

Radom, 11 września 2023

dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. URad.
Katedra Fizyki, Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego

Recenzja pracy doktorskiej

Ocena stanu naprężeń w ferromagnetycznych elementach konstrukcyjnych z zastosowaniem zjawiska magnetosprężystego

Autor: mgr inż. Dorota Jackiewicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Szewczyk,

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Szymon Gontarz, prof. PW

prowadzonej na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Doroty Jackiewicz została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 14.07.2023.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena tematu i celu pracy

Tematykę recenzowanej pracy doktorskiej cechuje interdyscyplinarność. Badania nad efektami magnetosprężystymi i ich aplikacje w kontroli naprężeń elementów stalowych wymagały połączenia działań i umiejętności w zakresie miernictwa wielkości magnetycznych oraz elektroniki, budowy maszyn i inżynierii mechanicznej, fizyki magnetyzmu i materiałów magnetycznych, inżynierii materiałowej oraz metod numerycznych.

Ze względu na konstrukcyjny efekt końcowy pracy (stanowisko pomiarowe z elementami mechanicznymi, elektromagnetycznymi i elektronicznymi) oraz zakres możliwych zastosowań można jednoznacznie stwierdzić, że tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

Głównym tematem i celem rozprawy było wykorzystanie efektów magnetosprężystych do monitorowania stanu naprężeń w konstrukcjach ze stali ferromagnetycznych. Jest to zagadnienie niezmiernie interesujące i – jak wynika z analizy literaturowej – nosi znamiona innowacyjności. W ramach pracy została opracowana metodyka badań właściwości magnetosprężystych elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnych w postaci próbek ramkowych oraz konstrukcji kratownicowych. Zakres badań nie ograniczał się jedynie do pomiarów zmian wartości parametrów magnetycznych pod wpływem naprężeń (np. ewolucji kształtu pętli histerezy magnetycznej, zmiany przenikalności magnetycznej i namagnesowania maksymalnego). Uzyskane wyniki pomiarów zinterpretowano w ramach rozszerzonego modelu Jilesa – Athertona w odniesieniu do krzywych magnesowania stali konstrukcyjnych w obecności naprężeń.

Istotnym atutem pracy jest fakt, że w celu przeprowadzenia badań Doktorantka musiała zaprojektować i skonstruować niestandardowe układy pomiarowe oraz przygotować specjalistyczne oprogramowanie. Imponujący dorobek publikacyjny Doktorantki oraz duży potencjał aplikacyjny efektów badań świadczy o wysokiej jakości ocenianej pracy.

Rada Naukowa Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna
Wpłynęło dnia 02.11.2023
L. dz. _____ *Wolcinski*

3. Merytoryczna ocena pracy

Tytuł jak i początkowe zdania streszczenia trafnie zarysowują tematykę i zakres pracy, ale nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, czy przeprowadzone badania dotyczą wyłącznie naprężeń zewnętrznych czy również naprężeń wewnętrznych. W streszczeniu pojawia się wartość liczbową „czułości pomiarowej” 39 mT/kN, ale nie podano, co było mierzone.

Wstęp (Rozdział 1.) wprowadza prawidłowo w tematykę rozprawy. Podano zwięźle dotychczasowy stan wiedzy i techniki w zakresie badań nieniszczących (w tym metod magnetycznych) oraz zamieszczono krótkie uzasadnienie celowości podjętych badań nad wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego do monitorowania naprężeń w konstrukcjach stalowych. We Wstępie użyto sformułowania „znaczne energie” w kontekście promieniowania rentgenowskiego. Nie jest jasne, czy chodziło o energie pojedynczych kwantów, czy całkowitą energię strumienia promieniowania.

W rozdziale 2. („Cel i zakres pracy”) podano na początku zarówno zasadniczy cel pracy jak i stowarzyszoną z nim tezę pracy. Te dwa kluczowe elementy rozprawy zostały sformułowane wyłącznie jakościowo, co może budzić pewien niedosyt, ale jest to usprawiedliwione złożonością metrologiczną, techniczną i fizyczną zagadnienia. Bardzo skrupulatnie podany został zakres pracy jako wykaz zadań badawczych. Odnosiły się one zarówno do badań eksperymentalnych nad pełnym wachlarzem efektów magnetosprężystych w konstrukcjach stalowych z uwzględnieniem wpływu warunków środowiskowych, jak również rozwinięcie modeli teoretycznych opisujących procesy magnesowania w elementach poddanych zewnętrznym naprężeniom.

W kolejnych podrozdziałach rozdziału 3. dokonano szczegółowego przeglądu stanu wiedzy i zaawansowania technicznego w metodyce oceny stanu naprężeń. Wymieniono i omówiono m.in.: metodę tensometryczną, metody optyczne (światłowodowa i triangulacyjna) oraz metodę wibrotermograficzną. Najwięcej uwagi poświęcono metodom magnetycznym, takim jak: metoda magnetyczno-proszkowa, metoda rozpraszania strumienia magnetycznego, magnetowizja, metoda prądów wirowych i tomografia wiropądowa, metoda magnetostrykcyjna, analiza szumów Barkhausena, metoda magnetycznej pamięci metalu, metoda pomiarów magnetosprężystych oraz metoda elektromagnetyczna. Drobny niedosyt stwarza omówienie metody magnetostrykcyjnej – a zwłaszcza brak jasnego odróżnienia od klasycznej metody ultradźwiękowej. Nie wytłumaczono też fizycznej istoty efektu Barkhausena. W podsumowaniu tego rozdziału zamieszczono zbiorczą tabelę przeglądową oraz podkreślono konieczność opracowania nowej metody do pomiaru stanu naprężeń wykorzystującej zjawisko magnetosprężyste. Nie wytłumaczono jednak dlaczego nie są satysfakcjonujące „metody pomiarów magnetosprężystych”, które znalazły się w prezentowanym przeglądzie i które niewątpliwie opierają się na zjawisku magnetosprężystym.

Rozdział czwarty poświęcony jest omówieniu fizycznej istoty zjawiska magnetosprężystego, co w doktoracie inżynierskim jest dodatkową wartością. W tekście niestety pojawiło się kilka nieścisłości merytorycznych i terminologicznych. W opisie formuły wielkość λ_s nie powinna być nazywana „magnetostrykcją nasycenia”, lecz „stałą magnetostrykcji nasycenia”. Nie wyjaśniono też, dla jakiego kierunku pomiaru ta stała jest zdefiniowana. Na stronie 36 w drugim akapicie zostało użyte nieprawidłowe sformułowanie „indukcja magnetyczna B materiału”. Poza tym istotą wspomnianej w pierwszym zdaniu reguły Le Chateliera jest zestawienie łącznie faktów podanych w zdaniu pierwszym i drugim. We wzorze (4.3) wielkość d została nazwana „czułością piezomagnetyczną”. Jako, że w literaturze pod tą nazwą spotyka się różne zdefiniowane wielkości (np. odniesione do naprężeniowych zmian przenikalności magnetycznej), wskazane byłoby uściślenie proponowanej definicji, a zwłaszcza o wyjaśnienie,

jaka indukcja pola magnetycznego B występuje we wzorze (4.3) – wymuszona czy remanencyjna oraz czy na jej wartość ma wpływ kształt elementu. Wydaje się, że naświetlając fizyczne podstawy efektu magnetosprężystego bardziej prawidłowym podejściem byłoby odniesienie się do naprężeniowych zmian lokalnego namagnesowania materiału (a nie indukcji). W formule (4.5) nie zgadzają się jednostki (brakuje stałej przenikalności magnetycznej próżni, a zamiast momentu magnetycznego powinna być lokalna gęstość momentów magnetycznych równa lokalnemu namagnesowaniu). W równaniu (4.9) po lewej stronie mamy do czynienia z jednostką energii, a po prawej stronie z gęstością objętościową energii i nie jest podane uzasadnienie przyjętej liniowej zależności od naprężenia. Nie zostało też podane uzasadnienie i wyprowadzenie końcowej formuły (4.10) na gęstość objętościową energii magnetosprężystej (która w opisie została błędnie utożsamiona z całkowitą energią magnetosprężystą). W przypadku opisu energetycznych efektów magnetosprężystych zabrakło ścisłego opisu tensorowego oraz stwierdzenia, że źródłem energii magnetosprężystej jest zależność energii anizotropii od odkształcenia. Warto podkreślić, że tylko opis tensorowy oraz uwzględnienie w formule (4.4) pominiętej energii sprężystej (z tensorem stałych sprężystych materiału) umożliwia prawidłowe wyprowadzenie wzorów na stałą magnetostrykcji oraz całą klasę efektów magnetosprężystych. Ograniczenie się przez Doktorantkę do różnego rodzaju uproszczeń funkcjonujących w literaturze jest jednak całkowicie usprawiedliwione, ze względu na dominujący aspekt techniczny tematyki rozprawy doktorskiej.

Rozdział 5. w całości został poświęcony przeglądowi modeli magnesowania. Doktorantka szczególnie nacisk położyła na uwzględnienie i zrozumienie zależności krzywych magnesowania od naprężeń. Z tego też względu całkowicie zbędny wydaje się dość pośpiesznie napisany wstęp termodynamiczny do wyjściowego modelu Jilesa-Athertona. Trudno bowiem w kilku zdaniach jasno opisać złożoność założeń takiego podejścia i ściśle zdefiniować występujące w tym modelu wielkości termodynamiczne. W szczególności wielkość U – nazwana w termodynamice (i przez Doktorantkę) „energią wewnętrzną” – nie jest tą energią – przynajmniej wg. podanej definicji (5.3). W opisie modelu Jilesa-Athertona bardziej trafnymi określeniami byłyby: „namagnesowanie fazy izotropowej” i „namagnesowanie fazy anizotropowej” zamiast „magnetyzacja izotropowa” i „magnetyzacja anizotropowa”. Poza tym wyjaśnienia wymaga rachunek jednostek we wzorze (5.7), ponieważ wobec niepodania wcześniej ścisłej definicji wielkości „ a ” („parametr związany z gęstością ścian domen”) nie jest pewne, w jakich jednostkach wyrażają się wielkości $E(1)$ i $E(2)$ nazwane energiami, przy czym docelowo argument funkcji eksponent we wzorze (5.7) powinien być bezwymiarowy. Czy całkowanie we wzorze (5.7) odpowiada przypadkowi 2D czy 3D? Jakie jest uzasadnienie fizyczne uśredniania namagnesowania przy użyciu formuły (5.25) i czy wynik tego uśredniania zależy od temperatury? Analogiczne pytania i wątpliwości co do jednostek dotyczą wzorów (5.25), (5.26) i (5.27) – pomimo zamieszczenia równania (5.29) definiującego parametr „ a ”, ponieważ nie podano w nim ścisłej definicji i jednostki występującego w nim parametru „ N ” („gęstość domeny magnetycznej”). Można się również zastanowić, czy potrzebne było powtarzanie wzorów stanowiących podstawę modelu Jilesa-Athertona w przypadku bez naprężeń i z naprężeniami. Można by po prostu stwierdzić, że parametry modelu są funkcjami naprężeń. Należy też zwrócić uwagę na błąd we wzorze (5.12) opisującym histerezę magnetyczną w modelu Jilesa-Athertona – chodzi zarówno o typografię parametru „ δM ” jak i wątpliwość co do tego, które wyrażenie jest mnożone przez ten parametr. W przeglądzie modeli magnesowania Doktorantka wspomniała również o modelu Takacsa trafnie komentując, że proponuje on efektywny opis matematyczny, ale bez odniesienia do zjawisk fizycznych i parametrów materiałowych. W przeglądzie modeli zabrakło niestety modelu Preisacha oraz analizy FORC (First-Order-Reversal-Curve) histerezy magnetycznej. Te podejścia mogły być konkurencyjne wobec opisu krzywych magnesowania przy użyciu modelu Jilesa-Athertona. Bardzo wartościowym elementem wstępu teoretycznego jest jednak wprowadzony tensorowy

opis anizotropowej przenikalności magnetycznej z fenomenologicznym uwzględnieniem wpływu naprężeń. Należy jedynie zwrócić uwagę, że już wyjściowa macierz diagonalna (5.32) – wbrew podanej informacji – dotyczy przypadku anizotropowego (a nie izotropowego), ponieważ jej elementy są różne, przy czym „kierunki anizotropowości” są zgodne z osiami przyjętego układu współrzędnych. Poza tym wzór (5.30) definiuje nie przenikalność a podatność magnetyczną i to w sposób uproszczony (rekomendowana byłaby postać różniczkowa).

Stosunkowo krótki rozdział 6. został przeznaczony wyłącznie do omówienia sposobu dopasowywania modeli teoretycznych do danych pomiarowych w celu wyznaczenia parametrów modelu. Jako funkcję celu wybrano standardową funkcję χ^2 , choć ta nazwa nie została przywołana w tekście pracy. Podano jednak ważną informację, że parametry modelu Jilesa-Athertona były wyliczane łącznie na podstawie wielu histerez zmierzonych dla różnych amplitud pola magnesującego. Doktorantka dokonała szczegółowego omówienia algorytmów stosowanych do minimalizacji funkcji celu. W tym przeglądzie znalazły się zarówno algorytmy gradientowe jak i ewolucyjne (tradycyjne i różnicowe). Szkoda, że na końcu rozdziału zabrakło informacji, który z algorytmów został wybrany i przy użyciu jakiego oprogramowania był zrealizowany. Jednakże te szczegóły zostały podane w dalszej części pracy.

Również bardzo zwięzły jest rozdział 7., któremu nadano tytuł „Przedmiot badań”. W rzeczywistości odnosi się on wyłącznie do samych materiałów, z których wykonano opisane w dalszej części pracy docelowe obiekty badań. Wybrane zostały dwa rodzaje stali: martenzytyczna stal X30Cr13 o podwyższonej odporności na korozję oraz konstrukcyjna stal stopowa chromowo-molibdenowa 13CrMo4-5, która przeznaczona jest do pracy w podwyższonych temperaturach. Doktorantka powołała się na wartości składów pierwiastkowych i parametrów mechanicznych tych stali opublikowanych w stosownych normach. Czy dostawca stali był dostatecznie wiarygodny, tak że nie wydawało się konieczne wykonanie weryfikujących analiz pierwiastkowych i mechanicznych?

W rozdziale 8. omówiona została szczegółowo metodyka eksperymentalnej części rozprawy i – moim zdaniem – ten właśnie rozdział najpełniej ukazuje jakość i szeroki zakres ocenianej pracy. Doktorantka zdecydowała się na wybór docelowych próbek w postaci ramek (a nie pierścieni) po to, by ich kształt był możliwie zbliżony do geometrii występujących w praktyce elementów konstrukcyjnych poddanych naprężeniom. W celu maksymalnego uniezależnienia się od wpływu kształtu próbki na końcowe wyniki Doktorantka zastosowała uzwojenie symetryczne. Przy użyciu symulacji metodą elementów skończonych (MES) Doktorantka wykazała, że w miejscach założenia uzwojenia (kolumny ramki) rozkłady zarówno naprężeń jak i namagnesowania są najbardziej jednorodne. Doktorantka zaprojektowała zaawansowane, innowacyjne stanowisko do pomiarów pętli histerezy magnetycznej metodą zmiennoprądową wyposażone w prasę hydrauliczną i rewersor siły (do uzyskania naprężeń rozciągających). Układ pomiarowy był całkowicie zautomatyzowany i zapewniał komputerową akwizycję danych. Powstała również jeszcze bardziej rozwinięta wersja układu z kriostatem umożliwiającą pomiar charakterystyk magneto-sprężystych w funkcji temperatury.

Rozdział 9. prezentuje większość wyników wykonanych badań doświadczalnych. Przed dokonaniem właściwych pomiarów pętli histerezy Doktorantka sprawdziła, że najlepiej prowadzić zmiennoprądowe pomiary pętli histerezy magnetycznej przy możliwie niskiej częstotliwości (0.1 Hz) w celu uniknięcia wpływu prądów wirowych. Do rozmagnesowania próbek zastosowano przebieg o częstotliwości 20 Hz. W pierwszej kolejności Doktorantka wykonała pomiary pętli histerezy bez naprężeń dla standardowych próbek pierścieniowych w celu jak najbardziej dokładnego wyznaczenia parametrów magnetycznych stali X30Cr13 i 13CrMo4-5. Zostały przeprowadzone pomiary zarówno pętli pełnych jak i minorowych (dla

szeregu mniejszych wartości pól magnesujących), co pozwoliło na wyznaczenie polowych charakterystyk podatności, remanencji, koercji i namagnesowania maksymalnego. W podsumowaniu tych wyników pojawił się słuszny wniosek, że obydwie stale można zaliczyć do materiałów magnetycznie miękkich. Doktorantka powtórzyła analogiczne pomiary dla przypadku próbek ramkowych i stwierdziła, że różnice w porównaniu do referencyjnego przypadku próbek pierścieniowych są niewielkie. Jest to stwierdzenie jakościowo uzasadnione, ale wskazane byłoby jakieś ilościowe podsumowanie. Najważniejsza grupa wyników dotyczyła pomiarów pełnych pętli histerez dla próbek ramkowych poddanych naprężeniom rozciągającym. Podstawowym wnioskiem z zaprezentowanych badań było stwierdzenie, że zmiany parametrów magnetycznych (zwłaszcza przenikalności magnetycznej i maksymalnej indukcji) są na tyle duże, że mogą być wykorzystane do oceny naprężeń mechanicznych. Bardzo pożądane byłoby jednak wyjaśnienie, jak poradzić sobie w praktyce metrologicznej z widoczną nieliniowością – a nawet niemonotonicznością otrzymanych charakterystyk. Poza tym brakuje informacji, czy sprawdzane było występowanie ewentualnej histerezy magnetomechanicznej. Bardzo cennym dopełnieniem wspomnianych badań była weryfikacja wpływu temperatury na otrzymywane wyniki. Pomiary przeprowadzono w zakresie od -20°C do 60°C i nie wykazano istotnych zmian indukcji maksymalnej. Oznacza to, że wpływ zmian temperatury otoczenia jest pomijalny – co jeszcze bardziej predestynuje praktyczne wykorzystanie efektów magneto-sprężystych do oceny naprężeń w elementach stalowych. Zwieńczeniem badań doświadczalnych było powtórzenie pomiarów histerezy magnetycznej w funkcji naprężenia dla próbek stalowych poddanych obróbce cieplnej (wygrzewanie i chłodzenie) wg. procedury „step-cooling”. Okazało się, że i tym razem nie zaobserwowano istotnych zmian w charakterystykach magneto-sprężystych, co dało się wytłumaczyć stosunkowo niewielkimi zmianami w metalograficznej strukturze ferrytyczno-węglkowej (obserwowanej przy użyciu mikroskopu świetlnego). Rozdział kończy się bardzo istotnym zestawieniem liczbowych wartości naprężeniowych czułości przenikalności magnetycznej i indukcji maksymalnej, przy czym wskazano najkorzystniejszy zakres pola magnesującego. Doktorantka powinna jednak wyjaśnić, czy podane wartości czułości odnoszą się wyłącznie do przypadku małych naprężeń, a jeśli tak, to konkretnie do jakiego zakresu. Brakuje też informacji, czy podejmowano próbę wyznaczenia tych czułości dla naprężeń ściskających.

Rozdział 10. przenosi zaproponowane uprzednio idee w obszar praktycznych zastosowań do przypadku konstrukcji stalowych w postaci kratownic (w trójkątnym układzie Warrena). Do badań wykorzystano skonstruowany uprzednio układ pomiarowy, przy czym dokonano niezbędnych dostosowań odnośnie części mechanicznej i magnetycznej. Szczególnie praktyczny okazał się wariant uzwojenia kratownicy, który nie wymagał wykonywania otworów w elementach kratownicy a jedynie zmniejszenie ich średnicy. Zamknięty obwód magnetyczny z trzema uzwojeniami stanowiły trzy sąsiadujące ze sobą elementy kratownicy tworzące trójkąt. Ze względu na różny stan naprężeń w tych elementach charakterystyki magneto-sprężyste wyznaczano w funkcji zewnętrznej siły obciążającej. Uzyskana duża czułość efektu magneto-sprężystego i dobra powtarzalność wyników okazały się całkowicie wystarczające do praktycznych zastosowań w zakresie monitoringu naprężeń, co jest niewątpliwie bardzo znaczącym osiągnięciem niniejszej pracy doktorskiej. Warto jednak zadać pytanie, czy były podejmowane próby pomiarów charakterystyk magneto-sprężystych w otwartym układzie magnetycznym. Zastosowanie jednej cewki magnesującej i sygnałowej przykładanej od zewnątrz pozwoliłoby badać stan naprężeń w indywidualnych elementach kratownicy bez żadnej ingerencji w jej konstrukcję. Oczywiście nie dałoby się wówczas wyznaczać parametrów materiałowych stali, ale nie byłoby to celem w takim zastosowaniu. Jestem przekonany, że wspomniane rozwiązanie wskazuje naturalny kierunek przyszłych działań o charakterze aplikacyjno-utilitytarnym.

Rozdział 11. stanowi zwięźczenie naukowej części pracy. Doktorantka wykonała dopasowania zmodyfikowanego modelu Jilesa-Athertona do zmierzonych charakterystyk magneto-sprężystych ramkowych próbek stalowych oraz dla jednego z wariantu konstrukcji kratownicowej. Dużo uwagi zostało poświęcone konfigurowaniu i testowaniu różnicowego algorytmu ewolucyjnego, który został użyty do minimalizacji residuum kwadratowego oraz doborowi punktu startowego. Warto też podkreślić, że niekwestionowanym osiągnięciem było samodzielne stworzenie aparatu obliczeniowego przy użyciu otwartego oprogramowania, który umożliwia dopasowanie do danych pomiarowych modelu, wymagającego całkowania i rozwiązywania równania różniczkowego. Dzięki tej złożonej procedurze numerycznej udało się uzyskać pionierskie wyniki przedstawiające zależności parametrów modelu Jilesa-Athertona od siły obciążającej konstrukcję kratownicową. Szkoda jednak, że wartości siły nie były przeliczone na wartości naprężenia oraz że otrzymane wyniki nie zostały dokładniej omówione. Niemonotoniczne zależności naprężeniowe parametru anizotropii magneto-krystalicznej oraz sprzężenia między domenami magnetycznymi wskazują na niezmiernie interesującą fizykę efektów magneto-sprężystych i prawdopodobnie mogłyby być powiązane z występowaniem tzw. punktu Villarięgo. Zaskakująco liniową zależność wykazuje natomiast parametr „ a ”, który powiązany jest z gęstością ścian domenowych. Proszę, żeby na podstawie otrzymanych wartości parametru „ a ” oszacować średnią objętość domen oraz ich średni rozmiar liniowy (przy założeniu kształtu sześciennego lub kulistego). Jest to niezmiernie ważna kwestia, ponieważ odnosi się do ewentualnego występowania zjawisk superparamagnetycznych, które mogą pojawić się wtedy, gdy w danej temperaturze rozmiar domen jest dostatecznie mały. Fakt braku istotnej zależności od temperatury indukcji maksymalnej w zadanym polu magnesującym (raportowany w rozdziale 9.) może jednak sugerować brak takich efektów – prawdopodobnie ze względu na stosunkowo duży rozmiar domen. W konsekwencji może okazać się, że uśrednianie namagnesowania w modelu Jilesa-Athertona przy użyciu „temperaturowego” czynnika Boltzmanna mogłoby być zastąpione „zero-temperaturową” minimalizacją energii całkowitej układu. Należy wziąć pod uwagę również taką ewentualność, że w celu uzyskania dobrego dopasowania zmierzonych „gładkich” pętli histerezy, konieczne jest przyjmowanie sztucznie zaniżonego rozmiaru domen w modelu Jilesa-Athertona. Byłby to dowód na to, że model ten jest bardziej matematyczny niż fizyczny, ale rozstrzygnięcie tej kwestii nie było celem pracy Doktorantki.

W rozdziale 12. Doktorantka dokonała trafnego podsumowania i sformułowała właściwe wnioski końcowe, które jednoznacznie pozwalają stwierdzić, że postawiona na początku pracy teza okazała się prawdziwa. Podane zostały też wartości czułości metody magneto-sprężystej powiązane ze zmianą indukcji magnetycznej wywołaną określonym naprężeniem lub siłą obciążającą w próbkach ramkowych i konstrukcjach kratownicowych. Wartością dodaną tego ostatniego rozdziału pracy są niewątpliwie nakreślone plany przyszłych działań badawczych i aplikacyjnych. Doktorantka planuje rozszerzyć spektrum analizy efektów magneto-sprężystych na większą grupę stali konstrukcyjnych, kontrolę stanu naprężeń prętów zbrojeniowych w konstrukcjach żelbetowych oraz ciągłego monitorowania naprężeń w kadłubach statków.

Bibliografia rozprawy jest bardzo bogata (120 pozycji). Obejmuje ona prace z szerokiego przekroju czasowego (z uwzględnieniem najbardziej aktualnych doniesień) i pochodzących z wielu grup badawczych (krajowych i zagranicznych).

4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Praca napisana jest na ogół poprawnym językiem. Jedyne zastrzeżenia można mieć do zbyt częstego używania skrótów myślowych i „branżowego” żargonu. Tekst rozprawy przygotowany został starannie, chociaż nie udało się uniknąć pewnych błędów typograficznych i redakcyjnych. Podział na rozdziały wydaje się prawidłowy i logiczny, chociaż niektóre tytuły nie zawsze dobrze korespondują z treścią rozdziałów. Angielska wersja streszczenia wiernie oddaje treść pierwowzoru polskiego i jest napisana poprawnie pod względem gramatycznym i stylistycznym. Na szczególną pochwałę zasługują estetyczne wykresy i rysunki zamieszczone w pracy.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując szczegółową część opinii o rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Doroty Jackiewicz stwierdzam, że:

- Zagadnienie naukowe, którego rozwiązaniu podjęła się Doktorantka, zostało wybrane i sformułowane prawidłowo.
- Cel główny pracy został przez Doktorantkę osiągnięty, a postawiona teza - udowodniona. Realizacja wszystkich, założonych celów szczegółowych niniejszej pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna” (Dziedzina nauk: Nauki Inżynieryjno-Techniczne).
- W celu rozwiązania zagadnienia badawczego Doktorantka twórczo skorzystała z aktualnego dorobku naukowo-technicznego w zakresie inżynierii mechanicznej, budowy maszyn, fizyki magnetyzmu, inżynierii materiałowej, elektroniki, metrologii wielkości elektromagnetycznych, modelowania zjawisk i metod numerycznych.
- W czasie realizacji pracy Doktorantka wykazała się umiejętnościami prowadzenia badań doświadczalnych i teoretycznych oraz znaczącym doświadczeniem w projektowaniu doświadczalnych układów pomiarowych.
- Wyniki badań prowadzonych w ramach niniejszej pracy doktorskiej istotnie poszerzają wiedzę dotyczącą możliwości wykorzystania efektów magnetostrykcyjnych do monitoringu stanu naprężeń w konstrukcjach stalowych, jak również w zakresie modeli teoretycznych opisujących krzywe magnesowania materiałów poddanych naprężeniom.

Stwierdzam, iż rozprawa mgr inż. Doroty Jackiewicz spełnia warunki Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Ustawa 2.0) oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Oczekuję, że podczas obrony Doktorantka odniesienie się do zapisanych w recenzji uwag krytycznych, komentarzy i pytań. Należy podkreślić, że nie umniejszają one w istotnym stopniu wartości merytorycznej pracy doktorskiej, ponieważ dotyczą głównie niedociągnięć i braków w opisie metod i wyników badań.

Ze względu na zakres nowatorskiej pracy włożonej w konstrukcję innowacyjnego układu do pomiarów efektów magnetostrykcyjnych i monitorowania naprężeń w stalowych konstrukcjach mechanicznych (który bez wątpienia posiada duży potencjał aplikacyjny) oraz biorąc pod uwagę imponujący dorobek publikacyjny Doktorantki (42 współautorskie publikacje o łącznej punktacji MEiN 734 pkt. – w tym jeden artykuł za 140 pkt.) z pełnym przekonaniem wnoszę o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.

Sumiata