

Kraków, 15 lutego 2026 r.

Prof. dr hab. inż. Marek S. Kozień
Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki Stosowanej i Biomechaniki

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Swachy
pt. „Weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń
zmęczenia w zakresie wysoko- i gigacyklowym
z zastosowaniem systemu do badań z częstotliwością
ultradźwiękową”

1. Podstawa prawna

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Swachy pt. „Weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczenia w zakresie wysoko- i gigacyklowym z zastosowaniem systemu do badań z częstotliwością ultradźwiękową” została wykonana na podstawie zawiadomienia nr 1/NB.520.3.2025 o wyznaczeniu na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej, Pana dr hab. inż. Łukasza Muślewskiego, prof. PBŚ z dnia 05 listopada 2025 r., oraz związanego z nim pisma, również sygnowanego przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej (1/NB.520.3.2025).

2. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca została wydrukowana w formie zeszytu/broszury w formacie B5 i zawiera 156 numerowanych stron. W zakresie merytorycznym obejmuje dziewięć rozdziałów i spis literatury. Praca uzupełniona jest streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz wykazem ważniejszych skrótów, oznaczeń i symboli.

Krótki, jednostronicowy **pierwszy rozdział** zatytułowany „Wprowadzenie” zawiera zwarte uzasadnienie wybranej tematyki pracy. W **rozdziale drugim** zatytułowanym „Przegląd stanu wiedzy” przedstawiono pokrótce zagadnienie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów. W dalszej części szeroko przedstawiono zagadnienie badań zmęczeniowych w

zakresie gigacyklowym odnosząc się do schematyzacji krzywych S-N i mechanizmów zniszczenia. Następnie dokładnie omówiono ultradźwiękową metodę doświadczalnego wyznaczania trwałości zmęczeniowej podając jej podstawy teoretyczne, omawiając stanowisko badawcze oraz przedstawiając problemy interpretacyjne badań związane z: wpływem temperatury (nagrzewanie się próbki w trakcie badań), efektem skali (relatywnie mały rozmiar próbki), wpływem tłumienia wewnętrznego materiału na drgania próbki i rodzajem obciążeń/wymuszeń próbki (przebieg harmoniczny, obciążenia programowane blokowe). Ostatnim poruszonym zagadnieniem jest szacowanie trwałości zmęczeniowej, a w szczególności przedstawienie liniowych hipotez sumowania (kumulacji) uszkodzeń zmęczeniowych. Rozdział ten jest w praktyce przeglądem literatury dotyczącym wszystkich zagadnień poruszanych w pracy doktorskiej, o czym świadczy również tytuł ostatniego podrozdziału (2.4) – „Wnioski z przeglądu literatury”. W **rozdziale trzecim** „Cel i zakres pracy” sformułowana została hipoteza pracy, przedstawione zostały jej cele i zakres. W **rozdziale czwartym** „Program badań” omówiono całościowo realizowany program badań dla danego materiału (próbek wykonanych z wybranego materiału), wraz z jego schematyzacją. Omówiono też szczegółowo metodykę badań zmęczeniowych, przedstawiając szczegółowy schemat procedury badań. Opisano też wykorzystywaną aparaturę badawczą, a w szczególności ultradźwiękowy system do badań zmęczeniowych Italsigma MU26, zdefiniowano programy obciążeń oraz przedstawiono charakterystyki wybranej do badań stali konstrukcyjnej S355J2+N. W **rozdziale piątym** „Badania wstępne” omówiono szczegółowo zrealizowane badania doświadczalne i symulacyjne, jakie były niezbędne do przygotowania i przeprowadzenia zasadniczych badań doświadczalnych związanych z realizacją tematyki pracy. Wykonano badania doświadczalne, które pozwoliły na wyznaczenie wartości wymaganych parametrów modelu: modułu Younga (monotoniczna próba rozciągania) i gęstości masy. ponadto zbudowano i przetestowano układ pomiarowy do pomiaru naprężeń w próbce w oparciu o układ tensometryczny HBM (mostek tensometryczny). Ponadto wykonano badania symulacyjne próbek wykorzystywanych w badaniach, przeprowadzone metodą elementów skończonych w celu potwierdzenia wartości częstotliwości drgań własnych wzdłużnych próbki o kształcie klepsydrowym (pierwsza forma drgań) oraz weryfikacji wartości naprężeń w próbce - analiza drgań wymuszonych w stanie ustalonym). Omówiono również metodykę badań fraktograficznych. W **rozdziale szóstym** „Badania zasadnicze” przedstawiono wyniki zasadniczych badań zmęczeniowych przeprowadzonych dla wymuszeń o charakterze stałoamplitudowym oraz programowanym oraz omówiono

wyniki badań fraktograficznych wybranych przełomów próbek. W **rozdziale siódmym** „Weryfikacja wybranych liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych” dokonano estymacji trwałości zmęczeniowej próbek przy zastosowaniu czterech wybranych liniowych hipotez kumulacji naprężeń na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych o charakterze stałoamplitudowym. W **rozdziale ósmym** „Analiza wyników badań i obliczeń” dokonano zbiorczego i finalnego podsumowania uzyskanych wyników badań doświadczalnych mając na uwadze zdefiniowane cele i zakres pracy. Ostatni **dziwiasy rozdział** „Podsumowanie” zawiera uwagi końcowe wynikające z wykonanych badań. Podane też zostały osiągnięcia autora. Finalnie sformułowane zostały wnioski płynące ze zrealizowanych badań oraz wnioski dotyczące dalszych badań. **Spis literatury** zawiera 179 pozycji. Literatura jest aktualna, a ostatnie pozycje pochodzą z 2024 roku (ponadto wytyczne ASME z 2025 roku).

3. Ocena pracy

3.1 Ocena ogólna

Praca doktorska dotyczy zagadnienia badań zmęczeniowych w zakresie gigacylowym, a w szczególności szacowania trwałości zmęczeniowej materiału, mając na uwadze wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji, w zakresie wysoko- i gigacylowym. Tematyka pracy jest bardzo aktualna. Z uwagi na narastające oczekiwania dotyczące projektowania konstrukcji narażonych na drgania, o jak najdłuższym, ale równocześnie zdefiniowanym czasie eksploatacji, bądź określenia czasu bezpiecznej eksploatacji, obecnie jednym z najpoważniejszych ograniczeń jest możliwość wiarygodnego opisu własności materiałowych dotyczących zagadnień zmęczeniowych. Własności te powinny opierać się na przeprowadzonych doświadczalnych testach zmęczeniowych. Obecne możliwości techniczne pozwalają na przeprowadzenie takich testów w zakresie gigacylowym na próbkach o relatywnie małych rozmiarach (małych objętościach materiału w których propaguje się pęknięcie prowadzące do zniszczenia). W zastosowaniach praktycznych projektowania konstrukcji pojawia się wiele dodatkowych istotnych problemów o charakterze naukowym: wpływ rozmiaru próbki (współczynnik skali), wpływ nagrzewania się próbki w trakcie badań (przy badaniach o charakterze gigacylowym), wpływ rodzaju (kształtu) funkcji wymuszenia w stosunku do przebiegów obciążeń rzeczywistych, sposób uwzględniania naprężeń wieloosiowych (naprężenie zastępcze), sumowanie uszkodzeń (hipotezy kumulacji naprężeń/odkształceń). Autor rozprawy mając możliwość dostępu do ultradźwiękowego

systemu analiz zmęczeniowych pokazał w swojej rozprawie, że jest świadomy występujących problemów, a co godne podkreślenia większość z tych zagadnień stało się dla niego przedmiotem analiz. Świadomość występowania tych wyzwań oraz praktyczność zastosowań znalazły wyraz w postawionych celach pracy. **Pierwszy cel pracy** dotyczył opracowania i weryfikacji procedury umożliwiającej realizację badań doświadczalnych w zakresie gigacyklowym. **Drugi cel pracy** dotyczył wyznaczenia własności zmęczeniowych wybranego materiału konstrukcyjnego z zastosowaniem systemu do badań z częstościami ultradźwiękowymi. **Trzeci cel pracy** dotyczył weryfikacji wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych na podstawie przeprowadzonych badań dla stali S355J2+N. **Czwarty cel pracy** dotyczył sposobu szacowania trwałości dla elementów narażonych na obciążenia zmienne w czasie o bardzo dużej liczbie cykli, w szczególności typu VHCF.

Praca napisana jest bardzo czytelnie i zrozumiale. Należy podkreślić wyjątkową staranność edycji oraz bardzo dobrą jakość oraz celowość wykorzystania wykresów i obrazów.

3.2 Uwagi o charakterze merytorycznym

Do uwag o charakterze merytorycznym, które nie wpływają na poprawność dokonanych analiz zaliczyć należy:

1) Strona 11.

W „Przeglądzie stanu wiedzy” pojawia się komentarz „... zmęczeniem gigacyklowym w angielskiej literaturze nomenklaturze nazywanym zarówno *gigacycle fatigue* jak i *Very High Cycle Fatigue (VHCF)*”. W literaturze spotyka się również określenie Ultra High Cycle Fatigue (UHCF). Ponadto poprawnie „w anglojęzycznej literaturze”.

2) Strona 27.

Zamiast sformułowania „w materiałach ferrytyczno-perlitycznych” poprawnie „w stalach ferrytyczno-perlitycznych” (skrótowo), albo lepiej „w stalach o strukturze ferrytyczno-perlitycznej”.

3) Strona 92.

W tekście użyte jest sformułowanie opisu przeprowadzonych analiz „W dalszej kolejności przeprowadzono analizę harmoniczną w stanie ustalonym”. Poprawne określenie zakresu analiz to „analiza drgań wymuszonych w stanie ustalonym przy wymuszeniu harmonicznym”. Można też użyć sformułowania „odpowiedź układu na

wymuszenie harmoniczne w stanie ustalonym”. Analiza ta jest np. podstawą wyznaczania charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej układu.

4) Strona 101.

W opisie pod rysunkiem podano „(w Pascalach)”. Jednostką naprężenia (ciśnienia) w układzie SI jest paskal, oznaczany jako Pa.

5) Strona 102.

Określenie „występowanie gradientu naprężeń” ma charakter potoczny. Formalnie gradient jest operacja dokonana na polu skalarnym, której rezultatem jest pole wektorowe. Długość wektora gradientu pola skalarnego (np. składowej naprężeń) w określonym punkcie wskazuje kierunek najszybszego wzrostu wartości w tym punkcie, a wartość tego wektora szybkość zmian.

3.3 Uwagi redakcyjne

Do uwag o charakterze redakcyjnym zaliczyć należy:

1) Strona 9.

W sformułowaniu „systemów pracujących w oparciu rezonansu” brakuje np. wyrażenia „o zjawisko”.

2) Strona 37.

Zamiast „akumulacji” raczej „kumulacji”.

3) Strona 46.

W podpunkcie 2.3 występuje tylko jeden podpunkt 2.3.1.

4) Strona 106.

Zamiast „przy określonych warunkach brzegowych” w odniesieniu do przeprowadzonych analiz raczej „zadanych” albo „przyjętych”.

5) Cały tekst.

Pojedyncze literówki np. „wykoanie”, „kilku procentowa”.

6) Cały tekst.

Spójnie wprowadzone jest w tekście rozprawy zagnieżdżanie numeracji kolejnych podpunktów. Wyróżnienie to jest czytelne i uzasadnione. Warto jednak rozważyć (przy ewentualnym wydaniu doktoratu w postaci monografii), czy poziom czwarty zagnieżdżenia (np. 5.1.1.1 Aparatura badawcza; 5.1.1.2. Metoda badań; 5.1.1.3. Wyniki) jest konieczny do wyróżnienia, czy nie wystarczy w tych przypadkach jedynie wyróżniony tytuł (podtytuł).

4. Podsumowanie, wniosek końcowy

Recenzowana praca:

- Zawiera wyniki i analizy badań doświadczalnych przeprowadzonych przy wykorzystaniu ultradźwiękowego systemu do badań zmęczeniowych Italsigma MU26. Analiza eksperymentalna została wykonana z bardzo dużą starannością:
 - badania zostały przeprowadzone dla próbek o zaprojektowanym kształcie klepsydrowym (uzasadnionym badawczo, popartym przeprowadzonymi symulacjami MES);
 - wartości parametrów materiałowych dla wybranego materiału zostały wyznaczone doświadczalnie przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Instron 8501, mikromierza elektronicznego Sylvac S_Mike PRO, wagi laboratoryjnej Radwag WTC 2000, wagi laboratoryjnej AD50 z zestawem Hydro AD;
 - wyznaczenie wartości naprężeń w próbce zostało dokonane metodą tensometryczną przy wykorzystaniu opracowanego oryginalnego układu pomiarowego, którego poprawność działania została zwalidowana; wykorzystano mostek tensometryczny HBM Quantum MX1615B wraz z oprogramowaniem Catman; w analizach wykorzystano opracowany program w języku Python z wykorzystaniem biblioteki SciPy.
 - do pomiaru temperatury próbek zastosowano pirometr Optris CTlaser LT CFI;
 - do analizy przełomów zmęczeniowych przeprowadzono badania fraktograficzne w szerokim zakresie powiększeń przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego Keyence VHS-7000.

Wszystkie badania zostały szczegółowo zaprojektowane (metodyka badań, program badań) i wykonane przez Doktoranta. Pokazuje to dużą dojrzałość i umiejętność Doktoranta do planowania i przeprowadzania badań doświadczalnych.

- Zawiera wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych w celu sprawdzenia przyjętego kształtu próbek w celu późniejszego zweryfikowania rozkładu naprężeń w próbkach oraz wartości częstotliwości drgań własnych wzdłużnych próbek. Symulację komputerową wykonano metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu pakietu Abaqus. Przeprowadzono analizę drgań własnych i drgań wymuszonych w zakresie odpowiedzi w stanie ustalonym na wymuszenie harmoniczne.

- Zawiera wyniki szeregu badań zmęczeniowych przeprowadzonych dla wymuszeń o charakterze stałoaamplitudowym jak i o zdany programie badań (programowanych) dla próbek wykonanych ze stali S355J2+N w zakresie do 10^{10} cykli.
- Zawiera analizę porównawczą estymacji trwałości zmęczeniowej dla badanego materiału przy zastosowaniu czterech liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych: Palmgrena-Minera, Palmgrena-Minera z aproksymacją na zakres poniżej granicy zmęczenia, Palmgrena-Minera z modyfikacją Haibacha, Palmgrena-Minera z modyfikacją Serensena.
- Zawiera propozycję aproksymacji krzywej S-N za pomocą wykresu dwustopniowego, przy wykorzystaniu do oceny jakości (poprawności) aproksymacji statystycznych miar dopasowania oraz wskaźników jakości prognoz.
- Zawiera uchybienia, omówione w punktach 3.2 i 3.3, które w żadnym stopniu nie wpływają na poprawność samej analizy oraz czytelność tekstu rozprawy.

Zdaniem recenzenta przedstawiona praca jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora oryginalnego problemu naukowego, jakim była szczegółowa weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych obejmująca również zagadnienie rzeczywistych przebiegów krzywych trwałości zmęczeniowej, w zakresie gigacyklowym (10^9 – 10^{10} cykli). Wymagało to na początku prac dokonania krytycznego i twórczego przeglądu literatury przedmiotu, w szczególności w zakresie analiz zmęczeniowych VHCF. Doktorant wykazał się umiejętnością przeprowadzenia z dużą starannością serii badań doświadczalnych wykorzystując znajdujący się w Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji Politechniki Bydgoskiej unikalny, nowoczesny i złożony ultradźwiękowy system do badań zmęczeniowych Italsigma MU26. Wykazał się przy tym umiejętnością planowania badań doświadczalnych i wykorzystywania różnych urządzeń badawczych (maszyna wytrzymałościowa, pirometr, mikroskop cyfrowy, układ tensometryczny). Doktorant posiada również umiejętność przeprowadzania symulacji komputerowych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Godna podkreślenia jest umiejętność stosowania przez Doktoranta w badaniach doświadczalnych i ich analizie specjalistycznego oprogramowania komputerowego (Catman, Pyhon). Z realizacją pracy związane jest przede wszystkim opublikowanie artykułu w specjalistycznym i renomowanym czasopiśmie naukowym *International Journal of Fatigue* (2023, IF=6.8). Wszystkie te działania pokazują umiejętność prowadzenia przez Doktoranta samodzielnej pracy naukowej. Spełnione są

również wymagania art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r., poz. 574 ze zm.). Dlatego też wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Mateusza Żurawskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

Ponadto biorąc pod uwagę, kompletność pracy doktorskiej (sformułowanie zagadnienia, jego unikalność i zakres, badania doświadczalne, symulacje komputerowe), całościowy sposób realizacji (wykorzystanie unikalnego ultradźwiękowego systemu do badań zmęczeniowych Italsigma MU26), opublikowanie związanych z dysertacją wyników badań w renomowanym czasopiśmie naukowym *International Journal of Fatigue*, uważam recenzowaną pracę doktorską za wyróżniającą. Dlatego też wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Swachy, przez Radę Naukową Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej lub Radę Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Bydgoskiej.

