

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr in . Pawła Safinowskiego p. t.  
„Ultradźwiękowa diagnostyka degradacji mechanicznej i strukturalnej  
betonu ”**

Rozprawa doktorska mgr in . Pawła Safinowskiego liczy 178 stron, składa się z wprowadzenia, sześciu rozdziałów, wykazu literatury przedmiotowej i dwóch aneksów prezentujących szczegóły zastosowanych metod numerycznego rozwiązywania równań nieliniowych i oprogramowania do wyznaczania parametrów modów falowych według jednego z modeli omówionych w rozprawie.

W krótkim wprowadzeniu autor uzasadnia potrzebę podjęcia tematu opracowania nieniszczącej i bezkontaktowej metody oceny stopnia degradacji wierzchniej warstwy betonu w obiektach inżynierskich budowanych w wielkiej ilości w eksploatacji. Taka metoda dotychczas nie powstała, pomimo ogromnego znaczenia badania własności mechanicznych konstrukcji betonowych i prognozowania ich trwałości. Trudności, które napotykają badacze tej problematyki specjaliści wynikają z dwóch przesłanek: po pierwsze - beton jest kompozytem o własnościach zależnych od trzech komponentów: *zaczynu cementowego, kruszywa* a także *warstwy kontaktowej* zaczynu - kruszywo, po drugie - o trwałości betonu decyduje własności jego mikrostruktury, której badanie wymaga skomplikowanych metod diagnostycznych.

W rozdziale pierwszym autor w sposób bardzo zwięzły przedstawia mechanizmy degradacji betonu, które potencjalnie mogą doprowadzić do wyłączenia obiektu z eksploatacji, a nawet do jego zniszczenia. Klasyfikację przyczyn degradacji autor przytacza zgodnie z poglądami prezentowanymi w fundamentalnym podręczniku prof. A.M. Neville'a, cytując ostatnie dostępne polskie tłumaczenie tej publikacji. Mając na uwadze specyfiki wynikające z dużej koncentracji krajowych prac budowlanych, szkoda, że wśród przyczyn przyspieszonej degradacji betonu autor pominiął błędy w zagęszczeniu mieszanki oraz w pielęgnacji betonu, do których może dojść na placu budowy. Następnie na pięciu stronach autor omawia znane mu stosowane obecnie niszcząco i nieniszcząco metody badania betonu. Intensywny rozwój inżynierii materiałowej i elektroniki sprawił, że obecnie metod tych jest bardzo wiele. W tej części rozprawy autor cytuje dużo znaczących pozycji z literatury przedmiotowej. Sposób oceny użyteczności określonych metod jest tu sprawą subiektywną. Autor recenzji w tym miejscu wymieniłby również, jako stosowane, następujące metody:

- badanie mrozoodporności, np. wg. PN - V 83002,

- badanie odporności na karbonatyzację, np. wg. PN - EN 13295.

Ponadto, przy opisie metody emisji akustycznej - cz. sto stosowanej w wielu krajach do monitorowania stanu technicznego obiektów betonowych, należałoby powołać się na podręcznik A. Grosse i H. Ohtsu „Acoustic Emission Testing - Basic for Research - Applications in Civil Engineering” z 2008 roku.

W rozdziale pierwszym autor rozprawy stwierdza, że jego zdaniem, stopień i głębokość degradacji betonu oraz własności jego mikrostruktury mogą w najbardziej efektywny sposób zostać określone przy pomocy pomiaru zależności dyspersyjnej prędkości propagacji fali Rayleigha oraz metod reflektometrycznych. Po tych rozważaniach następuje sformułowanie celu pracy. Jest nim zaprojektowanie i przetestowanie oryginalnych systemów pomiarowych, wykorzystujących dwie wymienione wyżej metody akustyczne przy założeniu powietrznego sprężenia pomiędzy przetwornikami a badanym obiektem.

Rozdział drugi zawiera szeroko ujęte podstawy teoretyczne zastosowanych metod badawczych. Zostały tu omówione algorytmy rozwiązywania równań opisujących trzy modele:

- o model warstwowy - niejednorodnego Thomсона - Haskella,
- o model liniowej zmiany modułu Younga Gibsona (dwa razy w tekście nazywanego Gibbonem),
- o model porowatego w odniesieniu do planowanych badań reflektometrycznych.

Dokonano porównania wpływu zmiany parametrów wejściowych opisujących stałe materiałowe na postać wyników charakterystyk numerycznych generowanych przez oprogramowanie stosując trzy opisane wyżej modele.

Część eksperymentalna rozprawy zawiera opisy dwóch systemów pomiarowych: SWMD, generujących i rejestrujących fale powierzchniowe oraz RMD, realizujących pomiary reflektometryczne. Aparatura ta, wykorzystująca najnowsze rozwiązania technologiczne, została przystosowana do pracy w trybie automatycznym w warunkach terenowych. W rozdziale trzecim przedstawiono schematy blokowe wymienionej wyżej aparatury i szczegóły zastosowanych algorytmów. Niezależnie od danych technicznych zastosowanych przetworników ultradźwiękowych, będących kluczowymi elementami systemu. Dla obu systemów pomiarowych podano wyniki testów przeprowadzonych na izotropowych materiałach referencyjnych, które wykazały kilkuprocentową zgodność otrzymanych wyników pomiaru z wartościami rzeczywistymi.

W rozdziale czwartym autor omawia wyniki swoich badań dotyczących identyfikacji wybranych właściwości betonu w oparciu o otrzymane dane eksperymentalne. Zagadnienie to nastręcza duże trudności wynikające ze złożoności przyjętych modeli. Autor wybrał cztery metody do konstrukcji algorytmów dopasowujących parametry modelu do wyników eksperymentu. Efektywność wybranych metod została porównana przy pomocy zbioru danych syntetycznych symulujących zbiór wyników pomiaru współczynnika odbicia. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane w postaci tabel. Na ich podstawie dokonano selekcji najefektywniejszych metod. Zostały one następnie zastosowane do

zasadniczych testów procedur identyfikacji parametrów o rodka w oparciu o modele Haskella i Gibsona. Wyniki tych testów zostały zaprezentowane graficznie i tabelarycznie. Parametry materiałowe wyznaczone na drodze rozwiązania problemu odwrotnego pozostawały w dostatecznej zgodności z założonymi danymi wyjściowymi. W podrozdziale IV.6 autor przedstawił alternatywny algorytm rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla modelu Haskella o nazwie „chmura punktów” w którym wynikiem działania procedury optymalizacyjnej jest zbiór rozwiązań. Rozwiązanie optymalne było estymowane z tego zbioru na podstawie dodatkowych kryteriów. Weryfikacja działania wymienionego wyjściowego algorytmu wykazała jego wysoką precyzję w estymowaniu założonych parametrów betonu.

Wyniki przeprowadzonych symulacji autor podsumował w podrozdziale IV.8. Stwierdził w nim, że w oparciu o model Gibsona możliwa jest estymacja grubości obszaru betonu zdegradowanego i jego parametrów (porowatość, przepuszczalność, krętość).

W rozprawie doktorskiej recenzent nie znalazł definicji krętości jako charakterystycznego parametru struktury betonu. W podręczniku Neville’a morfologicznie najbliższym spotykanym terminem jest „kreda”.

Oprogramowanie o nazwie „chmura punktów” jest efektywne do analogicznego celu w oparciu o model Haskella. Należy tu podkreślić, że autor rozprawy weryfikował opracowane przez siebie procedury na podstawie danych syntetycznych. Na przykład w Tabeli IV.6 wykazał, że opracowana procedura jest efektywna dla porowatości 30, 50 i 80 % dla warstwy zdegradowanej a nieefektywna dla warstwy o porowatości 20 %. Tymczasem już porowatość 15 % skutkuje radykalnym obniżeniem własności mechanicznych betonu, a typowe wartości tego parametru są mniej więcej dwukrotnie niższe. Autor rozprawy przyznaje, że na obecnym etapie rozwoju jego aparatury i oprogramowania mogłoby znaleźć zastosowanie jedynie w diagnostyce obiektów bardzo silnie zdegradowanych.

W rozdziale V autor zamieścił wyniki pomiarów wykonane systemem generującym fale powierzchniowe oraz systemem reflektometrycznym w wybranych rzeczywistych obiektach. Ponieważ wymienione wyjściowe systemy są efektywne jedynie do identyfikacji obszarów o wysokiej porowatości lub znacząco różniących się impedancją akustyczną, skuteczność diagnostyczna w odniesieniu do betonu jest ograniczona. Dlatego zaprezentowano wyniki pomiarów na próbkach ze sztucznie zaimplementowanym makroniejednorodnością oraz gazobetonem typu YTONG i beleczkach o wysokiej wartości porowatości. W przypadku tych obiektów uzyskano pewne użyteczne rezultaty. Zastosowanie zaprojektowanych systemów do badań eksploatowanych obiektów rzeczywistych wymaga, w opinii recenzenta, dalszego udoskonalenia tej aparatury. Tym niemniej badania przedstawione przez autora rozprawy doktorskiej mają charakter oryginalny i zawierają rzetelne i kompetentne omówienie złożonej tematyki opracowania zaawansowanego technologicznie i złożonego funkcjonalnie systemu diagnostycznego.

## Uwagi krytyczne

Recenzent stwierdza, że omawiana rozprawa została zredagowana nie całkiem starannie. Większość rysunków, na których konfrontuje się charakterystyki modelowe i wyniki otrzymane przy pomocy omawianego oprogramowania są mało czytelne ze względu na przyjęte zbyt małe rozmiary. W tekście pozostała spora ilość błędów literowych. Zwłaszcza autor modelu materiału z liniową zmianą modułu ścinania jest niejednoznacznie tytułowany przez autora doktoratu.

Uchybienia zauważone przez recenzenta są znikome i nie mają znaczenia dla oceny całości pracy. Całość rozprawy stwarza wrażenie przemyślanego przygotowania i przedstawienia. W opinii recenzenta prezentowane wyniki badań są bardzo interesujące z poznawczego punktu widzenia, chociaż ich zastosowanie praktyczne jest raczej odległe.

## Wniosek

Biorąc pod uwagę przedstawioną wyżej ocenę rozprawy doktorskiej mgr Pawła Safinowskiego stwierdzam, że osiągnięciem celu pracy zostało należyte udokumentowanie oraz że rozprawa spełnia warunki Ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych z dnia 14 marca 2003 r. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie omawianej rozprawy do publicznej obrony.