

Gliwice, 07.04.2023

dr hab. inż. Małgorzata Szymiczek, prof. PŚ  
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adrianny Filipiak-Kaczmarek  
pt.: **“Wpływ starzenia na właściwości strukturalne i mechaniczne  
kompozytowych prętów zbrojonych”**

promotor: dr hab. inż. Wojciech Błażejowski, prof. uczelni  
promotor pomocniczy: dr inż. Michał Barcikowski

### **Podstawa opracowania recenzji:**

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma o nr W10/12/2023 z dnia 13.01.2023 r., które zostało podpisane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego.

### **1. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Adrianny Filipiak-Kaczmarek pt.: “Wpływ starzenia na właściwości strukturalne i mechaniczne kompozytowych prętów zbrojonych” została zredagowana w języku polskim jako monografia licząca 105 stron. Zawiera ona spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp, 11 merytorycznych rozdziałów a właściwie 12 rozdziałów (co wynika z błędnej numeracji), spis literatury wraz z wyszczególnieniem norm i źródeł literaturowych, a także katalog rysunków, tabel oraz równań. Praca zawiera również 23 załączniki, w których przedstawiono wyniki

badania oraz propozycję zmodernizowanego układu obciążenia dla prowadzenia badań starzeniowych pod stałym obciążeniem.

Należy podkreślić, że prace badawcze zostały częściowo zrealizowane w ramach projektu LIDER/40/0219/L-18/NCBIR/2019 pt.: „Nowa generacja hybrydowych prętów zbrojeniowych do zbrojenia betonu i gruntu”, sfinansowanego ze środków NCBIR.

Przedłożona do recenzji praca doktorska ma typową strukturę dla pracy naukowej. Autorka po krótkim wprowadzeniu i zdefiniowaniu problemu, dokonuje opisu stanu wiedzy w oparciu o najnowsze doniesienia literaturowe.

Podjęta w pracy tematyka, dotycząca wpływu warunków eksploatacji na właściwości kompozytowych prętów zbrojeniowych jest niezwykle istotna dla aplikacji w przemyśle budowlanym, szczególnie, że jest to obszar dynamicznego rozwoju, co jest efektem specyficznych właściwości polimerowych materiałów kompozytowych. Tak postawiony problem wymagał od Autorki interdyscyplinarnego podejścia, wiążącego inżynierię materiałową z mechaniczną.

Pierwsze trzy rozdziały poświęcone są kompozytowym materiałom polimerowych. Autorka wprowadza podział i bardzo ogólne informacje, bez podania konkretnych przykładów kompozytów funkcjonalnych czy konstrukcyjnych. W drugim rozdziale podano ogólne informacje na temat materiałów wzmacniających z ich podziałem wg kryterium temperaturowego, natomiast szerzej omówiono włókna szklane i bazaltowe, z których były wykonane pręty zbrojeniowe do betonu będące przedmiotem badań w niniejszej pracy. Rozdział trzeci poświęcony jest materiałom, które są wykorzystywane na osnowy kompozytów. Autorka w sposób pobieżny omawia żywice poliestrowe, winyloestrowe i epoksydowe, wskazując różnice pomiędzy nimi i obszary aplikacji.

Rozdział czwartym przedstawia, w szerokim rozumieniu, kompozytowe pręty stosowane do zbrojenia betonu. Choć jest to tematyka teoretycznie znana, to jednak generująca ciągle problemy wynikające z adhezji betonu do prętów, będącej efektem zmiennego obciążenia i środowiskowych warunków pracy konstrukcji. Doktorantka omawia metody wytwarzania prętów oraz sposoby wykończenia powierzchni, a w rozdziale 5 dokonuje analizy stanu wiedzy, uzasadniając wybór przyjętych warunków starzenia prętów kompozytowych.

Zgodnie z przeprowadzoną analizą literatury najczęściej symulowanymi warunkami starzeniowymi prętów stosowanych do zbrojenia konstrukcji betonowych, jest środowisko zasadowe i morskie. Środowisko zasadowe odzwierciedla w pewnym stopniu beton, który ma odczyn zasadowy (pH ok. 13), natomiast powodem kondycjonowania w wodzie morskiej jest aplikacja prętów kompozytowych w konstrukcjach hydrotechnicznych. Autorka przedstawia

również metody badawcze, pozwalające na ocenę jakościową i ilościową prętów kompozytowych.

Na podstawie przeprowadzonego studium literaturowego zostały sformułowane dwa problemy badawcze, które wskazują na potrzebę uzupełniania wiedzy w zakresie zachowania się konstrukcji betonowych wzmocnionych kompozytowymi prętami zbrojeniowymi szczególnie w aspekcie wpływu czynników środowiskowych i obciążenia na ich stopień degradacji, co pozwoliło na zdefiniowanie celu pracy, który brzmi:

*„Celem pracy było określenie jaki wpływ na właściwości zarówno strukturalne jak i wytrzymałościowe mają warunki w jakich kompozytowe pręty zbrojeniowe pracują. W tym celu zostały zasymulowane dwa środowiska, w których najczęściej takie pręty pracują: zasadowe, które odzwierciedla beton oraz słone symulujące wodę morską. Dodatkowym elementem przeprowadzonych badań starzeniowych była inkubacja próbek zarówno z jak i bez obciążenia statycznego”.*

Tak postawiony cel pracy wymagał od Autorki:

- przeprowadzenia badań starzeniowych w środowisku o zadanym stopniu zasolenia oraz zasadowym.
- analiz zmian strukturalnych występujących w kompozytowych prętach zbrojeniowych od wpływem warunków starzeniowych,
- określenia stopnia degradacji badanych materiałów na podstawie badań wytrzymałościowych.

Pani mgr inż. Adrianna Filipiak-Kaczmarek w rozdziale 7 podaje podstawowe informacje dotyczące przygotowania prętów tzn. rodzaje włókien, żywicę i technologie ich wytwarzania (pultruzja), które w dalszej części pracy były poddawane badaniom. Rozdział 8 zawiera systematykę analizowanych próbek. Próbki zostały podzielone ze względu na rodzaj wzmocnienia: szklane (o średnicy 6 i 10 mm), bazaltowe (o średnicy 6 mm) i hybrydowe (o średnicy 8 mm), natomiast nie wyjaśniono dlaczego do badań wytypowano akurat takie średnice.

Rozdział 8 (a właściwie 9, ponieważ jak już wspomniano w pracy występuje błąd w numeracji) zawiera opis metodologii badań. W ramach pracy zostało przygotowane stanowisko do badań starzeniowych w środowisku zasadowym i symulującym warunki morskie, które jednocześnie pozwalało na prowadzenie badań pod stałym obciążeniem. Próbki badano w czasie 30 i 90 dni, ale pH środowisk starzeniowych określono również po 60 dniach.

Oceny zmian strukturalnych dokonano na podstawie określenia zawartości wzmocnienia, pomiaru absorpcji wody, stopnia porowatości oraz analiz obrazów pozyskanych z wykorzystaniem mikrotomografii komputerowej. Zmiany właściwości wytrzymałościowych określono na podstawie pomiaru charakterystyk w próbie czteropunktowego zginania, jednocześnie wskazując trudności przy wyznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie i próby ich rozwiązania.

W rozdziale 9 (10) Doktorantka przeprowadziła analizę wyników z wykorzystaniem oprogramowania StatSoft Statistica, korzystając z testu t dla prób niezależnych z oceną jednorodności wariancji z uwzględnieniem testu Levene'a oraz Browna i Forsytha, co pozwoliło na określenie różnic istotnych statystycznie w badanej populacji.

W rozdziałach 10 i 11 (11 i 12) pracy, Autorka dokonała podsumowania prac, przedstawiła główne osiągnięcia, sformułowała wnioski oraz proponowane dalsze kierunki badań w podjętym obszarze badawczym.

Bibliografia dysertacji mgr inż. Adrianny Filipiak-Kaczmarek obejmuje 117 pozycji, a właściwie 118. Autorka na stronie 31 powołuje się na publikację nr 118, jednak w spisie literatury jej nie ujmuje. Poza tym pozycje 106 i 107 oraz 108 i 109 są powtórzone, Większość cytowanych prac jest z czasopism, które mają wysoki współczynnik impact factor, a także posiadają uznaną pozycję w międzynarodowym środowisku naukowym. W pracy wskazano 12 norm, w tym 8 norm ASTM, 3 normy polskie i jedną CSA. Osobno Autorka wyszczególniła źródła internetowe. W bibliografii nie wykazano ani jednej pozycji autorskiej lub współautorskiej Doktorantki.

## **2. Tematyka rozprawy i problem badawczy**

Podjęta w niniejszej rozprawie tematyka jest związana z coraz szerszym zastosowaniem kompozytów polimerowych do wzmocnienia konstrukcji betonowych jako alternatywy dla zbrojenia prętami stalowymi. Wynika to przede wszystkim z właściwości polimerowych materiałów kompozytowych charakteryzujących się znacznie wyższą wytrzymałością właściwą w stosunku do stali, a także wysoką odpornością korozyjną, co szczególnie istotne jest w środowiskach agresywnych. Osobną kwestią jest geometria pręta kompozytowego, układ wzmocnienia, chropowatość powierzchni, które są wynikiem m.in. technologii wytwarzania i właściwości materiałowych. Wymienione cechy mają istotny wpływ na zachowanie się zbrojenia w betonie, adhezję, co wpływa na pracę całej konstrukcji szczególnie w środowiskach agresywnych np. w wodzie morskiej. Pręty kompozytowe charakteryzują się niską gęstością

i przewodnością cieplną, a także nie stanowią bariery elektromagnetycznej, co w obecnych czasach jest dużą zaletą.

Zdefiniowanie synergicznego wpływu czynników technologicznych i eksploatacyjnych na wytrzymałość konstrukcji betonowych, szczególnie narażonych na oddziaływanie agresywnego środowiska (np. mocny wiatr, duża amplituda temperatur, drgania, wilgotność) jest podstawowym problemem istotnym z punktu widzenia projektowania budowli.

W niniejszej rozprawie postawiony przez Doktorantkę problem badawczy dotyczył właśnie wpływu oddziaływania zasymulowanego środowiska morskiego i zasadowego na właściwości eksploatacyjne (wytrzymałościowe) prętów zbrojeniowych wykonanych z włókien szklanych i bazaltowych.

Zatem z punktu widzenia walorów naukowych oraz użytkowych należy jednoznacznie uznać, że tematyka przedłożonej do recenzji dysertacji jest ważna oraz aktualna. Spełnia ona wymagania, jakie są stawiane pracom doktorskim, które są realizowane w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

### **3. Analiza i ocena merytoryczna rozprawy**

Na podstawie merytorycznej analizy zakresu jak i treści przedłożonej rozprawy należy stwierdzić, że praca wpisuje się dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna. Pani mgr inż. Adrianna Filipiak-Kaczmarek zrealizowała postawione zadania badawcze, zbudowała stanowisko do badań starzeniowych, a także zaplanowała i przeprowadziła eksperymenty, które pozwoliły na osiągnięcie zdefiniowanego celu. Efektem tych prac było określenie zależności pomiędzy obserwowanymi zmianami strukturalnymi a właściwościami wytrzymałościowymi określanymi w próbie czteropunktowego zginania. Badania jednak zostały przeprowadzone w bardzo ograniczonym zakresie, co poniekąd wskazuje sama Autorka.

Za najważniejsze osiągnięcie Pani mgr inż. Adrianna Filipiak-Kaczmarek uważam powiązanie wyników badań eksperymentalnych dotyczących oceny zmian strukturalnych z właściwościami wytrzymałościowymi badanych prętów. Warto podkreślić, że praca ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje obszar inżynierii mechanicznej i materiałowej. Autorka wykazała się umiejętnością interpretacji i analizy uzyskanych wyników, co pozwoliło jej na osiągnięcie założonego celu dysertacji. Recenzowana rozprawa została przygotowana poprawnie pod względem merytorycznym jak i językowym. Niemniej jednak kilka kwestii poruszonych w dysertacji budzi pewne zastrzeżenia:

- Autorka nie opisuje technologii wykonania prętów, nie podaje też właściwości użytej żywicy i włókien wzmacniających. W mojej ocenie są to istotne informacje dla podjętych analiz, tym bardziej, że w dalszej części pracy wiąże zmiany strukturalne z właściwościami wytrzymałościowymi.
- Co oznacza stwierdzenie, że powierzchnia była gładka, czy przeprowadzono odpowiednie badania? Abstrahując już od materiału badawczego, w którym uważam, że powierzchnia gładka jest czynnikiem minimalizującym wnikanie medium imitującego środowisko degradacyjne i jednocześnie ułatwiającym analizy – pozostaje problem adhezji pomiędzy prętem a betonem? Sama Autorka na str. 22 pisze *„Kluczowym aspektem w przypadku kompozytowych prętów zbrojeniowych jest rozbudowana powierzchnia i dobra adhezja do otaczającego je betonu, również w czasie zmiennego obciążenia zbrojonej konstrukcji betonowej”*.

Poza tym w przypadku prętów hybrydowych ważnym czynnikiem jest geometria rdzenia jak najbardziej zbliżona do przekroju kołowego, czego nie udało się w pełni uzyskać, a może to mieć kluczowe znaczenie m.in. przy określaniu właściwości wytrzymałościowych.

- Schemat przedstawiony na rys. 7.1 przedstawia budowę hybrydowych prętów zbrojeniowych, w mojej ocenie bez oplotu i jak sama Autorka twierdzi z powierzchnią gładką. Rysunki 4.1 i 4.3 (zaczepione z literatury) przedstawiają pręty z oplotem lub z żebrowaniem (rys. 4.3a) i piaskowane (rys. 4.3b). Rysunek 8.10 przedstawia pręty z oplotem, a rys. 8.11 bez oplotu. Badany materiał, geometria, układ włókien, chropowatość powierzchni jest bardzo istotna dla prowadzonych w pracy analiz. Warto byłoby przedstawić zdjęcia prętów poddanych badaniom.
- Opracowany program badań w mojej ocenie pozwala na uzyskanie celu, jednak jest mocno uproszczony, a metodologia badań opisana w sposób pobieżny. Doktorantka używa np. określeń w odniesieniu do próbek *„mniejsze, które posłużyły do badań materiałowych oraz większe, które wykorzystano do przeprowadzenia badań wytrzymałościowych”*. Podaje wymiary niektórych próbek, ale nie dla wszystkich testów. Nie podaje też liczebności próbek.

Jaka była długość próbek dla badań wytrzymałości na zginanie? Ile milimetrów wynosił rozstaw podpór i promień zaokrąglenia na podporach? Jaka była prędkość badania? Jak położono pręty hybrydowe względem zadanych obciążeń – zróżnicowana geometria rdzenia będzie miała wpływ na wyniki pomiaru wytrzymałości na zginanie.

Rozumiem problemy przy realizacji statycznej próby rozciągania, których opis uważam za istotny wkład, pomimo, że nie udało się przeprowadzić badania, ale jest to wskazówka do dalszych testów. Zresztą Doktorantka sama zwraca na to uwagę w analizie literatury. Myślę

jednak, że analiza rozkładu naprężeń na przekroju pręta zginanego zniwelowałby szereg wątpliwości.

- Metodyka badań starzeniowych z obciążeniem i bez obciążenia budzi moje poważne wątpliwości. Pierwszym aspektem jest przygotowanie próbek. Na rys. 8.7 wspomina Autorka o „zarobieniu końcówek żywicą”, rozumiem, że chodzi o zabezpieczenie powierzchni próbek żywicą. Jednak myślę, że warto podać również opis przygotowania powierzchni i weryfikacji ciągłości powłoki zabezpieczającej. Ma to istotne znaczenie dla zachowania się prętów podczas starzenia i zmian zachodzących w materiale. Osobnym problemem jest starzenie próbek pod obciążeniem, które nie było stałe dla wszystkich próbek, co zresztą sama Doktorantka zauważa. Niezrozumiałą jest dla mnie przyjęty czas starzenia. Myślę, że znacznie więcej informacji istotnych dla powiązania starzenia z oceną struktury materiału i właściwościami wytrzymałościowymi przyniosłyby krótsze czasookresy weryfikacji. Tym bardziej, że Pani mgr inż. Adrianna Filipiak-Kaczmarek sprawdzała pH zastosowanego środowiska i sama stwierdziła różnice, które mogą świadczyć o degradacji materiału.

Temperatura badania wynosiła 60°C - dlaczego przyjęto taką temperaturę? Jaki byłby rzeczywisty czas starzenia przy założonych warunkach? Autorka nie wyjaśnia tych kwestii, chociaż na stronie 31 podaje pewne zależności pozwalające na oszacowanie czasu eksploatacji.

- Badania starzeniowe w środowisku zasadowym (przygotowanym według normy ASTM, ale Autorka nie podaje nr normy) oraz słonym przygotowanym wg zapisu „0,7g NaCl w 11itrze wody destylowanej”. Myślę, że powinny zostać powołane odpowiednie normy. Zastępczą wodę morską również przygotowuje się wg odpowiedniej normy, poza tym istotne znaczenie dla degradacji materiału ma stopień zasolenia.
- Doktorantka pisze na stronie 42 „W przypadku zastosowanego włókna szklanego typu E, podczas jego zanurzenia w środowiskach agresywnych, następuje uwalnianie wodorotlenków, sodu, potasu oraz metali alkaicznych. Związki te przyczyniają się do wzrostu pH symulowanych środowisk”. Czy to jest potwierdzone przez przeprowadzenie odpowiednich badań? Czy w prętach bazaltowych występuje podobny mechanizm mający wpływ na zmianę pH?
- Badana zmiana masy próbek po starzeniu w środowisku zasadowym jest zróżnicowana szczególnie w przypadku prętów GFRP o średnicy 10 mm, tak jak w przypadku prętów hybrydowych, czy może to mieć podłoże w samym wytwarzaniu prętów? Poza tym Autorka

przedstawia wyniki dla prętów GFRP 10 w środowisku zasadowym, a dla GFRP 6 w środowisku wody morskiej (tabela 9.1). Czy nie prowadzono badań w środowisku o założonym zasoleniu dla GFRP 10 i zasadowym dla GFRP 6? Zmiana masy jest ściśle związana z absorpcją oraz porowatością i przekłada się na właściwości wytrzymałościowe.

- W mojej ocenie przeprowadzona analiza wyników jest pobieżna. Dyskusja wyników powinna zostać uzupełniona o opracowanie zależności wiążących czas starzenia (próbek badanych z obciążeniem i bez obciążenia) z charakterystykami wytrzymałościowymi (wytrzymałość na zginanie, moduł przy zginaniu, odkształcenie) w odniesieniu zmian strukturalnych opisanych przez porowatość i absorpcję, dla przyjętego obszaru badawczego. Pozwoliłoby to na zdefiniowanie konkretnych wniosków w aspekcie zakładanej aplikacji. Myślę, że warto byłoby przedstawić ilościowe zmiany badanych charakterystyk, co ułatwiłoby proces wnioskowania.

Poza tym przeprowadzona analiza statystyczna nie jest odzwierciedlona w dyskusji wyników i procesie wnioskowania. Obok powyższych uwag i wątpliwości na stronie 51 jest pusta przestrzeń, która sugeruje jakby czegoś brakowało. Literatura jest różnie cytowana np. [6][9][32][35][55][97][105][111][112] i na tej samej stronie 29, kilka linijek niżej [19, 21, 25 – 29, 34, 38, 71, 72]. Autorka także nie ustrzegła się błędów interpunkcyjnych, językowych, „literówek”, czy potocznego słownictwa.

### **Wniosek końcowy**

Należy podkreślić, że zawarte w mojej recenzji uwagi oraz sugestie nie wpływają na holistyczną ocenę rozprawy doktorskiej, która jest jednoznacznie pozytywna. Autorka wykazała się wiedzą, umiejętnością planowania eksperymentu, realizacją badań naukowych, oraz interpretacją uzyskanych wyników, co świadczy o predyspozycjach do prowadzenia prac naukowych. Cel pracy został osiągnięty.

**Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Adrianny Filipiak-Kaczmarek pt.: *“Wpływ starzenia na właściwości strukturalne i mechaniczne kompozytowych prętów zbrojonych”*, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

*Mateusz Filipiak*