

Prof. dr hab. Józef Zbroszczyk  
Emerytowany pracownik Instytutu Fizyki  
Wydział Inżynierii Produkcji  
i Technologii Materiałów  
Politechnika Częstochowska  
Al. Armii Krajowej 19  
42-200 Częstochowa

Częstochowa, dnia 24.02.2015 r.

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Rafała Mecha  
nt. „Właściwości magnetomechaniczne kompozytów na bazie proszków  
z materiału o gigantycznej magnetostrykcji”**

Recenzja została opracowana na podstawie pisma z dnia 05.01.2015 r. Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Edwarda Chlebusia, prof. zw.

Rozwój automatyki i miniaturyzacja urządzeń stwarza zapotrzebowanie na nowe materiały o specjalnych właściwościach, takich jak gigantyczna magnetostrykcja i duża magnetyzacja nasycenia. Badania tego typu materiałów są prowadzone na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej od wielu lat i pozwoliły uzyskać wiele interesujących wyników, prezentowanych na konferencjach i opublikowanych w czasopiśmie o szerokim zasięgu. Szczególnie interesujące są materiały o dużej magnetostrykcji i wytworzone na bazie otrzymanych z nich proszków kompozyty. Przedłożona do recenzji praca doktorska mgr. inż. Rafała Mecha dotyczy badań właściwości kompozytów magnetostrykcyjnych oraz zbudowanych z ich wykorzystaniem: wzbudnika magnetostrykcyjnego i urządzenia do odzyskiwania energii. Recenzowana praca jest pracą doświadczalną i jest bardzo obszerna – liczy 312 stron druku. Na początku pracy Autor zamieścił streszczenie w językach polskim i angielskim, a następnie, po krótkim wprowadzeniu do tematyki badań, sprecyzował tezę oraz cel pracy. Zgodnie z tezą, mgr. inż. Rafał Mech zakłada, że możliwe jest wytworzenie magnetostrykcyjnych materiałów kompozytowych bez wad charakterystycznych dla materiałów litych, ale z zachowaniem właściwości magnetomechanicznych materiału o gigantycznej magnetostrykcji.

Celem poznawczym pracy jest zbadanie właściwości magnetomechanicznych kompozytów wytworzonych na bazie proszku o gigantycznej magnetostrykcji Terfenolu-D.

Należy podkreślić, że oprócz tego typu badań, Autor zaplanował wykonanie i zbadanie wzbudnika magnetostrykcyjnego oraz urządzenia do odzyskiwania energii. Drugi rozdział Autor poświęcił przeglądowi literatury związanej z materiałami magnetostrykcyjnymi, zwracając szczególną uwagę na właściwości i metodę wytwarzania Terfenolu-D i kompozytowych materiałów magnetostrykcyjnych. W tym rozdziale mgr inż. Rafał Mech opisuje również modele kompozytów magnetostrykcyjnych, co pozwala na wyjaśnienie właściwości tych materiałów.

Obszerna część pracy, w skład której wchodzi trzy rozdziały zatytułowane: „Badania właściwości kompozytów magnetostrykcyjnych”, „Aktuatory magnetostrykcyjne” i „Energy harvesting”, licząca 132 strony, jest poświęcona badaniom własnym. Pracę kończą wnioski i uwagi oraz przewidywane kierunki dalszych badań, spis literatury, dodatki oraz spis rysunków i tabel. W dodatkach Autor zamieścił opis metod pomiaru i układów wykorzystujących kompozytowe materiały magnetostrykcyjne.

Próbki badanych kompozytów magnetostrykcyjnych były wykonywane poprzez łączenie żywicy epoksydowej zmieszanej z utwardzaczem i proszku materiału magnetostrykcyjnego, którym był Terfenol-D. Rozkład wielkości ziaren Terfenolu-D, których największa średnica wynosiła 300  $\mu\text{m}$ , Autor zbadał metodą dyfrakcji laserowej. Ze względu na dużą różnicę gęstości żywicy epoksydowej i proszku Terfenolu-D materiał umieszczano w polu magnetycznym o małym natężeniu. Wykonano próbki zawierające objętościowo 35%, 46% i 70% proszku Terfenolu-D. Biorąc pod uwagę wyniki badań uzyskane dla próbek o zwiększonej zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D, Autor zmodyfikował kompozyt, dodając do niego proszek żelaza karbonylkowego o średnicy ziaren z przedziału 1-5  $\mu\text{m}$ . Zawartość objętościowa proszku żelaza karbonylkowego wynosiła 10 i 20 %. Badania mikrostruktury kompozytów zostały przeprowadzone z wykorzystaniem mikroskopii optycznej i skaningowej mikroskopii elektronowej po badaniach właściwości magnetomechanicznych. Na podstawie tych badań Autor stwierdził brak degradacji materiałów kompozytowych po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego lub obciążenia. Było to szczególnie widoczne w rozkładzie poszczególnych pierwiastków w przekroju kompozytu. Przeprowadzone również zostały badania rentgenowskie, pozwalające na określenie składu fazowego próbek.

Po wykonaniu próbek kompozytów mgr inż. Rafał Mech w pierwszej kolejności przeprowadził pomiary modułu Younga. Na podstawie tych badań stwierdził, że moduł Younga rośnie ze wzrostem zawartości objętościowej Terfenolu-D w matrycy. W drugiej kolejności Autor zmierzył magnetostrykcję otrzymanych próbek kompozytów. Wymagało to

zbudowania oryginalnego stanowiska badawczego, umożliwiającego pomiar magnetostrykcji materiałów kompozytowych i materiału odniesienia, czyli Terfenolu-D, w zależności od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. Do pomiaru odkształcenia zostały użyte światłowodowe siatki Bragga ze względu na ich niewielkie wymiary oraz odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. W celu kompensacji wpływu temperatury na pomiar Autor zastosował dodatkową siatkę FBC odizolowaną mechanicznie od próbki, ale umieszczoną dostatecznie blisko, aby jej temperatura była taka sama jak próbki. W przypadku materiałów kompozytowych mgr inż. Rafał Mech zmierzył magnetostrykcję zarówno w funkcji pola magnetycznego, jak i naprężenia wstępnego, i stwierdził, że kompozyt zawierający objętościowo więcej proszku Terfenolu-D wykazuje większą wartość magnetostrykcji. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazał również, że wpływ naprężenia wstępnego na magnetostrykcję materiałów kompozytowych jest większy niż w przypadku materiału litego. Autor przeprowadził również badania magnetostrykcji objętościowej dla kompozytu zawierającego 46% proszku Terfenolu-D. Do pomiaru wykorzystał tę samą metodę jak przy pomiarze magnetostrykcji liniowej. W tym przypadku zastosowano dwa czujniki światłowodowe, jeden do pomiaru odkształcenia wzdłuż głównej osi próbki, a drugi do pomiaru odkształcenia obwodowego. Autor stwierdził, że zmiana objętości w polu magnetycznym zarówno materiału kompozytowego, jak i Terfenolu-D jest niewielka, i nie ma istotnego wpływu inne właściwości tych materiałów. Zbadał również zjawisko odwrotnej magnetostrykcji, czyli tzw. efekt Villariego. Podobnie jak w przypadku magnetostrykcji objętościowej, do pomiarów wykorzystano materiał kompozytowy o zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D wynoszącej 46%. Ze względu na możliwości zastosowania materiałów kompozytowych mgr inż. Rafał Mech zbadał podstawowe właściwości magnetyczne materiałów o zawartości objętościowej proszku Terfenolu-D wynoszącej 35, 46 i 70% oraz litego Terfenolu-D przy przemagnesowaniu w quasi-statycznym i zmiennym polu magnetycznym.

Interesujące zjawisko Autor zaobserwował przy magnesowaniu próbek w quasi-statycznym polu magnetycznym próbek schłodzonych bez pola magnetycznego i w polu magnetycznym. Magnetyzacja próbek schłodzonych w polu magnetycznym, mierzona w niskich temperaturach i słabym polu magnetycznym, jest większa niż próbek schłodzonych bez pola magnetycznego. Zachowanie takie jest podobne do efektów zamrażania spinów w szklach spinowych lub klastrowych i jest obserwowane w materiałach charakteryzujących się niekolinearną strukturą spinową. Na podstawie badań w zmiennym polu magnetycznym Autor stwierdził, że pętle histerezy dla materiałów kompozytowych praktycznie nie zmieniają

swego kształtu ze wzrostem częstotliwości i przy magnesowaniu tych materiałów dominują straty z prądów wirowych, lecz są one mniejsze niż w litym Terfenolu-D.

Opracowanie technologii wytwarzania kompozytów magnetostrykcyjnych i kompleksowe badania ich właściwości pozwoliły mgr. inż. Rafałowi Mechowi na zbudowanie wzbudnika. Spośród wytworzonych materiałów kompozytowych Autor wybrał kompozyt zawierający 70% objętościowo proszku Terfenolu-D, który w trakcie wiązania żywicy został dodatkowo poddany polaryzacji prostopadle do głównej osi próbki. W celu zbadania możliwości aplikacyjnych wykonanego wzbudnika zostało zbudowane stanowisko z dobranymi odpowiednio czujnikami oraz aparaturą pozwalającą na pomiar niezbędnych parametrów w trakcie jego pracy, takich jak np. magnetostrykcja rdzenia i wartość pola magnetycznego. Autor przeprowadził badania mające na celu określenie możliwości pracy wzbudnika z rdzeniem wykonanym z kompozytu magnetostrykcyjnego w układach sprzężenia zwrotnego. Przyjmując, że układ będzie miał za zadanie zapewnić utrzymywanie zadanej wartości odkształcenia rdzenia wzbudnika, niezależnie od zmiany zewnętrznego obciążenia, można by go zastosować w przemyśle precyzyjnym w celu utrzymywania narzędzi w określonym położeniu przy obróbce materiału. Przeprowadzone badania oraz symulacja rzeczywistego układu z rdzeniem wykonanym z kompozytowego materiału umożliwiły mgr. inż. Rafałowi Mechowi wykonanie wzbudnika magnetostrykcyjnego o zmniejszonych wymiarach, który może być wykorzystany w medycynie do stymulacji regeneracji tkanki kostnej.

W ostatnim dziesięcioleciu poszukuje się źródeł czystej i odnawialnej energii. Wykorzystując materiały magnetostrykcyjne, istnieje możliwość konwersji energii cieplnej lub mechanicznej, zwykle traconej w trakcie procesów zachodzących w urządzeniach, na energię elektryczną. Materiały magnetostrykcyjne badane przez Autora pracy mogą być wykorzystane do konwersji energii dzięki efektowi Villariego. Zasada działania takiego urządzenia polega na zamianie energii mechanicznej na energię elektryczną. Podstawowa wersja urządzenia składa się z takich elementów, jak magnes neodymowy, cewka, rdzeń oraz część przenosząca sygnał mechaniczny. Najważniejszym elementem jest rdzeń, który odpowiada za ilość przetwarzanej energii mechanicznej na energię elektryczną. Autor pracy przeprowadził badania, wykorzystując rdzenie wykonane z różnych materiałów, m.in. stali, litego Terfenolu-D i kompozytu z proszkiem Terfenolu-D.

Praca napisana jest jasno, a zamieszczone na jej końcu wnioski są sformułowane jednoznacznie i przekonująco. Wyniki uzyskane w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Rafała Mecha oceniam jako interesujące.

Do głównych osiągnięć Autora pracy należy zaliczyć:

- opracowanie technologii wytwarzania kompozytów magnetostrykcyjnych,
- zbudowanie układu do badania właściwości kompozytów,
- zbudowanie wzбудnika z materiału kompozytowego.

Jednakże Autor nie ustrzegł się drobnych niedociągnięć, które nie zmniejszają w istotny sposób wartości pracy. Autor pisze na str. 29: „Zjawiskami pochodnymi związanymi z magnetostrycją są (...) opóźnienia magnetyczne.

Na str. 143: „... w odróżnieniu od litego Terfenolu-D, w którym zjawisko superparamagnetyzmu występuje do temperatury  $T_B^{\max} = 250 \text{ K}$  ...”

Na str. 145: „... efekt superparamagnetyzmu jest obserwowany tylko w przypadku niższych wartości pola magnetycznego.”

W związku z tymi sformułowaniami mam pytania:

- jak można wyjaśnić opóźnienia magnetyczne w materiałach o magnetostrykcji bliskiej zeru?
- na czym polega zjawisko superparamagnetyzmu i czy można je obserwować w litym materiale, jakim jest Terfenol-D ?
- dlaczego według Autora pracy (str. 145) efekt superparamagnetyzmu jest obserwowany tylko w słabych polach magnetycznych ?

Podkreślone przeze mnie główne osiągnięcia Doktoranta stanowią istotny i ważny wkład w inżynierię materiałów. Teza pracy została udowodniona, a cel w pełni zrealizowany.

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Mecha pt. „Właściwości magnetomechaniczne kompozytów na bazie proszków z materiału o gigantycznej magnetostrykcji” w pełni spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 585 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie Autora tej pracy do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej.

Warszawa, 8 marca 2015

Dr hab. inż. Roman Szewczyk, prof. nadzw. PW

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej

Politechnika Warszawska

### Recenzja pracy doktorskiej

Właściwości magnetomechaniczne kompozytów na bazie proszków z materiału o gigantycznej magnetostrykcji

Autor: mgr inż. Rafał Mech

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Kaleta, prof. nadzw. PWr.

prowadzonej w Katedrze Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej.

#### 1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Rafała Mecha została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 5.01.2015.

#### 2. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena tematu i celu pracy

Przedstawiona praca doktorska ma charakter interdyscyplinarny. Obejmuje ona zarówno zagadnienia z zakresu mechaniki i technologii wytwarzania nowoczesnych materiałów, jak również miernictwa magnetycznego oraz elementów wykonawczych automatyki i elektroniki.

Tematyka związana z badaniem charakterystyk użytkowych materiału o gigantycznej magnetostrykcji (głównie Terfenolu-D) jest intensywnie rozwijana ze względu na ważne, praktyczne zastosowania tego typu materiałów. W zakresie tej tematyki wytwarzanie kompozytów na bazie tych proszków jest obszarem stosunkowo nowym. Kompozyty takie mogą być stosowane w warunkach przemysłowych, ze względu na mniejszą podatność na działanie środowiska (np. wilgoci) niż materiały lite. W obszarze tym, wytwarzanie, badanie właściwości i możliwości zastosowania kompozytów o anizotropii indukowanej w procesie wytwarzania, zarówno z wykorzystaniem pola magnetycznego, jak i naprężeń mechanicznych, jest obszarem niewątpliwie nowatorskim, o dużym znaczeniu zarówno z punktu widzenia badań podstawowych, jak i zastosowań technicznych.

Z tego względu temat pracy należy uznać za aktualny i ważny, zarówno z punktu widzenia badań podstawowych jak i stosowanych. Zakres pracy doktorskiej jest ambitny i świadczy o szerokim spektrum zainteresowań naukowych doktoranta.

### 3. Merytoryczna ocena pracy

W rozdziale drugim pracy dokonano analizy stanu wiedzy w zakresie podstaw teoretycznych związanych z fizycznymi aspektami zjawiska magnetostrykcji, metodami pomiaru oraz zaawansowanymi materiałami o gigantycznej magnetostrykcji i ich kompozytami. Przegląd jest szczegółowy i zawiera opis najnowszych osiągnięć w tym zakresie. W wykazie literatury zabrakło jednak fundamentalnej, polskiej pracy w tym zakresie – monografii prof. Z. Kaczkowskiego „Współczynniki piezomagnetyczne ferrytów magnetostrykcyjnych i ich histereza magnetyczna” IF PAN 1972.

Odnosnie tego rozdziału poproszę Autora o wyjaśnienie następujących zagadnień: Jak należy rozumieć pojęcie „idealnego odkształcenia magnetostrykcyjnego”? Dlaczego wyjaśniając związek między indukcją magnetyczną  $B$ , a odkształceniem magnetostrykcyjnym  $\lambda$ , Autor nie korzysta z zależności 2.24? Ponadto, stosując model Jilesa-Athertona (zależność 2.26), Doktorant stosuje równanie Langevina do opisu magnetyzacji bezhisterezowej  $M_{an}$ . Taki opis magnetyzacji bezhisterezowej może być stosowany wyłącznie dla materiałów izotropowych (Jiles D., Atherton D. “Theory of ferromagnetic hysteresis” J. Magn. Magn. Mater 61 (1986) 48-60, pierwszy akapit str. 51). Tymczasem, opracowane materiały cechują się znaczną anizotropią, wprowadzaną w procesie ich wytwarzania. Dlaczego Autor nie wykorzystał znanego rozszerzenia modelu Jilesa-Athertona umożliwiającego opis magnetyzacji bezhisterezowej z uwzględnieniem anizotropii osiowej (Ramesh A., Jiles D., Roderik J. “A model of anisotropic anhysteretic magnetization” IEEE Trans. Magn. 32, no. 5 (1996) 4234-4236)?

W rozdziale trzecim Doktorant zaproponował oryginalną metodę wytwarzania materiałów kompozytowych na bazie Terfenolu-D. Zrealizował także bardzo szeroki program badań właściwości funkcjonalnych opracowanych kompozytów, obejmujący zarówno pomiary magneto-mechaniczne, jak i badania mikrostruktury. Na szczególne podkreślenie zasługuje zastosowanie światłowodowych siatek Bragga do pomiaru odkształceń magnetostrykcyjnych.

W rozdziale 3.2.2.1. rozprawy Doktorant przedstawił budowę i schemat blokowy stanowiska do pomiaru magnetostrykcji próbek w kształcie walca. Wątpliwości budzi jednak sposób pomiaru natężenia pola magnesującego. Czy w trakcie pomiaru uwzględniono odmagnesowanie badanej próbki walcowej? Jakiego rzędu był współczynnik odmagnesowania i ile wynosiło natężenie pola magnetycznego w badanej próbce?

W rozdziale czwartym Doktorant zaproponował oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne magnetostrykcyjnego elementu wykonawczego wykorzystującego opracowane kompozyty. Rozdział obejmuje także szczegółowe wyniki badań opracowanego urządzenia oraz analizę

jego modelu parametrycznego. Doktorant zaproponował także oryginalne zastosowanie opracowanego urządzenia w zakresie inżynierii biomedycznej.

W rozdziale 4.2.2. Doktorant przedstawił model opracowanego elementu wykonawczego z zastosowaniem metody elementów skończonych. Autor nie wyjaśnił jednak, czy zastosowano model dwu, czy trójwymiarowy. Jeśli model był dwuwymiarowy, to w jaki sposób powiązano wyniki modelowania z trójwymiarowym obiektem rzeczywistym, o symetrii osiowej? Dlaczego Doktorant nie zdecydował się na zastosowanie otwartego oprogramowania umożliwiającego trójwymiarowe modelowanie układów magnetostatycznych metodą elementów skończonych, np. ELMER FEM?

Proszę także o wyjaśnienie zasady działania układu pomiarowego ze wzmacniaczem przyrządowym przedstawionym na rysunku 4.5. Jaka była niepewność tego pomiaru?

W rozdziale piątym Autor zaproponował układ pozyskiwania energii elektrycznej wytwarzanej na skutek działania zewnętrznej siły mechanicznej. Doktorant wykazał przewagę opracowanych kompozytów nad litym materiałem z Terfenolu-D w zakresie odporności mechanicznej. Opracowanie jest niewątpliwie oryginalne i może znaleźć zastosowanie praktyczne w cyfrowych układach bardzo małej mocy. Autor powinien jednak bardziej szczegółowo porównać możliwości pozyskania energii z opracowanego urządzenia, ze znanymi od lat układami piezoelektrycznymi.

Przedstawione uwagi mają charakter polemiczny i uzupełniający. Nie zmieniają one mojej wysokiej oceny wartości merytorycznej przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej.

#### 4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

W zakresie oceny redakcyjnej strony rozprawy, moje największe zastrzeżenia budzi fakt dość swobodnego wykorzystania przez Autora wtrąceń z języka angielskiego. Przykładem może być tu określenie „aktuator”, którego polskim odpowiednikiem jest „element wykonawczy”. Także określenie „energy harvesting” proponuję w przyszłości zastąpić zwrotem „pozyskiwanie energii elektrycznej”. Stosownie w tytułach rozdziałów zbitek w rodzaju „opis konstrukcji harwestera” należy uznać za błąd językowy. W wielu miejscach utrudnia to lekturę pracy. Proponuję w przyszłości używać określeń z języka polskiego, wskazując w razie potrzeby w nawiasie angielski odpowiednik.

Zastosowane w streszczeniu określenie „zaprogramowana magnetyczna struktura wewnętrzna” jest moim zdaniem błędne. Określenie „program” wiąże się z sekwencją działań. W tym przypadku możemy mówić o kształtowaniu charakterystyk użytkowych lub materiałach funkcjonalnych.

Zastosowane na stronie 111, (rys. 3. 26) określenie „Mapa dystrybucji pola magnetycznego” także nie jest poprawne. Proponuję użyć określenia „rozkład pola magnesującego”.



Moje wątpliwości budzi także sposób interpolacji przebiegów na wykresach, szczególnie na rysunkach 3.37, 3.53 i 3.68. Na rysunkach tych błędnie zastosowano interpolację liniową. Ponadto na rysunku 3.37 należy zaznaczyć niepewność pomiaru.

Na stronie 173 należy raczej użyć określenia „rezystancja wzorcowa”, a nie „opór wzorcowy”.

Natomiast na stronie 181, zamiast „możliwość aplikacji” proponuje poprawne określenie „możliwość zastosowania”.

Wskazane niedoskonałości redakcyjne pracy utrudniają w niektórych miejscach lekturę, jednak nie umniejszają jej wysokiej wartości merytorycznej.

## 5. Wniosek końcowy

Podsumowując szczegółową część opinii o rozprawie pana mgr inż. Rafała Mecha stwierdzam, że:

- Zagadnienie naukowe podjęte przez Doktoranta zostało wybrane i sformułowane prawidłowo.
- Cel pracy został przez Doktoranta osiągnięty. Realizacja założonych celów pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny naukowej „Mechanika”.
- Do rozwiązania tego problemu Doktorant skorzystał ze współczesnego dorobku naukowo-technicznego w zakresie obejmującym mechanikę, elektronikę i techniki modelowania matematycznego.
- Realizując pracę Doktorant wykazał się samodzielnością oraz umiejętnością organizowania badań doświadczalnych a także wiedzą o charakterze interdyscyplinarnym.
- Wyniki rozprawy poszerzają wiedzę o magnetomechanicznych właściwościach kompozytów na bazie proszków z materiału o gigantycznej magnetostrykcji, w tym kompozytów o anizotropii indukowanej w trakcie procesu wytwarzania.

Stwierdzam, iż rozprawa mgr inż. Rafała Mecha spełnia warunki Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki, oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ze względu na szerokie ujęcie zagadnienia, znacznie wykraczające poza typowy zakres pracy doktorskiej, oraz znaczny potencjał aplikacyjny opracowanych w ramach rozprawy doktorskiej rozwiązań technicznych, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Mecha.

