

Dr hab. inż. Małgorzata Chwał, prof. PK
Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Katedra Konstrukcji Maszyn i Struktur Kompozytowych
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: malgorzata.chwal@pk.edu.pl

Kraków, dnia 19 stycznia 2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Furmańczyka

**pt. „Badanie procesu pękania elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii
przełomów”**

Promotor pracy: dr hab. Ihor Dzioba, prof. PŚk

Promotor pomocniczy: dr inż. Justyna Kasińska

Podstawa opracowania: pismo nr MAA-510/133/2023 dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk,
Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia
22.11. 2023 r.

I. PROBLEM BADAWCZY I CELOWOŚĆ JEGO PODJĘCIA

Odporność na pękanie materiałów stosowanych w budowie maszyn i urządzeń ma istotne znaczenie na ich trwałość i niezawodność. Znajomość wpływu zarówno rodzaju obciążenia, mikrostruktury materiału czy temperatury pracy na mechanizm uszkodzenia jest kluczowa już na etapie projektowania. W obszarze mechaniki pękania zasadnicze jest wyznaczenie krytycznych wartości charakterystyk odporności na pękanie. Obecnie w opisie odporności na pękanie wykorzystuje się zarówno podejścia makroskopowe, jak i ze względu na dostępność aparatury, rozwija się podejścia lokalne oparte na analizie mikroskopowej przełomów. W podejściu lokalnym istotne znaczeniu w wyznaczeniu odporności na pękanie ma znajomości mikrostruktury materiału



Postulaty formułowane w latach 70. dla kryteriów lokalnych wymagają ponownego przywołania i uściślenie w świetle współczesnych możliwości badań metalograficznych i fraktograficznych.

Przesłana do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Furmańczyka pt. „Badanie procesu pęknięcia elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przełomów” dotyczy zagadnienia mechaniki pęknięcia materiałów konstrukcyjnych. Tytuł pracy doktorskiej nie budzi wątpliwości co do podjętej tematyki, która jest aktualna, a zawartość pracy stanowi wartościowy i oryginalny wkład do dyscypliny inżynieria mechaniczna, dotyczący opracowania metod wyznaczenia odporności na pęknięcia materiałów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przełomów wykorzystującej współcześnie dostępną aparaturę.

II. TREŚĆ PRACY – OCENA FORMALNA I MERYTORYCZNA

Wydana drukiem rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Furmańczyka pt. „Badanie procesu pęknięcia elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przełomów” liczy 150 stron i obejmuje: stronę tytułową (1 strona), spis treści (2 strony), spis oznaczeń i skrótów (3 strony), zarysu mechaniki pęknięcia (rozdział 1, 30 stron), cel badawczy pracy (rozdział 2, 1 strona), opis materiałów do badań (rozdział 3, 5 stron), opis właściwości mechanicznych użytych materiałów (rozdział 4, 10 stron), badania mikrostruktury i powierzchni przełomów (rozdział 5, 2 strony), wyznaczenie szerokości strefy stępienia (rozdział 6, 24 strony), obliczenia wartości odporności na pęknięcie (rozdział 7, 8 stron), wyznaczenie mikrochropowatości przełomów (rozdział 8, 22 strony), wyznaczenie odporności na pęknięcie (rozdział 9, 13 stron), podsumowanie i wnioski (rozdziały 9 i 10, 4 strony), spis literatury (rozdział 12, 8 stron, 144 pozycje), streszczenia w języku polskim (2 strony) i angielskim (2 strony).

Układ rozprawy doktorskiej, jest w sensie metodycznym właściwie skonstruowany. Kandydat prezentuje aktualny stan wiedzy, określa cel pracy, opisuje obiekt badawczy, wykonuje analizy i wyciąga wnioski. Materiał ilustracyjny oceniam jako dobrze dobrany i czytelny. Praca jest poprawnie napisana, nie sprawia trudności podczas czytania.

Ocena poszczególnych części rozprawy doktorskiej:

Rozdział **Zarys mechaniki pękania** jest wstępem do tematyki podjętej w pracy doktorskiej, który stanowi najbardziej obszerny rozdział. Przegląd literaturowy ujmuje współczesny stan wiedzy w obszarze problematyki rozprawy doktorskiej. Doktorant nawiązał do potrzeby opracowania bądź też udoskonalenia metod badawczych w tematyce odporności materiałów na pęknięcie oraz historyczne ujęcie tego obszaru badań. W kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano mechanizmy pęknięcia w stalach konstrukcyjnych opisując pęknięcie kruche łupliwe, kruche po granicach ziaren, pęknięcie ciągliwe plastyczne czy mieszane. Opisy poparto czytelnym materiałem ilustracyjnym. Doktorant wnikliwie analizuje obecny stan wiedzy powracając do prac ze starszej literatury, gdzie ciekawe podejścia zostały zaniechane, ze względu na ograniczenia co do możliwości badawczych. Uważam, to za ważny aspekt pracy świadczący o dogłębnej znajomości tematu. Doktorant charakteryzuje kryteria globalne oraz lokalne podejścia stosowane w analizie procesu pęknięcia, a przedstawione opisy teoretyczne rozszerzone są możliwościami oferowanymi przez badania metalograficzne i fraktograficzne. Niedosyt stanowi brak podsumowania.

W rozdziale **Cele badawcze pracy** Doktorant odniósł się do obecnego stanu wiedzy co do zastosowania lokalnych kryteriów zniszczenia. Za cel postawił sobie *opracowanie metod wyznaczania odporności na pęknięcie stali konstrukcyjnych bazując na badaniach morfologii powierzchni przelomów stosując współczesną aparaturę i metodyki badawcze*. Cel pracy jest jasno postawiony.

W rozdziale **Materiały do badań** Doktorant przedstawił wybrane materiały badawcze w grupie stali konstrukcyjnych, które w opinii Recenzenta zostały słusznie dobrane, aby uwypuklić różne mechanizmy pęknięcia i zapewnić szerokie ujęcie problematyki wyznaczenia odporności na pęknięcie. Wybrano materiały przeznaczone do pracy w obniżonych temperaturach, w temperaturach podwyższonych, materiały o wysokiej twardości, materiały o wysokiej wytrzymałości i ciągliwości. Dla każdego materiału podano skład chemiczny i obrazy mikrostruktury.

W rozdziale czwartym **Właściwości mechaniczne analizowanych materiałów** Doktorant wyznaczył charakterystyki wytrzymałościowe materiałów z próby jednoosiowego rozciągania w temperaturach obniżonych i temperaturze otoczenia. Przedstawił badania odporności na pęknięcie z próby zginania. Rozdział zakończył porównaniem wyników w obszarze granicy plastyczności, wytrzymałości doraźnej oraz odporności na pęknięcie oraz wysunął słuszne wnioski, iż wysokie

własności mechaniczne nie korelują z wysoką odpornością na pękanie. Uzyskane charakterystyki są zgodne z doniesieniami literaturowymi. Podsumowaniem przedstawione przez Doktoranta jest płynnym przejściem do dalszych rozważań w kolejnych rozdziałach pracy.

W rozdziale piątym **Badania mikrostruktury i powierzchni przelomu (metalograficzne, fraktograficzne, profilometryczne)** Doktorant zaprezentował metodykę badań mikroskopowych przelomów z opisem wykorzystanej aparatury i technik pomiarowych. Szczegółowo opisał przygotowanie zglądów metalograficznych. Analizując kolejne rozdziały pracy, uważam, że rozdział piąty powinien być włączony do rozdziału szóstego, którego jest nierozdzielalną częścią.

Kolejne cztery rozdziały stanowią w opinii recenzenta wartościowy materiał badawczo-aplikacyjny.

W rozdziale szóstym **Wyznaczenie szerokości strefy stępienia** Doktorant zaprezentował metodykę określenia odporności na pękanie w oparciu o pomiar szerokości strefy stępienia. Opisał trudności związane z rozróżnieniem granic stref przelomu oraz brak precyzyjnych zaleceń związanych z pomiarami punktowymi na strefie stępienia. Kluczową kwestią opisaną w tym rozdziale jest przedstawienie oryginalnej modyfikacji podejścia związanego z wykonaniem pomiarów szerokości strefy stępienia. *Doktorant zaproponował zamianę metody dyskretnych pomiarów punktowych obciążonych znacznym błędem przy wyznaczeniu szerokości strefy stępienia, na metodę pomiaru powierzchni strefy stępienia, a następnie obliczeniu jej uśrednionej szerokości.* Takie podejście opierało się zasadniczo na analizie zdjęć z mikroskopu skaningowego (Doktorant nazwał ją metodą SEM). Badania odporności na pękanie wykonał wg normy ASTM na próbkach SENB (zginanie próbek z jednostronnym karbem). Przedstawione wyniki porównawcze wykazały dobrą zgodność metody autorskiej z metodą normatywną. Doktorant opisał dodatkowo określenie szerokości strefy stępienia poprzez wykorzystanie profilu liniowego powierzchni przelomu przy użyciu profilometru optycznego i wskazał trudności w realizacji takiego badania. Uwypuklił, jak duże znaczenie w identyfikacji stref przelomu ma doświadczenie operatora. W rozdziale przedstawiono także możliwość aplikacji metod numerycznych MES w wyznaczeniu rozwarcia wierzchołka pęknięcia oraz szerokości strefy stępienia. Wyniki badań doświadczalnych oparte na zaproponowanej metodzie zostały czytelnie przedstawione z obszernym materiałem ilustracyjnym identyfikującym wpływ właściwości

materiału i temperatury na szerokość strefy stępienia. W podsumowaniu Doktorant wskazał dominujące mechanizmy pęknięcia dla poszczególnych materiałów. Materiał ten wskazuje na wysokie umiejętności w prowadzeniu badań i rozeznaniu w temacie.

W rozdziale siódmym **Obliczenie wartości odporności na pęknięcie w momencie inicjacji pęknięcia - J_i na podstawie pomiarów SZW** Doktorant wykorzystał możliwość obliczenia wartości odporności na pęknięcie w momencie inicjacji pęknięcia podkrytycznego opartą na pomiarze szerokości strefy stępienia. Doktorant przejrzysto wyjaśnił różnice pojawiające się w porównaniu uzyskanych wartości odporności na pęknięcie w momencie inicjacji pęknięcia J_i a wartościami krytycznymi odporności na pęknięcie J_c wskazując wpływ mechanizmu pęknięcia materiału.

W rozdziale ósmym **Wyznaczenie mikrochropowatości powierzchni przelomu** Doktorant *przedstawił i wyjaśnił zmodyfikowaną relację służącą do wyznaczenia mikrochropowatości M przelomów i określenia na jej podstawie wartości odporności na pęknięcie J_M opierając się na badaniach fraktograficznych przelomów próbek SENB wykorzystanych wcześniej do pomiaru szerokości strefy stępienia. Chropowatość przelomu określił z pomiarów profilometrycznych wg normy PN-EN ISO 4287 opierając się na pomiarach parametrów chropowatości R_{sm} , R_z , R_t , oraz R_c dla ciągłego mechanizmu pęknięcia. Dla pęknięcia mieszanego krucho-plastycznego Doktorant opisał założenia i sposób weryfikacji poprzez pomiary SEM. Wskazał, jak zmieniają się mechanizmy pęknięcia wraz z obniżaniem temperatury. Podał, w których temperaturach mechanizm pęknięcia jest w pełni łupliwy, co uniemożliwia wyznaczenie mikrochropowatości zaproponowaną metodą. Badania poparł bogatym i umiejętnie dobranym materiałem ilustracyjnym. Rozdział ten Doktorant zakończył obszernym porównaniem wyników odporności na pęknięcie uzyskanych z własnej metody bazującej na pomiarach mikrochropowatości powierzchni przelomu próbki w stosunku do standardowych procedur ASTM.*

W rozdziałach **Podsumowanie najistotniejszych rezultatów i Wnioski** Doktorant zwięźle posumował badania i rezultaty ujęte w rozprawie doktorskiej dotyczące opracowania metod oceny odporności na pęknięcie stali konstrukcyjnych oraz staliw na podstawie badań powierzchni przelomów. Następnie sprecyzował sześć wniosków końcowych. Dla recenzenta czytelniejsze wydaje się połączenie tych dwóch rozdziałów, gdyż obecnie w Podsumowaniu Doktorant bardziej

skupił się na metodzie związanej z szerokością strefy stępienia, a we Wnioskach na metodzie mikrochropowatości.

W **Spisie treści** wymieniono 144 pozycje w tym 9 stanowią publikacje współautorskie Doktoranta. Bibliografia ujmuje zarówno prace z początku XX w. jak i aktualne piśmiennictwo. Znaczna liczba prac z lat 70. i 80. XX w. związana jest tematyką badań rozwijaną przez Doktoranta. Prace z ostatnich 20 lat to 53 pozycje. Dobór literatury świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym.

III. WARTOŚĆ NAUKOWA PRACY

Każdą część recenzowanej rozprawy doktorskiej przedłożonej przez mgr inż. Piotra Furmańczyka oceniam wysoko, wskazując na bardzo dobre rozeznanie literaturowe, wysokie kompetencje Doktoranta w zakresie samodzielnego przygotowania programu badań, ich przeprowadzenia, analizy i interpretacji wyników oraz formułowania wniosków końcowych. Podjęta w rozprawie doktorskiej tematyka badawcza bez wątpienia wpisuje się w aktualne trendy światowe w inżynierii mechanicznej. Dużą wartością pracy jest kompleksowe i wielokierunkowe podejście do tematyki określenia odporności na pękanie zróżnicowanej grupy materiałów konstrukcyjnych charakteryzujących się różnorodnymi mechanizmami pękania. Nie jest to zadaniem łatwym, a świadczy o tym objętości materiału badawczego przedstawiona w pracy. Doktorant, sprawnie wykorzystując współczesną aparaturę i możliwości oprogramowania, przeprowadził badania mikrostruktury przelomów w celu wyznaczenia odporności na pękanie materiałów. W metodzie opartej na znajomości szerokości strefy stępienia, *Doktorant zaproponował oryginalną modyfikację sposobu określenia szerokości tej strefy z pomiaru powierzchni w miejsce pomiarów punktowych* obciążonych dużym błędem. Rozmiar szerokości strefy jest powiązany z charakterystykami odporności na pękanie. *Doktorant przedstawił także własną metodą wyznaczenia odporności na pękanie za pomocą parametrów chropowatości obliczonych z charakterystycznych profili powierzchni przelomu.* Wyraźnie wskazał trudności w zastosowaniu opracowanych metod do materiałów o mechanizmach rozwoju pęknięcia podkrytycznego innych niż ciągliwy. Praca badawcza wykazuje znaczny potencjał aplikacyjny.



IV. UWAGI I WĄTPLIWOŚCI

Analiza tak wieloetapowej, ale jednocześnie spójnej rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Furmańczyka, pozwala stwierdzić, iż dostarcza ona wielu nowych oraz cennych informacji. Pracę oceniam bardzo wysoko, jednak podczas lektury recenzentowi nasunęły się pewne uwagi/wątpliwości, które przedstawiam poniżej i do których mam nadzieję Doktorant odniesienie się podczas publicznej obrony:

- W spisie treści tytuł rozdziału piątego jest mylący. Informacje tam zawarte dotyczą metodyki badań i wykorzystanej aparatury. Niepotrzebne jest ujęcie szczegółowe przedstawione w nawiasach. Czytelniejsze byłoby tytuł: *Przygotowanie badań mikrostruktury i powierzchni przelomów*.
- Na rys. 1.2 nie podano materiału oraz temperatury jak podano na innych mikrofotografia. W tekście odniesiono się tylko ogólnie do materiałów metalicznych.
- W podpisie rys. 1.14 podano wielkość M , której nie ma na rysunku. Podpis powinien odpowiadać wielkościom zaprezentowanym na rysunku.
- Na str. 40 Doktorant używa określenia „lepsza dokładność” czy „opracowanie dokładniejszych podejść i metod”. W jakim sensie? Jakie dokładności są porównywane?
- W rozdziale dotyczącym opisu materiałów do badań dla systematyki wypadałoby podać przy każdym materiale również tabelaryczne zestawienie literaturowych właściwości mechanicznych.
- W rozdziale dotyczącym właściwości mechanicznych Doktorant nie podał uzasadnienia badania staliwa G17CrMo5-5 w temperaturach obniżonych, skoro w opisie materiałów na str. 42 podał, że pracują głównie w podwyższonych temperaturach.
- W opisie wyników zaprezentowanych na rys. 4.1-4.5 Doktorant nie przedstawił wg jakiego kryterium wybrano prezentowane wyniki skoro badano po minimum trzy próbki z każdego zakresu temperaturowego.



- Dla łatwiejszej interpretacji wyników, wykresy na rys. 4.1-4.5 powinny być wykonane dla takich samych temperatur. Doktorant nie uzasadnił, dlaczego przedstawił wyniki dla różnych wartości temperatur ujemnych.
- W rozdziale dotyczącym obliczenia wartości odporności na pękanie J_I pojawia się nieścisłość pomiędzy tekstem na str. 92, a tym co faktycznie umieszczone jest na rys. 7.1-7.5. Tekst sugeruje graficzne przedstawienie odporności na pękanie, a wykresy ujmują współczynnik intensywności naprężeń K_{JC} .
- Dla recenzenta czytelniejsze wydaje się połączenie Podsumowania i Wniosków, gdyż obecnie w Podsumowaniu Doktorant bardziej skupił się na metodzie związanej z szerokością strefy stępienia, a we Wnioskach na metodzie profili chropowatości. Brakuje wskazania kierunków dalszych prac.
- W pracy wykorzystano w szerokim zakresie nowoczesną aparaturę i oprogramowanie. Informacje szczegółowe Doktorant umieścił w tekście, natomiast ze względu na jej liczbę, zasadne wydaje się tabelaryczne zebranie takich informacji.

Układ pracy jest przejrzysty jednak pojawiły się drobne błędy edytorskie, które nie obniżają wartości merytorycznej pracy, m. in.:

- Drobne błędy interpunkcyjne.
- We wzorach, tabelach zastosowano kropki zamiast przecinaka w separatorach dziesiętnych.
- Na str. 17 i str. 31 użyto niepoprawnych zwrotów -60-ątych, 70-ątych.
- Brak odniesienia do rysunków 1.10-1.14, 4.1- 4.3, 5.1 oraz 6.5 w tekście.
- Na str. 36 odniesiono się do nieistniejącej formuły 2.1. Prawdopodobnie powinna być formuła 1.57.
- Na str. 91 odniesiono się do nieistniejącego rozdziału 2.4. Dotyczy rozdziału 4.2.

V. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Furmańczyka pt. „Badanie procesu pęknięcia elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przełomów” jest aktualnym i wartościowym opracowaniem związanym z zagadnieniami mechaniki pęknięcia wpisującym się w dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Zaprezentowany w pracy materiał jest oryginalnym rozwiązaniem istotnego problemu naukowego opracowanym na wysokim poziomie merytorycznym, potwierdzający wiedzę teoretyczną Doktoranta i umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Ostatecznie stwierdzam, iż rozprawa doktorska pt. „Badanie procesu pęknięcia elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przełomów” spełnia wszystkie kryteria formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i **wniosuję o dopuszczenie mgr inż. Piotra Furmańczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marek Chmura', is written in a cursive style.