

Dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. PŚ

Gliwice, 16.08.2020 r.

Katedra Konstrukcji Budowlanych

Zespół Konstrukcji betonowych i murowych

Wydział Budownictwa

Politechnika Śląska

Ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Zielińskiej

**pt. „Diagnostyka i obrazowanie wewnętrznej struktury elementów konstrukcji budowlanych z zastosowaniem transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej”**

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo z dnia 25.06.2020 r. skierowane do mnie przez Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska dr hab. inż. Joannę Żukowską, prof. PG. z prośbą o opracowanie recenzji.

### **2. Charakterystyka rozprawy**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Zielińskiej pt. „Diagnostyka i obrazowanie wewnętrznej struktury elementów konstrukcji budowlanych z zastosowaniem transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej”. Praca ma charakter teoretyczno-badawczy i

składa się z 8 rozdziałów, oraz bibliografii, spisu ilustracji i spisu tabel. Bibliografia obejmuje 178 pozycji piśmiennictwa, w tym czterech pozycji współautorskich Doktorantki. Tekst rozprawy liczy 186 stron i zawiera 93 rysunki, 18 tabel oraz 91 wzorów. Na początku pracy zamieszczono streszczenie pracy w języku angielskim oraz spis ważniejszych oznaczeń i skrótów.

W rozdziale 1 (Wstęp), Doktorantka omówiła temat badań nieniszczących wykonywanych w konstrukcjach inżynierskich oraz historię tomografii ultradźwiękowej. Podstawowy przegląd literatury pozwolił na określenie głównych problemów związanych z detekcją wewnętrznych uszkodzeń metodą ultradźwiękową i był podstawą do sformułowania celu pracy. Za cel pracy uznano ocenę możliwości zastosowania transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej do nieniszczącej diagnostyki elementów konstrukcji budowlanych.

Rozdział 2 zawiera podstawy teoretyczne propagacji fal ultradźwiękowych. Omówiono charakterystykę fal z podziałem na fale propagujące w ośrodkach nieograniczonych, półnieograniczonych oraz propagujące w cienkich płytach. Opisano ponadto podstawowe zjawiska fizyczne jakim podlegają fale ultradźwiękowe.

W rozdziale 3 przedstawiono podstawy teoretyczne tomografii ultradźwiękowej. Przedstawiono klasyfikację metod tomografii ze szczególnym uwzględnieniem tomografii transmisyjnej. Omówiono sposoby rozwiązywania układów równań nadokreślonych i niedookreślonych. Przedstawiono podstawy wykorzystania metod iteracyjnych do wykonywania obrazów tomograficznych. Zaproponowano sposób śledzenia promieni fali z uwzględnieniem możliwego zakrzywienia trasy ich propagacji. Na końcu rozdziału zamieszczono schemat blokowy obrazujący tok postępowania autorskiego programu do obrazowania tomograficznego.

Rozdział 4 zawiera opis sposobu modelowania propagacji fal sprężystych w komercyjnym programie Abaqus, bazującym na MES. W rozdziale zamieszczono ponadto przykład obliczeniowy obrazujący sposób rozchodzenia się fali w modelu numerycznym z inkluzją o modelowanej prędkości fali odpowiednio wyższej i niższej niż prędkość w ośrodku ją otaczającym.

W rozdziale 5 zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych i analiz numerycznych stalowych płytek z wadami wewnętrznymi o charakterze powierzchniowym i liniowym. Badania wykonano na ośmiu płytkach o wymiarach 30x500x500 mm. Jedna płytka wykonana została jako element pełny. Pozostałe płyty zawierały wady o zmiennym kształcie i wielkości. W trzech płytach zasymulowano wystąpienie uszkodzenia liniowego, które wykonano w postaci prostokątnego otworu o szerokości 5 mm i długościach 20 mm, 50 mm i 100 mm. Kolejne cztery płyty zawierały okrągły otwór o zmiennej średnicy: 10 mm, 20 mm, 50 mm i 100 mm, mający odzwierciedlać uszkodzenie o charakterze powierzchniowym. Zaproponowano dwie metody określenia czasu przejścia fali od nadajnika do odbiornika, pierwsza w formie pik-pik, druga w formie zero-zero. W każdej płytce wzbudzenie w postaci paczki falowej o częstotliwości 150 kHz, modulowanej oknem Hanninga składającej się z pięciu cykli sinusoidy, przykładano w 16 punktach, po 8 na dwóch prostopadłych względem siebie krawędziach. W trakcie pomiarów nadajnik umieszczano w określonym punkcie i odczytywano sygnały wyjściowe w ośmiu punktach znajdujących się na przeciwległej krawędzi. Następnie nadajnik przesuwano do kolejnego punktu i powtarzano pomiar. Łącznie zebrano 128 wykresów przebiegu fali w czasie. Na ich podstawie określono czas przejścia fali ultradźwiękowej dla każdej ze ścieżek. Na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych przygotowano mapy bazujące na bezpośrednim pomiarze czasu przejścia fal w elemencie uszkodzonym oraz na różnicach czasu przejścia fal przez element uszkodzony i element referencyjny. Analizę możliwości oszacowania wielkości uszkodzenia dokonano poprzez zagęszczenie siatki tzw. pikseli, na które podzielony jest element. Porównano mapy przygotowane na podstawie dwóch różnych wielkości pikseli. Ostatnia część analizy polegała na określeniu wpływu wartości współczynnika korelacji, opisującego zmianę kształtu fal propagujących przez element uszkodzony i płytę pełną. Do określenia wartości współczynnika korelacji wykorzystano metody Pearsona, Spearmana oraz Kendalla. Wykazano, że uszkodzenia o wymiarach znacznie mniejszych niż długość fali nie zostały skutecznie zlokalizowane za pomocą tomografii ultradźwiękowej, zarówno dla badań eksperymentalnych jak i numerycznych. Otwory o wymiarach większych lub porównywalnych do długości fali zostały skutecznie zobrazowane na tomogramach jako obszary o zmniejszonej prędkości propagacji fali.

W rozdziale 6 zamieszczono wyniki badań i analiz wykonanych na elementach murowanych wzniesionych z cegły na zaprawie cementowo-wapiennej. Modele badawcze o przekroju 38x38 cm (1,5 cegły) miały 9 warstw elementów murowych. Wykonano cztery modele badawcze: jeden pełny oraz trzy zawierające inkluzje w postaci pionowego otworu o przekroju 53 mm × 53 mm, wykonanego wzdłuż wysokości modelu. Otwór wykonano w odległości 77 mm od krawędzi filara. W jednym modelu otwór pozostawiono pusty, natomiast w dwóch kolejnych modelach w otworach umieszczono pręty stalowe o średnicy 32 mm. W jednym modelu pręt osadzono na zaprawie gipsowej, a w drugim na zaprawie cementowej. Tak przygotowane modele podano badaniom w środkowej warstwie cegieł, stosując metodę transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej. Mapy tomograficzne wykonano dla elementów podzielonych na różną liczbę pikseli. Poprzez analizę zmiennej konfiguracji ścieżek pomiarowych wykazano, że istotną rolę na otrzymany obraz tomograficzny ma ilość zebranych danych pomiarowych. Następnie przeprowadzono symulacje numeryczne obrazujące wpływ zmieniających się parametrów materiałowych zaprawy na otrzymane wyniki. Badania wykazały, że możliwe jest wykrycie ułożenia spoin w badanym przekroju muru. Inkluzja w postaci otworu została zidentyfikowana zarówno w badaniach numerycznych, jak i doświadczalnych, natomiast inkluzja w postaci osadzonego pręta została zidentyfikowana jedynie w przypadku analiz numerycznych. Badania eksperymentalne umożliwiły ponadto ocenę jakości połączenia adhezyjnego pomiędzy stalowym prętem osadzonym wewnątrz modelu i otaczającą je zaprawą.

W rozdziale 7 zamieszczono wyniki badań wykonanych na czterech belkach betonowych o wymiarach 100x100x500 mm. Pierwszą belkę wykonano o przekroju pełnym, natomiast kolejnych trzech zastosowano inkluzje o średnicy 20 mm, usytuowane w odległości 25 mm od jednej i 50 mm drugiej krawędzi belki. Pierwsza z trzech belek zawierała inkluzję w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm, w drugiej podobny pręt został trzykrotnie owinięty folią o grubości około 30 µm. Miało to na celu uzyskanie defektu w postaci cienkiej warstwy oddzielającej stal i beton. W ostatniej belce zabetonowano rurę PCV o grubości ścianki równej 1 mm. Głównym celem badań była ocena stanu połączenia adhezyjnego pomiędzy prętem zbrojeniowym i betonem. Opracowano autorski model teoretyczny, na podstawie którego próbowano odtworzyć dokładny przebieg fali w badanych elementach. Do śledzenia

rzeczywistego (zakrzywionego) przebiegu promieni fal zastosowano metodę hybrydową uwzględniającą ugięcie fali. Wykonano mapy tomograficzne bazujące na prostych i zakrzywionych ścieżkach przejścia fal, co umożliwiło porównanie otrzymanych wyników. Stwierdzono, że zastosowanie prostych promieni pozwoliło na uzyskanie zadowalających wyników. Jednak zastosowanie teorii hybrydowej podniosło jakość rekonstrukcji, poprawiając obrazowanie kształtu i wielkości inkluzji. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką efektywność tomografii ultradźwiękowej w obrazowaniu braku adhezji między prętem zbrojeniowym a betonem, nawet przy bardzo małej grubości wprowadzonego rozwarstwienia.

W rozdziale 8 zamieszczono podsumowanie oraz plan dalszych badań i analiz.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

#### **3.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów rozprawy**

Defektoskopia konstrukcji z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej jest stosowana od połowy XX wieku. Obecnie, w związku z zwiększaniem możliwości obliczeniowych procesorów i rozwojem metod analizy obserwuje się szczególny rozwój tomografii ultradźwiękowej. Na rysunku dostępne są już urządzenia zaopatrzone w układy wielu głowic eksponencjalnych (niewymagających sprzężenia akustycznego z badaną powierzchnią), pracujących w dużym zakresie częstotliwości. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że podjęty przez Doktorantkę temat rozprawy jest oryginalny i aktualny, a zdefiniowany główny cel i zakres pracy są jasne, zasadne i ważne tak z naukowego jak i z praktycznego punktu widzenia.

#### **3.2. Program badawczy i analityczny rozprawy**

Na bazie głównych celów i zamierzeń pracy sformułowano program badawczy i analityczny rozprawy. Program ten sformułowano poprawnie, a uzyskane wyniki mają znaczenie poznawcze oraz praktyczne i świadczą o oryginalności podjętego tematu.

### 3.3. Ocena naukowej wartości rozprawy

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe Autorki uznają:

- Przeprowadzenie badań laboratoryjnych na trzech materiałach konstrukcyjnych: stali, murze i betonie oraz ich analizę z uwzględnieniem rozwiązań teoretycznych i własnych propozycji.
- Wykonanie modeli numerycznych badanych elementów i analiza uzyskanych wyników symulacji numerycznych.
- Opracowanie autorskiego modelu propagacji fal ultradźwiękowych w elemencie z inkluzją o przekroju kołowym, uwzględniającego zjawiska odbicia i załamania fal.
- Opracowanie własnej metody identyfikacji rzeczywistego przebiegu ścieżki fali podłużnej z uwzględnieniem możliwości jej ugięcia.
- opracowanie autorskiego programu do obrazowania tomograficznego uwzględniającego możliwość śledzenia zakrzywienia fali.

Recenzent chciałby podkreślić, że prace Doktorantki związane z doktoratem zostały opublikowane w wysoko punktowanych czasopismach, takich jak: *Materials* (140 pkt) i *Construction and Building Materials* (140 pkt). Oprócz tego Doktorantka jest współautorką prac niezwiązanych z doktoratem, opublikowanych w takich czasopismach jak: *Journal of Applied Geophysics* (100 pkt), *Materials* (140 pkt), czy *Measurement* (200 pkt). Na *Web of Science* recenzent naliczył 9 publikacji i h-index równy 3, a w bazie *Scopus* 15 publikacji i podobny indeks Hrischa.

### 4. Uwagi krytyczne

Jak każda praca, taki i recenzowana rozprawa nie jest wolna od drobnych błędów, niedopowiedzeń czy niedociągnięć. Uwagi do pracy recenzent podzielił na ogólne, na uwagi szczegółowe oraz literówki i błędy stylistyczne. Recenzent nie ma uwag do wyglądu i układu pracy, który ocenia bardzo wysoko.

## 4.1. Uwagi ogólne

### **Uwaga dotycząca układu rozprawy**

Recenzowana rozprawa zawiera analizę stanu wiedzy, opis i wyniki badań własnych oraz opis i wyniki analiz obliczeniowych (numerycznych). Taki układ ma większość rozpraw doktorskich. W recenzowanej pracy doktorskiej przyjęto jednak niecodzienne proporcje w zakresie przeglądu literatury i opisu badań własnych i analiz. Przegląd literatury jest obszerny, zawiera bowiem informacje dotyczące metod nieniszczących, fal mechanicznych, metod ultradźwiękowych i analiz teoretycznych. Elementy przeglądu literatury znajdują się w wszystkich rozdziałach pracy, za wyjątkiem wniosków końcowych. Recenzent rozumie przy tym intencję Autorki – z poszczególnych etapów przeglądu literatury wynikają kolejne założenia przyjęte w badaniach i analizach numerycznych. Tym niemniej przyjęty układ pracy powoduje, że pewnemu „rozmyciu” ulegają liczne i obszerne analizy oraz badania własne (rozdziały 5-7), a przez to nie są one w pełni eksponowane.

### **Uwaga dotycząca określania modułu sprężystości i wytrzymałości badanych materiałów**

Moduł Younga  $E$  badanych materiałów (stal, beton, mur) określano metodą nieniszczącą, na podstawie prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Recenzent nie rozumie, dlaczego nie wykonano badań niszczących badanych elementów po przeprowadzeniu badań nieniszczących. Takie badania byłyby cenne szczególnie w odniesieniu do betonu i muru oraz jego komponentów (zaprawy i cegły). Oprócz określania modułu sprężystości badania takie pozwoliłyby wyznaczyć wytrzymałość betonu, muru, zaprawy i cegły. W pracy nie podano bowiem wytrzymałości stali, klasy stosowanego betonu, wytrzymałości elementów murowych ani klasy wytrzymałości zaprawy. Co ciekawe badania niszczące wykonano jedynie dla prętów stalowych stosowanych w badaniach betonowych belek.

### **Uwaga dotycząca zagęszczenia siatki pomiarowej**

W laboratoryjnych badaniach elementów stalowych, murowanych i betonowych przyjęto pewien układ siatki pomiarowej (układu głowic nadawczych i odbiorczych). Wpływ zagęszczenia siatki analizowano jedynie w obliczeniach numerycznych. Czy Doktorantka zastawiała się nad wpływem zagęszczenia lub rozgęszczenia siatki pomiarowej w badaniach laboratoryjnych? Jaki mógłby być wpływ takich działań?

### **Uwaga dotycząca badań konstrukcji murowych**

Mur jest specyficznym kompozytem, w którym połączono dwa materiały o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych i odkształceniowych. Przez to interpretacja badań nieniszczących, w tym i ultradźwiękowych prowadzonych w tym materiale jest niezmiernie trudna. W istniejącym murze oprócz niedokładności wykonania spoin (lokalne pustki) może występować wewnętrzna nieregularność układu elementów murowych i wtrącenia innych materiałów (zasyпка, inny rodzaj elementów murowych). Przeprowadzone badania zdają się to przynajmniej częściowo potwierdzać.

## **4.2. Uwagi szczegółowe**

Poniżej podano miejsca znalezionych błędów i kontrowersji:

Str. 11, 4 wiersz od góry napisano: *„Badania doświadczalne i numeryczne przeprowadzono bazując na właściwościach fal sprężystych propagujących w elementach stalowych, ceglanych i betonowych”*. Badania prowadzono na elementach murowanych z cegły i zaprawy, dlatego zamiast słowa „ceglanych” powinno się użyć słowa „murowanych”.

Str. 46, 7 wiersz od góry napisano: *„Na drodze promieni zachodzi proces całkowania parametrów ośrodka”*. Jest to dosyć niefortunne sformułowanie. Proces całkowania wykonuje się podczas prowadzonej analizy, on sam z siebie nie „zachodzi”.



Str. 58, 2 wiersz od dołu napisano: „*Oceny skuteczności algebraicznych metod tomografii dokonał Subbarao [147]. Porównał on metodę ART. i MART*”. Więcej nic na ten temat nie napisano. Jeśli przywołuje się wyniki obcych badań i analiz należy podać co z nich wynika.

Punkt 5.2.2. W opisie badania płytek stalowych użyto pojęcia „*siła wzbudzająca*”. Recenzent ma wątpliwość czy jest to poprawne określenie. Lepiej byłoby użyć „*wzbudzenie sygnału*”.

Str. 109, 2 wiersz od góry napisano: „*Spoiny między cegłami miały grubość 1 cm i były wypełnione zaprawą cementowo-wapienną*”. Lepiej byłoby: mur wzniesiono na zaprawie cementowo-wapiennej ze spoinami o grubości 1 cm.

Str. 109, 4 wiersz od góry napisano: „*Obiekt charakteryzował się wysokością 66,5 cm oraz przekrojem 38 cm × 38 cm*”. Lepiej byłoby: elementy badawcze miały wysokość 66,5 cm oraz kwadratowy przekrój o wymiarach 38 cm × 38 cm.

Str. 114, 4 wiersz od góry napisano: „*Spoiny wykonane z zaprawy cementowo-wapniowej ...*”. Nie ma takiej zaprawy, stosuje się natomiast zaprawę cementowo-wapienną.

Punkt 7.1. Wymaniałając rozwijane obecnie metody diagnostyczne zapomniano o metodzie radarowej, w której też stosuje się fale elektromagnetyczne.

Str. 143, 8 wiersz od dołu napisano: „*Przykładowe ścieżki pokazano na rysunku 7.9 odpowiednio dla elementu z kołową inkluzją stalową oraz otworem*”. Inkluzja nie była kołowa tylko miała przekrój kołowy.

Str. 144, 2 wiersz od dołu napisano: „*Symulacje wykonano dla przekroju betonowego o wymiarach 10 cm × 10 cm, zawierającego inkluzję okrągłą o średnicy 2 cm...*”. Inkluzja na pewno nie była okrągła, tylko miała przekrój kołowy.

Recenzent jest nieco zdziwiony, że w spisie literatury nie znalazł pracy doktorskiej dr inż. Karoliny Tatary. Pod numerem [114] zacytowano co prawda publikację stanowiącą podsumowanie tej pracy, lecz wydaje się, że w pracy powinno się znaleźć odniesienie do pracy doktorskiej obronionej w 2019 r., a dotyczącej podobnej tematyki.

### 4.3. Literówki i uwagi stylistyczne

Str. 11, 8 wiersz od dołu – jest *modelu*, powinno być *model*.

Str. 11, 9 wiersz od dołu – jest *uwzględniającego*, powinno być *uwzględniający*.

Str. 21, 5 wiersz od dołu – jest *umoliwiło*, powinno być *umożliwiło*.

Str. 61, podpis pod rysunkiem 3.15 jest *stanowiąca*, powinno być *stanowiącą*

Str. 70, 3 wiersz od góry – jest *prędkość*, powinno być *prędkości*.

Str. 85, 1 wiersz od góry – jest *ultradźwiękowej*, powinno być *ultradźwiękowej*.

Str. 102, 8 wiersz od dołu – jest *ścianie*, powinno być *krawędzi*.

Str. 157, 3 wiersz od dołu – jest *wrażliwość*, powinno być *wrażliwości*.

Recenzent zauważył również liczne braki przecinków, szczególnie przed słowami „gdzie” i „który”.

## 5. Wnioski końcowe

W recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Monika Zielińska rozwiązała oryginalne zadanie naukowe, polegające na zastosowaniu własnych algorytmów w celu określania rzeczywistych (zakrzywionych) ścieżek propagacji fal ultradźwiękowych w ośrodkach niejednorodnych. Stwierdzam, że główny cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami planowania i prowadzenia badań laboratoryjnych oraz rozwiązywania problemów teoretycznych. Przeprowadziła badania doświadczalne oraz analizy numeryczne, a do rozwiązania postawionego problemu zastosowała poprawne i oryginalne metody badawcze i analityczne. Uzyskała oryginalne wyniki i wykazała, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski poznawcze. Widzi również kierunki

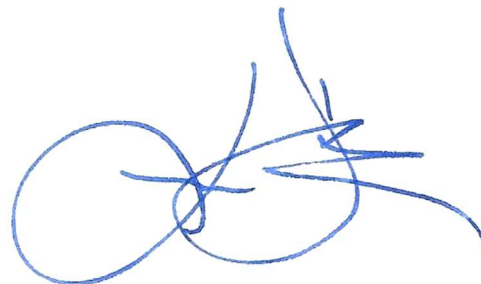
dalszych badań. Świadczy to o Jej odpowiednim przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie obniżają bardzo dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Uwagi mają charakter porządkowy lub dyskusyjny i mam nadzieję, że przynajmniej w części będą pomocne Autorce podczas przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

Oceniam, że rozprawa stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego oraz potwierdza, że Doktorantka posiada ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa jest opracowana na bardzo dobrym poziomie naukowym i redakcyjnym oraz wnosi w przedmiotowym zagadnieniu wkład w rozwój dziedziny inżynieria lądowa i transport.

Należy tu również podkreślić bogaty dorobek publikacyjny Doktorantki.

**Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Moniki Zielińskiej pt. „Diagnostyka i obrazowanie wewnętrznej struktury elementów konstrukcji budowlanych z zastosowaniem transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku ”O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z 2003 r., Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami). W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.