

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde
Katedra Wytrzymałości Materiałów
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

tel.: (0-58) 347-22-03
e-mail: wild@pg.gda.pl
fax.: (0-58) 347-16-70

Gdańsk, 2025.11.07

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Alirezy Tabrizikahou

**pt. „*Modelowanie numeryczne i badania eksperymentalne betonu
wysokowartościowego
z włóknami ze stopu z pamięcią kształtu*”**

wykonanej pod kierunkiem prof. Mieczysława Kuczmy

1. Podstawa opracowania

Podstawą do wykonania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport, prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, z dnia 18 czerwca 2025 r.

2. Ogólna charakterystyka dysertacji

Przedmiotem rozprawy jest analiza wpływu zastosowania włókien Fe-SMA na właściwości mechaniczne betonu. W pracy wykonano badania eksperymentalne, których celem było określenie odporności na wrywanie włókna Fe-SMA dla różnych jego geometrii z elementu betonowego wykonanego z różnych mieszanek betonowych oraz badania wpływu wstępnego sprężenia w teście zginania próbek betonowych zbrojonych włóknami Fe-SMA.

Rozprawa ma formę dysertacji artykułowej. Praca podzielona jest na 4 rozdziały i jest napisana w języku polskim. Konstrukcja pracy jest poprawna: po wstępie następują trzy zasadnicze rozdziały merytoryczne, następnie rozdział z wnioskami i kierunkami dalszych badań, literatura oraz trzy załączniki. Załącznik A zestawia aktywność naukową doktoranta, Załącznik B gromadzi cztery publikacje (B.1–B.4), które stanowią podstawę merytoryczną pracy, natomiast Załącznik C zawiera oświadczenia współautorów.

3. Treść rozprawy

Rozprawa bazuje na tematyce czterech oryginalnych artykułów oznaczonych jako B.1÷B.4 i opublikowanych w prestiżowych, recenzowanych czasopismach naukowych indeksowanych w bazie *Journal Citation Reports* (JCR). Rozprawa ma jednak charakter tylko streszczenia badań opublikowanych w B.1÷B.4, dlatego też treść bazowych czterech artykułów będzie omówiona w pierwszej kolejności.

Artykuły B.1 i B.2 są pracami przeglądowymi zawierającymi znaczą liczbę odniesień literaturowych (B.1 zawiera 216 pozycji, zaś B.2 zawiera 205 odniesień). Praca B.1 koncentruje się na przeglądzie zastosowań aktywnych, pasywnych i hybrydowych systemów przenoszenia i kontroli drgań konstrukcji oraz izolacji sejsmicznych opartych na SMA z podaniem ograniczeń oraz najczęściej stosowanego ich modelowania. Artykuł B.2 jest przeglądem badań eksperymentalnych, metod obliczeniowych, ograniczeń i potencjału kompozytów SMA-FRC (betonu zbrojonego włóknami ze stopów z pamięcią kształtu).

Praca B.3 przedstawia, przeprowadzone przez Doktoranta i zespół, badania eksperymentalne dotyczące określenia odporności na wyrywanie włókien ze stopu z pamięcią kształtu, na bazie żelaza (Fe-SMA), zatopionych w betonie wysokowartościowym (HPC).

Artykuł B.4, jest kluczową pracą rozprawy i dotyczy badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych związanych z problematyką betonów zbrojonych włóknami Fe-SMA. Recenzent, czytając załączone artykuły i rozprawę, odczuwał pewien niedosyt, gdyż w treści rozprawy nie wprowadzono informacji, które nie znalazły się także w omawianych artykułach B.1÷B.4. Takie dane i informacje byłyby przydatne dla badaczy, którzy chcieliby kontynuować badania rozpoczęte przez Doktoranta.

Rozdział 1 (**Wprowadzenie**) przedstawia motywację, sformułowaną tezę, cel i zakres badań, a także porządkuje strukturę całej pracy z odwołaniami do B.1–B.4. W rozdziale 1 nakreślono tło zastosowań stopów z pamięcią kształtu w budownictwie oraz przyjęto założenia dotyczące generowania rozproszonego naprężenia wstępnego przez krótkie włókna Fe-SMA zatopione w matrycy betonowej o wysokich parametrach.

W rozdziale 2 (**Badania eksperymentalne**) omówiona jest metodyka i wyniki eksperymentalnych badań w trzech komplementarnych blokach: (1) właściwości termomechaniczne materiału Fe-SMA istotne z punktu widzenia aktywacji, (2) nośność i mechanizm wyrywania pojedynczych włókien z betonu, (3) odpowiedź próbek zginanych z udziałem włókien Fe-SMA w odniesieniu do włókien stalowych. Analiza uzyskanych wyników obejmuje m.in. zestawienia wytrzymałości na zginanie oraz obserwacje procesu rysowania w zależności od różnych scenariuszy obciążenia temperaturą.

Przyglądając się bardziej szczegółowo rozdziałowi eksperymentalnemu podkreśla się, że przeprowadzone zostały badania (B3) odporności na wyrywanie włókien ze stopu z pamięcią kształtu na bazie żelaza (Fe-SMA) zatopionych w wysokowartościowym betonie (HPC). Przetestowano 24 grupy próbek, każda po trzy próbki (łącznie 72 próbki). Minimalną liczbę trzech próbek w jednym teście określono na podstawie normy ASTM C192/C192M. Probki utworzono z dwóch rodzajów/kształtów włókien Fe-SMA o średnicy 0,5mm z haczykami na końcach (6+23+6=35 mm) i włóknami prostymi (23 mm), zatopionymi w dwóch różnych

mieszkankach betonowych, badając je w trzech zakresach temperatur, tj.: otoczenia (20°C), 160°C i 200°C oraz przy dwóch różnych prędkościach obciążenia $0.2\text{mm}/\text{min}$ i $2\text{mm}/\text{min}$. Daje to 24 grupy po 3 próbki. Długość zatopienia (zakotwienia) w betonie wynosiła $17,5\text{mm}$ w obu przypadkach. W tych samych warunkach temperaturowych badano beton w którym były zatopione próbki włókien Fe-SMA, na próbkach sześciennych $40\times 40\times 40\text{ [mm]}$ na ściskanie i beleczkach $40\times 40\times 160\text{ [mm]}$ na zginanie w teście trójpunktowym (praca B.4). Próbki sześciennie do testów ściskania odzyskano z próbek poddanych wcześniej zginaniu przez ich odcięcie z końców beleczek. Rejestrowano siłę i ruch trawersy (szczęk) maszyny wytrzymałościowej. Badania z B.3. wykazały, że 3 z 4 testowanych parametrów miały istotny wpływ na odporność na wrywanie włókien Fe-SMA z betonu, tj.: kształt końców włókien (haczyki), mieszanka betonowa i typ obciążenia temperaturą, zaś szybkość obciążania nie miała wpływu na proces odporności przy wrywaniu włókna.

Termomechaniczne zachowania samych włókien Fe-SMA (B.3,B.4) testowano w warunkach odpowiadających aktywacji termicznej do poziomu 160°C i 200°C , w celu oceny generowania sił sprężających. Przeprowadzono $2\times 2=4$ testy wstępnie naprężonych (100MPa) włókien Fe-SMA z haczykami, które poddano kontrolowanemu ciągłemu obciążeniu termicznemu i mechanicznemu w komorze. Uzyskano odpowiednie krzywe cyklu termicznego na włókna. W pracy B.4, w celu porównania i oceny efektywności sprężania betonu za pomocą krótkich włókien Fe-SMA, przebadano trzy typy próbek beleczkowych w różnych warunkach temperaturowych. Parametry materiałów i środowiska użyte w testach z B.4 odpowiadały, tym zdefiniowanym i uzyskanym w B.3, tj. B.4 jest kontynuacją badań z B.3 z innym programem badawczym. Wymiary beleczek $40\times 40\times 160\text{ [mm]}$ przyjęto zgodne z powszechnie stosowanymi w badaniach zapraw. Rozważano trzy grupy beleczek zbrojonych: włóknami Fe-SMA, drugą porównawczą zbrojoną analogicznymi lecz komercyjnymi włóknami stalowymi oraz trzecią grupę beleczek z czystego betonu (niezbrojoną) jak w pracy B.3. W beleczkach zbrojonych przyjęto 2% ułamek objętościowy włókien. Wylano po 18 próbek każdego typu, co łącznie dało 54 próbki. Ponieważ włókna Fe-SMA rozproszone w betonie wymagały aktywacji termicznej uwzględniono trzy zakresy temperatury: otoczenia (20°C), 160°C i 200°C . W temperaturze aktywacji 160°C stop Fe-SMA, zgodnie z badaniami z B.3, wykazuje naprężenia odkształceniowe $\sim 350\text{MPa}$, zaś dla celów porównawczych, uwzględniono również temperaturę aktywacji 200°C generującą naprężenia wyższe, tj. $\sim 385\text{MPa}$. Do każdego zakresu temperatur przygotowano po sześć próbek. Wykonano testy 3-punktowe rejestrując siłę i ruch trawersy maszyny wytrzymałościowej. Wyniki badań przedstawiono jako średnie z pomiarów sześciu próbek w każdej z kategorii. Badana potwierdziły oczekiwania intuicyjne, że użycie włókien Fe-SMA po ich aktywacji sprężającej betonu zwiększają nośność beleczek, co dało wyższą wytrzymałość na zginanie (odpowiednio $26,65\text{MPa}$ (160°C) i $24,39\text{MPa}$ (200°C)), w porównaniu do ich odpowiedników w tych samych warunkach z włóknami stalowymi (odpowiednio $19,46\text{MPa}$ (160°C) i $16,67\text{MPa}$ (200°C)).

Rozdział 3 (**Modelowanie numeryczne**) przedstawiono modele numeryczne służące do symulacji zachowania betonów zbrojonych włóknami Fe-SMA (B.4. rodz. 4), bazujące na wynikach eksperymentalnych i opracowane w ramach systemu obliczeniowego ABAQUS/CAE. Do definiowania losowego rozkładu włókien w próbkach stworzono uniwersalny autorski algorytm i odpowiedni skrypt w języku Python zintegrowany z ABAQUS/CAE. Beton opisano wykorzystując biblioteczny model CDP (*Concrete Damage*

Plasticity) oferowany przez system ABAQUS. Do modelu CPD na bazie własnych wyników badań betonu opracowano Autorski algorytm generowania danych wejściowych kodowany w formie skryptu w Pythonie zintegrowanego z ABAQUS/CAE. Do implementacji zachowania stopu Fe-SMA zastosowano ujemny współczynnik rozszerzalności cieplnej (*Thermal shrinkage*) ujmując efekt kurczenia się włókna podczas odzyskiwania kształtu regulowanego odpowiednim poziomem temperatur.

Ostatecznie stworzono dwa modele numeryczne, pierwszy do symulacji szacowania własności kontaktu włókno-beton (1), bazujący na testach wrywania oraz docelowy dedykowany do symulacji trójpunktowego zginania beleczek (2). Testy numeryczne dla wrywania przeprowadzono dla kilku przypadków, choć trudno precyzyjnie stwierdzić dla ilu, zaś dla zginania trójpunktowego rozpatrzono sześć wariantów w celu oceny zbieżności podziału. Ich wyniki odniesiono do wcześniejszych eksperymentów. W ramach symulacji (1) zaproponowano efektywne uwzględnienie geometrii haczyka przez przypisanie różnych właściwości styku włóknom prostym. Wynikiem symulacji (2) jest potwierdzenie skutecznego wzmocnienia betonu przez jego sprężenie wywołane termiczną aktywacją włókien Fe-SMA.

W rozdziale 4 (***Wnioski i kierunki dalszych badań***) zawarto syntetyczne podsumowanie osiągnięć (z wyodrębnieniem elementów oryginalnych) oraz uporządkowane wnioski: ogólne, poznawcze, metodyczne, użyteczne i prognostyczne. Końcowa część wskazuje również możliwe ścieżki kontynuacji prac – od skalowania rozwiązań na elementy konstrukcyjne po zagadnienia długotrwałej trwałości i doprecyzowania procedur projektowych.

Zamieszczona w rozprawie bibliografia jest obszerna i aktualna, a powiązanie tekstu pełniącego funkcję przewodnika po artykułach B.1–B.4 zostało zrealizowane w sposób, precyzyjny i jednoznaczny, choć jak Recenzent wcześniej zauważył, niektóre informacje szczegółowe mogłyby uzupełnić rozprawę ułatwiając analizę zrealizowanego procesu badawczego i ewentualną kontynuację rozpoczętych badań. Podkreśla się, że opublikowanie czterech artykułów w bardzo dobrych, międzynarodowych czasopismach, w trakcie realizacji doktoratu, jest znaczącym osiągnięciem.

4. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne

4.1. Ocena trafności wyboru tematyki

Impulsem do wyboru tematyki rozprawy jest poszukiwanie nowych inteligentnych materiałów umożliwiających podniesienie bezpieczeństwa i trwałości użytkowania obiektów budowlanych. Większość badań wykorzystujących metale z pamięcią koncentrowała się na prętach i taśmach, podczas gdy prace nad zachowaniem się krótkich włókien SMA, w szczególności Fe-SMA w betonie poddanym różnym obciążeniom termicznym, nie zostały do tej pory szerzej przeanalizowane. Podjęty w rozprawie temat, zastosowania krótkich włókien Fe-SMA do wytwarzania rozproszonego sprężenia w betonie wysokowartościowym oraz ocena skutków aktywacji cieplnej, jest zagadnieniem aktualnym i potencjalnie rozwojowym.

Teza i cel naukowy mają oryginalny charakter oraz są właściwie sformułowane w odniesieniu do zrealizowanych badań. Uznaje się wybór tematu oraz sposób sformułowania celu badań za trafne i zasługujące na pozytywną ocenę.

4.2. Zawartość i układ rozprawy

Przyjęty układ rozprawy jest logiczny i wewnętrznie spójny. Tekst napisano poprawną polszczyzną, zaś warstwa graficzna i redakcyjna jest poprawna i przyjazna dla czytającego.

4.3. Uwagi krytyczne, dyskusje i pytania

Wybrane uwagi szczegółowe oraz pytania przedstawione są w poniższych punktach i są one przedstawione w kolejności wynikającej z układu tekstu w rozprawie doktorskiej.

1. Pytanie, wątpliwość. Czy jest możliwe, aby sprężenie stopem SMA indukowało jednocześnie ściskanie w stopie SMA i w betonie? Strona 2 wiersz 16 licząc od dołu.
2. Interesująca jest koncepcja wyboru geometrii włókna z haczykiem. Czy zastosowanie większego kąta zagięcia nie skutkuje lepszą odpornością na wyrywanie? Jakie przesłanki zdeterminowały wybór takiej a nie innej geometrii włókna z haczykiem?
3. Wymiary przekroju beleczek $40 \times 40 \times 160$ [mm] są tego samego rzędu co włókna z haczykami $l = 35$ mm. Standardowy test do badania zapraw może nie być najlepszym wyborem do oceny nośności belek z zaproponowanym rozproszonym włóknom o takich wymiarach. Czy te proporcje nie preferują ułożenie osi włókien w mieszance betonowej zbliżone do osi beleczki (patrz np. rys. 2.14 lub wyniki symulacji rys. 3.5 i 3.7).
4. Czy w trakcie przygotowania betonu z włóknami Fe-SMA nie obserwowano, tzw. „skłębienia” włókien, jak to ma miejsce w przypadku innych rodzajów włókien i większych (przemysłowych) ilości mieszanki? Wydaje się, że dodatkowy haczyk może powodować spinanie, łączenie się włókien.
5. W treści tabeli z rys. 3.3 dotyczącego algorytmu danych do modelu CPD, pojawia się parametr „lepkość”. Proszę o ustosunkowanie się do tego parametru, ponieważ poza podaniem jego wartości w przykładach z pracy B.4 nie odniesiono się do zagadnienia lepkości w równaniach konstytutywnych.
6. System ABAQUS, pod kątem aproksymacji przestrzennej rozpatrywanego ośrodka ciągłego, oferuje bogatą bibliotekę elementów skończonych zarówno bardzo prostych jak i bardzo złożonych. Autor, w kontekście wymiaru dziedziny aproksymacji po przestrzeni, używa elementów 1-wymiarowych (prętowe) do opisu włókien symulacja (2), 3-parametrowych (bryłowych) do opisu betonu w obu symulacjach (1) i (2) i także włókien w symulacjach (1) oraz pośrednio przyporządkowanie 2-wymiarowej (powierzchniowej) do opisu parametrów kontaktu w symulacji (1).

W obu symulacjach (1) i (2) Autor dość precyzyjnie opisuje parametry materiałowe, które mogą być wykorzystane przez innych czytelników. Niestety brak takiej precyzji w odniesieniu do dyskretyzacji przestrzennej.

7. Uwaga dotycząca symulacji (2) trójpunktowego zginania beleczek. Recenzent domyśla się, że do modelowania zbrojenia włóknami Fe-SMA w betonie, użyto najprawdopodobniej techniki tzw. elementów zagnieżdżonych (zanurzonych, zatopionych) (*embedded element technique*), na co wskazują np. rys. 3.7 i 3.9. Niestety w pracy nie podano informacji, która jednoznacznie zdefiniowałaby użytą technikę obliczeniową.

Wątpliwości mogą wiązać się z rozważaniem, iż klasyczna technika elementów zagnieżdżonych bazuje na założeniu idealnych więzów między elementami zanurzonymi (1D), a otaczającym ośrodkiem (3D). Deformacja (siatki) elementów zagnieżdżonych jest rezultatem tylko i wyłącznie przypisania im przez interpolację deformacji otaczającego ośrodka zgodnie z rzędem bryłowych aproksymujących funkcji kształtu. W tym sensie elementy zagnieżdżone nie wprowadzają i nie mają własnych (niezależnych) stopni swobody w globalnym układzie równań. Zatem w kontekście więzów idealnych nie jest jasny sposób odwzorowania haczyków elementów zagnieżdżonych w ramach włókien prostych, przez zmianę ich parametrów wiązania jego różnych części, jak sugeruje rys. 3.5. Interesujące będzie poznanie opinii Doktoranta w przedstawionym w niniejszym punkcie pytaniu.

Uwaga o charakterze ogólnym. Recenzent podkreśla, że tematyka przeprowadzonych badań jest bardzo ciekawa, a przyjęte procedury badawcze poprawne. Celem prowadzenia badań naukowych, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, jest poszukiwanie nowych rozwiązań, które mogą znaleźć zastosowanie w szeroko pojętej infrastrukturze. Należy także prowadzić prace badawcze w przypadku, gdy zdolność wdrożeniowa jest trudna do określenia. Lektura rozprawy podsuwa jednak Recenzentowi pewne wątpliwości. Idea wykorzystania metali z pamięcią do sprężenia elementu betonowego, na przykład przy jego naprawie, jest bardzo atrakcyjna, ale niestety metale z pamięcią muszą zostać poddane stymulacji do wystąpienia przemiany fazowej między austenitem a martenzytem na poziomie krystalicznym. Dla badanego rozwiązania stymulatorem jest temperatura, która aktywuje Fe-SMA, ale jednocześnie nie jest ona korzystna na mieszanki betonowej. Także trudny do przewyciężenia będzie aspekt ekonomiczny. Nawet znacząco tańsze włókna z Fe-SMA, w porównaniu do Nitinolu, będą trudne do zastąpienia standardowego, stalowego zbrojenia na placu budowy mając na uwadze, że uzyskany w warunkach laboratoryjnych wzrost wytrzymałości elementów z Fe-SMA jest zauważalny, ale zdaniem Recenzenta, jest on niewystarczający do przekonania biznesu do jego zastosowania w praktyce w najbliższych latach.

5. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa przedstawia spójny i dobrze udokumentowany, oryginalny program badawczy betonu zbrojonego z włóknami ze stopu z pamięcią kształtu na bazie żelaza Fe-SMA, który dobrze łączy eksperyment i modelowanie metodą elementów skończonych. Główne wyniki badań mają wartość poznawczą i nie można wykluczyć, że w przyszłości osiągną one potencjał wdrożeniowy w budownictwie. Na szczególne podkreślenie zasługuje kompletność zrealizowanych badań, czyli wykonanie badań eksperymentalnych wykorzystanych do walidacji modelu obliczeniowego, który umożliwia analizy nośności zarówno małych beleczek, jak i regularnych elementów konstrukcyjnych inteligentnych

obiektów budowlanych. Recenzent po raz kolejny podkreśla **zasługujący na wyróżnienie** element rozprawy, którym jest opublikowanie wyników badań w czterech artykułach w bardzo prestiżowych, międzynarodowych czasopismach wydawnictwa Elsevier.

Recenzent zaznacza, że przedstawione powyżej uwagi dyskusyjne i krytyczne traktowane są jako konstruktywne wskazówki do przyszłych badań lub możliwej dyskusji podczas obrony rozprawy doktorskiej.

Biorąc powyższe pod uwagę uznaje się, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania **stawiane pracom doktorskim i jest rekomendowana do dopuszczenia do obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej**

