

Recenzja

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

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej,
pismo nr RM-530-16-02/19/2020 z dnia 15.07.2020 r.,
wynikające z uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Rzeszowskiej
z dnia 08.07.2020 r.

1. Uwagi ogólne

Transport lotniczy, zarówno cywilny jak i wojskowy, należy w ostatnim dziesięcioleciu do najbardziej rozwijających się gałęzi logistyki, zajmujących się przemieszczaniem ludzi i towarów, i – co bardzo ważne - należy do najbezpieczniejszych form transportu. Bezpieczeństwo w transporcie lotniczym zależy od kilku kluczowych czynników: czynnika ludzkiego (poziom wykształcenia i profesjonalizm pilotów, mechaników lotniczych i naziemnej obsługi lotów); poziomu technicznego elementów statków powietrznych, w tym w szczególności silników i ustrojów nośnych samolotów; czynników losowych, w tym często nieprzewidywalnie i drastyczne zmiennych warunków pogodowych. Rozwój nauki w wielu dziedzinach, i związany z tym postęp w rozwoju współczesnych metod i narzędzi pozyskiwania i przetwarzania danych, umożliwia tworzenie profesjonalnych systemów, wspomagających szybką i pewną diagnostykę krytycznych podukładów samolotów, w tym pojawiania się i rozwoju ich uszkodzeń podczas eksploatacji, mających bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo lotu.

Jednymi z szczególnie istotnych elementów turbinowych silników samolotowych, decydujących o bezpieczeństwie ich działania, są dyski łopatek sprężarki silnika. Kontrola stanu łopatek sprężarki, wynikającego zarówno z ich zużycia eksploatacyjnego, w tym zużycia zmęczeniowego, jak również z uszkodzeń spowodowanych uderzeniem łopatki w ciało obce, które dostało się do komory sprężarki, staje się kluczowym elementem procesu podnoszenia stopnia bezpieczeństwa lotów.

Doktorant, dostrzegając wymienione aspekty związane z bezpieczeństwem transportu lotniczego, podjął się zadania opracowania użytecznego narzędzia, wspomagającego zobiektywizowany proces skutecznej oceny stanu uszkodzeń łopatek sprężarki turbinowych silników lotniczych, z zastosowaniem autorskich algorytmów komputerowej analizy obrazu.

2. Ocena rozprawy

Autor zawarł swoją pracę na 106 stronicach i podzielił ją na 7 głównych rozdziałów i 27 podrozdziałów, uzupełnionych wykazem 111 pozycji literatury. Najstarsza cytowana publikacja była wydana w 1996 roku, najnowsze natomiast - w roku 2019. 60% cytowanych pozycji literatury jest angielskojęzycznych. Cztery z cytowanych pozycji, związanych z problematyką rozprawy, są współautorstwa Doktoranta. Ponadto w pracy Autor zamieścił 104 rysunki, 11 tablic oraz 8 ponumerowanych zależności matematycznych.

Po krótkim, dwustronicowym wprowadzeniu, Doktorant przystąpił do analizy literatury, dotyczącej tematyki rozprawy, poświęcając jej około 40% całej pracy. Zaczynając od ogólnej charakterystyki silników lotniczych, przywołanej na podstawie publikacji firmy Rolls-Royce sprzed ćwierć wieku, Doktorant, na podstawie prac z lat 2009 – 2017, krótko przypomniał budowę łopatki wirnika sprężarki, a następnie, na podstawie dwóch prac, z 2010 i 2011 roku, opisał czynniki i przypadki uszkodzeń silników lotniczych, powstałych w wyniku zassania ciała obcego, a na podstawie prac z lat 2016 - 2018 zilustrował częstotliwość uszkodzeń silników lotniczych obcym ciałem, w funkcji fazy lotu. Prace z lat 2002 - 2018 były podstawą przywołania klasyfikacji ciał obcych na pasach startowych, przyczyn pęknięcia łopatek sprężarek, analiz zjawiska uderzenia ciała obcego w łopatkę (w tym praca [32] ze spisu literatury, z roku 2018, współautorstwa Doktoranta) i wpływu głębokości uszkodzenia na wytrzymałość zmęczeniową łopatek. Publikacje z lat 1998 - 2018 były źródłem przypomnienia znanych procesów dokonywania przeglądów stanu sprężarek silników lotniczych, w tym za pomocą boroskopu, fiberoskopu i wideoskopu i endoskopu.

Dziesięciostronicowy podrozdział 2.4 dysertacji Doktorant poświęcił przeglądowi literatury (głównie z roku 2019) z obszaru analizy obrazu w zastosowaniach do pomiaru parametrów obiektów fizycznych. Autor dysertacji scharakteryzował przetwarzanie obrazów cyfrowych, w tym przekształcenia punktowe, przekształcenia kontekstowe, filtrację liniową, operacje morfologiczne, segmentację obrazu, a także elementy analizy obrazu, zaimplementowane w środowisku MATLAB.

Dokonany przegląd literatury dokumentuje poziom zorientowania Doktoranta w obszarze tematyki pracy, osiągnięty w wyniku Jego szczegółowych studiów obecnego stanu wiedzy w kraju i na świecie w tym zakresie, i z pewnością stanowi dobre wprowadzenie do przyjęcia założeń, celu i zakresu pracy. Moją wątpliwość budzi jednak nieco przewymiarowana proporcja 40% analizy literaturowej do 60% zasadniczej, autorskiej części pracy. Niemniej, Doktorant, na tej podstawie uznał, że *„metody przetwarzania i analizy obrazów, ze względu na swoją różnorodność i uniwersalność zastosowania, można wprowadzić i stosować do opracowania systemu wspomagającego diagnostykę uszkodzeń łopatek turbosprężarki silników lotniczych”*, i zdecydował o podjęciu próby utworzenia nowej, autorskiej metody wizyjnej, mogącej służyć jako narzędzie do okresowej kontroli stanu łopatek turbinowych silników lotniczych. Doktorant postawił również przed sobą cel dokonania oceny stopnia użyteczności utworzonych algorytmów automatycznej analizy obrazu do klasyfikacji stopnia uszkodzenia łopatek sprężarki, a także, co bardzo ważne, do

prognozowania jego wpływu na inicjowanie i propagowanie pęknięć zmęczeniowych w procesie dalszej eksploatacji tak uszkodzonych elementów. Ostatnim zadaniem postawionym przez Doktoranta przed swoimi badaniami była próba sformułowania i sformalizowania związku pomiędzy utworzonym obrazem uszkodzonej łopatki sprężarki, a jej bieżącym poziomem wytrzymałości i możliwości ewentualnej dalszej, bezpiecznej eksploatacji.

Na stronie 43. 106-stronicowej pracy Doktorant rozpoczął czwarty (z siedmiu) rozdział dysertacji, pod nazwą „*Badania własne*”. W podrozdziale 4.1 określił On obiekt badań, jako łopatki pierwszego stopnia sprężarki silnika turbośmigłowego TWD-10B/PZL-10S, stanowiącego napęd samolotu AN-28 Bryza. Doktorant zapisał podstawowe cechy geometryczne, tworzywowe i wytrzymałościowe łopatki, dane techniczne silnika TWD, a także podstawowe dane odnośnie do samolotu AN-28 Bryza. Wybór łopatek pierwszego stopnia sprężarki Doktorant uzasadnił największą częstotliwością występowania uszkodzeń tych łopatek podczas startu i lądowania samolotu. Bardzo istotny podrozdział tego rozdziału, to podrozdział 4.3, w którym Autor sformułował przyjętą metodykę badań. W tym obszarze, w podrozdziale 4.3.1 Doktorant zdefiniował grupy uszkodzeń łopatek. Zbudował modele geometryczne łopatki pierwszego stopnia sprężarki w środowisku Siemens NX i przeprowadził ich dyskretyzację do obliczeń wytrzymałościowych w pakiecie ANSYS. Dokonując podziału łopatki na strefy od A do E, w funkcji jej długości, Doktorant zamieścił w pracy kolorowe mapy rozkładu naprężeń zredukowanych w przyjętych strefach w łopatce, z zamodelowanym uszkodzeniem w środku pióra na jej krawędzi (rys. 44 – 46). Mapy zostały wyskalowane w MPa, natomiast Doktorant nie podał podstawowych parametrów wejściowych do procesu obliczeń wytrzymałościowych, którymi są warunki brzegowe (więzy w miejscu podparcia łopatki) oraz sposób i parametry jej obciążenia, przez co uzyskane wyniki ilościowe nie są możliwe do oceny.

W podrozdziale 4.3.2 Doktorant opisał i zilustrował sposób przygotowania rzeczywistych łopatek do przeprowadzenia przez Doktoranta prób zmęczeniowych, a także ze stanowiskiem do wprowadzania do łopatek założonych postaci ich uszkodzenia, wraz ze stanowiskiem do mikroskopowych badań wystąpienia mikropęknięć w pobliżu wprowadzanego uszkodzenia. Próby zmęczeniowe zostały przeprowadzone poprzez wzbudzenie, za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego, drgań rezonansowych łopatki, oklejonej 63 tensometrami, rozmieszczonymi w strefach „A” do „I” łopatki, po 7 tensometrów w każdej strefie. Podczas próby osiągnęto odkształcenia łopatek, odpowiadające wartościom naprężeń w strefie referencyjnej „C5” (rys. 49), na poziomie 200 MPa. Analiza uzyskanych wyników obliczeń MES i badań doświadczalnych rzeczywistych łopatek wskazała na wystąpienie maksymalnych naprężeń w strefie „D” (rys. 50) i takie naprężenie zostało przyjęte do przeprowadzenia serii prób zmęczeniowych podczas zginania łopatek.

W podrozdziale 4.3.3 Doktorant opisał przeprowadzone przez siebie próby zmęczeniowe nieuszkodzonych i uszkodzonych łopatek sprężarki wytypowanego silnika samolotowego. Próby zostały przeprowadzone na unikatowym stanowisku badawczym, zawierającym elektrodynamiczny

wzbudnik drgań LDS V-830, wzmacniacz mocy, system komputerowy sterowania próbą zmęczeniową, komorę klimatyczną oraz zaprojektowany i wykonany specjalistyczny uchwyt do mocowania badanych łopatek. Utrzymywanie podczas próby założonej wartości amplitudy i częstości drgań głowicy wzbudnika, mierzonych za pomocą czujnika piezoelektrycznego i stereoskopowego mikroskopu świetlnego MTS132, zapewniał oprogramowany system sterowania pracą wzbudnika. Doktorant przyjął założenie, że rozpoczęcie procesu propagacji mikropęknięcia zmęczeniowego łopatki skutkuje zmniejszeniem się wartości częstości jej drgań własnych.

Siedmiostronicowy podrozdział 4.3.4 Doktorant poświęcił opisowi przyjętej przez siebie metodyki oceny uszkodzeń łopatek sprężarki silników lotniczych, z zastosowaniem autorskich algorytmów analizy obrazu. Kandydat utworzył 9 realizowanych komputerowo algorytmów analizy obrazów uszkodzeń badanych łopatek oraz jeden algorytm manualny. Obraz uszkodzenia Doktorant pozyskiwał na dedykowanym temu celowi, własnym stanowisku laboratoryjnym. W celu skalowania tworzonego obrazu uszkodzenia, na powierzchni pióra łopatki Doktorant naklejał wzorzec geometryczny, w postaci czarnych kwadratów, o znanych długościach boków, na białym tle. Oczekiwany efektem badań z zastosowaniem technik wizyjnych są zidentyfikowane w ten sposób, podczas dokonywanych przeglądów technicznych silnika, geometryczne parametry powstałego uszkodzenia łopatki. Doktorant przyjął klasyczne postępowanie w procesie przetwarzania obrazu, zawierające binaryzację obrazu, jego filtrację, lokalizację obszaru uszkodzenia i wyznaczenie jego przeskalowanych parametrów geometrycznych. Doktorant w tych działaniach wspomagał się pakietem obliczeniowym MATLAB.

Ostatnim elementem rozdziału „*Badania własne*” jest podrozdział 4.3.5, w którym Doktorant, na podstawie literatury, przedstawił główne cechy i możliwości poprawy skuteczności i dokładności różnych algorytmów wspomagających przetwarzanie obrazu, jak: usuwanie cieni i odbłasków, filtracja obrazu za pomocą filtra odchylenia standardowego jasności pikseli, czy też filtracja Perony-Malika. Ostatecznie Doktorant zdecydował o przyjęciu, w procesie automatycznej detekcji położenia uszkodzenia łopatki, podejścia opartego na założeniach geometrii fraktalnej, czyli tzw. systemu funkcji iterowanych. Rozdział „*Badania własne*” stanowi 30% objętości recenzowanej rozprawy.

Stanowiący 20% objętości dysertacji rozdział piąty zawiera zestawienie uzyskanych przez Doktoranta wyników badań. W podrozdziałach 5.1 i 5.2, w tablicach, na rysunkach i na wykresach, Doktorant przedstawił wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej łopatek bez uszkodzeń i łopatek z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami krawędzi, dokonując także analizy uzyskanych wyników w aspektach wytrzymałościowych, technologicznych i eksploatacyjnych. Dwustronicowy podrozdział 5.3 Doktorant poświęcił syntetycznemu opisowi przeprowadzonych przez siebie badań mikroskopowych i fraktograficznych przełomów piór łopatek, wyciągając na ich podstawie wnioski odnośnie do inicjacji i propagacji pęknięć podczas prób zmęczeniowych.

Szczególnie ważnym, ze względu na postawione cele rozprawy, jest podrozdział 5.4, zawierający bardzo krótki opis dziesięciu algorytmów przetwarzania obrazu, w których Doktorant

zastosował kolejno: jednoprogową binaryzację obrazu; dwuprogową binaryzację obrazu ze wstępną, nieliniową filtracją metodą Perony-Malika; jednoprogową binaryzację obrazu ze wstępnym usuwaniem refleksów i cieni; jednoprogową binaryzację obrazu odchylenia standardowego jasności pikseli; jednoprogową binaryzację obrazu odchylenia standardowego jasności pikseli, ze wstępnym usuwaniem refleksów i cieni i samoczynnym wyznaczeniem położenia uszkodzenia; jednoprogową binaryzację obrazu odchylenia standardowego jasności pikseli, ze wstępną filtracją gaussowską i samoczynnym wyznaczeniem położenia uszkodzenia; dwuprogową binaryzację obrazu ze wstępną filtracją gaussowską; jednoprogową binaryzację obrazu odchylenia standardowego jasności pikseli, z samoczynnym wyznaczeniem położenia uszkodzenia; jednoprogową binaryzację obrazu odchylenia standardowego jasności pikseli i z samoczynnym wyznaczeniem położenia uszkodzenia za pomocą wymiaru fraktalnego Katza; algorytm manualny. Za pomocą każdego z tych algorytmów Doktorant dokonał procesu wykrywania uszkodzenia i przeprowadził syntetyczną analizę porównawczą ich skuteczności. Opracowane algorytmy cechowały się skutecznością wykrywania uszkodzenia w przedziale od 49,5% (przy jednoprogowej binaryzacji obrazu) do 100% (w przypadku algorytmu manualnego), a także średnim błędem pomiaru wyznaczonego uszkodzenia w przedziale 18,1% (w przypadku dwuprogowej binaryzacji obrazu ze wstępną filtracją gaussowską) do 9,4% (w przypadku dwuprogowej binaryzacji obrazu ze wstępną, nieliniową filtracją metodą Perony-Malika).

Sześć procent objętości pracy zajęła Doktorantowi analiza wyników badań, a 1% - wyciągnięte przez Doktoranta wnioski. Zarówno analiza wyników badań, jak i wnioski, są w zasadzie powtórzeniem zapisanych już wcześniej w pracy spostrzeżeń Doktoranta, w podrozdziałach, dotyczących tematyki pracy, odnoszącej się do danego wniosku.

3. Uwagi krytyczne

Przedstawiona mi do opinii praca została zredagowana, niestety, niezbyt starannie. Spis treści pracy wykazuje 7 głównych rozdziałów oraz, niepotrzebnie zanumerowany jako rozdział 8, literaturę. W tekście pracy, rozdział Wprowadzenie nie ma numeru, a w spisie treści jest to rozdział pierwszy. Po rozdziale piątym pojawia się błędnie zanumerowany rozdział siódmy, (który w spisie treści ma poprawny numer 6) i błędnie zanumerowany rozdział ósmy (Wnioski), (który w spisie treści ma poprawny numer 7). Zwykle w publikacjach podrozdział „Literatura” nie jest już numerowany, a tu Doktorant niepotrzebnie przypisał mu ponownie numer 8.

W całej pracy Doktorant często używa, niepoprawnie, przyimka „dla” w znaczeniu „w celu”, lub „w przypadku” czy też „w odniesieniu do”.

Autor dysertacji lekceważy w wielu miejscach konieczne znaki interpunkcyjne. Wielokrotnie nie dba o poprawność gramatyczną i składnię budowanych zdań (np.: str. 20 „Materia stosowane...”; str. 25 „Częstość przeglądów (...) jest wykonywana...”; str. 26 „Podczas obserwacji kontrolnej (...) często towarzyszy problem...”, oraz „Spowodowane jest (*co jest spowodowane?*)

najczęściej brakiem wzorców...”); str. 63 „Wytworzony obraz nie stanowi więc obszar, w których każdy piksel ma zbliżoną jakość”; str. 64 „(...) zmodyfikowany. jest (...)”.

Podpis pod rys. 27 niepotrzebnie jest w cudzysłowie, a zależność (6) na str. 66 w tekście pracy jest dwukrotnie pomyłkowo przywoływana jako zależność (4).

Bardzo niestarannie zostały zestawione cytowane pozycje literatury. Takie niespójności i niestaranności można dostrzec w zestawieniu literatury, w pozycjach: 22, 25, 26, 29, 42, 53, 56, 61, 67, 70, 72, 73, 78, 97, 104, 107, 108, 109, 110.

Szkoda, że Doktorant, pisząc tak ważną pracę na tym etapie swojej aktywności naukowo – badawczej, nie przyłożył należytej uwagi do starannej jej edycji.

4. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktoranta temat jest ważnym problemem technicznym, ekonomicznym i społecznym, związanym z bezpieczeństwem użytkowania silników lotniczych. Ważność tej tematyki została potwierdzona pozytywnym rozstrzygnięciem konkursu NCBR - LIDER 5 - pt. „Analiza obrazu w klasyfikacji uszkodzeń łopatki sprężarki silników lotniczych i prognozowanie ich żywotności”, w ramach którego to projektu Doktorant prowadził badania, przedstawione w opiniowanej dysertacji.

W swojej pracy Doktorant: przyjął obiekt badań, jako łopatki pierwszego stopnia sprężarki silnika turbośmigłowego TWD-10B/PZL-10S, stanowiącego napęd samolotu AN-28 Bryza; sformułował cel i zakres badań; sformułował przyjętą metodykę badań; przeprowadził próby zmęczeniowe, poprzez wzbudzenie, za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego, drgań rezonansowych nieuszkodzonych i uszkodzonych łopatek sprężarki wytypowanego silnika samolotowego; utworzył 9 realizowanych komputerowo algorytmów analizy obrazów uszkodzeń badanych łopatek oraz jeden algorytm manualny; zdecydował o przyjęciu, w procesie automatycznej detekcji położenia uszkodzenia łopatki, podejścia opartego na założeniach geometrii fraktalnej; przeprowadził badania mikroskopowe i fraktograficzne przelomów piór łopatek, wyciągając na ich podstawie wnioski odnośnie do inicjacji i propagacji pęknięć podczas prób zmęczeniowych; wyciągnął ważne wnioski z uzyskanych wyników badań, dostrzegając możliwość zbudowania na tej podstawie użytecznego narzędzia do dokonywania przeglądów traktów gazowych silników lotniczych i prognozowania trwałości łopatek z uszkodzeniami, z zastosowaniem metod cyfrowego przetwarzania obrazu.

Na podkreślenie zasługuje fakt dużego wkładu Doktoranta, zarówno w opracowanie metodyki numerycznej analizy obrazów uszkodzeń łopatek, jak również w prowadzenie czasochłonnych, doświadczalnych badań zmęczeniowych nieuszkodzonych i uszkodzonych łopatek sprężarki silników lotniczych.

Pomimo przedstawionych w recenzji zastrzeżeń stwierdzam, że mgr inż. Wojciech Obrocki udowodnił, że potrafi sformułować cel badań, zaplanować i przeprowadzić konieczne badania,

z zastosowaniem metod numerycznych i doświadczalnych, a także wyciągnąć na tej podstawie użyteczne wnioski.

Biorąc pod uwagę uzyskane efekty recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Obrockiego pt. „Prognozowanie trwałości łopatek sprężarki silników lotniczych z zastosowaniem próby zmęczeniowej i numerycznej analizy obrazów ich uszkodzeń” stwierdzam, że mieszczą się one w obszarze zainteresowań zarówno dyscypliny inżynieria materiałowa, jak i dyscypliny inżynieria mechaniczna, a opiniowana praca może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r., Dz.U. Nr 65, poz. 595 i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned in the lower-left quadrant of the page.