

prof. dr hab. inż. Janusz Juraszek
Akademia Techniczno-Humanistyczna
ul. Willowa 2
43-309 Bielsko-Biała

Bielsko-Biała, 8.06'2018

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

OCENA STANU TWORZYWA METODAMI MAGNETYCZNYMI

mgr inż. Krzysztofa Fryczowskiego

wykonana na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej i umowy z dnia 17.05.2018r.

1. Sylwetka Doktoranta

Mgr inż. Krzysztof Fryczowski już na etapie pracy magisterskiej pt.: "Pomiary efektu Barkhausena w próbkach odkształconych plastycznie oraz w próbkach poddanych procesom pełzania" przejawiał zainteresowania: diagnostyką stanu elementów maszyn i urządzeń z wykorzystaniem metod badań nieniszczących, rozwojem nowoczesnych metod badań nieniszczących w zakresie wykorzystania polowego efektu Barkhausena, spektroskopii impedancji niskoczęstotliwościowej prądów wirowych oraz własnego magnetycznego pola rozproszenia. Pracę magisterską obronił w dniu 13 września 2013 na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn specjalność: Maszyny i Urządzenia Energetyczne. Po ukończeniu studiów magisterskich, co jest istotne kontynuował wcześniej podjęte badania rozszerzając je o metody analizy sygnałów niestacjonarnych w zakresie reprezentacji czasowych, częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych. W tym czasie był współautorem

13 publikacji punktowanych, 10 publikacji w materiałach konferencyjnych, brał czynny udział w 10 konferencjach krajowych dotyczących głównie badań nieniszczących, odbył 3 szkolenia z zakresu kotłów i oprogramowania LabView.

2. Ocena rozprawy

Rozprawa liczy 136 stron, zawiera spis treści, 7 rozdziałów, spis literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Bibliografia zawiera 101 aktualnych pozycji literaturowych

W rozdziale 1 Doktorant przedstawił zakres i główny cel rozprawy. Było nim opracowanie korelacji diagnostycznych, które umożliwiłyby określenie stanu tworzywa (ocena stanu naprężenia i deformacji, twardości oraz zużycia wskutek procesu pełzania) z wykorzystaniem do tego pomiaru właściwości magnetycznych i elektrycznych (pomiar połowego efektu Barkhausena, składowych impedancji prądów wirowych, natężenia własnego magnetycznego pola rozproszenia). Pewne wątpliwości budzi używanie przez Doktoranta określenia **tworzywo**. Według słownika języka polskiego pod pojęciem tworzywo rozumie się materiał służący do tworzenia czegoś, tworzywo chemoutwardzalne «substancja ulegająca utwardzeniu pod wpływem działania czynników chemicznych». W tym znaczeniu autor nie zajmuje się tworzywami, lecz konkretnymi materiałami głównie ferromagnetycznymi, w tym stalami:

stal S235JR - próbki płytowe z przewężeniem (wiosełkowe), szerokość przewężenia 30 mm i grubości próbek 3, 4 i 5 mm,

stop chromowo-niklowy - próbki walcowe o średnicy 4 mm i długości testowej 140 mm,

stal do głębokiego tłoczenia DC01 - próbki wiosełkowe, szerokość przewężenia 20 mm, grubość 2 mm,

stale austenityczne - próbki wiosełkowe, szerokość przewężenia 20 mm, grubość próbek 5 mm,

stal S235 i DC01 - próbki wiosełkowe, szerokość przewężenia 20 mm, grubość S235-3 mm DC01-2 mm,

stal ams6414 - forma próbek - krążek stalowy o średnicy 50mm i grubości 8 mm,

stal X12 X12CrMoWVNbN10-1-1 - próbki walcowe o średnicy 4 mm i długości 15 mm.

Przedstawił przegląd literaturowy analizowanego przez niego zagadnienia.

W rozdziale 2 omówił wybrane zagadnienia dotyczące elektromagnetyzmu. Przedstawił źródła pola magnetycznego, wyjaśnił zjawisko indukcji elektromagnetycznej (indukcyjność cewki, samoindukcja indukcja wzajemna, prądy wirowe) oraz opisał właściwości magnetyczne materiałów.

W rozdziale 3 Doktorant scharakteryzował sygnały diagnostyczne (polowy efekt Barkhausena, składowe impedancji prądów wirowych i natężenie własnego magnetycznego pola rozproszenia) i oparte na nich metody badawcze. Opisał aparaturę wykorzystaną w pracach badawczych. Dodatkowo zawarto w tym rozdziale wybrane zagadnienia dotyczące analizy niepewności i analizy statystycznej pomiarów. Szczególną uwagę poświęcono w tym rozdziale opisowi analizy ilościowej sygnału napięciowego polowego efektu Barkhausena oraz opracowanej w ramach niniejszego doktoratu aplikacji narzędziowej Barkhausen Emission Analysis Toolkit (BEATa), przeznaczonej do realizacji pomiaru, prezentacji graficznej i wielowariantowej analizy danych pomiarowych sygnału napięciowego efektu Barkhausena.

W następnym rozdziale zawarł ocenę możliwości wykorzystania metod magnetycznych badań nieniszczących do identyfikacji stanu naprężenia i odkształcenia w różnych materiałach. Implementowano następujące metody badawcze, czyli pomiar: polowego efektu Barkhausena, składowych impedancji oraz pomiar składowych własnego magnetycznego pola rozproszenia.

Wykazano możliwość wykorzystania parametrów opisu ilościowego polowego efektu Barkhausena do identyfikacji stanu naprężenia. Zastrzeżenia może budzić określenie stanu naprężenia, gdyż de facto Doktorant zajmuje się jedną składową tego stanu. Parametrem wykazującym największą możliwość opracowania korelacji diagnostycznych (duży zakres wartości naprężenia, wysoka wartość współczynnika determinacji korelacji liniowej) jest całkowita liczba zdarzeń wyznaczona dla różnych progów napięciowych. Opracował metodykę określania stanu naprężenia czynnego na podstawie wybranych parametrów ilościowo opisujących efekt Barkhausena. Wykazano możliwość jakościowej oceny wystąpienia w badanym elemencie odkształceń plastycznych, co generuje złożony stan odkształcenia i naprężenia.

Pomiary parametrów obwodu RLC, w którym rdzeniem uzwojenia pomiarowego jest obciążana próbka o geometrii osiowo-symetrycznej wykazały wpływ naprężenia na wartości składowych impedancji. Wpływ ten stwierdzono dla wszystkich częstotliwości pomiarowych, a dla niektórych z nich występuje jednoznaczna korelacja umożliwiająca określenia składowej

normalnej naprężenia. Niestety, wyniki pomiarów uzyskane dla poszczególnych próbek różnią się między sobą ilościowo w sposób znaczny.

Wykazano, że zmiana wartości składowych natężenia własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR występuje na skutek działania naprężenia normalnego. W przypadku sytuacji typowo laboratoryjnej, obciążenia narastającego w jednym cyklu w sposób ciągły, występuje korelacja naprężenie normalne - wartości składowych WMPR. Natomiast dla narastających obciążeń cyklicznych takiej korelacji brak. Przeprowadzono analizę możliwości identyfikacji składowej stanu odkształcenia plastycznego stali austenitycznych wykorzystując pomiar składowych własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR. W badaniach wykorzystano próbki stali austenitycznych różniące się pod względem składu chemicznego i stwierdzono, że tylko przypadku stali (X2CrNi18-9) obszary odkształcone plastycznie można identyfikować na podstawie rozkładów składowych WMPR.

W rozdziale 5 przedstawił wyniki badań dotyczących możliwości oceny twardości za pomocą polowego efektu Barkausena. Badano próbki, w których różnice twardości wynikały z umocnienia odkształceniowego oraz obróbki cieplno-chemicznej.

Wykazano, że zmiany twardości powodują zmiany wartości analizowanych parametrów ilościowej analizy polowego efektu Barkhausena. W obu analizowanych przypadkach (zmiana twardości wskutek umocnienia odkształceniowego oraz w wyniku obróbki cieplno-chemicznej) szczególnie wysokie współczynniki determinacji R^2 regresji liniowej otrzymano w przypadku rozkładów całkowitej liczby zdarzeń w wybranych przedziałach napięcia progowego oraz w przypadku amplitudy dla wybranych przedziałów częstotliwości. W przypadku pozostałych parametrów, takich jak energia efektu Barkhausena oraz największe napięcie obwiedni dla zmian twardości wskutek umocnienia nie uzyskano tak dobrej korelacji, natomiast dla zmian twardości wskutek obróbki cieplno-chemicznej otrzymane korelacje charakteryzują się dużą wartością współczynnika determinacji. Przeprowadzona analiza reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnału z wykorzystaniem krótkoczasowej transformacji Fouriera wykazała, że wzrost wartości twardości zwiększa obszar występowania niezerowych wartości współczynników spektrogramów zarówno w dziedzinie częstotliwości, jak i w dziedzinie czasu. Przedstawione wyniki w połączeniu z aplikacją BEATa umożliwiają rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych badań nieniszczących, polegających na określaniu twardości na podstawie wybranych parametrów ilościowo opisujących efekt Barkhausena.

Rozdział 6 zawiera interesujące wyniki badań mających na celu identyfikację stanu zaawansowania procesu pełzania. Badania przeprowadzono na próbkach ze stali

X12CrMoWVNbN10-1-1 dla dwóch skrajnych stanów tworzywa (stan dostawy, stan po pełzaniu). Interesująca byłaby analiza pomiędzy tymi dwoma stanami skrajnymi.

Dla próbek wykonanych ze stali X12CrMoWVNbN10-1-1 proces pełzania wpływa na ilościowe cechy polowego efektu Barkhausena i istnieje możliwość rozróżnienia dwóch skrajnych stanów tworzywa, czyli stanu dostawy i stanu po przeprowadzonych przyspieszonych próbach pełzania. W badaniach wykorzystano dwie konfiguracje parametrów wykorzystanych podczas pomiarów, które różniły się przede wszystkim częstotliwością prądu magnesującego. Większą możliwość rozróżnienia skrajnych stanów badanej próbki otrzymano w przypadku niższej częstotliwości prądu magnesującego.

W ostatnim rozdziale Doktorant przedstawił podsumowanie pracy. W dalszych badaniach należy wziąć pod uwagę szereg czynników, takich jak: geometria badanego elementu (Doktorant stosował próbki wiosełkowe i walcowe), złożony stan naprężenia w elemencie, jakość badanej powierzchni, stan mikrostruktury materiału oraz stan naprężeń własnych tworzywa, historia obciążania badanego elementu.

3. Ocena merytoryczna dysertacji

Tytuł „Ocena stanu tworzywa metodami magnetycznymi” rozprawy mógłby być bardziej uszczegółowiony, gdyż Doktorant ogranicza swoje rozważania do 6 różnych gatunków stali i jednego stopu Cr-Ni. Zastosował trzy różne metody magnetyczne bazujące na polowym efekcie Barkhausena, składowych własnego rozproszonego pola magnetycznego oraz zmianie impedancji uzwojenia pierwotnego. Jest to interesujące z badawczego i naukowego punktu widzenia, ponieważ poszukiwanie nowych implementacji tych metod w badaniach nieniszczących może przyczynić się do lepszego wykrywania miejsc niebezpiecznych, oceny twardości badanej powierzchni nieinwazyjnie, oceny zaawansowania procesu pełzania. Wymienione obszary są ważne również z praktycznego punktu widzenia. Analiza „obrazu magnetycznego” badanych próbek z ich stanem mechanicznym jest zagadaniem złożonym, ale zarazem interesującym naukowo. Cel pracy został moim zdaniem zbyt ogólnie określony. Określenie korelacji diagnostycznych umożliwiających określenie stanu naprężenia i deformacji - stan naprężenia ogólnie jest charakteryzowany za pomocą 6-ciu składowych natomiast dla przypadku zagadnienia dwu-wymiarowego i osiowo-symetrycznego za pomocą 3 składowych stanu naprężenia. To samo dotyczy zagadnienia stanu odkształcenia. Po przekroczeniu granicy plastyczności trzeba znać powierzchnię plastyczności, moduł umocnienia etc. Z dalszej części pracy wynika, że Doktorant pod pojęciem stanu naprężenia

rozumie jej jedną składową normalną a próba obciążeniowa, którą przeprowadzał to jednoosiowe rozciąganie.

Określenie korelacji diagnostycznych umożliwiających określenie twardości – mamy różne skale twardości dedykowane różnym materiałom oraz szereg metod pomiaru twardości.

Przyjęte metody badawcze Doktorant uzasadnia w następujący sposób: „W badaniach przeprowadzonych w ramach pracy nie skupiano się na konkretnej dziedzinie przemysłu **ani na konkretnych tworzywach**. Wynikało to z ograniczeń dostępu do aparatury badawczej (metody magnetyczne) oraz badanych **tworzyw**”. Nie tłumaczy to faktu badania różnych próbek metali za pomocą różnych metod :

- stal S235JR - ocena stanu naprężenia, **szum Barkhausena**,
- stop niklowo-chromowy - ocena stanu naprężenia, **miar składowych impedancji**,
- stal do głębokiego tłoczenia DC01 - ocena stanu naprężenia, twardość,
- stal austenityczna X2CrNi18-9 oraz X15CrNiSi20-12 - ocena deformacji plastycznej, **miar WMPR**,
- stal S235JR i DC01 - ocena twardości (umocnienia odkształceniowe), szum **Barkhausena**,
- stal AMS 6414 - ocena twardości (obróbka cieplno-chemiczna), szum Barkhausena,
- stal X12CrMoWVNbN10-1-1 - ocena zaawansowania procesu pełzania, szum Barkhausena, **pętla histerezy magnetycznej**.

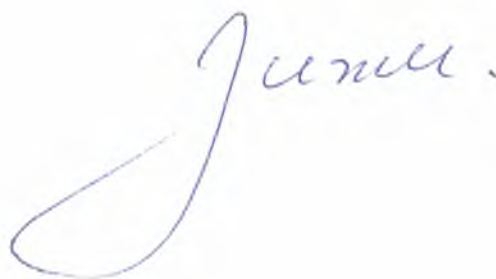
Pomimo tego metodykę prowadzonych badań należy uznać za właściwą. W pracy zamieszczono wyniki badań doświadczalnych, które często były związane z analizą statystyczną. Doktorant wykazał się dobrym warształem badawczym i analitycznym. Drobne uchybienia w opracowaniu wyników badań w niczym nie umniejszają ich wartości.

Pewnym mankamentem pracy są aspekty związane z oceną stanu zaawansowania procesu pełzania. Jest to zagadnienie złożone. Analizie poddano tylko, jak to określa Doktorant, stan dostawy i stan po pełzaniu. Nie zastosowano w tych badaniach pomiaru za pomocą metody emisji magneto-akustycznej, który to można znaleźć w pozycjach literatury przedmiotu. Kolejnym mankamentem pracy jest brak pomiarów dla stanów pośrednich procesu pełzania, pomiary w których dałyby bezpośrednią odpowiedź na możliwości opracowania metodyki oceny stanu zaawansowania procesu pełzania. Badania prowadzone były dla prostej geometrii próbek. Praktyczne zastosowanie przedstawionych metod do badania wybranych elementów konstrukcyjnych o bardziej złożonej geometrii będzie wymagało przeprowadzenie szeregu eksperymentów oraz ich walidacji.

Do najważniejszych osiągnięć pracy można zaliczyć: opracowanie aplikacji komputerowej Barkhausen Emission Analysis Toolkit (BEATa) przeznaczonej do realizacji pomiaru, prezentacji graficznej i wielowariantowej analizy danych pomiarowych sygnału napięciowego efektu Barkhausena. Można to uznać za istotne osiągnięcie Doktoranta w badaniach eksperymentalnych oraz w analizie danych pomiarowych. Aplikacja ta została wykorzystana do opracowania mających zastosowanie praktyczne w przemyśle nazwanych przez doktoranta „korelacji diagnostycznych oceny stanu naprężenia i deformacji oraz oceny twardości”. Istotną jej cechą jest możliwość wprowadzenia nowych metod analizy sygnału.

4. Ocena końcowa

Przedstawioną do oceny dysertację należy umiejscowić w dyscyplinie naukowej: Budowa i Eksploatacja Maszyn. Istotnym osiągnięciem doktoranta jest opracowanie oryginalnej aplikacji umożliwiającej wielowariantową analizę danych pomiarowych sygnału napięciowego efektu Barkhausena otrzymanych z jednowymiarowych badań obciążeniowych stosownych próbek. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Fryczowskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim (zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r., Dz.Ustaw Nr 65, poz. 595) i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Uml.', is written in a cursive style.