

dr hab. inż. Grzegorz Lesiuk, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej
i Biomedycznej,
dyscyplina: Inżynieria Mechaniczna
ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 WROCLAW

Wrocław, 2021-08-31

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Lipca
p.t. „*Eksperymentalno-numeryczna analiza procesu pęknięcia stali konstrukcyjnej*”

Opis identyfikacyjny: komputeropis na prawach rękopisu, stron 139, pozycji literatury 167.

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Ihor Dzioba, prof. PŚk.

Zleceniodawca: Dyrektor Naukowy Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, dr hab. inż. Sławomir Błasiak, prof. PŚk., zlecenie (pismo MAA-510/93/2021) z dnia 08 lipca 2021 r.

Rozprawa zawiera spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, 9 numerowanych rozdziałów (w tym literaturę, streszczenie w jęz. polskim i angielskim).

W **rozdziale 1.** zatytułowanym *Wprowadzenie. Mechanizmy Pęknięcia*, Autor omawia główne mechanizmy pęknięcia i kryteria pęknięcia w ujęciu globalnym i lokalnym. Modelowanie jest jednym z głównych zadań, obok badań doświadczalnych, jakie stawia mechanika pęknięcia. Autor zaprezentował najważniejsze modele obliczeniowe, w tym te stosowane do opisu pęknięć przy ciągłym charakterze przełomu.

Rozdział 2 zawiera tezę i cele badawcze pracy, które Autor sformułował następująco:

Teza: „*Dokładna ocena wytrzymałości elementów wykonanych z metali lub ich stopów, zawierających szczelinopodobne defekty, możliwa jest na podstawie analizy lokalnych pól naprężeń przeprowadzonej w wyniku badań eksperymentalnych i numerycznych*”

Zaś cele badawcze Doktorant sformułował jako:

1. Opracowanie metody definiowania konstytutywnej zależności materiału na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i numerycznych.
2. Analiza lokalnych pól naprężeń przed frontem szczeliny pozwalająca na przewidywanie mechanizmów zniszczenia (łupliwy, mieszany, ciągły), jeżeli znane są poziomy naprężeń krytycznych oraz wielkość obszaru krytycznego, w którym naprężenia rozwierające są większe od krytycznych.



3. Korekta normatywnej charakterystyki odporności na pękanie poprzez uwzględnienie parametru Q powiązanego ze współczynnikiem trójosiowości naprężeń T_z , uwzględniających zarówno wpływ więzów płaskich, jak i w kierunku grubości.

Rozdział 3 zawiera informacje o celach szczegółowych i zakresie badań.

W **rozdziale 4**. Doktorant opisuje zastosowane metody badawcze i materiały wytypowane do badań; żeliwo sferoidalne ADI, stal S355 o dwóch typach mikrostruktury FPW (ferryt ze skoagulowanymi cząstkami węglików) i FP (ferryt-perlit) oraz stal 42CrMo4. W rozdziale tym przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania, odporności na pękanie wyrażonej krytyczną wartością całki $J - JIC$. Badania przeprowadzono w zmiennych warunkach temperaturowych. Ponadto przeprowadzono analizy metalograficzne i fraktograficzne próbek po badaniach. Dla tak dobranego zestawu materiałów i zmiennych warunków temperaturowych Autor uzyskał różne mechanizmy pękania od czysto kruchego (łupliwego), poprzez mieszany łupliwo-ciągły, aż do pękania ciągłego będącego wynikiem mechanizmu wzrostu pustek. Na podstawie uzyskanych wyników Autor uzyskał krzywą przejścia plastyczno-kruchego dla każdego z analizowanych materiałów.

W **rozdziale 5**. „Definicja i kalibracja związku materiałowego”, Autor przedstawia opis procedury kalibracyjnej z wykorzystaniem formuły określającej naprężenia uplastyczniające wg metodologii opisanej w pracach Bai-Wierzbickiego i Neimitza. Doktorant przeprowadził dyskusję dotyczącą rozbieżności wyników uzyskiwanych w obszarze krzywej tuż przed momentem zniszczenia próbki tj. z uwzględnieniem efektu osłabiania się materiału na skutek inicjacji, rozwoju i koalescencji pustek. Wykorzystanie zmodyfikowanego członu osłabienia c_{η} umożliwiło poprawny opis krzywej w tym obszarze. Zauważono ponadto, że uwzględnienie w procedurze kalibracji parametrów: trójosiowości naprężeń oraz Lode pozwoliło na lepsze odtworzenie poziomu naprężeń wzdłuż frontu szczeliny ze względu na występujące zmiany wspomnianych parametrów w tym obszarze. W rozdziale przedstawiono wybrane, reprezentatywne aspekty przeprowadzania procedury przygotowania modelu materiału na potrzeby obliczeń numerycznych. W niniejszej pracy procedurę kalibracji związku materiałowego zrealizowano dla wszystkich materiałów przyjętych do programu badań, na próbkach dla których przeprowadzono obliczenia numeryczne.

Rozdział 6 zawiera wyniki analiz numerycznych. W symulacjach numerycznych wykorzystano dwa gatunki stali różniące się poziomami charakterystyk wytrzymałościowych oraz odporności na pękanie: S355-FPW oraz 42CrMo4. W obrębie każdego gatunku stali wybrano po trzy temperatury badania, w których występował odmienny charakter pękania: kruchy – łupliwy, mieszany kruchociągły oraz ciągły. W oparciu o zmodyfikowane kryterium pękania łupliwego RKR, Autor wyznaczył krytyczny poziom naprężeń dla każdej analizowanej stali. Określił wymiary powierzchni pękania kruchego, jej rozmieszczenie oraz względny udział w odniesieniu do powierzchni badanej próbki. Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych, Doktorant wysunął wniosek, że aby w próbce realizowany był proces pękania o charakterze łupliwym, muszą być spełnione następujące warunki: poziom naprężeń rozwierających powinien



przekraczać naprężenia krytyczne na obszarze przed frontem szczeliny obejmującym co najmniej 1/3 efektywnej powierzchni próbki.

W **rozdziale 7**. Doktorant opracował i przedstawił procedurę mającą na celu korektę odporności na pękanie z uwzględnieniem wpływu więzów geometrycznych próbki. Jako kryterium odniesienia Autor przyjął globalne kryterium pęknięcia z uwzględnieniem krytycznej wartości całki J , J_{IC} . Zaproponował formułę pozwalającą na korektę odporności na pękanie materiału z uwzględnieniem wpływu długości pęknięcia w próbce (węzów płaskich – *in-plane constraint*) oraz wpływu grubości (węzów po grubości przy zagadnieniach trójwymiarowych – *out-of-plane constraint*). Jednym z ważniejszych osiągnięć Doktoranta w tym rozdziale było uzupełnienie korekty odporności na pękanie poprzez przedstawienie nowatorskiego sposobu obliczania parametru Q . Zaproponowana procedura ma szczególnie duże znaczenie dla materiałów o wysokim poziomie plastyczności. W toku postępowania i przeprowadzonych obliczeń obliczone przez Doktoranta wartości odporności na pękanie mieszczą się w wąskim zakresie krytycznej wartości całki J wyznaczonej na drodze eksperymentalnej (błąd obliczeń nie przekroczył 2%).

Rozdział 8 zawiera syntetyczne podsumowanie i wnioski

Rozdział 9 obejmuje spis literatury.

UWAGI O ROZPRAWIE, PYTANIA MERYTORYCZNE I ZAGADNIENIA DYSKUSYJNE

Rozprawa jest napisana poprawnym, zrozumiałym językiem i wykazuje bardzo dobry poziom edytorski – nie dostrzeżono większych usterek, zaś niektóre z nich przedstawiono w dalszej części recenzji. Na szczególne podkreślenie zasługuje bogata dokumentacja graficzna. Rysunki oraz fotografie są wykonane bardzo starannie i odzwierciedlają szeroki program badań. Tabele są przejrzyste dla czytelnika.

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 167 pozycji zdecydowaną większość stanowią publikacje w języku angielskim. Jest to odbicie aktualnych wymagań, że publikować należy po angielsku.

W 9. cytowanych publikacjach z okresu 2018 – 2021 Doktorant jest współautorem, co potwierdza Jego aktywność naukową w tematyce rozprawy. Warto zauważyć, że dorobek Doktoranta jest znacznie większy w tej materii – w bazie WoS odnaleźć można 12 prac, cytowań 29 (18 bez autocytowań), $H=3$ – co należy uznać za wynik dobry jak na ten etap rozwoju kariery naukowej.

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

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. W tabeli 4.1. na stronie 44 dla materiału ozn. OC3-42CrMo4 podano czas wygrzewania materiału wynoszący 9000 minut. Czy wartość ta jest poprawna?
2. W p. 4.4 przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania. Z rys. 4.10 wynika, że przedstawiono wyniki dla jednej próbki. Stąd nasuwa się pytanie o liczbę próbek wykorzystanych w eksperymencie i rozrzutach statystycznych wyników, które przecież w kolejnych etapach stanowią podstawę dalszych analiz.
3. Na 65. stronie rozprawy przedstawiono wykres ilustrujących rozkład twardości w próbce po statycznym rozciąganiu dla stali S355-FP. Jaki był cel tego badania? Dlaczego nie przedstawiono podobnych wykresów dla innych materiałów. Czy uzyskane wyniki pomiarów porównywano seriami dla grupy próbek tego samego materiału?
4. Rys. 5.4. – dlaczego nie przedstawiono podobnych wykresów dla innych materiałów? Czy analizowano rozkłady ziaren w próbce i ich zmienność między próbkami tego samego materiału.
5. W rozdziale 5.2 wykorzystano metodę wideorejestracji (prowadzonej za pomocą kamery) próby rozciągania w celu określenia bieżącej wartości odkształcenia. Czy Autor rozważał wykorzystanie metod fotogrametrycznych np. DIC?
6. Na stronie 73 zaprezentowano wyniki zmian potencjału prądu elektrycznego DV rejestrowanych w trakcie próby rozciągania. Czy obserwowano równocześnie zmianę temperatury próbki w trakcie eksperymentu?
7. Na stronie 44 Autor formułuje zdanie: *„Wybór rozmiaru elementów skończonych oraz zmiany zagęszczenia siatki poprzedzone były badaniami wstępnymi w celu uzyskania zbieżności otrzymywanych wyników przy odpowiedniej jakości siatki elementów skończonych.”* - proszę sprecyzować o jakich badaniach wstępnych mowa, jak również proszę o przedstawienie wyników tych analiz.
8. Autor również w sposób nieprecyzyjny opisuje budowę modelu numerycznego – *„Rozmiar elementów oraz ich zagęszczenie na modelowanej próbce dobierane były w taki sposób, aby zapewnić odpowiednią jakość uzyskanej siatki (str. 44)”*. Proszę o uściślenie kryterium „odpowiedniej” jakości jak również komentarz dotyczący przyjętych warunków brzegowych (np. typ utwierdzenia (Tie, coupling etc.?).
9. Model numeryczny belki trójpunktowo zginanej Autor uzupełnił komentarzem (str. 42) *„W symulacji obciążenia zadawano przemieszczenie górnej rolki naciskającej na próbkę.”* – Proszę wyjaśnić w jaki sposób modelowano rolkę, podporę jak również czy analizowano rolę tarcia między podporą, rolką a próbką?
10. W podrozdziale 5.2 Autor opisuje na stronie 74 modele konstytutywne typu „A”, „B”, „C” – o jakich modelach matematycznych mowa i jaka jest ich



reprezentacja? Jakiej miary matematycznej używano do klasyfikacji jakości ich dopasowania?

11. Na stronie 87 znajduje się sformułowanie „*Celem przeprowadzenia analiz numerycznych było określenie pewnych wielkości pól mechanicznych przez wierzchołkiem pęknięcia*” – O jakich „pewnych” wielkościach mowa?
12. Czym kierował się Autor podczas doboru punktów (wykres na rys. 6.1.) przeznaczonych do dalszych analiz? Jakie stosowano kryteria wyboru?

Uwagi o charakterze redakcyjnym:

1. Zasadne wydaje się być połączenie rozdziałów 2 i 3 w jedną całość.
2. Na stronie 78 znajduje się sformułowanie „*wykorzystano w procederze kalibracji*”, powinno być „*wykorzystano w procedurze kalibracji*”
3. Podpis pod rysunkiem 1.1 „*Obrazy fraktograficzne przełomów ...*” – **fraktografia** jest sama w sobie nauką o budowie przełomów, zatem zasadne wydaje się być wyeliminowanie słowa „*przełomów*”. Pozwoli to uniknąć pleonazmu. Alternatywnie podpis ten można zatytułować krótko: „*Obrazy mikroskopowe przełomów próbek...*”.

Chciałbym 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 vitiis est*.

PODSUMOWANIE

Istotny i twórczy wkład **mgra inż. Sebastiana Lipca** w rozwój mechaniki, w jej część teoretyczną, eksperymentalną i metodologiczną polega na tym, że przedstawił rozwiązanie postawionego problemu badawczego, tj. *Eksperymentalno-numeryczna analiza procesu pęknięcia stali konstrukcyjnej*, na podstawie którego można sformułować następujące wnioski i osiągnięcia:

1. Autor zaproponował metody oszacowania krytycznych wartości naprężeń oraz odkształceń materiału w próbie jednoosiowego statycznego rozciągania metali,
2. Do opisu matematycznego krzywych naprężenia – odkształcenia zastosował procedurę kalibracji według metodologii zaproponowanej w pracach Bai-Wierzbickiego oraz Neimitza uwzględniającej funkcję plastyczności. Funkcja ta obejmuje wpływ takich wielkości, jak: składowe naprężeń, odkształceń, parametr trójowości naprężeń η , parametr Lode. Pozwoliło to w rezultacie końcowym na implementację do symulacji numerycznych obciążenia próbki trójpunktowo zginanej SENB i uzyskanie tym samym rozkładów naprężeń, odkształceń oraz parametru trójosiowości naprężeń η przed wierzchołkiem pęknięcia.

3. Ponadto, wykorzystał zmodyfikowane kryterium pęknięcia łupliwego RKR, wyznaczył krytyczny poziom naprężeń dla wszystkich analizowanych stali. Określił wymiary powierzchni pęknięcia kruchego, jego rozmieszczenie oraz względny udział w odniesieniu do powierzchni badanej próbki.
4. Doktorant opracował i przedstawił procedurę mającą na celu korektę odporności na pęknięcie z uwzględnieniem wpływu wymiarów geometrycznych elementów innych niż normatywne. Jako kryterium odniesienia przyjęto globalne kryterium pęknięcia z uwzględnieniem krytycznej wartości całki J , J_{IC} . Zaproponował formułę pozwalającą na korektę odporności na pęknięcie materiału z uwzględnieniem wpływu długości pęknięcia w próbce (więzów płaskich – *in-plane constraint*) oraz wpływu grubości (więzów po grubości przy zagadnieniach trójwymiarowych – *out-of-plane constraint*). Uzyskany wynik mieści w zakresie rezultatów otrzymanych na drodze eksperymentalnej co potwierdziło słuszność założeń i stosowanych metod.

WNIOSEK o dopuszczenie do publicznej obrony

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. **Rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Lipca spełnia** wymagania art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, stan prawny na dzień 30 września 2011 r.) i 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 późn. zm.) wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dziedziny nauk **inżynieryjno-technicznych** i dyscypliny **inżynieria mechaniczna** według obecnej klasyfikacji dziedzin i dyscyplin określonej w rozporządzeniu z dnia 20 września 2018 r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

Wrocław 31-08-2021

Gnypor Lesiur