

Dr hab. inż. Andrzej Kazberuk, prof. PB
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C
15-351 Białystok

Białystok, 17.09.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgra inż. Dżuliana Agresta

"Weryfikacja niezawodnościowego modelu efektu skali na przykładzie zginania obrotowego"

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi Uchwała nr 22/2023 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z dnia 05.07.2023 r., zgodnie z którą zostałem wyznaczony na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Dżuliana Agresta.

Rozprawa została przygotowana w Politechnice Opolskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Adama Niestonego.

1. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Rozprawa dotyczy możliwości zastosowania oryginalnego modelu teorii niezawodności do opisu efektu skali obserwowanego w badaniach zmęczeniowych metali. Zakres pracy obejmował badania doświadczalne, wszechstronną analizę statystyczną otrzymanych wyników, propozycję własnego modelu statystycznego oraz weryfikację numeryczną adekwatności zaproponowanego modelu.

Praca liczy łącznie 109 stron. Zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz stosowanych symboli i oznaczeń oraz załącznik z tekstem źródłowym skryptu w języku MATLAB. Rozprawa została podzielona na 6 rozdziałów numerowanych. Zilustrowano ją 78 rysunkami i 25 tablicami. Bibliografia liczy 94 pozycje, przy czym większość stanowią prace obcojęzyczne.

W pracy można wyróżnić trzy części: literaturową (36 str.), doświadczalną (35 str.) i analityczno-numeryczną (15 str.).

W krótkim „Wstępie” przedstawiono fakty historyczne dotyczące obserwacji zjawiska efektu skali. Rozdział drugi, zatytułowany „Przegląd literatury”, Autor rozpoczął od przedstawienia dokonań Augusta Wöhlera. Następnie wymienił hipotezy redukcji naprężeń i scharakteryzował procesy powstawania pęknięć zmęczeniowych. Obszernie przedstawiono zasadę i przebieg próby zginania obrotowego. Powołując się na niedawno opublikowane prace, uzasadniono atrakcyjność i aktualność stosowania próby zginania obrotowego do określania trwałości zmęczeniowej materiału. Kolejne podrozdziały dotyczyły efektu najstabszego ogniwa i parametrów określających niezawodność. Podrozdział „Efekt skali w badaniach”, to dokładne omówienie wyników zawartych w sześciu pracach opublikowanych w latach 1998 – 2020. Szkoda, że Autor nie sięgnął do artykułu Zhu et al. 2022 (*Recent advances on size effect in metal fatigue under defects: a review*, Int J Fract 234:21-43)

przedstawiającej przegląd prawie 300 prac dotyczących badania zjawiska efektu skali w określaniu trwałości zmęczeniowej metali. Przegląd literatury kończy podrozdział „*Estymacja w badaniach*”, w którym przedstawiono metody dopasowywania krzywej do wyników badań oraz niektóre sposoby wygładzania danych. Tu recenzent ze zrozumieniem odniósł się do trudności, które napotkał Autor, dobierając polskie odpowiedniki terminów angielskich. Niestety, nie tłumaczy to braku precyzji przedstawień matematycznych i objaśnień używanych symboli.

W rozdziale 3. sformułowano następujący cel pracy: „*weryfikacja możliwości zastosowania modelu efektu skali wynikającego z teorii niezawodności w obszarze badań zmęczeniowych materiału przy zginaniu obrotowym*”. Przedstawiono również zakres i chronologię planowanych badań doświadczalnych i analitycznych. W podrozdziale 3.2 przedstawiono dwie hipotezy badawcze: 1) „*niezawodnościowy model efektu skali może zostać zastosowany do przeliczania i symulacji rozkładów wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu obrotowym*”, 2) „*funkcje niezawodności obiektów skalowanych uzyskane z wyniku badań eksperymentalnych można przeliczać względem siebie wykładnikiem skali*”. Nawiązując do postawionych zagadnień badawczych, ustalono zakres pracy, w tym założenia do programu badań doświadczalnych, prowadzących do ich wyjaśnienia.

W rozdziale 4. „*Badania eksperymentalne*” bardzo dokładnie opisano maszynę UB-M użytą do badań zmęczeniowych oraz udokumentowano proces walidacji każdego z 4 stanowisk badawczych maszyny. Następnie scharakteryzowano próbki użyte do badań i materiał (stal C45), z którego zostały wykonane. Oczekiwane parametry wytrzymałościowe materiału potwierdzono przeprowadzając próbę statycznego rozciągania na dwóch próbkach, oznaczenie twardości Brinella (45 pomiarów) oraz badania metalograficzne mikrostruktury materiału. Wykonując badania wstępne, dobrano poziom obciążenia próbek, tak aby badanie odbywało się w zakresie wysokiej liczby cykli. Obliczono, również metodą elementów skończonych, wartość maksymalnego naprężenia normalnego w przekroju próbki poddanej zginaniu. Badania zmęczeniowe (rozdział 4.8) przeprowadzono na próbkach o dwóch długościach odcinka bazowego. W sumie, oznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej przeprowadzono na 50 próbkach. Wyniki przedstawiono na rysunku 58 (nieczytelny) i w tabeli 12. Wyniki poddano obróbce statystycznej, sprawdzając dopasowanie wyników do rozkładu normalnego i rozkładu Weibulla. Przeanalizowano pozycję przelomów i wytrzymałość zmęczeniową próbek z podziałem na stanowiska badawcze. Na podstawie wyników rozkładów zawodności dla każdego ze stanowisk oraz wyniku testu dopasowania danych do rozkładu normalnego, wyeliminowano dane pochodzące z dwóch stanowisk.

W rozdziale 5. przedstawiono „*niezawodnościowy model efektu skali*” tzn. sposób jego budowy, symulację komputerową trwałości próbek z ujęciem efektu skali oraz weryfikację modelu. Na szczególne podkreślenie zasługuje tu szczegółowy opis poszczególnych etapów konstruowania modelu, dokumentacja wyników przeprowadzanych analiz statystycznych (zarówno w formie tabelarycznej, jak i graficznej), staranny komentarz oraz wnikliwie formułowanie wniosków cząstkowych.

Rozdział 6. zatytułowano „*Podsumowanie i wnioski*”. Po zwięzłym opisie wykonanych badań Autor stwierdził, że 1) „... uwidocznił się efekt skali dla próbek ze skalowalną cechą długości odcinka pomiarowego...”, 2) „... zmiany w rozkładach prawdopodobieństwa nie są w pełni zgodne z teorią

niezawodności”, 3) „W kształcie rozkładów funkcji gęstości prawdopodobieństwa próbek S_{3n} widoczny jest wpływ dodatkowego czynnika...”, 4) „wykazano, że można stosować teorię niezawodności układów szeregowych do estymacji funkcji rozkładów niezawodności obiektów skalowalnych”, 5) „... przygotowano skrypt w programie MATLAB do symulacji zmiany rozkładu funkcji niezawodności w badaniach wytrzymałości zmęczeniowej zginaniem obrotowym”, 6) „potwierdzono możliwość wykonania przeliczenia rozkładów prawdopodobieństwa wykładnikiem skali...”.

Przyjęty układ rozprawy i sposób uporządkowania treści jest logiczny, właściwy dla prac o charakterze badawczym. Wszystkie części rozprawy są merytorycznie spójne.

2. OCENA PRACY

2.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów

Trudno mieć jakiegokolwiek wątpliwości co do ważności i aktualności nauki o zmęczeniu materiałów. Każda praca naukowa, a już zwłaszcza eksperymentalna, która mieści się w tej dziedzinie, jest cenna. Istnienie efektu skali jest faktem, który musi być uwzględniany w projektowaniu elementów maszyn. I o ile określenie wpływu tego efektu na statyczną wytrzymałość materiału jest dość proste, to znacznie komplikuje się przy wyznaczaniu materiałowych parametrów mechaniki pękania, czy wytrzymałości zmęczeniowej. Zatem uważam za w pełni uzasadnione podejmowanie prób określenia wpływu efektu skali na wytrzymałość próbek poddanych procesowi zmęczenia w warunkach zginania obrotowego. Uważam, że zaplanowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych pozwalających zmierzyć ten efekt, jest bardzo trudne, a podjęcie jakiegokolwiek próby jest cenne.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy uznać, że tematyka rozprawy jest bardzo istotna i aktualna, ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i może mieć odniesienie do praktyki inżynierskiej.

Celem pracy doktorskiej było sprawdzenie, czy możliwe jest zastosowanie modelu efektu skali, w rozumieniu teorii niezawodności, do wyznaczania trwałości zmęczeniowej materiałów badanych w warunkach zginania obrotowego. Autor konsekwentnie ten cel realizował, stawiając hipotezy badawcze, budując program badań doświadczalnych i przeprowadzając wnikliwe i szerokie badania statystyczne wyników, zakończone sformułowaniem własnego modelu teorii niezawodności, wykorzystującego efekt skali.

Cel i hipotezy badawcze jednoznacznie nawiązują do tematu rozprawy, a ich sformułowanie nie budzi wątpliwości.

2.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Rozprawę doktorską mgra inż. Dżuliana Agresta oceniam pozytywnie pomimo kilku uwag dyskusyjnych, które przedstawiam w dalszej części recenzji. Badania eksperymentalne, ukierunkowane na weryfikację modelu efektu skali, zostały zaprogramowane prawidłowo. Metodyka badań nie budzi zastrzeżeń. Przeprowadzone badania zostały dokładnie opisane i udokumentowane. Uzyskano wartościowe rezultaty, które zostały przedstawione czytelnie w formie graficznej w postaci licznych wykresów i zestawień tabelarycznych. Pomimo

niedociągnięć w opisie wyników badań, można uznać, że Autor przeprowadził poprawną interpretację i krytyczną analizę uzyskanych wyników, dowodząc umiejętności posługiwania się metodami naukowymi w rozwiązywaniu problemu badawczego. Wnioski, które wynikają z przeprowadzonych analiz, zostały w większości sformułowane prawidłowo. Cel pracy został osiągnięty, a do ważnych dokonań Autora należy zaliczyć, między innymi:

1. Opracowanie i zrealizowanie interesującego i trudnego programu badań, w efekcie którego uzyskano szereg wartościowych wyników, które przyczynią się do budowania wiedzy o warunkach prowadzenia badań doświadczalnych mających uchwycić efekt skali w określaniu wytrzymałości zmęczeniowej metali.
2. Autor udowodnił, że panuje nad rozległym aparatem zaawansowanej statystycznej analizy danych i teorii niezawodności.
3. Autor wykazał się dojrzałością niezbędną do krytycznego podejścia do własnych wyników badań i ostrożnością w formułowaniu wniosków.

3. UWAGI DOTYCZĄCE PRACY

3.1 Uwagi dyskusyjne i krytyczne

1. Stwierdzenia na str. 8: „W 1923 roku po wielu latach badań i problemów, które występowały w kolejnictwie, opracowany został pierwszy model, za pomocą którego w sposób uproszczony zostało opisane zachowanie obciążonego materiału. Wówczas użyto zależność pomiędzy odkształceniem i naprężeniem” wymagają wskazania źródła i doprecyzowania. Na ogół uważa się, że popularny związek pomiędzy odkształceniem i naprężeniem został sformułowany w XVII wieku, a opracowanie go nie miało związku z problemami w kolejnictwie.
2. W przeglądzie literatury rażą rozległe odwołania historyczne, przykłady z dziedzin niezwiązanych z naukami technicznymi bądź zagadnienia ogólnie znane. Tu przykładem jest rozdział 2.2 „Hipotezy wytrzymałościowe” – trywialny i niepotrzebny – w interesujących odcinkach badanych próbek belkowych nie występuje złożony stan naprężeń.
3. Autor nie uzasadnił wyboru wydłużenia odcinka testowego próbki jako czynnika mającego uchwycić doświadczalnie efekt skali. Próbki z trzykrotnie wydłużoną bazą miały znacznie mniejszą sztywność w stosunku do próbek referencyjnych, a tym samym, przy jednakowym obciążeniu, ich ugięcia były większe (przynajmniej dziewięciokrotnie). Również inny był promień krzywizny wydłużonej części bazowej. Czy ten czynnik nie wpływał znacząco na obniżenie trwałości zmęczeniowej tej serii próbek?
4. W rozdziale 4.2 „Walidacja warunków pracy stanowisk pomiarowych” brakuje opisu wielkości ΔR używanego zarówno w tekście, jak i na rysunkach 40-42. Nie jest również jasne czy walidacja dotyczyła warunków statycznych, czy dynamicznych przykładanego obciążenia.
5. Rozdział 4.3 str. 60. Autor opisuje statyczną próbę rozciągania, nie powołując się na żadną normę (PN-EN ISO 6892 ?). Podobnie przy próbie twardości Brinella: brakuje powołania normy (PN-EN ISO 6506 ?),

określenia średnicy i materiału użytego penetratora. Łączenie łamaną punktów na rys. 50 nie ma sensu.

6. Rozdział 4.6 str 69-71. Przedstawione wyniki „symulacji komputerowej metodą elementów skończonych” (rys. 55, 56; tab. 11) są kuriozalne. Dla schematu belki swobodnie podpartej (tzn. statycznie wyznaczalnej) otrzymano wartości naprężeń normalnych zależne od kształtu przekroju belki, czyli ewidentnie błędne. W części bazowej belki mamy stan czystego zginania i we wszystkich przekrojach tego odcinka belki działają jedynie naprężenia normalne i „redukowanie” ich wzorem Hubera-Misesa nie ma sensu. Dokładny i jedynie poprawny, to wynik nazywany przez Autora „empirycznym”, a wynikający z teorii zginania belek (wz. 56).
7. Komentarz na str. 76: „... spodziewaną przyczyną wpływającą na powstanie różnicy jest dodatkowa zmienna wynikająca z technologii przygotowania próbek, co nie jest przedmiotem pracy...”. O jaką „dodatkową zmienną” tu chodzi? Do tego miejsca Autor twierdził, że próbki różnią się jedynie długością bazy pomiarowej.
8. Wnioski nie zostały wyeksponowane. Recenzent musiał ich samodzielnie poszukiwać w tekście podsumowania. Te, które udało mi się znaleźć, uważam za cenne i na ogół poprawne, chociaż niektóre z nich zawierają stwierdzenia o charakterze spekulacyjnym i niemającym pokrycia w przeprowadzonych badaniach, np. „...widoczny jest wpływ dodatkowego czynnika, który może być spowodowany obróbką mechaniczną próbek na dłuższym odcinku materiału, ..., trudności podczas przygotowania próbek, ..., drgania będące efektem innej sztywności układu badawczego ...”

3.2 Uwagi natury formalnej

Pozycje wymienione w spisie literatury zostały zacytowane. W treści przywołano rysunki i tabele zamieszczone w rozprawie. W odbiorze tekstu przeszkadza widoczny brak staranności edytorskiej. Poniżej przedstawiłem niektóre uwagi natury edycyjnej:

1. Praca zawiera wiele błędów gramatycznych, interpunkcyjnych, zdań niezgodnych z kontekstem, literówek oraz niejasnych sformułowań. Recenzent nie jest językoznawcą, ale kierując się posiadaną wiedzą, uważam, że powinniśmy pisać „badania giętno-obrotowe”, a nie „gięto obrotowe” (a to jest już błąd ortograficzny).
2. Część rysunków prezentujących wyniki badań jest zbędna. Np. rys. 47 różni się od rys. 46 tylko skalą i opisami osi. Łamana przedstawiona na rys. 50 nie ma większego sensu. To nie jest „wykres”, czyli graficzna reprezentacja funkcji, tylko przedstawienie odchyłeń od wartości średniej jedynej pomierzonej wielkości. Nic nie wnoszą fotografie mikrostruktury stali C45 umieszczone w tab. 10. Rysunek 58 jest zupełnie nieczytelny.
3. Spis literatury przedstawiono w kolejności cytowania. Uważam, że wygodniejszy dla czytającego jest porządek alfabetyczny. W większości pozycji literaturowych przyjęto format: autor, tytuł, wydawnictwo, rok. Dla pozycji [29, 30, 38, 49, 54-63, 93] przyjęto format: tytuł, autor, rok, wydawnictwo. Uważam, że należało zdecydować się na jeden styl bibliograficzny.
4. Brakuje również konsekwencji w sposobie cytowania: raz jest to numer w nawiasach kwadratowych, innym razem nazwiska autorów bez numeru w wykazie pozycji, np. str. 17 „...Dominguez Almaraz ...”, str. 19

„...Dominguez Almaraz...”, „...Morton i Hearle...”, str. 20, 21, 23 „...Morton i Hearle...”, str. 22 „...Ewing i Humfrey...”, „...Charles Sanders Peirce...”, str. 25 „...Spencer i Smith...”.

5. Nieprecyzyjne lub brak niezbędnych powołań na źródła literaturowe. Reprezentatywny przykład to zdanie na str. 9: „*Do powszechnych metod analizy zalicza się klasyczne teorie [?] takie jak reguła Neubera (1961) [?], model Glinki-Molskiego (1985) [?], a także nowe rozbudowane modele jak Łagody-Machy (1998) [17].*”. Powołanych tutaj prac Neubera oraz Glinki i Molskiego nie ma w wykazie literatury. Nie podano też, kto twierdzi, że te metody są powszechne.
6. Cytując wzory matematyczne, Autor umieszcza powołania na źródła literaturowe w treści opisu, często dość daleko od cytowanego wzoru (np. 2-9, 11-21, 41-43, 45).

Wymienione przeze mnie uwagi nie umniejszają w istotny sposób oryginalności i wartości merytorycznej prezentowanej pracy.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Dżuliana Agresta rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące modelowania matematycznego efektu skali w ocenie wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji. Autor, posługując się przeprowadzonymi własnymi i oryginalnymi badaniami doświadczalnymi, wykazał adekwatność zaproponowanego niezawodnościowego modelu efektu skali. Model ten może mieć zastosowanie praktyczne.

Sformułowany w rozprawie cel został moim zdaniem osiągnięty. Autor rozprawy wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem pracy, umiejętnościami programowania i prowadzenia badań doświadczalnych, w tym wykorzystania metod badań doświadczalnych, zaawansowanej statystycznej analizy wyników i symulacji numerycznej. Zrealizował założony program badań, uzyskał oryginalne i wartościowe rezultaty, przeanalizował je i krytycznie ocenił oraz zakończył poprawnymi wnioskami.

Opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2023, poz. 742). Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna* w zakresie badania i modelowania matematycznego efektu skali w zmęczeniu materiałów. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgra inż. Dżuliana Agresta do publicznej obrony rozprawy.

