

dr hab. inż. Maciej Roskosz  
Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
ul. Konarskiego 18  
44-100 Gliwice

POLITECHNIKA GDAŃSKA  
WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ  
I MATEMATYKI STOSOWANEJ Gliwice 28.11.2016

Wpłynęło dnia 30.11.2016 r.  
L. dz. 69/WFTiMS/SN/2016  
Zał. —

### Recenzja

pracy doktorskiej Pana mgr inż. Zbigniewa Usarka

"Wpływ geometrii, właściwości magnetycznych oraz sposobu magnesowania próbki na rozkład przestrzenny magnetycznego pola rozproszonego"

Recenzję opracowano na podstawie pisma 40/WFTiMS/SN/2016 Dziekana Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Pana prof. dr hab. inż. Wojciecha Sadowskiego z dnia 4.10.2016.

Promotorem rozprawy był Pan dr hab. Bolesław Augustyniak a promotorem pomocniczym Pan dr inż. Marek Chmielewski.

#### 1. Zasadność tematyki badań

W pracy wyróżnić można dwa zagadnienia, których częścią wspólną jest magnetyczne pole rozproszone, będące przedmiotem pomiarów i symulacji numerycznych. Pierwszym z zagadnień są badania związane z własnym magnetycznym polem rozproszonym (WMPR) będącym skutkiem zmian magnetyzacji powstających w wyniku sprzężenia magneto-mechanicznego. Drugim zagadnieniem jest z formatowaniem pola magnetycznego w badanym obiekcie przy użyciu poruszającej się magneśnicy i analizą wycieku strumienia magnetycznego.

Problem ilościowej oceny stanu naprężeń i deformacji elementów maszyn, z racji jego istotności w diagnostyce stanu technicznego, jest problemem niesłabnącego zainteresowania naukowców. W pracy podjęto tematykę możliwości wykorzystania pomiarów WMPR do identyfikacji stanu naprężeń oraz zmian mikrostruktury spowodowanych odkształceniem plastycznym. Zagadnienia te, są obecnie przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowo-badawczych, a podjęta tematyka opracowania metody ilościowej oceny zmian przenikalności magnetycznej na podstawie pomiarów WMPR, w celu dalszego wykorzystania do oceny stanu naprężeń i deformacji, stanowi istotne uzupełnienie tematyki badawczej.

W przypadku magnesowania obiektów ruchomą magneśnicą pojawia się problem wpływu prędkości magneśnicy na przebiegi sygnałów diagnostycznych związanych z wadą, który nie został jeszcze w pełni rozwiązany. W ramach pracy podjęto badania mające na celu określenie relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy zmianą prędkości magneśnicy na zmianę rozkładu magnetycznego pola rozproszonego (MPR). Jest to istotne zagadnienie badawcze o dużym znaczeniu zarówno naukowym, jak i praktycznym, a wyniki badań (głównie wyniki symulacji numerycznych) prezentowane w publikacjach nie są jednoznaczne.

#### 2. Cele i tezy pracy

W pracy wyróżnić można zagadnienia związane z wpływem lokalnej zmiany geometrii i przenikalności magnetycznej na WMPR mierzone na powierzchni próbki oraz zagadnienia związane z analizą wpływu prędkości magneśnicy na MPR.

Celem badań nad wpływem lokalnej zmiany geometrii i przenikalności magnetycznej na rozkład WMPR było (I) opracowanie i przedstawienie metodyki pomiarów oraz analizy ilościowej rozkładu WMPR umożliwiającej ocenę stanu naprężeń i deformacji.

Celami badań nad wpływem magnesowania obiektu za pomocą ruchomej magnesownicy na rozkład MPR było: (II) usystematyzowanie i poszerzenie wiedzy na temat zależności tego wpływu od wybranych czynników oraz (III) zbadanie możliwości przekształcenia uzyskanego doświadczalnie rozkładu przestrzennego MPR do postaci quasi-stacjonarnej.

Tezy rozprawy dotyczące rozkładu przestrzennego WMPR w obecności lokalnej zmiany geometrii i/lub przenikalności magnetycznej brzmią:

1. Możliwe jest, na podstawie analizy rozkładu przestrzennego WMPR, określenie wielkości lokalnej, względnej zmiany przenikalności magnetycznej próbki.
2. Teza 1 jest prawdziwa także w przypadku współwystępowania w pewnym obszarze próbki lokalnej zmiany geometrii i lokalnej zmiany przenikalności magnetycznej.
3. W przypadku próbek poddanych rozciąganiu i charakteryzujących się lokalną zmianą geometrii możliwe jest, na podstawie analizy rozkładu przestrzennego WMPR, wyznaczenie składowej osiowej naprężeń w obszarze występowania zmiany geometrii.

Teza rozprawy dotycząca rozkładu przestrzennego MPR w sytuacji magnesowania ruchomym źródłem strumienia indukcji magnetycznej jest następująca:

4. Transformacja rozkładu przestrzennego MPR do postaci quasi-stacjonarnej może zostać wykonana na podstawie krzywych kalibracyjnych wiążących parametry charakterystyczne tego rozkładu z prędkością źródła.

### **3. Struktura pracy**

Praca została podzielona na pięć rozdziałów.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie to podejmowanej tematyki badawczej, zestawienie celów i tez pracy oraz omówienie jej struktury.

W rozdziale 2 umieszczono informacje na temat podstawowych wielkości fizycznych występujących w pracy. Pokróctce opisano wykorzystane w badaniach metody numeryczne. Przedstawiono również przyczyny powstawania MPR oraz jego charakterystyczne cechy. Rozdział kończy się opisem zjawiska prądów wirowych, które są generowane w obiekcie badanym podczas ruchu magnesownicy oraz analizą wpływu tych prądów na rozkład przestrzenny MPR. W rozdziale zawarto również analizę stanu badań w zakresie podejmowanej tematyki badawczej oraz umiejscowienie zagadnień podejmowanych w rozprawie na tle tychże badań.

Rozdział 3 zawiera wyniki pomiarów i symulacji numerycznych składowych WMPR przeprowadzonych dla zestawu próbek stalowych. Przedstawiono w nim analizę wyników uzyskanych dla różnych stanów obciążenia i odkształcenia badanych próbek. Zaprezentowano również wyniki symulacji MEB oraz, bazującą na tych wynikach, metodykę analizy rozkładu przestrzennego WMPR, której celem było określenie lokalnej, względnej zmiany przenikalności magnetycznej próbki.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki pomiarów doświadczalnych MPR dla przypadku magnesownicy poruszającej z różnymi prędkościami nad powierzchnią płyty stalowej, która posiada wady geometryczne. Umieszczono w nim także rezultaty analizy MES rozkładu przestrzennego prądów wirowych powstających w próbce w wyniku ruchu magnesownicy. Kończąc rozdział dyskusja porusza problem określonych warunków pomiaru, które mają bardzo duży wpływ na charakter zmian mierzonego sygnału.

Rozdział 5 podsumowuje przeprowadzone badania i prezentuje najistotniejsze ich wyniki.

Rozprawa kończy się Bibliografią obejmującą 95 pozycji oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. W Bibliografii autor umieścił 5 współautorskich publikacji o tematyce ściśle związanej z tematyką rozprawy. Cztery z nich ukazały się w czasopiśmie z Impact Factorem.

#### 4. Ocena merytoryczna pracy

W przypadku pracy, dla której w sposób precyzyjny sformułowano jej tezy, jej ocena merytoryczna sprowadza się do wyrażenia opinii, czy tezy te zostały w sposób wystarczający, dla przygotowującego opinię, udowodnione poprzez wyniki pomiarów, symulacji numerycznych czy też analizę źródeł literaturowych. Moim zdaniem, w ocenianej rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Zbigniewa Usarka przeprowadzone to zostało w sposób nie budzący wątpliwości, a nawet, idąc dalej, w sposób nie dający pola do możliwych dyskusji i krytyki, bo wszelkie kwestie mogące wzbudzać wątpliwości zostały dogłębnie rozważone. Świadczy to o dojrzałości naukowej doktoranta oraz (może to powinno znaleźć się na pierwszym miejscu) o jakości szkoły z jakiej się wywodzi. Musi to jednak być udowodnione, co czynię poniżej, odnosząc się do celów i tez pracy opisanych w punkcie 2 niniejszej recenzji.

Wpływ geometrii i/lub właściwości magnetycznych na rozkład WMPR został zbadany doświadczalnie oraz numerycznie z wykorzystaniem analizy MEB. W przypadku analizy wpływu geometrii uzyskane doświadczalnie jak i numerycznie rozkłady WMPR charakteryzują się lokalną zmianą, określaną w pracy jako anomalia, która jest rejestrowana nad obszarem przewężenia. Na podstawie wyników analizy wykazano, że wartości międzyszczytowe anomalii składowej stycznej indukcji i gradientu składowej normalnej rosną nieliniowo wraz ze wzrostem stopnia przewężenia próbki. Wykazano również, iż wartości międzyszczytowe anomalii rozkładów przestrzennych: składowej stycznej indukcji i gradientu składowej normalnej zależą w sposób nieliniowy od lokalnej zmiany przenikalności magnetycznej próbki. Na podstawie tych zależności można sformułować relacje odwrotne, które pozwalają określić wartość nieznaną względnej zmiany przenikalności magnetycznej na podstawie znanej wartości międzyszczytowej anomalii. Tak sformułowane relacje odwrotne są jednoznaczne, więc mogą pełnić funkcję zależności kalibracyjnej. Potwierdza to słuszność tezy 1.

Opracowane zależności kalibracyjne wykorzystano do rozwiązania zadania odwrotnego, polegającego na wyznaczeniu względnej zmiany przenikalności magnetycznej na podstawie rozkładu WMPR, w przypadku łączonego wpływu geometrii i właściwości magnetycznych na tenże rozkład. Uzyskane wyniki mieszczą się w granicach niepewności pomiaru rzeczywistej wartości względnej zmiany przenikalności magnetycznej. Potwierdza to prawdziwość tezy 2.

W celu zbadania bezpośredniej zależności między rozkładem WMPR a naprężeniami czynnymi wykonane zostały pomiary dla kilku wartości czynnego naprężenia rozciągającego, w zakresie odkształceń sprężystych i plastycznych. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie relacji między wartością składowej stycznej indukcji a poziomem naprężeń. Otrzymana korelacja nie pozwala na jednoznaczne określenie naprężenia czynnego na podstawie dowolnej zmierzonej wartości składowej stycznej indukcji. Tego typu przyporządkowanie jest jednak jednoznaczne dla badanej stali 18G2A dla naprężeń nieprzekraczających ok. 100 MPa. W kontekście ilościowej oceny naprężeń teza 3 jest prawdziwa jedynie w pewnym, wskazanym powyżej zakresie naprężeń.

Czynnikami wpływającymi na rozkład MPR w badaniach wycieku strumienia magnetycznego są: głębokość wady; usytuowanie wady względem powierzchni, nad którą wykonywany jest pomiar MPR; lokalizacja czujników względem magnesnicy oraz prędkość magnesnicy. Większość publikacji związanych z tą tematyką pochodzi z symulacji numerycznych. Prezentowane wyniki badań częściowo wypełniają tę lukę, ponieważ zawierają wyniki pomiarów MPR, które uzyskano doświadczalnie. Dla celów badań skonstruowano i wykonano magnesnicę z systemem pomiaru MPR oraz przemieszczenia. Obiekt badań stanowiła płyta wykonana ze stali 18G2A, w której wykonane zostały cztery prostopadłościennymi ubytki o różnych głębokościach – wady wzorcowe. Analiza danych doświadczalnych została uzupełniona o analizę numeryczną z wykorzystaniem MES, która

pozwoili na okrelenie rozkldu przestrzennego prdów wirowych generowanych w badanej plycie podczas ruchu magnešnicy oraz zbadanie wplywu umiejscowienia czujników wzgldem magnešnicy na zmianę poziomu bazowego rozkldów RMF.

Rozkld MPR stanowi Źródło informacji o rozmiarach wad, a ruch magnešnicy powoduje jego zniekształcenie, co prowadzi do błędnej oceny geometrii wady. Aby tego uniknąć można dokonać optymalizacji konstrukcji magnešnicy poprzez odpowiednie umiejscowienie czujników w celu zminimalizowania wplywu prędkości magnešnicy na mierzony rozkld przestrzenny MPR. Alternatywą dla procesu optymalizacji lub jego uzupełnieniem jest taka analiza zmierzonego rozkldu przestrzennego MPR, która prowadzi do uzyskania postaci quasi-stacjonarnej tego rozkldu. Przeprowadzono analizę zależności parametrów charakterystycznych rozkldu MPR od prędkości magnešnicy. Stwierdzono, iż poziomy bazowe składowych indukcji zależą w sposób monotoniczny (najczęściej liniowy) od prędkości magnešnicy. Uzyskane zależności pozwoliły na uniezależnienie zmierzonych rozkldów przestrzennych składowych indukcji od zmian ich poziomów bazowych. Podobnych, jak dla poziomów bazowych, prawidłowości nie zaobserwowano dla innych wartości międzyszczytowych. W rezultacie wplyw parametru, jakim jest zależna od prędkości wartość międzyszczytowa anomalii rozkldu MPR, nie został uwzględniony w procesie przekształcania otrzymanych doświadczalnie wyników pomiarów do postaci quasi-stacjonarnej. Oznacza to, iż zaprezentowany w pracy sposób analizy sygnału pozwala na pełne przekształcenie rozkldu przestrzennego MPR do postaci quasi-stacjonarnej w obszarach, w których nie występują wady oraz na przekształcenie częściowe w obszarach występowania wad. Zgodnie z powyższym prawdziwość tezy 4 została potwierdzona dla rozkldu pochodzącego z obszaru, w którym nie występują wady. Udowodnienie tej tezy w przypadku fragmentu rozkldu przestrzennego MPR, w którym występuje anomalia (której Źródłem jest wada) wymaga dalszych badań.

## 5. Strona edytorska pracy

Pracę przygotowano starannie, jednak Autor nie ustrzegł się pewnych drobnych, wyszczególnionych poniżej, zaniedbań.

1. Na stronie 6 i 7 autor dla metody magnetyczno-proszkowej używa skrótu MP zamiast powszechnie znanego i standardowego MT.
2. Na stronie 12 zamiast "także" jest "rakże".
3. W pracy znajdują się błędne odniesienia do pozycji literatury, co zapewne związane jest z wielokrotnymi zmianami struktury pracy, które nie pociągnęły za sobą zmiany numeracji pozycji literatury. Zakładając poprawność numeracji w bibliografii, błędnie przytoczone pozycje występują: str. 17 -jest [24] powinno być [41], jest [25] powinno być [42], jest [26] powinno być [43], jest [27] powinno być [44], jest [28] powinno być [45], jest [29] powinno być [46], jest [30] powinno być [47], jest [31] powinno być [48], jest [32] powinno być [49]; str. 18 - jest [33] powinno być [50], jest [34] powinno być [51]; str. 19 - jest [22] prawdopodobnie powinno być [52] ; str. 20 - jest [35] i całkowicie nie pasuje; str. 22 - [37] nie jest monografią; str. 23 - jest [39] powinno być [28], jest [40] powinno być [29], jest [41] powinno być [30], jest [42] powinno być [31], jest [43] powinno być [32]; str. 24 - jest [40] powinno być [29], jest [44] powinno być [33], jest [45] powinno być [34], jest [46] powinno być [35], jest [47] powinno być [37]; str. 25 - jest [22] prawdopodobnie powinno być [30], jest [48] powinno być [37], jest [49] i nie pasuje, jest [50] powinno być [39], jest [51] powinno być [40]; str. 26, 27 i 28 - jest [37] powinno być [26]; str. 32 - [45] nie jest pozycją przywoływanego autora; str. 35 - poz. [45] nie pasuje; str. 37 - jest [34] powinno być [51].

4. Na stronie 43 pierwsze zdanie wprowadzenia do rozdziału 3. brzmi "Niniejszy rozdział poświęcony został analizie danych pomiarowych ..." co jest stwierdzeniem błędnym i mylącym. Już na stronie 47 w tym rozdziale, opisywane są wyniki symulacji MEB a na stronie 60 pojawia się punkt 3.4. Analiza MEB. Prezentowane w pracy wyniki badań są zarówno wynikami pomiarów, jak również wynikami symulacji numerycznych. Niestety zaakcentowanie, co jest wynikiem pomiarów, a co symulacji jest moim zdaniem niewystarczające. W punkcie 3.2 dotyczącym pomiarów, we fragmencie w którym omawiany jest rys. 3.5, informacja o tym, że rysunek ten prezentuje wyniki symulacji numerycznej pojawia się na końcu akapitu. Uważam, że informacja ta powinna pojawić się na początku akapitu oraz w podpisie pod rysunkiem. Z kolei w podrozdziale 3.4 zatytułowanym "Analiza MEB", czyli prezentującym wyniki modelowania, jako pierwszy pojawia się punkt 3.4.1. w którym omawiane są wyniki pomiarów.
5. Tytuł podrozdziału 3.3. "Wyniki dla próbek obciążanych w trakcie wykonywania pomiarów" sugeruje, że w czasie pomiaru obciążenie rosło. Wydaje mi się, że pomiary wykonywano przy stałej wartości obciążenia czynnego i poprawniejszą formą byłby zapis "próbek obciążonych" zamiast "próbek obciążanych".
6. Na stronie 50 autor używa kwiecistej formy "wolniejszą (w dziedzinie przestrzeni) zmianę". Czy nie prościej byłoby "mniejszą zmianę".
7. Na podstawie rys. 3.10 oraz 3.14 nasuwa się pytanie, czy modelowano 1/4 próbki zakładając symetrię na jej długości i szerokości.
8. Zastanawiające jest występowanie w pracy najpierw rysunku 4.2 a dopiero po nim rys.4.1.
9. Opis osi odciętych na rys. 4.6 jest błędny. Zamiast "x[mm]" powinno być "v[m/s]".
10. Nie znajduję reguły na kolejność pozycji bibliografii. Nie jest ona uporządkowana ani alfabetycznie, ani też w kolejności powoływania się na jej pozycje w treści rozprawy. Pozycja [25] i [36] to ta sama publikacja. W pozycji [48] występuje błąd w pisowni nazwiska autora. Zamiast "Glought" powinno być "Clought".

Powyższe uwagi w najmniejszym stopniu nie wpływają na wysoką, merytoryczną ocenę rozprawy.

## 6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Zbigniewa Usarka, wykazując jego wiedzę i umiejętność prowadzenia pracy naukowej, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, przez co spełnia wymogi stawiane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595, z póź. zm.) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 10 listopada 2015 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wobec powyższego wnioskuję, by Wysoka Rada Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej dopuściła Pana mgr inż. Zbigniewa Usarka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Maciej Rosłok