

## Wybrane metody wykrywania degradacji zmęczeniowej w stalach ferromagnetycznych

**Streszczenie.** Degradacja zmęczeniowa stali ferromagnetycznych związana jest ze zmianą parametrów elektrycznych ( $\gamma$ ) i/lub magnetycznych ( $\mu$ ). W artykule omówiono wybrane zagadnienia badania korelacji parametrów magnetycznych materiału ze stopniem degradacji zmęczeniowej eksploatacyjnej jak i kontrolowanej ilościowo w warunkach laboratoryjnych. W celu laboratoryjnej identyfikacji i oceny zjawisk zmęczeniowych opracowano metodykę ilościowego opisu stopnia uszkodzenia materiału. Według opracowanej metodyki przygotowano zestaw próbek wzorcowych o określonej wartości stopnia ich uszkodzenia. Zbadano i przeanalizowano mikrostrukturalne aspekty procesu degradacji, jaka zachodzi w warunkach eksploatacji pod wpływem zmiennych obciążeń mechanicznych, termicznych oraz środowiska jak również w warunkach jednoosiowych obciążeń zmiennych realizowanych w laboratorium.

**Abstract.** The fatigue degradation of ferromagnetic steels proceeds with the changes of electrical ( $\gamma$ ) and/or magnetic ( $\mu$ ) parameters. The article presents some selected issues of research into correlations between the magnetic parameters and the material fatigue degree, in operating conditions as well as quantitatively controlled in laboratory conditions. In order to identify and assess the effects of fatigue, a methodology of quantitative description of material defect degree was developed. According to the developed methodology, a set of standard samples with specified value of their defect degree was prepared. There were tested and analyzed the microstructural aspects of degradation process taking place in the operating conditions under the influence of variable mechanical, thermal and environmental loads, and also in the conditions of single-variable loads performed in the laboratory. (Selected methods of detection of fatigue degradation in ferromagnetic steels)

**Słowa kluczowe:** wzorcowanie zmęczeniowe, korelacje mechaniczno-magnetyczne i elektryczne, ocena stopnia degradacji zmęczeniowej  
**Keywords:** fatigue calibration, mechanical-magnetic and electrical correlations, fatigue degradation degree assessment

### 1. Wprowadzenie

Nowoczesne metody defektoskopii powinny umożliwić nadzorowanie stanu rozwoju procesu zmęczenia materiału w dowolnym momencie eksploatacji, lub w kolejnych cyklach diagnostycznych. Prosta detekcja nieciągłości geometrii przestaje być wystarczająca tak w energetyce, lotnictwie jak i w transporcie szynowym.

Szybki rozwój diagnostyki procesów zmęczenia materiału dotyczy ostatnich kilkunastu lat. Kierunek rozwoju badań procesów zmęczeniowych został zainicjowany w kraju przez IPPT PAN na corocznych seminariach, w ramach Centrum Doskonałości Bezpieczeństwa Konstrukcji Wysokociśnieniowych, realizowanym wspólnie z Wydziałem Inżynierii Materiałowej PW. Na seminariach tych, zaczęto wprowadzać problematykę korelacji zjawisk mechanicznych zmęczeniowych ze zmianami magnetycznymi [1, 2, 4] i elektrycznymi materiału [3] do zagadnień mechaniki zmęczenia [5, 6, 7, 8]. Organizowane seminaria przyczyniły się do metodologicznego wykorzystywania dostępnych metod defektoskopowych w wykrywaniu procesu degradacji zmęczeniowej. Wzrost dynamiki badań [5, 6] nastąpił z momentem opracowania metod kontrolowania ilościowego mechanicznej degradacji zmęczeniowej stali.

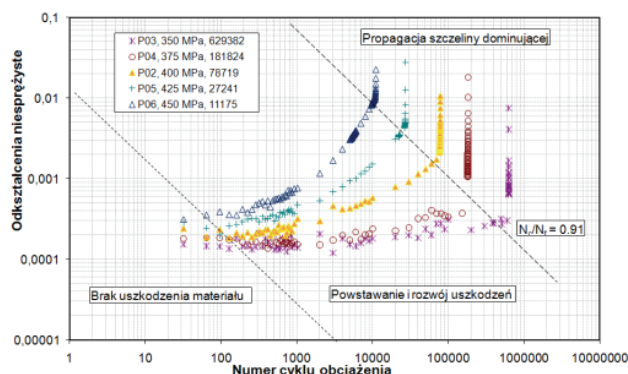
W artykule zawarto wybrane zagadnienia z zakresu korelacji parametrów magnetycznych materiału z postępowaniem degradacji zmęczeniowej. Wskazano na fizyczne i pomiarowe aspekty tego zagadnienia oraz prawidłowość doboru metod pomiaru.

### 2. Skalowanie zmęczeniowe. Ilościowa ocena stopnia uszkodzenia

Detekcja i charakterystyka zjawisk zmęczeniowych w materiale wymaga zdefiniowania stopnia uszkodzenia i opracowania zestawu próbek wzorcowych o określonej jego wartości. W celu ilościowego określenia stopnia uszkodzenia pod wpływem obciążeń cyklicznych zdefiniowano parametr uszkodzenia D [5, 6], opracowany na podstawie reakcji materiału w odkształceniach, w poszczególnych cyklach na wymuszenia cyklicznych zmian naprężenia o różnych amplitudach. Parametr D zdefiniowany jest zgodnie z zależnością (1):

$$(1) \quad D = \frac{\varepsilon_m - (\varepsilon_m)_{\min}}{(\varepsilon_m)_{\max} - (\varepsilon_m)_{\min}}$$

Gdzie  $\varepsilon_m$  oznacza średnią wartość odkształceń w rozpatrywanym cyklu obciążenia,  $(\varepsilon_m)_{\min}$  oznacza wartość średnią odkształcenia w pierwszym cyklu na początku procesu rozwoju uszkodzeń,  $(\varepsilon_m)_{\max}$  oznacza wartość średnią odkształcenia w ostatnim cyklu na końcu procesu rozwoju uszkodzeń. Dane doświadczalne pokazane przykładowo na rysunku 1, są podstawą do określenia ewolucji parametru uszkodzenia D i wyznaczenia zakresu amplitudy naprężeń, w którym obowiązuje liniowa akumulacja uszkodzeń, co w znacznym stopniu usprawnia szacowanie żywotności zmęczeniowej dla złożonych historii amplitud naprężenia [5-8].

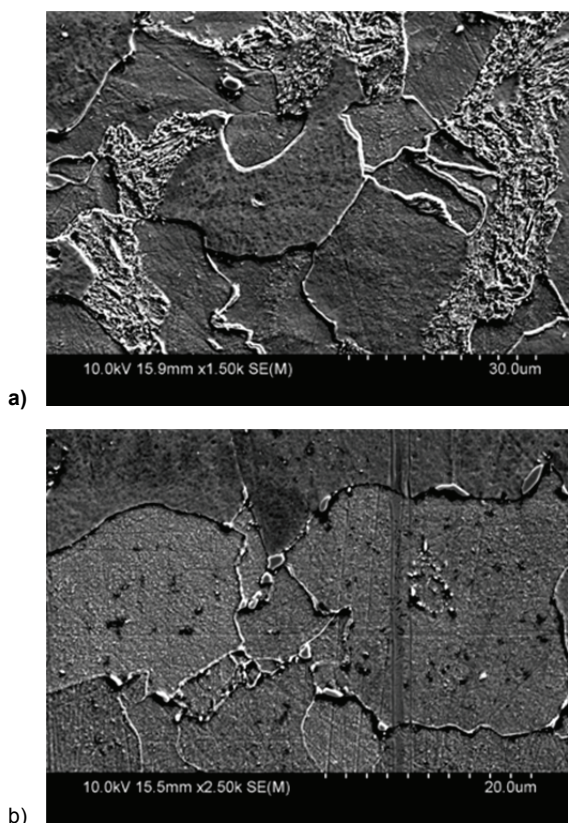


Rys. 1. Zmiana odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach obciążenia dla różnych poziomów amplitudy naprężenia

Postęp we wzorcowaniu zmęczeniowym próbek poprzez uzyskanie możliwości wykonywania próbek o zadanym stopniu zmęczenia mechanicznego materiału przyspieszył krajowy rozwój badań nad stalami stosowanymi w transporcie szynowym, a także w energetyce i przemyśle petrochemicznym.

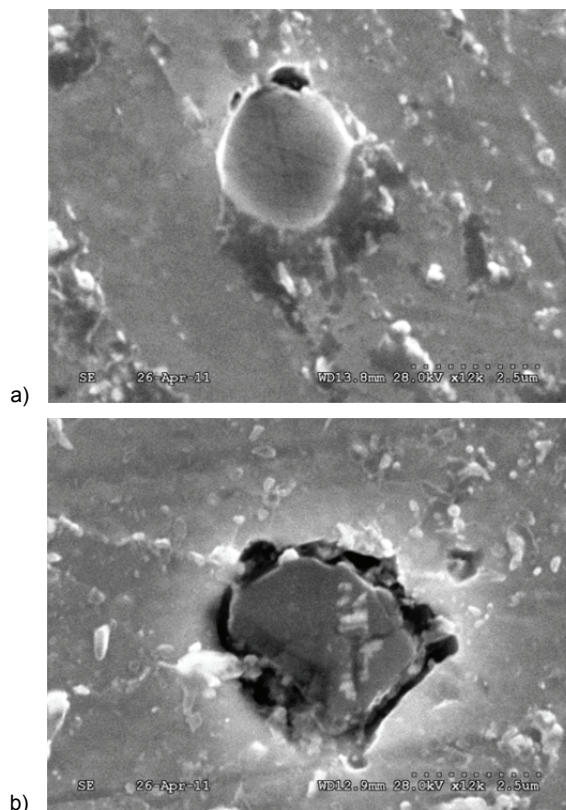
### 3. SEM - degradacja mikrostruktury pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych

Proces degradacji materiałów instalacji i konstrukcji wynika z warunków obciążeń mechanicznych i termicznych oraz agresywnego środowiska. Monitorowanie rozwoju degradacji jest możliwe na podstawie obserwacji mikroskopowych. W ostatnich latach pojawiły się rozwiązania pozwalające na nieinwazyjne obserwacje mikrostruktury (bez konieczności pobierania próbek) za pomocą mikroskopii świetlnej, a w niektórych przypadkach także Skaningowej Mikroskopii Elektronowej. Specyficzna dla tego gatunku stali dynamika zmian zachodzących w mikrostrukturze pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych pozwala na ocenę stopnia degradacji we wczesnej fazie jej rozwoju i dalszy monitoring aż do zniszczenia. Na rys. 2 przedstawiono zdjęcia mikrostruktury stali 13-HMF w stanie dostawy oraz po 100 000 godzin eksploatacji w warunkach instalacji bloków energetycznych.



Rys. 2. Obraz mikrostruktury stali 13 HMF przed (a) i po (b) czasie eksploatacji 100 000 h

Na podstawie analizy przedstawionych obrazów można stwierdzić występowanie istotnych zmian mikrostrukturalnych w wyniku oddziaływania zarówno wysokiej temperatury jak i obciążeń zmęczeniowych. Nastąpiła transformacja perlitu poprzez sferoidyzację i koalescencję płytek cementytu oraz powstały wydzielenia węglików na granicach ziaren. Te twarde wtrącenia niemetaliczne, obok innych defektów mikrostruktury, jak np. pustki, są istotnym czynnikiem procesu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych prowadzących do degradacji właściwości eksploatacyjnych. Potwierdzają to badania mikrostruktury próbek ze stali P91 poddawanych testom zmęczeniowym, które wykazały różnice w morfologii materiału próbki wokół wtrąceń tlenkowych (w tym przypadku  $Al_2O_3$ ). Na rysunku 3. przedstawiono obraz wtrącenia w próbce w stanie dostawy oraz w próbce po 6 700 000 cyklach pod obciążeniem symetrycznym o amplitudzie 320 MPa.



Rys. 3. Obraz wtrąceń niemetalicznych w próbce przed (a) i po (b) próbie zmęczeniowej

Na przedstawionych fotografiach można zaobserwować zjawisko „odspojenia” (debonding) twardego wtrącenia ceramicznego od plastycznej, metalicznej osnowy pod wpływem obciążeń zmęczeniowych. W dalszym etapie zmęczenia w takich miejscach następuje nukleacja mikro i makro pęknięć prowadzących do dekohezji próbki.

### 4. Podstawy fizyczne detekcji zmęczeniowej materiału metodami elektromagnetycznymi

Nakładanie się wewnątrz materiału pola magnetycznego zewnętrznego z polem od prądów wirowych jest zależne od częstotliwości i natężenia prądu płynącego przez cewkę magnesującą, przenikalności magnetycznej  $\mu$  oraz od przewodności elektrycznej właściwej  $\gamma$  [1, 12-21]. Procesy zmęczeniowe wpływają na oba parametry z różną intensywnością. Do opisu zmienności parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału pomocne są równania Maxwella. Po pominięciu wpływu prądów dielektrycznych, ze względu na dobrą przewodność właściwą materiału i założoną jego jednorodność, można zapisać:

$$(2) \quad \text{rot } \vec{E} = -\mu_r \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$(3) \quad \text{rot } \vec{H} = \gamma \vec{E}$$

gdzie:  $\vec{E}$  - natężenie pola elektrycznego,  $\vec{H}$  - natężenie pola magnetycznego,  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni,  $\gamma$  - elektryczna przewodność właściwa materiału,  $\mu_r$  - względna przenikalność magnetyczna materiału próbki. Najczęściej w rozważaniach technicznych przyjmuje się założenie upraszczające zakładające, że przewodność elektryczna jest skalarem, a więc wielkością jednowymiarową jak dla materiału izotropowego. Zakładamy także, że materiał próbki jest jednorodny.

$$(4) \quad \Delta \vec{H} = \gamma \mu_r \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

Wektorowo-czasowa postać wzoru równania różniczkowego (4) wskazuje, że o polu wypadkowym materiału ferromagnetycznego (nowego i eksploatowanego) magnesowanego prądem przemiennym decyduje zarówno przenikalność magnetyczna jak i przewodność właściwa materiału. Cykl zmian pola magnetycznego cewki magnesującej zmienia się wraz z przyłożonym do niej napięciem.

$$(5) \quad \hat{H}(t) = |\hat{H}| \cdot e^{j\omega t}$$

Następstwem magnesowania prądem przemiennym w czasie jest przesunięcie fazowe  $\delta$  indukcji  $\hat{B}(t)$  w stosunku do natężenia pola  $\hat{H}(t)$

$$(6) \quad \hat{B}(t) = |\hat{B}| \cdot e^{j(\omega t - \delta)}$$

Przenikalność magnetyczna jest także wielkością zespoloną:

$$(7) \quad \hat{\mu} = \frac{\hat{B}(t)}{H(t)} = \frac{|\hat{B}|}{|\hat{H}|} \cdot e^{-j\delta} = |\hat{\mu}| \cdot e^{-j\delta}$$

$$(8) \quad \mu_{cz} = \mu \cdot \cos\delta = \mu_L$$

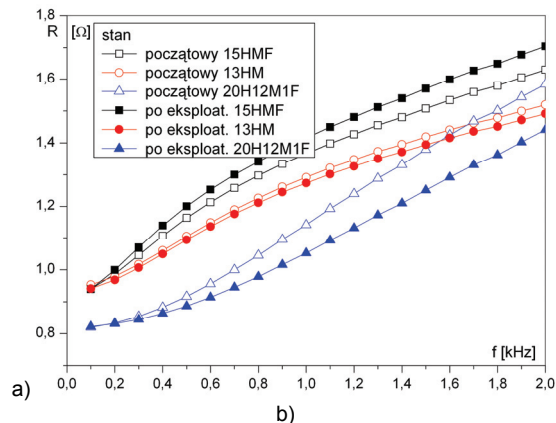
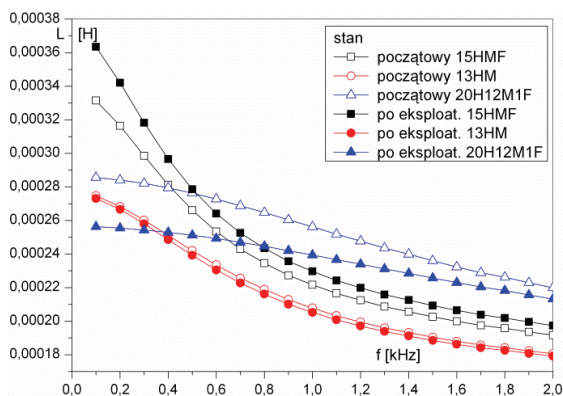
$$(9) \quad \mu_b = \mu \cdot \sin\delta = \mu_R$$

Kąt przesunięcia fazowego uwidocznił się w parametrach cewki pomiarowej z materiałem badanym (rdzeniem)

$$(10) \quad \delta = \frac{\Delta R r d z}{\omega L}$$

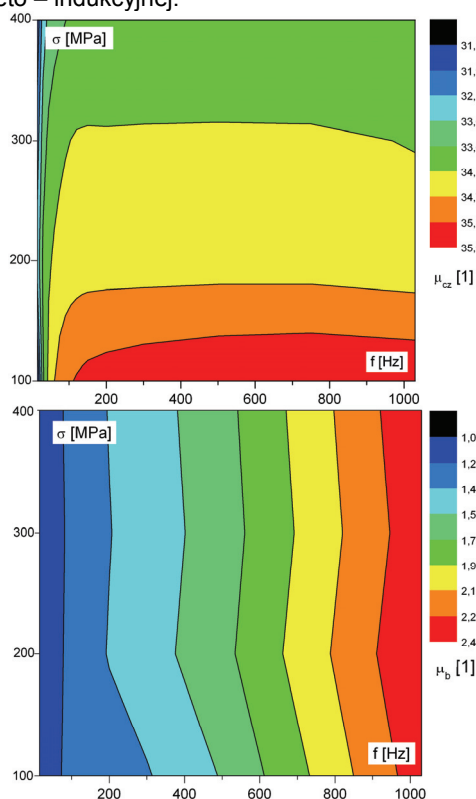
$$(11) \quad |\hat{\mu}| = \sqrt{\mu_L^2 + \mu_R^2}$$

Badając niezależnie zmiany składowej czynnej i biernej przenikalności magnetycznej interesującej nas próbki materiału lub strefy elementu za pomocą analizy napięcia cewki pomiarowej, możemy wskazać na składnik decydujący w postępie procesów zmęczenia oraz podać sposób jego wykrywania. [12-15]. Przykładowe wyniki pomierzonych wartości L i R cewki pomiarowej z badanym materiałem zamieszczono na rysunku 4a) i 4b). Z danych tych przeliczyć można składniki: czynny i urojony przenikalności magnetycznej zespolonej.



Rys.4. Wpływ procesu eksploatacji na zmiany parametru R (a) oraz L (b) układu pomiarowego (140 000 godzin pracy)

Z rysunku 4 wynika, że procesy degradacyjne stali 13HM ze względu na nieistotne zmiany impedancji układu pomiarowego będą trudne do wykrycia za pomocą metody magneto – indukcyjnej.



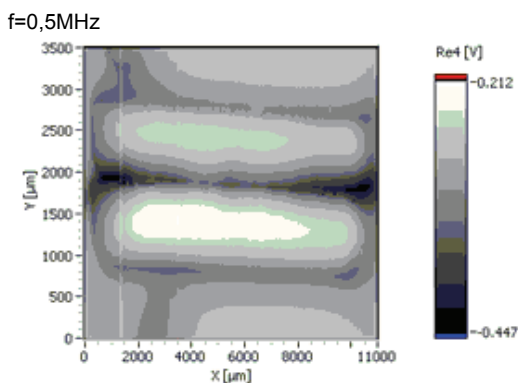
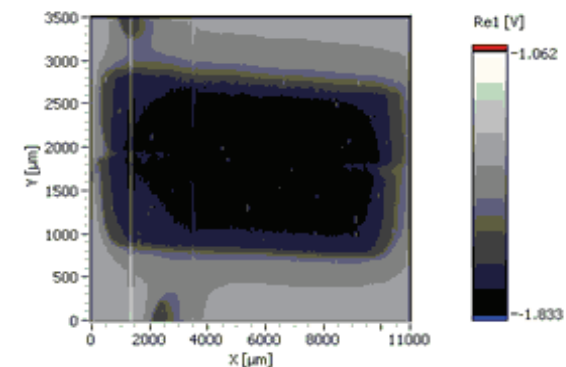
Rys. 5. Wyznaczone zmiany składowych przenikalności skutecznej czynnej i biernej dla stali na obręcze zestawów kołowych.

Na rysunku 5 podano przebiegi składowych przenikalności magnetycznej wyznaczone dla stali zestawu kołowego w funkcji zadanych naprężeń mechanicznych zmęczenia (według metody IPPT), oraz częstotliwości pola magnesującego przy stałej liczbie cykli obciążenia. Powyższa właściwość materiału uzasadnia stosowanie metod indukcyjnych.

### 5. Mikroskop BEMI - ocena degradacji struktury od obciążeń kontaktowych

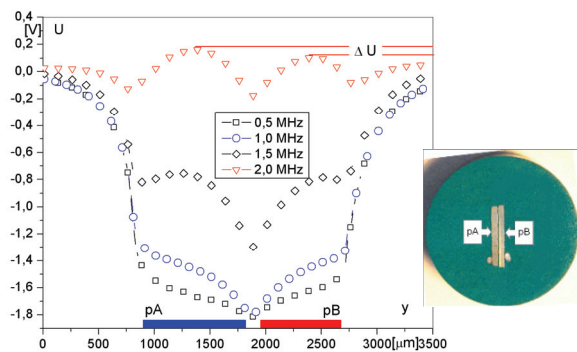
Mikroskop BEMI (Barkhausenrausch und Wirbelstrom-Mikroskop) wybudowano w instytucie Fraunhofera (Fraunhofer-IZFP). Badania prowadzono w ramach centrum doskonałości TRANSMEC (Katedra Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej). Przygotowano próbki z powierzchni tocznych koła nowego i eksploatowanego. Istotą

przeprowadzonych badań było jednocześnie badanie próbek  $p_a$  materiału nowego i  $p_b$  po eksploatacji. Wyniki skanowania przygotowanego materiału głowicą wiroprowadową i Barkhausena pokazano na rysunku 6.



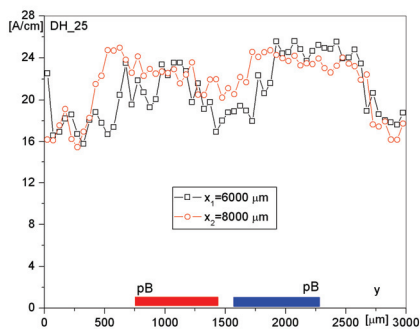
$f=2,0\text{MHz}$

Rys. 6. Obrazy sygnału sondy prądów wirowych mikroskopu BEMI dla częstotliwości skanowania 0,5MHz i 2,0MHz



Rys. 7. Wynik skanowania częstotliwościami 0,5MHz - 2,0MHz

Zarejestrowano różnicę sygnału  $\Delta U$  sondy pomiarowej wiroprowadowej dla częstotliwości 2MHz (rys. 7.).

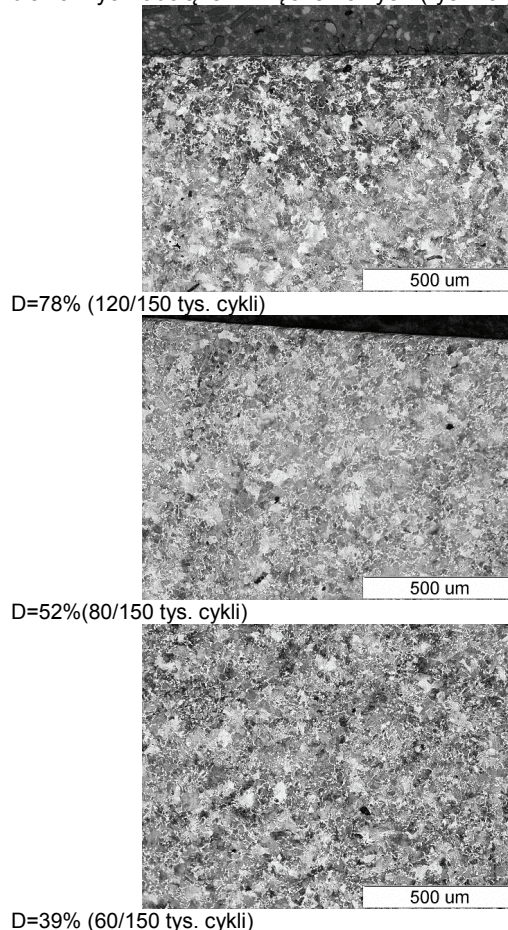


Rys. 8. Rozkładu poziomu szumu Barkhausena dla przekroju środkowego obu próbek

Konieczność odpowiedniego przygotowania powierzchni materiału a także stosowane częstotliwości utrudniają lub wręcz uniemożliwiają prowadzenie badań w warunkach przemysłowych.

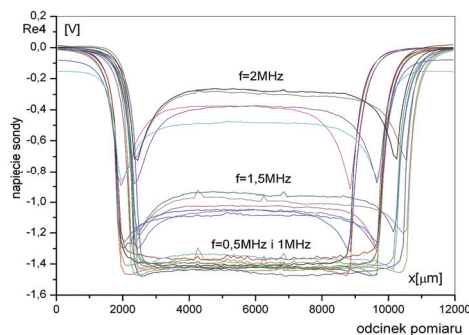
## 6. Mikroskop BEMI. Detekcja degradacji struktury od obciążeń cyklicznie zmiennych

Wzorcowanie zmęczeniowe próbek klepsydrycznych przeprowadzono w IPPT PAN. Rysunku 9, przedstawia zmiany w strukturze warstwy powierzchniowej uzyskane mikroskopem świetlnym w środkowych częściach próbek. Wynik skanowania powierzchni metodą prądów wirowych dla różnych obciążeń zmęczeniowych (rys. 10.)



Rys. 9. Przykładowe obrazy struktur po wprowadzeniu obciążeń zmęczeniowych

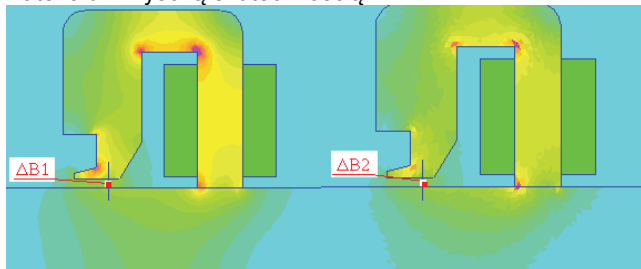
Podobnie jak w przypadku materiału próbek poddanych obciążeniom kontaktowym, wykrywanie zmian w strukturze materiału i różnicowanie stopnia wprowadzonych obciążeń mechanicznych cyklicznie zmiennych jest możliwe dla częstotliwości pola magnesującego powyżej 1,5MHz (rys. 10).



Rys. 10. Napięcia sondy pomiarowej w funkcji częstotliwości dla trzech stopni degradacji

## 7. Numeryczna ocena możliwości detekcji nieciągłości strukturalnej od procesów zmęzeniowych

Degradacja zmęczeniowa przebiega wraz ze zmianą parametrów elektrycznych ( $\gamma$ ) i/lub magnetycznych ( $\mu$ ). Proste obwody magnetyczne pokazane na rysunku – rys. 11-13, umożliwiając wykrywanie zmian zmęczeniowych materiału z wysoką skutecznością



Rys. 11. Obraz rozkładu indukcji magnetycznej materiałów



Rys. 12. Sonda pomiarowa



Rys. 13. Urządzenie pomiarowe

Urządzenia wykonano w ramach grantów własnych. W chwili obecnej aparatura jest stosowana w badaniach kół zestawów kołowych w ramach grantu N N502 3453 36.

## 8. Podsumowanie.

Istotą tematu opracowania jest wskazanie kierunku zmian metod magneto-indukcyjnych, ustalenie zasad prowadzenia pomiarów magnetycznych dla celów diagnostyki procesu zmęczenia oraz opracowanie metodyki badania parametrów magnetycznych stali niskowęglowych i stopowych. Powyższe cele można realizować przy zachowaniu kolejności działań opisanej poniżej:

- wskazanie gatunków stali o parametrach umożliwiających badania magnetyczne lub elektryczne,
- wyznaczenie zakresu zmian wrażliwych parametrów magnetycznych,
- wybór parametru istotnego dla badań,

- dobór metody, zakresu parametrów badawczych oraz sposobu pomiaru.

Część badań przeprowadzono w ramach projektu nr N507 329536 .

## LITERATURA

1. Żurek Z.H.: Wprowadzenie do metody detekcji procesów zmęczeniowych w materiałach konstrukcyjnych ferromagnetycznych i paramagnetycznych w polu magnetycznym, Gliwice 2011, monografia
2. Żurek Z.H.: Wyznacznik magnetyczny oceny postępu zmęczenia materiału ferromagnetycznego. Badania mechaniczne właściwości materiałów i konstrukcji, Seminarium IPPT PAN -Wykłady, str. 203-217, Zakopane 5-8grudzień 2005.
3. Starke P., Walther F., Eifler D.: PHYBAL - A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements. International Journal of Fatigue 28 (9) (2006) 1028-1036.
4. Rasek J., Stokłosa Z.: Badania właściwości materiałów metodami magnetycznymi - Badania mechaniczne właściwości materiałów i konstrukcji. Seminarium Szkoleniowe, IPPT PAN, Zakopane, 15-17 grudnia 2004.
5. Socha G.: Prediction of the fatigue life on the basis of damage progress rate curves. International Journal of fatigue vol. 26 no 4, 339-347, 2004.
6. Socha G.: Experimental investigation of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel. Int. J. Fatigue, 25, 2003, 139-147.
7. Dietrich L., Radziejewska J.: Report IPPT 2009, NADIA – New Automotive components Designed for and manufactured by Intelligent processing of light Alloys SIXTH EU FRAMEWORK PROGRAMME
8. Dietrich L., Rutecka A., Kowalewski Z.: Mechanical characterization – Fatigue and Creep of A356+TiB<sub>2</sub> based MMC. IPPT Report 2009 for INASMET w San Sebastian, Hiszpania
9. Żurek Z.H., Czastkiewicz Z.: Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych. PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, IV/2009, 229-232.
10. Żurek Z.H., Janeczek T.: Untersuchung des Ermüdungsprozesses in dem band der Bahn-Radsätze. RAD SCHIENE, Dresden, 2008.
11. Żurek Z.H.: Magnetic monitoring of fatigue process of the rim material of railway wheel sets. NDT&E international (independent nondestructive testing and evaluation), 39 (2006), pp. 675-679.
12. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Steel Magnetic Parameters as Material Fatigue Diagnostics Criterion. NDT.net, Issue 2009-03, pp. 251-257.
13. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, 9/2008, strony 670-673.
14. Żurek Z.H., Szudyga M.: Magnetometric diagnostics of constructional steels. Electrical Review, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2009, pp.118-122.
15. Żurek Z.H.: Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych N N507 0807 33.
16. D.Kukła, L. Dietrich, M. Ciesielski, „ Ocena stopnia uszkodzenia eksploatacyjnego materiału rurociągu parowego na podstawie analizy zmian właściwości zmęczeniowych i mikrostruktury” , VI Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Materiałów i Konstrukcji Augustów, 30 maja - 2 czerwca 2011