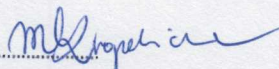


# Wpłynęło

data 11.06.2019 podpis 

dr hab. inż. Magdalena Rucka, prof. nadzw. PG  
Katedra Wytrzymałości Materiałów  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
e-mail: mrucka@pg.edu.pl  
tel.: 58 347 24 97

Gdańsk, 10.06.2019

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Karoliny Tatara**  
**pt. „Identyfikacja kruchych uszkodzeń w konstrukcjach betonowych z wykorzystaniem**  
**transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej i algorytmu Dijkstry”**

## 1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Prodziekana ds. nauki Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej, dr. hab. inż. Damiana Bębna, prof. PO z dnia 10 kwietnia 2019 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Karoliny Tatara pt. „*Identyfikacja kruchych uszkodzeń w konstrukcjach betonowych z wykorzystaniem transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej i algorytmu Dijkstry*”, wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. Zbigniewa Perkowskiego, prof. PO.

## 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki diagnostyki uszkodzeń w konstrukcjach betonowych z użyciem metody ultradźwiękowej oraz algorytmów tomografii transmisyjnej. Praca jest napisana w języku polskim, liczy 156 numerowanych stron formatu A4 i składa się z 7 rozdziałów: (1) *Wprowadzenie*, (2) *Odkształcalność betonu podlegającego uszkodzeniom struktury*, (3) *Fale mechaniczne*, (4) *Metody ultradźwiękowe stosowane w diagnostyce konstrukcji betonowych*, (5) *Teoria grafów i możliwość jej zastosowania w metodach ultradźwiękowych*, (6) *Obrazowanie kruchych uszkodzeń w elementach betonowych za pomocą UTT i algorytmu Dijkstry – przykłady obliczeniowe i badania eksperymentalne*, (7) *Podsumowanie*, poprzedzonych podziękowaniami, spisem treści i streszczeniem w języku angielskim. Na końcu rozprawy znajduje się spis literatury obejmujący 117 pozycji, spis ilustracji oraz spis tabel.

## 3. Treść rozprawy

W Rozdziale 1 (*Wprowadzenie*) Autorka dokonuje ogólnego przeglądu literatury dotyczącej metod nieniszczącej diagnostyki konstrukcji inżynierskich. W dalszej jego części skupia się na szczegółowym omówieniu kilku artykułów opisujących badania elementów betonowych z użyciem technik bazujących na propagacji fal ultradźwiękowych. Na tym tle Autorka określa cel i zakres pracy.

Rozdział 2 (*Odkształcalność betonu podlegającego uszkodzeniom struktury*) opisuje podstawowe typy uszkodzeń występujących w betonie, a także skalarnie i tensorowe miary

uszkodzeń struktury materiału w zakresie mikro w ujęciu kontynualnej mechaniki uszkodzeń. W rozdziale omówiono także prawa materiałowe opisujące proces odkształcania betonu.

Rozdział 3 (*Fale mechaniczne*) poświęcono podstawowym informacjom na temat zjawiska propagacji fal mechanicznych. W rozdziale tym scharakteryzowano typy fal mogących propagować w ciałach stałych, opisano pojęcie impedancji akustycznej, a także przeanalizowano czynniki wpływające na prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w betonie. Rozdział kończy się dwoma własnymi przykładami numerycznymi propagacji fal mechanicznych w ośrodku izotropowym i lepkosprężystym z wykorzystaniem metody różnic skończonych.

W Rozdziale 4 (*Metody ultradźwiękowe stosowane w diagnostyce konstrukcji betonowych*) zestawiono metody nieniszczące stosowane do diagnostyki betonu, a następnie szczegółowo omówiono metody bazujące na propagacji fal ultradźwiękowych. W dalszej części zaprezentowano informacje na temat obrazowania tomograficznego oraz algorytmów rozwiązywania układów równań źle uwarunkowanych do wyznaczania rozkładów prędkości propagacji fali mechanicznej w testowanym elemencie.

Rozdział 5 (*Teoria grafów i możliwość jej zastosowania w metodach ultradźwiękowych*) zawiera podstawowe informacje z zakresu teorii grafów oraz opis jednego z algorytmów poszukiwania najkrótszej ścieżki grafu, tj. algorytm Dijkstry, skupiając się na jego zastosowaniu do wyznaczania najszybszych ścieżek propagacji fal podłużnych w połączeniu z zasadą Fermata i prawem Snelliusa. Rozdział kończy się własnym przykładem obliczeniowym pokazującym możliwości szacowania czasów propagacji fal podłużnych pomiędzy dwoma punktami ośrodka z użyciem algorytmu Dijkstry.

Rozdział 6 (*Obrazowanie kruchych uszkodzeń w elementach betonowych za pomocą UTT i algorytmu Dijkstry – przykłady obliczeniowe i badania eksperymentalne*) stanowi zasadniczą część pracy. W rozdziale tym przedstawiono przykłady doświadczeń i obliczeniowe obrazowania rozkładu prędkości fal ultradźwiękowych. W przykładzie obliczeniowym analizowano element betonowy w płaskim stanie odkształcenia, z wprowadzonymi trzema obszarami degradacji materiału. Czasy przejścia fali podłużnej wyznaczono przy użyciu algorytmu Dijkstry, a następnie układ równań rozwiązano za pomocą metody Kaczmarza oraz metody najmniejszych kwadratów z regularyzacją Tichonowa. Przykłady doświadczeń obejmowały: testowy przykład wykonany na płycie z plexiglasu oraz przykłady właściwe – wykonane na belkach żelbetowych poddanych zginaniu 3-punktowemu, prefabrykowanej belce żelbetowej oraz płycie żelbetowej zespolonej z kratownicą stalową poddanej obciążeniu zmieniającemu się statycznie.

Rozdział 7 (*Zakończenie*) zawiera podsumowanie pracy oraz szczegółowe wnioski końcowe z przeprowadzonych analiz i badań doświadczalnych.

#### **4. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne**

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia oceny i monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich, szczególnie ważnego w kontekście utrzymania i diagnostyki obiektów budowlanych. Wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń konstrukcji betonowych i ich składowych elementów za pomocą metod nieniszczących są tematem intensywnych badań naukowych od kilkadziesiąt lat. Pomimo to tematyka detekcji uszkodzeń jest wciąż aktualna i rozwijana na całym świecie. Pojawiają się nowe metody oraz nowe zastosowania dla już istniejących metod. Rozwijane metody są testowane nie tylko na

sztucznie wprowadzanych defektach, ale również na uszkodzeniach powstałych podczas procesów degradacji mechanicznej konstrukcji. Na szczególną uwagę zasługują techniki umożliwiające obrazowanie uszkodzeń na powierzchni lub wewnątrz badanego elementu. Do takich metod należy tomografia ultradźwiękowa, będąca tematem niniejszej pracy.

Rozprawa stanowi studium możliwości wykorzystania tomografii ultradźwiękowej do obrazowania kruchych uszkodzeń elementów konstrukcji betonowych. Praca zawiera obszerne zestawienie dostępnych w literaturze informacji dotyczących uszkodzeń betonu, fal mechanicznych, a także metod nieniszczących, w tym ultradźwiękowych, dedykowanych do diagnostyki konstrukcji betonowych. Zasadnicza część pracy obejmuje autorskie przykłady obrazowania struktury betonu podlegającego kruchym uszkodzeniom. Podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna z praktycznego punktu widzenia, a szeroki zakres pracy łączy badania doświadczalne i analizy numeryczne. Za najważniejsze oryginalne elementy rozprawy można uznać:

- zastosowanie w transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej algorytmu Dijkstry w celu określenia rzeczywistych, nieprostoliniowych ścieżek propagacji fal ultradźwiękowych;
- zastosowanie skalarnego parametru uszkodzenia do szacowania stopnia uszkodzenia w postaci mikrozarysowań betonu;
- wykazanie przydatności użycia tzw. fikcyjnych punktów pomiarowych, skutkujących zwiększeniem rozdzielczości obrazów tomograficznych.

Uwagi ogólne, wybrane uwagi szczegółowe oraz pytania są przedstawione w poniższych punktach.

#### **Uwagi i pytania do treści rozprawy**

- 1) Na str. 23 Autorka podała, że w pracy „ograniczono się do pomiarów prędkości fal podłużnych, jako rozchodzących się najszybciej i nie ulegających dyspersji”. Należałoby tu uwzględnić jednak fakt, iż fala podłużna nie ulega dyspersji w ośrodku sprężystym nieograniczonym. Tymczasem w pracy analizowane są elementy przestrzennie ograniczone (np. płyty), w których propagują fale prowadzone (długość fal ultradźwiękowych wzbudzanych w przykładach opisywanych w rozprawie wynosi kilka centymetrów), wykazujące właściwości dyspersyjne.
- 2) Str. 43 – we wzorze na parametr uszkodzenia  $\omega$  (np. wzór nr 26) pojawia się gęstość materiału z uszkodzeniami struktury. W jaki sposób można by pomierzyć tę wartość w przypadku badań rzeczywistej konstrukcji?
- 3) Tabela 3.1 – wartości propagacji fali podłużnej i poprzecznej dla szkła akrylowego podano jako takie same.
- 4) W Rozdziale 3.3 brakuje równań Rayleigha-Lamba opisujących zależności dyspersyjne dla płyt, a także analizy wykresów krzywych dyspersji. Jest to o tyle istotne, że w Rozdziale 6.2 Autorka analizuje przypadek płyty, w której propagują fale Lamba.
- 5) Na str. 49 Autorka nieprecyzyjnie podała, że wzór (35) opisuje prędkość fali podłużnej w płycie. W rzeczywistości prędkości fal rozchodzących się w płytach opisują równania Rayleigha-Lamba. Należałoby tu zatem dodać, że jest to wzór pod warunkiem przyjęcia założeń płaskiego stanu naprężenia oraz przemieszczeń w płaszczyźnie płyty ( $u_x$  oraz  $u_y$ ) jako stałych na grubości płyty.

- 6) Na str. 50 Autorka błędnie podała, że wzór (36) opisuje prędkość fali podłużnej w pręcie oraz że fale podłużne nie podlegają dyspersji. W ogólności fale rozchodzące się w prętach są falami dyspersyjnymi i opisać je można za pomocą np. teorii Pochhammera (pręty o przekroju okrągłym). Podany wzór (36) jest przypadkiem szczególnym opisującym pręt według teorii elementarnej, w której pomija się deformację poprzeczną pręta. Należałoby tu dodać, że rozwiązanie według teorii elementarnej znacząco odbiega od rozwiązania ścisłego, w szczególności nie uwzględnia dyspersyjnego i wielomodowego charakteru fal propagujących w prętach.
- 7) Rozdział 3.5.2 – według jakich kryteriów dobrano krok czasowy i przestrzenny w przykładzie obliczeniowym? Czy wykonano analizę zbieżności?
- 8) Rozdział 6 (37 stron) przedstawiający wyniki badań Autorki ma stosunkowo nieznaczną objętość w stosunku do Rozdziałów 1-5 (99 stron, o charakterze głównie opisowym i zestawieniowym), pomimo dużego zakresu badań w nim zawartych. W rezultacie dość skompresowanej postaci rozdziału 6, zabrakło w nim wielu kluczowych informacji, np.:
- W jaki sposób ustalano czas przelotu fali (zaznaczony na rys. 6.1) w badaniach numerycznych oraz doświadczalnych?
  - Jakie były parametry pomiaru w trakcie realizacji badań betonoskopem (częstotliwość próbkowania, długość zarejestrowanego sygnału, wzmocnienie, itp.)?
  - W przykładzie obliczeniowym opisanym w rozdziale 6.1.1 nie podano parametrów materiałowych analizowanego elementu betonowego.
  - W przykładzie doświadczalnym opisanym w rozdziale 6.2.1 nie podano parametrów materiałowych analizowanej płytki z pleksiglasu. Warto by w tym rozdziale dodać krzywe dyspersji w celu zobrazowania, które z modów symetrycznych są wzbudzone.
  - Dlaczego do wyznaczenia czasów propagacji na promieniach łączących tzw. fikcyjne punkty pomiarowe użyto wybranego typu interpolacji (interpolacja wielomianowa funkcjami sklejanymi 3-go stopnia)? W pracy zabrakło porównania z innymi typami interpolacji i kryterium wyboru.
  - Wyboru metody rozwiązywania układu równań (metoda najmniejszych kwadratów z regularyzacją Tichonowa, z macierzą regularyzacyjną wygładzającą obrazy tomograficzne za pomocą dyskretnego operatora 2-go stopnia) dokonano wyłącznie na podstawie oceny wizualnej map (str. 110 – „... są one pod względem jakości najbardziej czytelne i pozbawione zaszumienia ...”; str. 142 – „... najbardziej satysfakcjonujące obrazy ...”). W pracy zabrakło precyzyjnego kryterium wyboru metody rekonstrukcji obrazu tomograficznego.

### **Język i redakcja rozprawy**

Pod względem redakcyjnym rozprawa jest opracowana starannie. Przyjęty podział pracy na siedem rozdziałów jest przejrzysty. Wykresy i rysunki są czytelne, a fotografie mają odpowiednią ostrość i nasycenie.

Wybrane usterki edycyjne:

- str. 9 – „... wybrane przez autorkę ciekawsze artykuły z tego zakresu ...” – nieprecyzyjne sformułowanie (jak rozumieć słowo „ciekawsze”?)

- str. 14 – „Pomiary przeprowadzono na 14 prostopadłościennych próbek ...” – niepoprawna odmiana;
- str. 22 – „... ulegają załamaniu lub dyfrakcji przy omijaniu przeszkód, np. w postaci wtrętów ...” – niefortunne określenie, lepiej brzmiałoby „defektów”;
- str. 26 – „nawet najmniejsze nieciągłości powstałe w jego strukturze jest czymś normalnym ...” – niepoprawna odmiana;
- str. 40 – „material” – błąd pisowni;
- str. 42 – „Najczęściej stosowaną metodą łączenia obu modeli to taka ...” – niepoprawna odmiana;
- str. 70 – „... coraz bardziej optymalnych ...” – niezręczne sformułowanie;

## 5. Wniosek końcowy

Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Zawiera ona wyniki poszerzające wiedzę w zakresie tomografii ultradźwiękowej elementów konstrukcji betonowych. Zasadnicze założenia pracy zostały zrealizowane, a przedstawione powyżej uwagi krytycznie nie obniżają w istotny sposób wartości merytorycznej pracy.

Recenzowana rozprawa świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autorkę. Mgr inż. Karolina Tatara dysponuje ogólną wiedzą techniczną pozwalającą na przygotowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych, a także wiedzą teoretyczną w dyscyplinie budownictwo, obejmującą w szczególności zagadnienia związane z mechaniką konstrukcji i metodami numerycznymi.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Karoliny Tatara do publicznej obrony.**

Magdalena Rucka