



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
Tel: +48 (12) 617 51 54
Fax: +48 (12) 617 29 21

AGH

prof. dr hab. inż. Łukasz Madej

e-mail: lmadej@agh.edu.pl

Kraków 15.08.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej:

Modelowanie numeryczne i badania eksperymentalne betonu wysokowartościowego z włóknami ze stopu z pamięcią kształtu

Autor rozprawy: mgr inż. Alireza Tabrizikahou.

Niniejsza ocena została przygotowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 17.06.2025r., na zlecenie Przewodniczącego wskazanej Rady.

1. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska, której podstawą jest tematycznie spójny cykl czterech publikacji dotyczących oceny możliwości wykorzystania włókien ze stopu z pamięcią kształtu na bazie żelaza (Fe-SMA) do kontrolowanego sprężenia wyrobów betonowych. Zastosowanie krótkich włókien w osnowie betonu ma za zadanie poprawę jego własności mechanicznych, zwłaszcza wytrzymałości oraz umożliwienie samonaprawy w warunkach uszkodzenia. Nowatorskim aspektem badań jest zastosowanie włókien Fe-SMA aktywowanych termicznie, które z punktu widzenia kosztów stanowią atrakcyjną alternatywę dla często wykorzystywanych włókien ze stopu niklowo-tytanowego, co jest kluczowe w przypadku zastosowania w obszarze inżynierii lądowej.

Praca stanowi kombinację szerokiego zakresu badań eksperymentalnych oraz uzupełniających symulacji komputerowych z wykorzystaniem zaproponowanego podejścia numerycznego. W takim ujęciu jest to kompleksowe podejście do analizy zdefiniowanego zagadnienia badawczego.

Przedstawiona do oceny praca doktorska całościowo liczy 45 stron i uwzględnia wprowadzenie do zagadnienia wraz z krótkim przeglądem literatury, dwa rozdziały omawiające zrealizowane prace eksperymentalne oraz numeryczne, a także obszerny rozdział z podsumowaniem wykonanych zadań, oraz omówieniem wniosków i możliwych kierunków dalszych badań. Ostatni rozdział przedstawia wykaz kluczowej literatury, który zawiera 75 pozycji, z których 28 opublikowano w okresie ostatnich pięciu lat. Całość uzupełniona jest integralnym cyklem czterech publikacji, które zostaną omówione w kolejnych częściach

niniejszej recenzji.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest generalnie adekwatny do tematyki przedstawionego cyklu publikacji, chociaż w opinii recenzenta aspekt badań o charakterze eksperymentalnym powinien zostać bardziej wyeksponowany. Tak jak wspomniano, sam cykl składa się z czterech publikacji z okresu 2022-2025. Prace opublikowano w czasopismach o bardzo wysokim współczynniku oddziaływania tzw. IF (ang. impact factor), trzy prace w *Construction and Building Materials* o tegorocznym wskaźniku 8.0 oraz jedna praca w *Composites Part B* o wskaźniku 14.2. W tym aspekcie, należy również podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem we wszystkich pracach wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.

Przeprowadzone i opublikowane badania zostały pozytywnie zaopiniowane przez kolegia redakcyjne i niezależnych recenzentów we wspomnianych prestiżowych czasopismach naukowych, to potwierdza, że podjęcie tematyki było uzasadnione, a same badania zostały prawidłowo zaplanowane i zrealizowane. W związku z powyższym charakterystykę zrealizowanych prac oraz pewne uwagi do uzyskanych rezultatów przedstawię w sposób zbiorczy w niniejszej opinii.

2. Ocena pracy doktorskiej

W pierwszym rozdziale Doktorant przedstawił ogólną motywację do podjęcia tematyki rozprawy doktorskiej wskazując na potencjał wykorzystania krótkich włókien ze stopu na bazie żelaza z pamięcią kształtu jako wypełniacza osnowy betonowej do kontrolowanego sprężania wytwarzanych wyrobów użytkowych. Czytelnik zostaje również wprowadzony w cykl czterech publikacji stanowiących integralną część rozprawy doktorskiej z wyraźnym wskazaniem powiązania każdej z nich ze zrealizowanymi etapami badawczymi, które są tożsame z głównymi rozdziałami pracy. Zatem pierwszy rozdział pracy stanowi podsumowanie bardzo obszernego przeglądu literatury przedstawionego w pracach oznaczonych jako B.1 oraz B2.

Publikacja B.1 omawia szczegółowy przegląd praktycznych zastosowań i modeli konstytutywnych różnych stopów z pamięcią kształtu m.in. w kontekście kontroli drgań konstrukcji w trakcie np. występowania katastrof naturalnych, takich jak trzęsienia ziemi. Doktorant jednoznacznie wskazuje dwie kluczowe cechy takich materiałów tj. efekt pamięci kształtu, który pozwala materiałom na powrót do pierwotnej formy po odkształceniu, oraz tzw. pseudo sprężystość, która umożliwia duże odkształcenia bez trwałych naprężeń resztkowych przy jednoczesnym rozproszeniu znacznej ilości energii. Obie te cechy wynikają z występowania przemiany fazowej między austenitem o strukturze regularnej ściennie centrowanej a martenzytem o strukturze tetragonalnej przestrzennie centrowanej. Należy podkreślić, że liczba odwołań do literatury w omawianej pracy wynosi aż 216 pozycji.

Analogicznie, publikacja B.2 stanowi obszerny przegląd literatury odnośnie badań eksperymentalnych i metod modelowania numerycznego dedykowanych dla kompozytów betonowych wzmocnionych włóknami ze stopów z pamięcią kształtu. Doktorant, podkreślił możliwe zastosowanie takich materiałów do sprężania wyrobów oraz samo naprawy pojawiających się uszkodzeń przy pracy podczas obciążenia.

Obie prace wykazały, że omawiane materiały oferują poprawę własności wyrobów w stosunku do standardowo stosowanych rozwiązań. Doktorant umiejętnie zidentyfikował również wyzwania praktyczne i naukowe, które stoją przed tego typu rozwiązaniami., m.in.

koszty włókien wypełniacza, złożoność modelowania obliczeniowego, ograniczenia dotyczące ułamka objętości włókien, rolę siły adhezji włókno-beton czy mechanizmów cieplnych przy aktywowaniu włókien w osnowie. Tak zdefiniowane wyzwania stały się motywacją do podjęcia niniejszej tematyki w ramach rozprawy doktorskiej. Doktorant zdecydował skupić się na ocenie możliwości wykorzystania względnie taniego stopu z pamięcią kształtu na bazie żelaza oraz na zastosowaniu metod modelowania numerycznego w sposób bezpośredni uwzględniających niejednorodności rozkładu włókien w osnowie do komputerowego wspomagania prac eksperymentalnych. Rozdział ten zakończony jest zdefiniowaniem tezy pracy doktorskiej.

Rozdział drugi stanowi przedstawienie zrealizowanych badań eksperymentalnych z uwzględnieniem wytworzenia materiału badawczego na bazie dwóch mieszanek betonowych i dwóch kształtów włókien wypełniacza, realizacji prostych testów plastometrycznych, testów wyciągania pod kątem określenia roli wiązania włókno-beton oraz testów trójpunktowego zginania. Rozszerzone omówienie wykonanych prac badawczych jest przedstawione w publikacji B.3. W tej pracy zaprezentowano obszerne badania eksperymentalne w celu określenia odporności na wyciąganie krótkich włókien Fe-SMA osadzonych w osnowie betonowej. Badano wpływ różnych czynników, w tym temperatury, szybkości obciążenia, kształtu końcówek włókien oraz składu mieszanki betonowej. Wyniki wykazały, że włókna z haczykowatymi końcówkami charakteryzują się większą odpornością na wyciąganie z osnowy niż włókna proste. Stwierdzono również, że wzrost temperatury zmniejsza odporność na wyciąganie włókien haczykowatych. Takie efekty nie są natomiast widoczne dla włókien prostych. Doktorant wykazał, że mieszanki betonowe o wyższej wytrzymałości na ściskanie i zginanie charakteryzują się większą odpornością na wyciąganie, natomiast szybkość obciążenia ma znikomy wpływ na ten parametr. W tej części rozprawy brakuje jednak dokładnej charakterystyki stanu mikrostruktury wytworzonych mieszanek betonowych oraz betonów z wypełniaczem w formie włókien stopu z pamięcią kształtu. Wykorzystanie technik mikroskopii świetlnej, skaningowej elektronowej lub mikrotomografii komputerowej zapewniłoby wartościowe informacje odnośnie stopnia jednorodności rozkładu poszczególnych frakcji w uzyskiwanych próbkach. Interesującym zagadnieniem byłaby również analiza lokalnego oddziaływania włókien stopu z elementami strukturalnymi osnowy betonu. W tym aspekcie Doktorant wspomina np., że dodatek popiołu krzemionkowego poprawia mikrostrukturę porów, ale bez szerszego rozwinięcia tej kwestii. Nie jest również jasne, dlaczego do analizy porównawczej zastosowano włókna zakrzywione i proste o dwóch różnych długościach, a także czy realizowane badania były powtarzane kilkakrotnie celem uzyskania wyników statystycznie reprezentatywnych.

Kolejny rozdział, trzeci, stanowi naturalną kontynuację prac naukowych opartych o badania eksperymentalne, ale tym razem wspartych również wykorzystaniem metod komputerowego wspomagania projektowania technologii. Doktorant opracował i zaimplementował model numeryczny do generacji cyfrowej reprezentacji mikrostruktury osnowy z wypełniaczem w formie krótkich włókien. Omówił założenia modelu, które mają na celu wierne odzwierciedlenie możliwego ułożenia włókien w betonie. Następnie opracował model numeryczny w komercyjnym oprogramowaniu metody elementów skończonych Abaqus. Interesującym aspektem, tej części pracy było opracowanie modelu wydajnego obliczeniowo przy zachowaniu dokładności uzyskiwanych wyników na akceptowalnym poziomie. W tym

aspekcie doktorant wprowadził koncepcję zastępczego uwzględnienia kształtu włókien i roli jaką taki kształt odgrywa podczas oddziaływania z osnową. Zaproponował również model oddziaływania włókno-osnowa. Parametry wszystkich stosowanych modeli zostały zidentyfikowane z wykorzystaniem wyników badań eksperymentalnych. Z kolei w ramach badań eksperymentalnych Doktorant przetestował próbki betonowe wzmocnione losowo rozproszonymi włóknami Fe-SMA, włóknami stalowymi oraz próbki z betonu niezbrojonego, poddając je działaniu temperatury w zakresie 160°C i 200°C. Podczas badań wykazał, że w temperaturze otoczenia włókna stalowe cechują się wyższą wytrzymałością na zginanie niż włókna Fe-SMA. Natomiast po aktywacji termicznej włókna Fe-SMA odzyskiwały swój kształt, zwiększając nośność i wytrzymałość na zginanie betonu, przewyższając wyniki dla próbek z włóknami stalowymi w analogicznych warunkach. W tej części realizacji rozprawy doktorskiej nie jest jednak jasne, czy procedura identyfikacji parametrów modeli była realizowana ręcznie, czy na drodze analizy odwrotnej z wykorzystaniem wybranej metody optymalizacji. Dyskusyjne jest również zastosowanie wspomnianego uproszczenia kształtu włókien z haczykami zamiast wykorzystanie możliwości oferowanych przez obliczenia wysokiej wydajności. Wyjaśnienia wymaga również dobór wartości współczynnika tarcia na poziomie 0.1, oraz doprecyzowanie jakie kryterium może być wybrane do identyfikacji rozmiaru najbliższego otoczenia włókna celem identyfikacji potencjalnych oddziaływań z innymi włóknami.

Zestawienie wszystkich wyciągniętych z pracy wniosków znajduje się w ostatnim, czwartym, rozdziale rozprawy. Doktorant przedstawił jednoznacznie oryginalne elementy badań oraz wnioski z podziałem na wnioski ogólne, poznawcze, metodyczne, użytkowe oraz prognostyczne. W ostatnim rozdziale szeroko opisał również możliwe kierunki dalszej pracy na bazie opracowanego zaawansowanego modelu numerycznego oraz dostępnego zaplecza laboratoryjnego.

3. Uwagi szczegółowe

Praca napisana jest starannie z zachowaniem standardów tekstu naukowo-technicznego. Jakość ilustracji jest na dobrym poziomie, a ich czytelność wzorcowa. W pracy występuje nieznaczna liczba drobnych błędów językowych np. Nikołowo-tytanowy stop, pimimo, czy specyficznych stwierdzeń np. faza martenzytowa.

4. Uwagi dyskusyjne

Proszę przedstawić wyjaśnienia następujących kwestii w formie pisemnej:

- dlaczego na etapie badań wstępnych nie wykorzystano technik do charakterystyki stanu mikrostruktury wytworzonych mieszanek betonowych?
- czy lokalne oddziaływanie włókien stopu z elementami strukturalnymi osnowy betonu jest istotne z punktu widzenia wytrzymałości wyrobu gotowego?
- co oznacza, że dodatek popiołu krzemionkowego poprawia mikrostrukturę porów w betonie?
- dlaczego do analizy porównawczej zastosowano włókna zakrzywione i proste o dwóch różnych długościach? Czy takie założenie może wpływać na uzyskiwane wyniki?
- czy realizowane badania eksperymentalne np. zginania były powtarzane kilkakrotnie

celem uzyskania wyników statystycznie reprezentatywnych?

- czy istnieją komercyjne rozwiązania dedykowane do generacji włókien wypełniacza w osnowie innego materiału?
- czy procedura identyfikacji parametrów stosowanych modeli była realizowana ręcznie, czy na drodze analizy odwrotnej z wykorzystaniem wybranej metody optymalizacji?
- czy były podjęte próby realizacji obliczeń z wykorzystaniem technik HPC?
- na jakiej podstawie dokonano wyboru wartości współczynnika tarcia na poziomie 0.1?
- czy możliwe jest zaprojektowanie układu wypełniacza w taki sposób, aby wykorzystać efekty grzania oporowego?

5. Podsumowanie

Doktorant na bazie zaproponowanych założeń właściwie przeprowadził prace w swoim doktoracie wykazując się wymaganą dojrzałością naukową. Zaprezentował umiejętności i wiedzę niezbędną do samodzielnego sformułowania oraz rozwiązania zagadnienia naukowego.

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

- ocenę możliwości stosowania włókien Fe-SMA do wytwarzania wyrobów betonowych o podwyższonych własnościach użytkowych,
- opracowanie zaawansowanego modelu numerycznego do wspomagania prac eksperymentalnych nad m.in. włóknami Fe-SMA,
- możliwość praktycznego wykorzystania zdobytej nowej wiedzy.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne są w dużej mierze dyskusyjne i wynikają z zainteresowania recenzenta przedstawioną rozprawą. Praca z tego typu nowatorskim materiałem oraz w skali wymiarowej, z którą zmierzył się doktorant jest niezmiernie skomplikowana i złożona. W związku z powyższym, przedstawione uwagi nie obniżają pozytywnej oceny przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska, jest dziełem dysertabilnym i spełnia warunki określone Ustawą z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Alireza Tabrizikahou do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

