

Bydgoszcz, 25.09.2023 r.

Dr hab. inż. Adam Lipski
Profesor PBS

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji

Al. prof. Sylwestra Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

e-mail: Adam.Lipski@pbs.edu.pl

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Dariusza Smolarskiego
pt. „Metoda spektralna bezpośrednia
zliczania cykli naprężeń o charakterze dwumodalnym”

Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, prof. dra hab. inż. Jerzego Andrzeja Śladka, nr M.00-121/2023 z dnia 26.07.2023 r. w sprawie powołania na recenzenta pracy doktorskiej pt. „Metoda spektralna bezpośrednia zliczania dwumodalnych cykli naprężeń”. Do oceny przesłano pracę pod tytułem „Metoda spektralna bezpośrednia zliczania cykli naprężeń o charakterze dwumodalnym”.

1. Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska obejmuje 96 stron, w tym 11 tabel i 26 rysunków. Podzielona jest na 7 rozdziałów. Oprócz nich zamieszczono spis treści, spisy: literatury, rysunków i tabel, wykaz stosowanych oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 (11 stron) obejmuje tło zagadnienia podjętego w pracy odnoszącego się głównie do metod analiz zmęczeniowych układów drgających, w tym do metod identyfikacji cykli w przebiegu obciążenia. Osobny podrozdział poświęcono analizie zmęczeniowej dla szczególnego przypadku obciążenia – przebiegu dwumodalnego. W rozdziale tym przedstawiono również tezę, cel i zakres pracy.



Rozdział 2 (16 stron) zatytułowany „Podstawowe pojęcia analiz zmęczeniowych” poświęcono przede wszystkim omówieniu hipotez i modeli znajdujących swoje zastosowanie w obliczeniowej części pracy. Jedynie opis efektu sekwencji obciążeń zamieszczony w krótkim Rozdziale 2.6 nie jest bezpośrednio związany z dalszą częścią pracy.

Rozdział 3 (8 stron) dotyczy sformułowania założeń metody spektralnej bezpośredniej bazujących na przesłance o istnieniu w dwumodalnym przebiegu czasowym naprężenia tzw. cyklu głównego oraz cykli pobocznych o niezerowej wartości średniej. Przedstawiony w Rozdziale 3.1 w postaci dziewięciu punktów algorytm dla jednoosiowego stanu naprężeń został poszerzony w następnym podrozdziale o możliwość analizy wieloosiowych przebiegów naprężeń o charakterze dwumodalnym.

Rozdział 4 (3 strony) obejmuje krótkie omówienie klasyfikacji sygnałów oraz przyjętej w pracy metody szacowania wartości amplitudy składowej harmonicznej na podstawie przebiegu funkcji gęstości widmowej mocy. Wydaje się, iż z punktu widzenia całości pracy rozdział ten powinien być umieszczony przed sformułowaniem założeń metody spektralnej bezpośredniej.

Rozdział 5 (8 stron) zawiera dwa przykłady zastosowania metody spektralnej bezpośredniej do analizy zmęczeniowej przebiegów dwumodalnych w przypadku jednoosiowego stanu naprężeń, a Rozdział 6 (19 stron) dwa przykłady dla wieloosiowego.

Prace podsumowuje Rozdział 7 (4 strony) zawierający wnioski dotyczące zrealizowanej pracy oraz jej ewentualnej kontynuacji.

W spisie literatury zamieszczono 111 pozycji, z czego 15 jest publikacjami współautorskimi Doktoranta.

2. Ocena pracy

Oceniając wybór tematu pracy wskazać należy, iż stanowi on ciekawą próbę zastosowania metody spektralnej w analizie zmęczeniowej konstrukcji. Szkoda, że Autor pracy tak mało miejsca poświęcił na zarysowanie tła zagadnienia, z którego wynikałaby potrzeba opracowania nowej metody zliczania cykli naprężeń, szczególnie w odniesieniu do obciążenia zmiennego o charakterze dwumodalnym.

Autor postawił tezę o następującym brzmieniu: „W oparciu o charakterystykę częstotliwościową przebiegów naprężeń można ocenić wytrzymałość zmęczeniową struktury w przypadku przebiegów dwumodalnych, bez konieczności stosowania metod typu 'rain-flow



counting' lub metod opartych na wykorzystaniu funkcji gęstości widmowej mocy." Tak postawiona teza pracy może budzić pewną wątpliwość dotyczącą wzmiankowanej funkcji gęstości widmowej mocy, która jest wykorzystywana w zaproponowanej metodzie do szacowania wartości amplitudy składowej harmonicznej.

Celem pracy było „zaproponowanie metody zliczania cykli naprężeń dla przebiegów dwumodalnych w oparciu o charakterystykę częstotliwościową przebiegów naprężeń”.

Przytoczonej powyżej tezie oraz zdefiniowanemu celowi została podporządkowana struktura pracy: zaczynając od sformułowania założeń metody spektralnej bezpośredniej, poprzez zaproponowanie algorytmu dla tej metody dla przebiegów dwumodalnych i jednoosiowego stanu naprężeń oraz jego modyfikacji dla przypadku wieloosiowego, po jej weryfikację na podstawie wybranych przykładów literaturowych. Uznać ją należy za logiczną i w pełni odpowiadającą wymienionemu wyżej celowi pracy.

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera elementy oryginalne, wśród których wskazać należy:

1. Zaproponowanie algorytmu metody spektralnej bezpośredniej zliczania cykli naprężeń dla przebiegów dwumodalnych w przypadku jednoosiowego stanu naprężeń.
2. Zaproponowanie algorytmu metody spektralnej bezpośredniej zliczania cykli naprężeń dla przebiegów dwumodalnych w przypadku wieloosiowego stanu naprężeń.

Wymienione algorytmy składają się z dziewięciu etapów, z których sześć pierwszych bezpośrednio odnosi się do tematu pracy, tj. do zliczania cykli naprężeń w przebiegu dwumodalnym obciążenia, trzy ostatnie odnoszą się do wykorzystania wyznaczonych uprzednio cykli do szacowania trwałości zmęczeniowej odpowiednio w przypadku jednoosiowego lub wieloosiowego stanu naprężeń.

Poszczególne etapy algorytmów układają się w logiczną całość pozwalającą na przeprowadzenie procesu schematyzacji przebiegu obciążenia. Główną uwagą do opisu zaprezentowanej metody (Rozdział 3.2 oraz Rozdział 3.3) jest jego zbytnia skrótowość. Bardziej szczegółowe omówienie poszczególnych elementów algorytmu opracowanej metody znacznie ułatwiłoby jej praktyczne wykorzystanie. Trudno jest np. z zamieszczonego opisu wywnioskować w jaki sposób przebiega proces wyznaczania parametrów zliczanych cykli, wartości średniej i amplitudy naprężenia.

Zaproponowane w pracy algorytmy poddano weryfikacji na podstawie własnych



lub zaczerpniętych z literatury przykładów. W przypadku zliczania cykli dla przebiegu dwumodalnego jednoosiowego szerzej przedstawiono analizę zmęczeniową pióra resoru zawieszenia samochodu, natomiast dla przebiegu dwumodalnego wieloosiowego bardzo szeroko omówiono przykład dla łożyska walcowego wzdłużnego wychodząc w tym przypadku znacząco poza zakres bezpośrednio związany z tematem pracy. Szkoda, że przy tej okazji Autor szerzej nie przedstawił środowiska obliczeniowego, zastosowanych narzędzi itp. elementów warsztatu naukowego wykorzystanego przy okazji realizacji pracy.

Zaprezentowane przykłady stanowią wystarczający dowód wskazujący na możliwość praktycznego zastosowania zaproponowanej metody. Szczególnie cenne byłoby jednak w tym miejscu szersze odniesienie wyników uzyskanych dzięki zaproponowanej metodzie spektralnej bezpośredniej do wyników możliwych do uzyskania na podstawie innych uznanych metod obliczeniowych, w tym również spektralnych. Pozwoliłoby to zweryfikować jakość opracowania przebiegu obciążenia, jak również dokładność szacowania trwałości zmęczeniowej na podstawie wyznaczonych tą metoda cykli, określić jej zalety oraz ograniczenia.

Przechodząc do uwag krytycznych, w dużej mierze dyskusyjnych, poniżej wymieniono ważniejsze z nich w kolejności ich powstawania podczas analizy niniejszej rozprawy doktorskiej:

1. Nie wskazano jaki związek z opisem dotyczącym krzywych zmęczeniowych dla różnych cykli naprężeń opisanych różnymi wartościami współczynnika asymetrii cyklu R mają wymienione parametry wytrzymałościowe wyznaczone na podstawie krzywej rozciągania (Rozdział 2.3 – Rys. 2.2, str. 21, akapit poprzedzający rysunek). Ponadto nie wskazano źródła, z którego zaczerpnięto Rys. 2.2.
2. Na podstawie Rys. 2.3 nie ma możliwości określenia liczby cykli do zniszczenia, na co wskazuje poprzedzający go tekst na str. 23. Podobnie Rys. 2.4 na str. 24.
3. Rys. 2.7, str. 29 nie przedstawia wizualizacji hipotezy Palmgren-Minera, tylko jej modyfikacje oparte na liniach resztkowej trwałości zmęczeniowej lub liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych zmierzające do uwzględnienia poziomów naprężeń niższych niż pokazana granica zmęczenia Z_G .
4. Wzór (3.5), str. 36 wskazuje na równość amplitudy i wartości średniej naprężenia cyklu głównego. Wyznaczane w przykładach obliczeniowych w dalszej części pracy cykle główne nie spełniają tego warunku.



5. W opisie wielkości występujących we wzorze (3.6) i (3.7) na str. 37 wskazano, że N_B – liczba cykli identyfikowanych w pojedynczym bloku dla przypadku dwumodalnego wynosi 2. Praktycznie w każdym z przykładów weryfikacyjnych zamieszczonych w dalszej części pracy liczba identyfikowanych cykli przekracza 2.
 6. Pierwszy z zaprezentowanych przykładów weryfikacyjnych dla przebiegu jednoosiowego dotyczy opracowania modelowego przebiegu o parametrach przyjętych przez Autora. Wyniki działania metody spektralnej bezpośredniej zestawiono z wynikami uzyskanymi na podstawie powszechnie przyjętej i uznanej metody *Rainflow*. Na jakiej podstawie stwierdzono (str. 44): „Wydaje się, że zaproponowany sposób identyfikacji cykli naprężeń daje wyniki bardziej zgodne z rzeczywistym przebiegiem (...)”?
 7. Drugi z zaprezentowanych przykładów weryfikacyjnych dla przebiegu jednoosiowego dotyczy analizy zmęczeniowej pióra resoru zawieszenia samochodu. W oparciu o wykres gęstości widmowej mocy wyznaczono, korzystając z zależności (4.5) i (4.6), wartości amplitud naprężeń przyjmując pola powierzchni w przybliżeniu jako pola trójkątów o jednakowej podstawie wynoszącej 0,3125 Hz, ale różnej wysokości. Czy takie podejście jest uzasadnione biorąc pod uwagę różną szerokość pików dla częstotliwości 2 Hz oraz 15 Hz?
 8. Omówienie wyników szacowania trwałości zmęczeniowej (Rozdział 5.2) powinno zostać uzupełnione o wyjaśnienie różnic pomiędzy wyznaczonymi wartościami oznaczonymi jako T_{FC} , T_{FL} oraz T_{DS} (str. 47 i str. 50).
 9. W omówieniu wyników analiz przeprowadzonych w ramach drugiego z przykładów weryfikacyjnych dla przebiegu wieloosiowego dotyczącego łożyska walcowego wzdłużnego, opisanych w Rozdziale 6.2 (ostatni akapit na str. 57), zamieszczono zdanie „odpowiada do okresowi $x = 2b$ ” (pisownia oryginalna). Ponieważ wielkość „b” ma charakter wymiaru liniowego, to czy uprawnione jest określanie wielkości „x” mianem „okresu”, który powinien mieć wymiar związany z czasem?
 10. W tym samym przykładzie weryfikacyjnym (drugi akapit na str. 61) wspomniano o wyznaczeniu naprężeń podpowierzchniowych przy wykorzystaniu rozwiązania analitycznego opisanego zależnością (6.3), przy czym „obliczenia rozpoczęto od promienia na głębokości 0.002 mm”. W jaki sposób uwzględniono to w zależności (6.3)? Jak ustalono, że „ekstremalne naprężenia zmęczeniowe wystąpiły na tej samej głębokości pod powierzchnią styku (na głębokości 0.026 mm)”?
- Na jakiej podstawie wyznaczono wykresy



zastępczego naprężenia zmęczeniowego w zależności od głębokości pod powierzchnią przedstawione na Rys. 6.6 (str. 62)?

11. Wniosek nr 3 zamieszczony w Rozdziale 7.1 (str. 70) nie do końca jest uzasadniony. W pracy dokonano porównania jedynie z jedną metodą opracowywania przebiegów *Rainflow*, w jednym przykładzie przedstawionym w Rozdziale 5.1. Samo zestawienie tabelaryczne wartości parametrów wyznaczonych cykli, bez szczegółowej analizy otrzymanych wyników, nie pozwala na takie sformułowanie.
12. Wniosek nr 7 zamieszczony w Rozdziale 7.2 (str. 71) dotyczący możliwości zastosowania krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT) nie znajduje swojego odzwierciedlenia w treści pracy. Prawdopodobnie jest to związane ze wskazywanym wcześniej brakiem opisu warsztatu naukowego Autora rozprawy.

Redakcję przedstawionej pracy należy ocenić pozytywnie, chociaż niektóre elementy z pewnością mogłyby być przedstawione w sposób bardziej czytelny. Ważniejsze uwagi redakcyjne zamieszczono poniżej:

1. W pracy zdarzają się pomyłki dotyczące cytowanych publikacji. W zamieszczonej bibliografii nie ma następujących pozycji: (Kocańda, 1999) – str. 6; (Sonsino, 2006) – str. 10. Pozycja (Ligaj, 2011) – nr 55 w spisie bibliografii nie dotyczy wieloosiowych stanów naprężeń. Jaki jest sens tłumaczenia na j. angielski tytułu publikacji nr 70? Trudno przy przyjętym sposobie cytowania rozróżnić pozycje nr 86 oraz nr 87, które podawane są jako (Romanowicz, Szybiński, 2014). Nie znaleziono w pracy odwołań do pozycji ze spisu bibliografii nr 64 (Miles, 1954) oraz nr 73 (Ozimek, 1985).
2. W niezbyt przejrzysty sposób zakończono akapit znajdujący się na str. 8 przed rys. 1.1.
3. Autor w pracy nie ustrzegł się pewnych kolokwializmów. Należy do nich np. sformułowanie „*przyjęcie przez strukturę dawki zmęczeniowej*” (str. 26).
4. Początek trzeciego akapitu zamieszczonego na str. 32 jest stylistycznie niepoprawny.
5. Punkt 3, str. 36, drugie zdanie - brak słowa „jest”.
6. Wydaje się, że pożądane w pracach naukowych jest ujednolicenie wyglądu i opisu tabel i ich zawartości dla podobnego zakresu prezentowanych danych.
7. Powszechnie w literaturze stosuje się angielską nazwę dla metody obwiedni w postaci „*Rainflow*”, np. w normie ASTM E 1049-85(2017), a nie „*Rain-flow*”.



3. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że analizy w niej zaprezentowane wykonane zostały na poziomie naukowym odpowiednim dla prac doktorskich. Zamieszczone w pracy uwagi krytyczne i redakcyjne, w dużej mierze dyskusyjne, mogą zostać wykorzystane przez Autora w realizacji przyszłych badań naukowych lub publikacji dotychczas uzyskanych wyników. Co najważniejsze nie obniżają one ogólnej pozytywnej oceny pracy.

Przedstawiona do recenzji praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule naukowym w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2016 r. poz. 882) i może być dopuszczona do publicznej obrony, a mgr inż. Dariusz Smolarski może ubiegać się o stopień naukowy doktora w dziedzinie *nauk inżynieryjno-technicznych* w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

