

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska

Opole, 2019-05-29

Recenzja

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

Recenzję pracy wykonano na zlecenie prof. dr. hab. inż. Jarosława Sępa Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 26 kwietnia 2019 r.

1. Charakterystyka pracy

Problem zmęczeniowego pęknięcia elementów konstrukcyjnych jest istotną kwestią do rozważenia przy konstruowaniu nowoczesnych, lekkich, bezpiecznych konstrukcji. W środkach transportu takich jak samolot, gdzie awaria elementów może doprowadzić do olbrzymiej katastrofy, nabiera on jeszcze większego znaczenia. W tego typu konstrukcjach silnik jest bardzo odpowiedzialnym elementem. W związku z tym analiza trwałości łopatek montowanych w takim silniku jest bardzo istotnym problemem i jako taki jest on postawiony w recenzowanej pracy doktorskiej. Rozwiązanie analizowanego problemu ma znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Rozpoznanie tego zagadnienia realizowane jest dwutorowo: za pomocą właściwych badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych.

Niniejsza rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Bednarza doskonale mieści się w ramach badań i analiz dotyczących analizy trwałościowej elementów konstrukcyjnych, a w efekcie także i całej konstrukcji.

Przedstawiona do recenzji praca ma stosunkowo dużą objętość, a jej treść zawarta jest na 192 stronach, przy czym zasadnicza część pracy zawarta jest na 162 stronach, natomiast resztę stanowi załącznik.

Tytuł pracy nie jest jednak precyzyjny. W tytule napisano o „analizie naprężeń (...) łopatek”. Można tylko mówić o naprężeniach w poszczególnych punktach łopatek, a nie o naprężeniach łopatek.

Praca podzielona jest na 8 rozdziałów i zakończona spisem literatury, załącznikiem oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Przed zasadniczymi rozdziałami treści pracy Autor umieścił spis ważniejszych oznaczeń, co jest dobrym zwyczajem, ponieważ sprawia, że praca staje się bardziej czytelna.

W rozdziale 1 rozprawy doktorskiej Autor umieścił genezę pracy oraz cel i zakres pracy. Wydaje się, że cel i zakres pracy powinien wynikać z analizy problemu i być umieszczony później, czyli po podrozdziale 1.3, gdzie przedstawiono obszernie przegląd literatury dotyczący postawionego w pracy problemu. Następnie doktorant dokonał opisu wybranych zagadnień z zakresu budowy i eksploatacji silników turbinowych, co ma miejsce w rozdziale 2. W rozdziale tym Autor przeszedł od problemu silników do łopatek, które są częścią tych silników i jednocześnie tematem rozważań w pracy. W rozdziale 3 zawarto krótki opis podstaw zjawiska zmęczenia. Niestety ten rozdział jest najsłabszą częścią pracy. Autor zawarł w niej szereg nieścisłości i błędów. Uwagi dotyczące tego problemu zawarto w szczegółowych uwagach do recenzowanej pracy. Autor powinien w przyszłości lepiej zaznajomić się z problemem zmęczenia materiałów. Następnie w nieco dłuższym rozdziale 4 Autor przedstawił zrealizowane badania eksperymentalne. Niestety poszczególne badania były wykonane na pojedynczych próbkach. W związku z tym biorąc pod uwagę duże rozrzuty badań zmęczeniowych, trudno na tej podstawie uzyskiwać wiarygodne wnioski. Można na przyszłość takie badania przyjąć za punkt początkowy do dalszych analiz. W kolejnym rozdziale 5 przedstawiono numeryczną analizę naprężeń w łopatkach. Niestety znowu w tym przypadku napisano o „naprężeniach łopatek”, co nie jest prawidłowe. W rozdziale 6 dokonano właściwej analizy trwałości zmęczeniowej przebadanych wcześniej różnych łopatek. W ten sposób Autor przeszedł do rozdziału 7, w którym dokonał analizy porównawczej wyników badań eksperymentalnych i badań numerycznych.

Ostatni numerowany rozdział to wnioski i kierunki dalszych badań. Wnioski Autora zasadniczo są prawidłowe, ale niestety nie zapisano ich w sposób zwięzły i krótki. Jest ich za dużo. Ponadto po 15 wnioskach pojawia się sformułowanie, że „precyzyjne oszacowanie liczby cykli (...) jest zadaniem trudnym”. Takie sformułowanie jest nie do przyjęcia i to przynajmniej z dwóch powodów. Po pierwsze samo zmęczenie jest procesem stochastycznym i charakteryzuje się bardzo dużymi rozrzutami. Dodatkowo jak wspomniano wcześniej

badania nie były powtarzane. Po drugie nie można mówić o „precyzyjnym oszacowaniu”. Takie określenie się wzajemnie wyklucza. W zmęczeniu możemy mówić tylko o prognozowaniu trwałości czy też, jak to Autor napisał, szacowaniu. Na końcu zamieszczono załącznik ponumerowany jako 1, przez co oczekuje się kolejnego, ale ten pierwszy jest też ostatnim. Powinno się mówić po prostu tylko o załączniku.

Pomimo ogólnie pozytywnej recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Arkadiusza Bednarza szereg wątpliwości zamieściłem w uwagach szczegółowych i pytaniach dotyczących pracy oraz uwagach redakcyjnych.

2. Uwagi szczegółowe i pytania dotyczące pracy

- str. 13 – napisano „naprężeń łopatek”. Takiego pojęcia nie ma. Można mówić o naprężeniach w poszczególnych punktach łopatek, a nie o naprężeniach łopatek;
- teza pracy jest mało czytelna. Wynika to prawdopodobnie z tego, że nie ma tam czasownika;
- w pracy pojawia się symbol Z_{g0} zdefiniowany jako zginanie wahadłowe przez analogię do skręcania, podczas gdy symbol ten raczej jest definiowany jako zginanie obrotowe;
- str. 40 – to nie jest wykres Wöhlera, który powinien być pojedynczo logarytmiczny, a jest to wykres Basquina (podwójnie logarytmiczny);
- wielokrotnie w przypadku charakterystyk zmęczeniowych mowa jest o naprężeniu lub odkształceniu. Pierwszy raz można to znaleźć na str. 42. Zawsze w tych przypadkach chodzi o amplitudę i to powinno być wyraźnie powiedziane;
- str. 44 – napisano, że badania zmęczeniowe można wykonać na prostych maszynach (np. do rozciągania). W praktyce tego nie da się zrobić. Ewentualnie można to zrobić dla bardzo małej liczby cykli, a przebieg obciążenia siłą w tym przypadku nie może przechodzić przez zero. Aby takie badania wykonać potrzebna jest maszyna do rozciągania-ściskania;
- str. 45 – zapisano, że „Wpływ różnych koncentratorów naprężeń został opisany w literaturze [98]”. Z takiego zapisu wynika, że jest to nowość i jak na razie problem ten został opisany tylko w jednej pracy, a oczywiście nie jest to prawda;
- str. 45-46 – Jako zmęczeniowe stałe materiałowe wymieniono całkowitą amplitudę odkształceń oraz liczbę cykli do zmęczenia. To nie są stałe w modelu MCB, a właśnie zmienne. Ponadto jako stałe zmęczeniowe wymieniono współczynnik umocnienia (K) oraz wykładnik umocnienia (n). Są to stałe statyczne, a w zmęczeniu wykorzystane są zmęczeniowe, które też są wymienione w cytowanym opisie.

- str. 51 – wzór (3.27) nie jest połączony z wcześniej cytowaną krzywą cyklicznego odkształcenia podaną w amplitudach naprężenia i odkształcenia. We wzorze nie ma amplitud tylko są zakresy;
- teoria Neubera – wzór (3.28) i dalszy opis jest niewłaściwy. Współczynnik jest bezwymiarowy, a nie w MPa, „e” – nie jest wyężeniem (wcześniej przy odkształceniu też to źle zdefiniowano). Wyężenie w praktyce jest bezwymiarowe i mieści się w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$. Autor ponadto przy błędnych założeniach nie ma spełnionego warunku zgodności jednostek. Z lewej strony mamy MPa, a z prawej MPa²;
- str. 61 – przy badaniach zmęczeniowych łopatek na wzbudniku były one montowane z jednej strony (tak przynajmniej wynika z rysunku). Czy nie było problemu z tak wykonywanymi badaniami?
- str. 71 – napisano „Z badań wynika, że największą dokładność uzyskiwano przy użyciu defektoskopii”. Z czym to porównywano, że Autor wyciągnął taki wniosek?
- w pracy napisano, że badania były wykonywane praktycznie w temperaturze otoczenia (20° C), a jednak częstotliwości były bardzo duże. Jaka była w praktyce temperatura badanych łopatek w trakcie pracy?
- str. 85 – mowa jest o różnicy trwałości. Ponieważ w zmęczeniu stosuje się skalę logarytmiczną, to lepiej mówić o krotności;
- str. 87 – rys. 4.32 – zapisano „rozciąganie stali”. Nie jest to właściwy zapis. Powinna być mowa o „rozciąganiu próbek wykonanych ze stali”;
- str. 87 – Autor pisze o wyznaczeniu naprężeń i odkształceń rzeczywistych. Nie jest to właściwe – jest to proste tłumaczenie z języka angielskiego (true). W modelach i obliczeniach my się tylko zbliżamy do rzeczywistości. Lepiej mówić o odkształceniu logarytmicznym i odpowiadającym mu naprężeniu;
- przy analizie naprężeń (podrozdziały 5.7 i 5.8) Autor zauważył, że część łopatek w niektórych punktach charakteryzuje się ściskaniem. Natomiast w pracy przy stosowaniu kryterium HMH (5.19) nie znaleziono do tego odniesienia. Stosowanie tego kryterium wprost zaniedbuje proces ściskania. Istnieje modyfikacja tego kryterium poprzez mnożenie przez funkcję $\text{sgn}(\sigma_1)$. Według recenzenta niniejszej pracy w zmęczeniu lepiej byłoby stosować inne kryteria.

3. Uwagi redakcyjne dotyczące pracy

- w spisie treści na str. 6 można znaleźć odwołanie do pracy doktorskiej oraz do samego spisu treści. W ten sposób nie robi się spisu treści,
- kilkakrotnie w pracy Autor używa określenia „ilość” zamiast „liczba”. Na przykład „ilość zmian”, „ilość łopatek”. W przypadku policzalności stosuje się „liczbę” a nie „ilość”.
- zgodnie z normą jednostek miar nie pisze się w nawiasach []. Ten błąd powielany jest wielokrotnie;
- str. 37 - definiowane są wielkości, które wynikają jedne z drugich;
- wielokrotnie w pracy pojawia się błąd w zapisie mnożenia jako mnożenia wektorowego „x”, a nie normalnego „·”;
- str. 42 – napisano „przebywanie pod uzyskaną linią”. Jest to uosobienie typowe dla rzeczy. Przebywać może tylko istota żywa;
- wielokrotnie w pracy mylone są nazewnictwa części pracy. Autor pisze o rozdziałach. Prawidłowa kolejność podziału to: rozdział, podrozdział, punkt, podpunkt;
- str. 55 – w tytule rozdziału mamy „własności”. Powinno być „właściwości”. Ten sam problem pojawia się na str. 75;
- str. 56 – zapisano „Tabela 4.1 prezentuje”. Jest to typowe uosobienie tabeli. Tabela nic nie prezentuje. To Autor zaprezentował w tabeli. Ten sam błąd można znaleźć na str. 89;
- str. 60 – jednostki momentu piszemy z kropką N·m, a nie jak zapisano Nm;
- str. 70 – rys. 4.18 – na wykresach zapisano funkcje matematyczne jako $y = f(x)$, tak jak w matematyce, a powinny zostać użyte symbole odpowiednich wielkości fizycznych;
- ponadto często można odnaleźć w pracy błędy interpunkcyjne.

4. Uwagi i wnioski ogólne

Z przedstawionej charakterystyki pracy oraz uwag dotyczących pracy, a nawet sformułowanego tytułu pracy, zarówno tych merytorycznych, jak i redakcyjnych wynika, że rozprawa wskazuje na bardzo duże rozeznanie problemu postawionego w pracy w zakresie analizy trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych oraz również wysokie doświadczenie badawcze w zakresie eksperymentu, jak i obliczeń mgra inż. Arkadiusza Bednarza. Analiza numeryczno-eksperymentalna podkreślona jest również w tytule pracy. Uwagi zawarte w recenzji mogą być przedmiotem analiz w dalszej działalności

badawczej i publikacyjnej doktoranta, a także mogą być przydatne w redagowaniu kolejnych prac naukowych. Tu należy zwrócić uwagę, że część uwag ma charakter pytań i sugestii do wykorzystania na przyszłość. Niestety tych komentarzy jest stosunkowo dużo. Szczególnie dotyczy to części związanej z rozeznaniem i definiowaniem samego problemu zmęczenia materiału. Na szczęście uwagi te, chociaż stosunkowo liczne, nie podważają wartości merytorycznej pracy. Ich liczba wynika najprawdopodobniej z pośpiechu w redakcji pracy.

4. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Bednarza pt. „Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych” umożliwia sformułowanie wniosku o spełnieniu w stopniu wystarczającym warunków określonych wymaganiami do obrony pracy doktorskiej na Politechnice Rzeszowskiej w dyscyplinie „inżynieria mechaniczna”.

