterze kompleksowym, pozwalającym na optymalizację rozwiązań dla różnych zastosowań. Z tego tytułu problematyka badawcza podjęta przez Doktoranta jest nadal aktualna, co przekłada się na zauważalne walory naukowe, a w szczególności użyteczne recenzowanej rozprawy doktorskiej.

## **2. Ocena pracy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Obrockiego składa się z 8 rozdziałów, liczących łącznie 106 stron o układzie tradycyjnym obejmującym część teoretyczną i część badawczą, dyskusję wyników, wnioski i bibliografię. Przegląd literatury przedmiotowej (rozdział 2) obejmuje 34 strony, a do jego opracowania jak i wyników badań własnych skorzystano ze 111 pozycji literaturowych, w tym 3 publikacji w których Doktorant jest współautorem. Dobór i wykorzystanie materiałów źródłowych nie budzi większych zastrzeżeń, aczkolwiek niektóre z tych pozycji są dzisiaj już mało aktualne. Brak jest również układu alfabetycznego bibliografii co utrudniło Recenzentowi jej analizę. Trzeba jednocześnie przyznać, że Doktorant opracowując przegląd literatury skupił się tylko na tych zagadnieniach, które są istotne z punktu widzenia tematyki badawczej recenzowanej pracy doktorskiej, co niewątpliwie dobrze świadczy o umiejętnej analizie dostępnych pozycji bibliograficznych przeprowadzonej przez mgr inż. Wojciecha Obrockiego.

Układ pracy oraz procedura jej realizacji są przejrzyste (oprócz metodyki oceny uszkodzeń łopatek z zastosowaniem algorytmów wspomagających analizę obrazu, do czego recenzent odnosi się w dalszej części opinii), a strona redakcyjna jest na dobrym poziomie graficznym. Starannie i czytelnie opracowane są wyniki badań, ale brak było Recenzentowi opisu na wstępie stosowanych symboli, skrótów i oznaczeń, co znacznie ułatwiłoby zrozumienie jej treści. Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest napisana bardzo poprawnym językiem, (co niewątpliwie jest zasługą promotora pracy), aczkolwiek zdarzają się Doktorantowi lapsusy językowe takie jak n.p. "naprężenia wewnętrzne", ( a zna Pan naprężenia zewnętrzne !?). W tym

konkretnym przypadku chodzi oczywiście o naprężenia własne. Występują również pomyłkowe oznaczenia kolejnych numerów zależności ( np. str.82 zależności 7 i 8 – a powinno być 9 i 10).

Rozdział 1 to wprowadzenie, w którym Doktorant uzasadnił celowość podjęcia badań będących tematem przedstawionej do oceny pracy doktorskiej. W rozdziale 2 mgr inż. Wojciech Obrocki omawia charakterystyki silników lotniczych i powstawania w nich uszkodzeń w wyniku zassania obcego ciała oraz metodykę kontroli i częstość przeglądu silników lotniczych wraz z przyczynami pękania łopatek. W osobnym podrozdziale Doktorant omawia analizę obrazu w zastosowaniu do pomiaru obiektów fizycznych.

Po przeanalizowaniu cytowanej literatury, część teoretyczną Doktorant kończy krótkim podsumowaniem w którym formułuje cel i zakres pracy, w formie określonych zadań badawczych. **Celem pracy była próba wprowadzenia nowej metody wizyjnej do kontroli okresowej silników lotniczych, jak również ustalenie stopnia użyteczności algorytmów automatycznej analizy obrazu do klasyfikacji uszkodzeń łopatek sprężarki oraz prognozowania ich oddziaływania na inicjację i propagację pęknięć zmęczeniowych w dalszej eksploatacji.** Niestety Doktorant nie sformułował tezy naukowej pracy, co znacznie ułatwiło by jej analizę.

Do zrealizowania założonego celu pracy mgr inż. Wojciech Obrocki sformułował zadania badawcze obejmujące badania wytrzymałości zmęczeniowej łopatek uszkodzonych i nieuszkodzonych, badania makroskopowe i fraktograficzne przełomów łopatek oraz ocenę metod numerycznej analizy obrazu. Doktorant zaprojektował i wykonał specjalistyczne stanowisko do wykonywania modelowych uszkodzeń łopatek, stanowisko do pomiaru głębokości uszkodzeń na krawędzi łopatek oraz stanowisko badawcze do próby zmęczeniowej łopatek, co bardzo dobrze świadczy o Jego umiejętnościach naukowo-technicznych. Na tak wykonanych stanowiskach możliwe było przeprowadzenie badań, aby zrealizować zamierzony cel pracy.

Doktorant przeprowadził badania na łopatkach 1 stopnia sprężarki silnika turbośmigłowego TWD-10B/PZL-10S stosowanego w samolocie AN-Bryza. Wybór ten był jak najbardziej uzasadniony, ponieważ ciało obce dostające się do silnika w czasie startu i lądowania samolotu, powoduje najczęściej uszkodzenia właśnie łopatek 1 stopnia sprężarki, co zostało przez Doktoranta uzasadnione w sposób logiczny w podrozdziale 4.2. Mgr inż. Wojciech Obrocki wykonał badania zmęczeniowe dla nieuszkodzonych i uszkodzonych łopatek z karbem w kształcie litery V o głębokości od 0,099 mm do 3 mm i określił wartości naprężenia zredukowanego dla 23 przypadków położenia uszkodzenia na krawędzi natarcia łopatki oraz naprężenie niszczące łopatkę i jej teoretyczną wytrzymałość zmęczeniową. Wszystkie w/w badania Doktorant przeanalizował i zinterpretował prawidłowo stwierdzając, że wytrzymałość zmęczeniowa łopatek modelowych uszkodzonych karbem w kształcie litery V, zależy od położenia strefy uszkodzenia i jego głębokości oraz jest mniejsza od

wytrzymałości łopatek nieuszkodzonych. To ostatnie stwierdzenie Szanowny Panie Doktorancie nie wymagało przeprowadzenia żadnych badań i jest ono oczywiste !!! Mam jako recenzent zastrzeżenia do metodyki i analizy wyników z zastosowaniem algorytmów analizy obrazu i proszę o ustosunkowanie się do nich w czasie publicznej obrony. I tak:

1. Liczba  $M \times N$  nie oznacza rozdzielczości, lecz rozmiar obrazu (str.33).
2. Brak jest określenia jednoznacznego schematu który pokazywał by autorską metodę przetwarzania i analizy obrazu w przypadku występujących uszkodzeń łopatek, (kolejność algorytmów z uzasadnieniem).
3. Dlaczego obszary analizy uszkodzonych łopatek są różnie położone i o różnych wielkościach ?!
4. Na rys. 59 i 60 Doktorant przedstawił zupełnie inne strategie analizy obrazu. Dlaczego zasady transformaty Hougha Doktorant nie zastosował dla uszkodzenia przedstawionego na rys. 59 jak w przypadku rys. 61 ?
5. Wyniki przedstawione na rys. 60 i 65 winny być analizowane równolegle, aby można było jednoznacznie stwierdzić, czy Doktorant wykorzystuje ostatecznie wymiar fraktalny (rys.65), czy też funkcję pochodną (rys.60).
6. Jak wyznaczono bazę pomiarową w przypadku rys.65c?
7. Na str.82 w zależności 8 (powinno być 10), określenia  $x$  (wartość pomiaru metodą numeryczną) i  $x_0$  (wartość pomiaru za pomocą mikroskopu), są dla recenzenta niezrozumiałe. Jak je wyznaczano?
8. Recenzent nie rozumie, czym kierował się Doktorant przy wyborze strategii w wyborze kolejnych algorytmów. Czy nie powinno najpierw określić się wpływu filtracji – wybrać najlepszą opcje i przejść następnie do binaryzacji ?!
9. Jak może średni błąd pomiaru wynosić powyżej 100% (rys. 101)?

W wyniku zastosowanych algorytmów Doktorant stwierdził, że największy stopień przydatności do identyfikacji uszkodzeń łopatek ma dwuprogowa binaryzacja ze wstępną filtracją nieliniową metodą Perony-Malika, z czym recenzent po analizie wyników badań całkowicie się zgadza. Niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie na podstawie uzyskanych wyników badań demonstratora służącego do oceny stanu uszkodzenia łopatek, a w rezultacie podjęcia decyzji co do możliwości dalszej pracy łopatki, jej naprawy lub niedopuszczenie silnika do dalszej eksploatacji.

Oceniając aspekt merytoryczny pracy stwierdzam, że przyjęta metodyka badań bazuje na współczesnej wiedzy i nowoczesnym warsztacie eksperymentów i obliczeń. Wyniki badań dotyczące analizy obrazu Doktorant przedstawił w dość zagmatwany sposób, co nie podważa faktu zrealizowania założonego celu pracy.

Wniosków końcowych potwierdzających zrealizowanie celu pracy Doktorant sformułował 5.

Do walorów pracy w szczególności zaliczam:

1. Zaprojektowanie i wykonanie trzech autorskich i oryginalnych stanowisk badawczych służących do zrealizowania celu pracy.
2. Wykazanie, że wytrzymałość zmęczeniowa uszkodzonych łopatek zależy od położenia strefy uszkodzenia i jej głębokości.
3. Ustalenie, że zmniejszenie częstotliwości drgań własnych łopatki podczas próby zmęczeniowej umożliwia poprawne ustalenie początku procesu jej pęknięcia.
4. Opracowane i przyjęte przez Doktoranta algorytmy do analizy obrazu potwierdziły możliwość ich zastosowania do oceny stanu łopatek, przy czym największą skuteczność wykrywania uszkodzeń posiada algorytm dwuprogowej binaryzacji obrazu ze wstępną filtracją nieliniową Perony-Malika.
5. Opracowanie demonstratora służącego do pomiaru uszkodzeń łopatek sprężarki silnika lotniczego w oparciu o uzyskane wyniki badań z zastosowaniem analizy cyfrowej ich obrazu, co może pozwolić na zastosowanie go do opracowania standardów w przeglądach traktów gazowych silników lotniczych.

### 3. Ocena końcowa rozprawy

Pomimo przytoczonych uwag, recenzowana rozprawę oceniam pozytywnie. Zawiera ona oryginalne rozwiązanie określonego, złożonego zagadnienia naukowego i aplikacyjnego. Doktorant w pełni zrealizował zakres merytoryczny pracy, wykazując się przy tym umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych i znajomością nowoczesnych technik pomiarowych, a wyniki badań opracowane są na dobrym poziomie edycyjnym i merytorycznym oprócz dość dziwnego układu pracy w części dotyczącej analizy obrazu.

**Stwierdzam więc, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odnośne Ustawy i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Wojciech Obrockiego do publicznej obrony.**

