



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ
I MATEMATYKI STOSOWANEJ

Imię i nazwisko autora rozprawy: Zbigniew Usarek
Dyscyplina naukowa: Fizyka

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy w języku polskim: *Wpływ geometrii, właściwości magnetycznych oraz sposobu magnesowania próbki na rozkład przestrzenny magnetycznego pola rozproszonego*

Tytuł rozprawy w języku angielskim: *Influence of sample geometry, magnetic properties and a method of magnetisation on the spatial distribution of the stray magnetic field*

Promotor: dr hab. Bolesław Augustyniak
Promotor pomocniczy: dr inż. Marek Chmielewski

Gdańsk, 2016



Problematyka rozprawy

Praca porusza problematykę wybranych zagadnień związanych z pomiarami magnetycznego pola rozproszonego (MPR), mających duże znaczenie dla interpretacji wyników tych pomiarów. Dwa główne zagadnienia to:

- wpływ geometrii i właściwości magnetycznych próbki na rozkład przestrzenny MPR;
- wpływ sposobu magnesowania na rozkład przestrzenny MPR.

Przez wpływ geometrii na rozkład przestrzenny MPR rozumiany jest wpływ lokalnych zmian geometrii, czyli również wpływ lokalnego zmniejszenia szerokości próbki. Przez wpływ właściwości magnetycznych na rozkład przestrzenny MPR rozumiany jest natomiast wpływ lokalnej zmiany przenikalności magnetycznej próbki na tenże rozkład. Analizowanymi w pracy sposobami magnesowania, mającymi istotny wpływ na rozkład przestrzenny MPR, są: magnesowanie próbki przy pomocy zewnętrznego pola magnetycznego, magnesowanie próbki przy pomocy przemieszczającej się nad próbką magneśnicy.

Motywacja do podjęcia badań

Z wykonanej przez autora analizy doniesień literaturowych można wnioskować, że w małym stopniu zbadana została możliwość wykorzystania metod bazujących na pomiarze MPR do ilościowego określania rozkładu jak i samej wartości naprężeń w badanym obiekcie. To samo dotyczy ilościowej oceny stopnia deformacji plastycznej przy pomocy tych metod. Zarówno naprężenia jak i zmiany w mikrostrukturze spowodowane deformacją plastyczną powodują zmianę przenikalności magnetycznej. Z tego też powodu postanowiono opracować metodę ilościowej oceny tejże zmiany na podstawie pomiarów MPR. Eksperymenty innych autorów były przez nich przeprowadzane dla próbek poddanych rozciąganiu w maszynach wykonanych z elementów ferromagnetycznych. Wykorzystywana przez autora maszyna rozciągająca została zaś wykonana w głównej mierze ze stali austenitycznej. Pozwoliło to zniwelować wpływ namagnesowanych elementów maszyny na wyniki pomiarów MPR.

Zmiana prędkości magneśnicy skutkuje powstaniem zaburzeń w przebiegach sygnałów napięciowych, które odpowiadają przebiegom składowych indukcji MPR. Zaburzenia te utrudniają odtworzenie poprawnego obrazu wady. Przyczyną zmian rozkładu przestrzennego MPR pod wpływem ruchu magneśnicy są prądy wirowe generowane w płycie podczas tego ruchu. Problem uniezależnienia otrzymanego obrazu wady od zmian prędkości magneśnicy nie jest jeszcze w pełni rozwiązany. Istniejące propozycje przekształcania mierzonego sygnału do postaci quasi-stacjonarnej bazują głównie na metodach „uczenia maszynowego”, takich jak sztuczne sieci neuronowe. Metody te nie wykorzystują relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy zmianą prędkości magneśnicy a zmianą przestrzennego rozkładu MPR. W związku z tym podjęte zostały badania mające tę relację określić.

Cele i tezy

Celem jaki przyświecał badaniom nad wpływem geometrii i właściwości magnetycznych na MPR było (I) opracowanie metodyki pomiarów i analizy ilościowej rozkładu przestrzennego MPR w przypadku obiektów technicznych magnesowanych jedynie ziemskim polem magnetycznym.

Celami badań nad wpływem magnesowania obiektu za pomocą ruchomej magneśnicy na rozkład przestrzenny MPR są: (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 MPR w obecności lokalnej zmiany geometrii i/lub przenikalności magnetycznej brzmią:



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

Teza rozprawy dotycząca rozkładu przestrzennego MPR w sytuacji magnesowania za pomocą ruchomej magneśnicy jest następująca:

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

Otrzymane wyniki

Na podstawie wyników badań uzyskanych dla próbek charakteryzujących się przewężeniem i lokalnym spadkiem przenikalności magnetycznej (spowodowanym deformacją plastyczną) stwierdzono, iż oba czynniki wywierają podobny wpływ na rozkład przestrzenny MPR. Na bazie analizy wyników pomiarów MPR oraz symulacji z użyciem metody elementów brzegowych (MEB) opracowano metodę ilościowego określania lokalnej zmiany przenikalności magnetycznej próbki. Po odpowiedniej kalibracji metoda ta pozwala na ocenę wartości lokalnego odkształcenia plastycznego. Zbadany został również wpływ zmian namagnesowania, spowodowanych działaniem naprężeń zadanych przez obciążenia zewnętrzne, na rozkład przestrzenny MPR. Stwierdzono, iż możliwe jest na podstawie analizy tego rozkładu przybliżone określenie przedziału wartości naprężeń, które występują w elemencie posiadającym przewężenie.

Wpływ magnesowania próbki za pomocą ruchomej magneśnicy na rozkład przestrzenny MPR został przeanalizowany dla przypadku płyty stalowej zawierającej wady o różnych głębokościach. Otrzymane dla płyty z wadami wyniki pozwalają stwierdzić, iż poziomy bazowe mierzonych rozkładów przestrzennych indukcji magnetycznej MPR zależą najczęściej w sposób liniowy od prędkości. Pozwoliło to opracować metodę przekształcania rozkładów przestrzennych MPR, zmierzonych dla w ogólności niejednostajnej prędkości, do postaci quasi-stacjonarnej. Analiza przestrzennego rozkładu prądów wirowych powstających w badanej płycie została przeprowadzona z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Rezultaty tej analizy wskazują na to, iż największa gęstość indukowanych prądów wirowych występuje w obszarach pod biegunami magneśnicy i w okolicy wady.

Struktura rozprawy

Rozdział 1 rozprawy stanowi wprowadzenie do problematyki badawczej. Zawarto w nim również cele i tezy rozprawy oraz opisano jej strukturę.

Na początku rozdziału 2 umieszczone zostały informacje na temat podstawowych wielkości fizycznych używanych w pracy. W sposób zwięzły zostały w nim również opisane wykorzystane w badaniach metody numeryczne. W dalszej jego części przedstawiono przyczyny powstawania MPR oraz jego charakterystyczne cechy. Rozdział kończy się opisem zjawiska prądów wirowych, które są generowane w obiekcie badanym podczas ruchu magneśnicy oraz analizą wpływu tych prądów na rozkład przestrzenny MPR. Rozdział ten zawiera również analizę stanu badań, które zostały przeprowadzone w dziedzinie rozważanych przez autora zagadnień oraz umiejscawia rozprawę na tle tychże badań.

Rozdział 3 zawiera rezultaty pomiarów MPR przeprowadzonych dla zestawu próbek stalowych w ogólności różniących się między sobą geometrią a także rodzajem i wartością naprężeń działających na próbkę. Przedstawiono w nim analizę wyników uzyskanych dla próbek stalowych, które pozostawały pod



wpływem naprężeń zewnętrznych o różnej wartości. W rozdziale tym zaprezentowano również wyniki symulacji wykonanych przy pomocy MEB oraz, bazującą na tych wynikach, metodykę analizy rozkładu przestrzennego MPR. Metodyka ta ma na celu określenie lokalnej, względnej zmiany przenikalności magnetycznej próbki. Na końcu rozdziału dokonano weryfikacji proponowanej metodyki w oparciu o rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla jednej z próbek zbadanych doświadczalnie.

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

Rozdział 5 podsumowuje przeprowadzone badania i najistotniejsze ich wyniki. Zawarto w nim także informacje o realizacji sformułowanych na początku rozprawy celów i tez. Wskazane również zostały potencjalne grupy czytelników, do których w szczególności jest skierowana treść rozprawy. Na końcu rozdziału zdefiniowano kierunki dalszych badań, jakie należy podjąć w związku z rozwojem przedstawionych w rozprawie metod.

Dorobek naukowy autora

Publikacje związane z problematyką rozprawy

- [1] Z. Usarek, *Czynniki wpływające na magnetyczne pole rozproszone elementów konstrukcyjnych wykonanych ze stali węglowych*, Młodzi naukowcy dla polskiej nauki cz. X, Nauki inżynierskie, Tom. I, 2013.
- [2] Z. Usarek, B. Augustyniak, M. Augustyniak, M. Chmielewski, *Influence of Plastic Deformation on Stray Magnetic Field Distribution of Soft Magnetic Steel Sample*, IEEE Trans. Magn. vol. 50 no. 4 (2014) 1-4.
- [3] Z. Usarek, B. Augustyniak, M. Augustyniak, *Separation of the effects of notch and macro residual stress on the MFL signal characteristics*, IEEE Trans. Magn. vol. 50 no. 11 (2014) pp. 1-4.
- [4] M. Augustyniak, Z. Usarek, B. Augustyniak, *Hierarchia czynników wpływu w diagnostyce komponentów stalowych metodą statycznego pola rozproszonego*, Energetyka 6 (2014) s. 324-329.
- [5] Z. Usarek, B. Augustyniak, *Evaluation of the impact of geometry and plastic deformation on the stray magnetic field around the bone-shaped sample*, Int. J. Appl. Electrom. Vol. 48 no. 2,3 (2015) pp. 195-199.
- [6] M. Augustyniak, Z. Usarek, *Discussion of Derivability of Local Residual Stress Level from Magnetic Stray Field Measurement*, J. Nondestruct. Eval. vol. 34 no. 3 (2015) pp. 1-9.
- [7] Z. Usarek, B. Augustyniak, M. Chmielewski, *Wykorzystanie metody elementów skończonych do oceny wpływu prędkości sondy na magnetyczne pole rozproszone modelowej wady powierzchniowej*, Energetyka 2 (2016) s. 85-90.

Pozostałe publikacje

- [1] Z. Usarek, *Modelowanie magnetycznego pola rozproszonego z wykorzystaniem MES*, Nowe trendy w naukach inżynierskich 4, Tom II, 2013.
- [2] M. Augustyniak, Z. Usarek, *Kontrola parametrów obwodu wymuszającego w quasi-statycznych magnetycznych badaniach nieniszczących stali, cz. I: Model analityczny i 2D*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 40 (2014).
- [3] M. Augustyniak, Z. Usarek, *Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review*, J. Nondestruct. Eval. vol. 35 no. 3 (2016) pp. 1-15.