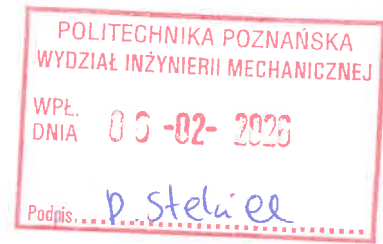


Bydgoszcz, 26.02.2026 r.

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. Patrycji Lau

nt.: „Alternatywna metoda oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych w pojazdach szynowych”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 1.12.2025 roku i pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej z dnia 3.12.2025 roku.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Podstawowym zagadnieniem rozpatrywanym w opiniowanej rozprawie doktorskiej jest metodyka konstruowania osi zestawów kołowych pojazdów szynowych w kontekście zapewnienia wystarczającej wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. Osie zestawów kołowych są niezwykle ważnym elementem konstrukcyjnym, który w krytyczny sposób wpływa na bezpieczeństwo pojazdu szynowego. Niezależnie od tego czy są to osie napędne, czy toczne ich uszkodzenie może prowadzić do poważnych konsekwencji, w tym utraty zdrowia i życia ludzi oraz wielkich szkód finansowych. Awarie osi, których skutkiem może być wykoślenie składów towarowych, stanowią także poważne zagrożenie dla środowiska naturalnego.

Nie dziwi zatem, że są one przedmiotem licznych regulacji i wymagań dotyczących zarówno procesu konstruowania, jak i ich eksploatacji, w tym diagnostyki. Biorąc pod uwagę długie okresy użytkowania pojazdów szynowych, szczególną uwagę zwraca się na konieczność oceny stanu osi, czego przykładem może być utrzymywanie osi zestawów kołowych wg rygorystycznego systemu VPI (Vereinigung der Privatgüterwagen-Interessenten) oraz wydane pod koniec 2024 roku w efekcie wypadku spowodowanego pęknięciem osi na początku 2023 roku na stacji we Wrocławiu rekomendacje Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego w sprawie badań NDT osi zestawów kołowych w wieku powyżej 40 lat w wagonach towarowych.

Niewątpliwym wsparciem w procesie konstruowania typowych osi zestawów kołowych są szczegółowe procedury wprowadzone wielokrotnie aktualizowanymi europejskimi normami, w tym obowiązującą obecnie normą PN-EN 13103-1+A1:2023-05 zawierającą zasady konstrukcji dla osi z czopami zewnętrznymi. Norma ta ma jednak zastosowanie do osi o geometriach zdefiniowanych w EN 13261:2020. Oznacza to, że w przypadku osi o innej konfiguracji czopów, przejść pomiędzy stopniami, odsadzeń, itp., jej zastosowanie ma ograniczony zakres, głównie do charakterystyki obciążeń i wartości naprężeń dopuszczalnych materiałów stosowanych do ich budowy. Wspomniana norma nie zawiera także wytycznych związanych z analizą trwałości zmęczeniowej osi w okresie propagacji ewentualnego pęknięcia, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia procedur utrzymania zestawów kołowych.

Można zatem zgodzić się z Doktorantką, która jako problem badawczy rozwiązywany w pracy wskazała brak analitycznych rozwiązań dla specyficznych przypadków osi oraz pominięcie w analizie naprężeń w osi metod numerycznych, w tym przede wszystkim metod elementów skończonych.

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

Rozprawa mgr inż. Patrycji Lau została zawarta na 122 stronach, co mieści się w typowych zakresach objętości tego typu opracowań. Jej treść została wzbogacona 65. rysunkami oraz 21. tabelami z danymi i wynikami badań. Bibliografia załącznikowa obejmuje 62 pozycje literatury, co w obecnych czasach nie jest zbyt imponującą liczbą. W załączonym wykazie brakuje odwołań do prac z udziałem Doktorantki. Jednak analiza dostępnych baz bibliograficznych wskazuje, że jest ona współautorem co najmniej dwóch prac zakresu tematu rozprawy doktorskiej z punktacją MNiSzW:

- Patrycja Lau, Piotr Paczos. Analytical, numerical and bench tests of axles in rail vehicles, *Materials Research Proceedings*, Vol. 30, pp 47-54, 2023, DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902578-7>.
- Patrycja Kronkowska, *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*, 2, pp. 52-57, 2018, DOI: <https://doi.org/10.53502/RAIL-138484>.

Treść pracy została podzielona na 10 rozdziałów poprzedzonych spisem treści oraz wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów. Na początku pracy zamieszczono także wymagane ustawowym zapisem streszczenia w języku polskim i angielskim. Do pracy dołączono ponadto załącznik zawierający kod źródłowy programu napisanego w języku programowania Python, który służy do generowania trójwymiarowego modelu konstruowanych osi w formacie STEP.

Pierwszy rozdział pracy zatytułowany „Wprowadzenie” został w głównej mierze poświęcony uzasadnieniu podjęcia tematyki badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej. Doktorantka wykazała w nim znaczenie zestawów kołowych, a w tym w szczególności ich osi, z punktu widzenia bezpieczeństwa pojazdów szynowych i szerzej transportu szynowego. Jednocześnie, na bazie analizy literatury oraz własnych doświadczeń, uzasadnia konieczność wdrażania alternatywnych metod obliczeń ich wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej z punktu widzenia procesu konstruowania nowych osi, jak i ich modernizacji oraz eksploatacji i diagnozowania.

W drugim rozdziale pracy Doktorantka przedstawiła cel i zakres pracy oraz omówiła przyjętą metodologię badań. Nieco nietypowym, ale w mojej ocenie wartościowym elementem tego rozdziału, jest także omówienie wartości i znaczenia podjętego przedsięwzięcia badawczego.

Zgodnie z deklaracją Autorki, celem badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej było [...] *uzupełnienie aktualnych metod obliczeń analitycznych stosowanych przy projektowaniu i ocenie wytrzymałości osi, wprowadzając alternatywną metodologię opartą na symulacjach MES*. Ponadto Doktorantka sformułowała cel wdrożeniowy, którym było [...] *stworzenie aplikacji połączonej z programem opartym na metodzie MES*, co Jej zdaniem miało umożliwić [...] *automatyzację i przyspieszenie procesu oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi pojazdów szynowych*.

Przedstawione przez Doktorantkę cele odpowiadają na zidentyfikowany i opisany we wprowadzeniu problem badawczy, a tym samym spełniają wymagania stawiane pracom doktorskim.

Opis zakresu badań ma w kilku punktach (8-10) nieco nietypową i niespójną formułę, gdyż przedstawiony jest w czasie przyszłym, tzn. przedstawia to, co Autorka 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 została krótko scharakteryzowana przyjęta przez Doktorantkę metodologia badań.

Kolejny rozdział rozprawy został przeznaczony na zaznajomienie czytającego z podstawowymi kwestiami dotyczącymi problemu zmęczenia materiałów i konstrukcji, w szczególności w odniesieniu do elementów podlegających zginaniu, w tym obrotowemu zginaniu, charakterystycznemu dla osi zestawów kołowych pojazdów szynowych. Podczas omawiania podstaw teoretycznych dotyczących problematyki zmęczeniowej, Autorka definiuje niektóre pojęcia w nieco odmienny od powszechnie stosowanych i ugruntowanych w literaturze określeń i nazw, na co warto zwrócić uwagę w przyszłych opracowaniach. Przykładem może być sformułowanie „graniczne cykle zmęczeniowe” lub „granica wytrzymałości na zmęczenie”.

Doktorantka omawiając zagadnienie zmęczenia ograniczyła się wyłącznie do okresu inicjacji pęknięcia zmęczeniowego, praktycznie pomijając okres jego propagacji. Można to zrozumieć uwzględniając przyjęty cel pracy, warto było jednak zwrócić uwagę na ten ważny aspekt chociażby ze

względu na procedury utrzymania zestawów kołowych. Do tej kwestii odniosę się jeszcze w dalszej części recenzji.

W czwartym, zaledwie dwustronicowym rozdziale rozprawy, Autorka szczegółowo omówiła główny obiekt badań, którym była oś toczna wagonu towarowego wykonana z materiału EA1N i spełniająca wymagania normy PN-EN 13261, a tym samym podlegająca metodom obliczeniowym i dopuszczalnym parametrom wytrzymałościowym określonym w normie PN-EN 13103-1+A1:2023.

Piąty rozdział pracy zawiera opis badań analitycznych przeprowadzonych na podstawowym obiekcie badań omówionym rozdziale 4. W rozdziale szczegółowo omówiono przebieg obliczeń osi zgodnie z europejską normą PN-EN 13103-1+A1:2023-05 (prawdopodobnie Doktorantka omyłkowo podała w tekście jej starszą wersję: EN 13103:2013+A2).

W rozdziale omówiono także dwa praktyczne osiągnięcia Autorki ułatwiające realizację obliczeń oraz przygotowanie trójwymiarowego modelu geometrycznego konstruowanej osi. Pierwszym z nich jest implementacja zapisów normy do arkusza kalkulacyjnego, który w zautomatyzowany sposób generuje wartości momentów gnących, a na ich podstawie maksymalne naprężenia oraz współczynniki bezpieczeństwa w charakterystycznych przekrojach osi.

Drugim narzędziem opracowanym przez Doktorantkę jest napisany w języku Python program generujący trójwymiarowy model obliczanej osi w formacie STEP, który jest aktywowany poprzez makro w arkuszu kalkulacyjnym.

W kolejnym rozdziale rozprawy znajdujemy omówienie wyników badań eksperymentalnych realizowanych na osi rozpatrywanej w badaniach analitycznych z zamontowanym jednym kołem. Badania przeprowadzone zostały na specjalistycznym stanowisku badawczym będącym na wyposażeniu jednostki Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, w której pracuje Doktorantka. W trakcie badań analizowano metodą tensometryczną rozkłady odkształceń w wybranych przekrojach (przeliczone na naprężenia normalne w kierunku osiowym) oraz wyznaczono trwałość zmęczeniową osi. Badania przeprowadzono na trzech osiach z zastosowaniem takich samych obciążeń odpowiadających warunkom eksploatacyjnym.

Rozdział siódmy, to z kolei prezentacja przebiegu i wyników badań numerycznych metodą elementów skończonych prowadzonych z zastosowaniem programu ABAQUS/Standard. W analizie zastosowano model osi zgodny z tym stosowanym w badaniach eksperymentalnych, tj. z zamontowanym jednym kołem, obciążając go w sposób odwzorowujący przebieg badania na stanowisku badawczym. Chociaż nie wynika to wprost z lektury treści rozdziału, można łatwo domyśleć się, że w analizie numerycznej zastosowano liniowo sprężysty model materiałowy, a wyznaczone wartości naprężeń odpowiadają obciążeniu statycznemu.

Nieco odrębnymi i nie związanymi bezpośrednio z wynikami badań omówionych w rozdziałach 5-7 są badania opisane w **rozdziale 8**. Polegały one na eksperymentalnej i numerycznej analizie naprężeń w trzech osiach o różnej geometrii wykonanych z różnych materiałów w skali 1:5, poddanych trójpunktowemu zginaniu. Miały one na celu weryfikację wpływu skali na wyznaczone wartości naprężeń, do czego odniosę się w uwagach do pracy.

O braku spójności rozdziału numer 8 z resztą pracy może świadczyć także zastosowanie innych narzędzi analiz numerycznych i metod badań eksperymentalnych. Odrębność badań opisanych tym rozdziale potwierdza także sama Doktorantka w podsumowaniu pracy w rozdziale 10, pisząc: *[...] W pracy uwzględniono dodatkowy rozdział poświęcony badaniom osi kolejowych w małej skali, który nie był pierwotnie przewidziany w założeniach badawczych. Jego realizacja wniosła jednak istotną wartość zarówno poznawczą, jak i praktyczną, uzupełniając całość rozważań.* W mojej ocenie, biorąc pod uwagę tytuł i cele pracy, bez szkody dla jej jakości można było ten rozdział pominąć ewentualnie rozszerzyć o dodatkowe porównawcze badania zmęczeniowe obiektów skalowanych i w rzeczywistych wymiarach. Dopiero w takim przypadku można by było wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu skalowania na wytrzymałość zmęczeniową osi.

Dziewiąty rozdział rozprawy zawiera analizę porównawczą wyników badań omówionych w rozdziałach 5-7. Porównaniu poddano niezależnie wyniki obliczeń metodą analityczną i numeryczną oraz metodą eksperymentalną i numeryczną. Doktorantka uzasadniła to innym charakterem naprężeń wyznaczanych metodą analityczną i eksperymentalną. W przypadku obliczeń zgodnych z normą PN-EN 13103-1+A1:2023-05 wyznaczano naprężenia zredukowane według hipotezy wyężeniowej

Coulomba–Treski, a metodą eksperymentalną naprężenia normalne do przekroju osi zestawu kołowego. Może to budzić pewne zastrzeżenia, które wskażę w uwagach do pracy.

Ostatnim numerowanym rozdziałem rozprawy jest **rozdział dziesiąty** zatytułowany „Podsumowanie i wnioski”. Doktorantka zgodnie z jego tytułem zamieściła w nim szereg uwag odnoszących się do celowości podjętego przedsięwzięcia badawczego, zakresu przeprowadzonych prac oraz praktycznego zastosowania ich wyników. Przedstawiła także najważniejsze wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań i analiz ich wyników. Zaprezentowane wnioski w mojej ocenie w ogólności znajdują odzwierciedlenie w treści pracy i nie budzą zastrzeżeń, jednak pewne uwagi krytyczne zostaną przedstawione w dalszej części recenzji.

Nie uwzględniając załącznika, pracę kończy wykaz źródeł literaturowych, które są zasadniczo zgodne z tematyką pracy, jednak w mojej ocenie mają stosunkowo skromny charakter. Niektóre źródła wydają się mieć nieco przypadkowy charakter, biorąc pod uwagę inne dostępne opracowania. Dotyczy to między innymi teoretycznych podstaw zmęczenia materiałów i konstrukcji, w tym metod obliczeń zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych.

Niezależnie od pewnych 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 przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej pozwala sformułować jej pozytywną ocenę, w szczególności w obszarze przeprowadzonych badań własnych obejmujących szeroki zakres obliczeń analitycznych, analiz numerycznych i badań eksperymentalnych na rzeczywistych elementach konstrukcyjnych oraz krytyczną analizę porównawczą ich wyników.

Przyjęty i zrealizowany zakres badań odpowiadał postawionym celom pracy, którymi było opracowanie metody obliczeń osi zestawów kołowych stosowanych w pojazdach szynowych na bazie wyników analiz numerycznych oraz wdrożenie opracowanej metody do praktyki. W mojej ocenie Doktorantka wykazała się właściwym przygotowaniem dla realizacji postawionych zadań badawczych, a rozprawa doktorska potwierdziła jej ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie podjętej tematyki, która biorąc pod uwagę jej zakres merytoryczny, a także zastosowane metody badawcze, można być jednoznacznie zakwalifikowana do dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2.1. Osiągnięcie Doktorantki

Podstawowym osiągnięciem Doktorantki jest w mojej ocenie opracowanie i wdrożenie metody obliczeń osi zestawów kołowych pojazdów szynowych, w której w odróżnieniu od standardowego podejścia bazującego wyłącznie na modelowaniu analitycznym zaproponowała rozszerzenie analizy na modelowanie numeryczne. W tym celu Doktorantka opracowała dwa dodatkowe narzędzie wspomagające obliczenia analityczne oraz przygotowanie trójosiowego modelu CAD do dalszych analiz numerycznych w oprogramowaniu MES. Zaproponowane podejście zostało pozytywnie zweryfikowane eksperymentalnie na rzeczywistych elementach konstrukcyjnych, co stanowi istotny element przeprowadzonych badań.

2.2. Uwagi do rozprawy

Pozytywna ocena rozprawy i wynikających z niej osiągnięć naukowo-badawczych, nie oznacza jednak, że w trakcie jej analizy nie zwrócono uwagi na pewne kwestie, które mogą budzić wątpliwości lub pytania. Tym samym, w dalszej części recenzji sformułowano pewne krytyczne, zapewne w części dyskusyjne uwagi, do poszczególnych zagadnień prezentowanych przez Doktorantkę. 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

1). Zmęczenie elementów konstrukcyjnych może być rozpatrywane w dwóch ujęciach, tzn. wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. W pierwszym przypadku odnosimy się do naprężeń

mogących powodować wystąpienie pęknięć zmęczeniowych, w drugim do liczby cykli obciążenia skutkujących inicjacją, a następnie propagacją pęknięcia. Procedury konstruowania osi zestawów kołowych w głównej mierze zmagają się z zapewnieniem odpowiedniej wytrzymałości zmęczeniowej, tzn. obniżenia naprężeń w krytycznych przekrojach osi poniżej granicy zmęczenia, co powinno teoretycznie gwarantować ich pracę w zakresie nieograniczonej trwałości zmęczeniowej. Jednak jak wskazuje praktyka, w trakcie eksploatacji pojazdów szynowych mogą pojawiać się okoliczności, które będą sprzyjać inicjacji pęknięć osi pomimo spełnienia przewidzianych normą warunków wytrzymałościowych. W takim przypadku niezwykle ważnym jest możliwość określenia przewidywanego czasu rozwoju pęknięcia do osiągnięcia jego krytycznej długości zagrażającej jej integralności, co stanowi dodatkowe wyzwanie dla konstruktorów. Wiedza na temat okresu rozwoju pęknięcia jest bardzo cenna, ponieważ umożliwia określenie czasu pomiędzy kolejnymi przeglądami, który zapewni wykrycie pęknięcia zanim dojdzie do zniszczenia osi i jest silnie związane z procedurami utrzymania zestawów kołowych. Jedną z metod stosowanych w tym celu jest np. zastosowanie oprogramowania NASGRO (lub AFGROW), w których implementowane są metody obliczeń propagacji pęknięć w konsorcjum największych producentów z obszaru przemysłu lotniczego i kosmicznego, energetyki, ale także pojazdów szynowych.

W pracy praktycznie pominięto tę kwestię, w związku z tym nasuwa się pytanie, w jakim zakresie zdaniem Doktorantki zaproponowane rozwiązanie jest w stanie wesprzeć zespoły konstrukcyjne w ustaleniu okresów kontrolnych osi zestawów kołowych.

- 2). W analizie porównawczej wyników badań przedstawionej w rozdziale 9. Doktorantka uzasadnia brak bezpośredniego porównania wyników badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń metodą analityczną innym charakterem wyznaczanych naprężeń (w obliczeniach na podstawie normy naprężeń zredukowanych według hipotezy wyężeniowej Coulomba–Treski, a metodą eksperymentalną naprężeń normalnych do przekroju osi zestawu kołowego). Jednak w mojej ocenie dysponując wartościami momentów gnących w poszczególnych kierunkach wyznaczanymi podczas obliczeń analitycznych, można także wyznaczyć wartości naprężeń w kierunkach zgodnych z wynikami pomiarów tensometrycznych.
- 3). Szkoda, że w analizie porównawczej nie odniesiono się do naprężeń dopuszczalnych, tj. spełnienia warunków wytrzymałościowych zdefiniowanych w normie. Dałoby to pełniejszy obraz skutków występujących różnic naprężeń w poszczególnych przekrojach rozpatrywanych w pracy.
- 4). W opisie stanowiska badawczego na stronie 60, Doktorantka napisała: „[...] Na stanowisku badawczym stosuje się fakt, że taki sam efekt wytrzymałościowy dla osi i koła zestawu uzyskuje się, gdy badana oś wiruje a wektor obciążenia jest nieruchomy (sytuacja w eksploatacji) jak i w przypadku gdy wirują niezerównoważone masy wywołujące siłę odśrodkową równą: ...”. Jest to prawda, ale jedynie w przypadku idealnego wyważenia zestawu kołowego; w innym przypadku pojawiają się siły odśrodkowe wprowadzające dodatkowe dynamiczne obciążenie osi.
- 5). Doktorantka zdecydowała się na zamieszczenie w pracy wyników badań porównawczych naprężeń wyznaczonych w osiach wykonanych w skali 1:5. Porównaniu podlegały naprężenia zredukowane zgodnie z hipotezą Huber-Mises-Hencky (H-M-H) wyznaczone na podstawie pomiarów odkształceń rozetami tensometrycznymi oraz wyznaczone numerycznie metodą elementów skończonych. Autorka odnosząc się do wyznaczanych naprężeń używa określenia hipoteza lub naprężenia Misesa, co nie jest błędem, jednak należałoby opisywać się jako Hubera lub ewentualnie Hubera-Misesa-Hencky’ego. Doktorantka przeprowadziła ponadto dodatkowe obliczenia MES na obiektach zamodelowanych w skali 1:1. W tym miejscu warto zwrócić uwagę, że zarówno w obliczeniach analitycznych, jak i w metodzie elementów skończonych skalowanie obiektu nie ma wpływu na wyznaczone wartości naprężeń i odkształceń, o ile zostaną zachowane podobne warunki obciążenia oraz podobny sposób generowania siatki, czego potwierdzeniem są uzyskane wyniki badań. Biorąc pod uwagę zastosowaną skalę próbek, tj. pięciokrotne zmniejszenie średnic i pięciokrotne zmniejszenie długości, w obliczeniach należało zastosować 25, a nie 5-krotne zwiększenie siły (średnica w trzeciej potęgze w mianowniku i długość w pierwszej potęgze w liczniku zależności na naprężenia). Wówczas nie byłoby konieczności dodatkowego przemnażania wyników obliczeń. Biorąc powyższe pod uwagę, trudno znaleźć uzasadnienie dla tego typu analiz.

W mojej ocenie badania na osiach wykonanych w skali miałyby jednak jasne uzasadnienie w przypadku analizy porównawczej ich eksperymentalnej trwałości zmęczeniowej.

- 6). Rozdział 10. Strona 112^{5,8}. Doktorantka w rozdziale „Podsumowanie i wnioski” zamieściła następujące stwierdzenie: „[...] Zrealizowane badania potwierdziły postawioną hipotezę badawczą, zakładającą, że wdrożenie innowacyjnej metody oceny wytrzymałości zmęczeniowej istotnie usprawni i przyspieszy proces projektowania osi pojazdów szynowych oraz wzbogaci dotychczasowe podejście metodologiczne do tego typu zagadnień”. Jest ono o tyle zaskakujące, że nigdzie wcześniej Autorka nie wspominała o hipotezie badawczej, a jedynie przedstawiła cele pracy.
- 7). Rozdział 10. Strona 115, wniosek numer 5. „[...] Możliwość uwzględnienia wymiarów regeneracyjnych już na etapie projektowania stanowi ważny krok w kierunku rozwoju gospodarki obiegu zamkniętego”. Podobnie jak w przypadku poprzedniej uwagi, można też mieć wątpliwości co do tego wniosku. Pomimo uważnej lektury pracy, trudno w niej znaleźć odniesienia to tego spostrzeżenia.

b. Uwagi szczegółowe

- Strona 13⁷. Trudno mówić o „cyklicznym zmęczeniu materiału”.
- Strona 14². Pojęcie „zużycia zmęczeniowego” odnosi się raczej do zmęczenia powierzchniowego (pittingu), które występuje między innymi na powierzchni tocznej kół zestawów kołowych lub szyn. W przypadku osi występuje kumulacja uszkodzeń zmęczeniowych prowadząca do powstawania pęknięć zmęczeniowych propagujących w głąb osi i skutkujących ich dekohezją.
- Strona 15, rysunek 1.3. Czy schemat pokazany na rysunku to własne opracowanie, czy kopia z normy. Jeśli to drugie to należałoby dodać odwołanie do literatury.
- Strona 15⁴. Należałoby rozwinąć używane skróty (UIC, TSI) przy ich pierwszym użyciu.
- Strona 18¹⁵. Czym są „elementy szynowe” ?
- Strona 22. Niewłaściwa numeracja rysunku. Powinno być Rys.1.4 zamiast Rys.2.
- Strona 23⁵⁻⁷. Doktorantka napisała: „[...] Aktualna norma PN-EN 13103-1:2023-05[3], nie uwzględnia pełnej gamy analiz numerycznych, które mogą znacząco poprawić dokładność oceny trwałości zmęczeniowej osi tocznych oraz napędnych”. Norma odnosi się raczej do wytrzymałości, a nie trwałości zmęczeniowej. Niewłaściwe oznaczenie normy. Powinno być: PN-EN 13103-1+A1:2023-05.
- Strona 37⁵⁻⁶. Autorka napisała: „[...] Badania te miały na celu empiryczną weryfikację zachowania osi pod wpływem cyklicznych obciążeń oraz ocenę jej rzeczywistej trwałości w warunkach eksploatacyjnych”. Należy raczej mówić o warunkach symulowanych obciążeń eksploatacyjnych.
- Strona 37⁴. Powinno być „symulacji” zamiast „stymulacji”.
- Strona 38³. Chodzi raczej o normę PN-EN 13103-1+A1:2023-05, a nie PN-EN 13103-1:2013+A2 (?)
- Strona 55. Powtórzona numeracja rysunku 5.10. Powinno być 5.11.
- Strona 66. Jakie jest źródło danych pokazanych na rysunku 6.7 ?
- Strona 67. Doktorantka posługuje się w pracy sformułowaniem „naprężenia zmierzone ...”. Takie określenie może być nieco rażące, gdyż naprężenia mają charakter obliczeniowy, a ich „pomiar” odbywa się poprzez przeliczenie z mierzalnej wielkości jaką są odkształcenia. Należałoby w przyszłości unikać takich sformułowań.
- Strona 71¹². Doktorantka posłużyła się trochę zaskakującym odwołaniem literaturowym w odniesieniu do podstaw metody elementów skończonych. Należałoby raczej powołać się na podstawową literaturę w tym zakresie, tj. np. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, and J.Z. Zhu, „The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals”.
- Strona 75⁶. Dlaczego zastosowano obciążenia siłą skupioną próbując odtworzyć warunki obciążenia występujące na stanowisku badawczym ?
- Strona 76, akapit nad tabelą 7.1. Czy modelowano wcisk między kołem i osią, a jeśli nie to co z naprężeniami od wcisku występującymi w rzeczywistym obiekcie badań ?

- Rozdział 8. Nie podano jaki materiał polimerowy zastosowano na próbki wykonane metodami MJF (Multi Jet Fusion) oraz SLS (Selective Laser Sintering).
- Rys.8.7. W jaki sposób można uzasadnić brak wzrostu wartości naprężenia dla rosnącej wartości siły w przypadku części próbek ? Brakuje komentarza do uzyskanych wyników pomiarów.

c. Uwagi redakcyjne

W mojej ocenie Doktorantka dołożyła 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, w szczególności ilustrujących zapisy z norm.

Niestety pewne zastrzeżenia można mieć także do opisu źródeł w bibliografii załącznikowej. W niektórych przypadkach brakuje części danych bibliograficznych, ponadto w odwołaniach do stron internetowych brakuje wymaganych informacji, w tym daty dostępu.

W pracy zaobserwowano kilka przykładów bezpośrednich tłumaczeń prawdopodobnie z języka angielskiego, które są albo niezrozumiałe albo wprost błędne. Należy w przyszłości unikać takich sytuacji. Poniżej przedstawiono kilka z nich:

- Strona 19³. „Siedzenie osi kolejowej” ? Może lepiej podpiąć ?
- Strona 19⁵⁻⁷. Niezrozumiałe zdanie: „[...] Symulację zmęczenia ciernego próbki osi pociągów dużych prędkości zobaczymy w [24], a także fretting test uszkodzeń na obszarze pasowania ciasnego osi pod obracającymi się obciążeniami zginającymi”.
- Strona 19¹¹⁻¹³. Niezrozumiałe zdanie: „[...] Artykuł [26] przedstawia stopniowe ramy oceny zmęczenia składające się z bezpiecznego życia jako pierwszego poziomu i tolerancji na uszkodzenia”.
- Strona 19⁸⁻¹². Niezrozumiałe zdania: „[...] W artykule [32] skupiono się na żywotności uszkodzonych osi kolejowych w odniesieniu do przeglądów osi kolejowych hartowanych indukcyjnie. W [33] przeanalizowano także efekty uszkodzenia powierzchni osi kolejowych oraz przyjrzeni się wpływowi obróbki wzmacniającej na wydajność zmęczeniową osi.”.
- Strona 34₁₃. Co oznacza: „napięcie-liczba cykli” ?
- Strona 71₇. „... siatkowanie ...” ?

Doktorantka w tekście rozprawy zamiennie używała pełnego określenia „tabela” i skrótu „tab.”. Należałoby stosować jednolitą konwencję, dotyczącą także numeracji rysunków.

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

W mojej ocenie Doktorantka w trakcie realizacji pracy wykazała się właściwymi kompetencjami w zakresie planowania i realizacji przyjętego programu badań analitycznych, eksperymentalnych i numerycznych, a także w zakresie opracowania i analizy otrzymywanych wyników badań. Metody i narzędzia badawcze użyte przez Doktorantkę były 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. Efektem realizacji rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie zidentyfikowanego problemu naukowego, a także zastosowanie wyników własnych badań naukowych w praktyce. W trakcie prowadzonych prac i przygotowania rozprawy Doktorantka wykazała się właściwym przygotowaniem teoretycznym oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

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

Bounded

