

Bydgoszcz, 22.08.2022 r.

prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Inżynierii Biomedycznej  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Stepnowskiego

nt.: „Lokalizacja uszkodzeń powierzchni za pomocą tomografii rezystancyjnej w cienkich warstwach grafenowych/grafitowych”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 1 czerwca 2022 roku i pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. Roberta Sitnika z dnia 13.06.2022 roku.

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Tematyka opiniowanej pracy doktorskiej związana jest z problemem monitorowania stanu elementów konstrukcyjnych złożonych obiektów technicznych, w tym przede wszystkim wczesnego wykrywania uszkodzeń mechanicznych takich jak pęknięcia lub silne deformacje plastyczne. Pomimo stałego rozwoju metod konstruowania, w tym metod modelowania materiałów konstrukcyjnych i procesów ich niszczenia, ciągle nie jest możliwym jednoznaczne przewidywanie rzeczywistych wytrzymałości i trwałości wielu elementów konstrukcyjnych. Dotyczy to w szczególności elementów konstrukcyjnych pracujących w złożonych warunkach obciążeń, w tym obciążeń dynamicznych i zmęczeniowych. Problem nasila się w przypadku elementów wykonanych z materiałów o złożonej strukturze i niejednorodnych właściwościach mechanicznych. W praktyce powoduje to konieczność stosowania różnych strategii eksploatacji, często uciążliwych i bardzo kosztownych, których celem jest uniknięcie sytuacji, w których mogłoby dojść do uszkodzeń powodujących zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi, bądź skutkujących znacznymi stratami materialnymi lub środowiskowymi.

Jednym z rozwiązań, które w znacznym stopniu ułatwia zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji obiektów technicznych, jest stałe lub okresowe monitorowanie kluczowych obszarów konstrukcji. Stosuje się w tym celu różne rozwiązania, których celem jest bezpośrednie lub pośrednie wykrywanie stanu konstrukcji, który wymaga reakcji użytkownika. W wielu przypadkach monitorowaniem objęte są tylko kluczowe miejsca elementów konstrukcyjnych, które wytypowano w fazie konstruowania jako będące najbardziej zagrożonymi wystąpieniem pęknięć. Tematyce tej poświęcono szereg opracowań, które w szczegółowy sposób omawiają zarówno różne metodyki diagnozowania stanu obiektu, jak i stosowane w tym celu narzędzia.

Znacznie większą trudnością obarczone jest wykrywanie uszkodzeń w przypadku elementów, w których trudno jest przewidzieć miejsce wystąpienia pęknięć, co powoduje konieczność monitorowania stanu, np. dużych powierzchni struktur kompozytowych. I właśnie ten obszar jest głównie rozpatrywany w ocenianej rozprawie doktorskiej.

Doktorant podjął się w swojej pracy realizacji kilku zadań, których praktycznym efektem miał być system umożliwiający automatyczne wykrywanie i lokalizację uszkodzeń na powierzchni obiektu. Pierwszym z nich było opracowanie metody analizy stanu powierzchni obiektu z zastosowaniem pomiaru rezystancji naniesionej na nią powłoki przewodzącej. Zadanie to wymagało zarówno teoretycznej analizy zagadnień związanych z przepływem prądu elektrycznego przez przewodzącą



powłokę, jak i opracowania technologii nanoszenia powłok na obiekty badań oraz opracowania metody wielopunktowego pomiaru rezystancji. Kolejnym zadaniem było opracowanie modelu matematycznego, który miał stanowić bazę dla analizy wyników pomiarów, w tym określenia parametrów wykrywanego uszkodzenia. Końcowym celem realizowanego przedsięwzięcia było opracowanie i doświadczalna weryfikacja systemu monitorowania stanu powierzchni, w tym opracowanie algorytmów detekcji i analizy parametrów uszkodzenia.

**W świetle powyższych stwierdzeń można zatem uznać podjęcie tematu rozprawy za celowe i uzasadnione, a podejmowaną tematykę aktualną zarówno pod względem poznawczym, jak i praktycznym.**

**Biorąc pod uwagę zakres tematyczny pracy, w tym jej cele i uzyskane efekty, ocenianą rozprawę można jednoznacznie zakwalifikować do dyscypliny inżynieria mechaniczna.**

Rozprawa mgra Marka Stepnowskiego została zawarta na 127. stronach (plus dwa załączniki). Autor zamieścił w niej 78 rysunków i 3 tabele. Bibliografia załącznikowa obejmuje 135 pozycji literatury, w tym 3 prace z udziałem Doktoranta.

Treść pracy została podzielona na 7 spójnych tematycznie rozdziałów poprzedzonych streszczeniami w języku polskim i angielskim.

**W pierwszym rozdziale** pracy Doktorant przedstawił znaczenie podjętego zamierzenia badawczego w zakresie budowy i eksploatacji maszyn, w tym potencjalne obszary zastosowania jego praktycznych efektów.

**Drugi rozdział** pracy, to syntetyczna analiza stanu wiedzy obejmująca przegląd metod i narzędzi stosowanych w monitorowaniu stanu konstrukcji. Autor skoncentrował się w nim głównie na metodach wykorzystujących przepływ prądu elektrycznego, ale także na teoretycznych podstawach analizy pola elektromagnetycznego oraz metodach analizy i pomiaru rezystancji, także w odniesieniu do jej pomiaru w strukturach powłokowych. Rozdział kończy podsumowanie i uzasadnienie dla podejmowanego zamierzenia badawczego, przy czym w mniejszym stopniu odnosi się ono do efektu prowadzonych badań (systemu lokalizacji uszkodzeń), a bardziej uzasadnia wykorzystanie przyjętego rozwiązania, to jest pomiaru rezystancji w przewodzącej powłoce naniesionej na monitorowany obiekt. Szkoda, że w uzasadnieniu nie wskazano jednoznacznie, jaki problem naukowy nie znalazł jeszcze satysfakcjonującego rozwiązania, a którego rozwiązanie w pracy stanowić będzie wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

**W trzecim rozdziale** przedstawiona została przyjęta teza oraz cel pracy. O ile sens tezy nie budzi uwag, tak jej strona językowa mogłaby być nieco zmodyfikowana. W mojej ocenie, np. nadmiarową jest jej końcowa część, tj. „... powodującego przerwanie jej ciągłości”. Wprowadzenie tego opisu komplikuje jej sens, gdyż opracowana metoda nie służy określeniu „parametrów uszkodzenia powłoki”, które powoduje przerwanie ciągłości powłoki. Metoda ma pozwolić określić parametry uszkodzenia, którym jest przerwanie ciągłości powłoki. W końcowym efekcie ma także pozwolić na określenie parametrów uszkodzenia obiektu, które powoduje przerwanie ciągłości powłoki.

W dalszej części rozdziału Autor wymienił zaplanowane zadania badawcze służące realizacji przyjętego celu pracy, które można by nazwać programem badań i nieco szerzej omówić w odrębnym punkcie pracy.

Zazwyczaj w rozprawach doktorskich w rozdziale poświęconym tezie i celom pracy podawany jest także zakres pracy, który może być pewnego rodzaju przewodnikiem i komentarzem ułatwiającym zapoznanie się z osiągnięciem Autora. Samo wyszczególnienie rodzaju badań i analiz często nie jest wystarczające do zinterpretowania ich wzajemnych relacji.

**Rozdział czwarty** rozprawy został poświęcony omówieniu pierwszej części badań własnych, które obejmowały przede wszystkim: opracowanie koncepcji metody analizy rezystancji przewodzącej powłoki umożliwiającej detekcję i lokalizację jej uszkodzenia, opracowanie i walidację modelu powłoki pozwalającego na teoretyczną analizę zmian rezystancji oraz opracowanie technologii przygotowania powłok pomiarowych wraz z wykonaniem obiektów badań. Dodatkowo omówiono w nim autorskie stanowisko badawcze przeznaczone do badań eksperymentalnych.

**W piątym rozdziale** pracy Autor przedstawił szczegółowo ideę metody monitorowania elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem opracowanej metodyki analizy zmian rezystancji wraz z jej



praktyczną implementacją w zaproponowanym w pracy systemie monitorowania stanu powierzchni. Doktorant szczegółowo zaprezentował proces przygotowania danych wejściowych pozyskiwanych z zastosowaniem modeli MES oraz algorytmy detekcji i analizy parametrów dwóch typów uszkodzeń: o kształcie kołowym i eliptycznym.

Opracowany system został poddany eksperymentalnej weryfikacji, a jej wyniki zostały szczegółowo omówione w **rozdziale szóstym**. Do badań weryfikacyjnych przeznaczono dwie próbki obiektów z naniesionymi warstwami przewodzącymi, które uszkodzono w kontrolowany sposób umożliwiając przeprowadzenie porównań wyników działania opracowanego systemu, tj. wyznaczonych parametrów uszkodzenia z ich rzeczywistymi wartościami.

Pracę kończy **rozdział siódmy** zatytułowany „Podsumowanie i wnioski”, który zawiera syntetyczne omówienie zakresu przeprowadzonych prac i ich efektów oraz wynikające z nich wnioski oraz wskazania do dalszych prac i badań. W mojej ocenie zaprezentowane wnioski znajdują odzwierciedlenie w wynikach przeprowadzonych badań i dobrze opisują efekty ich analiz, w tym niektóre zagadnienia, które wymagają realizacji dalszych badań.

**Z przedstawionego omówienia wynika, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału wymagania stawiane tego typu pracom.**

Analiza treści pracy nasuwa ogólne przekonanie o dobrym przygotowaniu Doktoranta do realizacji zaplanowanych zadań we wszystkich fazach omówionego w niej przedsięwzięcia badawczego. Zwraca uwagę rozpiętość tematyczna przeprowadzonych badań i analiz, staranność w ich opisie i realizacji, a także bardzo dobra orientacja Doktoranta w poruszanych zagadnieniach.

Należy także zwrócić uwagę, że ich realizacja wymagała od Autora wiedzy i umiejętności wykraczających poza inżynierię mechaniczną, w tym z zakresu inżynierii elektrycznej czy inżynierii materiałowej.

W mojej ocenie Doktorant w trakcie realizacji pracy wykazał się wiedzą i właściwymi kompetencjami w zakresie przygotowania i realizacji prac eksperymentalnych, formułowania modeli analitycznych i numerycznych, przygotowania i realizacji analiz metodą elementów skończonych z zastosowaniem zaawansowanych metod modelowania materiałów, a także w zakresie opracowania i analizy otrzymywanych wyników badań. Metody i narzędzia badawcze użyte przez Doktoranta są odpowiednie dla przyjętego celu i zakresu pracy, a sposoby przedstawienia wyników badań i ich analizy zgodne z wymaganiami stawianymi opracowaniom naukowym.

Powyższe uwagi nie oznaczają jednak, że nie można mieć pewnych krytycznych, w części dyskusyjnych uwag, do poszczególnych zagadnień prezentowanych przez Doktoranta. Ich omówienie zamieszczono w punkcie „ocena rozprawy”.

## **2. Ocena rozprawy**

### **2.1. Osiągnięcie Doktoranta**

Podstawowym zamierzeniem Doktoranta było opracowanie metody pozwalającej na lokalizację i wyznaczenie wymiarów uszkodzenia powierzchni elementów konstrukcyjnych. Realizacja tego celu wymagała od Autora zaproponowania rozwiązań, które stanowią nowość w stosunku do znanych i opisanych w literaturze propozycji. W powyższym kontekście, **jako główne osiągnięcie** rozprawy doktorskiej mgra inż. Marka Stepnowskiego należy uznać opracowanie i weryfikację hybrydowej, numeryczno-doświadczalnej metody wyznaczania parametrów uszkodzenia powierzchni z zastosowaniem wielokierunkowego pomiaru rezystancji cienkiej powłoki przewodzącej nanoszonej na monitorowaną powierzchnię. Zaproponowana przez Doktoranta koncepcja rozwiązania problemu odwrotnego, tj. odtworzenia przyczyny (powstałego uszkodzenia) na podstawie znanego skutku (zmierzonej zmiany rezystancji) umożliwiła przedstawienie propozycji systemu monitorowania stanu powierzchni za pomocą autorskich algorytmów.

Zaproponowane rozwiązania mogą w mojej ocenie znaleźć praktyczne zastosowanie w diagnozowaniu stanu elementów konstrukcyjnych zagrożonych powstawaniem uszkodzeń mechanicznych, przede wszystkim pęknięć wywołanych np. zmęczeniem materiału. Możliwość automatyzacji metody i jej działania bez konieczności wyłączania analizowanego obiektu z eksploatacji stanowi jej ważną zaletę, która może wpłynąć na obniżenie kosztów eksploatacji oraz co ważniejsze na podniesienie



bezpieczeństwa ludzi i środowiska, np. poprzez wykrywanie nieprzewidzianych uszkodzeń w okresach przypadających pomiędzy zaplanowanymi inspekcjami.

Istotnymi osiągnięciami pracy o znaczeniu praktycznym są także technologia przygotowania obiektów badań, narzędzia obliczeniowe i zautomatyzowane stanowisko do badań eksperymentalnych.

## 2.2. Uwagi o charakterze merytorycznym

### a. Uwagi ogólne

Analiza treści rozprawy pozwala stwierdzić, że jej Autor w mojej ocenie dołożył wielu starań, aby w precyzyjny i jasny sposób omówić opracowane rozwiązania, przeprowadzone badania i ich wyniki. Co ważne, omawia nie tylko zalety i korzyści wynikające z zaproponowanych rozwiązań, ale także analizuje ich wady i braki mogące niekorzystnie wpłynąć na ich efektywność i skuteczność w ocenie parametrów uszkodzenia. Powoduje to, że w dalszej części recenzji skoncentruję się przede wszystkim na kwestiach, które dotyczą koncepcji zaproponowanej metody oraz sposobu jej weryfikacji.

Zacznę jednak od ogólnych uwag dotyczących kwestii pojęciowych.

- Autor w przeglądzie literatury na stronie 18 definiuje pojęcie tomografii, jako „... sposób uzyskiwania dwuwymiarowego obrazu przekroju obiektu trójwymiarowego w dowolnie wybranej płaszczyźnie, w celu poznania jego struktury wewnętrznej, bez naruszania tej struktury...”. Zaproponowana w pracy metoda bazuje na analizie rezystancji cienkiej powłoki i nie posiada takiej funkcjonalności. Dlaczego zatem w tytule pracy pojawiało się określenie „tomografia rezystancyjna”? W dalszej części pracy praktycznie takie określenie dla zastosowanej metody pomiaru więcej nie pojawia się. Brakuje odniesienia do tego pojęcia także w podsumowaniu i wnioskach z badań.
- Dlaczego w tytule pracy pojawia się określenie „warstwy grafenowe”, skoro w badaniach Autor stosuje wyłącznie warstwy z grafitem?
- Jednym z kluczowych elementów zaproponowanej metody jest opisane w rozdziale 4 modelowanie powłoki przewodzącej. Autor do jego opisu stosuje pojęcie „model fizyczny”, ale w praktyce bazuje on na modelowaniu analitycznym i numerycznym. W mojej ocenie trudno zgodzić się z takim określeniem opracowanego sposobu modelowania. Co prawda przyjmuje się, że modelem fizycznym może być np. symulacja komputerowa implementująca prawa fizyki, jednak w sensie dosłownym model fizyczny jest układem materialnym. Sprawę komplikują dodatkowo nazwy rozdziału 4 („Model fizyczny”) i podrozdziału 4.4.1 („Model matematyczny”).

Kolejne uwagi, tak jak wspomniano wcześniej, dotyczą zaproponowanej koncepcji metody i jej weryfikacji.

- W zaproponowanej metodzie stan powierzchni elementu konstrukcyjnego analizowany jest poprzez wielokierunkowy pomiar rezystancji naniesionej na nią cienkiej powłoki przewodzącej prąd elektryczny. Autorowi udało się pozytywnie zweryfikować zaproponowane rozwiązanie na modelowej próbce w warunkach stanowiska laboratoryjnego. Jak Autor sam stwierdza we wnioskach, „... opracowane algorytmy działają w rybie różnicowym ...”, tzn. wymagają stanu odniesienia/wzorca. Jak nietrudno przewidzieć, taki stan odniesienia w powłoce na elemencie konstrukcyjnym bez uszkodzenia będzie zależał nie tylko od samej warstwy, ale także w znacznej mierze od obciążenia elementu konstrukcyjnego. Można sobie np. wyobrazić sytuację, w której monitorujemy stan powierzchni w otoczeniu karbu. Gradienty odkształceń będą przenoszone na warstwę pomiarową, co zapewne zmieni lokalnie jej rezystancję. Tym samym stan odniesienia, tj. rozkład rezystancji warstwy będzie zmieniał się wraz poziomem obciążenia. W jaki sposób, zdaniem Autora, można będzie poradzić sobie z taką sytuacją w rzeczywistych warunkach pracy elementów konstrukcyjnych?
- Zaproponowana metoda może być szczególnie przydatna w przypadku elementów podlegających obciążeniom cyklicznie zmiennym. Stosownym od lat rozwiązaniem pozwalającym na analizę odkształceń w takim przypadku jest metoda tensometrii oporowej. Jednak jednym z jej ograniczeń jest trwałość zmęczeniowa samych czujników (tensometrów), która w przypadku dużych odkształceń poprzedzających pojawienie się pęknięcia zmęczeniowego, jest często niewystarczająca. Czy zdaniem Autora, można mówić o trwałości zmęczeniowej powłoki przewodzącej (lub jej połączenia z obiektem) przygotowanej zgodnie z zastosowaną technologią?



- Autor w celu weryfikacji metody wykonał w kontrolowany sposób uszkodzenia w próbkach w postaci otworów i nacięć. O ile otwory wykonane były przez całą grubość próbki, tak brakuje informacji, czy nacięciu podlegała jedynie powłoka, czy cała próbka. Teoretycznie nie powinno to mieć znaczenia, jednak naruszenie ciągłości obiektu badań może np. spowodować zmianę naprężeń wewnętrznych, co z kolei może wpłynąć na rozkład odkształceń w otoczeniu nacięcia pośrednio zmieniając rozkład rezystancji w powłoce pomiarowej.
- Nie kwestionując i pozytywnie oceniając zaproponowany sposób weryfikacji opracowanej metody z punktu widzenia opracowanych algorytmów, uważam że ważnym aspektem który powinien być w przyszłości rozważony przez Doktoranta, jest weryfikacja zdolności naniesionej warstwy do odwzorowania uszkodzenia powierzchni będącego efektem obciążenia obiektu, np. zmęczenia materiału. Czy zadaniem Autora istnieją jakieś ograniczenia w tym zakresie ?

#### **b. Uwagi szczegółowe**

W dalszej części recenzji przedstawię kilka uwag o bardziej szczegółowym charakterze, w kolejności zgodnej z ich występowaniem w pracy.

- Streszczenie pracy w mojej ocenie jest głównie opisem jej zakresu.
- Strona 13<sup>9</sup>. Stwierdzenie, że analiza parametrów elektrycznych powłoki sprowadza się do „obszaru dwuwymiarowego” nie jest zasadne. Powierzchnia może być bowiem rozpatrywana w przestrzeni trójwymiarowej. Podobna uwaga dotyczy sformułowania użytego na stronie 41<sup>9</sup>.
- Strona 37<sup>6</sup>. Autor stwierdza, że „... W niniejszej pracy potraktowano badane warstwy węglowe jako liniowe”, nie podając uzasadnienia.
- Strona 41<sup>13</sup>. Określenie „dziury” nie jest zbyt fortunną nazwą uszkodzenia. Podobnie na stronie 95<sup>18</sup>.
- Strona 49-53. W opisie modelu matematycznego pojawia się wielkość „l”, która nie została zdefiniowana. Z opisów na rysunkach 4.4 i 4.5, zależności 4.9 i opisów współrzędnych punktów  $z_1$  i  $z_2$  można domyślać się, że jest to odległość pomiędzy punktami  $z_1$  i  $z_2$  od środka układu współrzędnych, ale nie jest to jasno sformułowane.
- Strona 59, zależność 4.20. Autor na stronie 59<sup>11</sup> wprowadza pojęcie „względnej zmiany rezystancji  $\Delta R$ ”:  $\Delta R$  jest zakresem (zmianą) rezystancji i należałoby poszukać innego opisu dla tej wielkości, gdyż taki zapis może wprowadzać czytelnika w błąd. Wielkość  $\Delta R$  została ponownie użyta przez Autora na stronie 68 w zależności 4.21 i w tym przypadku oznacza już zmianę rezystancji.
- Strona 70, zależność 4.22. Czy Autor zastanawiał się nad fizycznym uzasadnieniem dla zastosowanych wykładników potęgi ? Co jeśli znormalizowane zmiany rezystancji  $H$  lub  $V$  miałyby charakter ujemny ?
- Strona 71, rozdział 4.3.3. Czy biorąc pod uwagę bardzo małe zmiany napięcia wywołane zmianą rezystancji warstwy przewodzącej, 18-bitowy przetwornik ADC nie jest słabym ogniwem w zaproponowanym układzie pomiarowym ? Rzeczywiste rozdzielczości przetwornika są zazwyczaj niższe od teoretycznych. Często w podobnych układach pomiarowych stosuje się przetworniki 24, a nawet 32-bitowe.
- Strona 75, zależność 4.25. Autor zastosował opis jednostki dla „rezystancji powierzchniowej”, który w mojej ocenie nie jest prawidłowy. Co oznacza symbol pod kreską ułamkową ?
- Strona 78, rysunek 4.31. Niejasny opis osi pionowej: względna zmiana czego ?
- Strona 99, rozdział 5.3.3. Brakuje wyjaśnienia, dlaczego zastosowano algorytm z modelem uszkodzenia eliptycznego, a modelowano uszkodzenie okrągłe ?

#### **c. Uwagi redakcyjne**

W mojej ocenie praca została zredagowana bardzo starannie. W treści pracy zaobserwowano jedynie nieliczne usterki językowe i stylistyczne. W przyszłości należałoby jednak zwrócić uwagę na lepszą czytelność rysunków, w tym głównie opisów osi na wykresach. Brakuje też spójności w zakresie opisu rysunków. Większość z nich ma opisy w języku angielskim, część w języku polskim. Właściwszym w mojej ocenie byłoby zastosowanie opisów w języku polskim.

Chciałbym dodatkowo zwrócić uwagę na ogólniejszą kwestię, która często występuje w opracowaniach naukowych, a dotyczy zapisywania jednostek w nawiasach kwadratowych np. [mm]. Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów (także w zaktualizowanej wersji z dnia 5 czerwca 2020 r.) w sprawie legalnych jednostek miar, „...§ 10. Do nazw i oznaczeń jednostek nie należy dołączać żadnych dodatkowych wyrazów, wskaźników ani liter, poza określonymi w rozporządzeniu ...”. Tym samym zarówno na wykresie, jak i w tekście zamiast zapisu np.  $x$  [mm] stosuje się  $x$ , mm, a w przypadku wartości: 10 mm.

Inne uwagi dotyczące przede wszystkim redakcji jej tezy, zamieszczono w „Ogólnej charakterystyce rozprawy”, jednak nie wpływają one na ogólnie pozytywny obraz formalnej strony pracy.

Tak jak wspomniano wcześniej, zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę pracy i mają w dużej mierze charakter dyskusyjny. Ich omówienie może być przedmiotem dyskusji w trakcie jej publicznej obrony.

### **3. Wniosek końcowy**

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że podjęte w niej zamierzenie badawcze zostało osiągnięte a postawiona teza potwierdzona. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i użyteczne, które może znaleźć w przyszłości zastosowanie w praktyce, a jej Autor wykazał się właściwymi kompetencjami w zakresie prowadzonych prac badawczych.

Przeprowadzone prace otwierają przed Doktorantem obszary do dalszych badań, co jest istotnym aspektem realizacji rozprawy doktorskiej.

Można tym samym stwierdzić, że rozprawa doktorska mgra inż. Marka Stepnowskiego spełnia ustawowe wymogi i może być dopuszczona do dalszych czynności związanych z nadaniem stopnia doktora przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

