

Gdańsk, dnia 10 maja 2023

Prof. Wiesław Ostachowicz
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
w Gdańsku

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. inż. Karola Wachtarczyka

pt. Monitoring of fiber reinforced polymers using fiber Bragg gratings inscribed in highly-birefringent fibers

Uwagi ogólne

Podstawę prawną do napisania niniejszej recenzji stanowi pismo Pana Profesora Zbigniewa Gronostajskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Politechniki Wrocławskiej. Pismo o sygnaturze W10/RDND07/13/2023 z dnia 31 marca 2023 wraz z 1 egzemplarzem rozprawy doktorskiej otrzymałem w pierwszych dniach kwietnia.

Opis rozprawy

Rozprawa doktorska stanowi zwarty dokument liczący 136 stron. Praca zawiera wstęp napisany w języku angielskim oraz polskim. Rozprawa jest napisana w języku angielskim (z wyjątkiem streszczenia). Praca składa się z 5 rozdziałów, spisu rysunków oraz spisu tabel a także bibliografii liczącej 186 pozycji.

Przede wszystkim na uznanie zasługuje staranne przygotowanie przeglądu stanu wiedzy z zakresu monitorowania kompozytów wzmocnionych włóknami, stosowanych do tego czujników i technik ich integracji. Doktorant zwrócił uwagę na fakt, iż w zaawansowanych systemach SHM czujniki są rozmieszczone zarówno na powierzchni jak i wewnątrz kompozytu. W tym drugim przypadku następuje ważny proces ich integracji z kompozytem. Ponieważ integracja czujników odbywa się w procesie produkcyjnym, można te same czujniki wykorzystać do monitorowania procesu technologicznego.

Doktorant starannie dokonał przeglądu literatury przedmiotu, która dotyczący czujników światłowodowych. W szczególności skoncentrował swoją uwagę na tych czujnikach, które mogą mierzyć odkształcenie, monitorować różne fazy procesu produkcyjnego, a ich kształt i rozmiar umożliwiają zintegrowanie ich ze strukturą kompozytu bez degradacji właściwości mechanicznych kompozytu. Przeprowadzony przegląd literatury i jego analiza ułatwiła Doktorantowi prawidłowe sformułowanie programu badań własnych.

Mgr inż. Karol Wachtarczyk w sposób jednoznaczny sformułował cel rozprawy. Doktorant postanowił w sposób efektywny wykorzystać zintegrowane światłowodowe siatki Bragga na światłowodzie o wysokiej dwójłomności do pomiaru odkształceń na etapie wytwarzania oraz



eksploatacji kompozytów i konstrukcji kompozytowych, które są wzmacniane włóknami ciągłymi. Doktorant sformułował także cel aplikacyjny, a więc wskazał sposoby wykorzystania czujników o wysokiej dwójłomności w dwóch technologiach polimerowych. W rozprawie przedstawił technologię RTM (*Resin Transfer Molding*) oraz ATL (*Automated Tape Layup*).

Mgr inż. K. Wachtarczyk przedstawił tezę rozprawy, w której przyjął założenie, że generacja czujników o wysokiej dwójłomności umożliwi monitorowanie procesów wytwarzania kompozytów z matrycą duroplastyczną oraz termoplastyczną, a w szczególności umożliwi pomiar złożonego stanu odkształceń. Chodzi w tym przypadku o pomiary złożonego stanu odkształceń wewnątrz struktury kompozytu w warunkach obciążenia quasi-statycznego a także zmiennego w czasie.

Przyjęcie takich celów rozprawy doktorskiej a także sformułowanie ciekawej tezy oceniam bardzo wysoko. Tym bardziej, że osiągnięcie założonych celów pracy i udowodnienie tezy rozprawy, wymagało podjęcia przez Doktoranta bardzo dużego wysiłku i wiedzy.

Aby osiągnąć założone cele i udowodnić tezę, Doktorant zaplanował i przeprowadził kalibrację unikalnego czujnika o wysokiej dwójłomności. Kalibrację mechaniczną czujnika o wysokiej dwójłomności przeprowadził pod działaniem siły poprzecznej przyłożonej do światłowodu z czujnikiem. W dalszym etapie badań dokonał identyfikacji zagrożeń dla światłowodu podczas procesów wytwarzania kompozytów i ustalił położenie punktu żelowania a także dokonał pomiaru odkształcenia resztkowego w procesie technologii RTM (*Resin Transfer Molding*).

W kolejnym etapie Doktorant prowadził badania mechaniczne (quasi-statyczne) próbek kompozytowych wytworzonych w procesie RTM (*Resin Transfer Molding*). W badanych próbkach wbudowano czujniki, które wykorzystano do wykrywania złożonego stanu odkształcenia. Doktorant dokonał pomiarów odkształcenia szczątkowego podczas wytwarzania kompozytu przy pomocy technologii ATL (*Automated Tape Layup*). W następnym etapie dokonał pomiaru odkształcenia kompozytu wytworzonego w procesie ATL za pomocą zintegrowanego czujnika o wysokiej dwójłomności pod obciążeniem cyklicznym.

Podsumowując ten fragment opisu aktywności i dokonań Doktoranta stwierdzam, że przedstawione osiągnięcia zawierają szereg elementów innowacyjnych i tym samym przekraczają ramy wymagań rozpraw doktorskich. Moim zdaniem recenzowana rozprawa wnosi wiele wartości naukowych do dyscypliny inżynieria mechaniczna. W części końcowej rozprawy sformułowano wnioski i uwagi oraz wskazano kierunki dalszych badań.

Ocena merytoryczna

Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że zaproponowana generacja sensorów FBG o wysokiej dwójłomności, zastosowane układy pomiarowe, sposoby implementacji sensorów w kompozycie, zastosowane oprogramowanie, przyjęty sposób przetwarzania sygnałów optycznych oraz pokonywanie ograniczeń technologicznych umożliwiły określenie lokalnego złożonego stanu odkształcenia w kompozytach w założonych warunkach obciążenia. Ponadto potwierdzono przydatność rozwiązania do pomiarów odkształceń zarówno w procesach produkcyjnych RTM (*Resin Transfer Molding*), jak i ATL (*Automated Tape Layup*), a także w późniejszej eksploatacji. Tym samym potwierdzono tezy pracy, osiągnięto główny cel i zrealizowano zadania szczegółowe.



Na szczególną uwagę zasługuje zbudowanie układu pomiarowego ze światłowodową siatką Bragga wpisaną w światłowód o wysokiej dwójłomności z otworami bocznymi. W związku z tym konieczne było pozyskanie specjalistycznego światłowodu z bocznym otworem. Ponadto Doktorant przeprowadził proces wpisywania światłowodowych siatek Bragga o wysokiej dwójłomności techniką maski fazowej. Kontrolując proces wpisywania siatek, uzyskał wysokiej jakości siatki z jednakowym wzbudzeniem obu modów polaryzacji. Doktorant opracował stanowisko badawcze, na którym mógł wyznaczać czułość czujników wpisanych typu HB FBG. Ponadto opracował oryginalne oprogramowanie do obsługi testów czułości tych czujników (HB FBG). Wyzначył długości fali Bragga dla obu osi czujnika. Wykazał, że czułość czujnika FBG wpisanego w badane włókno na siłę poprzeczną była znacznie większa niż wartości znane z literatury dla innych czujników typu HB FBG. W rezultacie Mgr inż. K. Wachtarczyk wykazał pełną przydatność układu pomiarowego z oryginalnym czujnikiem FBG do pomiaru odkształceń przy obciążeniu czujnika wzdłuż jego długości i średnicy.

Niewątpliwie ważnym elementem recenzowanej rozprawy jest opis zastosowania czujników światłowodowych HB FBG do monitorowania kinetyki procesu wytwarzania kompozytów technologią RTM oraz badania kompozytów w warunkach zginania. Badania Doktoranta wykazały, że nie ma negatywnego wpływu na stosowane czujniki HB FBG podczas ściskania czujnika z tkaninami, w których włókna wzmacniające co najmniej jednej z sąsiadujących z czujnikiem warstw wzmacniających są ułożone w tym samym kierunku co światłowód. Natomiast inna orientacja światłowodu w stosunku do włókien wzmacniających może prowadzić do pogorszenia właściwości pomiarowych siatki Bragga w wyniku mikro-ugięć włókien, a nie indukowanej dwójłomności.

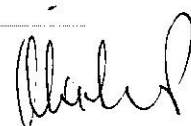
Ponadto Doktorant wykazał, że czujniki SH2 FBG (wpisany w światłowód z bocznym otworem) można zintegrować z kompozytem w procesie RTM i wykorzystać do monitorowania procesu. Badania rozwiązały problem integracji czujników z tkaninami i osadzania ich w kompozycie. Wykazano, że po wystąpieniu punktu żelowania widoczny jest ciągły monotoniczny trend zmiany separacji pików Bragga, wskazujący na narastanie odkształceń poprzecznych.

Doktorant wykazał, że czujniki HB-FBG umożliwiają pomiar wieloosiowego pola odkształceń. Reakcja czujników na to samo odkształcenie w obu układach daje różne wolne i szybkie przesunięcia szczytowe, dzięki czemu dwuczujnikowy układ HB FBG może być wykorzystany do pomiaru odkształcenia w trzech kierunkach, tj. kierunku prostopadłym do laminatu.

W rezultacie wykazano pełną przydatność czujników HB FBG do monitorowania procesu RTM w zakresie detekcji punktu żelowania i pomiaru odkształcenia szczytkowego, a także pomiaru odkształcenia złożonego kompozytu podczas jego pracy.

Uwagi krytyczne

W pracy zauważyłem kilka błędów literowych (np. słowo Lamb napisane małą literą) lecz ich liczba jest niewielka i nie mają praktycznie żadnego wpływu na czytelność pracy.



Uwagi końcowe

Rozprawę doktorską pt.: *Monitoring of fiber reinforced polymers using fiber Bragg gratings inscribed in highly-birefringent fibers* oceniam bardzo wysoko. Zarówno treść pracy, jej sposób zredagowania, wnioski i ich znaczenie praktyczne oceniam bardzo wysoko.

Poziom edytorski rozprawy oceniam bardzo dobrze. Materiał ilustracyjny jest dobrze przygotowany i pozwala na łatwy dostęp do interesujących informacji. Tak więc wysoko oceniam umiejętności autora w zakresie zarówno prowadzenia badań jak też ich 'sprzedawania', to znaczy sposobu informowania innych o ich znaczeniu.

Rozprawa posiada cenne uwagi natury poznawczej oraz – co szczególnie warte jest podkreślenia – zawiera materiał badawczy oparty na weryfikacji eksperymentalnej. Praca jest napisana przejrzysto, zawiera bogaty materiał ilustracyjny. Język i strona redakcyjna nie budzą wątpliwości.

Stwierdzam zarazem, że Autor rozprawy ma bardzo dobre przygotowanie do pracy badawczej. Wysoko oceniam jego wiedzę w zakresie dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna*.

Stwierdzam, że na podstawie przedłożonej mi do recenzji rozprawy doktorskiej można nadać Panu mgr. inż. Karolowi Wachtarczykowi stopień *doktora nauk technicznych*.

Wniosek końcowy

Wyrażone powyżej opinie o rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Karola Wachtarczyka jednoznacznie upoważniają mnie do stwierdzenia, że w świetle obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym stanowią one podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. A zatem stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Karola Wachtarczyka do publicznej obrony.

Wniosek o wyróżnienie

Ponadto w przypadku pomyślnego zakończenia obrony rozprawy doktorskiej i nadania stopnia doktora nauk technicznych stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Politechniki Wrocławskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana Karola Wachtarczyka.

