

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ mgr inż. DOROTY MICHAŁOWSKIEJ- MAZIEJUK

**pt.: „EFEKTYWNOŚĆ WZMOCNIENIA ZGINANYCH BELEK ŻELBETOWYCH
PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH TYPU CFRP”**

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 8 czerwca 2022r. oraz pismo nawiązujące do tej uchwały podpisane przez Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport PŚ prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dn. 25 lipca 2022r.

2. Przedmiot, treść pracy i układ redakcyjny pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Doroty Michałowskiej-Maziejuk pt. „Efektywność wzmocnienia zginanych belek żelbetowych przy użyciu materiałów kompozytowych typu CFRP”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska. Promotorem pomocniczym jest dr inż. Paweł Tworzewski z Politechniki Świętokrzyskiej.

Głównym celem pracy było zbadanie efektywności i możliwości przyspieszenia procesu wzmocnień zginanych belek żelbetowych za pomocą kompozytu CFRP metodą NSMR, wykonanych z zachowaniem warunków odzwierciedlających rzeczywiste usytuowanie belek w praktyce (wzmacnianie belek pod obciążeniem, w pozycji pułapowej).

Praca doktorska, opracowana w formie monografii liczącej łącznie 200 stron, została wydana przez Politechnikę Świętokrzyską, Wydział Budownictwa i Architektury w serii Rozprawy Doktorskie w 2022 roku.

Streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści oraz spis stosowanych symboli zamieszczono na początku opracowania. Zasadnicza treść pracy doktorskiej została podzielona na 11 rozdziałów, na końcu pracy podano bibliografię.

W rozdziale 1 Autorka uzasadniła znaczenie wybranego przez siebie tematu.

Rozdział 2 poświęcony został przeglądowi literatury. Ten szczegółowy przegląd rozpoczęto od zagadnień związanych z niezawodnością i bezpieczeństwem konstrukcji, poprzez określenie przyczyn i metod wzmocnienia z podziałem na metody tradycyjne i wzmocnienia kompozytami. Najszerzej opisane zostały wzmocnienia materiałami kompozytowymi począwszy od opisu stosowanych materiałów, metod wzmocnienia, poprzez zrealizowane dotychczas badania ze szczególnym uwzględnieniem najnowszej metody NSMR. Rozdział kończy opis pracy i procedur obliczeniowych wzmocnionej zginanej belki żelbetowej. Poszczególne podrozdziały zakończone są krótkim podsumowaniem. Autorka podkreśla, że w dotychczas

wpłynęło dnia:

Data 2022 -11- 08

Podpis M. Konec

przeprowadzonych badaniach w laboratoriach wzmocnienie było realizowane na belkach w pozycji odwróconej w porównaniu do rzeczywistego usytuowania belki w praktyce.

Ten bardzo wnikliwie przeprowadzony przegląd dotychczasowego stanu wiedzy był podstawą do sformułowania przez mgr inż. Dorotę Michałowską - Maziejuk czterech głównych celów badań i czterech tez pracy, które przedstawione zostały w rozdziale 3. Ogólnie, tezy pracy związane są z możliwością skrócenia czasu wzmocnienia belek w pozycji pułapowej metodą NSMR i poprawy skuteczności tego typu wzmocnienia z wykorzystaniem prototypowego urządzenia grzewczego.

Autorka w tym samym rozdziale podaje metodykę i ogólny zakres szerokiego programu badań własnych, które przyczynią się do udowodnienia sformułowanych przez Nią tez pracy.

Kolejne rozdziały od 4 do 11 są bezpośrednio związane z tematem pracy doktorskiej i przeprowadzonych przez Doktorantkę badań. Opis stanowiska badawczego i zastosowanej w badaniach aparatury podano w rozdziale 4.

W kolejnym rozdziale 5 – przedstawiono szczegółowy program badawczy dotyczący badań nad skróceniem czasu wiązania kleju oraz badań belek żelbetowych wzmocnionych metodą NSMR w aspekcie normalnego i przyspieszonego czasu wiązania kleju. Program obejmował zróżnicowane obciążenie: monotoniczne i cykliczne (M, C+M).

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w rozdziale 6, który ponadto zawiera również wyniki badań towarzyszących – materiałowych: badania betonu, stali zbrojeniowej i taśm z włókien węglowych).

Rozdział 7 poświęcono analizie wyników badań elementów żelbetowych w aspekcie wpływu zmiany temperatury grzania taśmy, czasu wiązania kleju na stopień wzmocnienia badanych elementów.

Kolejny rozdział 8 zawiera analizę wyników badań belek żelbetowych dotyczącą nośności i stopnia wzmocnienia w odniesieniu do belek wzmocnionych z normalnym i skróconym czasie wiązania kleju jak również belek niewzmocnionych, a także analizę wpływu temperatury grzania taśmy i zastosowania przyspieszonej metody wiązania na efektywność wzmocnienia. Doktorantka przeanalizowała również wpływ programu obciążenia, stopnia stałego zbrojenia belek żelbetowych i stopnia zbrojenia kompozytowego na skuteczność wzmocnienia.

Analizę wpływu przyspieszonej metody wzmocnienia na ugięcia, odkształcenia i krzywiznę badanych belek żelbetowych zawarto w rozdziale 9.

W kolejnym rozdziale 10 przeanalizowano wydłużalność taśmy CFRP będącej konglomeratem włókien węglowych i matrycy z żywicy epoksydowej przy zmiennej temperaturze, co umożliwiło Autorce wyjaśnienie i uzasadnienie wzrostu nośności wzmocnionych belek w przyspieszonej metodzie wzmocnienia.

Każdy z rozdziałów od 7 do 10 zakończony został zwięzłym podsumowaniem.

W rozdziale 11 stanowiącym podsumowanie przeprowadzonych badań Doktorantka zamieściła tabelaryczne zestawienie wyników badań wcześniej wykonywanych przez innych badaczy (10 serii, 74 belki) wraz z uzyskanymi stopniami wzmocnienia realizowanymi w pozycji odwróconej. W analogicznej formie Autorka podała wyniki własnych badań belek wzmocnionych pod obciążeniem w pozycji pułapowej, czyli odwzorowującej rzeczywisty proces wzmocnienia w praktyce - (tab. 11.1 i 11.2). Opracowała również w ujęciu statystycznym na podstawie wyników badań własnych i obcych wykresy zależności stopnia

wzmocnienia belek od stopnia wewnętrznego zbrojenia stalowego belek oraz stopnia zbrojenia kompozytowego. Rozdział 11 zakończono sformułowaniem 18 wniosków końcowych i określeniem kierunków dalszych badań.

Bibliografia zamieszczona została na końcu pracy doktorskiej. Obejmuje 120 pozycji literatury (artykuły naukowe, książki) ściśle związanych z tematem dysertacji, 21 pozycji normowych i 5 stron internetowych cytowanych w tekście pracy.

3. Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana praca doktorska ma charakter eksperymentalno-analityczny. Treść pracy ściśle odpowiada jej tytułowi. Temat pracy doktorskiej uważam za aktualny i ważny, mający bardzo duże znaczenie poznawcze i aplikacyjne.

Intensywny rozwój budownictwa i rosnące wymagania w odniesieniu m.in. do przenoszenia coraz większych obciążeń dotyczy nie tylko nowo wznoszonych obiektów, ale również istniejących już obiektów. To często wymusza decyzję o konieczności wzmocnienia w celu zwiększenia nośności. Ponadto intensywna eksploatacja konstrukcji, jej przeciążenia powodują stany awaryjne, co niesie za sobą decyzje o jej wzmocnieniu.

Wzmocnienie, aby było skuteczne, powinno włączyć się do pracy bezpośrednio po jego wykonaniu, powodując ograniczenie rozwoju zarysowania i podniesienie nośności. W konstrukcjach żelbetowych spełnienie tego warunku jest często trudne do zrealizowania.

Wzmocnienie elementów konstrukcji żelbetowych materiałami kompozytowymi CFRP stanowi nowoczesną metodę. Główną zaletą materiałów CFRP jest ich odporność na korozję, natomiast jedną z wad jest liniowa charakterystyka tych materiałów. Dotychczas głównym sposobem wzmocnienia było przyklejanie taśm CFRP do zewnętrznej powierzchni wzmacnianego elementu, co uwypuklało inną wadę tego typu wzmocnienia, czyli niską odporność ogniową. Metoda NSMR, wklejania taśm w utworzone bruzdy wzmacnianego elementu eliminuje ten problem. Uważana jest obecnie za nowoczesną i najskuteczniejszą technikę wzmacniania z uwagi na większe wykorzystanie wytrzymałości taśm na rozciąganie. Jednocześnie jest najmniej rozpoznana od strony badawczej.

Badania Doktorantki nie tylko wypełniły tę lukę, ale twórczo rozwinęły tę metodę poprzez zaproponowanie i zbadanie skuteczności nowej technologii związanej z podgrzewaniem taśmy, co powoduje istotne skrócenie czasu realizacji wzmocnienia (z 7 dni do 1,5h) oraz wzrost skuteczności wzmocnienia.

Tak duże poznawcze znaczenie przeprowadzonych badań nie byłoby możliwe do osiągnięcia bez opracowania precyzyjnie przemyślanego, wieloetapowego programu badawczego, obejmującego szeroki zakres badań jak również zastosowania najnowocześniejszej aparatury badawczej.

Realizacja wzmocnień belek w skali naturalnej i w warunkach odzwierciedlających rzeczywistą sytuację jaka występuje w praktyce, czyli wykonanie wzmocnienia pod obciążeniem w pozycji pułapowej było zadaniem trudnym do wykonania, wręcz pionierskim. Dzięki temu uzyskane wyniki są poznawcze i wiarygodne. Jednocześnie mogą być bezpośrednio zastosowane w praktyce inżynierskiej.

Wszystkie części rozprawy doktorskiej są merytorycznie spójne. Badania i opracowanie wyników zostały przeprowadzone bardzo starannie. Wyniki badań i analiz zostały szczegółowo udokumentowane w formie tabel i wykresów.

Główne cele badań zostały osiągnięte, a sformułowane przez Autorkę cztery tezy zostały w pełni udowodnione.

Opiniowaną rozprawę doktorską mgr inż. Doroty Michałowskiej-Maziejuk oceniam jako bardzo dobrą o dużym znaczeniu poznawczym, twórczo powiększającą dotychczasowy stan wiedzy na temat wzmocnienia belek na zginanie metodą NSMR. Jednoznacznie stwierdzam, że zgodnie z art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki opiniowana przeze mnie rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z wpływem podwyższonej temperatury taśmy kompozytowej CFRP - będącej wzmocnieniem zginanej belki żelbetowej - na efektywność wzmocnienia.

Poniżej wymienione argumenty stanowią uzasadnienie tej oceny.

Główne osiągnięcia pracy

Za najważniejszy oryginalny dorobek poznawczy o charakterze badawczo-naukowym, rozwijający wiedzę w zakresie mechanizmu współpracy kompozytu CFRP z żelbetową belką Autorki uważam:

- **Przeprowadzenie eksperymentalnych badań dotyczących skrócenia czasu wiązania kleju. Określenie optymalnej temperatury grzania taśmy potwierdzone wynikami badań.** Badania przeprowadzono 15 na elementach żelbetowych, podzielonych na 5 serii (z czego 1 seria to elementy niewzmocnione). Pozostałe belki (4 serie) były wzmocniane taśmą CFRP umieszczoną w specjalnie wykonanej bruździe. W trzech seriach taśmy były podgrzewane do temperatury 60, 70 i 80 stopni przez 1,5h. Elementy badano w schemacie trzy punktowego zginania, przy zróżnicowanym programie obciążenia.
- **Opracowanie technologii i szczegółów oprzyrządowania umożliwiających realizację skutecznego procesu grzania taśmy CFRP wzmocniającej belkę.**
- **Realizacja badań eksperymentalnych żelbetowych 16 belek w skali naturalnej, z czego 12 belek wzmocnionych pod obciążeniem w pozycji pułapowej taśmami CFRP metodą NSMR.** 4 niewzmocnione belki były belkami referencyjnymi tzw. świadkami umożliwiającymi eksperymentalne określenia skuteczności wzmocnienia. Belki były wzmocniane metodą NSMR dwoma sposobami z podgrzewaniem taśmy CFRP (70°) co skracало czas wiązania kleju (1,5h) oraz bez podgrzewania (wiązanie kleju 7 dni). Ponadto belki miały zmienny stopień stalowego zbrojenia wewnętrznego (0,51% i 1%), zmienny stopień kompozytowego zbrojenia wzmocniającego (0,08% i 0,14%) oraz zróżnicowany sposób obciążenia (monotoniczny i cykliczny). Belki badano w schemacie czteropunktowego zginania.
Wykonano również szerokie badania materiałowe eksperymentalnie określając wszystkie niezbędne parametry betonu, stali i taśm. Przeprowadzono również badania przebiegu temperatury zewnętrznej powierzchni kleju podczas grzania taśmy w celu potwierdzenia braku wpływu tego procesu na degradację składników zaprawy klejowej.

- **Przeprowadzenie wnikliwej analizy wpływu poszczególnych zmiennych parametrów na skuteczność wzmocnień belek metodą NSMR w zakresie przemieszczeń, odkształceń, ugięć, krzywizny badanych belek.** Przeprowadzona w tak szerokim zakresie analiza umożliwiła jednoznaczną ocenę wyższej skuteczności tego typu wzmocnienia w przypadku zastosowania przyspieszonego wiązania kleju w wyniku grzania taśmy CFRP - co istotnie skraca cały proces wzmocnienia.
- **Wyjaśnienie mechanizmu oddziaływania ogrzewanej taśmy, co umożliwiło określenie przyczyny i uzasadnienie uzyskanej w badaniach Doktorantki większej skuteczności wzmocnienia w procesie przyspieszonego wiązania kleju, (dochodzącej do 50%).** W tym celu wykonane zostały dodatkowe badania eksperymentalne (rozdział 10) wydłużenia taśm CFRP po wpływie zmiennej temperatury.
 Badania zrealizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie mierzono wydłużenia taśmy CFRP przy wzrastającej temperaturze grzania taśmy do temperatury 70°, utrzymania jej przez czas wiązania kleju (1,5h) a następnie schładzania do temperatury ok. 23°. W kolejnym etapie wykonywane były analogiczne pomiary z tym, że taśmę CFRP umieszczono (z klejem i bez kleju) w otulinie betonowej badanych elementów żelbetowych.
Analiza przeprowadzona przez Doktorantkę uzyskanych pomiarów wydłużeń /skróceń w aspekcie współczynników rozszerzalności termicznej taśmy CFRP z uwzględnieniem podziału na włókna węglowe i matrycę z żywicy epoksydowej były podstawą do wyjaśnienia przyczyny intensyfikacji procesu wzmocnienia w przypadku zastosowania grzania taśmy. Mechanizm tego wzrostu skuteczności jest związany ze sprężeniem termicznym, który Doktorantka określiła w swojej pracy jako mikro-sprężenie.
 Sprężenie termiczne, było niekiedy stosowane we wzmocnieniach konstrukcji (m.in. T. Godycki-Ćwirko- *Awarie Budowlane* 1999), tyle że w odniesieniu do klasycznych stalowych prętów. Natomiast Doktorantka jako pierwsza przebadła, określiła i przeanalizowała tak gruntownie proces termicznego sprężenia w zastosowaniu do materiału kompozytowego. Jest to tym bardziej cenne, że mechanizm tego zjawiska (mikro-sprężenia) w przypadku badań Doktorantki powiązany jest z czterema materiałami o zróżnicowanych właściwościach.
- **Zastosowanie w badaniach doświadczalnych nowoczesnych metod badawczych,** w tym metody polegającej na rejestracji odkształcenia za pomocą bezstykowego optycznego systemu pomiarowego *Aramis* wraz z przetwarzaniem cyfrowych danych wykorzystujących zasady fotogrametrii dwuobrazowej oraz zestawu optycznego do pomiaru współrzędnych 3D – TRITOP.
Bez zastosowania tych nowoczesnych metod zrealizowanie tego rodzaju i zakresu badań nie byłoby możliwe. Przy czym należy pokreślić nie tylko zastosowanie tej nowoczesnej aparatury w badaniach, ale także umiejętności Doktorantki w zakresie wykorzystania ogromnej ilości uzyskanych wyników z badań i ich interpretacji w odniesieniu do tego wieloparametrowego zagadnienia jakim jest temat dysertacji.
- **Przeprowadzenie analizy porównawczej wyników badań własnych z wynikami badań obcych** w ujęciu statystycznym czego rezultatem było graficzne przedstawienie

zależności stopnia wzmocnienia od dwóch ważnych parametrów: stopnia stalowego zbrojenia wewnętrznego i stopnia zbrojenia kompozytowego wzmocnienia.

- **Zaproponowanie modelu obliczania nośności belek żelbetowych wzmocnionych na zginanie** taśmami zgodnie z założeniami EC2 wraz z propozycją modyfikacji w zakresie ograniczenia odkształcenia taśmy i sztywności osiowej kompozytu.

Uwagi (pytania) o charakterze dyskusyjnym

1. W przeprowadzonych badaniach jednoznacznie uzyskano większą skuteczność wzmocnienia w przypadku skrócenia czasu wiązania kleju poprzez grzanie taśmy niezależnie od ścieżki obciążenia. Tym niemniej w przypadku obciążenia cyklicznego (C+M) była ona nieco niższa w porównaniu do belek obciążonych monotonicznie (M). Autorka tłumaczy to niższym wykorzystaniem taśmy CFRP. Czy na to niższe wykorzystanie wytrzymałości taśmy wpływają cechy materiałowe kompozytu CFRP czy także betonu pod tego rodzaju obciążeniem?
2. Metoda NSMR wymaga precyzji w wykonaniu bruzd, z uwagi na ryzyko przecięcia zbrojenia wewnętrznego. Otuliny według wcześniejszych norm były dużo mniejsze. W zasadzie dopiero normy europejskie z uwagi na trwałość zaostrzyły wymagania w tym względzie. Czy można określić minimalne wymagania otuliny zbrojenia w aspekcie głębokości bruzdy i osadzenia w niej taśmy? Czy zastosowanie zaproponowanej metody grzanych taśm miałoby jakiś wpływ na te minimalne wymagania?

Wybrane uwagi szczegółowe (w kolejności czytania tekstu pracy):

- Na rysunku 5.1 – wskazane byłoby opisać otulinę w przekroju elementu żelbetowego
- Rysunki 5.10 i 5.16 mogłyby być uzupełnione przekrojem poprzecznym belek
- Wnioski końcowe na str. 190 (nr 10 i 12) wydają się być podobne, czy to tylko pozorne podobieństwo?

Praca napisana została bardzo starannie i przejrzysto opracowana, co przy tak obszernym zakresie badań nie było prostym zadaniem. Zauważyłam jedną usterkę językową, którą wymienię, ponieważ powtarza się kilkakrotnie w tekście: *przy pomocy czegoś* (powinno być: *za pomocą czegoś* – a przy pomocy kogoś).

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest bardzo wartościową pracą eksperymentalno-analityczną, twórczo rozszerzającą dotychczasowy stan wiedzy w zakresie efektywności wzmocnień zginanych belek żelbetowych kompozytami CFRP metodą NSMR. Rezultaty rozprawy doktorskiej mogą być bezpośrednio zastosowane w praktyce inżynierskiej. To ważna, dodatkowa zaleta dotycząca prac badawczych z obszaru nauk stosowanych.

Temat pracy doktorskiej jest aktualny. Dotyczy nowoczesnej i dotychczas jeszcze nie rozpoznanej w zakresie mechanizmu oddziaływania metody wzmocnienia zginanych belek żelbetowych kompozytem CFRP techniką NSMR. Ponadto Doktorantka twórczo metodę NSMR rozwinęła poprzez proponowanie tzw. wzmocnienia na gorąco, czyli grzania taśmy CFRP umieszczonej w bruzdzie w otulinie wzmacnianej belki.

Współpraca wzmacnianego elementu i wzmocnienia to niezwykle skomplikowane, wieloparametrowe zagadnienie. Rozpoznanie tego problemu wymagało przeprowadzenia szeroko zakrojonych badań i zastosowania nowoczesnej apertury. Wnikliwe badania eksperymentalne i przeprowadzone analizy umożliwiły Doktorantce wyjaśnienie mechanizmu tej współpracy i co za tym idzie uzasadnienie wyższej skuteczności metody wzmocnienia za pomocą grzanych taśm.

Zaproponowana przez Doktorantkę oryginalna, innowacyjna metoda powoduje istotne skrócenie czasu wzmocnienia (związane ze skróceniem czasu wiązania kleju z 7 dni do 1,5h) i zwiększenie jego skuteczności. Ma to niezwykle pozytywne konsekwencje nie tylko finansowe, ale również społeczne, ponieważ często decyzja o konieczności wzmocnienia zapada w sytuacji pojawienia się stanu awaryjnego konstrukcji.

Praca doktorska mgr inż. Doroty Michałowskiej – Maziejuk zgodnie z wymogiem art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z wpływem podwyższonej temperatury taśmy kompozytowej CFRP - będącej wzmocnieniem zginanej belki żelbetowej - na efektywność wzmocnienia.

Mgr inż. Dorota Michałowska – Maziejuk wykazała się umiejętnością prowadzenia naukowych badań w szerokim zakresie z zastosowaniem najnowocześniejszej aparatury badawczej. Doktorantka posiada ogólną teoretyczną wiedzę w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo jak również umiejętności poprawnego analizowania skomplikowanych, złożonych zagadnień z obszaru konstrukcji żelbetowych oraz nowoczesnych metod wzmocnień materiałami kompozytowymi. Doktorantka jest w pełni przygotowana do samodzielnej pracy naukowej.

Cele pracy zasygnalizowane na początku dysertacji zostały osiągnięte a sformułowane przez Autorkę cztery tezy badawcze zostały w pełni udowodnione.

Zasygnalizowane uwagi w niczym nie umniejszają merytorycznej wartości pracy i nie mają wpływu na ogólną bardzo dobrą ocenę rozprawy doktorskiej przedłożonej do recenzji.

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Doroty Michałowskiej - Maziejuk pt. *„Efektywność wzmocnienia zginanych belek żelbetowych przy użyciu materiałów kompozytowych typu CFRP”* spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne, którym powinna odpowiadać rozprawa doktorska określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (tekst jednolity: Dz. U. 2017, poz. 1789) – oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 22.09.2011 (Dz. U. 2011, Nr 204, poz. 1200) w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora wraz z późniejszymi zmianami.

Na podstawie powyższego wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Doroty Michałowskiej-Maziejuk do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Z uwagi na zakres i wysoki poziom merytoryczny naukowych badań eksperymentalnych oraz na wartość poznawczą i aplikacyjną pracy wnioskuję również o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej.

K. Nagrodzka – Godyckie