



Prof. dr hab. inż. Gabriel Wróbel
Katedra Mechaniki Technicznej i Stosowanej
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice
Politechnika Śląska



Gliwice, 25.04.2023

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgra inż. Karola Wachtarczyka

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

„Monitorowanie polimerów wzmacnianych włóknami, za pomocą światłowodowych siatek Bragga wpisanych w wysoce dwójłomne światłowody”

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem
Promotora: prof. Dra hab. inż. Jerzego Kalety
Promotora pomocniczego: Univ-Prof. Dr Ing. Ralf Schledjewski

w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych,
w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna
sporządzona na zlecenie
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Prof. Dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego,
z dnia 2023.03.31

1. Przedmiot pracy

Recenzowana praca jest pracą naukowo-badawczą. Waler naukowości wynika z podjętego zadania rozszerzenia wiedzy z obszaru metodologii pomiarowo-diagnostycznej z wykorzystaniem aktualnie rozwijanej wiedzy i techniki z obszaru zastosowań specjalistycznych włókien światłowodowych do pomiarów stanów odkształcenia i naprężenia w ośrodkach odkształcalnych.

Znaczenie i użyteczność wiedzy związanej z tematem pracy wynika z potwierdzonego już miejsca, od stosunkowo niedawno rozwijanych technologii przesyłu i przetwarzania informacji, której nośnikiem są fale świetlne, a systemy wspomagające opierają się na technice światłowodowej. Popularność rozwiązania te zawdzięczają licznym zaletom, takimi jak: możliwości zamocowania dużej ilości czujników na badanej strukturze, umieszczania czujników na zewnętrznej powierzchni monitorowanych obiektów lub wewnątrz ich struktury, w przypadku takich materiałów jak np. betonu, kompozytów, konstrukcji metalowych. Zachodzi przy tym możliwość utworzenia gęstej siatki punktów pomiarowych, stosowania czujników FBG w ciężkich, eksploatacyjnych warunkach, zdalnego monitorowania i odczytywania wyników, przy jednoczesnym braku konieczności osobnego zasilania. Czujniki charakteryzują się wysoką wytrzymałością zmęczeniową, odpornością na zgięcia i wpływ czynników chemicznych, na korozję i starzenie. Monitoring uszkodzeń realizowany jest bez ingerencji w wytrzymałość konstrukcji, czujniki na monitorowanym obiekcie mogą prowadzić rejestrację ciągłą bądź wykonywać odczyty okresowo, za pomocą interrogatora. Same rozmiary, jak i waga czujników są przy tym niewielkie.

Przedmiotem pracy stały się światłowodowe układy pomiarowe z wpisanymi strukturalnymi filtrami w postaci siatek Bragga oraz badania możliwości ich wykorzystania do pomiarów i monitoringu procesów technologicznych wytwarzania materiałów kompozytowych o podstawie z polimerów termoutwardzalnych i termoplastycznych. Programem badań objęto w szczególności technologie RTM w odniesieniu do termoutwardzalnego kompozytu o wzmocnieniu matami z włókna szklanego oraz ATL układania taśm z impregnowanych termoplastycznym tworzywem, w procesie wytwarzania prepregów. W perspektywie, potwierdzenie skuteczności, poprawności i niezawodności działania badanej klasy światłowodowych czujników, w znacznym stopniu ekstremalnych warunkach wytwarzania kompozytów można by uznać za przydatność podobnych systemów pomiarowych w warunkach monitorowania różnorodnych układów nośnych, w warunkach ich eksploatacji.

2. Analiza treści rozprawy

Wstępne rozdziały pracy zostały poświęcone analizie aktualnego stanu wiedzy i praktyki w wykorzystaniu związanych z kompozytami o podstawie z termoutwardzalnych i termoplastycznych żywic, wzmocnionych włóknami. Podkreślona została waga problemu, wynikająca z postępu i skali zastosowań tej klasy kompozytów w produkcji materiałów i elementów konstrukcyjnych, wobec których stawiane zasadnicze wymagania związane są z wytrzymałością statyczną, dynamiczną, zmęczeniową czy statecznością. Również wrażliwość własności takich kompozytów na warunki i parametry technologiczne wzbudzają zainteresowanie możliwościami kontroli poprawności i powtarzalności przebiegu procesu produkcyjnego, sprzęgającego warunki mechaniczne z materiałowymi i termodynamicznymi,

składającymi się na przebieg technologii wytwarzania. Autor dostrzega również uzyskiwane pomiarowe podstawy prognostyczne jakości i bezpieczeństwa eksploatacji produktów kompozytowych. Podkreśla nieinwazyjność systemu monitoringu w procesie wytwarzania jak i w zakresie własności konstrukcyjnych opomiarowanego układu. Omawia szczególne obszary zastosowania światłowodowych układów pomiarowych. Podkreśla możliwość integracji czujników z monitorowanym, wytwarzanym elementem użytkowym, bądź z elementami stanowiska produkcyjnego, jak np. formą, w przypadku technologii RTM. W grupie funkcjonalności czujników wymienia możliwość, oceny stanu naprężeń szczątkowych. Przewiduje możliwości monitorowania jakości elementów wtryskiwanych, w szczególności wykrywania tzw. suchych punktów. Dokonuje przeglądu dotychczasowych sposobów zastosowania w standardowych już sposobach i przyrządach pomiarowych. Omawia różne rozwiązania w zakresie struktury światłowodów, podyktowane ich szczególnym zastosowaniem.

Osobne miejsce poświęca problemowi projektowania układów pomiarowych pod względem ich konfiguracji, odpowiedniej do, przykładowo, rozmieszczenia i orientacji przestrzennej światłowodowych elementów pomiarowych.

W rozdziale 1.3. Autor zawarł opis podstaw zastosowań światłowodowych siatek Bragga w sieciach światłowodów o wysokiej dwójłomności. Przedstawia rodzaje stosowanych światłowodów, zasadę procesów filtracji w układach z siatkami Bragga oraz ich wpływ typu światłowodu charakterystyki filtracji. Zwraca uwagę na potrzebę testowania własności anizotropowych włókien, z uwagi na potrzebę określenia korzystnych warunków ich integracji z opomiarowanym ośrodkiem. Przytacza przykłady układów pomiarowych opartych na różnych rodzajach światłowodów w odmiennych warunkach pracy i rodzajach obciążeń roboczych.

Przedstawiony w punkcie 1.4 cel pracy obejmuje:

- w aspekcie naukowym - wykazanie możliwości oraz uzasadnienie zastosowań siatek Bragga, wpisanych w układy światłowodów o wysokiej dwójłomności optycznej, do pomiarów odkształceń na etapach zarówno wytwarzania jak eksploatacji produktów z kompozytów polimerowych, o wzmocnieniu włóknami ciągłymi;
- w zakresie zastosowań – opis sposobów i oceny efektywności wykorzystania czujników HB FBG do monitorowania procesów przetłocznego formowania laminatów w technologii lekkiego RTM oraz automatycznego układania taśm termoplastycznych w technologii ATL.

Autor stawia tezę o możliwości zastosowania badanych układów pomiarowych do:

- monitorowania procesów wytwarzania kompozytów o osnowie zarówno z żywic termoutwardzalnych, jak termoplastycznych;
- pomiarów złożonego stanu odkształcenia wewnątrz materiału kompozytowego;
- możliwości wykorzystania w pomiarach prowadzonych w warunkach quasi-statycznych oraz zmiennych.

W drodze do oceny słuszności sformułowanej tezy, na wstępie, w rozdziale 2, zawiera podstawowe wiadomości dotyczące wytwarzania i kalibracji czujników Bragga, w warunkach wpisania w układ sieci światłowodowej o wysokiej dwójłomności. Omawia program prowadzonych testów oraz wykorzystywane oprogramowanie do analizy uzyskiwanych wyników.

Udziałem Doktoranta było wytworzenie wybraną metodą maski fazowej i kalibracja światłowodowych siatek Bragga o oczekiwanych charakterystykach optycznych oraz dobór światłowodów o odpowiedniej geometrii przekrojów, spośród dostępnych, charakteryzujących się wysoką dwójłomnością. Wykonał badania wpływu ułożenia przekroju światłowodu na jego charakterystyki pomiarowe – zależności sygnałów optycznych od kierunku obciążenia.

Rozdział 3 poświęcony został opisowi i ocenie możliwości wykorzystania przedmiotowej techniki w monitoringu procesu lekkiego RTM. Doktorant formułuje zalecenia związane z możliwością poprawnego przeprowadzenia pomiarów, zarówno w fazie układania formy, jak i

iniekcji żywicy. Przeprowadza dyskusję warunków poprawności pomiarów i jakości możliwych do uzyskania wyników, w zależności od struktury wzmocnienia oraz względnego ułożenia elementów pomiarowych.

W kolejnym kroku podejmuje zadanie monitorowania procesu utwardzania laminatu. Zmierza do wykazania efektywności pomiarów w odniesieniu do przebiegu procesu, z szczególnym uchwycenia charakterystycznych czasów żelowania.

Opisuje sposób monitoringu w warunkach integracji układu pomiarowego z formą. Wskazana została możliwość wykorzystania takiego rozwiązania.

Przedstawione zostały liczne wnioski i zalecenia dotyczące możliwości uzyskania poprawnych wyników pomiaru punktu żelowania. Przedyskutowano wpływ ułożenia czujników, wpływu zmian temperatury na dokładność pomiarów oraz możliwe sposoby pokonania stwierdzonych trudności. Opisano również możliwości jednoczesnych pomiarów w różnych kierunkach, zarówno względem kierunku ułożenia włókien, jak i prostopadłym do powierzchni ułożenia, co daje możliwość pełniejszej analizy stanu odkształcenia.

W rozdziale 4 opisane zostały zasady oraz warunki związane z przebiegiem procesu odpowiadającemu technologii automatycznego nakładania taśm z włókien wzmocnienia kompozytu (ATL), ze wskazaniem możliwości aplikacji układów HB FBG w kontroli przebiegu procesu. Wykonane zostały badania wpływu podstawowych parametrów procesu, jak siły docisku taśm, temperatury, wykorzystując prepregi wytworzone w zmiennych warunkach.

W kolejnych etapach badań przeprowadzone zostały testy poprawności pomiarów stanu odkształcenia-naprężenia w zginanych próbkach laminatu. W celu oceny wyników pomiarów wykonano analizę stanu deformacji obciążonej próbki metodą elementów skończonych. Badaniom poddano płytowe próbki w warunkach obciążeń statycznych oraz dynamicznych. Te ostatnie pochodzące od harmonicznego zginania badanej próbki. W przypadku obciążeń dynamicznych, poddano analizie wynikowe przebiegi zarejestrowanej histerezy procesu deformacji. Zaobserwowano czasowe zmiany przebiegu cykli, które zostały zinterpretowane jako efekt procesu zmęczeniowego poddanej zginaniu kompozytowej próbki. Zostało to potwierdzone obrazem fizycznych uszkodzeń próbek, a także przebiegami spadku ich sztywności i zmian energii .

3. Ocena poprawności naukowej.

Praca charakteryzuje się poprawną strukturą logiczną. Na wstępie Doktorant dokonuje przeglądu stanu wiedzy z obszaru objętego programem planowanych badań. Wskazuje obszary warte poszerzenia, z uwagi na rozwijane potrzeby pomiarowe, formułuje tezę odniesioną do zakresu efektywnego zastosowania badanej techniki pomiarowej. Poszukuje materiałów umożliwiających osiągnięcie postawionych celów pomiarowych. Opisuje udział własny w wytworzeniu włókien światłowodowych. Projektuje stanowiska i wykonuje kalibrację wykorzystywanych w dalszych badaniach czujników. Następnie opracowuje i realizuje program badań prowadzący do wykazania efektywności procedur pomiarowych, w wybranych technologiach wytwarzania i formowania kompozytów, za pomocą, w znacznym stopniu, samodzielnie wykonanych, pomiarowych światłowodowych siatek Bragga wpisanych w wysoce dwójłomne światłowody. Praca jest napisana zrozumiałym językiem, z wykorzystaniem poprawnie dobranych pojęć. Wnioski zawierają odniesienia do tezy pracy, które, na podstawie przeprowadzonych badań, potwierdzają zawarte w niej oczekiwania, związane z możliwością efektywnego wykorzystania badanych czujników do kontroli, na przykładzie wybranych, podstawowych procesów kształtowania materiałów kompozytowych. systemów światłowodowych RTM i ATL. Ponadto obejmują wiele szczegółowych spostrzeżeń

i zaleceń zmierzających do wskazania warunków, których spełnienie umożliwi osiągnięcie najkorzystniejszych wyników w zakresie pomiarowym i diagnostycznym w badanych układach. Należy zatem ocenić, zarówno układ dysertacji, jej strukturę logiczną, metody badawcze, a przede wszystkim uzyskane wyniki, jako wartościowe i oryginalne. Spis cytowanej literatury świadczy o znajomości dziedziny, w której osadzona jest tematyka pracy i aktualnego stanu wiedzy. Poprawność językowa i staranność edytorska, w tym zamieszczonych w pracy wykresów i ilustracji, pozwalają łącznie na stwierdzenie spełnienia w najwyższym stopniu standardów poprawności prac naukowo-badawczych.

4. Uwagi do pracy

Praca obejmuje opis przyjętej metodologii, szeroki przegląd stosowanych narzędzi i układów pomiarowych służących do wykonania postawionych zadań związanych z celem badawczym. Zakres badawczy dotyczy oceny możliwości poprawnego monitoringu procesów technologicznych RTM i ATL formowania kompozytów polimerowych. Należy, za Autorem, podkreślić, że badane sposoby i przedmiot badań mogą być alternatywą dla innych, znanych i stosowanych nieniszczących metod diagnostyki i monitoringu materiałów, takich jak rentgenowskiej, ultradźwiękowej, termowizyjnej. To co wyróżnia przedmiotową metodę i jej kluczowe narzędzia, to, oprócz nieinwazyjności, możliwość wykorzystania w warunkach procesu wytwarzania, co szczególnie w przypadku technologii formowania kompozytów polimerowych jest dużą zaletą. Krytycznie można by podejść do wielu nierozwiązanych w pracy kwestii, jednak wynika to głównie z obecnego powszechnego stanu wiedzy z zakresu problematyki pracy. Sam Autor zresztą w ostatnim rozdziale pracy wylicza wiele spośród wymagających dalszych badań kwestii, co dowodzi świadomości ograniczeń, w tym również nakreślonych programem pracy. Brak w pracy przeglądu aktualnych ofert światowego rynku producentów światłowodowych układów pomiarowych, w tym opartych na siatkach Bragga. Niejednokrotnie zawarte w udostępnionych przez producenta specyfikacjach ofertowych dane zaawansowanych technicznie produktów, do których niewątpliwie należą światłowodowe systemy pomiarowe, dostarczają, pomimo ochrony przed konkurencją, wielu aktualnych danych użytkowych, zakresu stosowalności, warunków pracy czy charakterystyk dokładności. W pracach naukowych na ogół brak odniesienia do takich źródeł, choć mogą one dostarczyć oceny innowacyjności rozwiązań. Uwagi te w żadnym stopniu nie pomniejszają wartości pracy, uzyskanych wyników oraz sformułowanych na ich podstawie wniosków.

Ambitnie wyznaczony, szeroki zakres pracy, siłą rzeczy, wykracza znacznie poza skalę i możliwości pracy doktorskiej. Dlatego osiągnięte wyniki i sformułowane wnioski zasługują na najwyższą ocenę.

4. Podsumowanie

Podsumowując analizę treści rozprawy, mając na uwadze poprawność postawionej tezy, wyboru metod badawczych oraz przeprowadzonych eksperymentów prowadzących do jej udowodnienia, wartości naukowej prowadzonych rozważań oraz uzyskanych wyników, rzeczowych wniosków, stwierdzam, że wytyczony cel pracy został osiągnięty, a uzyskane wyniki badań potwierdziły słuszność tezy.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę dotychczasowe osiągnięcia naukowe Pana mgra inż. Karola Wachtarczyka a w szczególności:

- wyróżniającą ocenę osiągnięcia naukowego, jakim jest opracowana dysertacja pt. „*Monitorowanie polimerów wzmacnianych włóknami, za pomocą światłowodowych siatek Bragga wpisanych w wysoce dwójłomne światłowody*”;
- Poziom naukowy sformułowanego celu pracy;
- Celowość aplikacyjną podjętych zadań;
- Wysoki poziom postawionej tezy;
- znajomość stanu wiedzy z dziedziny pracy, udokumentowaną 186 pozycjami cytowanej literatury, z okresu ostatnich lat;
- poprawność metodologiczną planu i realizacji prowadzonych badań;
- świadomość poziomu osiągniętych wyników i dalszych perspektyw pracy w podjętym temacie;
- umiejętność posługiwania się aparaturą badawczą;
- poprawność językową i edytorską pracy

stwierdzam, że, Pan mgr inż. mgra inż. Karol Wachtarczyk spełnia w stopniu bardzo dobrym wymagania stawiane kandydatom do uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna, zgodnie z art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2022, poz. 574 z póź. zm.)

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Karola Wachtarczyka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



prof. dr hab. inż. Gabriel Wróbel