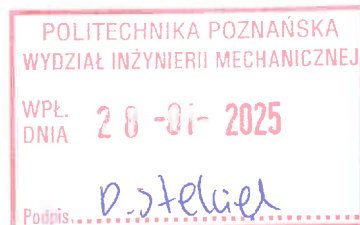


Prof. dr hab. inż. Paweł Pyrzanowski  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
ul. Nowowiejska 24  
00-665 Warszawa

Warszawa, 20.01.2026



## Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Patrycji Lau

Podstawą do wykonania recenzji pracy doktorskiej są: *Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późniejszymi zmianami), Uchwała nr 12/III/11/2025 Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 1.12.2025 oraz pismo dr. hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP – Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej nr DIM.075.288.2025 z dnia 3.12.2025.

### 1. Układ pracy i uwagi ogólne.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Patrycji Lau pod tytułem: „Alternatywna metoda oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych w pojazdach szynowych” wydana została jako zwarta monografia w języku polskim. Liczy łącznie 122 strony, w tym spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, część merytoryczną, zawierający 62 pozycje przeglądu literatury oraz jeden załącznik. Główna, merytoryczna część pracy podzielona została na 10 rozdziałów z podrozdziałami i zawiera 105 stron.

W pierwszym i drugim rozdziale Autorka zawarła wprowadzenie oraz podała cel i zakres pracy. Rozdział 3. zawiera podstawowe informacje o zmęczeniu materiałów, natomiast 4. opis obiektu badań. Badania te opisane zostały w rozdziałach 5-8, zaś ostatnie 2 rozdziały to całościowe omówienie otrzymanych wyników i ich podsumowanie.

W pracy nie zawarto jawnie żadnej tezy ani hipotezy badawczej, którą Autorka prowadząc badania starałaby się udowodnić. Jej zamiastką jest sformułowany w rozdziale 2 cel pracy, którym jest „opracowanie alternatywnej metody oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych w pojazdach szynowych, opartej na zaawansowanych analizach numerycznych przy użyciu Metody Elementów Skończonych”. Podejście takie, dość typowe w realizacji doktoratów powstających w ramach programu *doktorat wdrożeniowy*, budzi pewien niedosyt, ale spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim. Praca powstała wyraźnie na zlecenie pracodawcy i zapewne był to istotny czynnik ograniczający zakres i metodykę przeprowadzonych badań.

Zawarte w rozprawie piśmiennictwo jest aktualne i właściwie dobrane, choć dość ubogie. W dużej mierze ograniczone do zagadnień ściśle związanych z kolejnictwem.

Tematyka rozprawy jest niewątpliwie ważna, zwłaszcza z praktycznego punktu widzenia. Użyte metody nie stanowią przełomu w nauce, ale uzyskane wyniki z powodzeniem mogą być

wykorzystane w praktyce przemysłowej. Na uwagę zasługuje wspomniany w pracy autorski program pozwalający, przy pomocy szeroko dostępnego arkusza kalkulacyjnego, dokonać wstępnych analitycznych obliczeń i wygenerować model geometryczny do przeprowadzenia dokładniejszych symulacji numerycznych. Trochę szkoda, że nie został on szerzej opisany, gdyż stanowi niewątpliwie istotną część osiągnięć Autorki.

Biorąc pod uwagę zakres i tematykę zaprezentowanych w rozprawie badań uważam, że rozwiązywane zagadnienia są aktualne i ważne, i mogą być tematem pracy doktorskiej, a wybór dyscypliny naukowej – *inżynieria mechaniczna* – jest jak najbardziej uzasadniony.

## 2. Uwagi szczegółowe

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter przede wszystkim eksperymentalny i opisuje wykonane przez Autorkę badania zmęczeniowe pełnowymiarowych osi kolejowych (będące z uwagi na wykorzystanie unikatowej aparatury bardzo cenną częścią pracy) oraz próby statyczne wykonane na pomniejszonych modelach osi. Zakres tych badań, mierzonych parametrów i zaprezentowanych wyników budzi pewien niedosyt, ale zapewne wynika z ograniczeń narzuconych przez przedsiębiorcę, będącego stroną porozumienia o prowadzeniu doktoratu wdrożeniowego.

Część analityczna jest niewielka, obliczenia przeprowadzone zostały w oparciu o proste i dobrze znane modele, za najcenniejszą ich część uważam stworzenie programu umożliwiającego wstępne wykonanie obliczeń przez osoby o niewielkiej orientacji w tematyce. I choć trudno w pełni zaakceptować promowanie podejścia umożliwiającego, jak to wspomniała Doktorantka (114<sub>1-2</sub>), „prowadzenia analiz przez mniej doświadczonych pracowników, co przekłada się na optymalizację wykorzystania zasobów kadrowych”, to niestety jest to praktyka przemysłowa, którą musimy zaakceptować.

Część numeryczna ograniczona została do przeprowadzenia prostych symulacji statycznych wykorzystujących program metody elementów skończonych, których wyniki porównywano z danymi eksperymentalnymi, wykazując ich dużą zbieżność w przypadku modeli wykonanych ze stali. Istotne różnice dla modeli polimerowych są oczywiste i zostały przez Autorkę poprawnie wyjaśnione.

Ogólnie pracę oceniam jako poprawną, choć zawierającą liczne niedomówienia i pewne usterki. Poniżej przedstawiam główne uwagi i pytania, zaznaczając te, na które chciałbym uzyskać odpowiedź podczas publicznej obrony.

### a. Uwagi redakcyjne i językowe

Praca napisana jest poprawnym językiem, choć zawiera pewne niedoskonałości niezauważone podczas prac redakcyjnych. Przykładem mogą być:

- Brak wykazu oznaczeń i skrótów. Dotyczy to np. (154) „UIC” oraz „TSL”. Dla Autorki są to rzeczy oczywiste, ale muszą być wyjaśnione czytelnikom pracy.
- Osoby nieobeznane z techniką kolejową nie zrozumieją o jakie koło zębate chodzi (21<sup>13</sup>). Dobrze by było zamieścić odpowiedni rysunek.
- Wyniki obliczeń numerycznych, podane w tabeli 7.2 (81) powinny być pokazane na wykresie razem z wynikami eksperymentalnymi. W podanej postaci ich porównywanie jest bardzo niewygodne. W tabeli powinny natomiast być powtórzone wyniki eksperymentalne i podane różnice procentowe pomiędzy nimi a obliczeniami.

- Nie mówimy o naprężeniach *Misesa* (92<sub>2</sub>) a co najwyżej *von Misesa* lub, w języku polskim, *naprężeniach zredukowanych*.
- Na rysunku 8.14 (96) pokazano rozkłady naprężeń zredukowanych, na których wyraźnie widać koncentracje naprężeń w strefach kontaktu, natomiast zupełnie niewidoczne są spodziewane ich zmiany w okolicy karbów. Bardzo proszę podczas prezentacji na obronie o zawężenie skali naprężeń w taki sposób, aby było to widoczne.
- Na rysunkach 8.16-8.18 (99-100) pokazano wykresy słupkowe pokazujące, jak przypuszczam, naprężenia wzdłuż trzech osi tensometrów (oznaczenia T1-T3), zaś w podpisach widnieje, że są to naprężenia zredukowane (*von Misesa*).
- Największe różnice pomiędzy wynikami eksperymentalnymi, a numerycznymi nie występują, jak to napisano, dla tensometru nr 1 (107<sub>8</sub>) ale, co wynika w wykresu 9.3 i 96, dla tensometru nr 2.
- Liczne powtórzenia całych zdań widoczne w wielu miejscach pracy. Właściwsze byłoby powtórzenie myśli używając nieco innych sformułowań, co poprawiłoby komfort czytelnika.

#### ***b. Uwagi merytoryczne***

- Rysunek 3.2 (32) nie wyjaśnia mechanizmu skuteczności dogniatania powierzchniowego. Należałoby uzupełnić go o pokazanie rozkładu naprężeń z uwzględnieniem wprowadzonych tą metodą ściskających naprężeń własnych.
- Opiswane zmęczenie wysokocyklowe (34<sup>11</sup>) typowo dotyczy liczby cykli powyżej 10-20 tysięcy, a nie dopiero milionów, jak pisze Autorka. Można to bardzo prosto pokazać na wykresie Wöhlera w skali podwójnie logarytmicznej, gdzie dla stosunkowo niewielkiej liczby cykli (kilka-kilkanaście tysięcy) występuje utrata liniowości krzywej S-N.
- Jednostką nacisku (36<sup>2</sup>) nie może być t/os a co najwyżej T/oś. W zasadzie powinno się jednak podawać tę wielkość w jednostkach SI, czyli N/oś. Podobnie w tabeli 5.1. (39).
- Ponieważ badany jest tylko jeden materiał, i to dość rzadko stosowany – EA1N (36<sub>11</sub>), powinno zamieścić się nie tylko wybrane właściwości mechaniczne, ale także skład chemiczny.
- Brak podania dokładnej lokalizacji tensometrów. Zdjęcie na rys. 6.5 (64) powinno być uzupełnione rysunkiem z dokładnie zwymiarowanymi punktami pomiaru naprężeń.
- Sformułowany w pierwszym akapicie rozdziału 6.3 (69) wniosek o braku pęknięć jest zbyt optymistyczny w świetle przeprowadzonych badań. Czy po próbie wykonywano jakiegokolwiek obiektywne badania w celu wykrycia ewentualnych pęknięć lub mikropęknięć (metodą ultradźwiękową, prądów wirowych, rentgenowską lub chociaż penetracyjną)? Bez tego kategoryczne twierdzenie o braku pęknięć może być nieprawdziwe. Bardzo proszę o ustosunkowanie się do tego zagadnienia w trakcie publicznej obrony. (*pytanie na obronę*)
- Trudno zgodzić się ze stwierdzeniem (71<sub>3</sub>), że <metody analityczne> „mogą być również wykorzystywane do kalibracji wyników MES”. Sama Autorka stwierdziła wcześniej, że dla skomplikowanej geometrii modele analityczne nie odzwierciedlają w pełni złożoności konstrukcji. Jedyną w pełni poprawną formą weryfikacji obliczeń numerycznych są wyniki eksperymentu. Podobnie obliczenia analityczne nie pozwolą na ocenę jakości siatki

(Autorka używa tu rzadko spotykanego określenia „siatkowanie”). Programy MES mają wbudowane zaawansowane narzędzia pozwalające doskonale ocenić jakość wygenerowanych siatek, co przekłada się na jakość uzyskanych wyników.

- Schemat metody obliczeniowej pokazany na rys. 7.1. (72) jest niezrozumiały. Dlaczego wyniki (pkt. 4) wyprzedzają program komputerowy (pkt. 5) i model obliczeniowy (pkt. 6)? W jaki sposób Autorka przeprowadza weryfikację oraz co jest weryfikowane (pkt. 7)?
- Kompletnie niezrozumiała jest procedura opisana na początku rozdziału 7.3 (76). Po co używać „każdego dostępnego w bibliotece elementu skończonego” (76<sup>11-12</sup>), zresztą zapewne jest ich tam kilkaset. Od wielu lat wiadomo, że w tego typu zagadnieniach najlepiej sprawdzają się elementy 20 węzłowe, ewentualnie zdegenerowane do 15 węzłowych, których zresztą Autorka słusznie użyła. Elementy czworościenne w większości przypadków prowadzą do gorszej jakości wyników.
- Widoczna na rys. 7.4 i 7.5 (77) siatka elementów skończonych pozwala na stwierdzenie, że są one różnej wielkości, co przeczy zawartemu w tabeli 7.1 (76) stwierdzeniu o stałym rozmiarze elementu. W przypadku analizy zmęczeniowej elementów z karbami (jak w tym przypadku) niezwykle istotne jest dokładne modelowanie w okolicy tego karbu, co zazwyczaj realizuje się zagęszczeniem siatki w tym obszarze, zmniejszając tam kilkukrotnie rozmiar elementu. Większe rozmiary z daleka od miejsc koncentracji naprężeń nie wpływają na dokładność obliczeń, a pozwalają na znaczne zmniejszenie liczby elementów i stopni swobody, co nie tylko skraca czas obliczeń, ale także zmniejsza błędy numeryczne.
- W badaniach pomniejszych osi Autorka użyła wg deklaracji (82<sub>5</sub>) tensometrów typu RF91 o bazie 1 mm. Jest to, co zresztą widać na rys. 8.1 (82), trójosiowa prostokątna (0°/45°/90°) rozeta tensometryczna, w związku z czym niezrozumiałe jest stwierdzenie (82<sub>3</sub>) „rozmieszczenie jest równomierne co 4 mm”. Użycie rozet pozwala na znalezienie wszystkich 3 składowych tensora naprężenia, ale nie ma nic wspólnego z rozdzielczością pomiarową.
- Na rysunku 8.7 (88), nawiasem mówiąc zbyt małym, żeby można go wygodnie czytać, przedstawiono po 3 krzywe oznaczone kolorem niebieskim (T1), czerwonym (T2) oraz czarnym (T3), nie podając żadnego wyjaśnienia, co to są za naprężenia. Jeżeli odczytane z tensometrów odpowiednio 1, 2 i 3, to jak to się ma do układu współrzędnych badanych osi? Zresztą użycie rozet wyraźnie sugeruje chęć znalezienia naprężeń głównych oraz zredukowanych. Nie wiadomo także jak ustawione były osie tensometrów w stosunku do kierunku przyłożenia siły, co ma fundamentalne znaczenie z punktu widzenia uzyskanych wyników. Bardzo proszę o wyjaśnienie tego podczas obrony. (*pytanie na obronę*)
- Rysunek 8.8 (90) jest nieczytelny – zbyt mały. Co oznaczają kolory linii oznaczone przez U1 i U2?
- Zaniechanie dalszego zagęszczania siatki w miejscu karbów po osiągnięciu braku przyrostu zmian naprężeń o 5% (92<sub>2</sub>) jest zbyt szybkie. Poprawnie wykonany model MES powinien przy dalszym dwukrotnym zagęszczaniu siatki dawać zmiany poniżej 1% (niektórzy mówią nawet o 0,5%). W tym przypadku, z powodu kumulacji błęd przy kolejnych krokach, spodziewać się można nawet ponad 10% błędów, co trudno uznać za wynik dopuszczalny w tak dokładnej metodzie, jaką jest MES. (*pytanie na obronę*)

- W jaki sposób w modelu MES zrealizowano warunek braku przenikania pomiędzy podporami, trawersą a powierzchnią wału? Czy użyto elementów kontaktowych? Jeśli tak, to jaki przyjęto współczynnik tarcia?
- Analiza trzech przypadków obciążenia (94<sup>1</sup>) w przypadku modelu liniowo-sprężystego nie ma sensu. Odstępstwa od liniowości dla wyników eksperymentalnych wynikają zapewne z błędów pomiarowych. Z przypadku obliczeń MES jest to prawdopodobnie wynik zaokrąglenia.
- W tabeli 8.5 (103) oraz na rysunkach 8.22-8.24 (104-105) pokazano wyniki pomiaru strzałki ugięcia po wykonaniu badań wytrzymałościowych. Czy pomiary geometrii wykonywane były także przed badaniami, co wykluczyłoby wpływ wstępnych niedokładności wykonania osi na wyniki?
- Na zakończenie pracy Autorka powinna jasno określić perspektywę dalszych działań. Ponieważ jest to rozprawa, która powstała w ramach programu *doktorat wdrożeniowy*, cennym uzupełnieniem byłoby także pokazanie korzyści, jakie odniósł przedsiębiorca z dotychczas wykonanych badań.

### 3. Podsumowanie

Pani mgr inż. Patrycja Lau zrealizowała pracę badawczą składającą się z części eksperymentalnej, niewielkiej analizy analitycznej oraz obliczeń numerycznych. Otrzymane wyniki są poprawne oraz właściwie zinterpretowane i skomentowane. Wykorzystana literatura jest właściwa i aktualna. Pomimo wskazanych w poprzednim punkcie uwag przedłożona dysertacja wskazuje na umiejętność Autorki w prowadzeniu działalności naukowej. Dotychczasowe prace Doktorantki prezentowane były na kilku krajowych konferencjach naukowych oraz opublikowane w czasopiśmie „*Vibrations in Physical Systems*”, co dodatkowo podkreśla Jej potencjał badawczy.

Biorąc pod uwagę ogólną jakość rozprawy, jej aktualną tematykę oraz umiejętność rozwiązania przez Autorkę wybranego problemu naukowego, uważam, że praca pod tytułem: „Alternatywna metoda oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych w pojazdach szynowych” spełnia warunki stawiane w *Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późniejszymi zmianami)*, rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

pel

