

Prof. dr hab. inż. Józef BŁACHNIO
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
ul. Księcia Bolesława 6
01-494 Warszawa

Warszawa, 08.05.2017r.

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ
I MATEMATYKI STOSOWANEJ

Wpłynęło dnia 12.05.2017r.
L. dz. 95/WFTiMS/SN/2017
Zał. —

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła MACIAKOWSKIEGO
pt.: „Mechaniczny efekt Barkhausena, właściwości oraz wykorzystanie do wyznaczania
funkcji rozkładu naprężeń wewnętrznych”
wykonanej pod naukowym kierownictwem dra hab. Bolesława AUGUSTYNIAKA –
promotora oraz dra inż. Leszka PIOTROWSKIEGO – promotora pomocniczego

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej z dnia 19.09.2006 r. oraz pisma Dziekana Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej Nr. L.dz.31/WFTiMS/SN/2017 z dnia 03.04.2017r.

1. TEMATYKA PODJĘTEJ ROZPRAWY

Ocena stanu właściwości materiałów metodami nieniszczącymi jest obszarem intensywnie rozwijanych badań naukowych. W odniesieniu do materiałów konstrukcyjnych badania metodami nieniszczącymi pozwalają określać ich właściwości we wszystkich fazach istnienia wyrobów. Wybór właściwej drogi rozwiązania tego problemu należy nadal do jednego z ważniejszych celów naukowego poznania i wymaga szeregu badań o charakterze podstawowym. Takie podejście podjął mgr inż. P MACIAKOWSKI w rozprawie pt. „Mechaniczny efekt Barkhausena, właściwości oraz wykorzystanie do wyznaczania funkcji rozkładu naprężeń wewnętrznych”. Podjętą problematykę naukową uważam za bardzo ważną w realiach aktualnych zapotrzebowań poznawczych i aplikacyjnych. Rozważania zostały ukierunkowane na wzbogacenie dotychczasowej wiedzy w zakresie wpływu różnych czynników na właściwości magnetoelastyczne ferromagnetyków i uzyskiwany z nich sygnał mechanicznego efektu Barkhausena. Należy również podkreślić, że temat podjęty w pracy jest interesujący i w niewystarczającym stopniu rozpracowany w literaturze. Generuje szereg istotnych zagadnień wymagających poszukiwań metodologicznych, odpowiednio zaprogramowanych weryfikacyjnych eksperymentów oraz złożonych numerycznych symulacji. Doktorant twórczo rozwija ważki problem badawczy, który jak dotąd nie doczekał się wyczerpującego opracowania. Wykorzystując techniki magnetyczne analizował rozkład składowych naprężeń wewnętrznych w badanych próbkach z wybranych stali konstrukcyjnych. Zasadniczym zadaniem dysertacji było opracowanie optymalnej metody pomiaru mechanicznego efektu Barkhausena (MeBN). Zatem Autor podjął się rozwiązania problemu, który skalą trudności, znaczeniem naukowym i aplikacyjnym spełnia oczekiwania, jakie wiążą się z rozprawą doktorską.

2. ANALIZA TREŚCI I ZAKRESU ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgra inż. P. MACIAKOWSKIEGO zawiera 194 strony oraz 29 stron spisów: treści, bibliografii, rysunków, tabel i streszczeń. Składa się z wstępu, 8 rozdziałów, podsumowania i wniosków. Wykaz literatury zawiera 105 pozycji, ogólnie jest poprawnie dobrany. Przedstawiona bibliografia zawiera 1 publikację autorską oraz 13 publikacji współautorskich Doktoranta z lat 2011–2014 (przy czym autorzy i tytuły z niektórych pozycji bibliografii powtarzają się np.: 10 i 11, 61 i 64). Cytowana literatura dotyczy zakresu rozprawy i zawiera aktualne zagadnienia w niej rozważane oraz dobrze ujmuje tematykę badań realizowanych przez Doktoranta na tle osiągnięć innych autorów.

Rozprawa pt. „Mechaniczny efekt Barkhausena, właściwości oraz wykorzystanie do wyznaczania funkcji rozkładu naprężeń wewnętrznych” dotyczy opracowania optymalnej metody pomiaru MeBN w stalach ferromagnetycznych oraz procedury otrzymania z tych pomiarów funkcji rozkładu naprężeń wewnętrznych - oznaczonych w pracy symbolem $N(\sigma)$.

We wstępie Autor uzasadnia wybór tematu rozprawy oraz podaje jej cel i zakres. Zwraca uwagę, iż kluczowe jest poznanie wartości i rozkładu naprężenia własnego w materiale np. ferromagnetycznym. Praktycznie występuje ono w każdym materiale, co może skutkować zmianą właściwości magnetycznych, mechanicznych i wytrzymałościowych. W zakresie celu pracy podaje, iż zamierza opracować optymalną metodę pomiaru mechanicznego efektu Barkhausena (MeBN) w materiałach ferromagnetycznych oraz procedury otrzymywania z tych pomiarów funkcji rozkładu składowych naprężenia wewnętrznego w badanym materiale. Stwierdza, że na podstawie porównania wyników badań tarcia wewnętrznego od histerezy magnetosprężystej (TWM) oraz zbadanych zależności między natężeniem mechanicznego efektu Barkhausena a stratami energii w wyniku tego tarcia wewnętrznego, istnieje możliwość uzyskania rozkładu składowych naprężenia wewnętrznego, na podstawie wyników pomiaru natężenia MeBN w trakcie pierwszego obciążenia.

W rozdziale drugim charakteryzuje właściwości magnetosprężyste ferromagnetyków. Opisuje strukturę domenową ferromagnetyków, w tym poszczególne energie. Następnie zajmuje się strukturą domen i ruchem ich granic. Opisuje wpływ naprężenia na namagnesowanie oraz proces magnesowania. Dalsze rozważania dotyczą zjawiska tarcia wewnętrznego od histerezy magnetosprężystej (TWM) oraz modeli empirycznych wyjaśniających to tarcie wewnętrzne. Wreszcie wyjaśnia zjawisko mechanicznego efektu Barkhausena i przedstawia stan wiedzy na temat MeBN wraz z jego związkiem z TWM oraz wynikające z tego możliwości wykorzystania do wyznaczania składowych naprężenia wewnętrznego. Podaje także uwagi dotyczące ograniczeń takiego podejścia w przypadku zastosowania do określania naprężenia wewnętrznego.

W rozdziale trzecim klasyfikuje naprężenie wewnętrzne występujące w materiałach konstrukcyjnych. Definiuje trzy grupy naprężenia: makronaprężenie, mikronaprężenie i submikronaprężenie. Omawia przykłady metod ich wyznaczania wraz z krótką dyskusją.

W rozdziale czwartym podaje tezy rozprawy dotyczące zagadnień: pomiaru i metodyki analizy sygnału natężenia emisji mechanicznego efektu Barkhausena oraz wykorzystania tego sygnału do wyznaczania funkcji rozkładu składowych naprężenia wewnętrznego.

W rozdziale piątym zestawia 6 gatunków stali ferromagnetycznych, z których były wykonane próbki użyte w badaniach. Podaje rodzaje stosowych obróbek mechanicznych i cieplnych tych próbek. Omawia właściwości badanych stali.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawia opracowaną i wykonaną własną aparaturę badawczą, którą wykorzystywał w części doświadczalnej pracy. Skonstruował układ do wymuszania drgań swobodnych próbki za pomocą pobudzenia elektromagnetycznego, cechujący się wysoką powtarzalnością amplitudy generowanych oscylacji. Odształcenia na powierzchni próbki były mierzone za pomocą sondy DVRT do pomiaru odchylenia próbki od położenia spoczynkowego, zaadaptowanej do pracy z wyższą częstotliwością sygnału w uzwojeniu pierwotnym. Pozwalało to na precyzyjne wyznaczanie wartości chwilowych odształceń powierzchni próbki w trakcie oscylacji. Dzięki opracowanemu przez Autora układowi elektronicznemu osiągnięto wysoką rozdzielczość pomiarową odształceń względnych. Opracowane zostały również sondy do pomiaru MeBN wraz z analogowymi układami analizy sygnałów i uzyskano bardzo dobrą jakość wyników.

Autor opracował i przedstawił prostą, a jednocześnie poprawną zależność (6.4) normalizacji obwiedni RMS sygnału mechanicznego efektu Barkhausena od prędkości zadawanego obciążania. W wyniku tego uzyskał bardzo dobre odtworzenie przebiegów normalizowanego natężenia tego sygnału od naprężenia na powierzchni próbki przy różnych szybkościach zadawanego obciążania. Stwierdza, że w ten sposób również można dokonywać analizy sygnału magnetycznego efektu Barkhausena, pod warunkiem zmiany prędkości obciążania na prędkość zmian zewnętrznego pola magnetycznego. Rozdział ten kończy się opisem pomiaru twardości oraz pomiaru makro- i mikronaprężenia w próbkach.

W rozdziale siódmym zostały przedstawione opracowane programy w środowisku LabVIEW oraz w języku programowania Java. Programy te opracowano na potrzeby przeprowadzania rejestracji danych pomiarowych MeBN w trakcie prób zmęzeniowych oraz do ich analizy.

W rozdziale ósmym Autor przedstawia numeryczny model emisji MeBN w funkcji zadawanych obciążeń. Opiera się na elementach teorii mikromagnetyzmu, zgodnie z którą źródłem występowania MeBN jest skokowy ruch granic domen magnetycznych (GD) spowodowany kotwiczącymi je barierami w postaci defektów struktury, np. wakansami, granicami ziaren itp. Charakteryzuje dotychczasowe modele znane z literatury oraz przedstawia swój model fenomenologiczny emisji MeBN podczas obciążenia próbki. Opisuje opracowaną metodykę analizy wyników pomiarów emisji MeBN mającej na celu wyznaczenie funkcji rozkładu naprężenia wewnętrznego w próbkach. Podaje, iż model fenomenologiczny z niewielkimi modyfikacjami można również wykorzystać do opisu wpływu makronaprężenia na natężenie emisji MeBN. Rozdział ten kończy się analizą

wyników pomiarów mechanicznego efektu Barkhausena podczas naprężenia materiału próbek.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono wyniki realizowanych badań nad wykorzystaniem sygnału MeBN do wyznaczania funkcji wartości naprężenia wewnętrznego. Opisano badania emisji MeBN przeprowadzone na próbkach z blachy Fe-Si 3% o zorientowanym ziarnie. Materiał ten cechuje bardzo duża anizotropia właściwości mechanicznych i magnetycznych. Znalazło to odzwierciedlenie w wynikach pomiarów natężenia emisji MeBN i otrzymanych z analiz tego sygnału wyników pomiarów wartości naprężenia.

W dalszej części rozdziału Autor opisuje badania emisji MeBN przeprowadzone podczas próby zmęczeniowej próbki ze stali 13HMF. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdził, że sygnał emisji MeBN jest cennym źródłem informacji o zmianach mikrostruktury zachodzących podczas prób zmęczeniowych. Dodatkowym atutem opracowanej procedury badania emisji MeBN z udziałem maszyny zmęczeniowej jest możliwość przeprowadzania pomiaru bezpośrednio w trakcie pracy maszyny.

Następnie Doktorant opisał serię pomiarów natężenia emisji MeBN próbek ze stali S235JR poddanych różnym stopniom deformacji plastycznej. W próbkach tych występował stan makronaprężenia, który był zauważalny w wynikach pomiarów jako asymetria pętli histerezy MeBN względem kierunku zadawanego obciążania. Do tych wyników dopasowany został zmodyfikowany model fenomenologiczny i na tej podstawie zostały wyznaczone wartości makronaprężenia.

Kolejnymi opisanymi badaniami są pomiary emisji MeBN serii próbek ze stali P91 i X20 poddanych różnym obróbkom cieplnym. Uzyskane za pomocą analizy wyników pomiarów natężenia emisji MeBN wartości średniego naprężenia wewnętrznego zostały zestawione z wynikami średniego naprężenia wewnętrznego otrzymanego za pomocą metody dyfrakcji promieni rentgenowskich (XRD).

Następnie Doktorant opisuje serię wyników badań emisji MeBN przeprowadzonych na próbkach ze stali S235JR i S460ML poddanych walcowaniu na gorąco. Otrzymane tą metodą naprężenie porównywane jest z wartością naprężenia otrzymanego metodą dyfrakcji promieni rentgenowskich, uzyskanego z analizy poszerzenia maksimów dyfrakcyjnych. Autor stwierdza, iż uzyskane związki pomiędzy wartością średniego naprężenia wewnętrznego wyznaczanego za pomocą metody rentgenowskiej, uwiarygodniają jednoznacznie metodę wyznaczania naprężenia wewnętrznego poprzez odpowiednią analizę wyników pomiarów emisji MeBN.

W rozdziałach dziesiątym i jedenastym Doktorant dokonuje podsumowania osiągniętych rezultatów badań, przedstawia wynikające z tych badań wnioski oraz proponuje zagadnienia do dalszych prac badawczych.

3. OCENA MERYTORYCZNA REZULTATÓW ROZPRAWY

Mgr inż. P. MACIAKOWSKI w pracy doktorskiej przedstawił wyniki bogatych badań eksperymentalnych i licznych symulacji numerycznych dotyczących właściwości

i zastosowania mechanicznego efektu Barkhausena do wyznaczania rozkładu naprężenia wewnętrznego w próbkach z wybranych stali. Zbudował układ pomiarowy natężenia emisji mechanicznego efektu Barkhausena w funkcji zadawanych obciążeń oraz opracował metodykę analizy rezultatów pomiarów, przez co uzyskał bardzo dokładne wyniki badań. Zbadał wpływ szybkości obciążenia próbek na obwiednie napięcia skutecznego sygnału napięciowego emisji mechanicznego efektu Barkhausena oraz opracował skuteczną metodę korekcji wyników, wskutek tego uniezależnił je od szybkości zadawanego obciążenia. Opracowany model zależności natężenia emisji mechanicznego efektu Barkhausena od zadawanych obciążeń umożliwił jakościową i ilościową analizę wyników pomiarów emisji tego efektu. Na podstawie pomiarów emisji mechanicznego efektu Barkhausena w trakcie prób zmęczenia stali stwierdził, że jest to zjawisko bardzo czułe na zachodzące zmiany mikrostruktury próbek. Ważną zaletą tego efektu jest możliwość przeprowadzania takich badań i analizy wyników bezpośrednio w trakcie realizacji testów zmęczeniowych. Zawarte w rozprawie wyniki i zaproponowane sposoby ich analizy mogą być szczególnie przydatne do oceny stanu naprężenia i zmian struktury w materiałach poddanych procesowi zmęczenia. Poszczególne rozdziały są logicznie i spójnie przedstawione. Dobrze dokumentują uzyskanie założonych celów podjętych zadań badawczych, w zakresie poszukiwania jakościowych, a zwłaszcza ilościowych przesłanek, udowadniając sformułowane tezy. Tworzą zbiór wartościowych narzędzi do rozwijania dalszych badań w tym temacie i są istotnym przekazem cennych informacji wzbogacających dotychczasową wiedzę w zakresie właściwości i zastosowania mechanicznego efektu Barkhausena do wyznaczania rozkładu naprężenia wewnętrznego w elementach z materiałów ferromagnetycznych.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Podjęta i opracowana przez mgra inż. P. MACIAKOWSKIEGO problematyka naukowa odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim. Autor sformułował problem naukowy, opracował metody badawcze i skonstruował stanowisko badawcze. W ramach realizacji rozprawy w szerokim zakresie przeprowadził badania eksperymentalne, symulacje numeryczne i naukowe analizy. W całości zrealizował cele i zadania badawcze oraz udowodnił postawione tezy. Zaproponował także zakres dalszych prac badawczych. Podejmując i rozwiązując trudny, a zarazem aktualny problem, Doktorant włożył wiele wysiłku naukowego oraz wykazał, że posiada wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego formułowania zagadnienia, a także prowadzenia badań naukowych. Całość rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie tak pod względem metodologicznym, jak i merytorycznym. Opiniowana rozprawa posiada walory naukowe i użyteczne.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Mechaniczny efekt Barkhausena, właściwości oraz wykorzystanie do wyznaczania funkcji rozkładu naprężeń wewnętrznych” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Przedstawiam Wysokiej Radzie Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej wniosek o dopuszczenie Pana mgra inż. P. MACIAKOWSKIEGO do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

