

Opole, 9 stycznia 2026 r.

Prof. dr hab. inż. Adam Niesłony
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole
Tel.: +48 508 464 808
E-Mail: a.nieslony@po.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Swachy pt.:

*„Weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych
w zakresie wysoko- i gigacyklowym z zastosowaniem systemu do
badań z częstotliwością ultradźwiękową”*

Podstawa prawna

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny inżyniera mechaniczna, dra hab. inż. Łukasza Muślewskiego, Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, z dnia 5 listopada 2025 roku (2/NB.520.3.2025) oraz właściwej przedmiotowej umowy.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Problematyka weryfikacji hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w zakresie wysokocyklowym i gigacyklowym stanowi istotny i aktualny temat badawczy mający znaczenie zarówno poznawcze jak i aplikacyjne. Rozprawa dotyczy zagadnień związanych z prognozowaniem trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych pracujących pod wpływem bardzo dużej liczby cykli obciążenia, w tym przy amplitudach naprężeń niższych od konwencjonalnie przyjmowanej granicy zmęczenia. Problematyka ta nabiera szczególnego znaczenia w kontekście konstrukcji inżynierskich w których dąży się do redukcji masy, zwiększenia wydajności oraz wydłużenia czasu eksploatacji przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa.

W wielu obszarach przemysłu, takich jak motoryzacja, lotnictwo, energetyka, kolejnictwo czy przemysł maszynowy, elementy konstrukcyjne poddawane są długotrwałym obciążeniom zmiennym o dużej liczbie cykli, często przekraczającej klasyczny zakres zmęczenia wysokocyklowego. W takich warunkach klasyczne podejścia do szacowania trwałości zmęczeniowej, oparte na koncepcji granicy zmęczenia oraz liniowych hipotezach sumowania uszkodzeń, mogą prowadzić do istotnych błędów prognostycznych. Z tego względu zagadnienia związane z zachowaniem materiałów w zakresie VHCF oraz z zasadnością stosowania znanych modeli kumulacji uszkodzeń w tym obszarze są obecnie przedmiotem intensywnych badań naukowych.

Autor rozprawy koncentruje się na eksperymentalnej weryfikacji wybranych liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych z wykorzystaniem nowoczesnego ultradźwiękowego systemu do badań zmęczeniowych, umożliwiającego realizację testów przy częstotliwości rzędu 20 kHz. Zastosowanie tej metody badawczej pozwala na osiąganie pęknięć zmęczeniowych przy liczbie cykli rzędu 10^9 w rozsądnym czasie, co czyni ją obecnie jednym z nielicznych narzędzi umożliwiających systematyczne badania w zakresie zmęczenia gigacyklowego. Jednocześnie metoda ta rodzi szereg wyzwań metodycznych, takich jak wpływ częstotliwości obciążenia, efektów cieplnych, tłumienia czy efektu skali, które Autor podejmuje i analizuje w rozprawie.

Należy podkreślić, że podjęta tematyka wpisuje się w aktualne światowe trendy badań nad zmęczeniem materiałów w zakresie bardzo dużej liczby cykli oraz w rozwój metod eksperymentalnych umożliwiających weryfikację modeli trwałości zmęczeniowej. Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Swachy pt. *„Weryfikacja wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w zakresie wysoko- i gigacyklowym z zastosowaniem systemu do badań z częstotliwością ultradźwiękową”* właściwie lokuje się w obszarze inżynierii mechanicznej i obejmuje zagadnienia istotne dla wytrzymałości materiałów, mechaniki zniszczenia oraz inżynierskich metod prognozowania trwałości konstrukcji.

2. Zawartość pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Swachy posiada logiczną i przejrzystą strukturę. Układ rozprawy jest typowy dla prac eksperymentalnych z obszaru inżynierii mechanicznej. Rozprawa liczy łącznie 155 stron, z czego zasadniczy tekst merytoryczny obejmuje 131 stron.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia motywację podjęcia tematu, osadzając rozważania w kontekście współczesnych problemów związanych z prognozowaniem trwałości zmęczeniowej konstrukcji pracujących pod wpływem bardzo dużej liczby cykli obciążenia.

Rozdział drugi stanowi przegląd stanu wiedzy dotyczący badań zmęczeniowych w zakresie HCF i VHCF, metod ultradźwiękowych oraz hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Autor omawia mechanizmy zniszczenia, specyfikę badań wysokoczęstotliwościowych oraz aktualne podejścia do szacowania trwałości zmęczeniowej. Rozdział zakończony jest syntetycznymi wnioskami.

W rozdziale trzecim Autor formułuje hipotezę badawczą, cel główny oraz zakres rozprawy. Część ta jest spójna z wcześniejszym przeglądem literatury i jednoznacznie określa kierunek dalszych badań.

Rozdział czwarty poświęcony jest programowi badań oraz przyjętej metodyce eksperymentalnej. Autor szczegółowo opisuje: zastosowaną aparaturę badawczą, ultradźwiękowy system do badań zmęczeniowych, procedury kalibracyjne oraz programy obciążania.

W rozdziale piątym przedstawiono badania wstępne, obejmujące m.in. badania materiałowe, opracowanie i walidację układu pomiarowego, analizy numeryczne MES próbek oraz metodykę badań fraktograficznych. Rozdział ten ma istotne znaczenie dla wiarygodności wyników badań zasadniczych i potwierdza staranność Autora w przygotowaniu zaplecza eksperymentalnego.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań zasadniczych, obejmujących badania zmęczeniowe stałoaamplitudowe oraz programowane wraz z analizą fraktograficzną przełomów.

W rozdziale siódmym Autor dokonuje weryfikacji wybranych liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, wykorzystując także różne sposoby aproksymacji krzywych SN. Rozdział ten stanowi kluczową część rozprawy.

Rozdział ósmy poświęcony jest analizie i dyskusji uzyskanych wyników badań i obliczeń, natomiast w rozdziale dziewiątym Autor formułuje podsumowanie pracy, wnioski końcowe oraz wskazuje kierunki dalszych badań.

3. Ocena pracy

3.1. Ocena ogólna

Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotra Swachy należy ocenić jako obszerny, merytorycznie poprawny i w dużej mierze kompletny. Autor zgromadził i przeanalizował szeroki zbiór publikacji krajowych i zagranicznych dotyczących zmęczenia materiałów w zakresie wysokocyklowym i gigacyklowym, mechanizmów inicjacji i propagacji pęknięć, a także metod badawczych umożliwiających realizację testów przy bardzo dużej liczbie cykli obciążenia. Dobór literatury odpowiada charakterowi rozprawy i przedstawia aktualny stan wiedzy z tego obszaru. Szczególnie wartościowa jest część poświęcona zmęczeniu gigacyklowemu (VHCF), w której Autor omawia genezę rozwoju tej dziedziny, podważa klasyczną koncepcję nieskończonej trwałości zmęczeniowej oraz przedstawia współczesne podejścia do interpretacji krzywych SN w zakresie bardzo dużej liczby cykli. W pracy przywołano kluczowe publikacje dotyczące inicjacji pęknięć wewnętrznych, zjawiska „rybiego oka”, drobnoziarnistych obszarów FGA (Fine Granular Area) oraz różnic w zachowaniu materiałów o odmiennej mikrostrukturze.

Pozytywnie należy ocenić również przegląd literatury dotyczącej ultradźwiękowych metod badań zmęczeniowych. Autor przedstawia zarówno zasadę działania systemów ultradźwiękowych, jak i najważniejsze problemy metodyczne związane z ich stosowaniem, takie jak wpływ częstotliwości obciążenia, efektów cieplnych, tłumienia czy efektu skali.

W kontekście celu pracy istotne znaczenie ma część przeglądu literatury poświęcona hipotezom kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Autor przedstawia klasyczne liniowe modele sumowania uszkodzeń, wskazując na ich ograniczenia, zwłaszcza w odniesieniu do obciążeń z zakresu VHCF. Struktura rozdziału przeglądowego jest przejrzysta i zakończona syntetycznymi wnioskami, które wskazują luki badawcze i prowadzą do sformułowania celów rozprawy. Warto jednak zauważyć, że w niektórych fragmentach rozdziału Autor skupia się bardziej na deskryptywnym przedstawieniu wyników badań innych autorów niż na ich pogłębionej krytycznej analizie.

W rozdziałach 4 do 7 Autor w sposób metodyczny i konsekwentny przedstawia metodologię badań, ustala stałe materiałowe, projektuje geometrię próbki i przeprowadza analizę porównawczą prognozowanej trwałości zmęczeniowej, uzyskanej na podstawie różnych wariantów krzywych S–N z wynikami badań otrzymanymi przy obciążeniach programowanych.

Należy podkreślić, że weryfikacja eksperymentalna została przeprowadzona dla jednego materiału konstrukcyjnego. Ogranicza to możliwość bezpośredniego uogólnienia uzyskanych wniosków na inne grupy materiałów, zwłaszcza materiały o odmiennej mikrostrukturze lub podatności na inicjację pęknięć wewnętrznych w zakresie VHCF. Ograniczenie to nie stanowi jednak błędu merytorycznego, lecz jest naturalną konsekwencją eksperymentalnego charakteru pracy i zostało częściowo zasygnalizowane przez Autora w kilku miejscach w rozprawie.

Istotną kwestią, która pojawia się w kontekście interpretacji wyników rozdziału siódmego, jest również geometria zastosowanych próbek do badań ultradźwiękowych. Kształt próbki oraz rozkład naprężeń mogły sprzyjać inicjacji pęknięć na powierzchni próbki, co znajduje potwierdzenie w wynikach analiz fraktograficznych. W badaniach nie zaobserwowano pęknięć typu „rybie oko” ani obecności drobnoziarnistych obszarów FGA, charakterystycznych dla inicjacji wewnętrznej w zakresie zmęczenia gigacyklowego. Można odnieść wrażenie, że Doktorant nie do końca wyjaśnia ten fakt, który moim zdaniem jest bardzo interesujący.

Dodatkowym zagadnieniem wymagającym krótkiej dyskusji jest wpływ procesu chłodzenia próbki podczas badań ultradźwiękowych. Choć Autor prawidłowo identyfikuje konieczność kontroli temperatury próbki i stosuje odpowiednie procedury chłodzenia, to warto rozważyć, czy cykliczne oddziaływanie strumienia chłodzącego nie wprowadzało dodatkowego czynnika oddziałującego na proces zmęczeniowy, np. w postaci lokalnych gradientów temperatury lub zmiennych warunków cieplnych na powierzchni próbki. Zagadnienie to nie podważa poprawności uzyskanych wyników, jednak mogłoby zostać szerzej omówione w kontekście niepewności eksperymentalnych.

Pomimo wskazanych ograniczeń, rozprawę należy ocenić pozytywnie. Przedstawiony algorytm, procedury badawcze i analizy są spójne z przyjętą metodyką badań, a sformułowane wnioski wynikają w sposób logiczny z zaprezentowanych danych eksperymentalnych i obliczeniowych.

3.2. Uwagi merytoryczne

Po przeczytaniu pracy i analizie jej treści nasuwają się następujące uwagi szczegółowe, które także nawiązują do spostrzeżeń zawartych w podpunkcie 3.1. Ocena ogólna.

1. W badaniach ultradźwiękowych nie zaobserwowano inicjacji pęknięć wewnętrznych ani obecności obszarów typu *fish-eye* i FGA, typowych dla zmęczenia gigacyklowego. Proszę o wyjaśnienie, czy zdaniem Autora jest to konsekwencją geometrii próbki i rozkładu naprężeń, jakości materiału (czystości metalurgicznej, wielkości i charakteru wtrąceń), czy też przyjętych warunków badawczych, takich jak częstotliwość obciążenia, sposób chłodzenia lub amplituda naprężeń. Jakie modyfikacje programu badań lub konstrukcji próbki mogłyby potencjalnie doprowadzić do obserwacji mechanizmów inicjacji wewnętrznej? Czy obserwowano tendencję próbki do zginania podczas testów?
2. W rozprawie opisano sposób aproksymacji danych doświadczalnych krzywymi trwałości zmęczeniowej, jednak procedura wyznaczania punktów przecięcia linii regresji, widocznych na rys. 6.1, nie została przedstawiona w sposób jednoznaczny. Z kontekstu wynika, że punkty te stanowią efekt geometrycznego przecięcia dopasowanych prostych, jednak zagadnienie to mogłoby zostać doprecyzowane, zwłaszcza w odniesieniu do jego interpretacji fizycznej. Czy punkt przecięcia linii regresji jest wynikiem procedury optymalizacyjnej, przyjętym poziomem amplitudy naprężenia, czy jedynie matematycznym skutkiem dopasowania prostych?
3. Na rys. 6.3, zgodnie z legendą, zaznaczono liczby cykli dwóch próbek niezniszczonych. Nie są one widoczne na rys. 6.1 i 6.2. Proszę wyjaśnić tę rozbieżność.
4. Proszę o komentarz, czy dokładność eksperymentalnego wyznaczenia gęstości stali S355J2+N miała istotny wpływ na wyniki analiz dynamicznych i projekt próbek rezonansowych, oraz czy zastosowanie wartości normowej $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ prowadziłyby do zauważalnych różnic w rezultatach.
5. Czy Autor analizował możliwość zastosowania komercyjnych systemów pomiarowych (np. HBM QuantumX), a jeśli tak – jakie ograniczenia tych rozwiązań (pasmo przenoszenia, częstotliwość próbkowania, integracja z układem ultradźwiękowym) przesądziły o konieczności opracowania autorskiego mostka tensometrycznego?
6. We wnioskach znajduje się cenna uwaga dotycząca modyfikacji Haibacha (9.1. punkt 5.) Modyfikacja ta została pierwotnie zaproponowana, aby w procesie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych obciążeń zmiennie-amplitudowych lub losowych uwzględnić także cykle o amplitudach mniejszych niż granica zmęczenia. Jaka jest

opinia Doktoranta dotycząca możliwości stosowania tej modyfikacji do obliczeń zmęczeniowych w zakresie gigacykli przy występowaniu tylko amplitud o wartościach poniżej punktu załamania wykresu SN?

3.3. Uwagi redakcyjne

Należy stwierdzić, że praca została przygotowana w sposób staranny. Drobne, nieliczne błędy w piśmiennictwie, interpunkcji itp. zostały przekazane Doktorantowi. Rysunki i tabele zostały przedstawione czytelnie aczkolwiek można odnaleźć liczne błędy stylistyczne w opisach pod rysunkami, co między innymi przedstawiono poniżej.

Drobne błędy stylistyczne i redakcyjne

Str. 72; wzór (5.2): brakuje znaku "-" we wzorze na wsp. Poissona;

Str. 86; opis pod wzorem (5.26): jest „Zmiana”, powinno być „zmiana”;

Str. 95; podpis pod rys. 5.19: niepoprawny styl, poprawny mógłby brzmieć następująco: „Rys. 5.19. Widoki modelu MES próbki: a) model dyskretny, b) środkowa część przewężenia, c) przekrój poprzeczny w środku przewężenia, d) przekrój wzdłużny w osi próbki.”;

Str. 97; rys. 5.21: nie podaje się wartości współczynników jako osobnego rysunku, chodzi o k_{σ} ;

Str. 98; linia 4: W tekście pojawiają się sformułowania „model tensometru” w kontekście jego fizycznego montażu, co wymaga doprecyzowania redakcyjnego lub użycia słowa np. „typ”;

Str. 101; podpis pod rys. 5.26: niepoprawny styl, poprawny mógłby brzmieć następująco: „Rys. 5.26. Wyniki analizy harmonicznej w stanie ustalonym z uwzględnieniem tłumienia: a) mapa przemieszczeń wzdłuż osi próbki [m], b) rozkład naprężeń zredukowanych według hipotezy von Misesa na powierzchni próbki [Pa].”;

Str. 102; podpis pod rys. 5.27: nieprecyzyjny opis: Rozkład naprężeń (jakich? von Mises, liniowe?) oraz przemieszczeń (mierzone od jakiego punktu) wzdłuż osi próbki;

Str. 106; podpis pod rys. 5.31: nieprecyzyjny opis, proponuję: Rys. 5.31. Stanowisko mikroskopowe do analizy przełomów zmęczeniowych.

Str. 108; tab. 6.1: Dokładność zapisu liczby cykli do jednego cyklu sugeruje większą precyzję niż uzasadniona niepewnością eksperymentalną. Zazwyczaj w badaniach zmęczeniowych stosuje się zaokrąglenie do 10^2 – 10^3 cykli;

Str. 111-119: na rysunkach przedstawione widoki 3D powierzchni złomów nie wnoszą żadnych dodatkowych informacji i są zbędne;

W Polsce do oddzielenia wartości dziesiętnych używamy przecinka (,) a nie kropki (.), np. tabela 5.7, rys. 5.11, 5.16, 5.20 itd.

4. Ocena końcowa

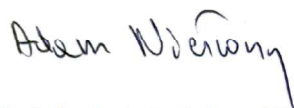
Powyższe uwagi nie podważają istotnej wartości merytorycznej rozprawy ani nie negują naukowych osiągnięć Doktoranta. Wręcz przeciwnie, przedstawiona praca potwierdza, że mgr inż. Piotr Swacha posiada ugruntowaną wiedzę z zakresu wytrzymałości zmęczeniowej materiałów, mechaniki zniszczenia oraz nowoczesnych metod badań eksperymentalnych realizowanych w zakresie wysokiej i bardzo wysokiej liczby cykli obciążenia. Doktorant wykazał się również umiejętnością samodzielnego planowania i prowadzenia złożonych badań eksperymentalnych, krytycznej analizy uzyskanych wyników oraz ich interpretacji w odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy.

Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowe podejście Autora do zagadnienia, obejmujące przygotowanie i walidację aparatury badawczej, analizy numeryczne MES, badania fraktograficzne oraz weryfikację klasycznych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w zakresie HCF i VHCF. Zastosowanie ultradźwiękowego systemu do badań zmęczeniowych oraz konsekwentne wykorzystanie uzyskanych charakterystyk materiałowych w analizach trwałości stanowi istotny walor pracy.

Stwierdzam, że postawiony przez Doktoranta cel rozprawy został zrealizowany w sposób wystarczający. Rozprawa wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna. Na tle prowadzonych obecnie na świecie intensywnych badań dotyczących zmęczenia gigacyklowego Autor potrafił wyodrębnić istotny problem badawczy i rozwiązać go w sposób samodzielny i metodycznie poprawny.

5. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej pozwala stwierdzić, że spełnia ona wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.). W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony oraz nadanie Panu mgr. inż. Piotrowi Swasze stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.



Prof. dr hab. inż. Adam Niestony