

prof. dr hab. inż. Maria Kotelko
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka
ul. B. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź
maria.kotelko@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Stepnowskiego

pt.: "Lokalizacja uszkodzeń powierzchni za pomocą metody tomografii rezystancyjnej w cienkich warstwach grafenowych/grafitowych"

Podstawę do opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika z dnia 13. czerwca 2022r.

1. Przedmiot rozprawy

W ostatnich dekadach prowadzone są intensywne badania nad zastosowaniem techniki elektrycznej tomografii impedancyjnej (EIT) w systemach monitoringu i inspekcji odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych, m. in. statków powietrznych. Systemy te wpisujące się w kategorie metod nieniszczących, mają podstawowe znaczenie w monitorowaniu bezpieczeństwa pracy, w tym detekcji uszkodzeń, newralgicznych (odpowiedzialnych) elementów maszyn, konstrukcji lotniczych i konstrukcji nośnych. Jedną z koncepcji w ramach technik EIT jest zastosowanie cienkich powłok o określonych parametrach elektrycznych (ang. *sensing skin*) naklejanych na element monitorowany. Przy założeniu, że odkształcenie lub przerwanie powłoki odpowiada przerwaniu ciągłości lub odkształceniu powierzchni badanej, pozwala to na detekcję uszkodzeń, a także, przy zastosowaniu niektórych technik, określenie ich położenia i kształtu. Wyróżnia się 3 metody tomografii impedancyjnej: rezystancyjną, pojemnościową i wiroprądową. Spośród tych metod, technika oparta na pomiarach rezystancji jest stosunkowo prosta.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest opracowanie metody detekcji uszkodzeń cienkich powłok przewodzących poprzez pomiar zmian rezystancji. Temat ten wpisuje się w najnowsze trendy badań nad nieniszczącymi metodami monitorowania uszkodzeń konstrukcji, co ma bardzo istotne znaczenie w praktycznych zastosowaniach inżynierskich.

W ramach recenzowanej pracy opracowano metodę określania lokalizacji i parametrów uszkodzenia powłoki za pomocą pomiaru zmian rezystancji w powiązaniu z algorytmem opartym na fizycznym (matematycznym) modelu rozkładu potencjału elektrycznego oraz na modelu numerycznym Metody Elementów Skończonych (MES). Ten ostatni pozwala na uzyskanie map potencjału elektrycznego w powłoce nieuszkodzonej i z uszkodzeniem i zastosowanie metody różnicowej. Rozwiązanie analityczne, oparte na modelu matematycznym wykorzystane jest do określenia parametrów uszkodzenia kołowego lub eliptycznego.

2. Treść rozprawy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisu literatury (bibliografii) cytowanej w tekście, zawierającej 135 pozycji,

oraz trzech załączników (kart katalogowych materiałów zastosowanych w eksperymencie i kodu numerycznego programu stanowiska pomiarowego). Ogółem praca zawiera 129 stron (bez załączników).

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy, w którym omówiono ogólnie zagadnienie będące jej przedmiotem.

Rozdział drugi zawiera przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy. Przegląd ten podzielono tematycznie w pięciu paragrafach dotyczących kolejno systemów monitorowania konstrukcji, metod tomografii impedancyjnej, interpolacyjnych metod oceny rezystywności, powłok przewodzących prąd elektryczny oraz metod pomiaru rezystancji. W ostatnim paragrafie tego rozdziału Doktorant podsumowuje stan wiedzy w przedmiocie rozprawy i stawia tezę, że spośród opisanych metod najbardziej obiecująca jest metoda oparta na pomiarach rezystancji powłok przewodzących. Określa też luki w zakresie badań nad tą metodą, tj. ograniczenie do powłok o anizotropowych własnościach konduktywności i detekcji pojedynczego uszkodzenia o określonym kształcie (otworu kołowego).

W rozdziale 3-m Doktorant formułuje tezę i cel pracy. To, co Autor określa jako „cele pracy” jest także zakresem i planem pracy.

W rozdziale 4-m przedstawiono metodologię badań. Opisano koncepcję metody układu pomiarowego, szczegółowe rozwiązanie zagadnienia rozkładu potencjału elektrycznego, sprowadzające się do rozwiązania jednorodnego równania Laplace'a), a następnie model numeryczny MES utworzony w środowisku kodu ANSYS. W modelu MES zastosowano 8-mo węzłowy płaski element z jednym stopniem swobody w każdym węźle, tj. wartością potencjału elektrycznego. Przedstawiono wyniki badania wpływu wielkości elementu na wyniki obliczeń. W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano mapy potencjału elektrycznego dla powłoki bez uszkodzenia i z uszkodzeniem, a następnie zastosowano metodę różnicową i wyznaczono względną zmian rezystancji. Ponieważ zastosowana metoda wymaga przeprowadzenia obliczeń dla wielkiej liczby wariantów danych, opracowano program generowania tych wariantów, nazwany przez Autora *generatorem modeli numerycznych*. Rozdział 4. Zamyka szczegółowy opis stanowiska badawczego, tj. kolejno: technologii wytwarzania powłok przewodzących, wyniki wstępnych badań zmian rezystancji w powłokach uszkodzonych, omówiono budowę zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego oraz metodę walidacji modelu numerycznego MES. Autor określił te walidacje, jako walidację *modelu fizycznego*.

Rozdział 5. zawiera opis autorskiej koncepcji systemu monitorowania stanu powierzchni. Przedstawiono w nim koncepcję systemu, metodę kalibracji modelu MES, metodę tworzenia map wrażliwości oraz algorytmy określania parametrów uszkodzenia kołowego i eliptycznego.

Rozdział 6-ty poświęcony jest wynikom eksperymentu. Autor opisuje w nim przebieg eksperymentu oraz wyniki badań. Przytacza wyniki pomiarów przeprowadzonych dla dwóch przypadków, tj. uszkodzenia w kształcie otworu kołowego i uszkodzenia w postaci szczeliny. Przedstawia mapy otrzymane za pomocą opracowanych algorytmów przy wykorzystaniu metody różnicowej. Mapy te pozwalają na identyfikację lokalizacji uszkodzeń oraz (częściowo) parametrów uszkodzeń.

Rozdział 7-my zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Autor podsumowuje rezultaty wykonanych prac. Stwierdza, że zastosowana metoda pozwala na identyfikację uszkodzeń i ich lokalizację. W przypadku wariantu MUE pozwala również na określenie parametrów uszkodzenia. We wnioskach końcowych Doktorant wskazuje elementy nowatorskie w opracowanych algorytmach oraz systemie akwizycji danych. Omawia też dokładność zastosowanej metody, a także możliwości rozszerzenia stosowalności zaproponowanego systemu na warstwy o większych wymiarach, przy zwiększonej liczbie elektrod oraz różnych kształtów uszkodzeń. Na zakończenie Autor zakreśla perspektywy dalszych badań.

3. Ogólna ocena rozprawy

Doktorant podjął się rozwiązania istotnego, z punktu widzenia rozwoju metod mechaniki eksperymentalnej, a także zastosowań inżynierskich tych metod, zagadnienia monitorowania uszkodzeń powierzchni elementów konstrukcyjnych przy zastosowaniu powłok przewodzących prąd elektryczny. W pracy postawiono tezę, iż pomiar zmian rezystancji takiej powłoki w wyniku jej uszkodzenia (przerwania ciągłości) w połączeniu z algorytmem opartym na zależnościach wynikających z fizycznego modelu uszkodzenia, pozwala na identyfikację tego uszkodzenia, jego lokalizację oraz określenie jego wymiarów.

Aby tę tezę udowodnić Kandydat zbudował fizyczny, hybrydowy model zmian rezystancji spowodowanych uszkodzeniem, bazujący na rozwiązaniu analitycznym zagadnienia rozkładu potencjału elektrycznego oraz modelu numerycznym MES. Następnie zbudował stanowisko pomiarowe, na potrzeby którego opracował system akwizycji danych.

Opracował także autorski, hybrydowy system monitorowania stanu powierzchni, składający się z modułu kalibracji, w którym generowane są mapy wrażliwości otrzymane z obliczeń numerycznych MES i modułu monitoringu, w którym zastosowano algorytm identyfikacji rzeczywistych uszkodzeń, pozwalający na identyfikację uszkodzenia. Następnie na specjalnie zbudowanym stanowisku badawczym przeprowadził badania doświadczalne próbek przewodzących i przedstawił opracowane wyniki badań.

Zatem zakres pracy jest kompletny i obejmuje zarówno opracowanie teoretyczne modelu fizycznego, opracowanie projektu stanowiska badawczego wraz z systemem akwizycji danych pomiarowych i autorskim systemem monitoringu uszkodzeń badanych powłok, a także walidację modelu fizycznego i dyskusję otrzymanych wyników eksperymentu.

Elementami nowatorskimi rozprawy w mojej opinii są:

- opracowanie hybrydowego modelu fizycznego (metoda analityczna w połączeniu z MES),
- opracowanie autorskiego systemu monitoringu uszkodzeń, wykorzystującego metodę różnicową, w tym opracowanie algorytmu generowania tzw. map wrażliwości.

Niewątpliwą zaletą pracy jest budowa, wykonanie i przeprowadzenie eksperymentu na stanowisku badawczym. Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych wskazują na przydatność zastosowanej metody i opracowanych algorytmów MUK i MUE, aczkolwiek dokładność otrzymanych map uszkodzeń jest stosunkowo mała i wskazuje, że opracowana metoda może służyć jedynie do wstępnej detekcji uszkodzeń. Jednakże Autor wykazał, że metoda ta może być zastosowana w praktycznych rozwiązaniach inżynierskich po jej uprzednim udoskonaleniu i weryfikacji jej wyników na obiektach rzeczywistych.

Biorąc powyższe pod uwagę rozprawę mgr inż. Marka Stepnowskiego oceniam wysoko. Kandydat wykazał się szeroką wiedzą z zakresu metod numerycznych mechaniki (MES), a także z zakresu metod eksperymentalnych mechaniki oraz umiejętnością planowania i wykonania eksperymentu.

Układ pracy jest przejrzysty, jej redakcja jest staranna, aczkolwiek budzi pewne zastrzeżenia, wymienione w następnym paragrafie. Bibliografia opracowana jest adekwatnie do tematu pracy. Biorąc powyższe pod uwagę, moja ogólna merytoryczna ocena rozprawy jest pozytywna.

4. Uwagi krytyczne

- 4.1. Podstawową opracowanej metody detekcji uszkodzeń jest założenie, że odkształcenie lub przerwanie powłoki przewodzącej odpowiada przerwaniu ciągłości lub odkształceniu powierzchni badanej. W ramach pracy nie przeprowadzono badań na próbkach wielowarstwowych, składających się z uszkodzonej warstwy zbliżonej do obiektu rzeczywistego (np. metalowej), z warstwy izolacyjnej i powłoki przewodzącej. Nie wykonano także symulacji

numerycznych rozkładu potencjału elektrycznego próbek obciążonych mechanicznie. Jedynym stopniem swobody w modelu MES był potencjał elektryczny. Nie jest pewne, czy odkształcenie powłoki nie spowoduje takich zmian rezystancji względnej, które zakłóca obraz uzyskany na podstawie opracowanych algorytmów MUK i MUE, a w konsekwencji zakłóca mapy zmian wyznaczonych względem stanu bez uszkodzeń i również bez odkształceń.

Przynajmniej jeden eksperyment na wielowarstwowej próbce (metal/warstwa izolacyjna/powłoka) lub eksperyment numeryczny MES mógłby udzielić częściowej odpowiedzi na powyższą wątpliwość.

4.2. Program eksperymentu, tj. liczba wykonanych prób była stosunkowo mała, co czyni dość trudnym formułowanie uogólnionych wniosków. Ponadto, w każdym eksperymencie istotne jest zbadanie powtarzalności wyników doświadczalnych, co w przypadku badań przeprowadzonych przez Doktoranta nie było możliwe.

4.3. Budując model numeryczny MES przeprowadzono analizę zbieżności (przy pewnych ograniczeniach podanych przez Autora w paragrafie 4.2.2.) i dobrano na jej podstawie optymalny rozmiar elementu skończonego. Dla próbek nieuszkodzonych zastosowano siatkę równomierną. Nie wynika jasno z opisu modelu MES, czy w przypadku próbki z uszkodzeniem, generowana siatka była zagęszczana wokół otworów w obszarze tzw. „edytowalnym”, co mogłoby być istotne dla minimalizacji błędów i poprawy zbieżności.

4.4. W mojej opinii podpunkty 2.5 oraz 4.2.2. zawierają zbyt podstawowe informacje o metodach pomiaru rezystancji (pp 2.5) i ogólnej idei metody elementów skończonych (pp 4.2.2). Informacje takie mogłyby się znaleźć w pracy magisterskiej, natomiast w rozprawie doktorskiej nie są konieczne.

4.5. Autor stosuje w niektórych wzorach i na niektórych wykresach błędne oznaczenia, sugerujące, że dana wielkość fizyczna jest wymiarowa, podczas, kiedy jest bezwymiarowa.

Dotyczy to oznaczeń względnej zmiany rezystancji, we wzorach: (4.20), (4.21), (5.1), (5.3). Także dotyczy to opisu wykresów: 4.12, 4.21 (względna zmiana rezystancji nie może być mierzona w omach), wykresu 5.5 (chodzi zapewne o „relative change in resitance”)

4.6. Autor kilkakrotnie błędnie stosuje określenie „ilość” zamiast „liczba”, m.in. „*ilość elektrod*” (str. 47), „*ilość symulowanych próbek*” (str. 63).

Uwagi 4.1, 4.2 i 4.3 mają charakter merytoryczny, zaś uwagi (4.4-4.6) są to uwagi edytorskie. Powyższe uwagi krytyczne (zarówno merytoryczne, jak i edytorskie) nie umniejszają ogólnej wysokiej oceny merytorycznej rozprawy.

Wniosek końcowy

Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje 4 publikacje (według bazy Scopus), w tym jeden artykuł w czasopiśmie indeksowanym JCR i dwie publikacje pokonferencyjne.

Biorąc pod uwagę wysoką ocenę rozprawy, przedstawioną powyżej, oraz dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktoranta spełniający w stopniu dostatecznym wymagania ustawowe, stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Marka Stepnowskiego pt: „Lokalizacja uszkodzeń powierzchni za pomocą metody tomografii rezystancyjnej w cienkich warstwach grafenowych/grafitowych”** spełnia wszystkie warunki stawiane przez ustawę „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce” z dn. 20.07. 2018 r. (Dz.U. poz. 1669) i na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Łódź, 24 sierpnia 2022 r.