

Växjö, 25 sierpnia 2023 r.

**Recenzent:**

dr hab. inż. Wit Derkowski  
Associate Professor  
Department for Building Technology  
Linnaeus University  
SE-351 95 Växjö, Sweden  
tel.: +48 502136060  
e-mail: [wit.derkowski@lnu.se](mailto:wit.derkowski@lnu.se)

**Adresat Recenzji:**

prof. dr hab. inż. Dariusz Gawin  
Przewodniczący Rady do spraw Stopni Naukowych  
w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka  
Politechniki Łódzkiej  
al. Politechniki 6, 90-924 Łódź

**Recenzja**

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

**1. Podstawa formalna i prawna opracowania recenzji**

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo prof. dr hab. inż. Dariusza Gawina, Przewodniczącego Rady do spraw Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej, z dnia 16 czerwca 2023 roku, przesłane wraz z egzemplarzem rozprawy doktorskiej i umową o dzieło nr D/14/2023/W6 z dnia 27 czerwca 2023 r.

Podstawą prawną wykonania recenzji jest Ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668) wraz z późniejszymi zmianami.

**2. Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Rogowskiego, pt.: „Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmacniania elementów żelbetowych na zginanie”. Praca została napisana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Renaty Kotyni, jako promotora.

Opiniowana praca, napisana w języku polskim, zawarta jest w trzech tomach, na które składają się: treść zasadnicza rozprawy doktorskiej licząca 186 stron formatu A4 oraz dwa tomy załączników z wynikami badań o łącznej objętości 190 stron formatu A3. Na treść dysertacji, znajdującej się w tomie pierwszym składają się podziękowania, streszczenia, spis treści, spisy rysunków, tabel i oznaczeń o łącznej liczbie 24 stron, 151 stron zasadniczej części pracy składającej się z 8 rozdziałów oraz 21 stron zawierających wykaz piśmiennictwa obejmujący 123 pozycje.

Tematem recenzowanej dysertacji jest analiza możliwości stosowania zbrojenia ze stopów metali z pamięcią kształtu (FeSMA) do wzmacniania przez sprzężenie zginanych elementów żelbetowych,

prowadzona w kontekście oceny wykonalności i efektywności tego typu wzmocnień. Jest to praca o charakterze doświadczalno-obliczeniowym, w której Doktorant prowadził badania porównawcze belek wzmocnionych przez sprężenie taśmami z włókien węglowych (CFRP) oraz taśmami ze stopów z pamięcią kształtu (FeSMA), stworzył model numeryczny takich elementów oraz zaproponował uproszczony model analityczny stosunkowo dobrze odzwierciedlający ich rzeczywistą pracę.

Moim zdaniem tytuł dysertacji jest zbyt szeroki i nie całkowicie odzwierciedla jej, siłą rzeczy, ograniczony zakres – w pracy analizowana była jedynie praca belek pod doraźnym, monotonicznym obciążeniem krótkotrwałym, z pominięciem efektów obciążeń długotrwałych, zmiennych w czasie, jak i tych o różnym charakterze, np. dynamicznym czy termicznym.

Należy jednak jednoznacznie podkreślić, że samo zagadnienie możliwości stosowania tych nowatorskich materiałów w inżynierii lądowej ma duże znaczenie praktyczne i jednocześnie stanowi interesujący problem naukowy, który do chwili obecnej nie doczekał się odpowiedniej ilości badań i analiz, umożliwiających powszechne realizacje tego typu wzmocnień obiektów budowlanych. Fakt ten bardzo dobrze uzasadnia podjęcie tej problematyki, jako aktualnego i ważnego dla budownictwa zagadnienia, które winno zostać rozwiązane na drodze naukowej. Wybór takiego tematu dysertacji zasługuje na najwyższą ocenę i jestem przekonany, że efekty niniejszej pracy będą budzić zainteresowanie wielu ośrodków naukowych na świecie.

### 3. Treść rozprawy doktorskiej

Zasadnicza część recenzowanej rozprawy doktorskiej składa się z ośmiu rozdziałów omówionych poniżej.

Rozdział 1, liczący 4 strony, zawiera krótki opis problemu badawczego, motywację i zakres pracy, a także cztery cele i jedną tezę główną pracy.

Już na wstępie pracy autor informuje, że „głównym celem pracy jest analiza wykonalności i efektywności” analizowanej technologii wzmacniania, ale to określenie wydaje się zbyt szerokie. Studium wykonalności rozumiane jest zazwyczaj jako kompleksowa metoda, określająca szanse i korzyści, problemy i ograniczenia, ale także i koszty, które mogą wiązać się z wdrażaniem nowego pomysłu, a więc obejmuje ono zarówno techniczną wykonalność, jak i wykonalność ekonomiczną, prawną, operacyjną czy planową (np. w zakresie analiz czasowych). To właśnie kompleksowość jest najważniejszym aspektem zagadnienia wykonalności. Analizowana praca skupia się natomiast jedynie na wykonalności technicznej, a i w tym zakresie nie w pełni rozwiązuje zagadnienie (kwestia właściwego zakotwienia taśm pozostała nierozwiązana).

Zaprezentowana teza pracy brzmi następująco: *„Czy sprężenie przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA jest skutecznym sposobem poprawy stanów użytkowalności i nośności zginanych elementów żelbetowych?”* W tej formie jest ona raczej szerokim pytaniem badawczym, a nie tezą. Teza powinna być tym, co Doktorant chciałby ogłosić światu - to mógłby być np. pomysł interpretacyjny, efekt wnikliwej analizy, wykazanie jakiegoś związku czy wpływu danych parametrów na pracę konstrukcji. Teza jest zatem odpowiedzią na pytanie badawcze, a nie samym pytaniem. Pojawia się również wątpliwość, czy podniesiona w tezie skuteczność sprężenia materiałami FeSMA (w innych miejscach pracy nazywana efektywnością) jest traktowana łącznie, czy rozdzielnie w stosunku do poszczególnych stanów granicznych nośności i użytkowalności. Innymi słowy, czy gdyby którykolwiek ze stanów granicznych nie został poprawiony, to wzmocnienie należy uznać za nieskuteczne? Jak zatem zdefiniowana jest skuteczność czy efektywność?

Pomimo wspomnianych uwag dyskusyjnych uważam, że postawione zagadnienie badawcze jest ważne i bardzo ciekawe z naukowego punktu widzenia, a same badania w tym zakresie z pewnością stanowią pożądane poszerzenie aktualnego stanu wiedzy.

W rozdziale 2, zatytułowanym *Materiały z pamięcią kształtu (SMA)*, liczącym 38 stron, kompleksowo przedstawiono stopy SMA, należące do grupy materiałów zwanych inteligentnymi, szczegółowo opisując ich charakterystykę. Szkoda, że autor nie wykonał własnego zestawienia właściwości SMA na podstawie dostępnych informacji (co mogłoby być dużą wartością tej pracy), a jedynie zaczerpnął tabele podane w innych pracach. Spowodowało, to że poszczególne tabele są czasami niekompletne lub nieczytelne lub dane w nich są niespójne. Przykładowo, w Tab. 2.1:

- nie podano wytrzymałości, która to wydaje się jedna z podstawowych właściwości mechanicznych materiału;
- zastosowano symbol „-” ale nie wyjaśniono, czy jest to właściwość do tej pory niezbadana, czy też ona nie występuje lub jest nieistotna;
- podając „zakres temperatur” dla  $M_s$  i  $A_s$  podano tylko jedną wartość temperatury;
- maksymalne odkształcenia FeSMA podano jako 40%, podczas gdy w Tab. 2.2 podano wartości od 16 do 30%;
- podano wartości modułu Younga, nie precyzując czy mowa jest o  $E_{ini}$  czy  $E_{act}$ , a wartość maksymalna jest mniejsza niż wartości podane w Tab. 2.2 i 2.3.

Podobna uwaga ogólna dotyczy podawanych właściwości reologicznych materiału FeSMA (p. 2.2.3). W Tab. 2.6. zebrano wyniki różnych badań, ale trudno z nich jest czytelnikowi cokolwiek ostatecznie wnioskować. Nie tylko dlatego, że w niektórych przypadkach nie podano ważnych danych, ale i dlatego, że np. w różnych badaniach tego samego materiału badanego niemalże w tych samych warunkach uzyskano prawie dwukrotną różnicę w wartości relaksacji (patrz ostatni wiersz w badaniach [61] i drugi wiersz w badaniach [72]). Dodatkowej interpretacji wymaga też pierwszy wiersz w badaniach [30], gdzie przy  $\epsilon_{init}=0$  (próbka nieobciążona?) uzyskano relaksację równą 9%.

W rozdziale 3, liczącym 42 strony, przedstawiono *Stan wiedzy w dziedzinie aktywnego wzmocnienia na zginanie elementów żelbetowych materiałami FeSMA*. W rozdziale tym Doktorant ograniczył się do swoistego rodzaju state-of-the-art w zakresie badań eksperymentalnych, natomiast dotychczas opracowane modele obliczeniowe zaprezentował dopiero w rozdziałach 6 i 7. Wybrano, przeanalizowano i opisano 14 różnych badań opublikowanych w okresie 2016–2022 (to pokazuje, jak nową dziedzinę w zakresie inżynierii lądowej stanowi wybrane zagadnienie). Bardzo wysoko oceniam p. 3.5 „*Analiza wyników badań doświadczalnych*” zakończony skrupulatnie opracowanymi wnioskami.

Na rozdział 4, prezentujący program własnych badań doświadczalnych, składa się 16 stron. Zawiera on skrótowy opis całości badań, obejmujący charakterystykę użytych materiałów, dane dotyczące elementów badawczych wzmocnionych zarówno taśmami CFRP, jak i FeSMA, prezentację technologii naprężania i kotwienia poszczególnych rodzajów taśm, a także opis stanowiska badawczego wraz z charakterystyką infrastruktury pomiarowej.

W rozdziale 5 *Wyniki badań doświadczalnych*, liczącym 20 stron, zawarto oszacowanie wprowadzonej siły sprężającej w poszczególnych belkach oraz zestawiono podstawowe wyniki w zakresie mechanizmów zniszczenia, zarysowania i ugięcia badanych belek. Szczegółowe wyniki pomiarów zawarte zostały w dwóch tomach Załączników. Rozdział ten kończy się stosunkowo lakonicznym podsumowaniem.

Rozdział 6, obejmujący 12 stron, zawiera opis własnego modelu numerycznego wraz z jego walidacją na podstawie wybranych wyników badań własnych. Całość analiz prowadzono w programie Atena. Z uwagi na niewystarczającą nośność strefy zakotwienia w belkach użytych w badaniach własnych, numeryczne badania parametryczne wpływu stopnia zbrojenia stalowego, wpływu klasy betonu oraz wpływu poziomego sprężenia na efektywność wzmocnienia wykonano na belkach odpowiadających tym badanym przez Michels i in. [51].

W rozdziale 7, zatytułowanym *Model obliczeniowy*, liczącym 6 stron, skrótowo przedstawiono dotychczasowe modele analityczne wyznaczania nośności na zginanie przekrojów żelbetowych sprężonych cięgnami SMA bez przyczepności oraz opisano propozycję własną uproszczonego modelu analitycznego dla takich obliczeń, zbudowanego na bazie modeli wcześniej opisanych.

Rozdział 8, liczący również 6 stron, zawiera wnioski końcowe oraz proponuje kierunki przyszłych badań.

#### 4. Ocena merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr inż. Janusza Rogowskiego stwierdzam, że przyjęty układ oraz sposób prezentacji treści jest logiczny i typowy dla prac o charakterze doświadczalno-obliczeniowym. Jak wcześniej wspomniałem, bardzo wysoko oceniam tematykę rozprawy i podjęcie przez Doktoranta wyzwania prowadzenia badań naukowych wciąż unikalnych w skali świata, a na polskim rynku w ogóle nie prowadzonych – to właśnie takie prace mają największe szanse być zauważone i docenione zarówno przez międzynarodowe gremia naukowe, jak i przez przedstawicieli przemysłu, zorientowanych na wdrażanie najnowszych technologii w budownictwie.

Dobór pozycji literaturowych jest raczej właściwy, zarówno pod kątem ilościowym, jak i jakościowym - przeanalizowano zbiór dobrze wybranych, najważniejszych w tej tematyce prac, realizowanych w ośrodkach zagranicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że z rynku krajowego Doktorant skupił się jedynie na pracach badawczych wykonywanych przez rodzimy zespół Politechniki Łódzkiej oraz – częściowo – przez zespół Politechniki Rzeszowskiej. Jednocześnie pominięte zostały prace realizowane np. na Politechnice Krakowskiej (w tym np. praca doktorska W. Politalskiego dotycząca przyrostu naprężenia w cięgnach bez przyczepności stosowanych we wzmocnieniach zginanych konstrukcji żelbetowych; praca doktorska A. Dębskiej dotycząca zastosowania materiałów z pamięcią kształtu do sprężania konstrukcji betonowych; czy prace autora niniejszej recenzji dotyczących pierwszego w Polsce zastosowania sprężonych taśm CFRP do wzmocniania konstrukcji budynku), na Politechnice Śląskiej (w tym praca doktorska M. Kałuży dotycząca wzmocniania przez sprężanie taśmami CFRP), czy w innych ośrodkach (np. prace W. Radomskiego dotyczące pierwszych w Polsce zastosowań materiałów CFRP do wzmocniania konstrukcji inżynierskich).

Strona edytorska dysertacji znajduje się na bardzo wysokim poziomie.

Na fakt mojej jednoznacznie pozytywnej oceny przedmiotowej rozprawy doktorskiej wpływają przede wszystkim następujące argumenty:

- stworzenie dobrze opracowanego state-of-the art w zakresie światowych badań eksperymentalnych, dotyczących wzmocniania zginanych elementów żelbetowych sprężonymi taśmami SMA, wraz z uporządkowaniem oraz opracowaniem statystycznym ich wyników;
- dobre rozpoznanie przez Doktoranta problemu, do tej pory nieopracowanego naukowo, który ma bezpośrednie odniesienie do praktyki inżynierskiej – zarówno tematyka, cele, jak i teza główna

pracy oraz przyjęte metody naukowe zostały trafnie dobrane. Należy w tym miejscu bardzo wysoko ocenić zamiar łączenia pracy badawczej nad zagadnieniami o charakterze naukowo-poznawczym z wdrażaniem nowych rozwiązań inżynierskich w praktyce;

- przeprowadzenie trudnych i pracochłonnych badań eksperymentalnych na elementach konstrukcyjnych w skali zbliżonej do rzeczywistej, z zastosowaniem materiałów dotychczas niezmiernie rzadko stosowanych, co stanowiło znaczące utrudnienie w pracy młodego badacza. Złożoność badań doświadczalnych wynika również ze stosowania zróżnicowanych technik pomiarowych;
- najwyższa staranność w udokumentowaniu wyników własnych badań doświadczalnych i ich otwarte udostępnienie (Załączniki recenzowanej pracy doktorskiej), a dzięki temu umożliwienie innym badaczom wykorzystania i rozpowszechnienia efektów swojej pracy;
- opracowanie miarodajnych modeli obliczeniowych: modelu numerycznego dla badanych elementów, zwalidowanego wynikami własnych badań eksperymentalnych, oraz uproszczonego modelu analitycznego określania nośności na zginanie przekrojów wzmocnionych. Autor wykazał tym samym możliwość przeprowadzenia stosunkowo wiarygodnej analizy numerycznej pracy żelbetowych belek wzmocnionych sprężonymi taśmami FeSMA bez przyczepności, a jednocześnie możliwość szybkiego szacowania nośności zginanych elementów sprężonych takimi taśmami.

Podczas studiowania rozprawy nasunęły się pewne wątpliwości, niejasności bądź błędy, które powinny zostać wyjaśnione. Uwagi te podzieliłem na następujące cztery grupy:

❖ Uwagi ogólne, odnoszące się do całości pracy

1) dotycząca przedwczesnego zniszczenia strefy zakotwień w belkach wzmocnionych FeSMA

W belkach wzmocnionych przez sprężenie taśmami FeSMA, badanych w ramach recenzowanej pracy doktorskiej, zniszczenie nastąpiło na skutek wyrwania gwoździ kotwiących taśmy, a więc nie uzyskano pełnej nośności przekroju wzmocnionego. Uważam, że fakt ten stanowi poważne niedociągnięcie w planowaniu badań prowadzonych w ramach pracy zajmującej się analizą efektywności wzmocnień taśmami FeSMA, ponieważ przedwczesne niszczenie strefy zakotwień wyklucza określenie wzmocnienia jako efektywnego.

Z powodu przedwczesnego zniszczenia belek FeSMA, wnioski w pracy powinny dotyczyć przede wszystkim etapów poprzedzających początek utraty zakotwienia, czyli raczej fazy sprężystej pracy belki. Wartości obciążenia niszczącego czy końcowego ugięcia tych belek nie powinny być porównywane z odpowiednimi wartościami belek wzmocnionych taśmami CFRP, w których taśmy prawidłowo pracowały do końca eksperymentu (autor takie analizy zaprezentował to w rozdziale 5, chociaż już w rozdziale 6 wnioskowanie z badań numerycznych oparto na belkach o właściwościach takich jak w badaniach [51], a nie badaniach własnych, co oceniam jako właściwą decyzję).

Nasuwają się w tym miejscu zatem dwa pytania:

- Czy, obserwując wysuwanie się gwoździ kotwiących, już przy sile mniejszej od obciążenia niszczącego belki niewzmocnionej, i intensywny rozwój rys w strefie zakotwienia (opis na str. 131), nie należało przerwać eksperymentu i wzmocnić strefy zakotwienia taśm FeSMA? Lub przynajmniej wzmocnić strefę zakotwień w drugiej z belek wzmocnionych w ten sposób?

- Czy utrata zakotwienia była wynikiem błędu projektowego czy wykonawczego? Autor nie daje jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie, chociaż dla przyszłych badaczy i wykonawców ta odpowiedź byłaby bardzo cenna.

2) dotycząca nieuwzględnienia efektów długotrwałych

Stany graniczne konstrukcji budowlanych analizowane powinny być z uwzględnieniem zmiennych oddziaływań długotrwałych (tzn. z uwzględnieniem wpływu wszystkich efektów reologicznych zarówno na spadek siły sprężającej oraz przyrost odkształceń elementu, jak i możliwego wpływu cykliczności obciążenia), a niniejsza praca dotyczy jedynie obciążeń doraźnych, krótkotrwałych, działających w jednym cyklu obciążenia. Zatem wnioski niniejszej pracy, np. na temat wpływu wzmocnienia przez sprężenie materiałami FeSMA na zarysowanie czy ugięcia belek, mają bardzo ograniczone zastosowanie i muszą być traktowane z dużą ostrożnością.

3) dotycząca struktury pracy doktorskiej

\* wydaje się, że p. 2.3 lepiej pasuje do rozdziału 3, ponieważ dotyczy on wzmocnienia konstrukcji, a nie opisu materiału;

\* Tytuł rozdziału 7 „Model obliczeniowy” nie najlepiej oddaje jego treść, ponieważ same obliczenia mogą być wykonywane zarówno przy użyciu modeli analitycznych, jak i modeli numerycznych. W pracy rozdział ten obejmuje jedynie analizę wcześniej opracowanych modeli analitycznych (p. 7.1), wyniki własnych obliczeń wg tych modeli (p. 7.2) i propozycję autorskiego, uproszczonego modelu analitycznego nośności na zginanie przekroju żelbetowego sprężonego ciągnem bez przyczepności (p. 7.3). Wydaje się, że rozdział 6, dotyczący analiz numerycznych, powinien być raczej połączony z obecnym rozdziałem 7, przy czym p. 7.1 to mógłby się znaleźć w rozdziale 3 „Stan wiedzy ...”).

❖ Uwagi dotyczące poszczególnych obszarów

1) Badania eksperymentalne wraz z analizą ich wyników

\* Niedosyt budzi sposób prezentowania wyników badań betonu w rozdziale 4.3.1. Nie zostało podane na ilu próbkach badany był beton, jakie uzyskano rozrzuty wyników \*(np. podając współczynnik zmienności dla danej wielkości). Podanie jedynie wartości średniej na potrzeby analizy wyników badań doświadczalnych elementów jest niewystarczające. Prowadzi to do sytuacji opisanej na str. 111, w której wytrzymałość betonu na ściskanie zbadana na próbkach walcowych po dwóch tygodniach spada o 0,8 MPa, podczas gdy badana na próbkach sześciennych rośnie o 3,6 MPa (nie podano w jakim wieku betonu badania prowadzono). Zdziwiał też, że wszystkie parametry betonu badane w wieku 85, 86, 89 i 90 dni są identycznie takie same (patrz Tab. 4.2) – najprawdopodobniej są to wyniki średnie z całej serii badań wykonywanych jednocześnie.

\* W rozdziale 4.3.3 autor unika bezpośredniej informacji, że nie zostały przeprowadzone jakiegokolwiek badania materiałowe dla zastosowanych w badaniach własnych taśm FeSMA, a podawane wartości pochodzą z artykułu opublikowanego w 2018 r. Nawet jeśli taśmy dostarczył ten sam producent, to nie ma pewności, że właściwości tego wciąż nowatorskiego materiału nie uległy zmianie w ciągu ostatnich ok. 5 lat. Pojawia się pytanie, dlaczego w ramach tej pracy doktorskiej nie zweryfikowano chociażby niektórych - tych możliwych do

zbadania po dostarczeniu do Politechniki Łódzkiej - właściwości materiału? W przypadku taśm CFRP, badań najprawdopodobniej również nie przeprowadzono, a źródła podanych wartości w ogóle nie podano.

- \* Proces aktywacji taśm kontrolowany był termoparą – czy tylko jedną? Gdzie umieszczoną? Czy można przyjąć, że nagrzanie taśmy FeSMA było równomierne na długości?
- \* Czy można przyjąć, że belki wzmocnione FeSMA i CFRP pracowały dokładnie w tym samym schemacie statycznym, skoro swobodny odcinek taśm CFRP wynosił 908 mm, a taśm FeSMA 1250 mm (czyli o ok. 25% więcej), oraz siła naciągowa w taśmach CFRP wynosiła 100 kN, a w taśmach FeSMA  $P=400\text{MPa} \cdot 180\text{mm}^2=72\text{ kN}$  (czyli o ok. 28% mniej). Zatem wpływ sprężenia na pracę belek jest różny. Czy można zatem bezpośrednio porównywać uzyskane wielkości ugięć i nośności?
- \* Na str. 122 autor wspomina o potrzebie uwzględnienia niedokładności pomiarów i analizie błędów w analizach wyników badań, wliczając nawet jakie czynniki mają wpływ na możliwy błąd, ale w pracy nie znalazła się żadna analiza błędów. Szkoda, ponieważ dopiero wynik podany z zakresem możliwego błędów stanowi wiarygodną informację z badań, która może służyć dalszym analizom, szczególnie w sytuacji, kiedy badane są pojedyncze elementy badawcze i nie jest możliwa analiza statystyczna rozrzutu wyników. Ciekawe byłoby zweryfikowanie dokładności pomiaru szerokości rozwarcia rysy określanej na podstawie metody DIC (system Aramis), którego wyniki podawane są w pracy z dokładnością 0,001mm (patrz np. rys. 5.8).
- \* Ważną kwestią w analizie wzmocnień przez sprężenie ciągniami zewnętrznymi jest uwzględnienie poślizgu cięgna w zakotwieniu, ponieważ ma to zasadniczy wpływ na wielkość strat siły sprężającej. Podane w Tab. 5.1 poślizgi taśm CFRP w zakotwieniu NEOXE wynoszą ponad 2,5 mm (brak precyzyjnej informacji czy jest to poślizg w zakotwieniu czynnym tylko, czy czynnym i biernym), co skutkuje aż niemalże 40% startą siłą naciągowej! Czy firma NEOXE podaje informacje jakie są standardowe wartości poślizgów taśm w ich zakotwieniach? Czy autor próbował porównać te wartości z jakimikolwiek dostępnymi informacjami lub pomiarami w trakcie badań innych systemów zakotwień? W przypadku taśm FeSMA, przytoczona została informacja z publikacji [51] o typowym dla zastosowanego rozwiązania zakotwienia poślizgu równym 0,5 mm. Czy w tych badaniach podjęto próbę oszacowania wielkości rzeczywistego poślizgu?
- \* Przy szacowaniu wielkości siły sprężającej na podstawie pomierzonych ugięć czy momentu rysującego przyjęto szereg uproszczeń. Np. założono, że naprężenia w taśmie na odcinku strefy zakotwienia zmieniają się liniowo. Najprawdopodobniej nie jest to prawdą np. z uwagi na nierównomierny rozkład gwoździ kotwiących (patrz foto 4.7). W p. 5.6 autor stwierdza, że odkształcenia taśmy zmieniają się na długości zakotwienia „w zasadzie liniowo”, jednakże skala rysunków 5.13 i 5.14 nie pozwala na dokładną analizę strefy zakotwienia, a wręcz skrajne fragmenty tych wykresów mogą sugerować nieliniowe zmiany w tych obszarach. Przyjęto również, że środek ciężkości przekroju belki wzmocnionej jest w środku wysokości, a także, że obliczenia prowadzone są dla średniej wartości wytrzymałości betonu na rozciąganie  $f_{ctm}=0,9 \cdot f_{ct,sp}$ . Ciekawe byłoby wykonanie analizy wrażliwości wyniku obliczeń z uwagi na możliwe zmienności poszczególnych podstawianych wartości (np. warto sprawdzić wpływ możliwie dużego rozrzutu wartości wytrzymałości na rozciąganie, jak i wpływ faktu, iż

wartość momentu rysującego określana była w badaniach prowadzonych etapowo, to znaczy rejestrowano wyniki nie w sposób ciągły, a jedynie po każdym etapie obciążenia).

- \* Zawarte w p. 5.4 i 5.5 wnioski jakościowe są dość oczywiste i potwierdzają one dobrze już rozpoznany wpływ sprężenia na pracę elementów żelbetowych (np. wzrost wielkości momentu rysującego, zmniejszenie ugięcia, itp.), natomiast przy uogólnianiu wniosków ilościowych z badań eksperymentalnych zrealizowanych na tylko dwóch elementach danego typu należy zachować szczególną ostrożność.

## 2) Modelowanie numeryczne

- \* Rys. 6.5 jest bardzo słabo opisany i nie pozwala na dobrą interpretację przyjętego modelu – brak podania konkretnych wartości rzędnych i odciętych dla punktów charakterystycznych, nie do końca wiadomo na ile ten wykres jest spójny z wykresem podanym na rys. 4.4.b). Dziwne jest też określenie wartości podanych na osi odciętych „Odkształcenia w programie”. Takie sformułowanie należałoby zdefiniować.
- \* Przeprowadzono walidację modelu, stwierdzając jednocześnie, że uzyskano „nieco większe nośności elementów” – dobrze byłoby, aby w pracy doktorskiej podać procentowe różnice uzyskane w procesie walidacji, a nie ograniczać się jedynie do tak enigmatycznego stwierdzenia. Moim zdaniem można było podać próbę rozszerzenia walidacji o analizę innych wartości mierzonych w trakcie eksperymentu, a nie jedynie ugięcia belki, co mogłoby jeszcze lepiej uwiarygodnić przyjęty model.
- \* Część konkluzji wyciąganych na podstawie analiz numerycznych, np. te wnioski jakościowe dotyczące wpływu stopnia zbrojenia belek czy wytrzymałości betonu na moment rysujący czy moment uplastycznienia zbrojenia stalowego (p. 6.3 i 6.4) są również dość oczywiste. Mogłyby one być wyciągnięte również na podstawie analizy najprostszych modeli analitycznych. Ta sama uwaga dotyczy p. 6.5, gdzie potwierdzono znany już wcześniej wpływ sprężenia na pracę belki.

## 3) Uwagi dot. uproszczonego modelu analitycznego

- \* Chociaż w tekście na str. 164 mowa o tym, że po zarysowaniu nie uwzględnia się pracy betonu w strefie rozciąganej, to wzór (7.28) tego faktu nie uwzględnia. Wg (7.28), nawet przy dużych obliczonych wartościach odkształceń betonu na krawędzi rozciąganej, należy przyjąć wartość naprężenia w betonie równą  $f_{ctm}$ .
- \* Dlaczego przyjęto ograniczenie wzrostu naprężeń w FeSMA do wartości 700 MPa, którego to ograniczenia w przypadku CFRP nie ma? Wyjaśnienia wymaga, dlaczego zakłada się, że nigdy, nawet w przypadku dobrego zakotwienia taśm FeSMA, niemożliwa będzie utrata nośności przekroju w wyniku zerwania zbrojenia sprężającego.
- \* We wzorze (7.35) pojawia się współczynnik redukcji przyczepności  $R$ , jednak z podanej procedury nie wynika czy należy stosować wartość  $R_{cr}$  (7.25) czy  $R_{un-cr}$  (7.26). Szkoda, że w pracy nie wyprowadzono wzorów określających współczynnik  $R$  dla najpowszechniej stosowanego schematu belki wolnopodpartej z obciążeniem równomiernie rozłożonym na jej długości.
- \* Autor stwierdza „dość dobrą” zgodność wyników obliczeń wg zaproponowanego modelu z wynikami eksperymentu zastrzegając, że sprawdzono ja dla wartości odkształceń w taśmach



wyznaczanych w sposób przybliżony (str. 167) – trudno jest zinterpretować to stwierdzenie ponieważ nie podano ani wartości liczbowych odkształceń taśm, ani procentowej różnicy poszczególnych wyników.

4) Analiza wniosków końcowych wyciąganych na podstawie własnych badań:

- \* Pierwszy wniosek mówi o m.in. „Główną zaletą sprężania taśmami FeSMA była prostota montażu, zakotwienia, ...” – wniosek ten jest zaskakujący, ponieważ akurat w tych badaniach zakotwienie okazało się całkowicie nieskuteczne, a więc trudno nazwać to główną zaletą.
- \* Wniosek drugi mówi o tym, że dla obu materiałów (CFRP i FeSMA) „uzyskana została podobna wartość siły sprężającej” – pytanie, o której wartości siły sprężającej jest mowa, ponieważ siły naciągowe różniły się znacznie, siły po stratach doraźnych były zbliżone (ponieważ w przypadku FeSMA wystąpiła ok. 40% strata siły na skutek poślizgu, która w przypadku innych belek może mieć całkiem inne wartości procentowe), a wartości docelowe siły sprężającej (po stratach reologicznych) w ogóle nie były przedmiotem analizy.
- \* Wniosek trzeci jest ogólnym wnioskiem dotyczącym wpływu sprężenia na belkę żelbetową i nie zawiera w sobie żadnej specyfiki związanej z użyciem materiału FeSMA lub CFRP.
- \* Wniosek czwarty mówi raczej o błędnym zaprojektowaniu elementów badawczych (nieuwzględnieniu poziomej siły rozciągającej przekazywanej na beton w miejscu zakotwienia oraz zbyt słabym kotwieniu taśm FeSMA).
- \* Ostatni wniosek, w pierwszej swojej części, dotyczącej przyrostu nośności belek, jest niemiernodajny, ponieważ – jak sam autor stwierdza – zniszczenie elementu jest wynikiem przedwczesnego zniszczenia zakotwienia taśm FeSMA. Druga część wniosku, dotycząca konieczności poprawy sposobu kotwienia jest bardzo ważna, ale szkoda, że nie pada żadna konkretna propozycja takiej poprawy.
- \* Przyjęta w pracy metodologia oceny efektywności wzmacniania zginanych elementów żelbetowych przez sprężenie taśmami FeSMA, polegającą na porównaniu efektów wzmocnienia ze zbliżoną, ale lepiej rozpoznaną, technologią sprężania taśmami CFRP, wydaje się bardzo trafna. Szkoda zatem, że wnioski końcowe nie zawierają bezpośredniego porównania tych dwóch technologii – ciekawe byłoby porównanie m.in. możliwości kotwienia poszczególnych cięgien, możliwych do uzyskania maksymalnych sił naciągowych, poszczególnych strat doraźnych sił sprężających, start reologicznych (nie były one przedmiotem badań w tej pracy), ewentualnych różnic w przyrostach nośności lub w zarysowaniu i ugięciu belek na skutek innej sztywności poszczególnych systemów).

❖ Uwagi szczegółowe

- \* W rozdziale 3 występuje niespójność informacji podanej na rys. 3.11 (otwory wypełnione zaprawą cementową) w stosunku do tej w tekście powyżej (wypełnienie żywicą epoksydową).
- \* W opisie badań [62] (str. 86-89) pojawiają się pewne wątpliwości – mowa jest o poziomie sprężenia, którego wielkość podawana jest bez jednostek (pierwszy wiersz na str. 89) – co jest zatem rozumiane jako poziom sprężenia?
- \* Trudny do interpretacji jest rys. 2.15. Przykładowo:

- na rys. 2.15.a) poszczególne krzywe opisane są jako wartość procentowa podzielona przez GPa, podczas gdy z tekstu powyżej wynika, że krzywe odpowiadają najprawdopodobniej różnym stopniom zbrojenia. Jak należy interpretować te opisy, np. „0,03%/GPa”?
  - co pokazano na osi rzędnych rys. 2.15. b)? Czy to jest wartość naprężenia (jak w opisie osi) czy wartość redukcji/spadku naprężenia, jak w tekście wklejonym do rysunku?
  - \* Rysunki prezentujące wyniki własnych doświadczeń eksperymentalnych i analiz numerycznych są często wykonywane jako wykresy zależności „Siła” vs. „Ugięcie”/ „Przemieszczenie”/ „Odształcenie” – podpisy rysunków, jak i opisy osi, powinny być jednak precyzyjniejsze, należy wyjaśnić czy „Siła” jest wielkością siły przykładanej przez jeden siłownik czy sumą sił z dwóch siłowników, należy doprecyzować w którym punkcie dana wielkość (ugięcie/przemieszczenie/odkształcenie) są określane, itd.
  - \* Rysunki zawierające dwa różne wykresy powinny być zawierać dodatkowo oznaczenia a) i b) oraz opis tych oznaczeń w podpisie rysunku – brak takich oznaczeń stwierdzono np. na rys. 6.8 – 6.10.
  - \* Poz. 114 cytowana jest w nieprawidłowy sposób – nie podano informacji o autorze, wydawcy, dacie opublikowania itp.
- ❖ Uwagi edytorsko – językowe
- \* Pewne błędy interpunkcyjne, głównie dotyczące braku przecinków.
  - \* Pewne błędy w składni zdań (np. pierwsze zdanie p. 2.1.3, pierwsze zdanie p. 2.2.2).
  - \* Pewne błędy stylistyczne lub logiczne, np. „belki zniszczyły się ze względu na miażdżenie betonu” (str. 72), „materiał opierający się na kryteriach” (str. 146) „W podanym artykule belki były monitorowane przez 4 lata” (str. 89).
  - \* Pewne niedociągnięcia językowe, np. sformułowania:
    - „trudna odkształcalność” na str. 38;
    - „zakres temperatur” na str. 37 (zamiast „różnica/zmiana temperatury”);
    - „naprężenia maksymalnego kształtu” na str. 49;
    - użycie określenia „ciągliwość” w stosunku do elementów konstrukcyjnych (np. str. 72) (podczas gdy ciągliwość to właściwość mechaniczna materiału, określana jako zdolność materiału do uzyskiwania dużych odkształceń trwałych bez naruszenia spójności materiału);
    - „krótkoterminowa strata” (str. 125) (chodzi raczej o stratę natychmiastową, a nie krótkoterminową, bo mowa o starcie, która następuje w momencie kotwienia taśmy, a nie o stracie, która będzie trwać przez krótką chwilę);
    - „liczba odchyień” w stosunku do rys (str. 144).
  - \* Rys. 4.1 jest mało czytelny.

## 5. Podsumowanie recenzji

W opiniowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Janusza Rogowskiego podjęto problem do tej pory bardzo słabo rozpoznany na gruncie naukowym, a jednocześnie mający duże znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Praca ta przyczynia się do pogłębienia zasobu wiedzy w podjętej tematyce i stanowi wkład w rozwój technologii wzmacniania konstrukcji żelbetowych przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu, a uzyskane wyniki zostały tak dobrze udokumentowane, że otwierają

możliwość ich dalszego wykorzystania w późniejszych badaniach realizowanych również w innych ośrodkach badawczych. Pod tym względem pracę oceniam bardzo wysoko.

Doktorant, na podstawie wnikliwej analizy dotychczasowego stanu wiedzy, zredagował cele i postawił jedną tezę pracy po czym, stosując odpowiednie metody badawcze, zredagował ważne wnioski końcowe i trafnie zidentyfikował kierunki przyszłych badań w tym obszarze. Podsumowując, można stwierdzić, że Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego wnioskowania naukowego na podstawie własnych rozwiązań postawionych problemów.

Doktorant wykazał się również odpowiednimi umiejętnościami prowadzenia trudnych technicznie i czasochłonnych badań doświadczalnych w skali zbliżonej do rzeczywistej. W świetle opisanych faktów stwierdzam, iż Doktorant posiada predyspozycje i odpowiednie przygotowanie do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Podkreślam również, że moim zdaniem mocne strony dysertacji zdecydowanie przeważają nad słabszymi, które najprawdopodobniej wynikały z ograniczeń czasowych. Szereg z przedstawionych przeze mnie uwag i komentarzy ma charakter otwartej dyskusji naukowej bądź wskazówek dotyczących przyszłej pracy naukowej i nie powinny być one traktowane jako krytyka.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż recenzowana rozprawa pt. „Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmacniania elementów żelbetonowych na zginanie” spełnia wszystkie wymagania odnośnie do prac doktorskich zawarte w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668) wraz z późniejszymi zmianami. Stwierdzam również, że Doktorant osiągnął efekty uczenia się, stawiane dla Poziomu 8 Europejskich Ram Kwalifikacji, i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Janusza Rogowskiego do publicznej obrony złożonej pracy.

.....  
*dr hab. inż. Wit Derkowski*

