

prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Inżynierii Biomedycznej  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Dżuliana Agrest**

**nt.: „Weryfikacja niezawodnościowego modelu efektu skali na przykładzie zginania obrotowego”**

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała rady naukowej dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Opolskiej z dnia 5.07.2023 roku i pismo Przewodniczącego rady z dnia 6.07.2023 roku.

### **1. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Podstawowym zagadnieniem rozpatrywanym w opiniowanej pracy doktorskiej jest możliwość modelowania wpływu skali na trwałość zmęczeniową z zastosowaniem metod probabilistycznych znanych i rozwijanych w teorii niezawodności. Wpływ skali na wytrzymałość materiału jest analizowany i opisywany od wielu lat zarówno na drodze eksperymentalnej, jak i rozważań teoretycznych. Doczekał się wielu opracowań, w tym także w zakresie analizy wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. Do kanonu podstaw konstrukcji maszyn można zaliczyć metody analizy rzeczywistych współczynników bezpieczeństwa elementów z karami bazujących na analizie wykresów naprężeń granicznych z uwzględnieniem współczynników wpływu wielkości przedmiotu. Możliwość wzajemnego przenoszenia wyników badań prowadzonych na obiektach o różnych długościach lub przekrojach, jednak przy takich samych wartościach naprężeń, znacznie ułatwia proces konstruowania zgodnie z procedurami Fatigue Design i tym samym upraszcza optymalizowanie konstrukcji ze względu na jej wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. Przykładem mogą być badania właściwości zmęczeniowych materiałów konstrukcyjnych na próbkach o znormalizowanych proporcjach wymiarowych lub badania zmęczeniowe komponentów maszyn prowadzone na ich skalowanych modelach fizycznych.

Biorąc pod uwagę probabilistyczny charakter procesów zmęczeniowych, w ich opisie stosowane jest także modelowanie stochastyczne (opisane m.in. w pracy Sobczyka i Spencera z 1996 r. pt. Stochastyczne modele zmęczenia materiałów). Takie podejście pozwala również na zastosowanie w opisie zmęczenia metod wykorzystywanych w analizie niezawodności obiektów technicznych.

Niezawodnościowe podejście w opisie zmęczenia ma szczególne znaczenie w analizie złożonych struktur, za sprawą możliwości oszacowania prawdopodobieństwa zachowania przez analizowany obiekt stanu zdadności w określonym przedziale czasowym.

Jak już wcześniej wspomniano, wymienione zagadnienia stanowią przedmiot badań w wielu ośrodkach, jednak wymagają poszukiwania rozwiązań poprawiających skuteczność prognozowania wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. Dotyczy to także obiektów pracujących w warunkach obrotowego zginania w reżimie zmęczenia wysokocyklowego, tj. w zakresie rozpatrywanym przez

Doktoranta.

Dotychczasowy rozwój metod analizy wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej w ujęciu niezawodnościowym pozostawia w dalszym ciągu spore obszary do analizy i badań, w szczególności w zakresie stochastycznego opisu poszczególnych czynników wpływających na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. W literaturze brakuje także szerszej analizy efektu skali w zmęczeniu z zastosowaniem modelowania stosowanego w ocenie niezawodności.

**W świetle powyższych stwierdzeń można uznać podjęcie tematu rozprawy za uzasadnione, a podejmowaną tematykę aktualną pod względem poznawczym i praktycznym.**

Rozprawa mgr inż. Dżuliana Agrest została zawarta na 107 stronach, co raczej mieści się w niższych od typowych zakresach objętości tego typu opracowań. Doktorant treść pracy wzbogacił 80. rysunkami i 25. tabelami z danymi i wynikami badań. Bibliografia załącznikowa obejmuje 94 pozycje literatury. W załączonym wykazie brakuje odwołań do prac z udziałem Doktoranta. W tym miejscu warto zaznaczyć, że Doktorant opublikował kilka prac z zakresu tematu rozprawy doktorskiej, w tym m.in.:

- Niesłony A., Agrest D. Badanie efektu skali poprzez modyfikację odcinka pomiarowego próbki przy zginaniu obrotowym oraz ocena wpływu chropowatości. Modelowanie Inżynierskie, T. 36, nr 67, 2018, s. 44-48.
- Agrest D. Efekt skali w próbach zginania obrotowego. Zeszyty Naukowe. Mechanika. Politechnika Opolska, z. 108, 2017, s. 7-10.
- Agrest D. Badanie efektu skali poprzez modyfikację odcinka pomiarowego próbki przy zginaniu obrotowym. Zeszyty Naukowe. Mechanika. Politechnika Opolska, z. 107, 2016, 9-12.
- Agrest D. Opis niezawodnościowy efektu skali w zmęczeniu elementów maszyn. Zeszyty Naukowe. Mechanika. Politechnika Opolska, z. 106, 2015, 28.
- Agrest D. Koncepcja badań do wyznaczenia współczynnika skali przy zginaniu obrotowym. Zeszyty Naukowe. Mechanika. Politechnika Opolska, z. 105, 2015, 9-12.

Treść pracy została podzielona na 6 rozdziałów poprzedzonych spisem treści oraz wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów. Na końcu pracy zamieszczono także wymagane ustawowym zapisem streszczenia w języku polskim i angielskim oraz załącznik zawierający skrypt dla programu MATLAB.

**W pierwszym rozdziale** zatytułowanym „Wstęp” Doktorant krótko zapoznaje czytających z zagadnieniem efektu skali i jego występowaniem w różnych obszarach działalności człowieka. Brakuje w nim w mojej ocenie informacji, której można by oczekiwać od wstępu lub wprowadzenia, tj. uzasadnienia dla podjęcia tematu pracy, wskazania problemu, którego rozwiązaniu służy oraz jego znaczenia dla rozwoju nauki, w tym nowości w aspekcie aktualnego stanu wiedzy.

**Drugi rozdział** pracy został poświęcony przeglądowi literatury w zakresie podstawowych zagadnień związanych z tematyką pracy, tj. właściwościami mechanicznymi materiałów konstrukcyjnych, metodom analizy niezawodności oraz efektowi skali. Informacje zawarte w tym rozdziale mają w dużej mierze podręcznikowy charakter i tylko częściowo oddają aktualny stan wiedzy w zakresie tematu pracy. Szkoda, że Autor nie przedstawił w pracy podsumowania i wniosków płynących z analizy stanu wiedzy, w których wskazałby braki lub słabości istniejących rozwiązań oraz określiłby wytyczne do badań własnych, w tym np. odnoszące się do planowanych do weryfikacji (zgodnie z tematem pracy) metod analizy niezawodności i efektu skali.

**W kolejnym rozdziale** Doktorant przedstawił cel i zakres pracy, które w skrócie można opisać jako „weryfikację możliwości zastosowania modelu efektu skali wynikającego z teorii niezawodności w obszarze badań zmęczeniowych materiału przy zginaniu obrotowym”. Autor nie definiuje jakie modele i teorie będą podlegały analizie, w tym jakie jest ich źródło: propozycje własne, literaturowe? Opis zakresu badań ma trochę nietypową formułę, gdyż przedstawiony jest w czasie przyszłym, tzn. przedstawia to, co Autor zamierza zrobić, a nie to co zostało zrobione. Tym samym bardziej przypomina harmonogram planowanego projektu badawczego, niż omówienie zakresu przeprowadzonych prac naukowo-badawczych.

W dalszej części rozdziału Doktorant stawia dwie hipotezy badawcze, które w efekcie prowadzonych badań podlegały ocenie. Pierwsza hipoteza zakłada, że „niezawodnościowy model efektu skali może

zostać zastosowany do przeliczenia i symulacji rozkładów wytrzymałości zmęczeniowej dla skalowanych długości próbek w testach zmęczeniowych przy obciążeniu zginaniem obrotowym”. Druga hipoteza zakłada, że „funkcje niezawodności  $R(t)$  obiektów skalowanych uzyskane z wyników badań eksperymentalnych można przeliczać względem siebie wykładnikiem skali”.

Postawione hipotezy badawcze w mojej ocenie nie budzą uwag, poza trudnym do interpretacji opisem funkcji niezawodności uzyskanej z symulacji komputerowej.

Doktorant obydwie hipotezy przedstawił w postaci równań wraz z ich alternatywnymi postaciami.

**W czwartym rozdziale** rozprawy Autor szczegółowo omawia przeprowadzone badania eksperymentalne. W rozdziale znajdujemy m.in. informacje o stanowisku badawczym do prowadzenia testów zmęczeniowych w warunkach zginania obrotowego wraz z weryfikacją wskazań jego układów pomiarowych, charakterystykę próbek do badań statycznych i zmęczeniowych oraz wyniki badań. Badania eksperymentalne zrealizowane przez Doktoranta objęły analizę własności statycznych, pomiary twardości, analizę makro i mikrostruktury badanych próbek oraz najważniejsze z punktu widzenia celów pracy badania trwałości zmęczeniowej. W badaniach zmęczeniowych Autor w pierwszej kolejności wyznaczył wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu naprężeniowym dla zakresu zmęczenia wysokocyklowego i na tej podstawie określił poziom obciążenia stosowany w dalszej, zasadniczej części badań, służącej zebraniu danych eksperymentalnych do testowania/weryfikacji postawionych hipotez.

**Piąty rozdział pracy** zawiera opis przeprowadzonych analiz w zakresie weryfikacji postawionych hipotez badawczych. W pierwszej części ocenie podlega możliwość uwzględnienia efektu skali z zastosowaniem symulacji komputerowych prowadzonych na bazie „teorii niezawodności i opisanych w literaturze informacji o efekcie skali”. Niestety opis zawarty w dalszej części rozdziału nie ułatwia zrozumienia zastosowanego sposobu modelowania trwałości próbek w wersji bazowej i skalowanej.

Drugim analizowanym podejściem jest znacznie jaśniej zdefiniowany i opisany niezawodnościowy model efektu skali, który umożliwia estymację niezawodności próbek skalowanych na podstawie niezawodności próbek bazowych i na odwrót. Rozdział kończy szczegółowe porównanie wyników badań symulowanych, estymowanych i eksperymentalnych.

Ostatnim rozdziałem rozprawy jest **rozdział szósty** zatytułowany „Podsumowanie i wnioski”, w którym Doktorant zgodnie z jego tytułem podsumowuje przeprowadzone prace oraz wskazuje najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań i analiz ich wyników. Zaprezentowane wnioski w mojej ocenie znajdują odzwierciedlenie w treści pracy i w ogólności nie budzą zastrzeżeń. W rozdziale brakuje jednak jasno wyróżnionych wskazań do dalszych badań oraz wniosków, które dotyczyłyby praktycznego zastosowania uzyskanych wyników w praktyce. Zwraca uwagę także nieco chaotyczny charakter treści rozdziału. Elementy podsumowania przeplatają się bowiem z wnioskami.

Zamieszony w dalszej części pracy **Spis literatury** zawiera wykaz źródeł literaturowych, które w ogólności odzwierciedlają tematykę pracy, jednak w mojej ocenie brakuje w nim co najmniej kilku ważnych pozycji odnoszących się do niezawodnościowego podejścia w ocenie trwałości zmęczeniowej, w tym np. prac P.H. Wirschinga, czy wspomnianej wcześniej pracy Sobczyka i Spencera omawiającej stochastyczne modele zmęczenia materiałów. W przyszłych badaniach proponuję też zwrócić uwagę na rozkład Birnbaum-Saunders dedykowany trwałości zmęczeniowej (Birnbaum ZW, Saunders SC. A new family of life distribution. J Appl Probab. 1969; 6(2): 319-327 opisany także m.in. w pracy Balakrishnan N, Kundu D (2019) Birnbaum-Saunders distribution: A review of models, analysis, and applications. Appl Stoch Model Bus Ind 35:4-49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/asmb.2348>).

Zwraca także uwagę niewielka liczba bieżących publikacji z omawianej tematyki. W wykazie znaleziono łącznie zaledwie 5 publikacji z ostatnich 5 lat.

**Niezależnie od wskazanych kilku uwag krytycznych, z przedstawionego powyżej omówienia wynika, że oceniana rozprawa spełnia pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału formalne wymagania stawiane tego typu pracom.**

## 2. Ocena rozprawy

Analiza rozprawy pozwala sformułować jej ogólnie pozytywną ocenę, w szczególności w zakresie realizacji badań własnych, w tym przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz wyników ich analizy porównawczej z wynikami rozważań teoretycznych. Nieco mniej przekonująca jest część dotycząca rozpoznania stanu wiedzy i uzasadnienia znaczenia prowadzonych badań dla rozwoju analizowanej problematyki badawczej.

Zaproponowany zakres badań odpowiadał postawionemu celowi przedsięwzięcia. Doktorant wykazał się właściwym przygotowaniem dla realizacji postawionych zadań badawczych, w tym ogólną wiedzą i umiejętnościami, które umożliwiły przeprowadzenie weryfikacji postawionych hipotez badawczych.

Zwraca także uwagę krytyczne podejście do uzyskanych wyników badań eksperymentalnych, poprzedzone wstępną walidacją układów pomiarowych stanowiska badawczego.

Biorąc pod uwagę zakres tematyczny rozprawy obejmujący analizę właściwości mechanicznych oraz problematykę niezawodności, a także zastosowane metody badawcze, można jednoznacznie zakwalifikować ją do dyscypliny inżynieria mechaniczna.

### 2.1. Osiągnięcie Doktoranta

Zasadniczym celem pracy była weryfikacja możliwości zastosowania modelu efektu skali opartego na opisach niezawodnościowych w zakresie analizy trwałości zmęczeniowej próbek poddanych obrotowemu zginaniu. Cel ten został przez Doktoranta osiągnięty poprzez realizację szerokiego zakresu badań eksperymentalnych prowadzonych na dwóch typach próbek różniących się długością części pomiarowej oraz poprzez analizę ich wyników z zastosowaniem probabilistycznych modeli stosowanych w teorii niezawodności. Pozytywna weryfikacja hipotezy zakładającej możliwość teoretycznego określania trwałości zmęczeniowej próbek na podstawie wyników badań zmęczeniowych ich skalowanych odpowiedników może stanowić ważną przesłankę w zakresie planowania i realizacji często bardzo kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych. Jej praktyczne zastosowanie wymagać jednak będzie znacznie szerszego zakresu badań prowadzonych dla bardziej zróżnicowanych poziomów obciążeń (najlepiej umożliwiających „skalowanie” pełnych wykresów trwałości zmęczeniowej) oraz zdefiniowania sposobów skalowania próbek lub elementów konstrukcyjnych.

### 2.2. Uwagi do rozprawy

Przedstawiona powyżej pozytywna ocena rozprawy i jej osiągnięcia naukowego, nie oznacza jednak, że nie można mieć pewnych krytycznych, zapewne w części dyskusyjnych uwag, do poszczególnych zagadnień prezentowanych przez Doktoranta. Część uwag wynikających z analizy strony formalnej pracy zamieszczono bezpośrednio w punkcie „Ogólna charakterystyka rozprawy”. Zwrócono jednak uwagę także na kilka zagadnień o charakterze merytorycznym, które należałoby wyjaśnić lub poddać dyskusji w trakcie publicznej obrony. Poniżej zestawiono je z podziałem na uwagi o charakterze ogólnym i nieco bardziej szczegółowym.

#### a. Uwagi ogólne

- Doktorant jest Autorem publikacji, które w znacznym zakresie dotyczą problematyki podjętej w ramach opisanych w rozprawie badań. Z czego wynika ich pominięcie w rozprawie ?
- Spory niedosyt budzi mało precyzyjny opis symulacji komputerowej trwałości próbek opisany w rozdziale 5.2. Doktorant pisze: „Z wykorzystaniem teorii niezawodności i opisanych w literaturze informacji o efekcie skali został przygotowany skrypt do wykonania symulacji wpływu efektu skali na trwałość zmęczeniową próbek obciążonych zginaniem obrotowym”. Co oznacza w tym przypadku „teoria niezawodności” i „informacje o efekcie skali” ? Niestety dalszy opis sposobu symulacji jest również mało precyzyjny i przez to przebieg badań wydaje się być trudny do odtworzenia przez czytającego rozprawę. Należy pamiętać, że możliwość replikacji badań jest jednym z warunków dobrze opisanych wyników badań.
- Dlaczego badania symulacyjne zamieszczono w rozdziale „Niezasadnościowy model efektu

skali”, który w mojej ocenie jest odrębnym podejściem do analizowanego problemu. Wskazuje na to także rozdzielnie obydwu podejść poprzez przyjęcie dwóch odrębnych hipotez.

- Doktorant przeprowadził szczegółową analizę wyników badań eksperymentalnych, także w ujęciu statystycznym i probabilistycznym. Na tej podstawie ograniczył dane uwzględniane w dalszych analizach do wyników uzyskanych z dwóch stanowisk (2 i 4) spośród czterech dostępnych, stwierdzając że na odrzuconych stanowiskach (1 i 3) istnieje ryzyko zakłócenia uzyskanych trwałości innymi czynnikami. Czy Doktorant pomimo tego próbował poddać je analizie ? Być może pozwoliłoby to ocenić skuteczność przyjętego sposobu „skalowania” trwałości także w mniej korzystnych warunkach.
- W badaniach weryfikacyjnych Doktorant ograniczył się do realizacji testów zmęczeniowych na jednym poziomie obciążenia momentem gnących na stanowisku do obrotowego, czteropunktowego zginania. Wartość siły wywołującej moment gnący została przyjęta na poziomie 300 N, co dawało maksymalne naprężenie gnące wynoszące około 350 MPa. Dobór siły obciążającej został opisany w rozdziale 4.5, lecz brakuje w nim kryterium doboru wartości obciążenia. Czym kierowano się przy doborze takiej wartości naprężenia w badaniach weryfikacyjnych ?
- W pracy Doktorant kilkakrotnie odwołuje się do wielu źródeł jednocześnie nie wskazując czego dotyczą poszczególne prace (strony: 9, 11, 19, 39). Przykładowo na stronie nr 9 znajduje się następujące sformułowanie: „Obecnie stosowane są techniki komputerowe, w tym metody numeryczne, na przykład metoda elementów skończonych, metoda elementów brzegowych, jak i metody doświadczalne takie jak: metoda elastooptyczna, metoda cyfrowej korelacji obrazu czy termowizja i wiele innych [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] [16], [17].”. Należy unikać tego typu sytuacji. W opisywanym przypadku Autor wiąże wymienione techniki badawcze z badaniami nad wytrzymałością materiałów – jak to rozumieć ?
- Doktorant wielokrotnie, chociaż nie zawsze, pomija odwołanie do źródeł literaturowych powołując się na metody lub modele opisywane nazwiskiem lub nazwiskami autorów (strony: 15<sup>11</sup>, 19<sup>8</sup>, 25<sup>6</sup>, 33<sup>5</sup>, 35<sup>1</sup>, 36<sup>1</sup>, 37<sup>5</sup>, itp.). Brak wskazania źródła bardzo utrudnia jego identyfikację tylko na podstawie nazwisk autorów publikacji.

## b. Uwagi szczegółowe

- Co oznacza stwierdzenie na stronie 13<sup>7</sup>, że zginanie obrotowe „wykorzystywane jest w przemyśle, ze względu na nieosiową charakterystykę obciążenia” ?
- Strona 14<sub>4</sub>. Powinno być „wprowadzenie” zamiast „wprowadzenia”.
- Wykres pokazany na rysunku 20 nie posiada żadnego wyjaśnienia lub komentarza.
- Używając skrótów, należy przy ich pierwszym użyciu (np. rysunek 27) podać ich pełne znaczenie, np. probability density function (PDF).
- Strona 47<sup>8</sup>. Autor napisał: „Problem badawczy rozważony w tezie ...”. W pracy nie zaproponowano „tezy”.
- Podpis pod rysunkiem 34. Powinno być: „licznik cykli stanowiska nr 3 i 4”.
- Strona 54<sub>3</sub>, rysunek 40-42. Co oznacza  $\Delta R$  ?
- Strona 57<sub>13</sub>. Czy na pewno C45 to stal narzędziowa ?
- Strona 57<sub>6</sub>. Co oznacza „długie przewężenie partii próbek” ?
- Strona 70<sup>6</sup>. Jaki model materiałowy użyto w modelowaniu próbki w jej analizie numerycznej ?
- Strona 79<sup>4-6</sup>. Co oznacza zgodność z teorią niezawodności i pozycja przełomów próbek.
- Strona 86<sup>12</sup>. Co oznacza (57) przy odwołaniu do testu Andersona-Darlinga ?

## c. Uwagi redakcyjne

W mojej ocenie Doktorant dołożył starań, aby strona redakcyjna rozprawy nie budziła zastrzeżeń i można uznać, że w ogólności jest zredagowana poprawnie i starannie. Można mieć jednak pewne uwagi co do jakości przygotowania rysunków i wykresów. Do ich opisu zastosowano bowiem różnego

typu i rozmiaru czcionki. W niektórych przypadkach opisy rysunków są nieczytelne (zbyt małe). Ponadto, biorąc pod uwagę, że praca jest napisana w języku polskim, w mojej ocenie dane prezentowane na wykresach i rysunkach powinny zachować polskojęzyczną formę.

Niestety pewne zastrzeżenia można mieć także do opisu źródeł w bibliografii załącznikowej. W niektórych przypadkach brakuje części danych bibliograficznych (poz. [10], [86]), ponadto w odwołaniach do stron internetowych brakuje wymaganych informacji, w tym daty dostępu (poz. [73-75]).

Ocena strony językowej pracy nie budzi uwag, poza nielicznymi usterkami stylistycznymi i tzw. „literówkami”. Autorowi zdarzyły się także drobne powtórzenia, które nie wpłynęły jednak na jej ogólnie pozytywny odbiór.

### **3. Podsumowanie i wniosek końcowy**

W mojej ocenie Doktorant w trakcie realizacji pracy wykazał się właściwymi kompetencjami w zakresie planowania i prowadzenia prac eksperymentalnych, a także w zakresie opracowania i analizy otrzymanych wyników badań. Metody i narzędzia badawcze użyte przez Doktoranta są właściwe dla przyjętego celu i zakresu pracy, a sposoby przedstawienia wyników badań i ich analizy zgodne z przyjętymi standardami w tym zakresie.

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że podjęte w niej zamierzenie badawcze zostało osiągnięte, a rozprawa zawiera osiągnięcia poznawcze i utylitarne mogące w przyszłości znaleźć zastosowanie w praktyce. Przedmiotem rozprawy doktorskiej było oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant wykazał się właściwym przygotowaniem teoretycznym oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Można zatem stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Dżuliana Agrest spełnia ustawowe wymogi i może być dopuszczona do dalszych czynności związanych z nadaniem stopnia doktora.