

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Bednarza pt. "Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych"

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa z dn.26.04.2019 informujące o powołaniu mnie przez Radę Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej na recenzenta pracy doktorskiej **mgr inż. Arkadiusza Bednarza pt. "Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych"**. Przesłana dokumentacja zawiera m.in. wydrukowaną i oprawioną pracę doktorską, która to była przedmiotem niniejszej recenzji.

2. Ogólna ocena rozprawy

Oceniana praca dotyczy tematyki badania trwałości zmęczeniowej wybranego elementu silnika lotniczego. Swoją pracę doktorant ukierunkował na badanie trwałości zmęczeniowej uszkodzonej łopatki pierwszego stopnia sprężarki. Przedstawione badania obejmowały część teoretyczną, badania eksperymentalne oraz badania numeryczne. Jest to optymalny zestaw badań dla dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Poruszona przez doktoranta tematyka jest aktualna i posiada wymierny aspekt praktyczny. Silniki odrzutowe są powszechnym napędem współczesnych środków transportu. Ich trwałość, niezawodność oraz bezpieczeństwo zależą m.in. od poznania i zrozumienia zjawiska zmęczenia materiału oraz umiejętnym wykorzystaniu tej wiedzy w procesie konstruowania oraz eksploatacji silników lotniczych.

Recenzowana praca doktorska składa się ze spisu treści, ośmiu rozdziałów (łącznie ze wstępem), wykazu literatury, załącznika oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Całość spisano ma 192 stronach.

Wstęp do rozprawy składa się z wprowadzenia, celu i zakresu pracy oraz przeglądu literatury. Jako główny cel pracy autor wskazał numeryczno-eksperymentalną analizę naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek sprężarki zawierających defekty mechaniczne, pracujących w zakresie drgań rezonansowych. W przeglądzie literatury autor starał się przedstawić aktualny stan wiedzy w obszarze prowadzonych przez niego badań. Zwarzywszy na to, że doktorant chciał potraktować rozpatrywane zagadnienie kompleksowo to znaczy wymienić prace naukowo-badawcze dotyczące silników lotniczych, ich uszkodzeń, skutków uszkodzeń, zjawiska rezonansu łopatek, analizy modalnej a także badań eksperymentalnych silników zadanie to było praktycznie niewykonalne. Przedstawiony przegląd literatury musiał w takim wypadku być mocno ograniczony do wybranych pozycji literaturowych.

Zakończeniem przeglądu literatury jest naukowa teza pracy, która została sformułowana następująco: „Umiejscowienie i sposób powstania karbu wpływa na proces inicjacji pęknięcia i trwałość zmęczeniową łopatki sprężarki”.

W drugim rozdziale pracy (strony 29-36) doktorant zawarł krótkie przedstawienie przedmiotu swoich badań: lotniczego silnika turbinowego, sprężarki oraz łopatki sprężarki. Trudno doszukać się w tym rozdziale informacji o charakterze naukowym, jednak uważam ten materiał za istotny dla zrozumienia istoty zagadnienia dla czytelnika nie związanego bezpośrednio z techniką lotniczą.

Podobną, wprowadzającą rolę pełni także rozdział trzeci, w którym doktorant przedstawia zjawisko zmęczenia materiału. Doktorant w tym rozdziale zaczyna od pojęć podstawowych jak definicja zmęczenia materiału czy opis rodzajów obciążeń cyklicznych. W dalszej części rozdziału przedstawione są opisy m.in. krzywej Wohlera, wykresu Smitha i metody korekcji naprężeń średnich. Niestety do przedstawienia informacji o metodach korekcji naprężeń średnich doktorant posłużył się źródłem w postaci instrukcji programu ANSYS. Materiał tam przedstawiony różni się od funkcjonujących w świecie nauki wzorów opisujących korektę naprężeń średnich. W rezultacie błędnego tłumaczenia lub błędów w źródle danych wzór (3.29) nie jest poprawny. Problem ze zrozumieniem istoty korekcji naprężeń średnich przez doktoranta przewija się także w dalszej części pracy.

Właściwa część autorskiej części rozprawy doktorskiej rozpoczyna się w rozdziale czwartym poświęconym badaniom eksperymentalnym łopatek sprężarki. Autor wykonał szereg badań łopatek sprężarki z różnymi wariantami uszkodzenia jej krawędzi natarcia. Badania obejmowały badania rezonansowe oraz badania trwałości zmęczeniowej w

warunkach rezonansu. Nie mam zastrzeżeń do przedstawionej metodyki badań. Szczegółowe wyniki badań zestawione są w obszernym Załączniku nr 1. Dzięki temu mogą być dobrym materiałem odniesienia dla innych badaczy zajmujących się tą tematyką.

Rozdział piąty pracy poświęcony jest numerycznej analizie stanu naprężenia łopatki w warunkach rezonansu. Doktorant rozpoczyna ten rozdział od dokładnego opisu sposobu w jaki zbudował model MES łopatki. Momentami odniosłem wrażenie, że rozprawa doktorska zamieniła się w podręcznik oprogramowania inżynierskiego. Uważam, że autor zbyt dużo uwagi poświęcił w tym miejscu opisowi zagadnień o charakterze inżyniersko-technicznym. Nie mam zastrzeżeń co do przedstawionej metodyki obliczania naprężeń. Doktorant dość konsekwentnie prezentuje wyniki naprężeń w trzech postaciach:

- naprężenia zredukowane,
- naprężenia główne,
- naprężenia w globalnym układzie odniesienia.

W analizowanym przez doktoranta problemie istotne są wyłącznie naprężenia główne. Naprężenia zredukowane nie mogą być wykorzystywane w analizie zmęczeniowej ponieważ zacierają różnice pomiędzy rozciąganiem i ściskaniem. Analiza naprężenia w globalnym układzie odniesienia dla skomplikowanej bryły trójwymiarowej także nie niesie żadnych użytecznych informacji. Dlatego też większość zaprezentowanych map rozkładu naprężeń nie ma żadnego praktycznego znaczenia.

Bazując na wyznaczonych w rozdziale piątym rozkładach naprężeń doktorant przeprowadził numeryczną analizę zmęczeniową, którą opisał w rozdziale szóstym.

Wyniki trwałości zmęczeniowej uzyskiwane w analizach numerycznych silnie zależą od danych materiałowych użytych do opisu zjawiska zmęczenia. Ponieważ doktorant nie dysponował tymi danymi dokonał ich oszacowania na podstawie innych danych uzyskanych z próby rozciągania i pomiaru twardości. W zależności od sposobu wyznaczenia parametrów opisujących zachowanie się materiału podczas zmęczenia na podstawie stałych materiałowych doktorant wyznaczył siedem zestawów tych parametrów. Wartości średnie (z siedmiu modeli) utworzyły dodatkowy ósmy zestaw parametrów.

Doktorant przeprowadził analizy trwałości dla wszystkich ośmiu zestawów parametrów. Wyniki analiz zmęczeniowych zawarte są w tabeli 6.3. Takie podejście nie do końca jest zgodne z naukowym podejściem do badań. Przeliczenie wszystkich przypadków i zbiorcze

zestawienie wyników świadczy o braku pomysłu na wybór jednego lub kilku modeli materiałowych, które najlepiej nadają się do modelowania tej klasy zagadnień. A jak postąpił by doktorant gdyby macierz możliwych modeli obejmowała tysiące przypadków? Także analizowałby wszystkie z jednakową starannością?

Kolejny z rozdziałów rozprawy doktorskiej zawiera analizę porównawczą wyników. Jest to logiczne domknięcie przyjętej metodyki badań. W rozdziale tym zawarto szereg interesujących wniosków z przeprowadzonych badań. Pomimo tego, że wyniki badania trwałości zmęczeniowej charakteryzują się dużym rozrzutem wynikającym ze specyfiki tego zjawiska to autor szukał wytłumaczenia dla uzyskanych rozbieżności pomiędzy eksperymentem i obliczeniami numerycznymi. Na tym etapie badań „odkryto” potencjalną przyczynę różnic, którą jest obróbka powierzchni łopatek wprowadzająca rezydualne naprężenia ściskające w warstwie powierzchniowej. Doktorant wykonał eksperymenty potwierdzające taki stan rzeczy. Z jednej strony można stwierdzić, że pominięcie tego efektu w początkowej części pracy świadczy o niekompletnym studium literaturowym i nieprzygotowaniu doktoranta do podjęcia tego tematu. Z drugiej strony doktorant wykazał się umiejętnością analizy uzyskanych wyników i dążeniem do uzyskania kompletnego i prawidłowego rozwiązania problemu.

Rozprawa doktorska zakończona jest rozdziałem podsumowującym, w którym zamieszczono wnioski i kierunki dalszych badań. Zamieszczony spis literatury zawiera 162 pozycje.

3. Najważniejsze osiągnięcia Doktoranta

Przedstawiona rozprawa doktorska pana mgr inż. Arkadiusza Bednarza poświęcona jest istotnym zagadnieniom związanymi z eksploatacją silników lotniczych. Podjęcie tego tematu uważam za trafny i mający duży potencjał użyteczny.

Wysoko oceniam także metodykę prowadzonych badań. Autor zasadniczą część pracy na którą składały się obliczenia i analizy numeryczne weryfikował wynikami eksperymentów. Jest to fundamentalna zasada, która powinna być podstawą wszelkich obliczeń i analiz.

Za największe osiągnięcie doktoranta uważam przeprowadzenie i opisanie całego cyklu obliczeń i analiz prowadzących do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej łopatek. Równie interesującym i autorskim osiągnięciem doktoranta jest zbadanie wpływu uszkodzenia łopatki na jej trwałość zmęczeniową. Wpływ położenia karbu oraz sposób jego powstania ma wpływ na trwałość zmęczeniową. Osiągnięciem autora jest ilościowe wyznaczenie tego wpływu.

4. Uwagi krytyczne i pytania skierowane do doktoranta w związku z recenzowaną rozprawą

Moje uwagi krytyczne dotyczące rozprawy doktorskiej częściowo przedstawiłem w poprzednich punktach recenzji. Za niekoniecznie uzasadnione uważam zamieszczenie w pracy dokładnego opisu tworzenia modelu komputerowego łopatki. Używanie nazw własnych komend programu ANSYS moim zdaniem nie powinno mieć miejsca w tej rozprawie. Rozdział czwarty rozprawy dotyczący badań eksperymentalnych łopatek sprężarki w wielu miejscach przypomina sprawozdanie z przeprowadzonych badań.

Krytycznie odnoszę się także do faktu, że doktorant wykonał obliczenia trwałości zmęczeniowej dla wszystkich dostępnych zestawów parametrów materiałowych i nie pokusił się o ograniczenie tej liczby na podstawie rozważań naukowych (np. literatura, dodatkowy eksperyment).

Duże zaniepokojenie wywołał opis przez doktoranta korekcji naprężeń średnich. Wzory przedstawione w rozdziale 3 autor powielił za źródłem w postaci instrukcji programu ANSYS. Przedstawienie ich w tej postaci może być błędem edycyjnym lub niepoprawnym zrozumieniem mechanizmu korekcji naprężeń średnich przez doktoranta. Za tym drugim wariantem mogą przemawiać wyniki dalszych analiz zmęczeniowych. Doktorant używa do obliczeń obciążenie sinusoidalne o zerowej wartości średniej (rys.6.3). Jaki więc sens ma stosowanie korekcji naprężeń średnich? Ponadto w zależności od zastosowanego algorytmu korekcji naprężeń doktorant uzyskał różne wyniki trwałości zmęczeniowej. Jeszcze bardziej zastanawiające jest uzyskanie większej trwałości zmęczeniowej w przypadku uwzględnienia korekcji naprężeń średnich.

Bardzo proszę autora o wyjaśnienie mi tego faktu tj. wykazanie w jaki sposób uwzględnienie korekcji naprężeń średnich dla sygnału o zerowej wartości średniej może doprowadzić do wzrostu trwałości zmęczeniowej.

Kieruję także do autora prośbę o ustosunkowanie się do mojej uwagi dotyczącej używania w analizie naprężeń wartości naprężeń zredukowanych i naprężeń w układzie osi globalnego układu współrzędnych.

5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Bednarza pt. "Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych", przygotowana pod kierunkiem naukowym dr hab. inż.

Lucjana Witka oraz promotora pomocniczego dr inż. Łukasza Święcha, spełnia wymagania stawiane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003r. wraz z późniejszymi zmianami i wnoszę o dopuszczenie pana Arkadiusza Bednarza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

