

Prof. dr hab. inż. Tomasz Sadowski, D.h.c.
Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Dróg i Mostów
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Lublin, 19.09 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Alireza Tabrizikahou
pt. „Modelowanie numeryczne i badania eksperymentalne betonu
wysokowartościowego z włóknami ze stopu z pamięcią kształtu”.

1. Przedmiot i podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Alirezy Tabrizikahou pt. „Modelowanie numeryczne i badania eksperymentalne betonu wysokowartościowego z włóknami ze stopu z pamięcią kształtu”, przygotowana na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej; promotor: prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma; promotor pomocniczy: dr hab. inż. Magdalena Łasecka-Plura. Rozprawa została złożona w 2025 r. i mieści się w dyscyplinie „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport”.

Przedmiotem oceny, zgodnie z art.187 ust. 1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, jest sprawdzenie, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi prośba Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy (pismo z dnia 18.06.2025 r.).

2. Opis ogólny rozprawy

Rozprawa została przygotowana w formie dysertacji artykułowej, w języku polskim, i obejmuje wstęp, trzy zasadnicze rozdziały merytoryczne, rozdział z wnioskami i kierunkami badań, literaturę oraz trzy załączniki: A (aktywność naukowa), B (Artykuły B.1–B.4 stanowiące podstawę rozprawy) i C (oświadczenia współautorów). Autor jednoznacznie wskazuje cztery publikacje B.1–B.4 oraz rolę Rys. 1.4, który mapuje etapy badań.

Rozdział 1. Wprowadzenie. Przedstawia motywację i problem badawczy, tezę, cel i zakres pracy, a także „Formę i układ rozprawy” z wyszczególnieniem artykułów B.1–B.4. Wskazano kontekst stopów z pamięcią kształtu (SMA) w budownictwie oraz założenia badawcze dotyczące naprężeń wstępnych generowanych przez krótkie włókna ze stopu z pamięcią kształtu na bazie żelaza (Fe-SMA) w matrycy betonu wysokowartościowego (HPC) i betonu zbrojonego włóknami (FRC).

Rozdział 2. Badania eksperymentalne. Zawiera metodykę i wyniki badań w trzech blokach: (i) zachowanie termomechaniczne Fe-SMA, (ii) wrywanie włókien Fe-SMA z betonu, (iii) próby zginania próbek betonowych z włóknami Fe-SMA (oraz porównawczo stalowymi). Następnie omówiono dyskusję i interpretację wyników odpowiadającą tym trzem obszarom. Rozdział ilustrują m.in. zestawienia wytrzymałości na zginanie i obserwacje rysowania próbek pod różnymi procedurami termicznymi.

Rozdział 3. Modelowanie numeryczne. Opisuje: (i) algorytm generowania losowo rozproszonych włókien (zapewnienie nieprzecinania się włókien i nieprzekraczania granic próbki), (ii) modele materiałowe (matryca betonowa – CDP; Fe-SMA z odwzorowaniem efektu pamięci kształtu), (iii) własności kontaktu matryca–włókno, oraz (iv) weryfikację modelu i analizę wrażliwości siatki. Ujęto implementację w Python/ABAQUS/CAE z interfejsem GUI oraz wizualnym schematem przepływu algorytmu. Rozdział kończą porównania krzywych siła–ugięcie (eksperyment vs MES) dla warunków pokojowych oraz po aktywacji 160 °C i 200 °C.

Rozdział 4. Wnioski i kierunki dalszych badań. Zawiera syntetyczne „Oryginalne elementy badań”, wnioski końcowe z podziałem na ogólne, poznawcze, metodyczne, użyteczne, prognostyczne oraz zarys przyszłych prac.

Literatura i Załączniki. Po korpusie rozprawy zamieszczono literaturę oraz: Załącznik A (aktywność naukowa – publikacje, konferencje, projekty, staże, nagrody, dane naukometryczne), Załącznik B (Artykuły B.1–B.4) i Załącznik C (oświadczenia współautorów).

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że przyjęty układ jest spójny i logiczny; powiązanie korpusu z artykułami B.1–B.4 oraz integralna rola Załącznika B zostały jasno zakomunikowane. Materiał jest napisany poprawną polszczyzną, a strona edytorsko-graficzna jest przejrzysta i czytelna. Autor wykazuje niezbędną ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria lądowa oraz umiejętność porządkowania i syntetyzowania treści w formule dysertacji artykułowej.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów

Temat jest aktualny i ważny: wykorzystanie włókien Fe-SMA do rozproszonego wstępnego sprężania HPC/FRC stanowi krok poza klasyczne pręty/taśmy (zewnętrzne wzmacnianie), otwierając drogę do „aktywnych” kompozytów betonowych. Autor identyfikuje w literaturze luki:

- (i) brak danych o krótkich włóknach Fe-SMA w matrycy betonowej (wobec dominujących badań na Ni-Ti),
- (ii) niepoznane mechanizmy wyrywania Fe-SMA po podgrzaniu,
- (iii) brak mikrostrukturalnych modeli MES z rozproszonymi włóknami Fe-SMA.

Cele pracy są jasno wyartykułowane i spójne z programem badawczym: testy wyrywania (B.3), zginanie trójpunktowe kompozytów z włóknami Fe-SMA i stalowymi (B.4) oraz model MES odwzorowujący losową dystrybucję, kontakt i aktywację Fe-SMA.

Mając powyższe na uwadze uważam, że podjęty przez Autora rozprawy temat jest aktualny i interesujący zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia. Podobnie rzecz ma się z tezą i celem naukowym pracy, które są oryginalne. Podsumowując ten fragment recenzji uważam, że dobór tematu i postawionego celu zasługują na pozytywną ocenę.

3.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

(a) Część eksperymentalna

B.3: 72 próbek ($24 \text{ grupy} \times 3 \text{ powtórzenia}$) objęła zmienne: geometria zakończeń (proste vs. hakowe), mieszanki HPC-1/HPC-2, temperatura (pokojowa/160 °C/200 °C) oraz prędkość obciążania. Najważniejsze wnioski:

- (i) zakończenia hakowe $\sim 2\times$ większa nośność wyrywania niż proste,
- (ii) wzrost temperatury zwykle obniża nośność (silniej dla hakowych),

- (iii) wpływ prędkości jest niewielki,
- (iv) mieszanka HPC-1 daje wyższą nośność i wytrzymałość (ściskanie/zginanie) w całym zakresie temperatur.

Zauważono też anomalię: przy włóknach prostych wzrost z 160 °C do 200 °C czasem nieznacznie zwiększał nośność dla małej prędkości obciążania — wskazując na możliwe zmiany mikrostrukturalne; to sensowna przesłanka do dalszych badań.

B.4: Dla zawartości włókien 2% (obj.), geometrii hakowej i zginania trójpunktowego wykazano, że w temperaturze pokojowej Fe-SMA są „bierne” (nie generują żadnych sił sprężających), a stalowe włókna dają wyższą wytrzymałość na zginanie (22,95 MPa stal vs 20,2 MPa Fe-SMA). Po aktywacji Fe-SMA: 160 °C → 26,65 MPa; 200 °C → 24,39 MPa, przewyższając odpowiednio próbki ze stalą (19,46 MPa; 16,67 MPa). Optimum aktywacji wskazano na 160 °C — maksymalizuje efekt sprężający przy ograniczeniu degradacji wiązania i matrycy.

W mojej ocenie, część eksperymentalna jest dobrze zaprojektowana (sensowny dobór zmiennych wpływu, porównanie ze stalą, identyczna geometria włókien dla porównania) i prowadzi do spójnego obrazu: skuteczność Fe-SMA jako rozproszonego „mikro-sprężenia” potwierdzona po aktywacji 160 °C.

(b) Część obliczeniowa (MES)

Autor opracował algorytm losowej dystrybucji włókien (bez wzajemnego przecinania i bez „dotykania” granic próbki), zastosował model CDP dla betonu oraz ujemny współczynnik rozszerzalności termicznej dla Fe-SMA, aby odwzorować odzysk kształtu i naprężenia odzyskowe (≈360 MPa przy 160 °C; ≈385 MPa przy 200 °C). Kontakt włókno–beton odwzorowano modelem tarcia + więzi kohezji z rozróżnieniem końców włókna (6 mm) i odcinka środkowego (23 mm), co skutecznie replikuje obserwowane zjawisko wyciągania włókien haczykowych mimo uproszczenia geometrii w MES.

Walidację przeprowadzono na krzywych siła–ugięcie z prób zginania (różne rozmiary siatki); wyniki numeryczne dobrze śledzą trendy eksperymentów oraz rozkłady naprężeń ściskających w matrycy i uszkodzeń rozciąganych. Zwrócono uwagę na koszt obliczeń (rzędu dni dla małej próbki z ~750 włóknami), co uczciwie sygnalizuje ograniczenia bezpośredniego modelowania milionów włókien.

Wkład oryginalny obejmuje:

- (i) pierwszą, systematyczną ocenę wyrywania krótkich Fe-SMA w HPC pod wpływem temperatury/końca włókna/prędkości/mieszanki (B.3),

- (ii) eksperymentalny dowód skuteczności rozproszonego wstępnego sprężenia krótkimi Fe-SMA w zginaniu (B.4),
- (iii) wiarygodny model MES, z algorytmem losowej dystrybucji i weryfikacją siatkową.

Podsumowując ten fragment recenzji pod względem merytorycznym wartość naukową rozprawy oceniam wysoko.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Recenzowana rozprawa doktorska jest cenną inicjatywą, bo nie tylko porządkuje i syntetyzuje stan wiedzy o kompozytach betonowych z krótkimi włóknami Fe-SMA (B.1–B.2), ale przede wszystkim dostarcza oryginalnych wyników eksperymentalnych i numerycznych (B.3–B.4) o znaczeniu praktycznym dla inżynierii materiałów i konstrukcji. Podczas lektury nasunęły się jednak następujące uwagi krytyczne, uwagi dyskusyjne, sugestie, komentarze i pytania do Autora:

- 1) W B.3 liczba próbek oraz bogaty zestaw wariantów (geometria włókien, procedury termiczne, receptury matrycy, szybkość obciążania) istotnie wzmacniają wiarygodność wniosków. W B.4 warto rozważyć zwiększenie liczności serii oraz włączenie dodatkowych zmiennych eksploatacyjnych (np. szybkość przyłożenia obciążenia, obciążenia cykliczne/zmęczeniowe). Prezentacja wyników w B.4 jest przejrzysta; wskazane rozszerzenia można ująć w przyszłych pracach Autora.
- 2) Badane elementy zginane w B.4 mają niewielkie rozmiary w relacji do długości włókien, co może sprzyjać lokalnym niejednorodnościom rozproszenia i efektom brzegowym. Dla ograniczenia potencjalnych artefaktów rekomenduje się powtórzenie wybranych wariantów na większych próbkach, aby potwierdzić uogólnialność wniosków.
- 3) Dla próbek z rzędu $\sim 10^2$ – 10^3 włókien pełne odwzorowanie mikrostruktury jest uzasadnione i obliczeniowo osiągalne. Przy przejściu do elementów inżynierskich (belki/płyty w skali metrów) ten poziom szczegółowości może skutkować wielotygodniowymi obliczeniami. Rekomenduje się wykorzystanie metod homogenizacji (RVE) lub podejść wieloskalowych (np. FE² / modeli zastępczych dla włókien) w celu utrzymania wysokiej dokładności przy znaczącym skróceniu czasu analiz.

- 4) Skoro B.4 zawiera zestawienia statystyczne, naturalnym rozwinięciem jest ocena relaksacji włókien Fe-SMA po aktywacji oraz długoterminowa stabilność sprężenia w betonie (np. po 1 miesiącu i po 1 roku), z uwzględnieniem wpływu skurczu i pełzania matrycy oraz cykli temperaturowych/środowiskowych.
- 5) Wyniki wskazują, że aktywacja cieplna generuje efektywne siły wstępnego sprężenia, lecz jednocześnie wpływ nagrzewania na matrycę i interfejs jest istotny. W B.4 małe próbki można było równomiernie wygrzać w komorze; w skali belek/płyt proces ten staje się kosztowny i trudny. Warto zbadać alternatywne metody aktywacji lokalnej (np. indukcyjną) pozwalające na selektywne nagrzewanie włókien w konstrukcjach o dużych gabarytach.
- 6) W B.4 odnotowano niewielkie osiadanie włókien wynikające z różnicy gęstości. W elementach o większych wymiarach zjawisko to może się nasilać ze względu na dłuższy czas wiązania. Rekomenduje się zbadanie modyfikacji reologii mieszanek (np. domieszki modyfikujące lepkość, optymalizacja uziarnienia i w/c, dobór superplastyfikatora pod kątem stabilności) w celu ograniczenia osiadania włókien przy zachowaniu urabialności.

Przedstawione powyżej uwagi nie mają wpływu na moją pozytywną ocenę jej merytorycznej zawartości.

5. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Alireza Tabrizikahou pt. „Modelowanie numeryczne i badania eksperymentalne betonu wysokowartościowego z włóknami ze stopu z pamięcią kształtu” rozwiązuje postawione zadanie naukowe, polegające na identyfikacji i ilościowej ocenie zależności między parametrami aktywacji termicznej krótkich włókien Fe-SMA (w szczególności temperatura 160–200 °C, geometria zakończeń, udział objętościowy i losowa dystrybucja w matrycy) a odpowiedzią mechaniczną kompozytu HPC/FRC (nośność i ciągliwość przy zginaniu, mechanizmy zarysowania oraz wyrywania), z równoległą weryfikacją numeryczną w modelu. Stwierdzam, że sformułowane w rozprawie cele badawcze są zasadne, oryginalne i zostały osiągnięte; w szczególności wyniki B.4 stanowią spójne zwięzłe podsumowanie programu badawczego i wykazują wyraźny potencjał aplikacyjny.

W tym miejscu chciałbym również zaznaczyć, że uwagi krytyczne zawarte w punkcie 4 recenzji nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Zostały podane w celu dyskusji i

uporządkowania przedstawionej treści z nadzieją, że w przyszłości zostaną uwzględnione przez Autora podczas przygotowywania monografii oraz artykułów do czasopism naukowych z tej tematyki. Mając powyższe na uwadze można uznać rozprawę za przygotowaną na bardzo dobrym poziomie. Moim zdaniem Autor rozprawy wykazał się głęboką znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, a także bardzo dobrą umiejętnością programowania i prowadzenia badań doświadczalnych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora oraz potwierdza jego umiejętność do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej a także spełnia obecnie obowiązujące wymagania ustawowe dotyczące nadania stopnia doktora. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie proponuję wyróżnienie dla recenzowanej pracy doktorskiej. W mojej ocenie wartość rozprawy jest ponadprzeciętna. Stanowi ona cykl 4 prac opublikowanych w najlepszych czasopismach wydawanych przez oficynę Elsevier. Szczególnie należy podkreślić nowatorstwo metodyki badawczej, oryginalność osiągnięć naukowych, oraz bardzo wysoki poziom warsztatu naukowego. Bardzo istotnym zagadnieniem jest możliwość wykorzystania w praktycznych zastosowaniach inżynierskich.