

prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski, dr h.c. multi
emerytowany profesor zwyczajny
Politechniki Warszawskiej
e-mail: Wojciech.Radomski@pw.edu.pl
tel. k.: 603 647 863

Warszawa, dnia 17 lipca 2023 roku

RECENZJA
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGR INŻ. JANUSZA ROGOWSKIEGO
PT. „ZASTOSOWANIE MATERIAŁÓW Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU
DO AKTYWNEGO WZMACNIANIA ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH
NA ZGINANIE”

1. Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Niniejszą recenzję opracowałem na podstawie umowy o dzieło, noszącej numer D/12/2-23/W6 oraz datę 27 czerwca 2023 roku, zawartej z Wydziałem Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechnik Łódzkiej, reprezentowanym przez Dziekana tego Wydziału, Pana prof. dr hab. inż. Dariusza Gawina.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Janusza Rogowskiego, zatytułowana „*Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie*”, przygotowana pod kierunkiem Pani prof. dr hab. inż. Renaty Kotyń jako promotora. Rozprawa ta została przedstawiona w trzech zbroszurowanych częściach formatu A4. Część pierwsza, licząca 186 stron, to część zasadnicza zawierająca tekst dysertacji, część drugą i trzecią (nazwane tomem I, liczącym 114 stron oraz tomem II, liczącym 190 stron), stanowią załączniki oznaczone literami A, B i C. Załącznik A jest opisem i zestawieniem wyników badań wykonanych i opublikowanych przez innych badaczy, które dotyczą aktywnego wzmocnienia elementów żelbetowych na zginanie, załącznik B jest szczegółową dokumentacją własnych badań doświadczalnych Doktoranta, załącznik C zawiera szczegółowe wyniki, które przeprowadził z zastosowaniem czujników światłowodowych.

2. Tematyka, treść i sposób zredagowania rozprawy – wstępne elementy jej oceny

Tematyka rozprawy jest bezdyskusyjnie nowa i oryginalna w skali nie tylko krajowej, ponieważ prac badawczych dotyczących zastosowania materiałów z pamięcią kształtu do wzmocnienia żelbetowych elementów konstrukcyjnych na zginanie jest na świecie jeszcze stosunkowo niewiele i podejmowano je dosłownie w ostatnim czasie, tj. w okresie obejmującym lata 2016 ÷ 2022. Dobrze to świadczy o kreatywności Doktoranta i jego Promotora (teraz pewno lepiej pisać i mówić: Promotorki) i ich odwadze badawczej w „zaatakowaniu” problematyki mało jak dotychczas rozpoznanej. To bardzo pozytywna i twórcza postawa naukowa.

Zasadnicza treść rozprawy ujęta jest ośmiu rozdziałach, poprzedzają ją streszczenia w językach polskim i angielskim oraz spisy rysunków, tabel i symboli, a wieńczy wykaz piśmiennictwa, obejmujący 123 pozycje.

Rozdział 1 (4 strony), zatytułowany *Wstęp*, jest wprowadzeniem w tematykę rozprawy. Zawiera on jej genezę oraz cele i rzecz najważniejszą – tezę. Została ona sformułowana tak: *Czy sprzężenie przy użyciu materiałów z pamięcią kształtu FeSMA jest skutecznym sposobem poprawy stanów użyteczności i nośności zginanych elementów żelbetowych?* Tezę tę zacytowałem w całości, ponieważ będę do niej nawiązywać w dalszej fragmentach tej recenzji. Rzadko się zdarza, aby teza dysertacji doktorskiej była ujmowana w formie pytania. W tym jednak przypadku uważam to za uzasadnione wobec bardzo ograniczonej jeszcze wiedzy o możliwości zastosowań materiałów z pamięcią kształtu do wzmacniania konstrukcji. W tej sytuacji badacz musi odpowiedzieć na podstawowe pytania, nie przesądzając, czy wynik jego dociekań będzie pozytywny czy negatywny. To jest natura nauki i bardzo mi się podoba taka teza, którą przywołałem.

W rozdziale 2 (37 stron), noszącym tytuł *Materiały z pamięcią kształtu (SMA)*, zamieszczono podstawowe informacje o takich materiałach, oznaczanych zazwyczaj skrótem *SMA* od angielskiej nazwy *Shape Memory Alloys*. Ponieważ materiały te stanowią nowość, zwłaszcza w budownictwie, to bardzo dobrze, że Doktorant opisał je w syntetyczny sposób, uzasadniając ponadto, dlaczego materiały, a zwłaszcza te zawierające żelazo (czyli *FeSMA*), mogą być szczególnie przydatne do wzmacniania elementów żelbetowych, belek – na zginanie i ścinanie oraz słupów – na ściskanie.

Rozdział 3 (42 strony), jest zatytułowany *Stan wiedzy w dziedzinie aktywnego wzmacniania na zginanie elementów żelbetowych materiałami FeSMA* i stanowi dobrze ujęty, usystematyzowany przegląd prac eksperymentalnych, wykonanych w różnych ośrodkach badawczych na świecie i dotyczących wymienionego w tytule rozdziału wzmacniania. Badania te podzielono na dwa główne obszary – pierwszy, to zastosowanie materiałów *FeSMA* do wzmocnienia i modernizacji strukturalnej istniejących konstrukcji oraz drugi – zastosowanie tych materiałów do zbrojenia nowych konstrukcji. Pierwszy z wymienionych obszarów obejmuje trzy podobszary - wzmocnienie za pomocą zbrojenia zewnętrzne (*EAR*, od angielskiej nazwy *Externally Applied Reinforcement*), za pomocą zbrojenia zastosowanego przypowierzchniowo (*NSMR*, od angielskiej nazwy *Near-Surface Mounted Reinforcement*) oraz za pomocą zbrojenia ulokowanego w warstwie torkretu. Drugi obszar potraktowany jest samoistnie, bez wyodrębniania podobszarów. Jednakże ten drugi obszar trudno jest zaliczyć do wzmocnienia (por podpis rys. 3.1.), chyba, że poniewczasie okazałoby się, że zaprojektowane zbrojenie nowej konstrukcji jest niewystarczające i należy zastosować jakieś dodatkowe zbrojenie z *FeSMA*. W nawiązaniu do pierwszego obszaru dyskusyjnie wydaje mi się umieszczania zbrojenia wzmacniającego w warstwie torkretu, bo według mnie o efektywności wzmocnienia decyduje w tym przypadku powiązanie (przyczepność) warstwy torkretu ze „starym” betonem. Być może myślę się. Na uwagę i pozytywną ocenę należy uznać sposób analizy wyników zrelacjonowanych poprzednio wyników badań (punkt. 3.5.). Doktorant dokonał tej analizy szczegółowo, w sposób statystyczny i krytyczny. Świadczy to o jego znakomitym rozeznaniu stanu wiedzy w tematyce, którą w swej rozprawie podjął.

Rozdziały 4 (14 stron), 5 (20 stron), 6 (12 stron), 7 (12 stron) oraz 8 (5 stron) stanowią najważniejszą, bo oryginalną część rozprawy. Do części tej odniosę się bardziej szczegółowo w punkcie 3 recenzji, w tym miejscu ograniczę się do zwięzłego przedstawienia ich treści.

Rozdział 4 jest zatytułowany *Program badań doświadczalnych*. Przedstawiony w nim został opis owego programu, obejmujący badania pięciu belek – jednej tzw. referencyjnej bez wzmocnienia, dwóch ze wzmocnieniem w postaci aktywowanej taśmy *FeSMA* oraz dwóch wzmocnionych przez naprężenie taśmy kompozytowej *CFRP*. Wszystkie belki miały te same

wymiary 300 x 300 x 2500 mm oraz ten sam stopień (procent) konwencjonalnego zbrojenia rozciąganego równy 0,25 i ściskanego równy 0,11 (por. uwaga C.17.). W rozdziale tym zaprezentowano wyniki badań betonu i stali zbrojeniowej oraz taśm *FeSMA* i *CFRP*, które miały posłużyć do wzmocnienia belek oraz sposób realizacji tego wzmocnienia. Dalej Autor szczegółowo opisał stanowisko badawcze, sposób wywierania obciążenia oraz zastosowany system pomiarowy. Ze względu na treść rozdziału uważam, że jego tytuł nie jest całkowicie trafny – powinien po prostu brzmieć: *Własne badania doświadczalne* (to oczywiście jedna tylko propozycja).

W rozdziale 5 o tytule *Wyniki badań doświadczalnych* przedstawione są rezultaty badań, których realizację opisano w rozdziale 4. Rezultaty te dotyczą wyznaczenia wartości siły sprężającej w przypadku taśm *CFRP* na podstawie pomierzonych odkształceń oraz w przypadku taśm *FeSMA* na podstawie pomiaru ugięć oraz obliczeń teoretycznych – odkształceń tych taśm nie można było mierzyć bezpośrednio z uwagi na wysoką temperaturę ich aktywacji. Opisano następnie zaobserwowane i zarejestrowane fotograficznie mechanizmy zniszczenia belek oraz analizowano obraz ich zarysowań, a także ugięcia i odkształcenia badanych belek. W podsumowaniu dokonano porównań skuteczności sprężenia w zależności od rodzaju materiału taśm wzmocniających belki.

Rozdział 6 ma tytuł *Analiza numeryczna*. Użyto do niej programu komputerowego *Atena*, ukierunkowanego na nieliniową analizę konstrukcji żelbetowych. W rozdziale przedstawiono podstawowe założenia modelu i wyniki jego walidacji na podstawie własnych badań doświadczalnych oraz ocenę wpływu stopnia konwencjonalnego zbrojenia prętami stalowymi (0,31%, 0,45%, 0,80%, 1,26% i 2,46%), klasy betonu (20 MPa, 30MPa, 40 MPa, 50 MPa i 60 MPa), poziomu sprężenia (0 MPa, 150 MPa, 300 MPa, 450 MPa i 600 MPa) na efektywność wzmocnienia taśmami *FeSMA*. Wyniki analiz przedstawiono na wykresach i przekonująco skomentowano.

Rozdział 7 zatytułowany jest *Model obliczeniowy*, choć z treści wynika, że użycie liczby mnogiej w tym tytule byłoby bardziej odpowiednie. Przeprowadzono obliczenia nośności belek wzmocnionych za pomocą taśm *FeSMA* oraz bezprzyczepnościowych cięgien stalowych, stosując różne modele obliczeniowe (w sumie siedem – por. str. 162, Tab. 7.1.), zaczerpnięte z prac innych badaczy. Dodatkowo analizie poddano opracowany przez Doktoranta obliczeniowy model uproszczony, polegający głównie na wprowadzeniu współczynnika redukcji przyczepności. Generalnie uzyskano dobrą korelację rezultatów obliczeń otrzymanych z zastosowaniem wszystkich modeli z wynikami badań doświadczalnych. Zamieszczone komentarze Doktoranta są wnikliwe i merytorycznie uzasadnione.

Rozdział 9, *Wnioski i kierunki przyszłych badań*, wieńczy rozprawę. Przedstawione wnioski wynikają wprost z treści poprzednich rozdziałów rozprawy. Szkoda tylko, że nie odniesiono się w nich w sposób bezpośredni do jej tezy, choć została przecież potwierdzona. Zaproponowane przez Doktoranta kierunki przyszłych badań są przekonujące. Podjęty przez niego temat badawczy z całą pewnością zasługuje na kontynuację.

Przedstawiony układ rozdziałów i ich treść są logiczne i czytelne; praca jest na ogół dobrze zredagowana. Napisano ją dobrą na ogół polszczyzną, do czego przywiązuję dużą wagę. W obu poprzednich zdaniach napisałem „na ogół”, bo znalazłem jednak pewne pod wymienionymi względami uchybienia, które są przedstawione w uwagach szczegółowych (punkt 4 recenzji). Forma edytorska rozprawy nie budzi żadnych zastrzeżeń – jest na wysokim poziomie, co zresztą w dobie powszechnej komputeryzacji jest obecnie normą.

Obszerne załączniki, o których wspomniano w punkcie 1 recenzji, stanowią szczegółowe udokumentowanie badań zrealizowanych przez Doktoranta i dobrze świadczą o jego staranności – rzadko spotyka się tego rodzaju rzetelność i trud zgromadzenia, uporządkowania i zaprezentowania wyników. Zarchiwizowanie wyników badań może mieć duże znaczenie w wyjaśnianiu niektórych zagadnień, które mogą wystąpić w przyszłych badaniach, rozwijających podjętą w rozprawie tematykę.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Już na samym początku tej części recenzji stwierdzam, że rozprawę doktorską Pana mgr inż. Janusza Rogowskiego oceniam wysoce pozytywnie. Uzasadniam to następującymi, ujętymi w punktach argumentami (oznaczonymi przez A z kolejnymi numerami).

A.1. Jak zasygnalizowano na wstępie punktu 2 tej recenzji, samoistną wartością rozprawy jest już sama jej tematyka, nowoczesna i oryginalna. Samo tylko podjęcie mało jeszcze rozpoznanej problematyki, świadczy o odwadze Doktoranta w penetrowaniu nowych obszarów badawczych, co zasługuje na uznanie.

A.2. Doktorant wykazał duże własne zainteresowanie podjętym tematem, musiał poznać specyfikę materiałów z pamięcią, szczególnie tych zawierających żelazo, czyli *FeSMA*. Świadczy o tym dobitnie wszechstronnie opracowany rozdział 2. Ponadto zebrał dane o sposobie prowadzenia najnowszych badań nad aktywnym wzmacnianiem na zginanie elementów żelbetowych. Badania te wykonano w różnych ośrodkach na świecie w latach 2016 ÷ 2022, są więc rzeczywiście najnowsze. Oprócz zrelacjonowania i skomentowania wyników tych badań, Autor rozprawy zadał sobie trud szczegółowego opisu ich wyników w ujęciu statystycznym (punkt 3.5.). Rzadko spotkać można taki sposób zredagowania prezentacji stanu wiedzy, a szkoda bo sposób ten pozwala na rzetelne poznanie tendencji badawczych w danym temacie. Ten dodatkowy wysiłek Doktoranta także stanowi o merytorycznej wartości jego rozprawy.

A.3. Program własnych badań doświadczalnych został dobrze przemyślany i zrealizowany. Jego główną ideą było porównanie skuteczności wzmocnienia takich samych belek żelbetowych w łącznej liczbie czterech – dwie były wzmocnione za pomocą termicznego aktywowania taśmy *FeSMA* (po jednej w każdej belce), dwie (również po jednej w każdej belce) wzmocniono za pomocą sprężenia taśmy *CFRP*. Piąta belka nie była w żaden sposób wzmocniona i stanowiła tzw. element referencyjny (str. 109, tab. 4.1.). Sposób przygotowania i przeprowadzenia badań pomocniczych, czyli badań materiałowych betonu i stali zbrojeniowej oraz taśm *CFRP* i *FeSMA*, a także badań zasadniczych, wykonanych na wymienionych belkach, nie budzi zastrzeżeń (poza jedną sprawą nieco dyskusyjną – por. uwagi **B.3.** i **B.4.**) i świadczy o wysokich kompetencjach Doktoranta jako eksperymentatora. Badania własne, które prowadzono do osiągnięcia granicy nośności belek (czyli do ich zniszczenia), zostały jasno i dostatecznie szczegółowo opisane tak, aby – zgodnie z często zapomnianą dziś zasadą – mogli je powtórzyć inni badacze. Przebieg badań został rzetelnie przedstawiony. Pomiary przeprowadzono za pomocą nowoczesnego oprzyrządowania i aparatury (między innymi z użyciem światłowodów i cyfrowej korelacji obrazu 3D Aramis, co nie jest u nas jeszcze powszechne). Autor rozprawy wykazał bardzo dobre przygotowanie do korzystania z najnowszych metod doświadczalnych. Pewne niepowodzenia w badaniach niektórych belek (uszkodzenia zakotwień taśm), zostały uczciwie wskazane i skomentowane, co zasługuje na uznanie. Wyniki badań zostały bardzo dobrze, czytelnie zaprezentowane, a wynikające z nich wnioski należycie sformułowane.

A.4. Porównawcze badania doświadczalne przyniosły bardzo interesujące i nowe wyniki, pozwalające na ukierunkowanie dalszych prac. Skuteczność wzmocnienia została potwierdzona w odniesieniu do obu rodzajów metod. Belki sprężone taśmami *FeSMA* i *CFRP* wykazały wzrost obciążenie rysującego w stosunku do belki referencyjnej w granicach 70 % ÷ 86% oraz wzrost obciążenie powodującego przekroczeni stanu granicznego użyteczności w granicach 64 % ÷ 79%. Przyrosty te były następstwem zbliżonej siły sprężającej w obu rodzajach taśm. Belki wzmocnione wykazały też większą od belki referencyjnej sztywność w przedziale obciążeń powodującym zarysowanie i uplastycznienie stali zbrojeniowej. Sprężenie powodowało też redukcję naprężeń rozciągających w tej stali. Tego rodzaju wyników, oczywiście w ogólnym zarysie, dotyczącym sprężania taśmami *CFRP*, można się było niejako spodziewać, choćby w świetle innych badań wykonanych w Politechnice Łódzkiej (por zakończenie punktu 5 recenzji). Natomiast nowym stwierdzeniem jest, że przyrost nośności belek wzmocnionych za pomocą naprężonych taśm *CFRP* w porównaniu do belki referencyjnej był równy nieco ponad 80 % i był – jak pisze Doktorant na str. 143 – wyraźnie większy niż w przypadku belek wzmocnionych taśmami *FeSMA*, bo w odniesieniu do nich przyrost ten był równy około 50%. Autor tłumaczy ten stosunkowo niewielki przyrost przedwczesnym uszkodzeniem zakotwień tych taśm. Stanowi to ważną wskazówkę dotyczącą kontynuacji tematyki badawczej podjętej w recenzowanej tu rozprawie, ale także i pewną przestrożę praktyczną przy ewentualnym wprowadzaniu tej metody do wzmocniania realnych konstrukcji – nośność elementu może być w decydującym stopniu uzależniona od zakotwień taśm *FeSMA*.

A.5. Oprócz dość obszernych badań doświadczalnych, Doktorant przeprowadził również analizę numeryczną z zastosowaniem programu *Atena*, który umożliwia nieliniową analizę konstrukcji żelbetowych. Zaproponował model obliczeniowy, którego tzw. walidację przeprowadził na podstawie porównania z wynikami własnych badań doświadczalnych. Porównania te przedstawił za pomocą wykresów, które jednoznacznie wskazują na dużą zgodność rezultatów obliczeń i eksperymentów. Model okazał się zatem adekwatny i są uzasadnione podstawy, aby uważać, że może być przydatny do celów projektowych. Jest to niewątpliwie osiągnięcie Doktoranta.

A.6. Autor rozprawy poddał również analizie modele obliczeniowe stosowane przez innych badaczy, obejmujące wyznaczanie nośności elementów zginanych wzmocnionych taśmami *FeSMA* oraz wzmocnionymi bezprzyczepnościowymi cięgnami stalowymi. Modele te zaadoptował do sytuacji odpowiadających warunkom przeprowadzania własnych badań. Wyniki dotyczące prac innych badaczy porównał z rezultatami własnych doświadczeń (str. 162, tab. 7.1.), uzyskując dalsze potwierdzenie słuszności stosowanych modeli. Znalazł więc oryginalną drogę przydatną do projektowania.

A.7. Doktorant doskonale zdaje sobie sprawę, że temat zastosowania *FeSMA* do wzmocniania konstrukcji żelbetowych rozpoznał w swej rozprawie dopiero „wstępnym bojem”. I choć osiągnął wiele w sensie poznawczym, a także i praktycznym, to wiele zagadnień pozostaje jeszcze do bliższego zbadania. Dlatego zaproponował kierunki przyszłych poszukiwań doświadczalnych i obliczeniowych, które są przekonujące. Taka postawa otwartości na kontynuowanie podjętej tematyki, sprzyja rozwojowi nauki i ugruntowuje dodatkowo merytoryczną wartość opiniiowanej tu dysertacji.

Można by znaleźć zapewne więcej jeszcze argumentów uzasadniających wartość

recenzowanej rozprawy. Poprzestanę jednak na już przedstawionych, uznając je za całkowicie wystarczające.

Bardzo pozytywna ocena rozprawy (por. punkt 2 oraz punkty A.1. ÷ A.7.) nie oznacza jednak, że nie można w odniesieniu do niej sformułować uwag, w mniejszym może stopniu krytycznych, ale ujętych raczej w formie pytań pobudzających do dyskusji. Do niej skłaniają przede wszystkim dobre prace czyli takie, jak tu opiniowana. To rzecz naturalna, bo właśnie merytoryczna dyskusja stanowi niezbywalny i twórczy czynnik rozwoju nauki. Mam zatem następujące uwagi i pytania (oznaczone przez B z kolejnymi numerami).

B.1. Zacznijmy od sprawy zupełnie podstawowej. Otóż fundamentalną cechą konstrukcji budowlanych i inżynierskich, w tym oczywiście wykonanych z betonu, jest ich trwałość techniczna i funkcjonalność eksploatacyjna w długim okresie użytkowania. Na przykład współczesne mosty projektowane są na sto i więcej lat. Jeżeli zatem do ich wykonywania czy wzmacniania ich elementów mają być stosowane materiały z pamięcią kształtu, to powstaje pytanie „jak długi jest okres tej pamięci”. Innymi słowy, czy aktywacja materiałów *FeSMA*, w wyniku której następuje zmiana ich struktury krystalicznej, pozwalająca na „zachowanie pamięci”, jest zmianą „na zawsze”? Jaki jest wpływ efektów reologicznych na te materiały i zachowanie w nich intencjonalnie wprowadzonych sił sprężających o żądanej, początkowej wartości. Dotychczasowe badania na temat wzmacniania elementów żelbetowych materiałami *FeSMA*, tak dobrze zrelacjonowane i skomentowane przez Doktoranta w rozdziale 3, dotyczą jednak laboratoryjnych badań doraźnych. Nie znalazłem informacji o zastosowaniu tej metody do wzmocnienia rzeczywistej konstrukcji. Prawdopodobnie jest jeszcze na tego rodzaju realizacje zbyt wcześnie, bo temat jest nowy i mało poznany. Niemniej jednak jestem ciekawy stanowiska Autora rozprawy w przedstawionym tu zagadnieniu.

B.2. Autor zwraca uwagę (m.in. str. 170, w9g i dalsze), że po aktywacji (w przypadku jego własnych badań – termicznej) moduł Younga *FeSMA* maleje, nawet dwukrotnie w stosunku do stanu sprzed aktywacji. Dlatego do celów projektowych należy stosować niższą wartość tego modułu. Co jest tego przyczyną? Czy zmiana sieci krystalicznej materiału po aktywacji?

B.3. Uwaga ta dotyczy pewnej praktyki badań laboratoryjnych wzmocnień belek żelbetowych przez sprężanie taśm, czy to *CFRP* czy *FeSMA*. Otóż zarówno z opisu badań innych (np. str. 71), jak i we własnych badaniach Doktoranta (np. str. 115) wynika, że stosowane było montowanie i sprężanie taśm w pozycji odwróconej (tj. późniejszy spód belki stanowił podczas montażu taśm ich wierzch). Rozumiem, że to znacznie ułatwia przygotowanie belek do badań. Tyle tylko, że nie ma to nic wspólnego z rzeczywistością – przecież elementy konstrukcji podlegają wzmocnieniu zazwyczaj w niewygodnej pozycji tzw. sufitowej. To ta właśnie pozycja określa czasochłonność działań, a zatem i ich koszt. Moim zdaniem trzeba dążyć do możliwie jak największej spójności między badaniami w laboratorium i warunkami rzeczywistymi, jeśli badania mają nawet w perspektywicznym celu zastosowanie w praktyce danej metody wzmacniania. O konsekwencjach tej „odwróconego” sposobu chętnie podyskutuję z Doktorantem podczas obrony jego dysertacji. Jako początek takiej dyskusji nadmiemy, że Autor za główną zaletę sprężania taśmami *FeSMA* uważa prostotę montażu, zakotwienia i aktywacji. Pisze na stronach 170 i 171, że *cała operacja od momentu nawiercania otworów w betonie do zakończenia podgrzewania zajęła mniej niż pół godziny i nie wymagała w każdej chwili zaangażowania więcej niż 2 osób*. Oczywiście nie kwestionuję tego, ale warto pamiętać, że czynności te wykonywano w laboratorium w ułatwionych warunkach, bo na

„odwróconych” belkach, o czym już wspomniano. W warunkach wzmacniania rzeczywistych konstrukcji już tak prosto i szybko by nie było.

B.4. Na str. 125 Autor rozprawy pisze, że: *W przypadku sprężania taśmami FeSMA pomiar odkształceń taśm był utrudniony w trakcie aktywacji ze względu na wysoka temperaturę, która uniemożliwiła wykorzystanie tensometrów czy czujników światłowodowych. Z tego powodu określenie siły sprężającej ograniczyło się do jej oszacowania metodami pośrednimi*”. I dalej te metody, bazujące na tzw. ujemnej strzałce ugięcia spowodowanej sprężeniem, opisuje. Zwraca przy tym uwagę na możliwość zastosowania wzorów teoretycznych określających ugięcia. Wszystko to święta prawda. Na tym tle dwie uwagi. Pierwsza – skoro aktywacja taśm FeSMA następowała z użyciem palnika gazowego wytwarzającego temperaturę około 400° C (str. 116), to jakikolwiek pomiar bezpośredni siły sprężającej był w ogóle niemożliwy, a nie utrudniony. Druga – jak realizować pośrednie oszacowanie wartości siły sprężającej taśmy FeSMA podczas wzmacniania realnych konstrukcji.

B.5. W nawiązaniu do termicznej aktywacji taśm FeSMA warto przypomnieć, że w dotychczasowych badaniach stosowano temperatury aktywacji w granicach 130°C ÷ 350°C, (str. 169), zaś w badaniach własnych Autora – około 400°C (str. 116). Ciekawi mnie odpowiedź na pytanie jakie mogą być skutki „niedogrzenia” lub „przegrzania” tego materiału z pamięcią kształtu, czy może być w jakimś stopniu zachowana. Poza tym, dlaczego Doktorant zastosował w swoich badaniach temperaturę aktywacji około 400°C. Czy wynikało to na przykład z instrukcji producenta?

B.6. Mimo, że Doktorant bardzo szczegółowo opisuje badania własne i uzyskane wyniki, to w niektórych, nielicznych, ale istotnych moim zdaniem fragmentach, jego komentarz jest zbyt zdawkowy, raczej informujący niż wyjaśniający. Przykładem tego jest fragment tekstu na str. 144, który cytuję dosłownie: *Belka FeSMA 1 zniszczyła się gwałtownie momencie uplastycznienia zbrojenia stalowego, z kolei belka FeSMA 2 wykazała ograniczoną ciągliwość*. Z tablicy 4.1. na str. 109 wynika, że obie te belki były identyczne. Badane były (chyba?) także w ten sam sposób. W czym zatem należy upatrywać przyczyn wymienionych w cytacie różnic? Czy tylko zniszczeniem zakotwienia taśmy w belce FeSMA?

Wymienione uwagi mają zgodnie z zapowiedzią charakter dyskusyjny. Nie są istotnymi uchybieniami rozprawy. Mają pobudzić Doktoranta do refleksji, która może mu się przydać, jak miemam, w kontynuowaniu badań. Zresztą zagadnień wartych dyskusji można by sformułować znacznie więcej niż wynikałoby to z uwag oznaczonych B.1. ÷ B.6., bo opiniowana praca na to zasługuje. Poprzestaną jednak na już przedstawionych.

4. Uwagi szczegółowe

Niżej przedstawione uwagi szczegółowe nie są uporządkowane według stopnia ich ważności merytorycznej, redakcyjnej lub językowej. Sformułowałem je w kolejności odpowiadającym drobnym w większości uchybieniom, które spostrzegłem w miarę czytania rozprawy. Zamieszczam je wyłącznie po to, aby przy następnych publikacjach jej fragmentów, Autor mógł te uchybienia usunąć, jeśli oczywiście się ze zdaniem recenzenta zgodzi. Są to więc następujące uwagi (oznaczone literą C z kolejnymi numerami).

C.1. Str. 5, w4g – *Czy zmniejszenie ugięć nie jest tożsame ze zwiększenie sztywności?* Ponadto, w6g – *Lepiej drugie istniejących zastąpić słowem rzeczywistych (zdanie będzie wtedy poprawniejsze pod względem stylistycznym).*

C.2. Str. 25, w16g – To taka kiepska maniera we współczesnej polszczyźnie – *produkcja cementu* za nic nie odpowiada, tylko *wytwarza* (lub *emituje*) 4,5 % dwutlenku węgla (całkiem na marginesie i żartobliwie: podobno trzeba obecnie używać nazwy *ditlenek węgla*, więc aby „uniknąć kary” najlepiej pisać po prostu CO₂). Ponadto, w4d – jeżeli używany jest termin *wytworzenie konstrukcji*, to trzeba nawiązywać od określonych hipotez wytrzymałościowych, które to *wytworzenie* definiują. W wymienionym fragmencie tekstu chodzi po prostu o określony stopień *obciążenie konstrukcji* (dodatkowe wyjaśnienie: *wytworzenie* to nie jest stopień wykorzystania naprężeń względem jakichś wartości, np. wytrzymałości charakterystycznej lub obliczeniowej, jak wielu sądzi).

C.3. Str. 27, w8d – Tu chodzi nie tylko o modernizację, która z założenia polega na poprawie (podniesieniu wartości) charakterystyk konstrukcji, np. jej nośności, w stosunku do poziomu przyjętego w projekcie, ale wzmocnienie może też polegać na przywracaniu przyjętej w projekcie nośności, która wskutek różnych przyczyn uległa zmniejszeniu w stosunku do projektowanej – metody wzmocnień są te same w obu wymienionych przypadkach.

C.4. Str. 28, w1d – Chyba *dalsze prace badawcze*, a nie *metody badawcze*.

C.5. Str. 29, w2d – Wiem, że tak niektórzy piszą, ale zwrot *parametry fizyczne i wytrzymałościowe*, sugeruje, że owe *parametry wytrzymałościowe nie są fizyczne* (przy okazji: powinno być *fizyczne*). Lepiej zatem napisać po prostu: *cechy* (lub *właściwości*) *materiałowe*.

C.6. Str. 40, w7d – Słowo *dla* jest zbędne i w dodatku rusycyzm; powinno być: ... *właściwości FeSMA są wyraźnie lepsze niż* (lub *od*) *stali zbrojeniowej*:... Ponadto, w2d – nie ...*wykres dla próby*... i nie ...*wraz z zestawieniem dla stali zbrojeniowej*, tylko (po polsku!) ... *w próbie* (lepiej: ...*w badaniach* ...) *rozciągania FeSMA oraz stali zbrojeniowej*..., *pokazano na rys. 2.8*. I jeszcze, w1d – brak przecinka przed ...*został przedstawiony* (lepiej: *przedstawiono*). Na tejże stronie, w1g – jest dwa razy *zaprezentowane* i nie *dla materiału* tylko *na podstawie danych uzyskanych od producenta* lub *przekazanych przez producenta*.

C.7. Str. 41, w7d - *Yang i inni wykazali*, a nie *wykazał*.

C.8. Str. 47, przedostatni wiersz w Tab.2.5. – Opuszczono numer źródła [?] po *Hong i in.*

C.9. Str. 47, w1d – Dlaczego ten właśnie poziom wstępnego odkształcenia należy uznać za *optymalny*? Według jakiego kryterium optymalizacji? Bez uzasadnienia, to stwierdzenie w tekście robi wrażenie arbitralnego i j niewiele wyjaśnia. Ta sama uwaga dotyczy str. 48, w1g ÷ w4g – jaki jest ten warunek optymalizacji wstępnych odkształceń? I nie *dla innych temperatur*, tylko *w innych temperaturach*...(w1g).

C.10. Str. 52, w13g – Wiem, że tak wielu pisze, ale to błąd. Termin *rzęd* oznacza jednostki, dziesiątki, setki, itd., a więc nie *rzędu 8 – 14 MPa*, tylko ...*przyrost naprężeń odzyskanego kształtu w zakresie 8 – 14 MPa*. Uwaga ta dotyczy wielu dalszych fragmentów tekstu. Wracając do str. 52, w14d - Nie *miał miejsce*, tylko *wystąpił* (lub *zaobserwowano*, *zarejestrowano*). I nie (w10d) *skutkowało relaksacją*, tylko *powodowała* lub *wywoływała relaksację*. Dotyczy to także tekstu na str. 56, w5g i str. 57, w11g i wielu dalszych fragmentów tekstu, ale już ich szczegółowo nie będę wymieniać.

C.11. Str. 63, w4g ÷ w6g – Kryteria tej klasyfikacji zastosowań są trochę nieostre. Czy efekt pamięci kształtu może być wykorzystywany tylko do sprężania belek i płyt nowych, czy także do wzmacniania tych elementów w istniejących konstrukcjach, bo w odniesieniu do ścinania (w5g), jest mowa tylko o wzmacnianiu. Ta sama uwaga dotyczy aktywnego skrępowania słupów – nowych, czy istniejących i wymagających wzmocnienia?

C.12. W całym rozdziale 3, w podtytułach zastosowano odmienny sposób przywoływania źródeł przez podawanie nazwisk autorów i roku publikacji. Dotyczy to także tytułów tablic i podpisów rysunków. Dlaczego nie pozostawiono przywoływania pozycji numerami ze spisu bibliograficznego. Ta zmiana nie jest oczywiście błędna, tylko wprowadza pewną niejednorodność redakcyjną. Nie ma to oczywiście istotnego znaczenia, ale trochę dziwi.

C.13. Str. 67, w1d – Słowo *dla* jest zbędne (por. uwaga C.6.).

C.14. Str. 78, w11g – Lepiej napisać *zastosowano* lub *użyto* niż *wykorzystano*.

C.15. Str. 98, w4g – Chyba nie w *artykule* użyto betonu, tylko w *badaniach*.

C.16. Str. 106, w1d - ...*była zachowana w elementach...*, nie *dla elementów*. To samo str. 107, w2d - ...*przyczepność między zbrojeniem FeSMA (dla gładkich elementów) a wykorzystywanymi zaprawami lub żywicami*. To samo po polsku: ... *przyczepność między gładkimi prętami zbrojeniowymi z FeSMA i zastosowanymi zaprawami i żywicami*.

C.17. Str. 110, w4g – Nie*systemów kotwiących taśm*, tylko ...*systemów kotwiących taśmy*. Ponadto, w6g, nie*użyto dwa pręty*, tylko ...*użyto dwóch prętów* (używać kogo?, czego?, a nie kogo? co?; dlatego mówimy np. *używać życia*, a nie *używać życie*). I jeszcze, w1d – Nie ...*ułożenie mieszanki betonowej dla wszystkich elementów ...*, tylko ... *ułożenie mieszanki betonowej we wszystkich elementach...* Więcej już owego źle lub niepotrzebnie używanego *dla* nie będę wytykać, choć pojawia się w dalszym tekście dość często (np. na str. 138 i 140). Ponadto, str. 110, w6g i w7g – z tablicy 4.1. (str. 109) wynika, że stopień zbrojenia *ściskanego* był równy 0,11 (dwukrotnie napisano zbrojenie **rozciągane**).

C.18. Str. 112, p. 4.3.2 – Dlaczego nie wymieniono gatunku stali zbrojeniowej?

C.19. Str. 121, w1g i w2g – Widać jestem mało odczytany, bo po raz pierwszy spotykam się z określeniem *infrastruktura pomiarowa*. Do tej pory miałem do czynienia z *aparaturą pomiarową*, *układem* lub *systemem pomiarowym* lub po prostu *oprzyrządowaniem*. Proszę sprawdzić w słownikach lub internecie (np. w wikipedii) co nazywamy *infrastrukturą*.

C.20. Str. 125, w1d – (5.1.) to nie jest wzór, tylko równanie różniczkowe.

C.21. Str. 126, (5.2.) – To raczej zależność nie wzór, ale się nie upieram, że mam rację.

C.22. Str. 127, w12d – Zwrot: *oznacza metodę kalkulacji opartą na ugięciu* jest niefortunny.

C.23. Str. 17, w3d – Co Autor rozumie przez *wartość sprężenia i siły sprężającej*? Na czym polega różnica? Może chodzi o *wartość naprężenia* nie *sprężenia*?

C.24. Str. 129, w6g – Ugięcia nigdy nie podlegają bezpośredniemu pomiarowi, mierzona są przemieszczenia pionowe, które przy bardzo sztywnym podparciu mogą być bliskie ugięciom, ale nie są z nimi tożsame. Ponadto (w11g), o jakie konkretne przybliżenie w określeniu (raczej: wyznaczaniu) siły sprężającej chodzi w tym przypadku?

C.25. Str. 131, w7g – Opuszczono numer rysunki – jest (por. 0), a chodzi chyba o rys. 5.3. Ponadto, w8d – *Znów owo skutkowało* (por. uwaga C.10.).

C.26. Str. 138, w12g – por. uwaga C.1.

C.27. Str. 139, ostatni akapit, poczynając od w10d – Raz Autor pisze o *przemieszczeniach pionowych* (dobrze!), a drugi raz o *ugięciach* (co niebył ścisłe!) – por. uwaga C.24.

C.28. Str. 140, Tab. 5.4. – Brak na dole wyjaśnienia symboli u_y oraz u_u . Tytuł tablicy warto poprawić na np. *Wielkości charakterystyczne dotyczące ugięć*.

C.29. Str. 143 – por. uwagi C.6. i C.10.

C.30. Str. 145, w3g – Pochwalam Autora, że napisał: ... *który jest przeznaczony do nieliniowej analizy*, a nie *dla*. Natomiast w dalszym tekście na tej samej stronie Autor wraca do tego nieszczęsnego *dla* (także w podpisie rys. 6.1.).

C.31. Str. 147, w9d – Zwrot...*program analizował te warunki na odkształcenia, a następnie...* jest jakimś niezbyt fortunnym skrótem myślowym.

C.32. Str. 152, w3g – *Nie za wyjątkiem* (rusycyzm), tylko *z wyjątkiem*.

C.33. Str. 157 ÷ 161 – por. uwaga C.12.

C.34. Str. 169., w11d – por. uwaga C.10.

C.35. Str. 185, pozycja [104] – W tytule niepotrzebne są wielkie litery przy każdym słowie tytułu. Ponadto brak jest numeru czasopisma i jego wydawcy. Nie we wszystkich pozycjach piśmiennictwa (brawo, że nie użyto terminu *literatura*) podano numery stron publikacji. W tekście nie znalazłem przywołanie pozycji [120], jest jej przywołanie na str. 159 tylko w formie „słownej”. W pozycji tej powinno być *ASCE*, a nie *asce* (por. piśmiennictwo [120]).

C.36. Str. 186, poz. [114] – Dane bibliograficzne są niekompletne, brak jest nawet roku i miejsca opublikowania tej pozycji.

Raz jeszcze podkreślam, że przedstawione uwagi szczegółowe mają drugorzędne znaczenia i nie wpływają na moją ogólnie wysoką ocenę merytoryczną rozprawy Pana mgr inż. Janusza Rogowskiego.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując niniejszą opinię stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Janusza Rogowskiego pt. *Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do aktywnego wzmacniania elementów*

żelbetowych na zginanie” spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne stawiane dysertacjom doktorskim przez środowisko naukowe oraz przepisy ustawowe. Wszystkie cele oraz teza rozprawy (choć nie nawiązano do niej bezpośrednio we wnioskach w rozdziale 8), jak już pokreślono poprzednio, zostały osiągnięte i udowodnione. Pracę tę oceniam bardzo pozytywnie, czemu dałem wyraz w punktach 2 i 3 niniejszej recenzji. Dlatego z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony wymienionej rozprawy.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę oryginalność i nowoczesność tematyki rozprawy, jej szeroki zakres oraz wysoki poziom realizacji i sposób przedstawienia treści, a także to, że Doktorant jest już współautorem publikacji w międzynarodowym czasopiśmie wysokiej rangi (pozycja [18] piśmiennictwa), stawiam wniosek o wyróżnienie opiniowanej tu pracy. Szczegółowe uzasadnienie tego wniosku wynika wprost z poprzednich ocen zawartych w tej recenzji.

Ponadto, co uważam za ważne, zaopiniowana praca stanowi element szkoły naukowej, która jest już ukształtowana i rozwijana przez Panią Promotor, Profesor Renatę Kotynię w Politechnice Łódzkiej i która to szkoła obejmuje krąg zagadnień dotyczący innowacyjnych metod wzmocnienia konstrukcji za pomocą materiałów niekonwencjonalnych. Dotychczasowy krąg badawczy dotyczący wzmocnień z zastosowaniem kompozytów polimerowych z włóknami (głównie węglowymi - CFRP) został – co dokumentuje recenzowana tu praca – poszerzony o materiały z pamięcią kształtu. To poszerzenie tematyki badawczej zasługuje na wielkie uznanie.



