



**POLITECHNIKA RZESZOWSKA**  
**im. Ignacego Łukasiewicza**  
**Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska**  
**i Architektury**  
**Katedra Konstrukcji Budowlanych**



Rzeszów, 9 maja 2022 r

**Recenzent:**

dr hab. inż. Lidia Buda-Ożóg, prof. uczelni  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Konstrukcji Budowlanych  
ul. Poznańska 2  
35-084 Rzeszów  
tel. +48 17 743 24 02,  
e-mail: lida@prz.edu.pl

**Adresat recenzji:**

Rada Naukowa Wydziału Inżynierii Lądowej  
Politechnika Krakowska  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

*mgr inż. Tomasza Howiackiego*

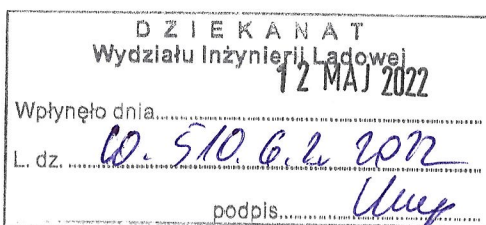
pt.: Analysis of cracks in concrete structures with the use of distributed  
optical fibre measurements

Analiza zarysowań w konstrukcjach betonowych przy zastosowaniu  
światłowodowych pomiarów rozłożonych

**1. Podstawa formalna**

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowią:

- a) Uchwała Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej  
z dnia 16 marca 2022 r.,



- b) Pismo Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 22 marca 2022 r., podpisane przez Dziekana Wydziału prof. dr hab. inż. Andrzeja Szaratę.

## **2. Podstawa prawna**

- a) Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595, z po2. zm.),
- b) Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669),
- c) Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r (Dz.U. z 30.01.2018 r. poz.261).

## **3. Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Howiackiego, pt. Analysis of cracks in concrete structures with the use of distributed optical fibre measurements, (Analiza zarysowań w konstrukcjach betonowych przy zastosowaniu światłowodowych pomiarów rozłożonych). Praca została napisana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Marka Słońskiego, przy współudziale promotora pomocniczego dr inż. Rafała Sieńko. Liczy 448 stron i została napisana w języku angielskim. Składa się z 13 stronicowego streszczenia w języku polskim, 8 zasadniczych rozdziałów oraz bibliografii zawierającej imponujący wykaz cytowanych 246 pozycji monografii, artykułów i innych publikacji, 12 pozycji norm oraz 57 pozycji obejmujących materiały firmowe, strony internetowe, karty katalogowe. Praca zawiera aż 424 rysunki i fotografie oraz 87 tablice.

## **4. Treść rozprawy**

### **4.1. Przedmiot, cel i tezy pracy**

Przedmiotem pracy jest porównanie wskazań czujników monolitycznych i kabli warstwowych wykorzystywanych do światłowodowych pomiarów rozproszonych elementów betonowych. Porównanie to ma na celu ocenę oraz wskazanie optymalnych czujników światłowodowych przydatnych do analizy ilościowej i jakościowej zarysowań w konstrukcjach z betonu. Sformułowano dwie tezy pracy:

- pierwsza - istnieje możliwość zapewnienia odpowiedniej przyczepności pomiędzy betonem a światłowodowym włóknem pomiarowym, pozwalającej na jednoznaczną identyfikację powstających zarysowań.
- druga - możliwe jest obliczanie szerokości rys z dokładnością nie gorszą niż 0.05 mm na podstawie zarejestrowanego profilu odkształceń.

Postawione tezy są prawidłowe, a ich naukowe potwierdzenie i uzasadnienie poszerza aktualny stan wiedzy.

#### **4.2. Charakterystyka i ocena poszczególnych rozdziałów**

Układ rozprawy stanowi 8 zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem w języku polskim oraz krótką charakterystyką, a następnie zakończonych podziękowaniami i wykazem literatury.

W rozdziale pierwszym będącym wprowadzeniem do problemu, autor wyjaśnił idee monitorowania konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji z betonu. Zwrócił uwagę na fakt, że światłowodowa technika pomiarów rozłożonych DFOS, jest stosunkowo młodym podejściem stanowiącym przełom w monitorowaniu stanu konstrukcji i pełne wykorzystanie zalet tej technologii możliwe jest po spełnieniu wielu wymagań dotyczących parametrów, budowy, metod instalacji, które wciąż nie są dostatecznie zbadane i opisane w literaturze. W rozdziale pierwszym wyodrębniono 5 podrozdziałów dotyczących: roli badań eksperymentalnych, zagadnieniu monitorowania konstrukcji, idei pomiarów z wykorzystaniem światłowodowych czujników rozłożonych, ocenie prawdopodobieństwa awarii konstrukcji oraz motywacji autora do zgłębienia niniejszego problemu.

Rozdział drugi pracy stanowi przegląd stanu wiedzy związanego z podejmowanym tematem. Rozdział podzielony jest na 9 podrozdziałów zawierających: przegląd literatury, opis technik i parametrów pomiarowych, szczegółowego opisu stosowanych włókien światłowodów, wielowarstwowych kabli sensorycznych oraz monolitycznych czujników do pomiaru odkształceń. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono podstawowe metody ich instalacji, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji z betonu. Przedstawiono podstawy teoretyczne związane z mechanizmem przenoszenia odkształceń z betonu na elementy pomiarowe, omówiono podstawowe modele matematyczne stosowane do opisu tego zjawiska oraz istotę kompensacji

termicznej. Na koniec, na podstawie przeglądu literatury zaprezentowano przykłady zastosowania techniki DFOS do detekcji rys w elementach z betonu.

W rozdziale trzecim pracy sformułowano tezy i przedstawiono program badań. Rozdział 4 zawiera opis badań wstępnych prowadzonych między innymi przez autora dysertacji w latach 2016-2017. Badania przeprowadzono na walcowej betonowej próbce ściskanej oraz żelbetowym pręcie rozciągany. Obserwacje z przeprowadzonych badań wykorzystano podczas oceny skuteczności zastosowania włókna światłowodowego w ściślej powłoce zewnętrznej do pomiarów powierzchniowych elementów ściskanych oraz do pomiarów wewnątrz rozciąganego pręta żelbetowego. Wnioski z przeprowadzonych badań wykorzystano do zaplanowania badań docelowych.

Rozdziały 5 do 7 to główna i najważniejsza część pracy. Każdy z rozdziałów zakończony jest podsumowaniem przeprowadzonych badań i zawiera cenne wskazówki oraz spostrzeżenia autora.

Rozdział 5 obejmuje badania drobnowymiarowych, betonowych próbek walcowych z powierzchniowymi włóknami światłowodowymi. Badania przeprowadzono na 20 próbkach o zróżnicowanym wymiarze kruszywa grubego, odpowiedni 8 i 16 mm. Zaproponowano również dwa sposoby instalacji włókien tj. z uprzednio przygotowaną powierzchnią elementu (wypełnienie porów żywicą) oraz bez tego przygotowania. Parametrem, na podstawie którego dokonywano oceny badanych elementów, był sformułowany przez autora pracy współczynnik zmienności odkształceń w strefie ściskanej i rozciąganej. Na podstawie analizy uzyskanych wyników, stwierdzono, że wielkość kruszywa oraz metoda montażu włókna na powierzchni betonu nie mają istotnego znaczenia dla oceny zmienności odkształceń, natomiast jednoczesny pomiar odkształceń próbki na kierunku pionowym i poziomym umożliwia wyznaczenie współczynnika Poissona, którego gwałtowna zmiana może sygnalizować stan zagrożenia elementu betonowego. Analizie poddany został ponadto wpływ rozdzielczości przestrzennej na jakość wyników, którą przyjmowano odpowiednio: 5, 10, 15, 20 i 50 mm. Na tej podstawie do dalszych badań zarekomendowano jako optymalną, rozdzielczości 10 mm, co odpowiada 100 punktom pomiarowym na jeden metr włókna.

Rozdział 6 stanowi kontynuację pomiarów z wykorzystaniem powierzchniowych włókien w powłoce akrylowej, a przedmiotem badań były trzy pełnowymiarowe, płyty strunobetonowe. Włókna światłowodowe przyklejono do górnej i dolnej powierzchni

badanych elementów, ponadto wewnątrz płyt zastosowano włókna światłowodowe na wysokości dolnych i górnych cięgien sprężających. Dzięki instalacji czujników wewnątrz betonu, możliwy był pomiar odkształceń termiczno-skurczowych, a także kontrolowanie procesu sprężania. W prowadzonych badaniach wykorzystano prototypowe wersje czujnika EpsilonRebar, w których włókno integrowane było z kompozytowym rdzeniem na badanym elemencie, a nie na etapie jego produkcji jak to ma miejsce w docelowej wersji tego czujnika. Najważniejszym elementem badań opisanych w rozdziale 6, była ocena zarysowania elementów na podstawie pomiarów światłowodowych włókien powierzchniowych i zlokalizowanych wewnątrz płyty, powstałego w efekcie ich czteropunktowego zginania. Oszacowane szerokości rys na podstawie powierzchniowych czujników światłowodowych były zgodne z pomiarami referencyjnymi wykonanymi na bocznej powierzchni elementu. Natomiast wartości odkształceń otrzymane z czujników tensometrycznych punktowych i włókien światłowodowych wykazały znaczne nawet kilkuprocentowe rozbieżności. Jak wykazały przeprowadzone badania czujniki punktowe w strefie rozciąganej działały poprawnie tylko w zakresie liniowo-sprężystym. Interesującym spostrzeżeniem autora jest zaobserwowany zarówno dla czujników powierzchniowych jak i wbudowanych lokalny wzrost wartości odkształcenia w strefie rozciąganej podczas końcowych etapów obciążenia. Obserwacja ta była zgodna z lokalizacją najsłabszego przekroju poprzecznego zidentyfikowanego w strefie ściskania, który zdecydował o zniszczeniu elementu. W trakcie prowadzonych badań, zauważono, że podczas znacznych deformacji płyty wystąpiły lokalne odspojenia włókna i/lub żywicy od powierzchni betonu, a pomimo to analiza jakościowa i ilościowa pęknięć była nadal możliwa.

Rozdział 7 jest najważniejszym punktem pracy z uwagi na ewentualną realizację rzeczywistych długoterminowych systemów monitorowania konstrukcji betonowych. W rozdziale tym porównane zostały cztery popularne narzędzia pomiarowe DFOS przeznaczone do montażu bezpośrednio w betonie, są to dwa czujniki monolityczne EpsilonSensor i EpsilonRebar oraz dwa kable warstwowe Brugg V1 i V9. Badania obejmowały sześć belek żelbetowych o rozpiętości 4 m oraz zróżnicowanym zbrojeniu podłużnym i poprzecznym. Zbrojenie rozciąganej strefy przęsłowej w trzech belkach stanowiły pręty o średnicy 10 mm, natomiast w trzech kolejnych pręty o średnicy 20 mm. Zróżnicowanie zbrojenia podłużnego skutkowało innym obrazem zarysowania badanych elementów. Badania obejmowały pomiar odkształceń wczesnych związanych ze zjawiskami termiczno-skurczowymi oraz pomiary zasadnicze,

odkształceń powstających w procesie obciążania analizowanych belek. Do oceny i identyfikacji powstających rys na podstawie zmiany pomierzonych odkształceń autor pracy zaproponował i zdefiniował parametr tzw. współczynnik kształtu rysy CSC, wyrażony poprzez zmienność odkształceń na długości efektywnej. Pomiar odkształceń w strefie ściskanej badanych belek był zbieżny dla wszystkich zastosowanych narzędzi pomiarowych, natomiast istotne rozbieżności zaobserwowano w pomierzonych odkształceniach strefy rozciąganej. Ostatecznie przeprowadzone badania wskazały że najlepszym rozwiązaniem do pomiarów i analizy zarysowań były monolityczne czujniki o obniżonej sztywności EpsilonSensor. Poprawną identyfikację rys uzyskano również z czujników o wysokiej sztywności EpsilonRebar dlatego w konkluzji niniejszego rozdziału te dwa rozwiązania zostały zarekomendowane przez autora pracy do monitorowania rzeczywistych, wielkogabarytowych konstrukcji inżynierskich, dla których obecność sztywnego czujnika jest bez znaczenia.

Rozdział 8 jest podsumowaniem wniosków wynikających z przeglądu literatury oraz przeprowadzonych prac badawczych. Bardzo wartościowym fragmentem są tutaj wnioski o charakterze praktycznym, tj. związanym z wyborem konkretnych narzędzi pomiarowych czy też sposobów ich instalacji w zależności o rodzaju konstrukcji (istniejąca, wykonywana) oraz charakteru pomiarów (laboratoryjne, rzeczywiste).

## **5. Merytoryczna ocena rozprawy**

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr inż. Tomasza Howiackiego stwierdzam, że przyjęty układ i sposób prezentacji treści jest logiczny i typowy, charakteryzujący prace badawcze. Dobór pozycji literaturowych jest właściwy i w pełni wystarczający zarówno w zakresie teoretycznym jak i doświadczalnym. Wszystkie pozycje zawarte w spisie zostały zacytowane w treści rozprawy, nie stwierdzono błędów w numeracji tabel i rysunków. Strona graficzna rozprawy jest bardzo dobra, czytelna oraz obszernie ilustrowana, co moim zdaniem podnosi jej walory poznawcze i estetyczne.

Na fakt jednoznacznie pozytywnej oceny przedmiotowej dysertacji wpływają także następujące argumenty:

- bardzo dobre rozpoznanie przez Doktoranta technik pomiarowych i narzędzi wykorzystywanych w procesie monitorowania konstrukcji z wykorzystaniem technologii rozproszonych czujników światłowodowych

(DFOS) oraz świadomość problemów mogących wystąpić podczas monitorowania zarysowanych konstrukcji betonowych,

- umiejętność zebrania, przeanalizowania i syntetycznego zestawienia stosunkowo młodej ale obszernej literatury naukowej w wybranej tematyce,
- czytelne i logiczne opracowanie programu badawczego na zróżnicowanych elementach, z wykorzystaniem różnych technik pomiarowych i różnej lokalizacji czujników pomiarowych, umożliwiające statystyczną analizę wyników i sformułowanie wniosków oraz zaleceń praktycznych,
- wykorzystanie zalet czujników światłowodowych do monitorowania stanu konstrukcji jest obecnie bardzo popularnym zagadnieniem podejmowanym przez wiele instytucji naukowych i działów badawczo-rozwojowych na całym świecie, a temat dysertacji i prezentowane badania wpisują się w ten trend,
- opisane w pracy badania w których porównywano kable warstwowe i czujniki monolityczne wewnątrz tych samych elementów konstrukcyjnych są jednymi z pierwszych tego typu,
- wykazanie przez Doktoranta skuteczności zastosowania rozproszonych czujników światłowodowych do monitorowania odkształceń termiczno-skurczowych charakterystycznych dla wczesnego wieku betonu,
- zaproponowanie parametru w postaci współczynnika kształtu rysy, umożliwiającego jakościową ocenę zarysowania na podstawie pomierzonych odkształceń, niezależnie od rodzaju elementu z betonu i morfologii rysy,
- poszerzenie bazy wiedzy w zakresie: możliwości pomiarowych z wykorzystaniem czujników światłowodowych, ich zalet ale także ewentualnych wad i ograniczeń,
- podanie szeregu argumentów potwierdzających postawione w dysertacji tezy pracy.

Podczas studiowania pracy nasunęły się pewne wątpliwości, niejasności lub błędy, które nie obniżają wartości merytorycznej pracy i jednoznacznie pozytywnej oceny. Zostały one podane w charakterze dyskusji z nadzieją, że mogą być przydatne

w trakcie opracowywania publikacji naukowych dotyczących konstrukcji z betonu oraz analizy probabilistycznej. Uwagi podzieliłam na grupy:

- ogólne uwagi dotyczące interpretacji wyników:

W każdym z badanych przypadków Doktorant na podstawie analizy statystycznej wyników tylko jednej próbki formułuje wnioski. W mojej opinii takie podejście nie jest poprawne, ocena niepewności pomiarów bezpośrednich powinna opierać się na statystycznej analizie zbioru wyników pomiaru powtarzalnego. W każdym z badanych przypadków ten zbiór zawierał co najmniej 3 elementy, a w badaniach walcowych próbek ściskanych 10 elementów. Nie jest możliwe aby wszystkie badane próbki w serii miały identyczną nośność i identyczne współczynniki zmienności odkształceń. Proszę o ustosunkowanie się do tego zagadnienia.

Podsumowując wynik badań walcowych próbek ściskanych, autor pracy użył stwierdzenia „the concrete worked in theoretically elastic range”, jest to nieprawda. Beton nie jest materiałem idealnie sprężystym, zależność naprężenia – odkształcenia nie przebiega liniowo i już przy niewielkich naprężeniach obserwuje się w betonie odkształcenia nieodwracalne.

W dysertacji występuje współczynnik zmienności ze znakiem minus, przykładowo tabela 28, 29. Jest to błędny zapis, ponieważ współczynnik zmienności to względna miara rozproszenia zmiennej losowej w stosunku do wartości średniej i zawsze przyjmuje wartości dodatnie. To wynika nawet z zależności  $v_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}$ , gdzie zarówno odchylenie standardowe jak i wartość średnia są dodatnie. Sądzę, że używanie podczas analizy wyników sformułowania „strain distribution”, nie jest najtrafniejsze. Przez „distribution” zwykle rozumie się rozkład zmiennej losowej wraz z charakterystycznymi dla niego estymatorami. Proszę o wyjaśnienie tej wątpliwości.

- szczegółowe uwagi dotyczące interpretacji wyników:

Analizując tabelę 33 i 34 można odnieść wrażenie, że praktycznie wszystkie badane próbki cylindryczne uległy zniszczeniu po osiągnięciu naprężeń ściskających 32 MPa, ta zgodność wyników w mojej opinii jest niepokojąca w przypadku betonu.

Na stronie 252 podsumowując pomierzone wartości odkształceń za pomocą czujników referencyjnych i światłowodowych, autor zwrócił uwagę na rozbieżność tych wyników wynikającą z heterogeniczności betonu. Analizując przedstawione wykresy



mam wrażenie, że większe znaczenie miał tutaj nierównomierny nacisk tłoka prasy hydraulicznej podczas ściskania niż różnorodność materiału – o czym autor nie wspomina.

Brak informacji o rzeczywistej wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie, zastosowanego w badaniach płyt sprężanych. Beton projektowany to C50/60, a jaki był w rzeczywistości? Warto byłoby porównać wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 276 (krzywa - brak zarysowania) z obliczeniami analitycznymi uwzględniającymi wytrzymałość betonu na podstawie badań.

W pracy nie wyjaśniono dokładnie w jaki sposób wyznaczono wartość „teoretycznego współczynnika zmienności” wynoszącą 56%, przedstawioną na wykresie 277 i uwzględnioną tabeli 38.

Przedstawione w tabelach 77 i 78 uśrednianie szerokości rys w zależności od zmiany długości efektywnej nie ma sensu praktycznego. Sądzę, że analiza powinna być przeprowadzona tylko w zakresie wybranego narzędzia pomiarowego. Uśrednianie szerokości rys z czterech analizowanych narzędzi pomiarowych o wartościach granicznych szerokości rys od 0,218 mm do 0,382 mm – raczej nic nie wnosi do pracy. Proszę o komentarz do tej wątpliwości.

W przypadku belek zginanych podczas ich obciążania obserwuje się po przejściu z fazy pracy 2a do 2b zjawisko zamykania niektórych mniejszych rys i wyraźną dominację rys pozostałych. Czy w prowadzonych badaniach to miało miejsce?

Na stronie 306, wyliczając zakres planowanych analiz Doktorant wskazał na: „a statistically significant number of cracks”, na czym polega ta analiza, proszę o wyjaśnienie.

- uwagi dotyczące układu pracy:

Rozdział 1.4 „Probabilistic background” jest w mojej opinii w pracy zbędny. Doktorant nie przeprowadza analiz probabilistycznych, a przedstawione w niniejszym rozdziale informacje są bardzo lakoniczne, a czasami nawet błędne. Generalnie rozdział jest dość chaotyczny, jest trochę informacji o analizie ryzyka, pojawia się twierdzenie Bayesa a następnie kilka wyrwanych informacji o wskaźniku niezawodność i metodach jej zapewnienia. Mam wrażenie błędnych oznaczeń na rysunku 013, owszem wiedza pochodząca z pomiarów elementów konstrukcji w warunkach rzeczywistych może zmniejszyć niepewność modelu nośności w porównaniu z modelem pierwotnym opartym tylko na założeniach projektowych, nie

wpływa natomiast na model efektów oddziaływań, natomiast na zamieszczonym w pracy rysunku jest odwrotnie.

- inne uwagi:

W pracy obok naukowych sformułowań, zastosowano zwroty potoczne np. „widoczne na wykresach gołym okiem”, z „punktu widzenia matematyki” czy pleonazmy np. „zupełnie nowej wiedzy”.

Str. 21 „przeanalizowanie pracy czujników w różnych warunkach zarysowania”, autorowi chodziło zapewne o analizę pracy czujników podczas różnego obrazu zarysowania.

Str. 14 „Przewagę pomiarów geometrycznie ciągłych nad metodami konwencjonalnymi przedstawiono i wyjaśniono na gruncie probabilistycznym”, nie rozumiem tego zdania. Analizy probabilistyczne polegają na uwzględnieniu niepewności parametrów losowych poprzez przyjęcie typu rozkładu, rozproszenie itp, a w dysertacji nie odnalazłam takich analiz.

W tabeli 14 strona 144, brak wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności dla modułu sprężystości betonu oraz współczynnika Poissona. W literaturze można odnaleźć te wartości, przykładowo współczynnik zmienności dla modułu sprężystości wynosi od 7-26% (tabela 6.1 – Budownictwo Ogólne tom 3 – Podstawy projektowania).

Str.338 „hydration of concrete” powinna być raczej hydratacja cementu.

## **6. Podsumowanie recenzji**

W opiniowanej rozprawie doktorskiej podjęto problem w pełni aktualny, mający znaczenie poznawcze i praktyczne. Praca rozwiązuje postawione zagadnienie naukowe i stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy z zakresu monitorowania stanu konstrukcji. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy naukowej i technicznej w zakresie prezentowanej tematyki oraz odpowiednimi umiejętnościami planowania, prowadzenia trudnych technicznie i czasochłonnych badań elementów wykonanych z betonu. Świadczy to o dojrzałości naukowej Doktoranta oraz dużym doświadczeniu pomiarowym. Dysertacja napisana została poprawnym językiem, a jej mocne strony zdecydowanie przeważają nad słabszymi. Uwzględniając powyższe argumenty stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż.

Tomasza Howiackiego „Analiza zarysowań w konstrukcjach betonowych przy zastosowaniu światłowodowych pomiarów rozłożonych” spełnia wymogi stawiane w Ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. poz. 1669) i z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595, z pol. zm.) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 1-9 stycznia 2018 r (Dz.U. z 30.01.2018 r. poz. 261). i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

z poważaniem  
  
dr hab. inż. Lidia Buda-Ozóg, prof. uczelni