

Prof. dr hab. inż. Małgorzata Kujawińska  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechatroniki  
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki  
e-mail: [malgorzata.kujawinska@pw.edu.pl](mailto:malgorzata.kujawinska@pw.edu.pl)  
tel.: 602 240 310

Warszawa, 20.06.2023r

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgra inż. Karola Wachtarczyka pt. „Monitoring of fiber reinforced polymers using fiber Bragg gratings inscribed in highly-birefringent optical fibers”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Karola Wachtarczyka „Monitoring of fiber reinforced polymers using fiber Bragg gratings inscribed in highly-birefringent optical fibers”. Promotorem Doktoranta jest prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta z Politechniki Wrocławskiej, a drugim Promotorem prof. dr inż. Ralf Schledjewski z Montanuniversitat Leoben. Recenzja została opracowana na prośbę Przewodniczącego RDN Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego (pismo W10/RDND07/12/2023 z dnia 31.03.2023 r.).

Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami, ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r (Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), rolą recenzenta jest stwierdzenie czy osoba ubiegająca się o stopień naukowy doktora posiada wymagany dorobek naukowy (wymóg Art. 186), oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie jak i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (wymóg Art. 187 ust. 1), a przede wszystkim czy przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (wymóg Art. 187 ust. 2).

Po przestudiowaniu rozprawy nie mam żadnych wątpliwości co do poniższych faktów:

1. Tematyka rozprawy w pełni odpowiada obszarowi dyscypliny inżynieria mechaniczna w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych .
2. Rozprawa ma charakter technologiczno-eksperymentalny, co znajduje odzwierciedlenie w tezie i naukowym celu rozprawy. Teza (przedstawiona w podrozdziale 1.4) jest jasno sformułowana i możliwa do weryfikacji na bazie przedłożonej rozprawy.
3. Wsparcie rozprawy trzema (cytowanymi w pracy) współautorskimi artykułami (w dwóch mgr inż. Wachtarczyk jest pierwszym autorem) opublikowanymi w czasopismach znajdującymi się w bazie JCR (*Polym. Composites, Appl. Science, Materialsx2*) stanowi podstawę do stwierdzenia spełnienia ustawowego wymogu dot. dorobku naukowego, jak i przesłankę do stwierdzenia rozwiązania oryginalnego problemu naukowego.

Recenzowana praca doktorska dotyczy zbadania możliwości efektywnego wykorzystania czujników bazujących na siatkach Bragga (FBG) zapisanych w światłowodach o wysokiej dwójłomności (HB) do pomiaru odkształceń na etapie wytwarzania i eksploatacji kompozytów

i konstrukcji kompozytowych wzmocnianych włóknami ciągłymi. Wybór tematu pracy jest ważny z naukowego, ale przede wszystkim z aplikacyjnego i ekonomicznego punktu widzenia, gdyż coraz szersze wykorzystanie materiałów kompozytowych w odpowiedzialnych konstrukcjach wymaga opracowania i implementacji systemów dedykowanego monitorowania strukturalnego zarówno na etapie wytwarzania kompozytów jak i ich późniejszej eksploatacji. Na specjalną uwagę zasługuje fakt, że w pracy Doktorantowi udało się zaimplementować w efektywny i efektowny sposób osiągnięcia naukowe dwóch znanych polskich grup naukowych zajmujących się technologią światłowodowa i elementami światłowodowymi: grupy dr hab. P. Mergo (Uniwersytet Marii Skłodowskiej – Curie; wytwarzanie włókna HB) oraz grupy dr hab. T. Osucha (Politechnika Warszawska; zapisywanie FBG w światłowodzie). Przy realizacji pracy również ogromne znaczenie miała współpraca Doktoranta z Chair of Processing of Composites, Montanuniversität Leoben, gdzie wytworzone zostały badane elementy kompozytowe.

Układ pracy jest dość typowy dla prac technologiczno-eksperymentalnych. W rozdziale 1 doktorant umotywiował podjęcie w/w tematu pracy i zidentyfikował podstawowe wyzwania występujące w tym obszarze. Następnie przedstawił obszerne studium literaturowe opisujące stan wiedzy dotyczący czujników światłowodowych stosowanych w SHM (ang. *structural health monitoring*), technik ich integracji z kompozytami oraz metod monitorowania kompozytów wzmocnionych włóknami. Studium literaturowe, obejmujące 139 pozycji, było podstawą do sformułowania w podrozdziale 1.4 celu i hipotezy naukowej rozprawy. W przyjętej tezie Doktorant stwierdza, że „ zaproponowana generacja czujników HB FBG umożliwi monitorowanie procesów wytwarzania kompozytów z matrycą duroplastyczną i termoplastyczną oraz pozwoli na pomiar złożonego stanu odkształceń, w tym wewnątrz struktury kompozytu, zarówno w warunkach obciążenia quasi-statycznego jak również zmiennego w czasie.” Równocześnie wybrane zostały dwie współczesne metody wytwarzania wyżej wzmiankowanych typów kompozytów: technologia RTM (ang. *resin transfer molding*) do kompozytów o osnowie duroplastycznej oraz technologia ATL (ang.: *automated tape layup*) do kompozytów z matrycą termoplastyczną.

Aby udowodnić postawioną tezę Doktorant przeprowadził obszerne prace przygotowawcze i badania własne, które zostały opisane w trzech następnych rozdziałach rozprawy. Rozdział 2 dotyczy opisu wytworzenia 2 wersji światłowodu HB typu „side-hole” (SH) i bazujących na nich czujników z siatkami Bragga (zrealizowane głównie siłami UMSC i PW), a następnie opracowania przez Doktoranta układu pomiarowego oraz kalibracji i badań tych czujników. Badania wykazały przydatność zbudowanego układu pomiarowego z czujnikiem HB FBG do pomiaru odkształceń przy wzdłużnym i poprzecznym obciążaniu czujnika, a także zwiększoną czułość na odkształcenia poprzeczne w porównaniu z czujnikami FBG w komercyjnych włóknach HB.

W następnych dwóch rozdziałach Doktorant skoncentrował się na zbadaniu możliwości wykorzystania czujników HB FBG w dwóch wybranych współczesnych technologiach polimerowych: RTM i ALT. W rozdziale 3 czujniki HB FBG zostały w pierwszym etapie wykorzystane do monitorowania kinetyki procesu wytwarzania kompozytów w osnowie duroplastycznej techniką RTM. Wymagało to najpierw zbadania wpływu ściskania występującego w formie stalowej do RMT na czujnik zagrzebany (w różnych konfiguracjach kątowych) we włóknie wzmocniającym, a następnie zbadania kinetyki procesu utwardzania kompozytu w czasie procesu RTM poprzez identyfikację punktu żelowania i wyznaczenia złożonego stanu odkształceń powstałego w następstwie procesu utwardzania żywicy. Badania

te wymagały uważnego zaprojektowania eksperymentu, analizy i interpretacji wyników, na podstawie znajomości zjawisk zachodzących w samym światłowodzie, interakcji między czujnikiem i wytwarzanym materiałem kompozytowym oraz monitorowania parametrów procesu RTM. Badania te przeprowadzone były z wykorzystaniem opracowanych czujników HB FBG, a także porównane z wynikami uzyskanymi z komercyjnych czujników FBG. W następnym kroku, płyty kompozytowe (z czujnikami FBG) wytworzone metodą RMT badane były metodą zginania czteropunktowego. Doświadczenia, zrealizowane zgodnie z protokołem pomiarowym opracowanym w ramach rozprawy, wykazały, że czujniki HB FBG mogą być wykorzystane do pomiaru złożonego stanu odkształceń w płaskim elemencie wytworzonym metodą RTM.

Rozdział 4 dotyczy zastosowania czujników HB FBG do monitorowania kompozytu na osnowie termoplastycznej w trakcie nakładania kolejnych warstw kompozytu w procesie wytwarzania metodą ATL. Ze względu na inny charakter procesu (w porównaniu z RTM), zadanie to wymagało najpierw sprawdzenia czy parametry procesu (temperatura, nacisk rolki) nie degradują własności czujnikowych siatek Bragga i jak wpływają one na modyfikację sygnału pomiarowego. Następnie Doktorant zmierzył stan naprężeń resztkowych w płaszczyźnie płyty kompozytowej w trakcie nakładania warstw i po zakończeniu procesu. Przeprowadził również pomiar odkształceń w wytworzonej płycie w warunkach obciążeń quasi-statycznych i cyklicznych w celu zbadania zmian sztywności materiału oraz pomiaru pętli histerezy mechanicznej. W ostatnim rozdziale Doktorant sformułował końcowe wnioski podsumowujące osiągnięcia zaraportowane rozdziałach 2-4 oraz kierunki dalszych prac związanych z budową i optymalizacją wykorzystania czujników HB FBG w zastosowaniach do badań materiałów kompozytowych.

Podsumowując tę część recenzji, stwierdzam, że **teza, postawiona na początku pracy, została w pełni udowodniona** poprzez prace i badania zaprezentowane w rozdziałach 2-4. Wśród wielu oryginalnych wyników chciałabym wyróżnić następujące elementy:

1. **Zastosowanie do czujników światłowodowych z FBG włókna o hybrydowej strukturze łączącej duże otwory boczne z rdzeniem eliptycznym.** Skutkuje to wysoką dwójłomnością ( $1 \times 10^{-3}$ ) i wynikającą z niej dużą wstępną separacją widmową peaków Bragga (1.16nm), jak również dużą czułością na siłę poprzeczną do 650 pm/(N/mm), a nawet -1150 pm/(N/mm) w zależności od orientacji włókna względem kierunku przyłożenia siły. Dodatkowo wysoka  $\sim 22$  %m/m koncentracja GeO<sub>2</sub> w rdzeniu włókna ułatwia zapis siatek Bragga z wykorzystaniem promieniowania UV bez uczulania wodorem (uzyskanie większej stabilności termicznej czujników). Opublikowane w art. Wachtarczyk K. i in., *Materials*, 15, 77 (2021)] – 4 cytowania.
2. **Innowacyjność w zakresie opracowania metodyk i układów pomiarowych** stosowanych na kolejnych etapach pracy. Dotyczy to przede wszystkim **układu do wyznaczania czułości czujników HB FBG**, układu/modyfikacji stanowiska do **monitorowania procesu wytwarzania płyty kompozytowej z czujnikami HB FBG metodą RTM** oraz **układów i protokołów pomiarowych do wieloosiowych pomiarów odkształceń** elementów kompozytowych z czujnikami wytworzonych metodą RTM i do **prób w warunkach quasi-statycznych i cyklicznych obciążeń** elementów wytworzonych metoda ATL.
3. **Wykazanie zalet i stosowności wykorzystania HB FBG do badania kinetyki w procesie wytwarzania kompozytów metodą RTM**, a w szczególności do wyznaczania punktu

żelowania i monitorowania odkształceń wynikających z procesu utwardzania żywicy i odkształceń reszkowych generowanych w procesie produkcyjnym. Wykazano, że pomiar odkształceń poprzecznych z wykorzystaniem czujników HB FBG jest prawie niezależny od temperatury co daje **znaczną przewagę tych czujników** w porównaniu do czujników FBG w światłowodzie jednomodowym. Wyniki opublikowano w artykule Wachtarczyk i in., *Materials*, 15, 6497 (2022) – 4 cytowania. Jest to jeden z niewielu (o ile nie jedyny) do tej pory artykuł, w którym przedstawiono wykorzystanie czujników HB FBG do monitorowania procesu w technikach formowania zamkniętego (tu: RTM).

4. Wykazanie, iż czułość czujników HB FBG zintegrowanych z płytą kompozytową (metoda RTM) na odkształcenia pozapłaszczyznowe i w płaszczyźnie badanej płyty zależy od ich konfiguracji (szybka i wolna oś czujnika) oraz do kierunku przyłożonej siły. Dlatego **właściwa konfiguracja 2 czujników + opracowany protokół pomiarowy wystarczy do pełnego wyznaczenia stanu odkształceń w płycie poddanej czteropunktowemu zginaniu.**
5. **Wykazanie możliwości integracji czujników HB FBG z wytwarzanym elementem kompozytowym metodą ATL** tzn. braku negatywnego efektu temperatury i nacisku rolek w procesie produkcyjnym na sygnał uzyskiwany z czujnika. Pokazanie, że tak **wbudowane czujniki HB FBG umożliwiają między-procesowe pomiary odkształceń reszkowych kumulujących się w procesie dodawania kolejnych warstw kompozytu.** Zaprezentowane wyniki monitorowania odkształceń reszkowych dla różnych parametrów procesu produkcyjnego mają duże znaczenie dla pełnego zrozumienia zjawisk zachodzących w czasie formowania elementu kompozytowego metodą ATL, identyfikacji kluczowych parametrów odpowiedzialnych za odkształcenia reszkowe oraz optymalizacji parametrów technologicznych metody ATL. Prace te opisano w artykule Yadav N., Wachtarczyk K. i in., *Polymer Compos.*, 43(3) 1590 (2022)– 4 cytowania.
6. Wykazanie **przydatności czujników HB FBG do wyznaczenia złożonego stanu odkształceń w płaskich elementach kompozytowych wytworzonych metodą ATL**, a w szczególności do pomiaru zmiany sztywności (pomiary quasi-statyczne) oraz pętli histerezy mechanicznej (pomiary przy obciążeniu cyklicznym) elementów kompozytowych.

Przedstawione osiągnięcia dot. zastosowania czujników HB FBG w badaniach kompozytów wytworzonych metodami RTM i ATL są oryginalne na skalę światową. Brak lub niewiele opublikowanych prac wykorzystujących z powodzeniem czujniki HB FBG w tych zastosowaniach.

Odnosząc się do strony redakcyjnej rozprawy stwierdzam, że jest ona na wysokim poziomie edytorskim. Zastosowany język jest precyzyjny, logiczny i zwięzły, staranne ilustracje dobrze wspomagają tekst, a szczegółowe podsumowania po każdym z głównych omawianych tematów bardzo dobrze porządkują materiał. Nieliczne uwagi edycyjne przekazałam bezpośrednio Doktorantowi.

Jednocześnie studiowanie rozprawy nasuwa recenzentowi zbiór niżej zamieszczonych pytań dwojakiej natury. Pierwsze z nich to pytania/uwagi merytoryczne, które zdaniem recenzenta stanowią zauważone niedociągnięcia w pracy, drugie zaś, to uwagi typu dyskusyjnego. Odpowiedzi na pytania w drugiej kategorii powinny być źródłem konstruktywnej dyskusji z Doktorantem w trakcie obrony publicznej. Jednocześnie ze względu

na dążenie do ograniczenia objętości recenzji, uwagi nie są poprzedzone wprowadzeniem i w konsekwencji mogą być zrozumiałe jedynie w kontekście pracy.

Uwagi merytoryczne:

1. W rozdziale 2 informacja dotycząca zaprojektowania (wyboru parametrów docelowych) światłowodów wytworzonych w laboratorium UMCS i ostatecznie będących podstawą rozprawy ograniczona jest to podania 3 referencji ([143-145], datowanych odpowiednio na lata 2013, 2016 i 1999. Autorami artykułów [143 i 145] są członkowie grupy prof. W. Urbańczyka z Politechniki Wrocławskiej [143 i 144]. W pracy brakuje pełnego uzasadnienia wyboru parametrów włókna i dyskusji czy uaktualnienie parametrów mogłoby wpłynąć (polepszyć) na późniejsze wyniki uzyskane w pracy oraz czy jest obecnie możliwość uzyskania lepszych parametrów z punktu widzenia wytwarzania włókna (ograniczenia technologiczne)? Jeżeli opracowano model numeryczny włókna uzyskującego teoretycznie najlepsze parametry, to na ile różni się ten model od parametrów zmierzonych dla wytworzonych światłowodów SH1 i SH2.
2. Dlaczego obecnie HB FBG używane są w postaci „gołych włókien” bez pokrycia?
3. Czy eksperymenty przeprowadzone w pracy bazowały na pomiarach pojedynczych próbek i procesów czy też były przeprowadzane dla większej liczby próbek. Czy pomiary dla jednej próbki przeprowadzono jedno- czy wielokrotnie? Czy Doktorant próbował oszacować niepewność pomiaru w przeprowadzonych eksperymentach?
4. Jaka jest szacowana dokładność ustawienia kąтового włókna w płytach kompozytowych wytworzonych metodami RTM i ATL. Jak ta dokładność ustawienia może wpłynąć na dokładność pomiarów stanu odkształceń przy zginaniu czteropunktowym?

Uwagi dyskusyjne:

1. Czy w procesach RTM i/lub ATL stosuje się scenariusz nakładania warstw różny od prostopadłego ustawienia ( $0_n/90_m$ )? Jeżeli tak, to jaka konfiguracja czujników HB FBG była by wymagana w obu przypadkach, aby uzyskać podobne informacje o procesach i stanie odkształceń w wytworzonych elementach konstrukcyjnych?
2. Jakie, wg. Doktoranta, inne metody wytwarzania materiałów kompozytowych oczekują w pierwszym rzędzie na zaimplementowanie czujników światłowodowych i czy w tych metodach parametry HB FBG zaoferują również lepsze możliwości pomiarowe aniżeli FBG w SMF?

Powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne nie podważają wartości pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie. Rozprawa stanowi udokumentowanie posiadania przez Doktoranta wiedzy interdyscyplinarnej łączącej zagadnienia z zakresu mechaniki eksperymentalnej, inżynierii materiałowej, technologii materiałów kompozytowych, a także sensoryki światłowodowej. Waga i poprawność uzyskanych wyników potwierdzone zostały ich opublikowaniem w 3 artykułach w czasopiśmie z listy JCR oraz ich cytowaniami. Tym samym stwierdzam, że Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami pretendującymi go do uzyskania stopnia doktorskiego.

W podsumowaniu stwierdzam, iż przedłożona rozprawa doktorska spełnia wymogi zawarte w Art. 186 i 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), dotyczące wymaganego dorobku naukowego, zaprezentowania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz rozwiązania oryginalnego problemu naukowego. W tym ostatnim zakresie, najistotniejszym z punktu widzenia obecnie obowiązujących przepisów, stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr inż. Karola Wachtraczyka p.t. „Monitoring of fiber reinforced polymers using fiber Bragg gratings inscribed in highly-birefringent optical fibers” reprezentuje znaczące osiągnięcie naukowe i spełnia z nadmiarem wymagania ustawy. Stawiam więc wniosek o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'K. Wachtraczyk', is positioned on the right side of the page.