



Lublin, dn. 7 czerwca 2016 r.

dr hab. inż. Piotr Kisała, prof. PL
Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Szelağa pt.: „Czujniki światłowodowe z siatką Bragga do pomiaru odkształceń i temperatury w materiałach kompozytowych”

Niniejsza recenzja została przygotowana na prośbę Dziekana Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej wyrażoną w piśmie z dnia 28.04.2016 r.

1. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Szelağa poświęcona jest badaniom układów detekcji odkształceń i temperatury opartych na przetwornikach w postaci światłowodowych siatek Bragga, umieszczonych w materiałach kompozytowych. Tytuł przedmiotowej rozprawy doktorskiej „Czujniki światłowodowe z siatką Bragga do pomiaru odkształceń i temperatury w materiałach kompozytowych“ jest zgodny z jej zawartością i poruszaną w niej tematyką naukową. Za cel pracy *implicite* Autor postawił wykazanie możliwości zastosowania siatek Bragga o liniowo opadającym zboczu widmowej charakterystyki transmisyjnej do pomiaru temperatury i odkształcenia w strukturach kompozytowych. Cel ten został osiągnięty poprzez wykonanie obliczeń numerycznych, wykazujących wpływ temperatury i odkształcenia na charakterystyki widmowe siatek Bragga, budowę modelu numerycznego struktury kompozytowej z wbudowanymi czujnikami światłowodowymi, zestawienie autorskiego stanowiska laboratoryjnego do badania struktur kompozytowych z siatką Bragga oraz wyznaczenie wbranych parametrów metrologicznych zaproponowanego układu czujnika.



Autor formułuje i dowodzi w pracy tezy *explicite* o następujących treściach: cyt.: „Siatki Bragga z liniowo opadającym zboczem charakterystyki transmisyjnej można z powodzeniem wykorzystać do pomiaru temperatury i odkształcenia w strukturach kompozytowych” oraz „Czułość siatek Bragga o stałym okresie na odkształcenie i temperaturę nie jest parametrem stałym i ściśle zależy od rozkładu danej wielkości fizycznej na odcinku, na którym zapisana jest siatka”. Zdanie drugie tezy brzmi bardziej jak wniosek z otrzymanych wyników pomiarów eksperymentalnych, niemniej jednak recenzent stwierdza, że obydwie tezy w podanym przez Doktoranta brzmieniu zostały udowodnione.

W rozdziale pierwszym Autor w sposób przejrzysty i logiczny definiuje podstawowe parametry metrologiczne przetwornika pomiarowego w postaci siatki Bragga, zarówno o stałym jak i zmiennym okresie. Doktorant omawia sposoby kompensacji wpływu temperatury na pomiary innych wielkości fizycznych. Poza analizą zawartą w niniejszym rozdziale, opis metody kompensacji temperatury Autor zamieścił dodatkowo w Załączniku 1 do niniejszej rozprawy. Szkoda, że techniki jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury za pomocą światłowodowych siatek Bragga nie zostały omówione szerzej. Autor zamieszcza jedynie nazwy poszczególnych metod i podaje ich podstawowe parametry metrologiczne.

Rozdział drugi pracy obejmuje obliczenia numeryczne wpływu temperatury i odkształcenia na jednorodne siatki Bragga. Ciężar naukowy niniejszego rozdziału został położony na udowodnienie tezy, że czułość na temperaturę i odkształcenie jednorodnych siatek Bragga nie jest parametrem stałym i ściśle zależy od rozkładu danej wielkości fizycznej na odcinku, na którym zapisana jest siatka. Ważnym elementem aplikacyjnym jest ilościowe i jakościowe określenie tego wpływu dla takich rozkładów tych wielkości fizycznych, które w praktyce mogą wystąpić w strukturze kompozytowej. Niestety, o ile wykazanie wpływu niejednorodnego odkształcenia na czułość czujnika jest uzasadnione, o tyle wykazanie zmiany czułości siatki (2 – 4%) w sytuacji gdy różnica temperatur wynosi 75°C nie jest uzasadnione praktycznie. Tak duży gradient



temperatury na długości siatki (rzędu 1-3 cm) nie jest często spotykany, nie jest również łatwy do wywołania.

W rozdziale trzecim Autor opisał wytwarzanie struktur kompozytowych, w szczególności wykorzystaną przez Niego technologię utwardzania niskociśnieniowego. Kluczowym elementem tej części pracy jest opis autorskiego stanowiska do pomiaru temperatury i odkształcenia. Doktorant wykorzystywał również stanowisko przygotowane wcześniej przez zespół realizujący projekt dotyczący fonicznych materiałów kompozytowych do monitorowania struktur lotniczych. Wyniki przeprowadzonych badań badawczych stanowią niewątpliwie cenny wkład Autora i posiadają znaczenie użytkowe. Doktorant scharakteryzował badane czujniki w warstwie ściskanej i rozciąganej struktury kompozytowej. Dokonał analizy rozkładu odkształcenia dla różnych wartości ugięcia kompozytu, przy różnych punktach przyłożenia siły do całej struktury. Szkoda, że dla celów porównawczych nie przedstawiono w tej części pracy wyników prób ściskania i rozciągania siatek Bragga w wolnej przestrzeni. Niniejsza część pracy zawiera również wyniki analizy badanej struktury metodą elementów skończonych. Autor przedstawił podział układu na elementy skończone 8-węzłowe typu SHELL281, zaprojektował próby rozciągania kompozytu i wyznaczył wyężenie materiału. Wykazał również wpływ uzyskanych wyników naprężeń zredukowanych struktury na charakterystyki spektralne teoretycznej siatki, umieszczonej w kompozycie. Warto byłoby tutaj zauważyć, że na wyznaczone numerycznie naprężenia zredukowane mają również wpływ błędy metody elementów skończonych (podział „ciągłej” przestrzeni na elementy skończone).

Czwarty i piąty rozdział pracy zawierają analizę numeryczną zachowania widm siatek Bragga umieszczonych w kompozycie, przy czym rozdział czwarty dotyczy przypadku gdy siatka posiada stały period, zaś rozdział piąty zawiera wyniki dla siatki Bragga o zmiennym okresie, w przypadku której zboczne charakterystyki transmisyjnej opada liniowo. Ważnym elementem tej części pracy doktorskiej są wnioski wynikające z porównania wyników obliczeń numerycznych z wynikami przeprowadzonych przez



Doktoranta eksperymentów. Autor wykazał zmienność czułości na odkształcenie w zależności od miejsca umieszczenia siatki w materiale kompozytowym, a także w zależności od punktu przyłożenia oraz wartości siły odkształcającej strukturę. Wyniki dotyczące zmian pozycji i dynamiki charakterystyk widmowych czujnika Autor zamieścił w załącznikach 3-5 do niniejszej pracy, dokonując podziału tematyki pomiędzy poszczególne załączniki na analizę numeryczną, eksperymentalną oraz wnioski zbiorcze. Rozdział piąty zawiera szereg wyników o charakterze użytkowym. Autor przeanalizował proces ogrzewania struktury kompozytowej i wykazał w jakim stopniu na czujnik z obadającym zбочem charakterystyki transmisyjnej wpływa zjawisko rozszerzalności termicznej materiału kompozytowego oraz zjawisko ogrzewania światłowodu, na którym naniesiona jest siatka Bragga. Pozwala to przewidzieć jak zmniejszenie skurczu polimeryzacyjnego powstające po utwardzeniu struktury wpłynie na parametry tego typu czujników, integrowanych w układach kompozytowych stosowanych w zmiennych warunkach środowiskowych.

Uważam, że rozdział 4 i 5 zawierają wyniki najciekawsze, nieoczywiste w wielu przypadkach i posiadające ważny aspekt użytkowy.

2. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Pomiary odkształceń i temperatury w materiałach kompozytowych pozwalają na zwiększenie niezawodności konstrukcji, bezpieczeństwa przy ich użytkowaniu oraz wydłużają okres ich eksploatacji. Zmniejszają również czas ich wyłączenia z ruchu, które w konsekwencji prowadzi do podwyższenia kosztów użytkowania czy wręcz powstawania strat finansowych. Niewątpliwie istotnym problemem jest opracowanie metod kontroli stopnia degradacji i zużycia konstrukcji oraz wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji. Z tego punktu widzenia prowadzone przez Doktoranta i opisane w pracy doktorskiej badania są aktualne. Dotyczy to przede wszystkim rozwiązywanego problemu badawczego polegającego na opanowaniu procesu umieszczania czujnika w materiale kompozytowym i wykazania możliwości zastosowania czujników z siatkami Bragga do pomiaru zarówno temperatury jak



i odkształcenia w strukturze kompozytowej. Oryginalność rozprawy wyznaczają przeprowadzone przez Autora obliczenia numeryczne, wykazujące wpływ charakterystyki zastosowanej siatki Bragga na parametry metrologiczne zastosowanej metody pomiarowej oraz wpływ szeregu warunków pracy kompozytu na wyniki uzyskanych pomiarów. Obliczenia te były poddane weryfikacji na autorskim stanowisku badawczym, a uzyskane przez Doktoranta wyniki badań wykazały w jakim zakresie zmian sił działających na kompozyt i w jakich warunkach temperaturowych zaproponowana metoda pomiarowa może być zastosowana.

Z tego punktu widzenia badania i symulacje numeryczne, których wyniki przedstawiono w rozprawie doktorskiej są niezwykle ważne i mają znaczenie aplikacyjne.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Wyznaczenie czułości siatki Bragga na mierzone wielkości fizyczne w zależności od właściwości materiałowych kompozytu.
2. Opanowanie procesu integracji czujnika światłowodowego z materiałem kompozytowym.
3. Wykazanie, że czułość temperaturowa i odkształceniowa siatek Bragga o stałym okresie nie jest parametrem stałym. Zależy ona od rozkładu danej wielkości fizycznej na odcinku, na którym zapisana jest siatka.
4. Numeryczne wyznaczenie czułości siatki na jednorodne i niejednorodne (rozumiane jako zmiana wartości na długości) odkształcenie.
5. Udowodnienie, że wskutek wpływu nierównomiernego odkształcenia uzyskuje się różne średnie czułości siatki Bragga, z kolei charakter zmian tych czułości jest inny przy rozciąganiu a inny w przypadku ściskania. Jest to istotne przy projektowaniu systemów sensorycznych w materiałach kompozytowym.
6. Wykazanie wpływu wygrzewania kompozytu na zmniejszenie defektów i uzyskanie pożądanej charakterystyki wbudowanej siatki Bragga. Doktorant wykazuje, iż pomimo, że w skali makroskopowej kompozyt posiada odpowiednie właściwości



wytrzymałościowe, to z punktu widzenia charakterystyk czujnika, struktura może być wykonana niepoprawnie (np. źle wykonany proces utwardzania struktury).

7. Opanowanie technologii utwardzania niskociśnieniowego przy wytwarzaniu struktur kompozytowych z czujnikami światłowodowymi, w szczególności: wykonanie autorskiego stanowiska do próżniowego formowania struktury kompozytowej.
8. Wykazanie, że odpowiednio dobrane pokrycie lakierowe może minimalizować niepożądany wpływ skurczu polimeryzacyjnego przy zachowaniu czułości na badany czynnik zewnętrzny (np. przekroczenie pewnej wartości grubości warstwy zmniejsza czułość na mierzone wielkości fizyczne, z kolei zbyt mała jej wartość prowadzi do pęknięcia światłowodu wewnątrz struktury).
9. Opanowanie procesu zabezpieczania włókien optycznych w strukturze kompozytowej przed ich przypadkowym uszkodzeniem (np. zastosowanie taśmy poliuretanowej i papieru jako zabezpieczenia, wbudowanie złączy światłowodowych w strukturę itp.).
10. Budowa stanowiska pozwalającego na pomiar wpływu temperatury na parametry siatek Bragga w wolnej przestrzeni i strukturze kompozytowej (możliwość pracy w zakresie pomiarowym od 22^oC do 83^oC).
11. Wykonanie analizy rozkładu odkształcenia dla zmiennych wartości ugięcia i różnych punktów przyłożenia siły do struktury.
12. Sporządzenie map odkształcenia i naprężeń zredukowanych dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych.
13. Przeanalizowanie i wykazanie wpływu i przyczyn zmiany (zmniejszenia) czułości siatki Bragga na temperaturę umieszczonej w kompozycie (działanie dwóch przeciwstawnych efektów: zmniejszenie skurczu polimeryzacyjnego i ogrzewanie włókna optycznego, na którym zapisana jest siatka).
14. Ocena wpływu procesu laminacji na charakterystyki spektralne siatek Bragga w oparciu o wybrane wskaźniki jakościowe (np. czułość, długość fali Bragga).



15. Wykazanie wpływu zastosowania siatek Bragga z liniowo opadającym zboczem charakterystyki transmisyjnej, umieszczonej w kompozycie, na współczynniki czułości układu pomiarowego oraz zmianę zakresu spektralnego.
16. Wykazanie możliwości uproszczenia systemu pomiarowego poprzez zastosowanie czujników z siatką Bragga o liniowo opadającym zboczu charakterystyki transmisyjnej (np. możliwość jednoznacznego określenia kierunku przemieszczania materiału: ściskanie, rozciąganie, możliwość zastosowania prostego układu detekcji: miernik mocy optycznej).

Reasumując, Autor udowadnia możliwość zastosowania czujników z siatkami Bragga w materiałach kompozytowych i wykazuje wpływ parametrów charakterystyki widmowej siatek na właściwości czujnika. Wykonane badania i przeprowadzone symulacje numeryczne stanowią niewątpliwie cenny wkład Autora oraz oryginalny element Jego pracy. **W pracy poruszono zagadnienia nowe i istotne z punktu widzenia ich potencjalnych zastosowań w systemach pomiarowych i monitorujących stan konstrukcji złożonych z materiałów kompozytowych.**

3. Uwagi krytyczne, pytania

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Szeląga recenzent zgłasza następujące krytyczne uwagi szczegółowe.

- s. 11: w wykazie oznaczeń i w tekście pracy Autor niefortunnie używa tych samych liter d i D do oznaczenia szerokości i długości płytki kompozytowej, jest to mylące szczególnie przy analizie modelu belki zginanej,
- s. 12: w wykazie oznaczeń Autor nazywa $n(z)$ profilem współczynnika załamania światła dla siatki Bragga, tymczasem wielkość ta opisuje modulację współczynnika załamania światła na długości siatki,
- s. 13: uważam określenie kompozytu, w którym umieszczono czujniki światłowodowe jako struktury inteligentnej za stwierdzenie przesadzone,



- s. 13: akapit 2: co to jest „przetwarzanie sygnału zewnętrzne i wewnętrzne”?, chodziło zapewne o rodzaje czujników światłowodowych i ich podział na zewnętrzne i wewnętrzne,
- s. 16: niezrozumiałe określenie: „spektralne światłowodowe siatki Bragga”,
- s. 23: Autor stosuje wymiennie różną wielkość liter dla oznaczenia tych samych wielkości, np. równanie (1.11) symbol L oznacza długość światłowodowej siatki Bragga, podczas gdy w równaniu (1.6) ta wielkość oznaczona jest symbolem l ,
- s. 25: graficzne oznaczenie obszarów o wysokim i niskim współczynniku załamania światła na rysunku 1.5 wprowadza w błąd, Autor zmienia jedynie wypełnienie obszarów o wysokim i niskim współczynniku załamania, uzyskując ten sam okres na długości siatki,
- s. 36: Autor nazywa funkcję $f(z)$, opisaną równaniem (2.11) jako sinusoidalny kształt siatki, trafniejsze byłoby sformułowanie: modulacja współczynnika załamania w siatce opisana jest funkcją sinusoidalną,
- s. 47: niedokończony opis rysunku 3.4,
- s. 54-55: niewidoczne wartości przemieszczeń węzłowych na rysunkach 3.14-3.18,
- brak komentarza do rysunków 3.14-3.18, na których wyraźnie widać zupełnie inny charakter odkształcenia płytki kompozytowej i przemieszczeń węzłowych przy zmiennych wartościach dla rozważanych przez Autora wartości ugięć,
- s. 61: co to jest I_y w równaniach (4.2)-(4.5)? Tej wielkości nie ma również w wykazie oznaczeń a jest ona ważna z punktu widzenia weryfikacji obliczeń metodą elementów skończonych wykonaną przez Autora.

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Szeląga recenzent zgłasza następujące pytania szczegółowe:

1. Jakie jest maksymalne dopuszczalne wydłużenie względne światłowodu jednomodowego z zapisaną siatką Bragga? Autor na stronie 14 pisze, że „czujniki z siatkami Bragga dają możliwość pomiaru odkształcenia powyżej $10000 \mu\epsilon/m$. Istotnie, takie wartości są możliwe do zmierzenia czujnikiem z siatką Bragga, ale w przypadku, gdy np. potraktujemy głowicę czujnika jako zespół rozciąganej próbki, montowanej na obiekcie mierzonym, do której przymocowany jest światłowód z siatką. Wtedy jednak próbka



- pełnić będzie rolę „transformatora wydłużenia” i to ona pozwoli na pomiar wydłużeń o wspomnianych wyżej wartościach.
2. Autor stwierdza, że możliwe jest zapisanie nawet do 100 siatek na jednym włóknie światłowodowym (s. 14). Proszę o wyjaśnienie skąd wynika taka ilość i co jest głównym ograniczeniem przy przesłuchiwanie (pomiarze sygnału) przy dużej ilości siatek Bragga zapisanych na jednym włóknie.
 3. Wytrzymałość światłowodów krzemionkowych jest zdecydowanie mniejsza niż graniczna wytrzymałość struktury kompozytowej, czy Doktorant zna (lub stosował) metody ograniczenia tego problemu?
 4. Autor analizuje zmienność odkształcenia na długości siatki Bragga. Do analizy wykorzystuje środowisko pozwalające na analizę metodą elementów skończonych i uzyskuje trójkątny rozkład odkształcenia na długości siatki (rys. 3.19). Dlaczego do analizy zachowania się widma siatki (wykonanej w OptiGrating) wykorzystuje kształt Gaussowski? Czy nie lepiej byłoby zdefiniować własny rozkład poprzez wprowadzenie odpowiedniej funkcji w OptiGrating, uzyskując dokładne odwzorowanie wymuszenia (o tym samym kształcie, amplitudzie i umiejscowieniu na długości) na siatce?
 5. Pytanie niniejsze jest raczej sugestią i wynika z poprzedniego. Ciekawe byłoby określenie wpływu niedokładności odwzorowania rozkładu odkształcenia na długości siatki na niedokładność wyznaczenia czułości siatki oraz na niedokładność wyznaczenia wartości odkształcenia przy wykorzystaniu zaproponowanego czujnika.
 6. Autor stosuje kryterium pokrywania się pól figur pod wykresami rozkładów odkształceń (rysunki 3.20-3.21) do określenia zgodności wykresów. Tymczasem charakterystyki nie rozpoczynają się od wartości zerowych odkształcenia na brzegach siatki, czy nie lepiej byłoby zatem użycie np. kryterium błędu średniokwadratowego do określenia stopnia zgodności charakterystyk?
 7. Autor porównuje zmiany długości fali Bragga pod wpływem rozciągania i ściskania światłowodu wyznaczone numerycznie i eksperymentalnie podając „niepewność określenia przesunięcia długości fali Bragga”, która (niepewność) w przypadku charakterystyk zamieszczonych na rysunkach (4.6) – (4.8) wynosi 5%. W jaki sposób niepewność ta została określona? To samo pytanie dotyczy niepewności określenia zmiany transmisji sygnału optycznego oraz przyrostu temperatury (ostatnia linijka tekstu na stronie 67).



8. Czy rzeczywiście słuszne jest stwierdzenie Autora, że: cyt.: „Aby odtworzyć widmo transmisyjne, należy od charakterystyki źródła światła odjąć charakterystykę odbiciową (w skali liniowej)”, czy Autor nie dostrzega pewnego uproszczenia w takim stwierdzeniu?

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne (głównie redakcyjne) oraz wątpliwości wyrażone w pytaniach nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej.

4. Ocena analizy źródeł

Analiza źródeł literaturowych obejmuje łącznie 75 pozycji. W przypadku 9 pozycji mgr inż. Mateusz Szelaąg występuje jako współautor. Cytowane artykuły dotyczą zagadnień związanych z diagnostyką i pomiarami materiałów kompozytowych przy wykrozystaniu metod optycznych w tym czujników ze światłowodowymi siatkami Bragga. Literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy.

5. Podsumowanie

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Szelaąga „Czujniki światłowodowe z siatką Bragga do pomiaru odkształceń i temperatury w materiałach kompozytowych ” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w art. 13 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2004r. (Dz. U. nr 65, poz. 595) w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej w dyscyplinie fizyka. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Szelaąga do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Ponadto biorąc pod uwagę rangę rozwiązywanego problemu oraz jakość i zakres przeprowadzonych badań oraz uwzględniając fakt, że praca posiada ważne walory poznawcze i aplikacyjne wnioskuję o jej wyróżnienie.