

Dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, prof. PB
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45E
15-351 Białystok

Białystok, 20.06.2023

Przeżyłem

DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgra inż. Grzegorza Banasiaka
"Wpływ modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi
na odporność na działania alkaliów"

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi Uchwała nr 650/2023 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport z dnia 04.04.2023 r., zgodnie z którą zostałam wyznaczona na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Banasiaka.

Rozprawa została przygotowana w Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Garbacza. Promotorem pomocniczym była dr inż. Maria Włodarczyk.

1. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Rozprawa dotyczy możliwości modyfikowania kompozytowych prętów zawierających włókna bazaltowe (BFRP), przeznaczonych do zbrojenia konstrukcji z betonu, w celu zwiększenia ich odporności na oddziaływanie środowiska alkalicznego. Zagadnienie mieści się zarówno w dyscyplinie inżynieria lądowa jak i w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Praca liczy łącznie 151 stron. Zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz stosowanych symboli i oznaczeń. Rozprawa została podzielona na 8 rozdziałów. Zilustrowano ją 82 rysunkami i 27 tablicami. Bibliografia liczy 109 pozycji, przy czym większość stanowią prace obcojęzyczne. Pozycje bibliograficzne zostały trafnie dobrane. Pracę kończą wykazy rysunków i tabel.

W pracy można wyróżnić dwie części: literaturową (55 str.) i doświadczalną (67 str.). Rozdział zatytułowany *Wprowadzenie* zawiera *Genezę pracy* oraz *Cel i zakres pracy*. W rozdziale tym Autor prezentuje powody, który skłoniły Go do podjęcia badań ukierunkowanych na poszukiwanie rozwiązań materiałowych dla zbrojeniowych prętów kompozytowych zawierających włókna bazaltowe, odpornych na oddziaływanie środowisk korozyjnych, w szczególności środowiska alkalicznego.

W rozdziale tym zaprezentowano również cele pracy, w których doprecyzowano kierunki modyfikacji prętów BFRP, podjęte w ramach badań eksperymentalnych. Postawiono następujące pytania badawcze:

- „1. Czy i jaki wpływ na odporność na działanie alkaliów ma modyfikacja składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi (BFRP) przez ich hybrydyzację, tzn. częściową zamianę włókien bazaltowych włóknami węglowymi (pręty HFRP)?
2. Czy i jaki wpływ na odporność na działanie alkaliów ma dodatkowa modyfikacja składu prętów HFRP poprzez dodatnie nanokrzemionki do spoiwa epoksydowego (pręty nHFRP)?”

W nawiązaniu do postawionych zagadnień badawczych ustalono zakres pracy, w tym założenia do programu badań doświadczalnych, prowadzących do ich wyjaśnienia.

W kolejnych rozdziałach dokonano analizy literatury związanej z przedmiotem rozprawy. Rozdział drugi zawiera ogólną charakterystykę prętów kompozytowych FRP. Autor rozpoczął od charakterystyki włókien i żywic stosowanych jako materiał spajający włókna, a następnie opisał właściwości prętów kompozytowych FRP, sygnalizując kierunki ich modyfikacji materiałowych. Istotną część rozdziału stanowi omówienie potencjału zastosowania różnych wyrobów FRP w budownictwie.

W rozdziale trzecim zawarto przegląd wiedzy dotyczącej prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi (BFRP). Autor poświęcił szczególną uwagę hybrydyzacji prętów tj. uzupełnianiu włókien bazaltowych np. włóknami węglowymi w celu poprawy wartości modułu sprężystości podłużnej prętów. Opisując kierunki rozwoju technologii prętów zbrojonych FRP z włóknami bazaltowymi, Autor zwrócił uwagę na brak wystarczających danych i modeli opisujących zmiany właściwości prętów w czasie, w zależności od rodzaju oddziaływań, którym pręty mogą być poddane.

Obszerny rozdział czwarty poświęcono trwałości prętów kompozytowych FRP. Opierając się na licznych źródłach literaturowych, Autor scharakteryzował w nim różne grupy czynników mających wpływ na trwałość prętów kompozytowych, a także zwrócił uwagę na złożoność problemu trwałości prętów FRP wynikającą głównie stąd, że procesy korozyjne przebiegają odmiennie i mogą być uwarunkowane innymi czynnikami w przypadku włókien i w przypadku spoiwa. Bardzo interesujące jest zestawienie współczynników redukcyjnych z uwagi na pełzanie i warunki środowiskowe, opracowane na podstawie kilku norm stosowanych do projektowania elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi (Tabela 3, str. 53). Zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami projektowania, wartości współczynników przyjmowane są „po stronie bezpiecznej”, co znacznie ogranicza możliwości efektywnego zastosowania prętów i materiałów FRP. Godne podkreślenia jest tu nie tylko zacytowanie szeregu prac, ale również ich krytyczna analiza dotycząca wpływu poszczególnych czynników na wyniki uzyskane przez różnych badaczy. Zapoznanie się z częścią teoretyczną rozprawy pozwala zrozumieć pytania badawcze sformułowane w rozdziale pierwszym. Wnioski wynikające z szerokiego przeglądu literatury zostały wykorzystane przy interpretacji wyników badań własnych.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały poświęcone badaniom eksperymentalnym. Przedmiotem badań były pręty z włóknami bazaltowymi (BFRP) oraz pręty hybrydowe z włóknami bazaltowymi i węglowymi (HFRP) o średnicy 8 mm, w których matrycę stanowiła żywica epoksydowa. Badano pręty o trzech składach:

- BFRP zawierające 100% włókien bazaltowych,
- HFRP zawierające 75% włókien bazaltowych oraz 25% włókien węglowych,
- nHFRP zawierające 75% włókien bazaltowych oraz 25% włókien węglowych, w których spoiwo żywiczne zawierało dodatek nanokrzemionki (3% objętościowo).

W rozdziale piątym Autor przedstawił *Materiały i metody badawcze*, między innymi opisał cechy geometryczne badanych prętów i zaprezentował wyniki testów właściwości wytrzymałościowych prętów kontrolnych. Wprowadzenie włókien węglowych do składu prętów spowodowało zwiększenie modułu sprężystości podłużnej z 43 GPa (pręty BFRP) do ponad 70 GPa (pręty HFRP i nHFRP). Szczegółowo opisano metody oceny odporności prętów FRP na oddziaływanie środowiska alkalicznego. Podstawową metodę badania stanowiła procedura A według wytycznych ACI 440.3R-04 B6, zgodnie z którą próbki prętów kompozytowych były przechowywane w środowisku alkalicznym w temperaturze 60°C.

Stosowano również zmodyfikowane procedury B i C tej samej normy – próbki poddane stałemu naprężeniu przechowywano w środowisku alkalicznym w temperaturze pokojowej. Efektywność modyfikacji składu prętów kompozytowych oceniano na podstawie spadku masy próbek oraz na podstawie zmian wytrzymałości na rozciąganie i zmian wytrzymałości na ścinanie. Przeprowadzenie badań odporności prętów na oddziaływanie środowiska alkalicznego według procedur B i C wymagało budowy specjalnego stanowiska zapewniającego utrzymanie stałego naprężenia prętów w trakcie długotrwałego testu.

W rozdziale szóstym zaprezentowano *Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych prętów poddanych oddziaływaniu środowiska alkalicznego przez okres 1, 2, 3, 4 i 6 miesięcy*. Między innymi przedstawiono przykładowe zależności siła rozciągająca – przemieszczenie oraz liczne fotografie obrazujące sposób zniszczenia prętów FRP. Obszerną dyskusję wyników badań zawiera rozdział siódmy. *Podsumowanie i wnioski*, zawarte w rozdziale ósmym, sformułowano na podstawie analizy wyników badań. W głównej mierze Autor odniósł się do pytań badawczych postawionych na początku rozprawy. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły szczegółowo opisać proces niszczenia prętów kompozytowych poddanych oddziaływaniu środowiska alkalicznego. Najistotniejsze wnioski wynikają z analizy rezultatów badania odporności prętów kompozytowych na oddziaływanie środowiska alkalicznego w temperaturze 60°C (procedura A). To właśnie podwyższona temperatura jest czynnikiem, który ma największy wpływ na postęp procesu degradacji prętów FRP mierzony spadkiem wytrzymałości na rozciąganie. Prowadzenie badań według procedur B i C w temperaturze pokojowej, uniemożliwiło pełne wykorzystanie tych metod do badania odporności prętów FRP. Analiza wyników badań przeprowadzonych według procedury A pozwoliła dokonać oceny efektywności zaproponowanych kierunków modyfikacji składu prętów w kontekście postawionych pytań badawczych.

Podano również propozycje przyszłych badań zmierzających do uzyskania nowej wiedzy w zakresie komponowania składu niemetalicznych prętów zbrojeniowych w celu poprawy ich właściwości wytrzymałościowych oraz trwałości w warunkach jednoczesnego oddziaływania różnych czynników niszczących. Odrębną kwestią pozostaje doskonalenie metod badań trwałości prętów FRP.

Przyjęty układ rozprawy i sposób uporządkowania treści jest logiczny, właściwy dla prac o charakterze badawczym. Wszystkie części rozprawy są merytorycznie spójne.

2. OCENA PRACY

2.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów

Kompozyty FRP są obiektem zainteresowania naukowców i inżynierów od kilkadziesiąt lat. Obecny wzrost zainteresowania tymi kompozytami w budownictwie spowodowany jest poszukiwaniem rozwiązania alternatywnego dla zbrojenia stalowego, które zwiększałoby nośność (dzięki odpowiednio dużej wytrzymałości na rozciąganie) i trwałość konstrukcji, prowadziło do ograniczenia ciężaru konstrukcji i byłoby uzasadnione ekonomicznie. Jednakże, nadal stopień sformalizowania i ustandaryzowania wymagań dotyczących projektowania i wykonawstwa konstrukcji betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym jest niewystarczający. Właściwości fizyczne materiałów kompozytowych jak również ich odporność na oddziaływanie środowisk korozyjnych, mogą być kształtowane poprzez modyfikację ich składu. W przypadku prętów zbrojeniowych, można rozważać dobór włókien jak również modyfikować skład spoiwa żywicznego. Do włókien szczególnie odpornych na oddziaływanie środowisk agresywnych należą włókna bazaltowe. Jednocześnie,

wykonane z nich pręty charakteryzują się stosunkowo niskim modułem sprężystości podłużnej. Zatem w pełni uzasadnione jest podejmowanie prób modyfikowania składu prętów z włóknami bazaltowymi w kierunku uzyskania pożądanych właściwości wytrzymałościowych, z uwzględnieniem potencjalnych warunków ich eksploatacji.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy uznać, że tematyka rozprawy jest istotna i aktualna, ma zarówno znaczenie poznawcze, jak też może mieć odniesienie do praktyki inżynierskiej.

Celem pracy doktorskiej było sprawdzenie, czy hybrydyzacja prętów BFRP zwiększa ich trwałość. Autor podjął próbę odpowiedzi na sformułowane na początku rozprawy pytania badawcze realizując program badań doświadczalnych. Zadania badawcze związane były z oceną wpływu częściowej zamiany włókien bazaltowych włóknami węglowymi oraz modyfikacji spoiwa żywicznego za pomocą dodatku nanokrzemionki, na właściwości wytrzymałościowe oraz odporność prętów na oddziaływanie środowiska alkalicznego.

Cel i pytania badawcze jednoznacznie nawiązują do tematu rozprawy, a ich sformułowanie nie budzi wątpliwości.

2.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Rozprawę doktorską mgra inż. Grzegorza Banasiaka oceniam pozytywnie pomimo kilku uwag dyskusyjnych, które przedstawiam w dalszej części recenzji. Badania eksperymentalne, ukierunkowane na poprawę właściwości wytrzymałościowych i odporności na oddziaływanie alkaliów, poprzez modyfikację składu prętów FRP, zostały zaprogramowane prawidłowo z uwagi na założone cele. Metodyka badań nie budzi większych zastrzeżeń, z wyjątkiem nie w pełni wykorzystanych procedur B i C badania odporności prętów kompozytowych na oddziaływanie alkaliów według wytycznych ACI 440.3R-04 B6. Przeprowadzone badania zostały dokładnie opisane i udokumentowane. Uzyskano wartościowe rezultaty, które zostały przedstawione czytelnie w formie graficznej w postaci licznych wykresów i zestawień tabelarycznych. Pomimo niedociągnięć w opisie wyników badań, można uznać, że Autor przeprowadził poprawną interpretację i krytyczną analizę uzyskanych wyników, dowodząc umiejętności posługiwania się metodami naukowymi w rozwiązywaniu problemu badawczego. Wnioski, które wynikają z przeprowadzonych analiz, zostały w większości sformułowane prawidłowo. Cel pracy został osiągnięty.

Do osiągnięć Autora należy zaliczyć, między innymi:

1. Opracowanie i zrealizowanie interesującego programu badań, w efekcie którego uzyskano szereg wartościowych wyników, które przyczynią się do rozwoju technologii prętów kompozytowych przeznaczonych do zbrojenia konstrukcji z betonu.
2. Opracowanie i weryfikację funkcjonowania stanowiska badawczego umożliwiającego prowadzenie testów odporności zbrojenia FRP na oddziaływanie środowiska alkalicznego w warunkach jednoczesnego naprężenia prętów. Opracowanie harmonogramów badań umożliwiło znaczne skrócenie czasu ich realizacji.
3. Potwierdzenie, że komponowanie składu prętów zbrojeniowych FRP z użyciem różnych włókien (np. włókien bazaltowych i węglowych) może prowadzić do osiągnięcia pożądanych właściwości wytrzymałościowych i odporności na oddziaływanie środowisk korozyjnych.

Z uwagi na wzrastające zainteresowanie stosowaniem zbrojenia niemetalicznego w zginanych elementach z betonu rozprawa ma bez wątpienia charakter aplikacyjny.

3. UWAGI DOTYCZĄCE PRACY

Uwagi dyskusyjne

1. W odniesieniu do włókien, zamiast określenia trwałość należałoby używać określenia odporność na oddziaływanie środowiska korozyjnego (alkalicznego). Ogólnie trwałość to cecha konstrukcji, elementów, natomiast materiały odznaczają się odpornością na oddziaływanie określonych czynników.
2. W opisie założeń do programu badawczego brakuje komentarza wyjaśniającego, na jakiej podstawie przyjęto proporcje włókien bazaltowych i węglowych w składzie prętów HFRP oraz jak dobrano rodzaj i zawartość modyfikatora żywicy epoksydowej w przypadku prętów nHFRP.
3. Nie wyjaśniono precyzyjnie, w jaki sposób monitorowano stałe naprężenie próbek prętów w trakcie badania według procedury B i C.
4. W jaki sposób utrzymywano stałe nawilżenie próbek badanych według procedury C?
5. W rozdziale zatytułowanym *Analiza wyników* wielokrotnie powtarza się stwierdzenie: „Dla większości badanych okresów rozrzut wyników był mniejszy niż dla próbek kontrolnych, co pozwala wnioskować o pewnym korzystnym wpływie sezonowania badanych próbek...”. Skąd ten wniosek? Co on oznacza?
6. Nie mam pewności czy określenie *retencja* można stosować w stosunku do parametrów wytrzymałościowych.
7. Wnioski są na ogół poprawne, chociaż niektóre z nich zawierają nie w pełni zrozumiałe stwierdzenia, np. „W przypadku prętów BFRP spadek wytrzymałości na ścinanie po 6 miesiącach był istotnie większy niż wytrzymałości na rozciąganie, do odpowiednio 19% i 65% wytrzymałości początkowych”. Bardzo proszę o wyjaśnienie.

Uwagi natury formalnej

Pozycje wymienione w spisie literatury zostały zacytowane. W treści przywołano rysunki i tabele zamieszczone w rozprawie. Usterki edytorskie i gramatyczne dotyczą przede wszystkim tzw. literówek, błędów gramatycznych oraz interpunkcyjnych, ale także niejasnych sformułowań.

1. W rozdziałach dotyczących trwałości prętów kompozytowych FRP niepotrzebnie opisywano (bardzo szczegółowo) zagadnienia związane z korozją stali zbrojeniowej. Są to zagadnienia ogólnie znane.
2. Część rysunków prezentujących wyniki badań (np. zależności siła rozciągająca – przemieszczenie) znacząco różni się wielkością, stylem opisu i skalą, należało to ujednoczyć. Kilka fotografii ma zbyt mały format, co powoduje, że są niewyraźne.
3. W rozdziale *Analiza wyników* są niejasne nawiązania do zestawień tabelarycznych wyników badań np. w Tabeli 25 nie ma wartości 1538,6 MPa (str. 121), a w Tabeli 26 nie ma wartości 1418,7 MPa (str. 123).
4. Autor niewłaściwie używa określeń „niższy” i „wyższy”, np. zamiast „wysoka odporność na korozję” (str. 26) powinno być „duża odporność na korozję”, zamiast „wysoka ciągliwość” (str. 37) powinno być „duża ciągliwość”, zamiast „niższą trwałość” (str. 47) powinno być „mniejszą trwałość”, zamiast „najniższa/najwyższa wartość współczynnika zmienności” powinno być „najmniejsza/największa wartość współczynnika zmienności” itp.

5. W rozdziale *Materiały i metody badawcze* (rozdział piąty) pomieszczono opis metod badań i wyniki testów właściwości próbek kontrolnych. Całość wyników badań, w tym prętów kontrolnych, powinna być zaprezentowana w rozdziale szóstym.
6. Zestawienie tabelaryczne wyników badania wytrzymałości na rozciąganie próbek po sezonowaniu w roztworze alkalicznym z wynikami uzyskanymi dla próbek kontrolnych znacznie ułatwiłoby analizę postępu procesów degradacji.
7. Rys. 39, według podpisu, przedstawia konstrukcję do utrzymywania stałego odkształcenia w trakcie sezonowania próbek. Jednakże, nie wynika z niego, na czym ta konstrukcja polega.
8. W treści pracy znalazło się szereg niezręcznych sformułowań, takich jak: "... wpływ zadziałania wysokiej temperatury..." (str. 47), "...niższy względny spadek..." (str. 50), "...rosnący spadek wytrzymałości na rozciąganie..." (str. 61), "Badania wykazały wyższe właściwości wytrzymałościowe i ich wyższą retencję..." (bez skazania o jakie właściwości chodzi - str. 67), "Próbki BFRP ścięte po 6 miesiącach..." (str. 115), „wysokość spadku wytrzymałości” (str. 128), „badania ścinające” (str. 129), „wzrost spadku” (str. 132) itp.
9. Zamiast „*odczyn Ph*” (str. 95) powinno być „*odczyn pH*”,

Wymienione przeze mnie uwagi nie umniejszają oryginalności i wartości merytorycznej prezentowanej pracy.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Banasiaka rozwiązuje oryginalne zadania naukowe dotyczące modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi w kierunku poprawy ich właściwości wytrzymałościowych, w szczególności modułu sprężystości podłużnej, a także zwiększenia ich odporności na oddziaływanie środowiska alkalicznego. Zaproponowane rozwiązania materiałowe będą miały zastosowanie praktyczne.

Sformułowany w rozprawie cel został moim zdaniem osiągnięty. Autor rozprawy wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem pracy, umiejętnościami programowania i prowadzenia badań doświadczalnych, w tym wykorzystania metod badań doświadczalnych i analizy wyników. Zrealizował założony program badań, uzyskał oryginalne i wartościowe rezultaty, przeanalizował je i krytycznie ocenił oraz zakończył w większości poprawnymi wnioskami. Podjął także próbę sformułowania kierunków dalszych badań.

Opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2023, poz. 742). Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie naukowej *inżynieria lądowa, geodezja i transport* w zakresie wykorzystania prętów kompozytowych BFRP i HFRP do zbrojenia konstrukcji z betonu. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgra inż. Grzegorza Banasiaka do publicznej obrony rozprawy.

Dr. Tomasz Leckowski