

Dr hab. inż. Renata Kotynia, prof. PŁ  
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska  
Politechnika Łódzka  
Al. Politechniki 6  
90-924 Łódź  
[renata.kotynia@p.lodz.pl](mailto:renata.kotynia@p.lodz.pl)

Łódź, 16.09.2017 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
MGR INŻ. BARTOSZA PIĄTKA NA TEMAT:  
„NOWA TECHNOLOGIA WZMACNIANIA KONSTRUKCJI BETONOWYCH NAPRĘŻANYMI TAŚMAMI CFRP”**

**1. Podstawa formalna recenzji**

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 12.07.2017 oraz pismo Pana Prodziekana d/s Nauki i Rozwoju Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej dr hab. Inż. Bartosza Millera, Prof. PRz. z dnia 19.07.2017 r.

**2. Przedmiot recenzji i charakterystyka rozprawy**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Piątka pt. "Nowa technologia wzmocnienia konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP". Rozprawa przedstawiona do recenzji obejmuje 347 stron podstawowego tekstu w tym 52 strony załączników. Praca zawiera 324 rysunki i 77 tabel, numerowanych kolejno w każdym rozdziale pracy. Bibliografia liczy łącznie 193 pozycje piśmiennictwa obejmujące również normy, instrukcje i zalecenia techniczne. Praca została skomponowana w dziewięciu rozdziałach. Pierwsze trzy rozdziały obejmują kolejno wstęp (1), przegląd stanu wiedzy w zakresie technologii wzmocnienia konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP (2) oraz czynniki wpływające na efektywność wzmocnienia żelbetowych belek naprężanymi taśmami CFRP (3). Rozdziały 2 i 3 stanowią szeroki przegląd stanu wiedzy w zakresie technologii wzmocnienia konstrukcji betonowych przy użyciu naprężonych taśm CFRP z podziałem na: przegląd istniejących oraz będących w fazie badań, technologii naprężania i kotwienia taśm CFRP do konstrukcji betonowych (2) wraz z podsumowaniem wskazującym na kierunki ulepszenia własnej technologii wzmocnienia (*Neoxe Prestressing System – NPS*). W rozdziale 3 szczegółowo omówiono czynniki wpływające na efektywność tego typu wzmocnienia w belkach żelbetowych. Kolejne rozdziały rozprawy (4-7) stanowią zasadniczą część pracy obejmującą: badania laboratoryjne zakotwień taśm CFRP (4, 5), procedurę projektowania wzmocnień elementów żelbetowych naprężanymi taśmami CFRP (6), badania doświadczalne wzmocnionych belek (7) oraz badania wdrożeniowe (8). Szczegółowy opis technologii wzmocnienia został przedstawiony w rozdziale 4 w podziale na dwa zasadnicze elementy: zakotwienia taśm i urządzenie do ich naciągu. Autor omówił cechy nowej technologii oraz wymienił jej zalety i wady. Rozdział 5 poświęcono badaniom nowego typu zakotwień taśm, który należy uznać za najważniejszy element całego systemu. W rozdziale 6 Autor przedstawił i uporządkował procedurę projektowania wzmocnień elementów żelbetowych sprężonych taśmami CFRP. Badania efektywności wzmocnienia belek żelbetowych przedstawiono w rozdziale 7.

W rozdziale 8 opisano badania wdrożeniowe nowej technologii wzmocnienia belek *in situ* na rzeczywistym obiekcie mostowym. Ostatni, 9 rozdział pracy stanowi podsumowanie, w którym Autor omówił stopień realizacji celów rozprawy, syntetycznie uzasadnił postawioną tezę oraz sformułował kierunki dalszych badań, niezbędne do upowszechnienia zaprezentowanej technologii na polskim rynku budowlanym. Streszczenie w języku polskim i angielskim zamieszczono po spisie cytowanej literatury. Załączniki podzielono na 2 części zawierające: algorytm obliczeniowy (Z1) oraz szczegółowe obliczenia belek (Z2).

**Tematem rozprawy doktorskiej** jest nowa technologia wzmocnienia konstrukcji betonowych naprężonymi taśmami CFRP przeznaczona do wzmocnienia płyt i belek żelbetowych na zginanie w sytuacji obniżonej ich nośności oraz niespełnionych warunków stanu granicznego użyteczności ugięć lub rys. Technologia będąca przedmiotem rozprawy została opracowana w celu ulepszenia technologii Neoxe Prestressing System (NPS) istniejącej na rynku od 2010 r., a wdrożonej przez spółkę Tines Composites wraz z Zakładem Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej. Z uwagi na sprawy formalne, ulepszona technologia została nazwana NPS II, a zakres jej ulepszenia obejmował: poszerzenie zakresu stosowania, efektywności wzmocnienia, ergonomiczności i obniżenie kosztów, wzrost konkurencyjności na rynku w stosunku do innych podobnych technologii krajowych i zagranicznych.

**Jako tezę ogólną** pracy Autor określił „*znaczące ulepszenie stosowanego od 2010 r. systemu wzmocnienia konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP pod nazwą NPS przez zwiększenie nośności zakotwień systemu o ok. 70% dzięki modyfikacji połączeń i konstrukcji, zwiększenie siły naciągu taśm o 100% dzięki ulepszeniu urządzenia naciągowego oraz zwiększenie efektywności, niezawodności i ergonomiczności stosowania systemu w warunkach in situ, tj. na rzeczywistych obiektach mostowych.*”

Dla potwierdzenia tej tezy Doktorant postawił sobie w pracy główny cel, którym było opracowanie, wszechstronne zbadanie oraz wdrożenie nowej technologii wzmocnienia konstrukcji betonowych naprężonymi taśmami CFRP. Szczegółowa problematyka badawcza przedstawiona w rozprawie została podzielona na trzy podstawowe części obejmujące:

- a) badania nowych zoptymalizowanych zakotwień,
- b) badania nowego urządzenia naciągowego,
- c) badania nowego systemu NPS II i jego wdrożenie.

Doktorant precyzyjnie określił swój udział w poszczególnych częściach programu badawczego realizowanego w szerszym zespole w ramach projektu POIG, który wynosi: 75% w części (a); - ok. 25% w części (b) oraz 100% w części (c).

Podkreślenia wymaga fakt, że Doktorant był koordynatorem całości prac naukowo-badawczych i czynnie uczestniczył w pozostałych elementach projektu, realizowanych w części a) przez AGH Kraków pod kierunkiem prof. S. Błażewicza oraz w części b) przez spółkę Tines Composites pod kierunkiem dr. inż. J. Michałowskiego.

**Główny cel rozprawy** stanowi wszechstronne zbadanie oraz wdrożenie nowej technologii wzmocnienia konstrukcji betonowych naprężonymi taśmami CFRP, będącej znaczącym ulepszeniem technologii NPS stosowanej od 2010 r. W realizacji tego celu Autor rozprawy postawił sobie cele szczegółowe obejmujące: opracowanie i badania nowych zakotwień systemu oraz urządzenia naciągowego; badania

strat siły sprężającej; wdrożenie nowego systemu NPS II; badanie zdolności i czystości patentowej nowego systemu wraz ze zgłoszeniem patentowym.

### **3. Ogólna ocena wartości pracy**

#### **3.1. Tematyka rozprawy**

Tematyka pracy jest aktualna, ponieważ problemy wzmocnienia konstrukcji za pomocą materiałów polimerowych z różnymi typami włókien, w tym głównie taśmami CFRP, są współcześnie przedmiotem intensywnych badań, w związku z rozwojem ich zastosowań w praktyce.

Wiele badań doświadczalnych przeprowadzonych na zginanych żelbetowych elementach wzmocnionych kompozytami wykazało dość niską efektywność tej techniki, spowodowaną zniszczeniem elementu na skutek nagłego odspojenia kompozytu od powierzchni betonu, zainicjowanego przez typowe dla zginania rysy w środkowej części elementu. Mimo, że wzmocnienie konstrukcji przy użyciu biernych kompozytów pozwala zwiększyć nośność na zginanie, to warunki użytkowalności pozostają na ogół niezmienione (tzn. moment rysujący i ugięcia od obciążeń użytkowych). W celu zwiększenia wpływu wzmocnienia na stan graniczny użytkowalności oraz poziom wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, najlepszym jak dotąd rozwiązaniem jest wstępne jego naprężenie.

Z czynnym sposobem wzmocnienia wiążą się dwa zasadnicze problemy: sposób naprężenia kompozytu i przekazanie siły rozciągającej taśmę na konstrukcję poddaną wzmocnieniu. Ze względu na obecność dużych naprężeń stycznych między naprężoną taśmą a betonowym podłożem, może dojść do nagłego odspojenia końca taśmy od powierzchni betonu. Aby zapobiec takiemu mechanizmowi zniszczenia, opracowano jak dotąd kilka sposobów kotwienia, które można podzielić na te, które wymagają użycia systemów kotwiących i systemy bez zakotwień, ze stopniową redukcją siły sprężającej na długości taśmy. Zagadnienie kotwienia wstępnie naprężonych taśm jest obecnie podstawą wielu prac badawczych, mających na celu wdrożenia tej niewątpliwie najbardziej efektywnej techniki wzmocnień w praktyce inżynierskiej. Z tego względu dobór tematu pracy uważam za bardzo celowy i niezwykle istotny z punktu widzenia wciąż rosnących potrzeb wzmocnienia istniejących konstrukcji zarówno tych z wcześniejszą historią ich użytkowania, jak i nowo wznoszonych, poddawanych zmianom projektowym w trakcie budowy.

W stosunku do tradycyjnego żelbetu, a także elementów sprężonych cięgnami stalowymi, problem analizy zginanych elementów żelbetowych, wzmocnionych za pomocą dołączanych elementów polimerowych zbrojonych włóknami, polega na współdziałaniu trzech materiałów o znacząco różnej charakterystyce. W ten sposób obok materiału kruchego, o nieliniowej charakterystyce, jakim jest beton, występuje ciągliwy materiał o cechach plastycznych – jakim jest stal zbrojeniowa oraz trzeci materiał – polimer zbrojony włóknami, o liniowo-sprężystej charakterystyce i ograniczonej zdolności odkształceń. Z tego powodu konieczne są szerokie badania wzmocnionych na zginanie elementów żelbetowych nie tylko krótko, ale i długoterminowe, które pozwolą, precyzyjnie określić poziom efektywności tego typu wzmocnień w długim czasie użytkowania obiektu, pod wielokrotnie zmiennym obciążeniem oraz w zmiennych warunkach atmosferycznych.

Biorąc pod uwagę, że dzisiejszy poziom teorii żelbetu, poprzedzony był blisko 150-letnim okresem badań doświadczalnych, szeregu modyfikacji modeli obliczeniowych i doskonalenia procedur projektowania konstrukcji żelbetowych, niespełna 25-letnia historia badań konstrukcji żelbetowych wzmocnionych materiałami FRP wydaje się przy tym dziedziną bardzo młodą.

Jeśli chodzi o przedstawienie stanu wiedzy w dziedzinie zastosowań sprężonych materiałów kompozytowych CFRP zarówno w zakresie badań samych zakotwień, jak i w pełni wzmocnionych zginanych elementów żelbetowych, Autor wykonał to bardzo skrupulatnie przywołując zarówno te szandarowe przykłady, najczęściej cytowane, jak i te mało znane. Świadczy to o dużej Jego determinacji w opracowaniu obszernego zbioru danych i dowodzi starannego przestudiowania wielu publikacji. Trafne zestawienie dotychczasowych badań systemów kotwiąco-sprężających, jak i elementów wzmocnionych stanowi wartościową część pracy, a przedstawienie ich syntezy z logicznym komentarzem świadczy o badawczej dojrzałości Autora.

Oceniając więc wstępną część pracy warto podkreślić, że Doktorant czytelnie określił walory wzmocnienia czynnego, za pomocą naprężonych taśm kompozytowych, w stosunku do wzmocnień biernych, właściwie podsumowując stan wiedzy i określając na tej podstawie cel badań własnych.

Przyjęty przez Doktoranta główny układ pracy jest prawidłowy, czytelny i dobrze komponuje merytoryczną wartość rozprawy.

Na uwagę zasługuje krytyczna analiza czynników wpływających na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych naprężonymi taśmami CFRP, bardzo skrupulatnie opracowana w rozdziale 4. Autor trafnie dobrał metodologię tej analizy obejmującej kilkadziesiąt publikacji naukowych wydanych w okresie 1991-2015. W analizie tej ujęte zostały zarówno czynniki zamierzone (przez Autora nazwane stałymi), do których zaliczone zostały: parametry geometryczne, stopień zbrojenia stalowego, poziom obciążenia belki przed wzmocnieniem, jak i te zmienne, do których zaliczono: poziom naprężenia taśm CFRP, stopień zbrojenia kompozytowego i wpływ obecności skleiny.

Podkreślam tę kwestię dlatego, że Doktorant udowodnił, że rozumie wpływ tych czynników i właściwie interpretuje wagę każdego z nich, ze wskazaniem ich wpływu na trzy fazy pracy elementu żelbetowego poddanego zginaniu (w tym wypadku: moment rysujący, moment uplastycznienia zbrojenia wewnętrznego i moment niszczący). Na uwagę zasługuje również świadoma interpretacja sposobów zniszczenia (przez odspojenie, zerwanie kompozytu oraz wysunięcie jednego z końców z zakotwienia). Podział czynników na stałe i zmienne jest bardzo logiczny, ponieważ został uwarunkowany wpływem projektanta na ich dobór. Czynniki stałe są niezależne od projektanta, gdyż dotyczą narzuconej sytuacji elementu konstrukcyjnego (o określonych wymiarach, w określonym układzie statycznym i określonej charakterystyce materiałowej betonu i stali). Czynniki zaś zmienne trafnie nazwał Autor zależnymi od projektanta, gdyż na etapie projektowania wzmocnienia ma on wpływ na ich właściwy dobór.

Wydaje się jednak, że uogólnienie wpływu tych czynników na efektywność wzmocnienia nie jest takie proste, gdyż każdorazowo przy analizie wpływu jednego parametru, inne parametry również ulegają zmianom. Natomiast analiza badań zawężona do jednego lub kilku programów, daje również dość zniekształcony obraz, ograniczony do konkretnej sytuacji określonej warunkami danego programu badawczego. Wobec tego, aby uniknąć wpływu różnic geometrycznych i wytrzymałości betonu, w analizie należałoby rozważyć moment sprowadzony ( $M/(bdf_c)$ ) w odniesieniu do zarysowania, uplastycznienia zbrojenia głównego i zniszczenia.

Opisy zmian wielkości charakteryzującej pracę wzmocnionego elementu żelbetowego, przedstawione przez Autora w tabelach 3-1 ÷ 3-9 są nieczytelne, zwłaszcza dotyczy to ukośnych strzałek (opadających i wznoszących) i liczb określających procentowy przyrost/spadek tych wartości. Należałoby wprowadzić jednolity opis oznaczeń, gdyż ten zamieszczony w tabelach uniemożliwia właściwą interpretację

wyników np. tab. 3-1: „ $\nearrow$  30% (3)<sup>2</sup>”; „ $\nearrow$  3-13(2)<sup>1</sup>”; „5(6)”; „5% (6)”; „ $\rightarrow$  (3)<sup>2</sup>”; „ $\rightarrow$  (6)”; „ $\searrow$  1% -  $\nearrow$  2% (3)<sup>2</sup>” itd.

### 3.2. Główne zalety rozprawy

Nadrzędną cechą rozprawy jest kompleksowe ujęcie tematu wzmocnień zginanych elementów żelbetowych obejmujące badania podstawowe zakotwień i urządzenia do naciągu taśm nowego systemu kotwiąco-sprężającego. Rezultaty tego etapu rozprawy doktorskiej zostały wykorzystane do zgłoszenia patentowego nowego systemu wzmocnienia, którego Autor rozprawy jest jednym z twórców. Należy przy tym dodać, że dość powszechnie badania doświadczalne kończą się publikacjami, a w niewielkim stopniu służą bezpośrednim wdrożeniom, z tego względu udział Doktoranta w patencie zasługuje na szczególne uznanie i znacząco podnosi wartość Jego pracy.

Do głównych osiągnięć naukowych Doktoranta, zawartych w Jego rozprawie zaliczam:

1) Opracowanie i kompleksowe zbadanie systemu wzmacniania NPS II składającego się z: zakotwień z blach stalowych (dwóch typów: biernego i czynnego), urządzenia naciągowego wraz z dostosowaniem taśm rodzaju taśm CFRP i kleju epoksydowego (szczegółowo opisane w rozdziale 4 pracy). Cennym wnioskiem tych badań jest określenie poziomu strat doraźnych wywołanych poślizgiem zakotwienia równych 3mm.

2) Badania modeli zakotwień taśm CFRP, obejmujące badania materiałowe taśm CFRP, opracowanie nowej mieszanki klejowej, badania połączeń taśm CFRP z blachami stalowymi (dwóch grubości), badania statyczne modeli zakotwień klejowo-nitowych (typu N) i klejowo-śrubowych (typu S) oraz badania zmęczeniowe modeli połączeń klejowo-nitowych. Wyniki badań statycznych pozwoliły określić maksymalne siły naciągu taśm dla obu typów zakotwień na poziomie  $50\%f_{tu}$  – dla zakotwień typu N i  $60\%f_{tu}$  – dla zakotwień typu S.

Ponadto badania zmęczeniowe przeprowadzone na zakotwieniach typu N są kolejną wartością dodaną w merytorycznej ocenie pracy, co jest dowodem badawczej dociekliwości Doktoranta w celu poznania wszystkich wpływów mogących zmienić skuteczność kotwienia taśm.

3) Zaproponowanie procedury projektowania wzmocnień elementów żelbetowych naprężonymi taśmami CFRP (wg PN-EN 1992-1-1, 2008; CNR, 2004 oraz Fib Bulletin, 2001).

Mimo, że Autor szczegółowo opisał algorytm obliczania nośności wzmocnionych elementów i podał zasady analizy stanu granicznego użytkowalności, to obliczenia SGU ograniczone zostały jedynie do określenia wartości naprężeń i ugięć, bez analizy szerokości rozwarcia rys. Również szczegółowa analiza obliczeniowa badanych elementów zamieszczona w Załączniku 2 pracy nie zawiera takich obliczeń, podobnie, jak obliczenia wzmocnienia mostu (opisane w rozdziale 8).

Powszechnie wiadomo, że podjęcie takich obliczeń jest zagadnieniem dość skomplikowanym i należałoby w tym przypadku analizę rys wykonać odrębnie dla stanu przed wzmocnieniem i po wzmocnieniu. Korzystając bowiem z podstawowej zasady zachowania płaskiego przekroju i zasady „tension stiffening”, można z dużą dokładnością przeprowadzić taką analizę w odniesieniu do rys.

4) Badania efektywności wzmocnienia belek żelbetowych.

Program badań obejmuje sześć wolnopodpartych, jednoprzęsłowych belek żelbetowych, wśród których jedna (B1) była belką niewzmocnioną – świadkiem; dwie wzmocnione taśmami bez naciągu : bez zakotwień (B2) i kotwionymi przy użyciu zakotwienia nitowanego; trzy wzmocnione przy użyciu taśm CFRP naprężonych do poziomu odpowiednio: 30%, 40% i 50%  $f_{tu}$  z zakotwieniami śrubowymi.

Belki o przekroju 0,50x0,42m i rozpiętości w osiach podpór 5,6 m o stopniu zbrojenia ok. 0,8% wzmocniono dwiema taśmami CFRP typu UHS614, dla których w badaniach doświadczalnych określono charakterystykę wytrzymałościową ( $E_f = 160 \text{ GPa}$ ,  $f_{fu} = 3280 \text{ MPa}$ ,  $\epsilon_{fu} = 20,1\%$ ).

Podstawowe badania wytrzymałościowe materiałów (betonu, stali i taśm) wykonano starannie i przedstawiono w sposób niebudzący wątpliwości. Wymaga to podkreślenia, ponieważ nie jest to regułą w pracach badawczych, a często przyjmowane są parametry podawane przez producenta.

Przyjęty przez Doktoranta program badań zapewniał właściwą interpretację wpływu parametrów zmiennych, ponieważ każde badanie obejmowało tylko jeden dodatkowy parametr zmienny. W ten sposób program badań zapewnił jakościową i ilościową ocenę wpływu poszczególnych czynników zmiennych na wysoce satysfakcjonującym poziomie.

Wyniki badań Autor opisał szczegółowo zarówno w odniesieniu do SGN, jak i SGU z precyzyjnym opisem mechanizmów zniszczenia. Analiza wyników badań jest czytelna i trafnie określa efektywność wzmocnienia w trzech zakresach pracy elementu wzmocnionego: niezarysowanym, sprężystym i nośności granicznej.

#### 5) Badania wdrożeniowe na obiekcie mostowym

Ten ostatni element pracy oceniam bardzo wysoko, ponieważ badania wdrożeniowe w pracach doktorskich należą raczej do rzadkości. Autor przedstawił w tej części pracy dokładną analizę obiektu mostowego, zaproponował projekt jego wzmocnienia i zrelacjonował właściwe wzmocnienie istniejących belek wraz z analizą skuteczności tego wzmocnienia. Ten element pracy stanowi potwierdzenie wysokiego poziomu merytorycznego doktoranta, doświadczenia praktycznego i w pełni pozwala uznać, że osiągnął on zamierzone cele pracy.

Postawiona przez Autora teza rozprawy podzielona na trzy części obejmujące: zwiększenie nośności zakotwień systemu o ok. 70%; zwiększenie siły naciągu taśm o 100% oraz zwiększenie efektywności, niezawodności i ergonomiczności stosowania systemu na rzeczywistych obiektach mostowych została w pełni potwierdzona.

Kierunki dalszych badań zaproponowane przez Doktoranta potwierdzają jego determinację dalszego rozwoju systemu NSMII w celu wyeliminowania ograniczeń obecnego systemu oraz rozwój innych nowoczesnych systemów, również tych obejmujących inne technologie np. wklejane w bruzdy naprężone taśmy CFRP (NSM).

## 4. Uwagi krytyczne

### 4.1. Uwagi terminologiczne

Dbłość o poprawność językową nakazuje mi wymienić kilka uwag terminologicznych i językowych pomyłek, które jednak nie mają wpływu na ogólną opinię pracy, a mają raczej ustrzec Autora przed używaniem ich w przyszłych publikacjach.

- W pracy kilkakrotnie użyto terminu „wytężenie”, jako synonimu terminu „obciążenie”, co zostało użyte w kontekście wstępnego obciążenia elementu przed wzmocnieniem. To określenie jest dość często w potocznych określeniach stosowane, ale termin „wytężenie” poprawnie powinien być używany w analizie naprężeń (wytrzymałości materiałów), a nie w odniesieniu do stopnia wykorzystania nośności elementu lub całej konstrukcji.

- Określenie „naprężana” taśma jest w pracy używane tak samo często, jak określenie „wzmacniana” konstrukcja. Oba określenia występują w tekście pracy w kontekście na ogół czynności dokonanej np. konstrukcji „wzmocnionej”, „naprężoną” taśmą. Naturalne i językowo poprawne jest więc użycie formy

dokonanej zamiast niedokonanej, co może sugerować, że np. taśma „naprężana” nie zastała w pełni „naprężona”, to samo dotyczy konstrukcji „wzmocnianej”, ale ostatecznie „niewzmocnionej”.

- Wśród zalet technologii naprężonymi taśmami CFRP Autor wymienia (cytat str. 14): „wzrost poziomu bezpieczeństwa – postać zniszczenia elementu wzmocnionego taśmą naprężoną jest bardziej plastyczna”. W jaki sposób element żelbetowy sprężony zewnętrzną taśmą jest bardziej plastyczny? Nie wskazuje na to ani sprężysto-liniowa charakterystyka taśm CFRP, ani tym samym ich sprężenie.

Co Autor miał na myśli formułując w tym kontekście tezę o wzroście poziomu bezpieczeństwa?

- Sformułowanie „Wzrost wartości charakterystyk materiałowych lub geometrycznych wzmocnianych belek żelbetowych wpływa wyraźnie na zwiększenie wszystkich parametrów opisujących ich zachowanie (nośności, sztywności, momentu rysującego i momentu uplastycznienia stali)” (cytat str. 88) jest bardzo nieprecyzyjne i językowo niepoprawne. Zbyt duży poziom uogólnienia prowadzi do niezrozumiałych stwierdzeń, które ponadto nie mają rzeczywistego uzasadnienia.

- Podobnie niepoprawne jest inne sformułowanie z tej samej strony: „Podniesienie tych parametrów skutkuje jednak obniżeniem efektywności wzmocnienia”.

#### 4.2. Uwagi do metodologii badań i obliczeń

- Autor określa w badaniach poślizg zakotwienia względem betonu mierzony, jako względne przemieszczenie systemu kotwiącego względem podpory przy użyciu czujnika zegarowego. W jaki sposób pomierzono poślizg samej taśmy w zakotwieniu? Jeśli taki poślizg wystąpił, to całkowite przemieszczenie taśmy względem betonu (jako suma poślizgu zakotwienia i taśmy w zakotwieniu) mogłoby okazać się większe niż to pomierzone.

- W jaki sposób i w jakich miejscach kontrolowano temperaturę na długości wygrzewanego odcinka taśmy w badaniach Serii S1N – S3N?

- Algorytm obliczania nośności przekroju wzmocnionego przedstawiony w schemacie blokowym na stronie 179 nie jest wystarczająco jasny. W miejscu sprawdzania warunku  $\epsilon_c(x) > -3,5\%$ , twierdząca odpowiedź „TAK” powinna oznaczać „zniszczenie przekroju w strefie ściskanej”, podczas gdy wg schematu, odpowiada to „zniszczeniu przekroju w strefie rozciąganej”. W tym samym poziomie obliczeń schematu blokowego, przecząca odpowiedź „NIE” – do tego samego warunku, oznacza „zniszczenie przekroju w strefie ściskanej”, co nie jest prawdą.

- Jaki mechanizm zniszczenia przyjęto w analizie obliczeniowej belek B4-B6 wzmocnionych naprężonymi taśmami CFRP (str. 249; odspojenie taśmy, zerwanie taśmy, czy inny schemat zniszczenia), jak dobrano odpowiadającą wartość  $\Delta\epsilon_f$  ?

- Jedynie miarodajne pomiary odkształceń dają pomiary czujnikami indukcyjnymi LVDT. Z uwagi na lokalny pomiar odkształceń i dużą przypadkowość pomiaru, tensometry elektrooporowe raczej nie są zalecane do pomiaru odkształceń betonu.

- Układ podpór na rys. 7-18 wskazuje, że obie podpory były obrotowe, bez możliwości przesuwu, czy taki był rzeczywiście zrealizowany schemat belek podczas badań?

- Czy w analizie wyników badań został uwzględniony wpływ obciążenia wstępnego elementu przed wzmocnieniem wywołany ciężarem własnym? Jakie były konsekwencje tego wpływu? Z analizy momentu rysującego ( $M_{cr0}=55\text{kNm}$ ) dla belki niewzmocnionej B1 wynika, że nie powinna się ona zarysować pod ciężarem własnym ( $M_{cr0}=20\text{kNm}$ ). Wydaje się, że różnica między charakterystyczną wartością momentu rysującego, obliczoną w Załączniku 2 (str. 315;  $M_{cr0}=61,8\text{kNm}$ ), a wartością doświadczalną ( $M_{cr0}=55\text{kNm}$ ), wynosząca ponad 12%, jest zbyt duża.

- Wykresy odkształceń taśm w belkach B4-B6 (rys. 7-59, 60, 61) nie potwierdzają poziomów naprężenia taśm odpowiadających tym belkom: 6, 8, 10‰.

- Jaki jest powód większego przesunięcia wykresów odkształceń taśm w belkach wzmocnionych biernie B2 i B3, w porównaniu z belkami B4, B5, B6 – wzmocnionymi czynnie (rys. 7-62 i 7-63)?

Mimo wspomnianych wyżej uwag, pragnę podkreślić, że praca jest bardzo obszerna i znacząco wybiega swoim zakresem poza standardowe prace o charakterze badawczym. Napisana jest bardzo czytelnie, logicznie podzielona na rozdziały i podrozdziały, co sprawia, że jest bardzo przyjazna dla czytelnika, jeśli pominąć nieliczne „lapsusy językowe”, które nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

Materiał graficzny, tablice wyników i porównań oraz objaśnienia oznaczeń podano starannie i kompletnie, co przy tak obszernej ich liczbie nie było zadaniem łatwym.

W świetle przedstawionych faktów bardzo wysoko oceniam dokonania Doktoranta potwierdzone realizacją wszystkich postawionych celów, w bardzo szerokim zakresie badań własnych systemu sprężającego, wzmocnionych elementów, jak i wdrożenia na istniejącym obiekcie mostowym.

W pełni potwierdzam, że Doktorat udowodnił postawioną tezę: *„znaczące ulepszenie stosowanego od 2010 r. systemu wzmacniania konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP pod nazwą NPS przez zwiększenie nośności zakotwień systemu o ok. 70% dzięki modyfikacji połączeń i konstrukcji, zwiększenie siły naciągu taśm o 100% dzięki ulepszeniu urządzenia naciągowego oraz zwiększenie efektywności, niezawodności i ergonomiczności stosowania systemu w warunkach in situ, tj. na rzeczywistych obiektach mostowych.”*

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartosza Piątka rozwiązuje wszystkie postawione na jej wstępie cele naukowe, dowodzi o naukowej dojrzałości badacza i zarazem praktyka, który sprawnie relacjonuje, komentuje i porównuje badania obce, a na ich tle wyraźnie określa cele badań własnych, które ostatecznie jeszcze lepiej wykonuje, analizuje i wyciąga właściwe wnioski.

To w pełni pozwala mi wyrazić przekonanie, że Doktorant posiada predyspozycje do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych w zakresie prowadzenia bardzo jak widać złożonych badań i starannego opracowania ich wyników oraz – w znacznej przewadze zagadnień – poprawnego wnioskowania i prób uogólnień.

Wyrażam przekonanie, że praca doktorska mgr inż. Bartosza Piątka zatytułowana „Nowa technologia wzmacniania konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP” zawiera oryginalne fragmenty rozwiązań problemu naukowego i wskazuje na opanowanie przez Doktoranta warsztatu naukowego, a zatem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. (Dz. Ustaw Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami, Dz. U z 2005r. Nr 164, poz. 1365) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Bartosza Piątka do publicznej obrony.

Ponadto uwzględniając ogromny wkład pracy Doktoranta w realizację tak szerokiego programu badawczego, skuteczne wdrożenie na obiekcie mostowym i współautorstwo w patencie, z pełnym przekonaniem i satysfakcją wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Piątka.

Dr hab. inż. Renata Kotynia, Prof. PŁ