

Wrocław, 07.08.2023 r.

dr hab. inż. Monika Podwórna, prof. uczelni  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Katedra Mechaniki Budowli i Inżynierii Miejskiej  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

*Przyjęto*  
*17/08/2023*  
DZIEKAN  
Wydziału Inżynierii Lądowej  
*[Signature]*  
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**mgra inż. Kacpra Wasilewskiego**  
**pt. „Ocena zastosowania materiałów z pamięcią kształtu**  
**we wzmacnianiu konstrukcji historycznych”**

## 1. Podstawa i przedmiot opracowania

### 1.1. Podstawa formalna

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport w Politechnice Warszawskiej Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni z dnia 19 czerwca 2023 r. nr WTBD.521.DR.98.2023, wraz z Uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny nr 714/2023 z dnia 06 czerwca 2023 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Kacpra Wasilewskiego oraz z umową o dzieło na recenzję doktorską.

### 1.2. Przedmiot opracowania

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Kacpra Wasilewskiego pt. „Ocena zastosowania materiałów z pamięcią kształtu we wzmacnianiu konstrukcji historycznych”, złożona na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, napisana pod kierunkiem promotora Pana Profesora dr hab. inż. Artura Zbiciaka. Promotorem pomocniczym w pracy był Pan dr inż. Wojciech Terlikowski.

Doktorant reprezentuje dziedzinę *nauk inżynieryjno-technicznych*, dyscyplinę *inżynieria lądowa, geodezja i transport*.

### 1.3. Podstawa prawna

Podstawą prawną opracowania są:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz.U. 2023 poz. 742 z późniejszymi zmianami);
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2018 poz. 1669 z późniejszymi zmianami)  
*Art. 179. U. 1. Przewody doktorskie, postępowania habilitacyjne i postępowania o nadanie tytułu profesora wszczęte i niezakończone przed dniem wejścia w życie ustawy, o której mowa w art. 1, są przeprowadzane na zasadach dotychczasowych, z tym że jeżeli nadanie stopnia doktora, stopnia doktora habilitowanego lub tytułu profesora następuje po dniu 30 kwietnia 2019 r., stopień lub tytuł nadaje się w dziedzinach i dyscyplinach określonych w przepisach wydanych na podstawie art. 5 ust. 3 tej ustawy;*
- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (t.j. Dz.U. 2017 poz. 1789)  
*art. 51.u. 1. Przewody doktorskie i habilitacyjne, niezakończone do dnia wejścia w życie ustawy, są prowadzone na podstawie przepisów dotychczasowych;*
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 stycznia 2018 roku *w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* (Dz. U. 2018, poz. 261).

### 2. Kryterium oceny

W niniejszej opinii, rozprawę analizowano pod kątem spełnienia punktów zawartych:

- w art. 13 u. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*, a mianowicie:  
*Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej;*

- w art. 187 z dnia 20 lipca 2018 r. Ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, a mianowicie:
  1. *Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*
  2. *Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.*
  3. *Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.*
  4. *Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim. W przypadku gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim.*

### **3. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgra inż. Kacpra Wasilewskiego pt. *„Ocena zastosowania materiałów z pamięcią kształtu we wzmacnianiu konstrukcji historycznych”* dotyczy opisu zjawisk zachowania się tzw. materiałów inteligentnych (ang. *smart materials*), w szczególności stopów z pamięci kształtu (SMA – ang. *Shape Memory Alloys*). Rozprawa doktorska zawiera obszerną dyskusję dotyczącą wykorzystania SMA we wzmacnianiu konstrukcji, zwłaszcza historycznych konstrukcji murowych na terenach sejsmicznych.

Zakres pracy obejmuje sformułowanie modeli konstytutywnych SMA przy wykorzystaniu struktur reologicznych oraz ich implementacja w znanych programach komputerowych (COMSOL MULTIPHYSICS i WOLFRAM MATHEMATICA) do ewentualnego zastosowania we wzmacnianiu historycznych konstrukcji budowlanych. W pracy porównano dwa rodzaje wzmocnienia konstrukcji murowych zaprojektowane na podstawie takich samych kryteriów: klasyczne ściągi stalowe o wysokiej sztywności oraz ściągi z elementami supersprężystymi ze stopów z pamięcią kształtu. Udowodniono pozytywny wpływ ściągnięć SMA – mniejsze siły przekazywane na konstrukcję oraz lepsze właściwości tłumienia drgań konstrukcji wynikające z dyssypacji energii w trakcie przemian fazowych zachodzących w ściągu.

Wnioski uzyskane na podstawie przedmiotowych analiz mogą być wykorzystane do nowoczesnego wzmacniania konstrukcji poddanych obciążeniom dynamicznym.

Rozprawę podzielono na 8 rozdziałów. Dodatkowo po ostatnim rozdziale zamieszczono spis literatury (147 pozycji), spis rysunków (100 pozycji) oraz spis tablic (23 pozycji). Do pracy dołączono 3 załączniki oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera 85 ponumerowanych wzorów. Łącznie praca liczy 179 stron.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie wraz z jasno określonym celem i zakresem pracy.

Rozdział 2 przedstawia opis stopów SMA; w szczególności ich najważniejszych właściwości pod kątem zastosowania do wzmacniania konstrukcji (tj. pamięć kształtu oraz supersprężystość). W rozdziale zamieszczono opis badań doświadczalnych przeprowadzonych przez Doktoranta.

Rozdział 3 poświęcono zagadnieniu wzmacniania konstrukcji. Skupiono uwagę głównie na konstrukcjach historycznych. Omówiono zarówno pasywne, jak i aktywne metody wzmacniania konstrukcji. Szeroko opisano przykłady wzmocnień konstrukcji historycznych z wykorzystaniem stopów z pamięcią kształtu.

Rozdział 4 dotyczy zagadnienia modelowania matematycznego oraz numerycznych implementacji zjawisk supersprężystości oraz pamięci kształtu. Szczegółowo opisano modele w 3 środowiskach: a) COMSOL MULTIPHYSICS - pakiet symulacyjny, rozwiązujący układy nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych przy wykorzystaniu MES; b) SIMULA ABAQUS - program komercyjny dedykowany zaawansowanym analizom strukturalnym z wykorzystaniem MES; c) ANSYS MECHANICAL – oprogramowanie do symulacji MES pokrywające kompleksowo zapotrzebowanie związane z analizami mechanicznymi.

Rozdział 5 prezentuje opis elementów struktur reologicznych. Przedstawiono autorskie rozwinięcie literaturowych modeli SMA o strukturę uwzględniającą zmianę sztywności materiału przed i po przemianie fazowej w warunkach izotermicznych. Uzupełnieniem rozdziału jest załącznik A z kodem programu napisanego w środowisku WOLFRAM MATHEMATICA, służącego do porównań wariantów symulacji drgań oscylatora o 3 stopniach swobody (model trzykondygnacyjnej ramy stalowej) bez i ze wzmocnieniem SMA, poddanego oddziaływaniu w postaci przykładowego trzęsienia ziemi.

Rozdział 6 poświęcony jest badaniom laboratoryjnym służącym do wyznaczenia właściwości stopów SMA wykorzystanych do dalszych analiz numerycznych (zob. rozdział 7) jako charakterystyki poszczególnych struktur reologicznych. Uzupełnieniem rozdziału jest załącznik B z pełnym zestawieniem wyników badań doświadczalnych polegających na cyklicznym rozciąganiu próbki nitinolu w formie drutu.

Rozdział 7 prezentuje analizy numeryczne. Obliczenia komputerowe przeprowadzono w programie komercyjnym COMSOL MULTIPHYSICS z wykorzystaniem połączonych modułów SM i PDE. Symulacje numeryczne przedstawiono na fragmencie murowanego budynku

historycznego (wzorzec – fronton bazyliki św. Franciszka w Asyżu) z wymuszeniem sygnału zarejestrowanego w trakcie trzęsienia ziemi w 1989 roku w USA. Uzupełnieniem rozdziału jest załącznik C z przykładowymi pętlami histerezy dla wybranego ściągu w różnych przedziałach czasowych.

Rozdział 8 – podsumowanie pracy. W ostatnim rozdziale rozprawy sformułowano wnioski końcowe oraz wytyczono potencjalne kierunki dalszych prac badawczych w przedmiotowej tematyce.

Stwierdzam, że zaproponowany w rozprawie doktorskiej układ rozdziałów jest logiczny i bardzo przejrzysty. Praca jest napisana starannie, poprawnym językiem. Większość rysunków nie budzi zastrzeżeń.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

##### **4.1. Wybór tematyki rozprawy**

Problematyka rozprawy należy do zagadnień mechaniki konstrukcji budowlanych. Tematyka pracy - możliwości zastosowania materiałów z pamięcią kształtu do wzmacniania obiektów budowlanych – zawarta jest w zakresie badań w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Zagadnienie jest istotne, gdyż pozwala na poszukiwanie skutecznych metod wzmacniania konstrukcji murowych w obiektach zabytkowych. Podjęte badania posiadają zarówno walor naukowy jak i duże znaczenie praktyczne.

Rozważany problem badawczy jest oryginalny. Praca zawiera analizę teoretyczną, symulacje komputerowe i badania doświadczalne przeprowadzone przez Autora. Doktorant zainteresował się zagadnieniem, które nie zostało jeszcze w dostatecznym stopniu zbadane, proponuje autorskie podejście, w którym wskazuje odpowiednie narzędzie rozwiązania tego problemu.

Oceniam podjęty w pracy doktorskiej temat jako bardzo ambitny i zasadny do rozważań naukowych, a wyniki badań i analiz, uważam jako bardzo użyteczne w praktyce budowlanej. Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu w budownictwie jest jeszcze ekonomicznie mało zasadne, ale wskazane są badania materiałów o sterowalnych właściwościach pod kątem ich możliwości jako substytutu klasycznych rozwiązań. W pracy udowodniono korzyści zastosowania materiałów z właściwościami supersprężystości jako wzmocnienia historycznych konstrukcji murowych w przypadku oddziaływań sejsmicznych.

## 4.2. Główne osiągnięcia rozprawy

Rozprawa ma charakter badawczy z elementami teoretycznymi, numerycznymi oraz doświadczalnymi. Głównym zagadnieniem podjętym w pracy jest analiza właściwości stopów z pamięcią kształtu (SMA) pod kątem możliwości ich zastosowania jako wzmocnienie konstrukcji murowych w szczególności historycznych. Główny cel pracy (ocena zastosowania) został osiągnięty przy wykorzystaniu symulacji numerycznych oraz modelu SMA w postaci autorskiej struktury reologicznej. Realizacja celu wymagała od Autora przeprowadzenia studiów literaturowych, wykazania się wiedzą ze znajomości zagadnień teoretycznych, a także wiedzy praktycznej i umiejętności posługiwania się metodami badawczymi.

## 4.3. Ogólna ocena rozprawy

Wszystkie sformułowane cele rozprawy doktorskiej

1. *zamodelowanie zjawiska supersprężystości, charakterystycznego dla SMA, za pomocą struktur reologicznych wraz z propozycją autorskiej modyfikacji umożliwiającej uwzględnienie różnych sztywności poszczególnych faz krystalicznych;*
2. *przedstawienie procedury identyfikacji parametrów elementów struktur reologicznych modelujących SMA;*
3. *przeprowadzenie badań laboratoryjnych mających na celu wyznaczenie właściwości mechanicznych SMA;*
4. *projekt i analiza porównawcza przykładowego zastosowania SMA we wzmocnieniu konstrukcji historycznej na podstawie symulacji w programie COMSOL Mutiphysics, w którym zaimplementowano model materiałowy SMA opisany odpowiednią strukturą reologiczną;*

zostały osiągnięte. Badania naukowe zrealizowane w ramach rozprawy wnoszą wiele oryginalnych elementów w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Podsumowując, o pozytywnej ocenie dysertacji decydują poniższe cechy:

- o tematyka rozprawy jest dobrze dobrana;  
Temat jest ciekawy z poznawczego punktu widzenia. Zagadnienia wymagają zarówno wiedzy ogólnej jak i specjalistycznej.
- o sformułowane tezy i cele pracy należy uznać za wykazane i osiągnięte;

- praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego;  
Oprócz oryginalności, podjęte zagadnienie powiązane jest bezpośrednio z potrzebami praktyki inżynierskiej.
- struktura pracy jest przejrzysta i logiczna;  
Poszczególne rozdziały oraz analizy są dobrze dobrane i właściwie podsumowane.
- stan wiedzy literaturowej jest aktualny;  
Literatura przedmiotu rozprawy jest dobrze rozpoznana zarówno w części dotyczącej zagadnień technicznych, jak i legislacyjnych. Dobór literatury wskazuje na wysokie kompetencje Doktoranta w tym zakresie.
- rozprawa jest dobrze zredagowana;  
Rozprawa jest starannie przygotowana pod względem edytorskim. Zamieszczone rysunki i tablice są czytelne. Terminologia jest prawidłowa.

## 5. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

### 5.1. Uwagi redakcyjne

Bardzo wysoko oceniam walory redakcyjne pracy, niemniej jednak mam kilka drobnych uwag krytycznych:

1. Rys. 2.6 byłby bardziej czytelny, gdyby opis zawierał legendę wykorzystanych kolorów linii (podobnie jak np. rys. 5.18). Dla recenzenta mało zrozumiałe jest „*kolory wykresu odpowiadają poszczególnym etapom*”;
2. Opisy niektórych rysunków (np. rys. 2.9 czy 2.10) składających się z kilku - podpisanych *a, b* lub *a, b, c*, niepotrzebnie zawierają dopisek „*na środku*”, „*po prawej*” – zdaniem recenzenta, wystarczyłby zaznaczony na ilustracji podpunkt *a* i *b* lub *a, b, c*, (podobnie jak na rysunkach cytowanych np. 3.5 czy 3.7);
3. Pozycja literatury nr 62 ma niepełny zapis. Recenzent zauważa brak informacji o aktualnym stanie prawnym, tj. tekst jednolity z 2022 poz. 540 z późniejszymi zmianami;
4. Cel i zakres pracy są bardzo wyraźnie w dysertacji opisane. Recenzentowi brakuje podobnego zapisu sformułowania tezy pracy doktorskiej.

## 5.2. Uwagi merytoryczne

Szczegółowa analiza rozprawy pozwala na przedstawienie kilku uwag o charakterze dyskusyjnym. Uwagi te wymagają skomentowania przez Autora w ramach referatu lub podczas odpowiedzi na pytania w dyskusji.

1. Istotą struktury reologicznej przy przyjęciu założenia jednoosiowego charakteru pracy materiału jest to, że charakterystyka, która odwzorowuje właściwości modelu z akumulacją energii jest określona zależnością między funkcją siły a funkcją przemieszczenia; a dla modelu z dyssypacją energii - między funkcją siły a funkcją prędkości przemieszczenia. Czy w przyjętych modelach reologicznych uwzględniono wrażliwości materiału na prędkość deformacji? Jeżeli nie, to co objawia się brakiem tłumików w strukturach?
2. W pracy przyjęto model SMA w warunkach izotermicznych. Doktorant zauważa jednak, że zjawisko supersprężystości jest zależne od temperatury (zob. np. str. 115 „*Ze względu na izotermiczny charakter analiz numerycznych przeprowadzanych w dalszej części rozprawy, badania nie były zorientowane na określenie wpływu temperatury na ich wyniki. Niemniej jednak, nawet przy niewielkim zakresie zmienności temperatury otoczenia w trakcie badania był on zauważalny.*”). Czy Doktorant mógłby wytłumaczyć czy i jak można uwzględnić wpływ temperatury w modelu konstytutywnym SMA?
3. W rozdziale 4 Autor przedstawia modele materiałowe SMA dostępne w trzech komercyjnych programach umożliwiających symulacje numeryczne konstrukcji (tj. COMSOL MULTIPHYSICS, SIMULA ABAQUS, ANSYS MECHANICAL). Czy zaproponowane w rozprawie relacje SMA można zaprogramować przy zastosowaniu dowolnych komercyjnych kodów MES, które mają otwartą strukturę i umożliwiają użytkownikowi programowanie własnych procedur definiujących konstytutywne cechy materiałów? Czy są jakieś ograniczenia? Jakie są różnice pomiędzy sformułowaniami w ramach innych procedur (np. w ABAQUSie czy ANSYSie)?
4. W rozdziale 5 pracy przedstawiono dwa przykłady symulacji drgań układów konstrukcyjnych z SMA. Pierwszy to oscylator o jednym stopniu swobody (odwzorowanie wspornika) poddany wymuszeniu harmonicznemu. Drugi to oscylator o trzech stopniach swobody (model trzykondygnacyjnej ramy stalowej) poddany oddziaływaniu w postaci wybranego zapisu trzęsienia ziemi w formie funkcji przyspieszenia podstawy w czasie. Dlaczego przy analizie konstrukcji historycznych, Autor skupił swoją uwagę na ramie stalowej?



5. W ramach przeprowadzonych analiz, zaprojektowano wzmocnienie przykładowej konstrukcji murowej frontonu z wykorzystaniem SMA. W rozdziale 7 opisane są 3 kryteria analizy. Recenzentowi brakuje bardziej szczegółowych informacji oraz skróconych obliczeń projektowych.
6. Analiza ekonomiczna: czy ekonomicznie uzasadnione jest stosowanie prętów SMA zamiast stalowych we wzmacnianiu konstrukcji historycznych? Czy Doktorant mógłby porównać uśrednione ceny 11 sztuk 100 cm drutów SMA  $\phi$  1,5 mm wraz z płytami dociskowymi 34,1 cm x 34,1 cm oraz 11 sztuk 100 cm ściąągów stalowych  $\phi$  18 mm wraz z płytami dociskowymi 95,1 cm x 95,1 cm?

Reasumując stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska jest autorskim osiągnięciem naukowym. W pracy nie znajduję błędów merytorycznych. Uwagi Recenzenta mają jedynie charakter dyskusyjny i nie obniżają bardzo dobrej oceny rozprawy doktorskiej.

## **6. Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem niniejszej opinii stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i wnosi wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i wykorzystania odpowiednich metod naukowych i technik badawczych.

Doktorant zrealizował problematykę badawczą określoną w celu oraz w zakresie dysertacji. Poprawnie sformułował tezy pracy oraz udowodnił ich zasadność. Wykorzystał właściwe metody badań i odpowiednie analizy, wnosząc do pracy własne oryginalne elementy.

**Recenzowana rozprawa mgra inż. Kacpra Wasilewskiego pt. „Ocena zastosowania materiałów z pamięcią kształtu we wzmacnianiu konstrukcji historycznych” spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.**

**Stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy oraz o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Monika Podwórna, prof. uczelni



