

dr hab. inż. Grzegorz Lesiuk, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska we Wrocławiu
Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej
i Biomedycznej ul. Smoluchowskiego 25,
50-370 Wrocław

Wrocław, 2025-07-09

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Benarda Kiptoo Kipsanga**
pt. *„Assessment of fracture development in thick-walled elements of power boilers after
long-time operation”*

Opis identyfikacyjny: komputeropis na prawach rękopisu, stron 146, pozycji literatury 183.

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Krzysztof Waclawik, prof. Pol.Śl.

Kopromotor prof. dr ir. Wim De Waele

Zlecniodawca: Przewodniczący Rady Dyscypliny „Inżynieria Materiałowa” Politechniki
Śląskiej - prof. dr hab. inż. Adam Grajcar, pismo-uchwała z dnia 01 lipca 2025 r.

OGÓLNA OCENA ROZPRAWY: TEMATYKA, CEL ORAZ ZAKRES PRACY

Doktorant, jako cel pracy postawił sobie zbadanie zjawisk degradacyjnych w materiałach metalicznych pracujących w energetyce. Jednym z ważniejszych zagadnień podejmowanych przez Doktoranta jest wyjaśnienie zachodzących zjawisk w trakcie ekspozycji materiału w zróżnicowanych warunkach środowiskowych i temperaturowych. Przedmiotem badań Doktoranta były materiały pochodzące z istniejących konstrukcji ciśnieniowych, tj. badania prowadzone były na rzeczywistych elementach stalowych o ponad 100 000 godzinach pracy w celu oceny odporności na pękanie. Wybór tej tematyki oceniam jako trafny i ważny naukowo. Zauważyć należy, że tematyka ta ważna jest nie tylko z naukowego punktu widzenia, ale także z utylitarnego. Jako cel badawczy Autor rozprawy wyznaczył sobie zbadanie i zrozumienie wpływu starzenia spowodowanego długotrwałą eksploatacją na odporność na pękanie stali niskostopowej kotłów energetycznych. Wartościowym uzupełnieniem (zwyczajowo przedstawianych w rozprawach doktorskich) byłoby sformułowanie hipotezy badawczej, która pozwoliła by uporządkować logikę wywodów naukowych Autora. Nie jest to zarzut,

ale przyszła sugestia. Niemniej jednak, przy tak ogólnie sformułowanym celu rozprawy trafnie oceniam dobór metod i narzędzi badawczych opisanych w kolejnych rozdziałach rozprawy. W mojej ocenie, rozprawa ta podejmuje trudny i złożony temat oraz stanowi ważną pozycję bibliograficzną dla innych badaczy. Struktura rozprawy jest prawidłowa i typowa dla tego typu opracowań. Praca składa się z 7 rozdziałów oraz spisu bibliografii obejmującego 183 pozycje.

W **rozdziale 1.** zatytułowanym „*Introduction, Aims and Objectives and Scope*” Autor zarysował genezę i cel pracy przedstawiając główne wątki rozprawy. Zabrakło w tym miejscu wyraźnej hipotezy badawczej, która powinna być motywem przewodnim pracy. Cel pracy oceniam jako trafnie dobrany i ambitnie określony.

Rozdział 2. opisuje obecny stan wiedzy. W mojej ocenie rozdział ten jest ważny i porządkuje stan zagadnienia, przedstawiono ramy teoretyczne zastosowane w dysertacji. Omówiono historię, podstawy teoretyczne i metodologię eksperymentalną stosowaną w badaniach odporności na pękanie w warunkach ograniczeń płaskich więzów. Przedstawiono krótki przegląd stali ferrytyczno-bainitycznych (perlitycznych), martenzytycznych i austenitycznych stosowanych w elementach ciśnieniowych kotłów energetycznych, w tym przegląd właściwości i rozwoju historycznego.

W **rozdziale 3** przedstawiono analizę związków między odpornością na pękanie, starzeniem się stali i kształtem geometrii, opisując zmiany odporności na pękanie w dwóch częściach o różnych parametrach eksploatacyjnych i wymiarach geometrycznych (sekcje zaworów i rur). Zastosowano zarówno metody eksperymentalne, jak i numeryczne.

W **rozdziale 4** przedstawiono kompleksowy program eksperymentalny badający zachowanie stali w warunkach złożonego stanu naprężenia. Zbadano wpływ kąta nachylenia pęknięcia na odporność na pękanie oraz przeanalizowano wrażliwość kąta nachylenia pęknięcia na pękanie w warunkach złożonego trybu obciążenia mechanicznego.

W **rozdziale 5** przedstawiono wyniki badań odporności na pękanie z wykorzystaniem parametru CTOD do zbadania wpływu krótkotrwałego pełzania termicznego na odporność na pękanie. Ponadto przeprowadzono i przedyskutowano wyniki badań mechanicznych uwzględniających m.in. wpływ starzenia na wyniki uzyskane w próbie uderzeniowej na próbkach Charpy'ego z karbem w kształcie litery V oraz przeprowadzono analizę mikrostruktury.

W **rozdziale 6** zbadano związek między odpornością na pękanie a starzeniem się stali. Przedstawiono techniki przyspieszonego starzenia izotermicznego i przyspieszonego starzenia pełzającego. Opisano wpływ degradacji materiału na odporność na rozdarcie plastyczne.

W **rozdziale 7** podsumowano pracę, przedstawiając kluczowe wnioski i zalecenia dotyczące przyszłych badań.

Poruszane zagadnienia są w ocenie Recenzenta ważne i aktualne naukowo. Praca jest napisana poprawnym językiem z wykorzystaniem poprawnego warsztatu badawczego. Jednak, lektura pracy

nasuwa szereg niejasności i pytań natury polemiki naukowej, które powinny zostać wyjaśnione. Zagadnienia te zostaną ściśle przedstawione w kolejnym punkcie niniejszej recenzji.

UWAGI O ROZPRAWIE, PYTANIA MERYTORYCZNE I ZAGADNIENIA DYSKUSYJNE

Rozprawa jest napisana poprawnym, zrozumiałym językiem i wykazuje przyzwoity poziom edytorski – nie dostrzeżono większych usterek, zaś niektóre z nich przedstawiono w dalszej części recenzji. Na szczególne podkreślenie zasługuje bogata dokumentacja graficzna.

Doktorantowi należy się pochwała za dobór literatury – znajdują się tam nie tylko pozycje najnowsze, lecz także publikacje ważne dla tego obszaru badawczego, opublikowane wcześniej. Spośród 183 pozycji zdecydowaną większość stanowią publikacje w języku angielskim. Jest to odbicie aktualnych wymagań, że publikować należy po angielsku.

Zdaniem Recenzenta, rozprawa wyróżnia się ze względu na podjęcie trudnej tematyki i wykorzystanie nowoczesnych interdyscyplinarnych narzędzi badawczo-analitycznych.

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie zagadnienia, co stanowi niewątpliwie osiągnięcia naukowe Doktoranta. Lektura rozprawy doktorskiej nasuwa również szereg pytań i zagadnień o charakterze dyskusyjnym, które zaprezentowane są poniżej.

Uwagi krytyczne, polemiczne i komentarze:

1. Cel pracy zbyt ogólny, warto było być może nieco go uszczegółowić – przedstawić, wskazać jakie to konkretnie właściwości fizyczne Autor ma na myśli. Brak tezy pracy powiększa odczucie zbyt ogólnego zarysowania tematyki i celu.
2. Na stronie 1 znajduje się informacja, iż aż do 1960 roku (i prac Irwina) nie było explicite sformułowanego kryterium pękania. Nie jest to prawdą – Autor zignorował ważną i fundamentalną rolę A.A. Griffitha 1920 roku wprowadzającą ważne rozważanie energetyczne i inicjujące naukę zwaną mechaniką pękania. Nie jest to możliwe najważniejsza uwaga w tej recenzji, ale z racji szacunku do tego badacza należało to nadmienić i prawidłowo opisać.
3. Ilekroć Autor prezentuje wyniki materiałów w stanie poeksploatacyjnym, nasuwa się pytanie czy przeprowadzono jakiekolwiek badania nieniszczące (NDT) pozwalające na wykluczenie jakichkolwiek defektów będących wynikiem eksploatacji a mogących mieć wpływ na

uzyskiwane wyniki?

4. Dlaczego Autor, mimo dobrze rozezanego stanu literaturowego i wiedzy z mechaniki pękania zdecydował się w rozdziale 3 na wykorzystanie do odporności na pęknięcie siłowego kryterium tj. K_{IC} zamiast wykorzystania CTOD lub całki J ? Dla tak plastycznego materiału próba ta była już na starcie łatwa do przewidzenia, iż problematyczne będzie spełnienie wszystkich postanowień normy – szczególnie w zakresie zapewnienia płaskiego stanu odkształceń, a uzyskane wyniki potwierdziły brak takiej kwalifikacji.
5. Czy dane materiałowe wykorzystywane w symulacjach (jak np. Tabela 9) pochodziły z badań własnych? Jeśli tak dlaczego nie ma wyników, jeśli nie to jakie jest ich źródło?
6. Jaki jest cel wyników symulacji przedstawionych na rys. 27 i 28? Wartości współczynników intensywności naprężeń są dobrze znane i opisane dla przedstawianych geometrii – co także przytacza Autor w rozprawie.
7. Nie jestem przekonany, o słuszności nazewnictwa K_{IC} (Tabela 13) pochodzącego z analiz numerycznych. K_{IC} wyznacza się eksperymentalnie w ściśle określonych warunkach. Tak dowolne operowanie tym pojęciem prowadzi do szeregu nieścisłości. Sugerowałbym nazwanie tej wielkości „krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń”. Proszę o komentarz do tych wyników z objaśnieniem ich celu? Czy celem było dopasowanie wyników do danych eksperymentalnych czy odwrotnie? Jaką rolę miały pełnić te wyniki w ocenie odporności na pęknięcie.
8. Str. 57 – prezentowane wyniki badań fraktograficznych wymagają (to jest ogólna uwaga do całej pracy) poprawy i szerszego omówienia. A mianowicie: analizy przełomów należy prowadzić ze wskazaniem miejsc/obszarów analiz. W strefie karbu, inicjacji pęknięcia, propagacji i statycznego dołamania (na przykład). Tylko wtedy możemy wyciągać odpowiednie wnioski. W analizowanym przypadku, autor selektywnie na potrzeby własne wybierał miejsca i prowadził dyskusję tych wyników względem uzyskanych danych. Str. 57 – dlaczego nie przeprowadzono badań przełomów z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej?
9. Na stronie 61 jest sformułowanie „The average K_Q from all the specimens is very consistent with 3.75 and 4.38 $MPa\sqrt{m}$ for the pipe and valve samples, respectively” Czy nie jest to błąd? Uzyskano znacznie wyższe wyniki K_Q . Chyba, że Autor miał coś innego na myśli – proszę o wyjaśnienie tego celem uniknięcia nieporozumienia.
10. Dlaczego badania w złożonym stanie naprężeń ograniczono tylko do I+III sposobu pęknięcia? Dlaczego nie podjęto badań (w mojej ocenie znacznie lepiej rozpoznanych) w zakresie I+II?
11. Czy brak fizycznego przeprowadzenia procedury pre-crackingu w badaniu I+III mógł mieć jakiegokolwiek znaczenie na uzyskane wyniki badań? Czy Autor rozważał przedyskutowanie

wpływu ostrości karbu na wyniki odporności na pękanie? Jaki jest związek między promieniem zaokrąglenia dna karbu a uzyskiwanymi siłami niszczącymi?

12. Dlaczego Autor zdecydował się na ocenę wartości współczynnika intensywności naprężeń metodą DIC zamiast np. (znacznie łatwiejszą) metodą MES/MEB?
13. Autor jako δ_5 wykorzystał znaną w literaturze postać (4.1) równania. Czy rozważano inne kryteria, możliwość sposobu obliczenia ekwiwalentnego CTOD dla złożonych stanów naprężeń?
14. Dlaczego Autor nie dokonał analizy ścieżki pęknięcia – kąta inicjacji pęknięcia w warunkach złożonego stanu naprężeń? Czy uzyskane wyniki podążały za jakąkolwiek teorią? Czy byłyby zgodne z trajektorią pęknięcia przewidywaną przez MES?
15. Statystyka jest niewątpliwie słabą stroną pracy. Być może jednym z powodów jest ograniczoność materiałów i jako taki powód ten mogę uznać za ważny. Niemniej jednak nie jest akceptowalne w sensie naukowym tworzenie sądów i dowodzenie tez o różnicach między grupami. Autor wielokrotnie powołuje się na to. Przykładem mogą być wyniki pomiarów udurowalności – rys. 65 z zaznaczonym słupkiem błędów dla 2 (!) próbek – jako dowód przytaczam cytata: *„From the results it is notable that the total impact energy (impact toughness) increases slightly compared to new material and is maximum for 240 hours of ageing while there is no difference in average values of new material and 120 hours of ageing”*. Z pewnością różnice te nie są statystycznie istotne, chociaż obserwowalne. Zalecam dużą dozę ostrożności i w przyszłości szerszą dyskusję statystyczną – także w kontekście uzyskiwanych wyników badawczych – np. Tabela 32 – brak raportowanego współczynnika R^2 opisującego dopasowanie prezentowanych parametrów krzywych potęgowych do wyników badań.
16. Dlaczego Autor nie przedstawił w pracy wyników analiz metalograficznych (rozdział 5) materiału po próbach pełzania po 12, 240 i 480 h? Pozwoliłoby to na lepszą ocenę zachodzących zmian w materiale i ich potencjalną analizę wpływu na właściwości mechaniczne.

Uwagi o charakterze redakcyjnym:

W ogólnym ujęciu i wniosku końcowym praca jest „czytelna”, ale zawiera szereg uchybień natury edytorsko-redakcyjnej, które obniżają jej walor estetyczny. Oto przykłady niektórych z nich:

1. Spis ważniejszych oznaczeń – Q – jest „constrain” powinno być „constraint”
2. Rys. 2 – brakuje jednostki – oś x.
3. Dbłość o zapis wzorów matematycznych – np. strona 14 - wzór 2.5 – jest b_0 powinno być b_0 .



4. Brak odniesień literaturowych w niektórych przypadkach – np. tabela 3 – normy powinny być cytowane, dalej strona 20 „Wallin proposed...” brak odnośnika bezpośrednio po wspomnieniu jej autora.
5. Błędy w cytowaniu i niejednorodny styl bibliografii. Przykładem jest praca [66] i jej cytowanie na stronie 25 – Boroski et al. [66] – powinno być Boroński et al.
6. Staranność rysunków. Większość rysunków jest niestety rozmyta, słabej jakości – należałoby przyłożyć więcej staranności do graficznego opracowania. Rażąco przykładowo są „odręcznie” wykonane rysunki np. 10-11. Takie rzeczy nie powinny mieć miejsca w rozprawie na tym poziomie. Wypadałoby je przerysować i opatrzyć odpowiednim odnośnikiem literaturowym wskazującym na źródło pochodzenia.
7. Częste oznaczenie symbolu „stopnia” zerem w indeksie górnym – przykład Str. 42. 535^0C zamiast 535°C
8. Brak wymiarów na rysunkach – np. rys. 18, 85.
9. Wykresy powinny być dopasowane do danych pomiarowych (to uwaga do całej rozprawy) przykłady widoczne na rys. 26, 59, 65, 76, 77 itd.
10. Dbłość o zapis matematyczny – np. we wzorze 3.1. kropka po 1.1. jest zbędna, 4.2 – niepotrzebne puste pola prostokątne symbolizujące stopień pierwiastka.
11. W oznaczeniach obrazów mikroskopowych markery są niemal niewidoczne i rozmyte, a także rozciągnięte – rys. 34, rys. 39 – brak markera skali długości.

Jeszcze raz w tym miejscu należy podkreślić, że wyżej wymienione uwagi mają jedynie charakter dyskusyjny i w żaden sposób nie umniejszają pozytywnego odbioru wyników pracy oraz osiągniętych przez Doktoranta celów i zostały przeze mnie przedstawione w zgodzie z sentencją *nemo sine vitii est*.

PODSUMOWANIE

Istotny i twórczy wkład **mgr. inż. Benarda Kiptoo Kipsanga** w rozwój inżynierii materiałowej polega na tym, że przedstawił rozwiązanie postawionego problemu badawczego, tj. *Assessment of fracture development in thick-walled elements of power boilers after long-time operation*, na podstawie którego można wskazać na następujące osiągnięcia:

1. Przedstawienie i porównanie wyników badań odporności na pękanie oraz analizę właściwości wytrzymałościowych wybranych materiałów pracujących w energetyce w stanie poeksploatacyjnych (po 100 000 godzin).

2. Opis zjawisk degradacyjnych i powstanie wiedzy poznawczej dla wybranych stopów, co czyni je wiarygodnymi badaniami referencyjnymi dla innych badaczy.
3. Wprowadzenie do zagadnienia badań materiałów pracujących w energetyce badań odporności na pękanie w złożonym stanie naprężeń. Wykazanie, iż wprowadzenie obciążenia ścinającego w trybie III nie zmienia znacząco podstawowego zachowania pęknięcia, co więcej wydaje się (z zastrzeżeniem statystycznych uwag), iż wpływ pełzania na próbki z prostym nacięciem (mode I) spowodował zmniejszenie CTOD5 o 33,02% przy maksymalnym obciążeniu w porównaniu z 4,7% zmniejszeniem dla próbek z nacięciem nachylonym pod kątem 45° (I+III).
4. Opracowanie metodyki badań z wykorzystaniem techniki sztucznego starzenia i pełzania pozwalającej na wiarygodne odtworzenie i predykcję przyszłych kierunków degradacji materiału oraz określenia kierunku zmian wybranych właściwości mechanicznych.

WNIOSEK KOŃCOWY

o dopuszczenie do publicznej obrony

Biorąc pod uwagę całokształt dysertacji i osiągnięć Autora rozprawy, stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr. inż. Benarda Kiptoo Kipsanga spełnia** wymagania artykułu 13 ust 1. Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 z późniejszymi zmianami) w związku z art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz.1669 z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym, formułuję wniosek o dopuszczenie **mgr. inż. Benarda Kiptoo Kipsanga** do publicznej obrony opiniowanej pracy jako pracy doktorskiej reprezentującej dyscyplinę Inżynieria Materiałowa.

Wrocław, 07-09-2025

dr hab. inż. Grzegorz Lesiuk, prof. uczelni