



**Prof. zw. dr hab. inż. Janusz Mroczka, czł. rzecz. PAN, dr h.c. (mult.)**

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej  
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów  
Politechniki Wrocławskiej  
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław  
tel. +48 71 321 12 47  
+48 71 320 62 32  
fax: +48 71 321 42 77  
e-mail: janusz.mroczka@pwr.edu.pl

Wrocław, 7.09.2024

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Kachmiarza

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

Niniejsza recenzja została przygotowana na prośbę Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Gerarda Cybulskiego – wyrażoną w piśmie o sygnaturze WMb 521.04.2024 z dnia 17.06.2024 r.

### 1. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Przedłożona rozprawa doktorska pt. „Badanie efektu magnetośprężystego w obszarze Rayleigha w magnetykach amorficznych i jego wykorzystanie do budowy sensorów naprężeń i sił” liczy 312 stron i zawiera 9 rozdziałów stanowiących integralną całość. W tekście zamieszczono 105 rysunków oraz 35 tabel. W ramach rozprawy przedstawiono analizę stanu wiedzy w odniesieniu do zagadnień składowych tematu rozprawy oraz opis opracowanej przez autora metodyki badań i wyniki przeprowadzonych badań własnych, które stanowią realizację podjętej tematyki badawczej.

W **rozdziale 1** zidentyfikowano trzy zagadnienia składowe tematu rozprawy, zaznaczając brak ich syntetycznego ujęcia w dotychczasowym stanie wiedzy. Przedstawiono tło historyczne badań nad magnetycznymi właściwościami materii, od pierwszych obserwacji dokonywanych w starożytności, po współczesne dokonania związane z odkryciem ferromagnetyków, stanowiących jedną z najnowszych klas materiałów magnetycznie miękkich. Rozdział zawiera również krótką analizę współczesnego rynku materiałów magnetycznie miękkich, wykazującego stabilną tendencję wzrostową. Analiza ta, wraz z przytoczonymi danymi odnośnie liczby publikacji związanych z tematyką magnetyków amorficznych, stanowi uzasadnienie podjęcia omówionej w rozprawie tematyki badawczej. W podrozdziale 1.1 zidentyfikowano cele pracy w aspekcie podstawowym i użytkowym, jak również zdefiniowano jej zakres.

**Rozdział 2** zawiera przegląd znanych rozwiązań w zakresie pomiarów naprężeń i sił, uwzględniający najważniejsze rodzaje sensorów, w tym: tensometryczne (metalowe i półprzewodnikowe), piezoelektryczne, pojemnościowe, optyczne oraz magnetosprężyste. Dla każdego rodzaju sensorów przedstawiono pokrótce zasadę działania oraz omówiono najważniejsze wady i zalety. Podsumowanie rozdziału stanowi opracowana na podstawie danych literaturowych klasyfikacja poszczególnych rodzajów sensorów naprężeń i sił pod względem czułości odkształceniowej.

**Rozdział 3** zawiera analizę aktualnego stanu wiedzy odnośnie magnetycznych właściwości materii oraz zagadnień składowych tematu rozprawy. W podrozdziale 3.1 zdefiniowano najważniejsze wielkości fizyczne opisujące właściwości magnetyczne materiałów, którymi autor posługuje się w dalszej części pracy. Podrozdział 3.2 zawiera analizę zjawiska ferromagnetyzmu, poczynając od procesów zachodzących na poziomie atomowym. Następnie autor przytacza teorię pola molekularnego Weissa, model Heisenberga oraz koncepcję ścian domenowych, jako współczesny opis ferromagnetyzmu. W końcowej części podrozdziału autor omawia przebieg krzywej magnesowania pierwotnego ferromagnetyka z podziałem na pięć charakterystycznych obszarów, w tym tzw. obszar Rayleigha, co stanowi wstęp do podrozdziału 3.3. W podrozdziale tym omówiona została specyfika obszaru Rayleigha, w tym charakterystyczny soczewkowaty kształt pętli histerezy magnetycznej. Przytoczono oparty na wielomianach stopnia drugiego model histerezy Rayleigha, stanowiący pierwszy historycznie model zjawiska histerezy magnetycznej. Omówiono poszczególne



aspekty modelu oraz przedstawiono znane w literaturze uwagi krytyczne odnośnie opisu Rayleigha.

Podrozdział 3.4 został poświęcony analizie efektu magnetosprężystego. W początkowej części przytoczono najważniejsze prace związane z omawianym zagadnieniem, podkreślając brak pełnego i spójnego opisu fizycznego rozważanego zjawiska. Podrozdział 3.4.1 służy omówieniu bilansu całkowitej energii swobodnej ferromagnetyka, na gruncie którego rozpatrywany jest efekt magnetosprężysty. Autor scharakteryzował poszczególne składniki bilansu oraz zidentyfikował najważniejsze źródła anizotropii magnetycznej. W podrozdziale 3.4.2 omówiono efekt magnetostrykcyjny, uwzględniający zmianę wymiarów geometrycznych próbki ferromagnetyka poddanej wpływowi pola magnesującego. Podkreślono fundamentalną rolę magnetostrykcji w analizie efektu magnetosprężystego. Podrozdział 3.4.3 zawiera obszerną analizę efekty magnetosprężystego w materiałach ferromagnetycznych. Przytoczono znane z literatury rozważania odnośnie fizycznych źródeł zmian stanu magnetycznego ferromagnetyka pod wpływem przyłożonych naprężeń, w tym analizę stanu energetycznego materiału poddanego wpływowi naprężeń w zależności od znaku stałej anizotropii magnetosprężystej. Na gruncie przedstawionych danych literaturowych autor sformułował rozwinięcie opisu energetycznego efektu magnetosprężystego dla dowolnej konfiguracji kierunku wprowadzenia pola magnesującego i naprężeń, w szczególności dla konfiguracji równoległej i prostopadłej. Przedstawiona analiza zmian energii swobodnej prowadzi do opisu objaśniającego przebieg charakterystyk magnetosprężystych zmian maksymalnej indukcji magnetycznej w funkcji naprężeń. Sformułowany opis wyjaśnia odmienne zachowanie ferromagnetyka poddanego wpływowi naprężeń równoległych i prostopadłych do kierunku pola magnesującego. Dokonaną analizę poparto wynikami badań eksperymentalnych zaczerpniętymi z literatury źródłowej, w tym z własnych publikacji autora rozprawy. W końcowej części podrozdziału 3.4.3 autor wskazuje braki w opracowanym opisie, formułując jednocześnie hipotezy pozwalające na ich uzupełnienie. Weryfikacja owych hipotez nie została jednak zawarta w przedłożonej rozprawie. Podrozdział 3.4.4 stanowi podsumowanie rozważań prowadzonych w odniesieniu do efektu magnetosprężystego oraz uwagi odnośnie konstrukcji sensora naprężeń i sił wykorzystującego omawiane zjawisko.

W podrozdziale 3.5 omówiono ferromagnetyczne stopy amorficzne jako jedną z najnowszych klas materiałów magnetycznie miękkich. Omówiono pokrótce historię prac nad

rozwojem ferromagnetyków amorficznych oraz wskazano najważniejsze kierunki badań podejmowanych w literaturze źródłowej. W podrozdziale 3.5.1 omówiono ogólne właściwości fizykochemiczne stopów amorficznych, w tym właściwości mechaniczne i elektryczne. Podrozdział 3.5.2 służy przedstawieniu najważniejszych postaci, w jakich występują stopy amorficzne, w tym taśm stanowiących przedmiot badań, oraz metod ich wytwarzania. Wskazano również najważniejszych producentów magnetycznych stopów amorficznych. W podrozdziale 3.5.3 umiejscowiono badane stopy amorficzne metali przejściowych w klasyfikacji materiałów magnetycznie miękkich, przedstawiając również ich właściwości magnetyczne na tle konwencjonalnych materiałów o strukturze krystalicznej. Następnie scharakteryzowano najważniejsze rodzaje stopów amorficznych metali przejściowych w zależności od dominującego składnika stopowego. Podano również przykłady zastosowań poszczególnych rodzajów omawianych stopów. Podrozdział 3.5.4 poświęcono omówieniu procesu magnesowania stopów amorficznych metali przejściowych ze szczególnym uwzględnieniem roli lokalnej anizotropii przypadkowej zastępującej w omawianych materiałach anizotropię magnetokrystaliczną znaną z materiałów konwencjonalnych. Autor wykazuje znacznie mniejszą rolę anizotropii lokalnej w procesie magnesowania w porównaniu do anizotropii magnetokrystalicznej, co uzasadnia możliwość pominięcia jej w bilansie energii swobodnej stopów amorficznych. Podrozdział 3.5.5 stanowi syntetyczne ujęcie danych literaturowych odnośnie wpływu naprężeń wewnętrznych powstających w procesie produkcyjnym stopów amorficznych na ich właściwości magnetyczne. Zagadnienie to jest szczególnie istotne z punktu widzenia badań właściwości magnetoelastycznych omawianych materiałów. Autor dokonał podsumowania licznych badań Kronmüllera związanych z formowaniem się obszarów naprężeń wewnętrznych w procesie odlewania taśm amorficznych. W podrozdziale 3.5.6 omówiono pokrótce proces obróbki cieplnej stopów amorficznych, w tym możliwość wprowadzenia anizotropii magnetycznej indukowanej polem magnetycznym lub naprężeniami.

Podrozdział 3.6 stanowi skrótowe podsumowanie dokonanej analizy stanu wiedzy. Wyróżniono najważniejsze informacje, istotne dla interpretacji uzyskanych wyników badań własnych.

Przedmiot prowadzonych badań stanowią taśmy wybranych stopów amorficznych dostępne komercyjnie. Ich omówienia dokonano w rozdziale 4. Do badań wybrano sześć stopów amorficznych o zróżnicowanym składzie chemicznym. Materiały zróżnicowane są



przede wszystkim poprzez dominujący składnik stopowy oraz związany z nim współczynnik magnetostrykcji. Trzy spośród badanych materiałów stanowią stopy amorficzne żelaza o znaczącej magnetostrykcji dodatniej. Pozostałe trzy są stopami kobaltu o magnetostrykcji bliskiej zeru.

W **rozdziale 4** podano również podstawowe właściwości fizykochemiczne badanych stopów amorficznych, w tym parametry magnetyczne według specyfikacji producentów.

**Rozdział 5** stanowi opis opracowanej przez autora metodyki badawczej. W podrozdziale 5.1 sformułowano wymogi odnośnie rdzenia magnetycznego do badań magnetosprężystych. Podrozdział 5.1.1 przedstawia znane metody wprowadzania naprężeń do rdzeni z materiałów magnetycznych, w tym do rdzenia toroidalnego. Metoda ta została zaadaptowana na potrzeby prowadzonych badań, co omówiono w podrozdziale 5.1.2. Podrozdział 5.2 poświęcono omówieniu procesu wytworzenia z taśm amorficznych rdzeni do badań magnetosprężystych (podrozdział 5.2.1) oraz charakteryzacji ich parametrów geometrycznych i oszacowaniu niepewności ich wyznaczenia (podrozdział 5.2.2). Podrozdział 5.3 przedstawia ogólną koncepcję systemu pomiarowego w formie schematu blokowego, w którym wydzielono część elektroniczną oraz mechaniczną. Omówiono ogólną zasadę działania systemu, w tym równania pozwalające wyznaczyć wartość pola magnesującego, indukcji magnetycznej oraz wprowadzonych naprężeń.

Podrozdział 5.4 stanowi szczegółowy opis zautomatyzowanego systemu pomiaru charakterystyk magnetycznych w słabych polach magnesujących (część elektroniczna systemu pomiarowego), opracowanego przez autora na potrzeby prowadzonych badań. W podrozdziale 5.4.1 sformułowano wstępne założenia projektowe oraz omówiono szczegółową strukturę systemu z podziałem na 4 główne bloki funkcjonalne: blok generacji sygnałów sterujących, blok magnesowania, blok akwizycji danych pomiarowych oraz mikroprocesorowy układ sterowania. Szczegółową konstrukcję poszczególnych bloków omówiono w podrozdziałach 5.4.2-5.4.5. Autor przedstawił schematy elektroniczne poszczególnych podzespołów, omawiając ich zasadę działania oraz uzasadniając dobór handlowych elementów elektronicznych. Poziom szczegółowości przedstawionego opisu umożliwia odtworzenie konstrukcji systemu pomiarowego w celu ewentualnej weryfikacji przez niezależny ośrodek badawczy. Podrozdział 5.4.6 poświęcono omówieniu wybranych zagadnień związanych z opracowanym w środowisku LabVIEW oprogramowaniem kontrolno-pomiarowym, odnoszących się przede wszystkim do metod przetwarzania danych

pomiarowych. W podrozdziale 5.4.7 omówiono montaż systemu pomiarowego, w tym wytworzone obwody PCB, oraz przedstawiono wyniki pomiarów testowych, weryfikujące poprawność działania opracowanego rozwiązania. W podrozdziale 5.4.8 przedstawiano wybrane właściwości użytkowe systemu pomiarowego, w tym zgrubne oszacowanie niepewności pomiaru prądu magnesowania oraz napięcia indukowanego. Na ich podstawie dokonano również próby oszacowania niepewności pomiaru pola magnesującego i indukcji magnetycznej dla wybranego rdzenia magnetycznego, wykorzystując oszacowane w podrozdziale 5.2.2 niepewności wyznaczenia jego parametrów geometrycznych.

W podrozdziale 5.5 omówiono strukturę mechaniczną układu wprowadzania i pomiaru naprężeń ściskających do rdzeni toroidalnych z taśm amorficznych oraz oszacowano niepewność wyznaczenia wartości oddziałujących naprężeń dla poszczególnych rdzeni. Podrozdział 5.6 służy przedstawieniu kompletnego systemu pomiarowego wykorzystywanego w prowadzonych badaniach. W podrozdziale 5.7 autor omówił przyjętą ogólną procedurę pomiarową, stosowaną w trakcie pomiarów dla poszczególnych badanych stopów amorficznych.

W **rozdziale 6** przedstawiono wyniki własnych badań eksperymentalnych autora pracy przeprowadzonych według zaproponowanej procedury pomiarowej. Podrozdział 6.1 dotyczy charakteryzacji badanych stopów amorficznych w silnych polach magnesujących, zbliżonych do obszaru nasycenia magnetycznego. Wyznaczono podstawowe parametry magnetyczne: indukcję maksymalną, względną przenikalność magnetyczną, pole koercji oraz indukcję remanencji, stanowiące w dalszej części rozdziału odniesienie dla wyników uzyskiwanych w obszarze słabych pól magnesujących. Następnie autor zaproponował metodykę wyznaczenia zakresu pól magnesujących odpowiadającego obszarowi Rayleigha w badanych stopach amorficznych, opartą na aproksymacji liniowej zmian względnej przenikalności magnetycznej w funkcji amplitudy pola magnesującego. Metoda ma charakter kolejnych przybliżeń, z których pierwsze stanowi wyznaczenie wartości pola magnesującego odpowiadającego maksimum względnej przenikalności magnetycznej, dokonane w podrozdziale 6.2. Następnie w zakresie ograniczonym wyznaczoną wartością pola autor badał liniowość zmian przenikalności magnetycznej w funkcji amplitudy pola magnesującego, przyjmując jako granicę obszaru Rayleigha amplitudę pola, przy której współczynnik determinacji dopasowania liniowego osiąga wartość poniżej 0,9. Stanowi to przedmiot podrozdziału 6.3.



Wyznaczone wartości graniczne pola magnesującego są niższe, niż raportowane w literaturze źródłowej, co autor tłumaczy odmienną metodyką ich wyznaczenia.

Podrozdział 6.4 przedstawia wyniki badań charakterystyk magnetycznych nieobciążonych rdzeni amorficznych w wyznaczonym zakresie pól magnesujących odpowiadających obszarowi Rayleigha. W podrozdziale 6.4.1 przedstawiono charakterystyki przemagnesowania poszczególnych badanych stopów amorficznych dla amplitud pola magnesującego zawierających się w obszarze Rayleigha. Natomiast podrozdział 6.4.2 przedstawia wyniki badania zmienności parametrów magnetycznych poszczególnych stopów amorficznych w funkcji amplitudy pola magnesującego. Tym samym autor przedstawił kompletne charakterystyki magnetyczne badanych stopów amorficznych w obszarze Rayleigha, nieprezentowane dotychczas w literaturze źródłowej.

W podrozdziale 6.5 przedstawiono właściwe wyniki badań charakterystyk magnetosprężystych rozpatrywanych stopów amorficznych w obszarze Rayleigha. Podrozdział ten podzielono na trzy części. W podrozdziale 6.5.1 omówiono wpływ wprowadzonych naprężeń ściskających na charakterystyki przemagnesowania badanych stopów, obrazujące zmiany pętli histerezy magnetycznej wywołane oddziaływaniem naprężeń. Podrozdział 6.5.2 przedstawia charakterystyki zmian maksymalnej indukcji magnetycznej badanych materiałów w funkcji wprowadzonych naprężeń ściskających dla ustalonych wartości amplitudy pola magnesującego. Charakterystyki te są istotne z punktu widzenia potencjalnego zastosowania sensorowego wyników badań. Aspekt ten podkreślono w podrozdziale 6.5.3, poświęconym wyznaczeniu czułości magnetosprężystej badanych stopów amorficznych oraz określeniu liniowości obserwowanych pod wpływem naprężeń zmian maksymalnej indukcji magnetycznej. Autor przedstawił zmiany czułości magnetosprężystej i liniowości charakterystyk magnetosprężystych w funkcji amplitudy pola magnesującego, co umożliwiło określenie optymalnych warunków magnesowania rdzenia magnetosprężystego sensora naprężeń i sił. Na podstawie uzyskanych wyników autor wskazał stop METGLAS 2605 S3A jako materiał o największym potencjale aplikacyjnym w odniesieniu do sensora magnetosprężystego. W polu magnesującym o amplitudzie 3,2 A/m stop ten osiąga względną czułość magnetosprężystą 0,223 1/MPa, znacznie przewyższającą wartości notowane zarówno dla stopów amorficznych magnesowanych w silnych polach magnetycznych, jak i ferrytów magnesowanych w obszarze Rayleigha, przytoczone przez autora na podstawie literatury źródłowej. Stanowi to potwierdzenie głównego założenia pracy o możliwości uzyskania

wysokiej czułości magnetosprężystej w stopach amorficznych magnesowanych w obszarze Rayleigha. Przedstawione wyniki badań właściwości magnetosprężystych wybranych stopów amorficznych w obszarze Rayleigha stanowią unikatowe osiągnięcie autora, nieznane dotychczas w literaturze źródłowej. Podrozdział 6.6 stanowi syntetyczne podsumowanie uzyskanych wyników badań własnych autora pracy.

**Rozdział 7** poświęcono opracowaniu prototypu sensora magnetosprężystego naprężeń i sił z toroidalnym rdzeniem amorficznym magnesowanym w obszarze Rayleigha. Rdzeń wykonany jest ze stopu amorficznego METGLAS 2605 S3A, wskazanego w podrozdziale 6.5.3 jako materiał o największym potencjale aplikacyjnym. Przytoczono dwa znane rozwiązania odnośnie konfiguracji przetwornika, dokonując wyboru konfiguracji transformatorowej. W podrozdziale 7.1 przedstawiono ogólną koncepcję toru przetwarzania projektowanego sensora naprężeń i sił wskazując, że pomiar wartości skutecznej napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym rdzenia może wpłynąć na dodatkowy wzrost czułości sensora. Podrozdział 7.2 przedstawia szczegółową koncepcję układu przetwarzania oraz dobór parametrów pracy sensora. W podrozdziale 7.3 autor przedstawił charakterystykę przetwarzania zaprojektowanego sensora oraz wyznaczył względną czułość magnetosprężystą w odniesieniu do przyłożonej siły oraz wprowadzonych przez nią naprężeń. Zgodnie z założeniami, czułość naprężeniowa wynosząca  $0,334 \text{ 1/MPa}$  przewyższa czułość magnetosprężystą samego rdzenia, wyznaczoną w podrozdziale 6.5.3. Mimo wysokiej czułości, opracowane rozwiązanie wykazuje znaczne odchyłania standardowe w poszczególnych punktach pomiarowych, co może stanowić istotną przeszkodę w wykorzystaniu sensora. Podrozdział 7.4 stanowi podsumowanie części aplikacyjnej pracy, w którym autor wskazuje potencjalne możliwości zmniejszenia zmienności wskazań sensora w kolejnych seriach pomiarowych. Proponowane rozwiązania wymagają jednak dalszych badań.

**Rozdział 8** stanowi podsumowanie rozprawy. Autor przedstawił skrótowo rezultaty osiągnięte w ramach realizowanych badań oraz sformułował wnioski końcowe odnośnie możliwości wykorzystania toroidalnych rdzeni amorficznych magnesowanych w obszarze Rayleigha w konstrukcji magnetosprężystego sensora naprężeń i sił.

W **rozdziale 9** wskazano potencjalne kierunki dalszych badań, zarówno w aspekcie podstawowym, jak i aplikacyjnym. Praca zakończona jest spisem literatury źródłowej, zawierającym 348 pozycji.



## 2. Ocena oryginalności i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Elementami oryginalnymi zaprezentowanymi przez Autora jest:

1. Dokonanie opisu fizycznego magnetośprężystego efektu Villariego, gdzie autor zaproponował oparty na teorii Stonera-Wohlfartha model energetyczny efektu magnetośprężystego uwzględniający wpływ kierunku wprowadzenia naprężeń względem kierunku pola magnesującego na charakterystyki magnetośprężyste materiału. Rozpatrzono dwie najistotniejsze konfiguracje kierunków: równoległą i prostopadłą, co pozwoliło objaśnić charakter wyników uzyskanych w ramach badań własnych.

Przeprowadzona analiza pozwoliła uzupełnić znane z literatury modelowe charakterystyki magnetośprężyste  $B(\sigma)$ - $H_m$  materiałów o magnetostrykcji dodatniej i ujemnej o przypadek konfiguracji prostopadłej.

Przytoczone w pracy wyniki eksperymentalne wykazują w aspekcie jakościowym zgodność z zaproponowanym modelem. Model wymaga jednak uzupełnienia, przede wszystkim w zakresie opisu zmienności magnetostrykcji materiału pod wpływem naprężeń.

2. Opis wpływu naprężeń wewnętrznych powstających w procesie wytwarzania na właściwości magnetyczne stopów amorficznych metali przejściowych.

Dokonano syntetycznego podsumowania badań Kronmüllera omówionych w licznych publikacjach. Pozwoliło to sformułować logiczny ciąg przyczynowo-skutkowy, opisujący pochodzenie i rolę powstających w procesie wytwarzania naprężeń wewnętrznych w kształtowaniu stanu magnetycznego stopów amorficznych metali przejściowych. Ujęto również wpływ tych naprężeń na proces magnesowania w słabych polach magnesujących (obszar Rayleigha). Przytoczono również współczesne prace [41, 42], potwierdzające poprawność opisu Kronmüllera. Dokonane usystematyzowanie stanu wiedzy wykorzystano w interpretacji uzyskanych rezultatów badań własnych.

3. Opis wytwarzania rdzeni do badań magnetośprężystych i metody wprowadzania naprężeń.

Autor zaprezentowało opracowaną szczegółową, powtarzalną procedurę wytwarzania rdzeni toroidalnych z taśm amorficznych do badań magnetośprężystych.

Zaadaptował znaną metodę wprowadzania naprężeń w postaci umożliwiającą zarówno ściskanie, jak i rozciąganie osiowe rdzeni toroidalnych [278] (badania własne ograniczono do wpływu naprężeń ściskających).

4. Opis opracowanego systemu do pomiaru charakterystyk magnetycznych w słabych polach magnesujących.

Autor zaprojektował i wykonał system pomiaru charakterystyk magnetycznych w słabych polach magnesujących. Opracowany system dostosowano przede wszystkim do specyfiki pomiarów rdzeni pierścieniowych z taśm amorficznych, jednak szeroki zakres uzyskiwanych prądów magnesowania oraz mierzonych napięć indukowanych pozwala również na prowadzenie badań innych materiałów magnetycznie miękkich (stopy nanokrystaliczne, ferryty, miękkie stopy żelaza). Osiągnięte właściwości użytkowe nieznacznie ustępują rozwiązaniom komercyjnym, jednak pozwoliły na przeprowadzenie zaplanowanych badań.

Opracował autorskie oprogramowanie do akwizycji, przetwarzania, wizualizacji i archiwizacji danych pomiarowych, wspomagające prowadzenie badań.

5. Opis opracowanego systemu pomiarowego do badania charakterystyk magnetoelastycznych materiałów magnetycznie miękkich w słabych polach magnesujących

Połączenie opracowanego systemu pomiaru charakterystyk magnetycznych w słabych polach magnesujących (warstwa elektroniczna) oraz układu wprowadzania i pomiaru naprężeń mechanicznych (warstwa mechaniczna) pozwoliło uzyskać unikatowy system pomiarowy umożliwiający realizację planowanych badań.

6. Wyznaczenia zakresu pól magnesujących odpowiadającego obszarowi Rayleigha w stopach amorficznych metali przejściowych.

Przedstawiono metodykę określenia wartości granicznych pola magnesującego odpowiadających obszarowi Rayleigha w badanych stopach amorficznych metali przejściowych. Metodykę oparto na iteracyjnej regresji liniowej zależności względnej przenikalności magnetycznej od amplitudy pola magnesującego oraz ocenie zgodności kształtu pętli histerezy magnetycznej z opisem Rayleigha. Wyznaczone granice stanowią 0,15-0,3 wartości nasyceniowego pola koercji  $H_{csat}$ , plasując się poniżej wartości szacowanych przez K. Kronmüllera [172, 175]. Są też wyraźnie niższe od wartości wyznaczonych w pracy [142] dla stali konstrukcyjnych i ferrytów Ni-Zn.



7. Opis właściwości magnetycznych stopów amorficznych metali przejściowych w obszarze Rayleigha

Przeprowadzono pomiary pełnych charakterystyk magnetycznych sześciu wybranych stopów amorficznych METGLAS i VITROVAC (3 stopy żelaza i 3 stopy kobaltu) w obszarze Rayleigha, w tym:

- charakterystyk przemagnesowania,
- zmienności parametrów magnetycznych w funkcji amplitudy pola magnesującego.

8. Opis właściwości magnetosprężystych stopów amorficznych metali przejściowych w obszarze Rayleigha.

Badane stopy amorficzne metali przejściowych poddano wpływowi naprężeń ściskających w zakresie 0-10 MPa. Wyznaczono charakterystyki magnetosprężyste materiałów, w tym:

- wpływ naprężeń ściskających na charakterystyki przemagnesowania  $B(H)\sigma$ ,
- wpływ naprężeń na maksymalną indukcję magnetyczną  $B(\sigma)\sim H_m$ .

Uzyskane rezultaty są unikatową próbą charakteryzacji właściwości magnetosprężystych stopów amorficznych metali przejściowych w obszarze Rayleigha, nieznaną w literaturze źródłowej.

9. Badanie czułości magnetosprężystych badanych stopów amorficznych metali przejściowych.

Na podstawie zbadanych charakterystyk  $B(\sigma)\sim H_m$  określono czułość magnetosprężystą badanych stopów amorficznych metali przejściowych w obszarze Rayleigha. Pod kątem potencjalnej aplikacji sensorowej dokonano również oceny liniowości zbadanych charakterystyk.

Czułość magnetosprężysta badanych stopów zdecydowanie przewyższa wartości odnotowywane w obszarze silnych pól magnesujących, wyznaczone w pracy [304]. W przypadku stopu 2605 SA1 możliwe jest bezpośrednie porównanie z wynikami pracy [304], które wskazuje, że dla stopu amorficznego żelaza w stanie surowym czułość magnetosprężysta w obszarze Rayleigha przewyższa nawet czułość tego samego stopu poddanego obróbce cieplnej magnesowanego w obszarze silnych pól.

Na podstawie uzyskanych rezultatów wskazano stop METGLAS 2605 S3A jako materiał o największym potencjale aplikacyjnym.

10. Opracowanie sensora magnetoelastycznego z toroidalnym rdzeniem amorficznym magnesowanym w obszarze Rayleigha.

Autor opracował magnetoelastyczny sensor naprężeń i sił z toroidalnym rdzeniem amorficznym magnesowanym w obszarze Rayleigha. Wykorzystano rdzeń ze stopu METGLAS 2605 S3A, który wg wyników badań wykazuje największy potencjał aplikacyjny. Przyjęto konfigurację transformatorową, z rdzeniem magnesowanym polem o amplitudzie ok. 3 A/m (wartość wyznaczona jako optymalny punkt pracy). Jako wielkość mierzoną bezpośrednio przyjęto wartość skuteczną napięcia indukowanego w cewce wtórnej.

Wyznaczono charakterystykę przetwarzania opracowanego sensora. Pomiar wartości skutecznej napięcia indukowanego pozwolił dodatkowo zwiększyć czułość naprężeniową sensora względem czułości magnetoelastycznej samego rdzenia, powodując jednak spadek liniowości charakterystyki.

Osiągnięta czułość naprężeniowa sensora wynosi 0,334 1/MPa, przewyższając czułości uzyskane w pracach [29] (dla rdzeni ferrytowych w silnych polach magnesujących) i [304] (dla rdzeni amorficznych w silnych polach magnesujących). Wysokiej czułości towarzyszy jednak stosunkowo wysoki rozrzut wskazań w punktach pomiarowych charakterystyki.

### **3. Oryginalność naukowa**

Tematyka pracy ma charakter oryginalny. Obejmuje kilka istotnych aspektów. Realizacja przedstawionego celu wymagała od Autora wykazania się szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny rozprawy oraz biegłą obsługą narzędzi programowania. Przedstawiono w sposób wzorcowy metodologię dla tego typu problemów. Zaprezentowane przez doktoranta rozważania ukazują, że opanował On naukowy warsztat pracy i posiadał umiejętność formułowania problemów naukowych i właściwy sposób ich rozwiązywania.

### **4. Stopień rozwiązania zagadnienia**

Biorąc pod uwagę temat i cel, stwierdzam, że praca w pełni odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim w Dyscyplinie Naukowej - Inżynieria Mechaniczna. Na podkreślenie zasługuje przyjęta metodologia badań, wychodząca od dobrego rozeznania literaturowego w zakresie realizowanej pracy i prowadząca do pełnej weryfikacji doświadczalnej. W działaniach tych Autor wykazał się znajomością i prawidłowym



wykorzystaniem współczesnych technik badawczych. Zaprezentowany w pracy sposób postępowania świadczy o dojrzałości naukowej doktoranta. Biegłość w stawianiu hipotez, przejrzystość i logika zaprezentowanych analiz, konsekwencja w rozwiązywaniu trudnych problemów interpretacyjnych, krytyczna ocena uzyskanych wyników, konsekwencja w realizacji eksperymentu, to obraz umiejętności jakie prezentuje doktorant przedkładaną do oceny pracą.

## 5. Układ treści i opracowanie redakcyjne

Praca napisana jest poprawnym językiem. Poziom edytorski odpowiedni dla pracy doktorskich. Nieliczne błędy literowe i przejęzyczenia zawarłem w poniższej tabeli

| L.p. | Strona | Jest                                                                                                                                                        | Powinno być                                                                                                |
|------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.   | -      | W przypadku ujęcia wyrazu lub wyrażenia w cudzysłów, po cudzysłowie zamykającym brakuje odstępu przed kolejnym wyrazem. Błąd ten pojawia się w całej pracy. | -                                                                                                          |
| 2.   | 14-15  | rezystancja oznaczona jako <b>R</b>                                                                                                                         | w spisie oznaczeń i dalszej części pracy przyjęto oznaczenie <b>R</b>                                      |
| 3.   | 29     | „ <b>gidze</b> $\gamma$ jest stałą pola molekularnego”                                                                                                      | <b>gdzie</b> $\gamma$ jest stałą pola molekularnego                                                        |
| 4.   | 37     | „a znak <b>–</b> ” do gałęzi dolnej”                                                                                                                        | a znak <b>„–”</b> do gałęzi dolnej                                                                         |
| 5.   | 43     | „znane są prace <b>m.in</b> Browna [52]”                                                                                                                    | znane są prace <b>m.in.</b> Browna [52]                                                                    |
| 6.   | 46     | „Z przedstawionej zależności wynika, że oddziaływania wymienne...”                                                                                          | Z przedstawionej zależności wynika, że oddziaływania wymienne...                                           |
| 7.   | 48     | W równaniu (3.57) wyrazy sumowane są od $i = 1$ , jednak w podanym rozwinięciu pojawia się wyraz $K_0$ .                                                    | Sumowanie powinno rozpoczynać się od $i = 0$ .                                                             |
| 8.   | 83     | „Rosnące naprężenia przekształcają globalne maksimum <b><math>\varphi_0 = 0</math></b> w lokalne minimum”                                                   | Rosnące naprężenia przekształcają globalne maksimum <b><math>\varphi_0 = \pi</math></b> w lokalne minimum” |
| 9.   | 83     | „... upatrywać w podnoszącym się ze wzrostem naprężeń <b>poziomem</b> minimum energetycznego”                                                               | ... upatrywać w podnoszącym się ze wzrostem naprężeń <b>poziomie</b> minimum energetycznego                |
| 10.  | 91     | „przyrost indukcji <b>magmatycznej</b> ”                                                                                                                    | przyrost indukcji <b>magnetycznej</b>                                                                      |

|     |     |                                                                        |                                                                      |
|-----|-----|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 11. | 96  | „Najistotniejszą wadą opracowanego modelu <b>wydaje</b> się jednak...” | Najistotniejszą wadą opracowanego modelu <b>wydaje</b> się jednak... |
| 12. | 115 | „... można przybliżyć zależnością <b>wykładnicza</b> ...”              | ... można przybliżyć zależnością <b>wykładniczą</b> ...              |
| 13. | 140 | „wzdłuż którego <b>mona</b> rozmieścić”                                | wzdłuż którego <b>można</b> rozmieścić                               |
| 14. | 156 | „...według zależności <b>odpowiedni</b> (5.15) i (5.19)”               | ...według zależności <b>odpowiednio</b> (5.15) i (5.19)              |
| 15. | 161 | „(ang. <b>Ditrect</b> Digital Synthesis)”                              | (ang. <b>Direct</b> Digital Synthesis)                               |
| 16. | 174 | „wynosi ok. 0,4 mA,,”                                                  | wynosi ok. 0,4 mA,                                                   |
| 17. | 188 | „zmiany <b>nachylenie</b> charakterystyki”                             | zmiany <b>nachylenia</b> charakterystyki                             |
| 18. | 216 | „dostarczają napięcia wyjściowe <b>odpowiednie</b> +5 V i -5 V”        | dostarczają napięcia wyjściowe <b>odpowiednio</b> +5 V i -5 V        |

## 6. Uwagi krytyczne

1. W rozdziale 3.5. pod tytułem „Materiały ferromagnetyczne o strukturze amorficzne” autor wspomina o strukturze amorficznej. Materiały amorficzne nie mają struktury. Jest to stwierdzenie potoczne którego powinno się unikać w pracach.
2. W rozdziale 5.2.2. pod tytułem „Parametry geometryczne rdzeni” przedstawiono ich wymiary wraz z niepewnościami. Przyjęta w tym rozdziale gęstość stopu amorficznego podana przez producenta ma charakter przybliżony. Z obliczeń wynika, że w rdzeniu pierścieniowym zwijanym uzyskano wypełnienie przekraczające 90% co jest wartością dość optymistyczną.
3. Także wartość niepewności, wyliczona w rozdziale 5.2.2., pomiaru średnicy rdzenia zwijanego z taśmy na poziomie 20  $\mu\text{m}$  jest zbyt optymistyczna.
4. Kontynuując wątek z rozdziału 5.2.2. Autor wyznaczając parametry  $l_e$  i  $Se$  rdzenia zwijanego nie podał czy uwzględniono spodziewane dodatkowe rozproszenie strumienia magnetycznego w rdzeniu zwijanym z taśmy.
5. W rozdziale 5.4.4. pod tytułem „Blok akwizycji sygnałów pomiarowych” opisano detektor przejścia przez zero. Niezrozumiałym jest dlaczego w detektorze przejścia przez zero (rys.



5.22) zastosowano prostownicze diody mocy D3, skoro w układzie zastosowano transoptor. Jest to działanie zbyteczne i nadmiarowe.

## 7. Pytania kolokwialne

1. W ramach prowadzonych przez autora badań wykonano szereg pomiarów właściwości magnetycznych i magnetostrykcyjnych. Jaka jest niepewność pomiarów przedstawionych na wykresach w rozdziale 6.5.2. Czy oszacowanie niepewności w rozdziałach wcześniejszych nie jest zbyt optymistyczne?
2. W kontekście prowadzonych badań nasuwają się pytania. Z czego wynika zróżnicowanie czułości magnetostrykcyjnej badanych w pracy stopów? Czy wartość czułości magnetostrykcyjnej danego stopu amorficznego można przewidzieć?

## 8. Podsumowanie

Dokonując ogólnej oceny pracy stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Kachmiarza jest pracą bardzo wartościową, stojącą na odpowiednim poziomie naukowym. Autor wykazał się dobrą znajomością metodologii i techniki prowadzenia badań eksperymentalnych w szeroko rozumianych badaniach efektu magnetostrykcyjnego w obszarze Rayleigha w magnetykach amorficznych i ich praktycznego zastosowaniu w technice sensorów, ukazując pełną gamę złożonych narzędzi naukowego poznania. Praca zawiera szereg wymienionych wcześniej elementów oryginalnych. Cel pracy został osiągnięty zarówno w wymiarze naukowym jak i technicznym. Biorąc powyższe pod uwagę **wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej pracy.**

Reasumując uważam, że rozprawa doktorska pt. „Badanie efektu magnetostrykcyjnego w obszarze Rayleigha w magnetykach amorficznych i jego wykorzystanie do budowy sensorów naprężeń i sił”. Spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań oraz wiedzy teoretycznej (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.). W związku z powyższym **wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Macieja Kachmiarza do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

