

|                                              |             |
|----------------------------------------------|-------------|
| WYDZIAŁ OCEANOTECHNIKI<br>I OKRĘTOWNICTWA PG |             |
| Wpłynęło dnia                                | 3. 10. 2018 |
| L. dz.                                       | 1028        |
| zł.                                          |             |

Bydgoszcz, 18.09.2018 r.

dr hab. inż. Dariusz Boroński, prof. nadzw. UTP  
Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
w Bydgoszczy

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Kowalskiego

nt.: „Wpływ parametrów geometrycznych próbki stalowej na uzyskaną wartość wskaźnika krytycznego rozwarcia wierzchołka szczeliny CTOD w badaniach odporności na pękanie”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej z dnia 26 czerwca 2018 roku i pismo Dziekana Wydziału z dnia 5.07.2018 roku.

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Tematyka pracy doktorskiej mgr Kowalskiego związana jest z problematyką analizy odporności na pękanie materiałów konstrukcyjnych stosowanych w budowie struktur okrętowych. Zgodnie z informacjami podanymi przez Doktoranta, powodem podjęcia badań była praktyczna potrzeba zweryfikowania możliwości stosowania w badaniach własności materiałowych próbek o odmiennej geometrii w stosunku do zaleceń norm i towarzystw klasyfikacyjnych.

Badania odporności na pękanie są chyba jednymi z najbardziej rozbudowanych badań eksperymentalnych w analizie mechanicznych własności materiałowych. Do jej wyznaczenia stosowane są różne metody badawcze, w których wykorzystuje się wiele typów próbek. Uzyskiwane wyniki badań tym samym są przypisywane i przynależne wyłącznie określonego typowi badania. Powoduje to, że kwestionowane jest określanie wyznaczonych parametrów jako własności materiałowych. Równolegle funkcjonują regulacje normatywne określające wymagania w zakresie prowadzenia badań służących określeniu parametrów materiałowych, które mogą być stosowane w obliczeniach elementów konstrukcyjnych. Jednoznaczność interpretacji parametrów opisujących odporność na pękanie materiałów jest bardzo istotne także z punktu widzenia możliwości porównywania własności różnych materiałów.

Konstruowanie odpowiedzialnych struktur, których uszkodzenia mogą skutkować zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzi, a także wpływać destrukcyjnie na środowisko, często wymaga przeprowadzenia niezależnych od ich producenta odbiorów przez uprawnione jednostki. W wielu przypadkach oznacza to konieczność stosowania zweryfikowanych procedur obliczeniowych, często bazujących na znormalizowanych własnościach materiałowych wyznaczanych przez uprawnione, certyfikowane laboratoria badawcze. Dopuszcza się także stosowanie własnych rozwiązań, które jednak w takich przypadkach wymagają naukowego potwierdzenia ich skuteczności.



Autor opiniowanej rozprawy podjął się weryfikacji możliwości uogólnienia wyników badań prowadzonych na tzw. próbkach podwymiarowych na próbki normatywne. Tym samym, w świetle powyższych stwierdzeń można uznać podjęcie tematu rozprawy za celowe i uzasadnione, a podejmowaną tematykę aktualną zarówno pod względem poznawczym, jak i praktycznym.

Biorąc pod uwagę zakres tematyczny pracy, w tym jej cele i uzyskane efekty, ocenianą rozprawę można zakwalifikować do dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn.

Rozprawa o objętości 133 stron (172 z załącznikami) zawiera 93 rysunki, 23 tabele i 99 pozycji literatury. Doktorant przytoczył w wykazie literatury 3 publikacje, w których był współautorem.

Treść pracy została zawarta w 11 rozdziałach poprzedzonych streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz spisem treści, a także wykazem ważniejszych oznaczeń i symboli.

W pierwszym rozdziale pracy Doktorant omówił przyczyny podjęcia tematu badań oraz cele i zakres pracy.

Drugi rozdział został poświęcony znaczeniu ciągłości materiałów konstrukcyjnych stosowanych w budowie struktur okrętowych i problemom związanym z jej określaniem na podstawie badań doświadczalnych.

Kolejny, trzeci rozdział zawiera podstawowe informacje o mechanice pękania, znanych modelach i parametrach związanych z opisem przebiegu pękania, a także podstawowych wielkościach stosowanych do charakteryzowania odporności na pękanie.

Wybranych procedurom badań odporności na pękanie został poświęcony rozdział czwarty, w którym przeprowadzono przede wszystkim analizę wymagań związanych z doświadczalnym wyznaczaniem parametru CTOD. Doktorant usystematyzował wiedzę dotyczącą oczekiwań co do typu i wymiaru próbek, temperatury badań, oczekiwanych wartości rozwarcia pęknięcia, a także interpretacji wyników badań i sposobów ich prezentacji.

W krótkim piątym rozdziale Autor omówił wpływ wybranych czynników na wyniki badań odporności na pękania, koncentrując się głównie na temperaturze badań oraz wymiarach próbek.

W mojej opinii rozdział piąty mógł bez straty dla przejrzystości pracy zostać włączony do czwartego rozdziału, gdyż w dużej mierze nawiązywał do procedur badania odporności na pękanie.

Istotnym elementem prac realizowanych przez Doktoranta była numeryczna symulacja przebiegu próby trójpunktowego zginania płaskich próbek ze szczeliną w karbie. Z tego względu niezbędne było opracowanie modeli materiałowych uwzględniających wszystkie fazy zachowania materiału w trakcie monotonicznie zmiennego obciążania próbek. Stosowanym w tym celu modelom implementowanym do analiz prowadzonych metodą elementów skończonych został poświęcony rozdział szósty, w którym opisano między inny sposoby modelowania efektów umocnienia i osłabienia materiału.

Nieco zaskakującym jest zamieszczenie w punkcie 6.8 „podsumowania stanu wiedzy” dotyczącego rozdziałów od drugiego do szóstego. Należało takie podsumowanie wyróżnić w odrębnym rozdziale uzupełniając je o wskazania do badań własnych. Alternatywnym rozwiązaniem mogłoby być zamieszczenie treści z rozdziałów 2-6 w jednym rozdziale o nazwie analiza stanu wiedzy i wówczas jego ostatnim podpunktem byłoby właśnie podsumowanie.

W rozdziale siódmym Doktorant omawia program, metody i obiekty badań. Rozdział ten budzi pewne zastrzeżenia, które zostaną szerzej omówione w punkcie 2.2 opinii.

Rozdziały ósmy i dziewiąty poświęcone są omówieniu wyników badań numerycznych. W pierwszym z nich Doktorant omawia sposób opracowania modelu materiałowego kluczowego dla powodzenia prowadzonych analiz. Rozdział dziewiąty to szczegółowe omówienie numerycznej symulacji próby trójpunktowego zginania próbek z karbem i pęknięciem zmęczeniowym (szczeliną) o różnych stosunkach  $a_0/W$ .

W rozdziale dziesiątym Doktorant omawia wyniki badań eksperymentalnych, poczynając od przygotowania stanowiska, wykonania próbek, generowania pęknięć zmęczeniowych, realizacji próby trójpunktowego zginania, a skończywszy na krótkiej analizie wyników badań.

W rozdziale jedenastym odnajdujemy porównanie wyników badań numerycznych i doświadczalnych.

Główną część pracy kończy rozdział dwunasty, w którym Doktorant przedstawił syntetyczne wnioski



z badań oraz wnioski do dalszych prac.

W dwóch załącznikach Doktorant zamieścił wyznaczone numerycznie wykresy zmian rozwarcia szczeliny CMOD w funkcji obciążenia (siły) oraz wyniki badań doświadczalnych CTOD wraz ze zdjęciami przełomów próbek i ich wymiarami.

**Z przedstawionego omówienia wynika, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału wymagania stawiane tego typu pracom.**

W mojej ocenie Doktorant wykazał się odpowiednimi dla realizacji pracy kompetencjami w zakresie planowania i prowadzenia prac eksperymentalnych oraz realizacji analiz numerycznych metodą elementów skończonych, a także w zakresie opracowania i analizy otrzymywanych wyników badań. Metody i narzędzia badawcze użyte przez Doktoranta są odpowiednie dla przyjętych celów i zakresu pracy, a sposoby przedstawienia wyników badań i ich analizy zgodne z przyjętymi standardami w tym zakresie.

Lektura pracy nasuwa ogólne przeświadczenie o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do realizacji zaplanowanego przedsięwzięcia. Ze względu na bardzo ściśle powiązanie z wymaganiami przemysłu stoczniowego wymagało ono, obok wskazanych powyżej kompetencji w zakresie prowadzenia badań doświadczalnych i analiz numerycznych, bardzo dobrej orientacji w problematyce metod konstruowania kadłubów statków, a w tym analizy własności materiałowych stosownych w przemyśle stoczniowym.

Powyższe stwierdzenia nie oznaczają jednak, że nie można mieć pewnych krytycznych, w części dyskusyjnych uwag, do poszczególnych zagadnień prezentowanych przez Doktoranta. Ich omówienie zamieszczono w punkcie „ocena rozprawy”.

## **2. Ocena rozprawy**

### **2.1. Osiągnięcie Doktoranta**

Zasadniczym celem pracy było określenie możliwości wyznaczenia odporności na pęknięcia dla próbek o wymiarach i geometrii zgodnej z wymaganiami stosownych norm i zaleceń, na podstawie badań eksperymentalnych i symulacji numerycznej. Cel ten został osiągnięty poprzez opracowanie metody numerycznego modelowania próbek z zastosowaniem własności materiałowych otrzymanych w badaniach statycznych i kalibracji modelu materiałowego na bazie wyników badań próbek o zmniejszonych wymiarach. Opracowana metoda została pozytywnie zweryfikowana w wyniku porównania otrzymanych wyników symulacji z wynikami badań doświadczalnych.

Dodatkowym osiągnięciem jest analiza wpływu grubości próbek oraz początkowego stosunku  $a_0/W$  na otrzymywaną wartość rozwarcia pęknięcia.

Tak jak stwierdzono wcześniej, powyższe osiągnięcia mieszczą się w zakresie dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn.

### **2.2. Uwagi merytoryczne**

W wyniku analizy treści rozprawy, sformułowano uwagi dotyczące jej merytorycznej strony.

#### **a. Uwagi ogólne**

- W rozdziale „Metodyka prowadzonych badań” Doktorant zaproponował program badań (7.2), którego następnie nie był w stanie zrealizować. Efektem była modyfikacja programu badań opisana w kolejnym punkcie pracy (7.2.1). Nie budziłoby to uwag, gdyby przedstawiona do oceny praca była dziennikiem z prowadzonych prac. Jednak w przypadku redagowania pracy po przeprowadzonych badaniach, trudno zrozumieć dlaczego w pracy zostaje zamieszczony program badań, który następnie jest modyfikowany ze względu na ograniczenia techniczne. Można by zrozumieć, gdyby próbki serii B60 o stosunku  $a_0/W=0.5$  w trakcie badań nie uległy zniszczeniu i w efekcie wyniki badań nie byłyby brane pod uwagę w dalszej części pracy. Jednak w sytuacji, w której nawet nie podjęto próby ich badania, taki opis badań wydaje się trochę dziwny i moim zdaniem należało po prostu zamieścić w pracy ostateczny program badań z uzasadnieniem jego wyboru.
- Podobnie jak w poprzedniej uwadze, można mieć uwagi do stwierdzenia zamieszczonego w pracy,



że „Drugim czynnikiem mającym wpływ na program badań, był błąd firmy wykonującej karby mechaniczne ...). Trudno bez uwag zaakceptować fakt, że nie wykonano lub zmieniono jakąś część zaplanowanych badań z powodu niewłaściwego przygotowania próbek.

- Doktorant w kilku miejscach pracy jako uzasadnienie dla ograniczeń w założeniach przyjętych przed realizacją pracy wskazuje brak dostępu do właściwej infrastruktury badawczej oraz ograniczenia budżetowe. Można to oczywiście zrozumieć, jednak nie jest to chyba właściwe podejście w planowaniu prac naukowych. Jeżeli nie dysponuje się właściwym zapleczem badawczym i źródłami finansowania badań, to po prostu nie planuje się zadań, które są poza możliwościami ich wykonania.
  - Linie pęknięć zmęczeniowych w próbkach nie były linią prostą, co wynika w dużej mierze z odmiennego stanu pól naprężeń i odkształceń w środku i na powierzchni próbki. Tym samym Doktorant do analiz stosował uśrednioną długość pęknięcia obliczaną według zależności 10.2. Analizując dane zamieszczone w Załączniku nr 2 można zauważyć, co nie jest oczywiście niczym zaskakującym, że stosunek  $a_0/W$  dla każdej z próbek ma nieco inną wartość.
- Moim zdaniem, dla uzyskania pełniejszego obrazu skuteczności zastosowanego sposobu symulowania przebiegu wykresu CMOD-siła, analizę numeryczną powinno się przeprowadzić dla rzeczywistych długości, a nawet kształtów linii pęknięć/szczelin w poszczególnych próbkach. Dotyczy to zarówno kalibracji modelu materiałowego, jak i weryfikacji numerycznego wyznaczania wykresu CMOD-siła. Zgromadzony materiał badawczy pozwala na realizację tego typu analizy w przyszłości.
- Istotną częścią pracy jest numeryczne modelowanie próbek ze szczeliną. Doktorant sporo uwagi poświęcił modelowaniu własności materiału, jednak brakuje w pracy odniesienia do stanu wiedzy w zakresie modelowania w metodzie elementów skończonych elementów z pęknięciem/szczeliną.

#### **b. Uwagi szczegółowe**

Analiza treści pracy skłania także do sformułowania bardziej szczegółowych uwag.

- Rysunek 2.6: należałoby wyjaśnić znaczenie słowa „zład”, które jest branżowym określeniem w przemyśle okrętowym.
- Strona 21<sup>4</sup>: brakuje wyjaśnienia jak jest przykładane obciążenie udarowe.
- Strona 27<sup>2</sup>:  $G$  (prędkość uwalniania energii, pochodna energii potencjalnej) nie jest siłą.
- Strona 42, ostatni akapit: karb pokazany na rysunku 4.7 pozwala na uzyskanie prostej linii pęknięcia zmęczeniowego i ułatwia ocenę początkowej długości pęknięcia (szczeliny).
- Strona 73, rysunek 7.3: jak można wytłumaczyć zaburzenia w przebiegu wykresu CMOD-siła otrzymanego w wyniku symulacji metodą elementów skończonych.
- Strona 77, rozdział 8.2.: nie podano, jaki model plastyczności zastosowano w analizie numerycznej. Hubera-Misesa-Hencky’ego ?
- Strony 90 i 91: z czego wynika różnica w siatce podziału pokazanej na rysunkach 94 i 95 ? Czy strefa próbki objęta modelem M3 zawierała pęknięcie zmęczeniowe, czy tylko obszar przed pęknięciem ?
- Strona 108<sup>1</sup>: stwierdzenie, że wprowadzenie pęknięcia zmęczeniowego „... ma na celu wyrugowanie wpływu karbu mechanicznego na wynik próby.” nie do końca odpowiada jego faktycznej roli. Karb mechaniczny nie jest bowiem szczeliną, która generuje pola mechaniczne odpowiedzialne za pękanie. Zadaniem karbu jest spowodowanie, aby pęknięcie powstało w określonym miejscu i dało w efekcie możliwość wywołania warunków badań wymaganych dla prawidłowej interpretacji wyników badania.
- Strona 114<sup>5</sup>: w jaki sposób do wzorcowania pomiaru optycznego użyto skali wzorcowanej suwmiarki analogowej ? Czy obiektyw w układzie pomiarowym był obiektywem telecentrycznym ?

#### **2.3. Uwagi językowe i redakcyjne**

Pomimo starannej redakcji tekstu rozprawy, Doktorant nie ustrzegł się usterek językowych, stylistycznych i redakcyjnych, w tym m.in.:



- Rysunek 2.1: podpis pod rysunkiem jest niezrozumiały.
- Strona 15<sub>13</sub>: „wymyślona” nie jest chyba najlepszym określeniem.
- Strona 20<sup>9</sup>: powinno być „następnym” zamiast „następny”.
- Strona 24<sup>1</sup>: styl zdania.
- Strona 26: niepełny opis w podpisie pod rysunkiem 3.3.
- Strona 27<sup>2</sup>: styl zdania.
- Strona 36<sup>12</sup>: styl zdania.
- Strona 36<sub>9-10</sub>: styl zdania.
- Strona 46: niepełny podpis pod rysunkiem 4.10.
- Strona 51, tytuł rozdziału: badania raczej nie są „oparte o” mechanikę pęknięcia.
- Strona 63<sup>2</sup>: powinno być „jednym” zamiast „jeden”.
- Strona 75, tablica 8.1: powinno być „Minimalna” zamiast „Minimalne” (kolumny 2, 3 i 4).
- Strona 81, rysunek 8.6: nieprecyzyjne oznaczenie przebiegów CMOD-siła na wykresie. Trzeba domyślić się, że B30-1  $a_0/W = 0.5$  i B30-2  $a_0/W = 0.5$  to przebiegi „rzeczywiste” (zgodnie z opisem w tekście pracy).
- Strona 86, pusta strona z jednym zdaniem ? Brakuje chyba „W” na początku zdania.
- Strona 89, pusta strona z „Tab. 9.3”.
- Strony 95 i 96: nieczytelne (niejasne) rysunki nr 9.8 i 9.9.
- Strona 97<sup>1</sup>: powinno być „względnej” zamiast „względną”.
- Strona 98<sup>8</sup>: styl zdania, powtórzenie „obecnie”.
- Strona 106: pusta strona z jednym zdaniem.
- Strona 113, podpis pod rysunkiem: „Od” powinno zaczynać się od małej litery.
- Strona 118<sub>4-5</sub>: usterka redakcyjna edytora tekstu.
- Strona 122<sup>1</sup>: powinno być „wykresów” zamiast „wykresaów”.
- Strona 122<sub>5</sub>: powinno być „weryfikacji” zamiast „weryfikacji”.
- Strona 123<sup>1</sup>: powinno być „podlegały” zamiast „polegały” i „laboratoryjne” zamiast „laboratoryje”.
- Strona 132: błąd w tytule artykułu – powinno być „plastycznych” zamiast „pplacyjnych”.

Ponadto:

- Należy unikać zapisu jednostek w nawiasach kwadratowych.
- Odwołania do rysunków i tabel w tekście powinny być pisane małą literą.

Autor nie ustrzegł się także drobnych powtórzeń (np. strona 25 i strony 31<sup>3</sup>, 32<sup>2</sup>), które jednak nie wpływają na ogólnie pozytywny obraz redakcyjnej strony pracy.

Tak jak wspomniano powyżej, przedstawione uwagi krytyczne mają w części charakter dyskusyjny i mogą być przedmiotem dyskusji w trakcie publicznej obrony. Usterki wymienione w punkcie „Uwagi szczegółowe” mogą być wykorzystane przez Doktoranta w przyszłych publikacjach.

### 3. Wniosek końcowy

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że podjęte w niej zamierzenie naukowo-badawcze zostało przez Doktoranta osiągnięte. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcie praktyczne i poznawcze, a Doktorant wykazał się stosownymi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych i doświadczalnych.

Można zatem stwierdzić, że rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Kowalskiego spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.