

Częstochowa, dn. 29.07.2024 r.

Dr hab. inż. Krzysztof Chwastek, prof. PCz
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Macieja Kachniarza pt.
**„Badanie efektu magnetośprężystego w obszarze Rayleigha w magnetykach amorficznych
i jego wykorzystanie do budowy sensorów naprężeń i sił”**

Promotor: dr hab. inż. Jacek Salach
Dziedzina: nauki inżynierijsko-techniczne
Dyscyplina: inżynieria mechaniczna

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Macieja Kachniarza, podstawę do sporządzenia recenzji stanowi pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, prof. dra hab. inż. Gerarda Cybulskiego sygn. WMt.521.04.2024 z dnia 17.06.2024 r., w którym znalazła się informacja o podjętej w dniu 5.06.2024 r. przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna PW uchwale o powołaniu mnie na recenzenta w./wym. rozprawy.

1. Charakterystyka pracy

1.1 Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana w formie książki o formacie zbliżonym do B5. Praca zawiera 312 stron. Jej struktura obejmuje streszczenie w języku polskim oraz angielskim, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli, dziewięć rozdziałów (Wstęp, Sensory naprężeń i sił, Analiza aktualnego stanu wiedzy, Przedmiot badań, Metodyka badań, Wyniki badań eksperymentalnych, Sensor magnetośprężysty z toroidalnym rdzeniem amorficznym magnesowanym w obszarze Rayleigha, Podsumowanie i wnioski końcowe, Kierunki dalszych badań), podziękowania oraz wykaz literatury, obejmujący 348 pozycji.

1.2 Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy została w jasny i przejrzysty sposób określona zarówno w tytule, jak też w samym tekście rozprawy. Praca dotyczy możliwości wykorzystania efektu magnetośprężystego Villariego, w literaturze polskiej określanego niekiedy mianem efektu piezomagnetycznego (str. 43), do opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych czujników sił i naprężeń. Zagadnienie to niewątpliwie wpisuje się w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna, konkretnie w jej dział związany z projektowaniem, budową i zasadą działania precyzyjnych przetworników sygnałów, jednak z uwagi na interdyscyplinarny charakter tej gałęzi wiedzy, której dotyczy rozprawa tj. mechatroniki, można znaleźć w niej fragmenty charakterystyczne dla opracowań z zakresu

Politechnika Częstochowska**Wydział Elektryczny**

al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

tel. +48 34 3250 822, e-mail: dziekanat@el.pcz.czyst.pl

www.el.pcz.pl

fizyki ciała stałego czy automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych. Autor rozprawy przeprowadził badania dotyczące trzech zagadnień:

- procesu przemagnesowania materiałów ferromagnetycznych w obszarze słabych pól magnetycznych, określanym jako obszar Rayleigha;
- magnetosprężystego efektu Villariego (odwrotnego efektu magnetostrykcyjnego);
- właściwości magnetycznych materiałów o strukturze amorficznej.

Autor stwierdza we wstępie, że wyżej wymienione zagadnienia były przedmiotem badań naukowych przez innych badaczy¹, jednak brak jest prób ich syntetycznego ujęcia, obejmującego wszystkie trzy powyższe zagadnienia².

1.3 Charakterystyka poszczególnych rozdziałów pracy

Wstęp zawiera szereg informacji i ciekawostek z zakresu historii badań nad magnetyzmem. Zawarto w nim ponadto informacje na temat perspektyw rozwoju globalnego rynku materiałów magnetycznie miękkich, jak też uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań badawczo-rozwojowych w zakresie badań właściwości ferromagnetyków, w szczególności materiałów o strukturze amorficznej. W tej części pracy autor przedstawił w syntetyczny sposób cel i zakres pracy. Rozprawa nie zawiera tezy, jaką autor podjął się udowodnić, jednak zgodnie z moją wiedzą,

w rozprawach bronionych na Politechnice Warszawskiej nie jest to element wymagany.

Rozdział drugi stanowi przegląd rozwiązań sensorów naprężeń i sił. Autor w syntetyczny sposób scharakteryzował zasadę działania tensometrów, sensorów piezoelektrycznych, pojemnościowych, optycznych oraz magnetosprężystych. W rozdziale zawarto informacje na temat czułości odkształceniowej wybranych czujników siły.

Rozdział trzeci jest bardzo obszerny (110 stron). Autor zawarł w nim informacje na temat wielkości opisujących pole magnetyczne w ośrodkach materialnych, procesu magnesowania na gruncie fizyki ciała stałego, opisał mechanizmy oddziaływań wymiennych, tworzenie się domen magnetycznych, krzywą magnesowania materiału ferromagnetycznego. Dokonał analizy aktualnego stanu wiedzy na temat początkowego fragmentu charakterystyki magnesowania tj. obszaru Rayleigha oraz na temat magnetosprężystego efektu Villariego, zjawisk anizotropii i magnetostrykcji. Obszerną część tego rozdziału stanowi próba sformułowania autorskiego opisu procesu przemagnesowania z uwzględnieniem efektów od w./wym. zjawisk. Opracowany model przypomina nieco znany formalizm Stonera-Wohlfartha. Należy podkreślić fakt, że zaproponowane przez autora koncepcje wykorzystane w opisie zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Istotną zaletą modelu jest możliwość jego zastosowania zarówno do materiałów o dodatnim, jak i ujemnym współczynniku

¹ w tym miejscu przychodzi mi na myśl monografia B. Augustyniaka „Zjawiska magnetosprężyste i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów”, seria monografie 38, Wyd. Pol. Gdańskiej, 2003

² wyżej wymieniona monografia dotyczy stali ferrytycznych stosowanych w krajowym przemyśle energetycznym i maszynowym

magnetostrykcji, poddanych jednoczesnemu oddziaływaniu pola magnetycznego, jak też naprężeń mechanicznych wprowadzanych bądź w kierunku zgodnym z kierunkiem pola, bądź w kierunku prostopadłym. W dalszej części rozdziału autor scharakteryzował materiały magnetyczne o strukturze amorficznej, przedstawił ich podstawowe właściwości, technologie ich wytwarzania oraz potencjalne zastosowania np. w rdzeniach transformatorów rozdzielczych. Bazując na pracach Kronmüllera i współpracowników autor dokonał krytycznej analizy możliwości adaptacji istniejących modeli magnesowania dla materiałów o strukturze polikrystalicznej do opisu właściwości magnetycznych i charakterystyk magnesowania rdzeni ze szkielec metalicznych. Autor zwrócił uwagę na specyficzne właściwości magnetyczne materiałów amorficznych wynikające z ich morfologii i wskazał, że możliwe jest osiągnięcie wyższej czułości magnetosprężystej dla sensorów wykonanych z tych materiałów.

Rozdział czwarty stanowi kompilację informacji na temat właściwości komercyjnie dostępnych taśm ze stopów amorficznych na bazie żelaza i kobaltu, które zostały wykorzystane przez autora w dalszych badaniach.

Rozdział piąty, podobnie, jak rozdział trzeci, charakteryzuje się dużą objętością (prawie sto stron). Autor zawarł w nim szczegółowe informacje na temat części eksperymentalnej rozprawy. Opisał metody wprowadzenia naprężeń do rdzeni cylindrycznych zwinianych z taśm amorficznych, następnie przedstawił proces przygotowania rdzeni (zwinianie rdzeni, wykonanie stabilizujących odlewów z kleju epoksydowego, montaż podkładek przenoszących naprężenia oraz wykonanie uzwojeń cewek magnesującej i pomiarowej. W rozdziale znalazły się informacje na temat efektywnych wielkości charakteryzujących magnetowód wraz z analizą metrologiczną (budżetem niepewności). Autor badał w pracy sześć rdzeni z materiałów amorficznych o różnym składzie chemicznym, tym samym o istotnie różniących się właściwościach magnetycznych i mechanicznych. Trzy z badanych materiałów rdzeniowych cechowały się znaczącą wartością współczynnika magnetostrykcji, natomiast trzy pozostałe wykazywały znikomo małą wartość tego współczynnika. Znaczącą część rozdziału stanowi opis zintegrowanego układu pomiarowego umożliwiającego jednoczesne wprowadzanie do badanych rdzeni pola magnetycznego i naprężeń mechanicznych oraz pomiar charakterystyk magnesowania. Opracowany zautomatyzowany system pomiarowy stanowi rozwinięcie klasycznej konstrukcji histerezoграfu magnetycznego z uwzględnieniem specyfiki wykonywania pomiarów w słabych polach magnesujących. Autor opisał szczegółowo budowę i zasadę działania poszczególnych bloków funkcjonalnych urządzenia tj. blok generacji sygnałów sterujących, blok magnesowania oraz blok akwizycji danych pomiarowych. Bloki te zostały połączone poprzez 32-bitowy mikroprocesorowy układ sterujący, współpracujący z komputerem PC z zainstalowanym oprogramowaniem kontrolno-pomiarowym (LabVIEW). Należy podkreślić, że autor przeprowadził szczegółową analizę budżetu niepewności pomiarów wykonywanych z użyciem zaprojektowanego układu. Końcowe podrozdziały tej części pracy dotyczyły opisu części mechanicznej systemu pomiarowego (układ wprowadzania i pomiaru naprężeń mechanicznych, sposób integracji części elektronicznej i mechanicznej oraz przebieg procedury pomiarowej, składającej się z pięciu etapów:

- wstępne scharakteryzowanie badanego rdzenia w obszarze nasycenia
- wyznaczenie maksymalnej amplitudowej przenikalności magnetycznej
- wyznaczenie granic obszaru Rayleigha
- pomiar charakterystyk magnetycznych badanych rdzeni w obszarze Rayleigha
- pomiar charakterystyk magnetoelastycznych badanych rdzeni w obszarze Rayleigha.

W rozdziale szóstym autor przedstawił wyniki badań eksperymentalnych dotyczących badanych rdzeni. Charakterystyki magnesowania (pętle histerezy $B = f(H)$) przy nasyceniu oraz zależności amplitudowej przenikalności magnetycznej w funkcji amplitudy pola magnetycznego ($\mu = f(H)$) przedstawił po ich pogrupowaniu (oddzielnie charakterystyki dla rdzeni z taśm na bazie żelaza, oddzielnie – dla taśm na bazie kobaltu). Na podstawie kryterium sformułowanego w rozdziale wcześniejszym autor dokonał wyznaczenia granic obszaru Rayleigha dla badanych rdzeni ze stopów amorficznych. Po wyznaczeniu wartości granicznych pola magnetycznego dokonał właściwych pomiarów charakterystyk magnesowania badanych rdzeni w obszarze Rayleigha, stosując zagęszczenie punktów pomiarowych (zmienność amplitudy pola magnesującego $\Delta H_m = 0,1$ A/m dla stopów na bazie żelaza oraz $\Delta H_m = 0,025$ A/m dla stopów na bazie kobaltu). Stwierdził, że zmierzone pętle histerezy dla rdzeni ze stopów na bazie kobaltu wykazywały pewne odstępstwa od oczekiwanego kształtu soczewkowatego (lancetowatego). Zaobserwowane odstępstwa stanowią przesłankę do dalszych badań.

W kolejnym etapie badań autor wyznaczył charakterystyki magnetoelastyczne $B(H)_\sigma$ i $B_m(\sigma)_{Hm}$ w obszarze Rayleigha dla badanych rdzeni. Stwierdził, że wszystkie badane stopy z wyjątkiem materiału METGLAS 2705 M wykazują charakterystyki odpowiadające materiałom ferromagnetycznym o dodatnich współczynnikach magnetostrykcji. Charakter obserwowanych zmian kształtu pętli histerezy dla rdzeni ze stopów żelaza jest zbliżony we wszystkich trzech przypadkach. Nieco zaskakujące wyniki badań autor uzyskał dla rdzenia ze stopu METGLAS 2605 CO, który teoretycznie powinien wykazywać największą wartość współczynnika magnetostrykcji (według producenta $\lambda_s = 35$ $\mu\text{m/m}$), natomiast w rzeczywistości cechował się stosunkowo niewielką wrażliwością naprężeniową. W celu wyznaczenia optymalnego zakresu pracy sensorów naprężeń i sił wykonanych z badanych stopów amorficznych autor określił zmiany maksymalnej indukcji magnetycznej B_m w funkcji wprowadzanych do materiału naprężeń ściskających σ_c przy ustalonej amplitudzie natężenia pola magnesującego H_m i wyznaczył czułość magnetoelastyczną badanych stopów.

Kolejny rozdział rozprawy dotyczy opracowania koncepcji sensora magnetoelastycznego pracującego w obszarze Rayleigha oraz opisuje wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych z wykorzystaniem prototypu sensora wykonanego ze stopu METGLAS 2065 S3A, który został przez autora wybrany z uwagi na najkorzystniejsze właściwości. Autor zaproponował układ pracy sensora w konfiguracji transformatorowej, co pozwoliło mu na dodatkowe zwiększenie czułości sensora.

Dwa ostatnie rozdziały pracy stanowią wnioski końcowe z badań wykonanych w ramach realizacji pracy oraz kierunki dalszych badań.

1.4 Główne osiągnięcia rozprawy

Politechnika Częstochowska

Wydział Elektryczny

al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

tel. +48 34 3250 822, e-mail: dziekanat@el.pcz.czyst.pl

www.el.pcz.pl



Do głównych osiągnięć autora należy zaliczyć:

- przeprowadzenie kompleksowej analizy magnetoelastycznego efektu Villaria w rdzeniach wykonanych z materiałów amorficznych, która pozwoliła na sformułowanie opisu matematycznego o dużym stopniu złożoności, uwzględniającego wpływ anizotropii magnetycznej oraz naprężeń mechanicznych na kształt charakterystyk magnesowania tych materiałów. Należy podkreślić, że opracowany przez autora rozprawy model jest oparty na formalizmie Stonera-Wohlfartha, uznawanego przez wielu badaczy za jedyny istniejący opis mający silne podstawy fizyczne. Godny podkreślenia jest fakt, że możliwe jest zastosowanie opracowanego przez autora modelu również do innych materiałów ferromagnetycznych np. klasycznych blach elektrotechnicznych o strukturze polikrystalicznej. Autor wykazał umiejętność prowadzenia prac o charakterze teoretycznym.
- wskazanie obszaru słabych pól magnesujących jako bardziej perspektywicznego wobec obszaru nasycenia w zastosowaniach aplikacyjnych przy konstrukcji sensorów;
- opracowanie koncepcji i realizacja praktyczna wspomaganego komputerowo stanowiska pomiarowego. Autor wykazał swoje kompetencje jako utalentowany inżynier-konstruktor, zarówno w pracy warsztatowej (przygotowanie próbek, opracowanie obwodu mechanicznego układu wprowadzania i pomiaru naprężeń mechanicznych), jak też jako projektant układów elektronicznych w systemie pomiarowym (m.in. biegła znajomość środowisk LabView, LT Spice, GNU Octave, języka C, w którym stworzył oprogramowanie mikrokontrolera);
- opracowanie metodyki badawczej pozwalającej na określenie granic obszaru Rayleigha oraz ocenę odkształcenia pętli od kształtu soczewkowatego (lancetowatego);
- przeprowadzenie pomiarów charakterystyk magnesowania i magnetoelastycznych dla szerokiego spektrum materiałów o strukturze amorficznej;
- opracowanie prototypowej konstrukcji magnetoelastycznego sensora sił i naprężeń w oparciu o materiał METGLAS 2605 S3A.

2. Uwagi merytoryczne i krytyczne

1. Strona 32 „Proces ten prowadzi więc do zmiany struktury domenowej ferromagnetyka i nie jest w pełni odwracalny – część zmian ma charakter trwały, co jest przyczyną występowania histerezy magnetycznej” – pytanie do autora, czy zamiast słowa „przyczyną” nie byłoby zasadne użycie słowa „istotą”?

Strona 40

2. „Powiązanie parametrów modelu z aspektami procesu magnesowania w ujęciu makroskopowym jest ewidentne. Jednak oddanie natury fizycznej procesu magnesowania, poprzez powiązanie parametrów modelu z mechanizmami magnesowania, jest bardziej problematyczne” – stwierdzenia autora są niezrozumiałe. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
3. „Na tej podstawie parametry modelu Rayleigha można powiązać z dwiema stałymi funkcji energii potencjalnej: odległością pomiędzy sąsiednimi minimami potencjału oraz odchyleniem standardowym rozkładu potencjału wokół minimum”. Proszę

o komentarz, czy wyżej wymienione wielkości są istotnie stałymi, czy może raczej parametrami występującymi w wyrażeniu na energię potencjalną. Czy energia potencjalna układu nie ulega zmianom w trakcie procesu przemagnesowania? Czy ma ona związek ze sprężystymi odkształceniami ścian domenowych, o których wspomina autor m.in. na stronie 32 rozprawy? Jakże jeszcze inne formy energii można rozpatrywać w procesie przemagnesowania?

4. Czy częstotliwość przemagnesowania ma wpływ na kształt charakterystyk magnesowania i magnetoosprężystych dla rozważanych w rozprawie rdzeni z materiałów amorficznych? Jeżeli tak, to czy możliwe jest uwzględnienie tego wpływu w zaproponowanym przez autora w rozdziale 3 modelu teoretycznym?
5. Strona 212 „Dla 251 punktów w całkowanym przebiegu, szerokość przedziału całkowania wynosi $dt = 1/(249 f)$ ”. Czy nie powinno być $1/(250 f)$?
6. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego dolna wartość natężenia pola magnetycznego jest różna dla różnych stopów przynależnych do tej samej klasy materiałów (chodzi mi np. o rysunek 6.13 b).
7. Proszę o komentarz dotyczący nagłych „szarpnięć” (zaburzeń monotoniczności) wyznaczonych charakterystyk magnetoosprężystych dla niektórych wartości amplitudy pola magnesującego (mam na myśli np. rysunek 6.23 b).
8. Uwaga krytyczna: z tekstu rozprawy (str. 276-277) można dowiedzieć się, że autor rozważał aproksymację wyznaczonej charakterystyki przetwarzania opracowanego prototypu sensora magnetoosprężystego wielomianem stopnia drugiego (zależność pokazana na rys. 7.3 jest ewidentnie nieliniowa, natomiast w pracy pokazano linię trendu wynikającą z zastosowania regresji liniowej). Szkoda, że autor nie pokazał dopasowania dla zależności parabolicznej. Autor powinien operować nie tylko współczynnikiem R^2 podczas oceny jakości dopasowania, wydaje mi się, że cenną informacją byłoby podanie wartości np. pierwiastka z sumy kwadratów odchyleń w poszczególnych punktach pomiarowych odniesionej do liczby rozważanych punktów pomiarowych.

3. Pozostałe uwagi dotyczące pracy

Rozprawa została przygotowana z dużą starannością, co jednak nie oznacza, że jest wolna od błędów. W szczególności można znaleźć w tekście szereg niezręcznych stylistycznie sformułowań:

Strona 12

- „Prowadzone eksperymenty skoncentrowano na wykazaniu istnienia w ferromagnetykach o strukturze amorficznej obszaru magnesowania zgodnego z opisem przedstawionym przez Rayleigha [18] ...”. Bardziej poprawna stylistycznie

Politechnika Częstochowska

Wydział Elektryczny

al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

tel. +48 34 3250 822, e-mail: dziekanat@el.pcz.czest.pl

www.el.pcz.pl

i odpowiadająca merytorycznej zawartości pracy wersja: „(Prze)prorowadzone eksperymenty miały na celu wykazanie, że charakterystyki magnesowania ferromagnetyków o strukturze amorficznej zawierają fragmenty, które są możliwe do opisanie za pomocą modelu Rayleigha [18] ...”

- „Zaproponowano metodę oceny potencjału sensorowego poszczególnych materiałów ...” – propozycja: „Zaproponowano metodę oceny poszczególnych materiałów do zastosowań w sensorach” – moim zdaniem nie ma czegoś takiego, jak „potencjał sensorowy”.

Strona 13 ostatnie zdanie: „Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość opracowania magnetosprężystego sensora naprężeń i sił o wysokiej czułości, co potwierdza opracowany prototyp sensora” będzie brzmieć bardziej poprawnie, jeśli zapiszemy „Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość opracowania magnetosprężystego sensora naprężeń i sił o wysokiej czułości, co potwierdza opracowanie prototypu sensora”.

Strona 22 „... liczne znane rozwiązania w zakresie kształtu rdzenia ...” – propozycja: „liczne znane rozwiązania dotyczące/(co do) kształtu rdzenia;

„Względem sensorów tensometrycznych istotną zaletą ...” – propozycja: „W odróżnieniu od/(porównaniu z) sensorów(ami) tensometrycznych(nymi) cechują się istotną zaletą ...”.

Strona 23 „... czułość sensora magnetosprężystego można zwiększyć odpowiednim doбором ...” – rusycyzm; lepiej będzie „... czułość sensora magnetosprężystego można zwiększyć poprzez odpowiedni dobór ...”.

Strona 24 „Niniejszy rozdział jest poświęcony omówieniu wyjściowego stanu wiedzy odnośnie poszczególnych zagadnień zarówno w ujęciu indywidualnym, jak i łącznym”. Zdanie niezrozumiałe, co autor rozumie pod pojęciem „ujęcia indywidualnego/łącznego”. Propozycja: „Niniejszy rozdział ma za zadanie przedstawienie obecnego stanu wiedzy na temat ...” (unikamy użycia słowa „omówienie” – przedstawiona praca ma przecież formę pisemną, niepotrzebne są tu słowa „wyjściowy” i „odnośnie”).

Strona 31 literówka – powinno być „zwany ścianą Néela”.

Strona 34 oraz 115 „Moc tracona przy przeprowadzeniu pojedynczego cyklu przemagnesowania (tzw. moc strat P_h) ...” – czasami w slangu inżynierskim używa się pojęcia „strat mocy”, ale nie „mocy strat”; chodzi o energię rozpraszaną na ciepło w jednostkowej objętości materiału, dla pojedynczego cyklu przemagnesowania jednostki, w których wyrażana jest ta wielkość to W/m^3 ; w użyciu jest też pojęcie „stratności” materiału, w literaturze polskiej i zachodniej wyrażanej w W/kg . Autor jest świadomy tego faktu, gdyż w dalszej części rozprawy używa poprawnego określenia, jednak moją rolą jest wskazanie lapsusu na w./wym. stronach.

Strona 40 „Néel opisał ów obszar funkcją zależności potencjału ...” – propozycja „Néel opisał ten obszar poprzez wprowadzenie zależności / za pomocą funkcji ...” – moim zdaniem „zależność” i „funkcja” są tutaj synonimami.

Strona 41 „Autor poświęcił też wiele uwagi wyjaśnieniu znanych z literatury nieścisłości odnośnie modelu Rayleigha” – niepotrzebne słowo „odnośnie”.

Strona 42 „Na podstawie przytoczonych źródeł można stwierdzić, że brak jest jednoznacznego powiązania modelu Rayleigha z mikroskopowymi procesami magnesowania, jednak sam model stanowi zadowalającą aproksymację zjawisk makroskopowych ...” – w zasadzie zdanie jest w porządku, słowo „aproksymację” autor użył w znaczeniu potocznym, a ma ono jeszcze inne znaczenie (w matematyce stosowanej). Uważam, że bardziej jednoznaczny byłby zapis „... sam model w satysfakcjonujący sposób opisuje zjawiska makroskopowe ...”.

Strona 43 Co autor miał na myśli pisząc „prace o charakterze artykułów naukowych”? Czy istnieją prace o charakterze popularnonaukowym lub beletrystyczne poświęcone tej tematyce? Czy nie lepiej było napisać wprost o „artykułach naukowych”?

Ostatnia linijka na tej stronie „opis (...) należy zatem traktować raczej jako pewne przybliżenie natury zjawiska, aniżeli jego dokładną i kompletną charakteryzację fizyczną” – niepoprawne użycie słowa „charakteryzację”, moim zdaniem lepiej byłoby użyć słowa „charakterystykę” lub jakiegoś synonimu.

Strona 48 „W stopach o strukturze amorficznej anizotropia magnetokrystaliczna, z uwagi na brak uporządkowania dalekiego zasięgu, zostaje zastąpiona przez znikomą uśrednioną anizotropię lokalną [251]” – lepiej: „W stopach o strukturze amorficznej anizotropia magnetokrystaliczna, z uwagi na brak uporządkowania dalekiego zasięgu, zostaje zastąpiona przez uśrednioną anizotropię lokalną, o znikomej wartości [251]”.

Strona 51 „Rozważane dotychczas składniki bilansu gęstości energii swobodnej ferromagnetyka można uznać za gęstość energii wewnętrznych próbek materiału ...” – lepiej: „Rozważane dotychczas składniki bilansu gęstości energii swobodnej ferromagnetyka można uznać za gęstość energii wewnętrznej próbki materiału ...”.

Strona 58 Wartość natężenia pola molekularnego rzędu $550 \cdot 10^6$ A/m podana za [68] wydaje się zbyt duża, proszę autora o komentarz.

Strona 61 Literówka „... mangetosttrykcyjne przetworniki elektromechaniczne [68]”

Strona 63 „Efektem jest wytworzenie w próbce nowych kierunków anizotropii magnetycznej, mogących stanowić osie łatwego lub trudnego magnesowania, odpowiednio zmniejszając lub zwiększając energię swobodną układu” – propozycja: „„Efektem jest wytworzenie w próbce nowych kierunków anizotropii magnetycznej, mogących stanowić osie łatwego lub trudnego magnesowania, co skutkuje odpowiednio zmniejszeniem lub zwiększeniem energii swobodnej układu”;

w poprzednim brzmieniu sens zdania był taki, że wielkością poddawaną manipulacjom była energia swobodna układu, czyli autor zamienił skutek z przyczyną.

Strona 69 „... uwzględniając dodatniość liczby Poissona ...” - może lepiej „... uwzględniając fakt, że liczba Poissona przyjmuje wartości dodatnie...” ?

Strona 72 „ Funkcję (3.110) można zwizualizować w formie powierzchni całkowitej gęstości energii swobodnej $w_s(\psi, \phi)$ ” – może lepiej: „Funkcję (3.110) można zwizualizować przedstawiając gęstość energii swobodnej jako funkcję dwóch parametrów $w_s(\psi, \phi)$ ”?

Strona 76 Zdanie „Dla konfiguracji równoległej $\psi = 0$, materiał w stanie $K_\sigma > 0$ ma potencjał do większej redukcji energii swobodnej i osiągnięcia większego przyrostu magnetyzacji” jest w zasadzie zrozumiałe, jednak autor powinien pamiętać, że pojęcie potencjału ma ściśle określone znaczenie w fizyce ciała stałego i elektrotechnice, więc jego pojawienie się może wprowadzać czytelnika w błąd. Propozycja: „Dla konfiguracji równoległej $\psi = 0$, w sytuacji gdy $K_\sigma > 0$ jest możliwe uzyskanie większej redukcji energii swobodnej i osiągnięcia większego przyrostu magnetyzacji ”

Strona 82 ostatnia linijka „ ... jest na tyle silne, by zdominować naprężenia $\pm\sigma_1$ ” – czy nie powinno być „ ... jest na tyle silne, by skompensować wpływ naprężeń $\pm\sigma_1$ ”?

Analogiczna uwaga strona 83 „ ... jego energia Zeemana jest w stanie zdominować anizotropię magnetosprężystą ...” – czy nie powinno być „ ... jego energia Zeemana jest w stanie skompensować wpływ anizotropii magnetosprężystej ...”?

Strona 94 wniosek z analizy opracowanego modelu, zapisany pogrubioną czcionką:

„W określonym polu magnesującym H_m zmiana indukcji magnetycznej B_m ferromagnetyka pod wpływem naprężeń σ o ustalonym charakterze będzie odwrotna w przypadku wprowadzenia owych naprężeń równolegle lub prostopadle do kierunku pola, ale dla naprężeń wprowadzonych prostopadle będzie większa.”

Proponuję rozbić na dwa, trzy zdania i uprościć ich strukturę, np.

„Zmiana indukcji magnetycznej B_m ferromagnetyka poddanego magnesowaniu polem H_m pod wpływem naprężeń σ będzie zależęć od kierunku wprowadzenia naprężeń względem kierunku pola. Zmiana ta będzie przyjmować większe wartości, gdy naprężenia będą wprowadzane prostopadle do kierunku pola w stosunku do przypadku, gdy będą one wprowadzane równolegle. Przypadki, gdy naprężenia są wprowadzane w kierunku zgodnym i prostopadłym do kierunku pola, mają charakter komplementarny.”

Strona 96 zdanie pod rysunkiem 3.25 „ ... widać odwrotność zachowania materiału ...” - proponuję „ ...jakościowo różne zachowanie się materiału dla poszczególnych konfiguracji”.

Autor w wielu miejscach rozprawy, np. na stronie 106 używa slangu inżynierskiego pisząc o rdzeniach toroidalnych. Formalnie mówiąc, rdzenie zwijane z taśm mają kształt cylindra.

Strona 282 literówka „ ... określono jego granie w badanych materiałach” – powinno być „granice”.

Poz. [280] w spisie literatury – zniknęło nazwisko jednego ze współautorów pracy (Švec, P. (senior)).

Przedstawione powyżej uwagi **nie umniejszają** w żaden sposób wartości opiniowanej pracy.

4. Ocena końcowa

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska Pana mgra inż. Macieja Kachniarza „Badanie efektu magnetosprężystego w obszarze Rayleigha w magnetykach amorficznych i jego wykorzystanie do budowy sensorów naprężeń i sił” **spełnia wymagania** stosownej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wysokie kompetencje doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych zostały jednoznacznie potwierdzone w tekście rozprawy, która wskazuje na znaczącą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne predestynujące do ubiegania się o stopień naukowy doktora nauk technicznych. Wnioskuje o **dopuszczenie** rozprawy do publicznej obrony.

5. Wniosek o wyróżnienie pracy

Biorąc pod uwagę wysoką wartość merytoryczną rozprawy oraz opublikowanie części wyników rozprawy w renomowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej, m.in. w pracy M. Kachniarz, J. Salach, „Characterization of magnetoelastic properties of Ni–Zn ferrite in wide range of magnetizing fields for stress sensing applications”, Measurement 168 (2021) 108301 (Impact Factor za rok 2021 5.131) składam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Macieja Kachniarza.