

Prof. dr hab. inż. **Tomasz SIWOWSKI**  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Dróg i Mostów  
35-959 Rzeszów, ul. Poznańska 2  
e-mail: [siwowski@prz.edu.pl](mailto:siwowski@prz.edu.pl)

Rzeszów, 7.08.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej  
**mgr inż. Janusza Rogowskiego**  
pt. „Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu  
do aktywnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie”

## 1. Przedmiot i podstawa formalna recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Rogowskiego pt. „Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie”, przygotowana na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Renata Kotynia, kierownik Katedry Budownictwa Betonowego na ww. wydziale PŁ.

Recenzję wykonałem na podstawie następujących dokumentów:

- [1] Pismo Przewodniczącego Rady ds. Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport oraz Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej, prof. dr hab. inż. Dariusza Gawina, z dnia 16.06.2023 r.
- [2] Umowa o dzieło nr D/13/2023/W6 z dnia 27.06.2023 r. na opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Janusza Rogowskiego, zawarta pomiędzy recenzentem a Dziekanem Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska PŁ, prof. dr hab. inż. Dariuszem Gawinem.
- [3] Rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Rogowskiego pt. „Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie”, Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Budownictwa Betonowego, Łódź, czerwiec 2023 r. (2 tomy).
- [4] Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669).
- [5] Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, 1088, tekst ujednolicony).
- [6] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik. Rada Doskonałości Naukowej, Warszawa, 2022 r.

Zgodnie z art.187 ust.1 i 2 ustawy [5] oraz poradnikiem RDN [6] niniejsza recenzja zawiera w szczególności następujące oceny:

- a) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje **ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata** w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”;
- b) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Kandydata;
- c) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** lub **oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań naukowych** Kandydata w sferze gospodarczej.

Zgodnie z ustawą [5] oraz poradnikiem RDN [6] brak jest podstaw prawnych, by recenzent wyrażał w recenzji opinie odnoszące się do innych kwestii niż te, które zostały przedstawione powyżej, a które to wynikają jednoznacznie z przepisów ustawy [5]. Jednocześnie recenzent uwzględnił wymaganie sprecyzowane w wytycznych RDN [6], że pozytywna recenzja końcowa rozprawy doktorskiej musi być wynikiem **pozytywnej oceny wszystkich wyżej wymienionych zagadnień**, które podlegają ocenie recenzenta.

## 2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata [3] jest zgodnie z jej tytułem ocena możliwości zastosowania materiałów z pamięcią kształtu SMA (*shape memory alloys*) do aktywnego wzmacniania elementów żelbetowych na zginanie. Podstawowa rozprawa (tom I) liczy 186 stron, podzielonych na 8 rozdziałów, a także streszczenia w języku polskim i angielskim, spis symboli, spis rysunków i tabel oraz piśmiennictwo. Rozprawa zawiera 103 rysunki, 29 tabel, a piśmiennictwo obejmuje 123 pozycje. Integralną częścią rozprawy jest odrębny tom zawierający trzy załączniki (tom II): zestawienie parametrów i wyników badań obcych w dziedzinie aktywnego wzmacniania na zginanie elementów żelbetowych, szczegółowe wyniki własnych badań doświadczalnych Kandydata (5 belek) oraz wyniki pomiarów czujnikami światłowodowymi. Tom II z załącznikami liczy łącznie aż 190 stron, co daje łączną objętość rozprawy 376 stron (!?).

Zgodnie z art.187 ust.3 ustawy [5] rozprawa ma charakter **monografii naukowej**, zawierającej obszerny przegląd stanu wiedzy (rozdział 3), kompleksowy raport z doświadczalnych badań naukowych (rozdziały 4 i 5), część numeryczną (rozdział 6) oraz część analityczną (rozdział 7). Zasadnicza treść rozprawy została poprzedzona wstępem (rozdział 1), ogólną charakterystyką materiałów SMA (rozdział 2) ze szczególnym uwzględnieniem stopu FeSMA użytego przez Kandydata w badaniach własnych (p. 2.2), a rozprawę kończą wnioski, zawierające także postulowane przez Kandydata kierunki dalszych badań (rozdział 8). W odrębnym tomie rozprawy (tom II) Kandydat zamieścił szczegółowe wyniki analizy piśmiennictwa oraz własnych badań doświadczalnych.

**Układ rozprawy**, zarówno od strony formalnej, jak również merytorycznej, jest poprawny. Kandydat prawidłowo rozpoczął rozprawę od przeglądu stanu wiedzy nt. głównego przedmiotu jego prac badawczych, tj. materiałów z pamięcią kształtu, w szczególności opartych na żelazie (FeSMA), a następnie przedstawił bardzo szczegółowy przegląd stanu wiedzy w zakresie aktywnego wzmacniania elementów żelbetowych materiałami FeSMA, zwracając szczególną uwagę na metodą aplikacji wzmocnienia. Na bazie wniosków uzyskanych z przeglądu i analizy stanu wiedzy Kandydat zaplanował własne badania doświadczalne, przedstawiając je w kolejnych rozdziałach rozprawy w standardowy sposób, tj.: materiały i metody badawcze, wyniki badań własnych (umieszczone także w tomie II), analizę tych wyników oraz wnioski końcowe z wykonanych badań, umieszczone częściowo w podsumowaniu rozprawy. Ten standardowy układ raportu z doświadczalnych badań naukowych został w rozprawie twórczo uzupełniony dwoma rozdziałami (części: numeryczna i analityczna), w których Kandydat właściwie wykorzystał wyniki badań doświadczalnych do poszerzenia analizy parametrycznej proponowanej metody wzmocnienia oraz do stworzenia narzędzi projektowych, umożliwiających bezpośrednie wdrożenie wyników jego pracy naukowej.

**Piśmiennictwo** wykorzystane przez Kandydata w rozprawie zawiera łącznie 123 pozycje, z czego zdecydowaną większość stanowią artykuły w zagranicznych czasopismach naukowych. Kandydat wykorzystał jedynie 5 publikacji w języku polskim (o charakterze

ogólnobudowlanym), co jednak nie może dziwić z uwagi na innowacyjny i prototypowy w warunkach krajowych przedmiot badań Kandydata. Dziwić natomiast może fakt, że wśród cytowanego piśmiennictwa jest tylko jedna współautorska praca Kandydata. Oceniając ogólnie wykorzystane przez Kandydata piśmiennictwo można stwierdzić, że zostało ono dobrane prawidłowo, w liczbie adekwatnej do celów naukowych i tezy rozprawy, i zostało bardzo efektywnie wykorzystane zwłaszcza w części rozprawy zawierającej przegląd stanu wiedzy, a także w rozdziale opisującym metody analityczne projektowania wzmocnienia. Kandydat rzetelnie zebrał i przeanalizował wiedzę z większości zagranicznych publikacji w zakresie przedmiotu rozprawy oraz wybranych wytycznych, zawierających stosowne procedury obliczeniowe. Zdecydowana większość wykorzystanych publikacji pochodzi z drugiej dekady XXI w., jest więc to wiedza stosunkowo nowa, dlatego wnioski z jej przeglądu są bardzo aktualne.

### 3. Ogólna ocena merytoryczna rozprawy

#### 3.1. Geneza i zasadność podjęcia tematu

Genezę i uzasadnienie podjęcia tematu przedstawił Kandydat dość przekonująco w p.1.1 i 1.2 rozprawy. Nie ulega wątpliwości, że problem modernizacji (w tym wzmocnienia) istniejących konstrukcji budowlanych (w tym żelbetowych) jest bardzo aktualny ze względu na starzenie się obiektów budowlanych i infrastrukturalnych. Ponieważ ze względów ekonomicznych nie jest możliwe zastąpienie wszystkich starszych obiektów nowymi, istnieje od wielu lat zapotrzebowanie na efektywne metody przywracania pełnej przydatności eksploatacyjnej funkcjonującym budynkom i budowlom. W pierwszych dwóch dekadach XXI w. szczególnie rozpowszechniło się zastosowanie materiałów kompozytowych FRP (*fibre reinforced polymers*) do wzmocnienia istniejących konstrukcji. Obecnie kompozyty FRP w postaci prętów, cięgien, mat, taśm i kształtowników są szeroko bardzo stosowane w pracach modernizacyjnych konstrukcji betonowych, stalowych, murowych oraz drewnianych. Powstają także coraz efektywniejsze metody ich aplikacji *on-site*, zapewniające pełne wykorzystanie doskonałych parametrów wytrzymałościowych kompozytów FRP. Jedną z takich metod jest wstępne sprężanie elementów kompozytowych. Na tym tle **badania naukowe będące przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata doskonale wpisują się zarówno w trendy naukowe jak i potrzeby rynkowe** współczesnej inżynierii lądowej.

Motywuując podjęcie własnych badań, Kandydat podniósł problem ograniczeń i trudności w sprężaniu i kotwieniu kompozytowych elementów wzmocniających przy ich aplikacji za pomocą istniejących na rynku systemów wzmocniających. Jako alternatywę likwidującą w dużym stopniu ww. trudności Kandydat wskazał zastąpienie kompozytowych elementów wzmocniających (głównie taśm CFRP) za pomocą elementów wykonanych z materiałów z pamięcią kształtu SMA. Zdaniem Kandydata, w przypadku zastosowania SMA porównywalny efekt sprężenia jak w przypadku CFRP można bowiem osiągnąć przez stosunkowo proste podgrzanie do odpowiedniej temperatury wcześniej przymocowanego do konstrukcji elementu wzmocniającego z SMA. **Wstępne potwierdzenie słuszności tej tezy Kandydat uzyskał wykonując szeroki przegląd porównawczy piśmiennictwa**, obejmujący badania w zakresie wzmocnianie konstrukcji przez sprężenie materiałami FRP oraz SMA (por. praca [18]).

W rozprawie Kandydat podjął się doświadczalnej oceny wykonalności i efektywności wzmocnienia konstrukcji żelbetowej za pomocą elementów wykonanych z SMA. Aby lepiej wykazać potencjalne przewagi nowego materiału / technologii nad technologią konwencjonalną, tj. sprężaniem materiałami FRP, Kandydat przeprowadził w rozprawie

badania porównawcze (SMA vs. FRP). Abstrahując od wielu wątpliwości, które są związane z praktycznym wykorzystaniem nowej technologii (por. praca [18]), **podjęcie się przez Kandydata pionierskich w Polsce badań eksperymentalnych nad nowym materiałem i technologią do praktycznych zastosowań w inżynierii lądowej uważam za bardzo ważne i uzasadnione.**

### 3.2. Cele i teza rozprawy

W rozprawie doktorskiej Kandydat powinien rozwiązać problem naukowy, realizując postawiony cel (cele) i/lub udowadniając sformułowaną tezę (tezy) metodami naukowymi. W recenzowanej rozprawie Kandydat nie sprecyzował problemu naukowego, lecz postawił kilka celów badawczych i sformułował jedną tezę. Stopień realizacji tych celów oraz udowodnienia tezy został omówiony we wnioskach końcowych rozprawy.

Głównym celem rozprawy doktorskiej Kandydata była **ocena wykonalności i efektywności czynnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA**. Oprócz wskazania zarówno zalet, jak i wad oraz potencjalnych ograniczeń nowej technologii, celem rozprawy było także bezpośrednie doświadczalne porównanie nowej (FeSMA) i konwencjonalnej (CFRP) technologii wzmocnienia konstrukcji żelbetowych na zginanie. Uzupełniającym, lecz ważnym z praktycznego punktu widzenia celem rozprawy, było także opracowanie modelu obliczeniowego do analizy przekroju żelbetowego elementu zginanego wzmocnionego za pomocą nowej technologii. W świetle przedstawionej wyżej genezy i zasadności podjęcia tematu, tak postawione cele rozprawy są **adekwatne i uzasadnione naukowo**, a także **istotne i ważne** z punktu widzenia praktycznego wdrożenia nowej technologii w inżynierii lądowej. Opisują one także pośrednio problem naukowy (nie sprecyzowany w rozprawie), który Kandydat rozwiązał metodami naukowymi.

Rozprawa zawiera także jedną tezę, jednakże błędnie sformułowaną w postaci pytającej. Teza jest to twierdzenie, dla którego przedstawia się uzasadnienie lub które należy udowodnić, opierając się na przyjętym założeniu. Zdaniem recenzenta prawidłowo sformułowana teza rozprawy powinna brzmieć: *„Sprężenie (aktywne wzmocnienie) zginanych elementów żelbetowych przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA jest skutecznym (efektywnym) sposobem poprawy ich stanów granicznych nośności i użyteczności”*. Udowodnienie tej tezy metodami naukowymi było zadaniem Kandydata. Wymagało to jednak ilościowego zdefiniowania pojęcia „skuteczność” (lepiej „efektywność”) oraz wskazania konkretnych stanów granicznych nośności i użyteczności, które posłużyły Kandydatowi do oceny wcześniej zdefiniowanej efektywności. Takich konkretnych „mierników” Kandydat w rozprawie nie zdefiniował, aczkolwiek we **wnioskach** (p. 8.1 rozprawy) **przedstawił jakościowe i ilościowe dowody, które w wystarczający sposób udowadniają postawioną tezę.**

### 3.3. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy jest zawarty w rozdziałach 2 i 3 (łącznie 80 stron) i stanowi ok. 43% jej podstawowej treści (tom I). Obejmuje on ogólną charakterystyką materiałów z pamięcią kształtu (rozdział 2) oraz przegląd badań w zakresie aktywnego wzmocnienia na zginanie elementów żelbetowych materiałami FeSMA (rozdział 3). Przegląd stanu wiedzy obejmuje krajowe (nieliczne) i zagraniczne prace naukowe z drugiej dekady XXI w. Jest więc to wiedza stosunkowo nowa, dlatego wnioski z jej przeglądu są bardzo aktualne,

a podsumowanie przeglądu (w szczególności w rozdziale 4) stanowi rzetelne uzasadnienie przyjętych kierunków badań własnych Kandydata.

Charakterystyka SMA (rozdział 2) stanowi bardzo rzetelny i **interdyscyplinarny opis stosunkowo nowego i innowacyjnego materiału**, który Kandydat – jako jeden z pierwszych w Polsce – zastosował w inżynierii lądowej. Opis zawiera informacje z zakresu metalurgii, dotyczące przemian fazowych stopów SMA, wyjaśnia efekt pamięci kształtu tych stopów, kluczowy dla skutecznego ich zastosowania w inżynierii lądowej oraz charakteryzuje poszczególne rodzaje materiałów SMA. Główną część rozdziału 2 poświęcił Kandydat bardzo obszernemu omówieniu materiałów FeSMA (tj. stopów opartych na żelazie), które jego zdaniem są najbardziej obiecującym stopem SMA z punktu widzenia inżynierii lądowej. Jest to związane głównie z niższymi kosztami, prostszą produkcją i większą sztywnością elementów ze stopów FeSMA w porównaniu z innymi stopami SMA. Kandydat bardzo rzetelnie scharakteryzował na podstawie przeglądu piśmiennictwa główne cechy stopów FeSMA, podkreślając cechy ważne z punktu widzenia inżynierii lądowej (w tym m.in. parametry wytrzymałościowe, odporność na korozję, wytrzymałość zmęczeniową, wpływy termiczne itp.). Rozdział 2 kończy ideowy opis wykorzystania efektu pamięci kształtu do aktywnego wzmocnienia konstrukcji żelbetowych, który Kandydat szeroko rozwinął w kolejnym rozdziale.

Rozdział 3 zawiera bardzo profesjonalnie wykonany przegląd stanu wiedzy (opublikowanej w 14 artykułach naukowych z lat 2016 – 2022), **w zakresie aktywnego wzmocnienia na zginanie elementów żelbetowych materiałami FeSMA**. Kandydat szczegółowo przeanalizował wyniki badań łącznie 48 elementów żelbetowych, wzmocnionych / zbrojonych w różny sposób zbrojeniem FeSMA. Każde z badań zostało szczegółowo opisane, a opis każdorazowo zawierał program badań, zastosowane metody badawcze, analizę wyników oraz wnioski wyciągnięte przez autorów. Tak szczegółowa analiza piśmiennictwa pozwoliła Kandydatowi na wykonanie własnej, syntetycznej analizy wyników obcych badań doświadczalnych (p.3.5 rozprawy). Dysponując wynikami badań 48 elementów, Kandydat ocenił efektywność aktywnego wzmocnienia na zginanie elementów żelbetowych poprzez ustalenie wpływu stopnia zbrojenia FeSMA na wzrost momentu rysującego, momentu uplastyczniającego stal zbrojeniową oraz nośności granicznej belek żelbetowych. W każdym z ww. przypadków Kandydat opracował jakościowe wykresy dla uzyskanych zależności wraz z ich krótkim omówieniem, jednakże bez zdefiniowania odpowiednich funkcji analitycznych, które pozwoliłyby na ilościową ocenę wykazanych zależności. Po tak rzetelnym wykonaniu przeglądu badań obcych, brak funkcji ilościowych niepotrzebnie obniża wysoką ocenę wykonanej pracy.

W podsumowaniu przeglądu obcych badań doświadczalnych (p.3.5.4 rozprawy) Kandydat wykazał ograniczenia nowej technologii wzmocnienia / zbrojenia na zginanie elementów żelbetowych oraz zidentyfikował obszary braku wystarczającej wiedzy w tym zakresie (wzmocnienie EAR). **Stanowiło to uzasadnioną podstawę do opracowania programu badań własnych**. Jednakże oprócz wspomnianej wyżej oceny ilościowej, brakuje w podsumowaniu także oceny porównawczej technologii SMA vs. CFRP (wśród omawianych badań były również badania porównawcze), co stanowiło przecież jeden z celów rozprawy.

### 3.4. Zastosowane metody badawcze

Podstawowe badania doświadczalne belek zostały poprzedzone konwencjonalnymi **badaniami materiałowymi** betonu i stali zbrojeniowej. Kandydat nie wykonał jednak własnych badań materiałowych taśm FeSMA i CFRP, które są kluczowymi elementami technologii, będących przedmiotem rozprawy. Wykorzystanie danych producentów w

analizach wyników badań doświadczalnych oraz w badaniach numerycznych i/lub pracach analitycznych może negatywnie wpłynąć na wiarygodność wniosków z nich wyciągniętych.

**Podstawowe badania doświadczalne** przeprowadzone przez Kandydata w ramach rozprawy doktorskiej zostały wykonane **na 5 belkach żelbetowych** o wymiarach 0,3 x 0,3 x 2,5 m, wykonanych z betonu C25/30. Dwie belki wzmocniono pojedynczą taśmą FeSMA o przekroju 1,5 x 120 mm, kolejne dwie sprężoną taśmą CFRP o przekroju 1,4 x 60 mm, a jedną belkę pozostawiono bez wzmocnienia jako referencyjną. Sprężenie belek taśmami FeSMA wykonano przez podgrzanie materiału SMA do temperatury ok. 400°C, sprężenie taśmami CFRP wykonano za pomocą naciągu taśm i systemowych siłowników. W obu przypadkach taśmy nie były przyklejone do podłoża (działały jako ściąg), co **w przypadku taśm CFRP nie jest do końca zgodne z powszechnie stosowaną technologią wzmocnienia**. Proces wzmocnienia belek oraz jego wpływ na uzyskane wyniki badań i wyciągnięte wnioski rodzi wiele pytań dyskusyjnych. Najważniejsze z nich sformułowałem w p.4 niniejszej recenzji.

Belki żelbetowe badano statycznie w schemacie czteropunktowego zginania aż do zniszczenia wzmocnienia. Podczas badań mierzono odkształcenia betonu, stali zbrojeniowej oraz taśm FeSMA i CFRP oraz przemieszczenia i zarysowanie betonu belek. Do pomiarów tych wielkości Kandydat zastosował **bardzo bogaty i kompleksowy układ pomiarowy**, obejmujący:

- a) konwencjonalne pomiary odkształceń stali zbrojeniowej za pomocą tensometrów elektrooporowych;
- b) pomiary odkształceń betonu za pomocą cyfrowej korelacji obrazu DIC (*digital image correlation*);
- c) pomiary odkształceń betonu oraz taśm FeSMA i CFRP za pomocą światłowodów rozproszonych DFOS (*distributed fibre optic sensors*);
- d) konwencjonalne pomiary przemieszczeń belek czujnikami LVDT (*linear variable deflection transducers*);
- e) pomiary przemieszczeń belek za pomocą cyfrowej korelacji obrazu DIC;
- f) pomiary rozwoju zarysowania betonu za pomocą cyfrowej korelacji obrazu DIC.

Tak bogaty, a zarazem nowoczesny i efektywny (DIC, DFOS) układ pomiarowy pozwolił Kandydatowi na zebranie bardzo obszernej bazy wyników badań, co zdecydowanie uwiarygodniło wyciągnięte na ich podstawie wnioski w zakresie efektywności technologii FeSMA oraz jej porównania z technologią CFRP.

Oprócz konwencjonalnych badań doświadczalnych Kandydat wykonał także **badania numeryczne** za pomocą oprogramowania dedykowanego do nieliniowej analizy konstrukcji żelbetowych (rozdział 6). Celem analizy numerycznej była rozszerzona w stosunku do badań doświadczalnych **analiza parametryczna** wpływu stopnia zbrojenia stalowego, klasy betonu oraz poziomu sprężenia FeSMA na efektywność wzmocnienia. Kandydat wykonał bardzo złożony model numeryczny, wykorzystując zaawansowany model konstytutywny betonu, model sprężysto – plastyczny ze wzmocnieniem stali zbrojeniowej (walidowany na podstawie badań doświadczalnych), uproszczony model konstytutywny dla stopu FeSMA oraz dokładny model zakotwień, będących krytyczną częścią modelu numerycznego belek z uwagi na wyniki badań własnych. Do walidacji modelu numerycznego posłużyły Kandydatowi wyniki badań doświadczalnych (rys.6.7 w rozprawie). Niestety, pomimo dość dokładnego zamodelowania rzeczywistego zakotwienia, model numeryczny Kandydata nie był wystarczająco zgodny z wynikami własnych badań doświadczalnych.

Dlatego Kandydat do przeprowadzenia badań numerycznych **zastosował inny model numeryczny i walidował go w oparciu o wyniki badań szwajcarskich** (poz. [51] w rozprawie). Model ten nie został jednak przedstawiony w rozprawie (Kandydat określa go jako „identyczny” ze zmienionym modelem zakotwienia), nie pokazano również wyników jego walidacji. Wykorzystanie badań obcych do walidacji własnego modelu numerycznego to oczywiście dopuszczalna i często stosowana praktyka naukowa, lecz w tym przypadku obniża ona wartość własnych badań doświadczalnych Kandydata, gdyż nie mogły one służyć do walidacji własnego modelu numerycznego.

### 3.5. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

Rozdział 5 zawiera wyniki przeprowadzonych przez Kandydata badań doświadczalnych w zakresie szacowania siły sprężającej, oceny mechanizmów zniszczenia belek (wzmocnienia), analizy zarysowania, przemieszczeń oraz odkształceń taśm CFRP i FeSMA. Zbiorczą, ilościową ocenę efektywności obu technologii wzmocnienia oraz pośrednio ocenę SGN/SGU belek zawiera tabela 5.3 oraz podsumowanie badań doświadczalnych (p.5.7 w rozprawie). Szczegółowe, indywidualne wyniki badań dla każdej z belek zawierają załączniki (tom II).

Pomimo wielu ograniczeń i wątpliwości podniesionych w stosunku do metod badawczych (p.3.4 oraz p.4 recenzji) nie ulega wątpliwości, że uzyskane przez Kandydata wyniki badań doświadczalnych i ich analiza **mają bardzo dużą wartość poznawczą i stanowią jedną z pierwszych krajowych ocen efektywności wzmocnienia zginanych belek żelbetowych nową i innowacyjną technologią** wykorzystującą elementy ze stopów z pamięcią kształtu. Dużą wartością badań naukowych Kandydata jest kompleksowość uzyskanej oceny, obejmującej zarówno podstawowe SGN i SGU, jak również ocenę efektywności wzmocnienia w podstawowych fazach pracy belki żelbetowej, a także ilościowe porównanie tych efektywności z inną, konwencjonalną metodą wzmocnienia. Pomimo pewnych uwag dyskusyjnych co do wyników badań Kandydata (poniżej) należy podkreślić, że są to profesjonalnie uzyskane i przez to bardzo wiarygodne dane, mogące służyć jako *benchmark* w dalszym rozwoju tej nowej technologii wzmocnienia. Wyniki badań doświadczalnych uzyskane przez Kandydata pokazują wyraźnie zalety, jak również wady i ograniczenia nowej technologii, co samo w sobie wskazuje kierunki dalszego jej rozwoju.

Wyniki badań Kandydata udowodniły wykonalność i efektywność nowej technologii oraz jej porównywalność z technologią konwencjonalną. Na poziomie momentu rysującego oraz momentu uplastyczniającego stal zbrojeniową można powiedzieć, że obie technologie mają porównywalną efektywność, chociaż zawsze o kilka procent lepsza jest technologia konwencjonalna (tab.5.3 w rozprawie). Duże różnice – na niekorzyść nowej technologii – wystąpiły na poziomie nośności granicznej belki wzmocnionej. W porównaniu do ok. 80% efektywności taśm CFRP, efektywność taśm FeSMA wyniosła tylko ok. 50%, co każe recenzentowi **postawić fundamentalne pytanie o praktyczny sens rozwoju nowej technologii**. Chociaż o mniejszej efektywności taśm FeSMA na poziomie nośności granicznej decydowały głównie ich zakotwienia, to należy przypomnieć, że właśnie ich prostota (w porównaniu z kotwieniem taśm CFRP) była jednym z motywów podjęcia badań nad zastosowaniem taśm FeSMA do wzmocniania konstrukcji żelbetowych (por. p.1.1, s.26 rozprawy). Bez wątpienia dalszy rozwój zakotwień taśm FeSMA będzie determinował powodzenie komercjalizacji nowego systemu wzmocniania (podobnie jak to było w przypadku taśm CFRP).

Badania Kandydata nie potwierdziły także większej ciągliwości (*ductility*) belek wzmocnionych taśmami FeSMA, co miało być ich zaletą w stosunku do nagłego zniszczenia belek wzmocnionych taśmami CFRP. Obliczone przez Kandydata indeksy ciągliwości dla wzmocnień taśmami FeSMA są ok. 5-krotnie mniejsze niż w przypadku wzmocnień taśmami CFRP. Oznacza to, że **wzmocnienie konwencjonalne jest znacznie korzystniejsze z punktu widzenia bezpieczeństwa wzmocnionych konstrukcji żelbetowych**. Należy jednak pamiętać, że w przypadku badań doświadczalnych wzmocnienie belek taśmami CFRP nie odzwierciedlało rzeczywistej technologii, stosowanej *in-situ* (brak skleiny). W takim przypadku różnice w indeksie ciągliwości byłyby zapewne mniejsze.

Pomiary odkształceń taśm z obu materiałów wykazały ponadto, że przy zastosowanych poziomach sprężenia wykorzystanie materiału w taśmach CFRP było znacznie większe, niż w przypadku taśm FeSMA. Zakładając, że koszt obu materiałów wzmacniających jest nadal bardzo wysoki, także **efektywność ekonomiczna nowej technologii jest mniejsza od efektywności technologii konwencjonalnej**.

Wykazane w wyniku badań Kandydata wady i ograniczenia nowej technologii muszą w najbliższym czasie być rozwiązane, aby można było dalej rozwijać i w praktyce komercjalizować tę innowacyjną technologię. **Praktyczną wartością badań Kandydata jest fakt, że w oparciu o ich wyniki wskazał on kierunki tego rozwoju.**

### 3.6. Wyniki badań numerycznych i ich analiza

Badania numeryczne przeprowadzone przez Kandydata bardzo dobrze uzupełniają prace doświadczalne i pokazują **możliwości prowadzenia różnego rodzaju analiz parametrycznych w zakresie efektywności wzmocnienia**. Wykonanie takich badań nie tylko znacząco poszerza rezultaty rozprawy doktorskiej, ale także pokazuje bardzo szeroki i profesjonalny warsztat naukowy Kandydata. Na podstawie analizy numerycznej Kandydat ocenił wpływ stopnia zbrojenia stalowego, klasy betonu oraz poziomu sprężenia FeSMA na efektywność wzmocnienia. Kandydat otrzymał konkretne dane ilościowe (wykresy) pokazujące wpływ każdego z badanych parametrów na efektywność wzmocnienia. Dane te, a także stworzony przez Kandydata model numeryczny, mogą w przyszłości służyć do wstępnego projektowania wzmocnienia istniejących konstrukcji żelbetowych taśmami FeSMA. Wyniki i wnioski z badań numerycznych Kandydata nieznacznie umniejsza fakt braku w rozprawie opisu i walidacji modelu numerycznego, który został wykorzystany do ich uzyskania (p.3.4 recenzji).

### 3.7. Modele analityczne do wyznaczania nośności belki wzmocnionej FeSMA

W rozdziale 7 Kandydat bardzo dobrze pokazał **praktyczne wykorzystanie wyników badań własnych do weryfikacji istniejących procedur (modeli) obliczeniowych oraz do stworzenia własnego modelu analitycznego**, który może służyć do wstępnego projektowania wzmocnienia za pomocą taśm FeSMA. W pierwszej części rozdziału (p.7.1 i 7.2) Kandydat zweryfikował 7 wybranych procedur obliczeniowych na podstawie wyników własnych oraz obcych badań doświadczalnych (poz. [51], [93] w rozprawie). Weryfikacja wykazała, że wszystkie procedury obliczeniowe przeszacowują (o 14 – 47%) nośność wzmocnionych belek w porównaniu do wyników badań własnych Kandydata. Głównym tego powodem była jednak niska nośność zakotwień w badaniach Kandydata i brak możliwości uwzględnienia jej wpływu w weryfikowanych procedurach. Kandydat wykazał natomiast doskonałą zgodność weryfikowanych procedur (w zakresie  $\pm 2\%$ ) z wynikami badań szwajcarskich (poz. [51]).



W drugiej części rozdziału Kandydat, bazując na analogiach obliczeń belek sprężonych zbrojeniem bez przyczepności (stalowym, CFRP) opracował **własny model analityczny do wstępnego projektowania wzmocnienia belek za pomocą sprężonych taśm FeSMA i CFRP**. Model ten został zweryfikowany przez Kandydata w oparciu o wyniki badań własnych, a weryfikacja wykazała bardzo duży stopień zgodności (rys.7.3 w rozprawie). Kandydat, świadom ograniczeń opracowanego modelu obliczeniowego, wskazał także kierunki jego dalszej kalibracji.

### 3.8. Podsumowanie rozprawy

Podsumowanie rozprawy zawiera **zestawienie wniosków jakościowych i ilościowych**, sformułowanych przez Kandydata w poszczególnych rozdziałach rozprawy (rozdziały 5, 6 i 7) oraz sugerowane przez Kandydata kierunki dalszych badań w przedmiocie rozprawy. W podsumowaniu Kandydat nie odniósł się bezpośrednio do celów rozprawy oraz nie sprecyzował dowodu tezy rozprawy, chociaż poszczególne wnioski końcowe (jest ich w sumie 18) zawierają informacje potwierdzające realizację tych celów oraz udowadniają nie wprost postawioną tezę.

**Stopień realizacji celów oraz potwierdzenia tezy rozprawy jest bardzo dobry.** Kandydat w satysfakcjonujący sposób pokazał w rozprawie wykonalność oraz ocenił efektywność czynnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA. Oprócz wskazania zarówno zalet, jak i wad oraz ograniczeń nowej technologii, Kandydat przeprowadził także bezpośrednie porównanie doświadczalne nowej (FeSMA) i konwencjonalnej (CFRP) technologii wzmocnienia konstrukcji żelbetowej na zginanie. Opracował także model obliczeniowy do analizy przekroju żelbetowego elementu zginanego wzmocnionego za pomocą nowej technologii. Odnosząc się do tezy rozprawy jednoznacznie mogę stwierdzić, że Kandydat w satysfakcjonujący sposób wykazał skuteczność (efektywność) aktywnego wzmocniania zginanych elementów żelbetowych przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA, której głównym dowodem jest poprawa SGN/SGU belek żelbetowych.

Mając świadomość wad i ograniczeń nowej technologii, Kandydat **sprecyzował kierunki dalszych badań nad jej udoskonaleniem i wdrożeniem**. Wśród nich są m.in: opracowanie metod precyzyjnego określania siły sprężającej oraz jej strat, opracowanie efektywniejszych zakotwień taśm FeSMA, ocena efektywności zastosowania nowej technologii na konstrukcjach istniejących (zarysowanych, zdeformowanych) oraz opracowanie modeli obliczeniowych do projektowania wzmocnienia. Kierunki te wynikają wprost z doświadczeń uzyskanych przez Kandydata podczas realizacji własnych badań naukowych, będących przedmiotem rozprawy.

Wnioskowane przez Kandydata kierunki dalszych badań są zarówno oczywiste (w świetle wyników rozprawy), jak również fundamentalne dla dalszego rozwoju oraz praktycznego zastosowania nowej technologii wzmocniania konstrukcji żelbetowych. Jednakże szeroki zakres koniecznych badań oraz uzyskane przez Kandydata wnioski z porównania nowej (FeSMA) i konwencjonalnej (CFRP) technologii **każą zadać podstawowe pytanie o praktyczny sens tego rozwoju**. Do tego Kandydat w podsumowaniu się nie odniósł, a było to jednym z celów pracy.

### 3.9. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników rozprawy

**Możliwość praktycznego zastosowania** wyników rozprawy doktorskiej, zrealizowanej w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*” **jest zdaniem recenzenta koniecznością**.

Badania naukowe realizowane w tej dyscyplinie (w tym badania Kandydata) mają najczęściej charakter badań przemysłowych, służących do sprawdzenia i oceny czy dany rodzaj technologii jest przydatny na rynku, w jakim stopniu i jakie można wprowadzić ulepszenia. Badanie te prowadzą zazwyczaj do polepszenia obecnych już na rynku produktów, usług i procesów oraz do tworzenia nowych, innowacyjnych zasobów. Taki charakter mają także badania Kandydata. Należy jednak podkreślić, że badania przemysłowe są ostatnim etapem badań dla przemysłu, natomiast pierwszym etapem komercjalizacji są prace rozwojowe.

Wyniki badań Kandydata są **bezpośrednio związane z praktycznymi możliwościami zastosowań stopów SMA w inżynierii lądowej**. Stosowanie elementów z tych stopów w krajowym budownictwie jest jeszcze w fazie badań doświadczalnych, lecz ich wyniki wskazują na możliwość nieodległej komercjalizacji niektórych zastosowań. Do nich z pewnością należy wzmacnianie konstrukcji żelbetowych elementami wykonanymi z SMA. Wyniki badań naukowych Kandydata **mogą mieć zatem praktyczne zastosowanie**:

- a) we wstępnym projektowaniu wzmocnień konstrukcji żelbetowych nową technologią za pomocą zweryfikowanych procedur (modeli) obliczeniowych oraz autorskiego modelu analitycznego;
- b) jako *benchmark* dla kolejnych (koniecznych) badań i/lub wdrożeń nowej technologii do wzmacniania konstrukcji żelbetowych;
- c) w celu upowszechnienia stosowania stopów SMA w inżynierii lądowej.

#### 4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Kilka uwag krytycznych podałem już w p. 3 recenzji, oceniając ogólnie zawartość merytoryczną rozprawy. Poniżej przedstawiłem zbiorczo te i kolejne **uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz wątpliwości i pytania**, które sformułowałem po analizie rozprawy.

- 5.1 Dlaczego Kandydat nie wykonał własnych badań materiałowych taśm FeSMA i CFRP, które są kluczowymi elementami obu technologii, będących przedmiotem rozprawy. Przyjęcie danych producentów w analizach wyników badań doświadczalnych, numerycznych i/lub analitycznych może negatywnie wpłynąć na wiarygodność wniosków z nich wyciągniętych. Czy Kandydat może oszacować ten wpływ?
- 5.2 Technologia wzmacniania sprężonymi taśmami CFRP zakłada ich przyklejenie do podłoża betonowego, co ma duży wpływ na moment rysujący i nośność graniczną oraz postać zniszczenia wzmocnionej belki. W badaniach Kandydata taśma CFRP nie została przyklejona. Czy w takich warunkach wnioski z porównania obu technologii (FeSMA vs. CFRP) można uznać za wiarygodne w kontekście ich zastosowania na rzeczywistym obiekcie?
- 5.3 Jako pokazały badania przeprowadzone przez Kandydata, w technologii wzmacniania taśmami FeSMA kluczowe są zakotwienia, gdyż one przenoszą siłę sprężającą z taśmy na belkę. Na jakiej podstawie przyjęto w badaniach zakotwienia w postaci 12 gwoździ? Czy te zakotwienia zostały zaprojektowane, jaką metodą, dla jakich parametrów obciążenia i wytrzymałości materiałów? Czy postać zniszczenia belek wzmocnionych taśmami FeSMA nie była spowodowana zbyt niską nośnością zakotwienia?
- 5.4 Na jakiej podstawie przyjęto w badaniach wstępne odkształcenie taśm FeSMA o wartości 2%?

- 5.5 Czy podgrzewanie taśm FeSMA do temperatury 400°C miało wpływ na stan (np. parametry wytrzymałościowe) betonu i stali zbrojenia dolnego belki? Czy potencjalna zmiana stanu obu materiałów na skutek wysokiej temperatury powinna być uwzględniona w projektowaniu wzmocnienia taśmami FeSMA?
- 5.6 Sprężenie belek FeSMA i CFRP wykonano w odwrotnych pozycjach, odpowiednio z wpływem (rys.4.8 w rozprawie) i bez wpływu (rys. 4.11 w rozprawie) ciężaru własnego belki. Czy ta różnica może mieć, a jeżeli tak, to jaki, wpływ na wyniki i wnioski z porównania obu technologii?
- 5.7 Wartości sił sprężających w taśmach FeSMA zostały wyznaczone metodami pośrednimi. W przypadku pierwszej z metod (pomiar ugięć) Kandydat przyjął wartość całkowitego skrócenia taśmy  $s_t = 0,5$  mm, jak dla system zakotwienia gwoździami w badaniach wg poz. [51]. Jednakże w badaniach własnych Kandydat zastosował 12 gwoździ, a w badaniach wg poz. [51] zastosowano 8 gwoździ w zakotwieniu (33% mniej). Czy nie ma to wpływu na przyjętą wartość  $s_t$  i w konsekwencji na wyznaczoną wartość siły sprężającej?
- 5.8 Kandydat do przeprowadzenia badań numerycznych zastosował inny model numeryczny i walidował go w oparciu o wyniki badań szwajcarskich (poz. [51]). Model ten nie został jednak przedstawiony w rozprawie. Jakie są wyniki walidacji modelu numerycznego, zastosowanego do analiz wpływu parametrów wzmocnienia na jego efektywność (p.6.3 – 6.5 w rozprawie)?
- 5.9 W świetle jednoznacznych wyników porównania dwóch technologii wzmocniania (FeSMA vs. CFRP), w jakich obszarach inżynierii lądowej Kandydat widzi zastosowanie nowej technologii?
- 5.10 Jako jeden z kierunków przyszłych badań Kandydat wskazał połączenie technik wzmocniania przy użyciu zbrojenia FeSMA oraz biernych elementów CFRP. Jak Kandydat wyobraża sobie taką kombinację na typowej (istniejącej) belce żelbetowej?

## 5. Ocena strony formalnej i redakcji rozprawy

Układ rozprawy oceniłem w p.2 recenzji i uznaję go jako poprawny zarówno od strony formalnej, jak również merytorycznej. Redakcja tekstu rozprawy jest także właściwa, na dobrym poziomie, bez większych błędów formalnych i edytorskich. Język rozprawy jest poprawny technicznie, spójny i zrozumiały.

Poniżej przedstawiłem **kilka najważniejszych uwag natury redakcyjnej**, jakie zauważałem oceniając tekst rozprawy:

- dyskusyjne jest umieszczanie w monografii wszystkich szczegółowych wyników pomiarów (załączniki 2 i 3 – łącznie ok. 190 stron !); zdaniem recenzenta w części głównej monografii powinny być umieszczone wykresy potwierdzające kluczowe wartości zawarte w tabelach, a pozostałe szczegółowe wyniki, nie uwzględniane w dalszej analizie, można było pominąć;
- opis drugiej kolumny w tabelach 3.1 do 3.14 zamiast „nazwa elementu” powinien brzmieć „oznaczenie elementu”;
- brak źródła badań doświadczalnych na wykresie rys. 6.5 (s.148);
- brak źródeł danych przyjętych w p.7.1;
- niektóre (nieliczne) pozycje piśmiennictwa są opisane niejednolicie (brak jednego stylu) i w sposób niepełny, bez podstawowych informacji bibliograficznych.

## 6. Ocena spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w art.187 ust.1 i 2 ustawy [5]

### 6.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*”

Analiza treści rozprawy pozwala ocenić ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w przedmiotowej dyscyplinie jako **wystarczającą i satysfakcjonującą w świetle wymagań ustawowych**. W szczególności Kandydat wykazał się dobrą wiedzą ogólną w zakresie konstrukcji żelbetowych, metod ich projektowania, technologii wzmocnienia, a także wiedzą ekspercką w zakresie stopów metalicznych z pamięcią kształtu, będących nowym i innowacyjnym materiałem budowlanym. Zastosowanie materiałów SMA w inżynierii lądowej jest głównym obszarem wiedzy eksperckiej Kandydata. Kandydat nie tylko zna cechy, zalety i wady nowego materiału oraz obszary jego zastosowań w inżynierii lądowej, lecz także procedury obliczeniowe umożliwiające jego praktyczne wdrożenia. Kandydat także potrafił prawidłowo wskazać kierunki rozwoju zastosowań SMA w inżynierii lądowej.

Wiedza ogólna Kandydata nie ogranicza się jedynie do inżynierii lądowej, ale obejmuje także **dyscyplinę inżynierii materiałowej**, pozwalając Kandydatowi prowadzić badania naukowe dotyczące zastosowań nowego, innowacyjnego materiału, należącego do tzw. materiałów inteligentnych (*smart materials*). W rozprawie Kandydat wykazał dobrą znajomość metalurgii stopów SMA, ich cech materiałowych i możliwości ich modyfikacji w celu uzyskania pożądanego materiału budowlanego. Elementy wiedzy Kandydata z inżynierii materiałowej są widoczne głównie w przeglądzie piśmiennictwa (rozdział 2), gdzie bardzo profesjonalnie została przedstawiona charakterystyka materiałów SMA. Interdyscyplinarność wiedzy ogólnej Kandydata jest widoczna także w umiejętności wykorzystania synergii zalet dwóch różnych materiałów budowlanych: stopu FeSMA oraz betonu (rozdział 3). Ta interdyscyplinarność wiedzy Kandydata jest w dzisiejszym czasie bardzo pożądana, gdyż rozwój współczesnej inżynierii lądowej jest napędzany w równym stopniu osiągnięciami inżynierii materiałowej i tworzeniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych.

Współczesna inżynieria lądowa stała się już dawno nauką interdyscyplinarną, a rozprawa Kandydata dokładnie pokazuje zasadność tego stwierdzenia. Kandydat w rozprawie wykorzystał wiedzę ogólną z dwóch dyscyplin z dziedziny nauk inżynierijno-technicznych, efektywnie i skutecznie łącząc ją dla realizacji głównych celów rozprawy. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa **wykazała ogólną wiedzę teoretyczną** Kandydata w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*”, przez co **spełnia ona warunek określony w art.187 ust.1 ustawy [5]**.

### 6.2. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata

Rozprawa doktorska Kandydata powstała **pod kierunkiem doświadczonego promotora**: prof. dr hab. inż. Renaty Kotyni, która jest inicjatorem, liderem i głównym kierownikiem prac naukowych KBB PŁ w zakresie wzmocnienia konstrukcji żelbetowych niekonwencjonalnymi materiałami konstrukcyjnymi (FRP, SMA). Trudno zatem mówić o pełnej samodzielności prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. Bez wątpienia przedmiot rozprawy (pomysł), elementy jej oryginalności, zakres, program badań oraz wnioski końcowe powstały przy dużym zaangażowaniu Pani Promotor. Ponadto Kandydat, będąc doktorantem jednostki naukowej, w której realizowano badania doświadczalne, musiał bez wątpienia korzystać ze wsparcia chociażby personelu laboratorium badawczego KBB PŁ.

Jednakże oba ww. fakty nie podważają samodzielności prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata, zwłaszcza w zakresie przeglądu stanu wiedzy, na etapie realizacji badań doświadczalnych, obróbki ich wyników i analizy wniosków z badań, a także w samodzielnym wykonaniu obliczeń numerycznych i prac analitycznych. Kandydat skutecznie realizując i finalizując rozprawę doktorską **potwierdził nabycie stosownych kompetencji do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Kompetencje te można określić następująco:

- a) zdolność do krytycznego przeglądu istniejącej wiedzy, zawartej w źródłach krajowych i zagranicznych, w celu identyfikacji podstawowych problemów badawczych i opracowania planu badań doświadczalnych;
- b) zdolność do planowania badań doświadczalnych w zakresie konstrukcji budowlanych;
- c) zdolność do prowadzenia badań doświadczalnych (materiałowych, wytrzymałościowych) w zakresie konstrukcji budowlanych z wykorzystaniem konwencjonalnych i niekonwencjonalnych metod badawczych;
- d) zdolność do wykorzystania konwencjonalnych i niekonwencjonalnych (DIC, DFOS) technik pomiarowych w inżynierii lądowej;
- e) umiejętność obróbki i wizualizacji wyników badań doświadczalnych, analizy tych wyników oraz wyciągania poprawnych wniosków;
- f) umiejętność modelowania numerycznego MES zagadnień naukowych w zakresie konstrukcji budowlanych oraz analizy uzyskanych wyników;
- g) umiejętność wyznaczania kierunków dalszych badań w oparciu o wyniki przeprowadzonych własnych badań i analiz.

Ww. kompetencje nabyte przez Kandydata potwierdzają **umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**, przez co **spełniony jest warunek określony w art.187 ust.1 ustawy [5]**.

### 6.3. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego przez Kandydata jest **ilościowa i jakościowa ocena efektywności czynnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA**. W szczególności do oryginalnych osiągnięć Kandydata zaliczam:

- a) wykorzystanie nowego, innowacyjnego materiału budowlanego, tj. stopu z pamięcią kształtu (SMA), do wzmocniania konstrukcji żelbetowych;
- b) wdrożenie w skali laboratoryjnej (jako jedno z pierwszych w kraju) nowej technologii wzmocniania belek żelbetowych, opartej na stopach SMA;
- c) ilościową i jakościową ocenę efektywności zastosowania nowej technologii wzmocnienia belek żelbetowych;
- d) ocenę wpływu wybranych parametrów belek na efektywność wzmocnienia;
- e) ilościowe i jakościowe porównanie konwencjonalnej (CFRP) oraz nowej (FeSMA) technologii wzmocnienia belek żelbetowych;
- f) opracowanie analitycznej procedury obliczeniowej do wstępnego projektowania wzmocnienia nową technologią.

Kandydat rozwiązał postawiony w rozprawie problem naukowy za pomocą indywidualnie zaprojektowanych badań doświadczalnych, obejmujących badania materiałowe (stal, beton) oraz badania wytrzymałościowe z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych, a także za pomocą analizy numerycznej oraz prac analitycznych w zakresie procedur obliczeniowych.

Zarówno podjęta przez Kandydata tematyka badawcza jak również opracowany przez niego indywidualny program własnych badań doświadczalnych oraz badań numerycznych cechują się wysokim stopniem oryginalności, w szczególności w warunkach krajowych, gdzie zarówno tematykę jak i przyjętą metodologię badań (w pewnym zakresie) można uznać za pionierskie. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa Kandydata stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, przez co **spełnia ona warunek określony w art.187 ust.2 ustawy [5]**.

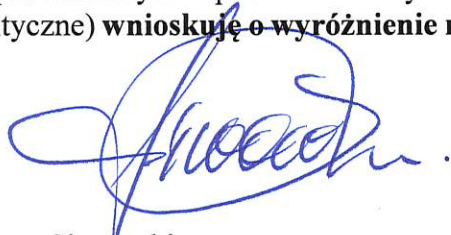
## 7. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Rogowskiego stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, jakim jest ocena wykonalności i efektywności czynnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA. W wyniku opisanych w rozprawie prac naukowych Kandydat ocenił ilościowo i jakościowo efektywność nowej technologii wzmocnienia oraz porównał ją z metodą konwencjonalną. Opracował także autorską metodę wstępnego projektowania wzmocnienia z użyciem nowej technologii, co może przyczynić się do wdrożenia opracowanej przez Kandydata technologii. Kandydat rozwiązał problem naukowy metodami doświadczalnymi, numerycznymi i analitycznymi, realizując własny program badań naukowych.

Kandydat wykorzystał w rozprawie wiedzę z dwóch dyscyplin z dziedziny nauk inżyniersko - technicznych, efektywnie i skutecznie łącząc ją dla realizacji celów rozprawy, przez co **wykazwał ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”**. Podczas realizacji rozprawy Kandydat nabył także odpowiednie kompetencje badawcze, które **potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**. Jednocześnie ze względu na rosnące zapotrzebowanie na modernizację i wzmocnienia istniejących obiektów budowlanych, zwłaszcza w obszarze infrastruktury drogowej, wyniki pracy naukowej Kandydata **mają znaczenie praktyczne**.

**Reasumując mogę jednoznacznie stwierdzić**, że oczywiste walory poznawcze rozprawy, oryginalne rozwiązanie postawionego problemu metodami naukowymi, a także wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata, upoważniają mnie do stwierdzenia, że rozprawa doktorska pt. *„Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie”*, **spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w ustawie [5]** oraz do postawienia wniosku o **przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Janusza Rogowskiego oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoką oryginalność i innowacyjność przedmiotu rozprawy, profesjonalne przygotowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych z wykorzystaniem nowych technik pomiarowych (DIC, DFOS) oraz kompleksowość przeprowadzonych prac naukowych (eksperyment, analiza numeryczna, obliczenia analityczne) **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Janusza Rogowskiego**.



Tomasz Siwowski  
Rzeszów, 7.08.2023 r.