

WYBRANE METODY WYKRYWANIA DEGRADACJI ZMĘCZENIOWEJ W STALACH FERROMAGNETYCZNYCH

Zbigniew H. ŻUREK, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, zbigniew.zurek@polsl.pl
Dominik KUKLA, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, dkukla@ippt.gov.pl
Krzysztof. J. KURZYDŁOWSKI, Wydział Inżynierii Materiałowej PW, kjk@inmat.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Od nowoczesnych metod defektoskopii oczekujemy możliwości nadzorowania stanu rozwoju procesu zmęczenia materiału, w dowolnym momencie eksploatacji lub w kolejnych cyklach diagnostycznych. Prosta defektoskopia nieciągłości geometrii przestaje być wystarczająca tak w energetyce, lotnictwie jak i transporcie szynowym.

Szybki rozwój diagnostyki procesów zmęczenia materiału dotyczy kilkunastu ostatnich lat. Kierunek rozwoju badań procesów zmęczeniowych został zainicjowany w kraju przez IPPT PAN [1, 2, 4] 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 i elektrycznymi materiału do zagadnień mechaniki zmęczenia [3]. Organizowane seminaria przyczyniły się do metodologicznego wykorzystywania dostępnych metod defektoskopowych w wykrywaniu procesu degradacji zmęczeniowej. Dynamika badań związana była z momentem opracowania metod kontrolowania ilościowej mechanicznej degradacji zmęczeniowej stali.

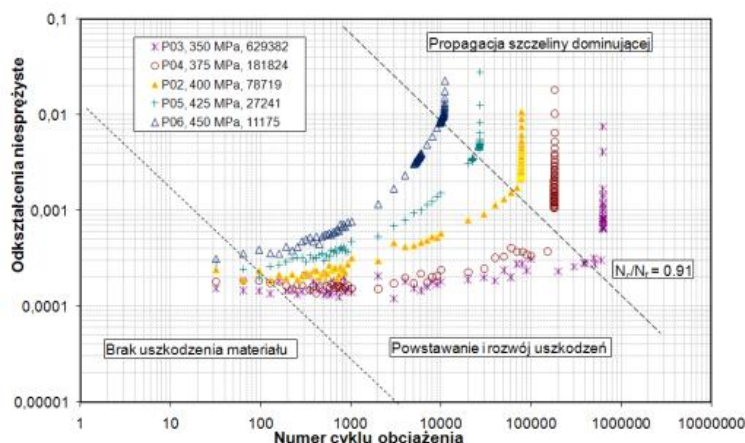
W artykule zawarto wybrane zagadnienia z zakresu korelacji zmienności parametrów magnetycznych materiału z postępem degradacji zmęczeniowej. Wskazano na fizyczne aspekty tego zagadnienia oraz prawidłowość doboru parametrów pomiaru.

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):

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

Gdzie ε_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 rys. 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 amplitudy naprężenia [5-8].

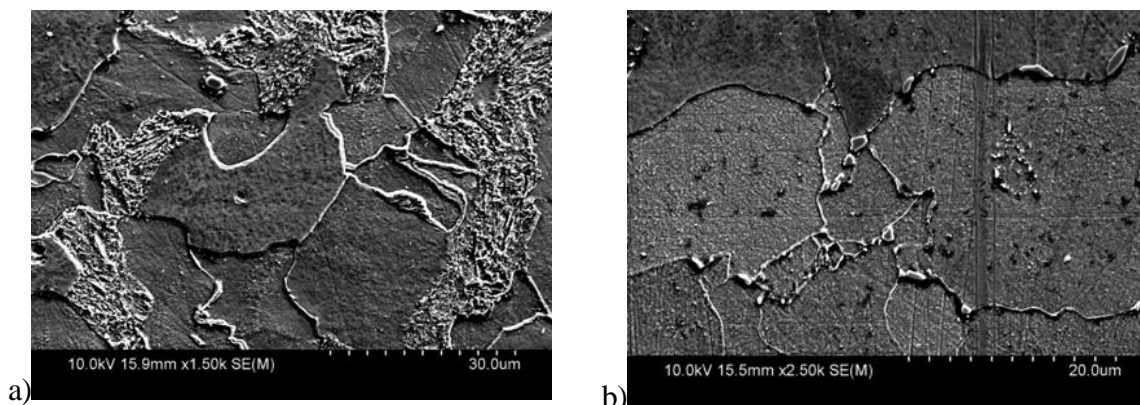


Rys. 1. Zmiana odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach obciążenia dla różnych poziomów amplitudy naprężenia

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

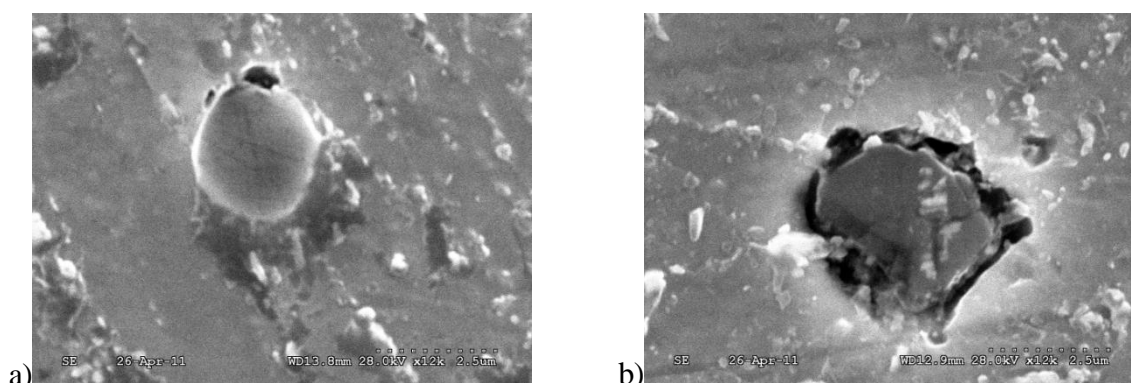
3. MIKROSKOP SEM - DEGRADACJA MIKROSTRUKTURY POD WPŁYWEM OBCIĄŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH

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 i w ostatnich latach pojawiły się rozwiązania pozwalające na nieinwazyjne obserwacje mikrostruktury (bez konieczności pobierania próbek) mikroskopii świetlnej, a 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 jej dalszy monitoring aż do zniszczenia. Na rys. 2 przedstawiono zdjęcia mikrostruktury stali 13-HMF w stanie dostawy oraz po 100 000 godzinach eksploatacji w warunkach instalacji bloków energetycznych.



Rys. 2. Obraz mikrostruktury stali 13 HMF przed (a) i po (b) eksploatacji w czasie 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 rys. 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 μ oraz od przewodności elektrycznej właściwej γ [1, 12-21]. Procesy zmęczeniowe wpływają na oba parametry z różną intensywnością. Do badania 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:

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

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

gdzie: \vec{E} - natężenie pola elektrycznego, \vec{H} - natężenie pola magnetycznego, μ_o - przenikalność magnetyczna próżni, γ - elektryczna przewodność właściwa materiału, μ_r - względna przenikalność magnetyczna materiału próbki.

Kolejne przekształca prowadzą do wektorowo-czasowego równanie różniczkowego:

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

Już ta postać wzoru (4) wykazuje, że o polu wypadkowym elementu magnesowanego cewka zasilaną prądem przemiennym decyduje zarówno przenikalność magnetyczna jak i przewodność właściwa materiału.

Jeżeli zapiszemy \vec{H} w formie zespolonej to otrzymamy:

$$\vec{H} = H e^{i\omega t} \quad (5)$$

gdzie \vec{H} jest wielkością zależną tylko od współrzędnych

$$\Delta \vec{H} = \Delta H e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = i\omega H e^{i\omega t} \quad (6)$$

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

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

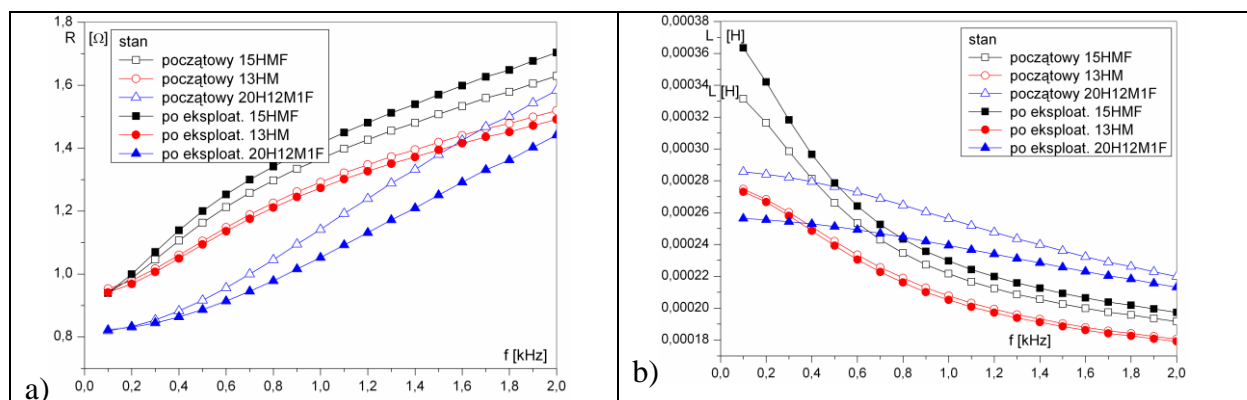
$$\mu_{cz} = \mu \cdot \cos \delta = \mu_L \quad (8)$$

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

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

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

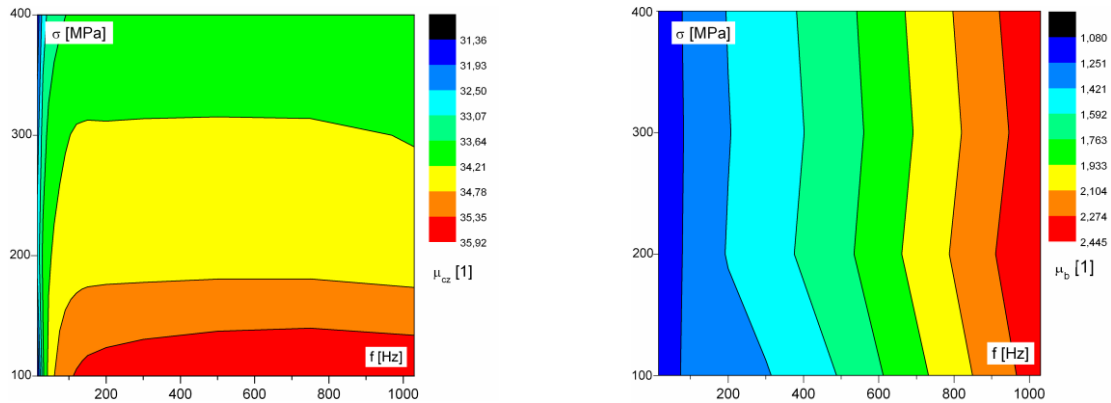
Badając niezależnie zmiany składowej czynnej i biernej przenikalności magnetycznej interesującej nas próbki materiału lub strefy elementu za pomocą analizy napięcia cewki pomiarowej, możemy wskazać na składnik decydujący w postępie procesów zmęczeniowych oraz podać sposób jego wykrywania. [16, 17]. Przykładowe wyniki pomierzonych zmian parametrów magnetycznych zamieszczono na rysunku 4a) i 4b)



Rys.4. Wpływ procesu eksploatacji na zmiany parametrów układu pomiarowego

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. Na rysunku 5 podano przebiegi składowych przenikalności

magnetycznej wyznaczone dla stali zestawu kołowego w funkcji naprężeń mechanicznych, częstotliwości pola magnesującego przy stałej liczbie cykli obciążenia.

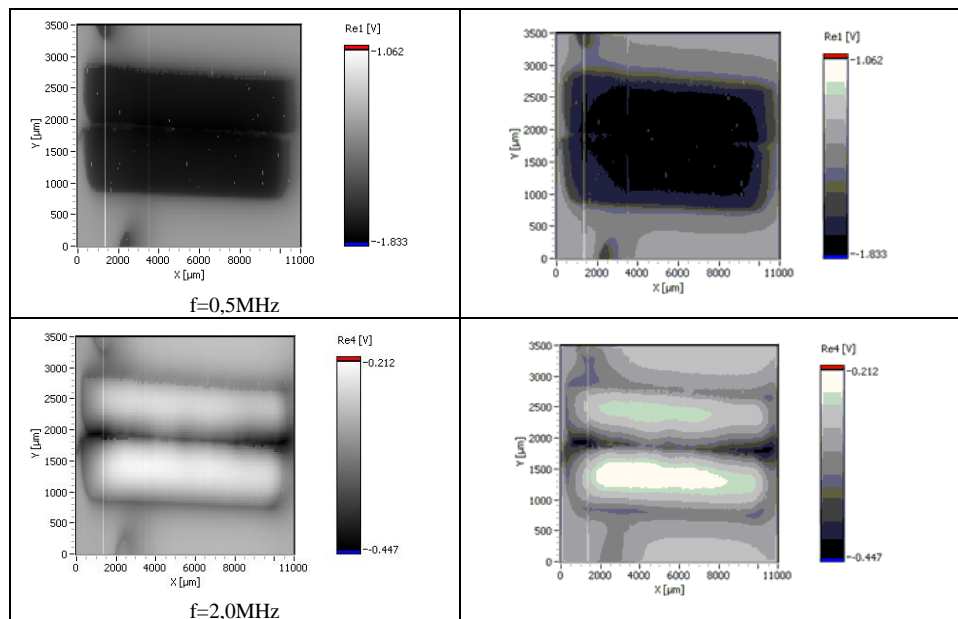


Rys. 5. Wyznaczone zmiany składowych przenikalności skutecznej czynnej i biernej dla stali na obręcze zestawów kołowych.

Dla stali na obręcze toczne obserwujemy zmiany przenikalności w funkcji amplitudy naprężenia. Powyższa właściwość materiału uzasadnia stosowanie metod indukcyjnych w badaniach procesu zmęczeniowego stali węglowych szczególnie w zakresie tangensa kąta stratności.

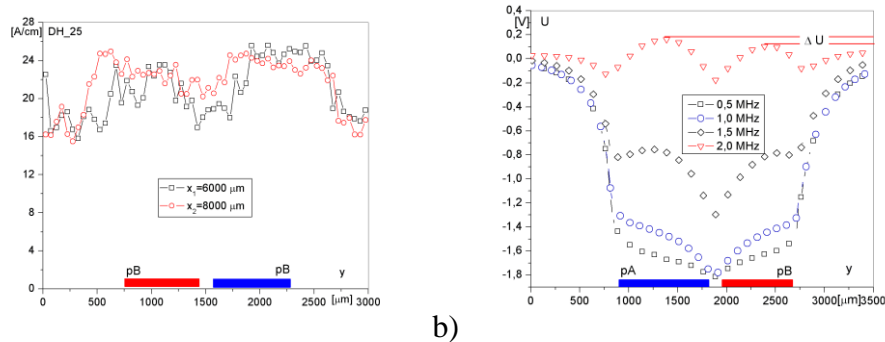
5. MIKROSKOP BEMI (FRAUNHOFER IZFP -SAARBRÜCKEN. DETEKCCJA DEGRADACJI STRUKTURY OD OBCIĄŻEŃ KONTAKTOWYCH

Do badań na stanowisku BEMI (Barkhausenrausch- und Wirbelstrom-Mikroskop) we Fraunhofer IZFP przygotowano próbki z powierzchni tocznej koła kolejowego P54T. Wyniki skanowania przygotowanego materiału głowicą wiroprowadową i Barkhausena pokazano na rysunku 6. Istotą przeprowadzonych badań było jednoczesne badanie próbek p_a materiału nowego i p_b po eksploatacji.



Rys. 6. Obrazy sygnału sondy prądów wirowych mikroskopu BEMI -w lewej kolumnie oraz obrazy po obróbce cyfrowej w prawej kolumnie

Zarejestrowana różnica sygnału ΔU sondy pomiarowej wiropądowej (dla częstotliwości powyżej 1,5MHz) (pokazana na rysunku (Rys.7b) oraz zmiana poziomu sygnału sondy Barkhausen (Rys. 7a) potwierdza możliwość detekcji degradacji materiału w warunkach laboratoryjnych.



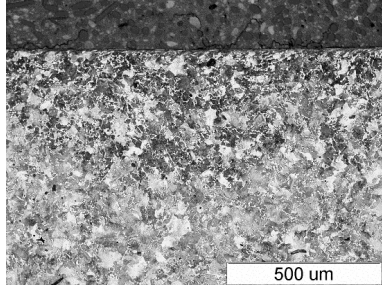
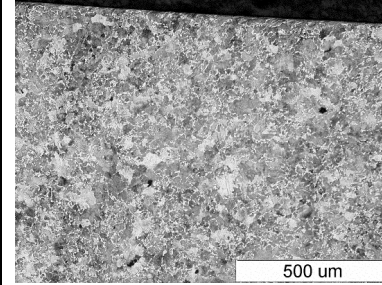
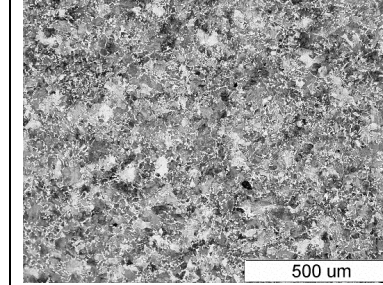
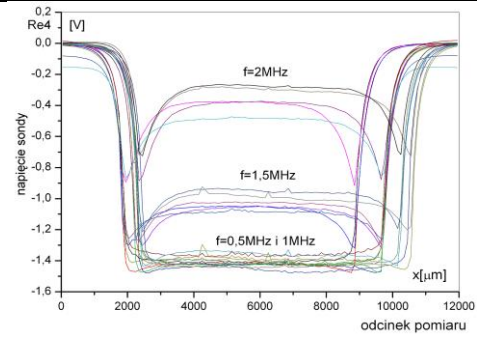
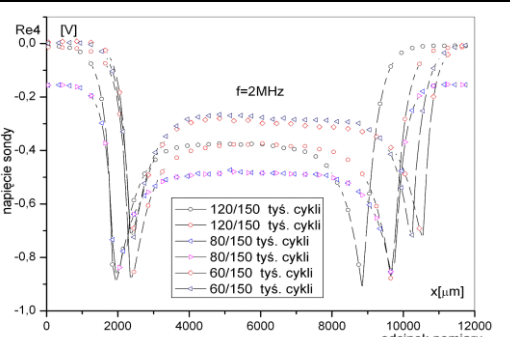
Rys. 7. Wynik porównania rozkładu poziomu szumu Barkhausen (a) i sygnału dla sondy wiropądowej (b)

Złożoność przygotowania powierzchni materiału, utrudnia lub wręcz uniemożliwia prowadzenie badań w warunkach przemysłowych za pomocą technologii BEMI.

6. MIKROSKOP BEMI. DETEKCCJA DEGRADACJI STRUKTURY OD OBCIĄŻEŃ CYKLICZNIE ZMIENNYCH

Przygotowano próbki kolejnie klepsydryczne. Wzorcowanie zmęczeniowe przeprowadzono w IPPT PAN. W tabeli 1. pokazano zmiany w strukturze warstwy powierzchniowej uzyskane na mikroskopie świetlnym w środkowych częściach próbek. Wynik skanowania powierzchni metodą prądo-wirową dla różnych obciążeń zmęczeniowych pokazano w poniższej tabeli

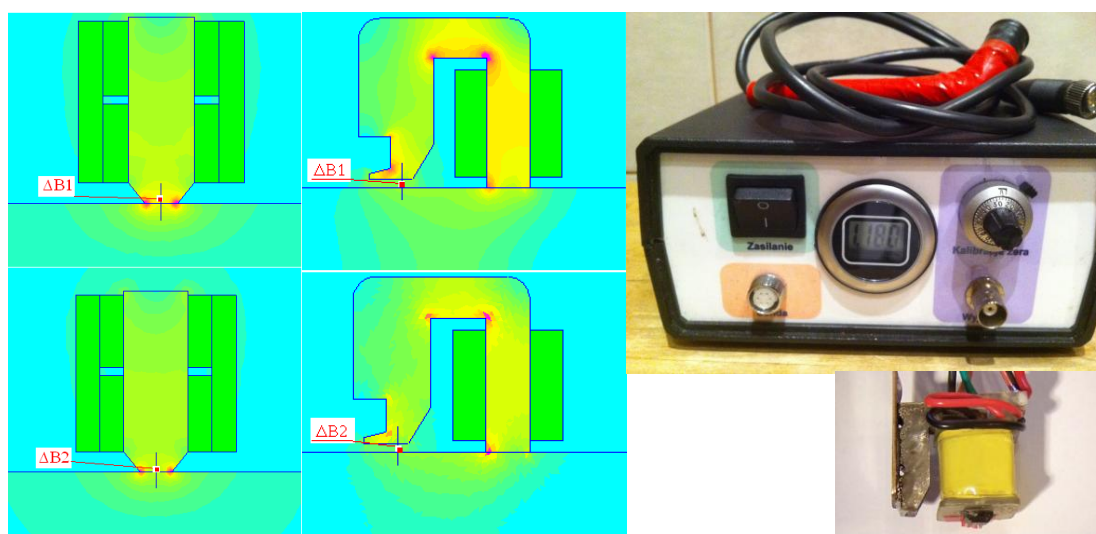
Tabela. 1. Przykładowe obrazy struktur po wprowadzeniu obciążeń zmęczeniowych

		
Próbka wzorcowana zmęczeniowo 78% (120/150 tys. cykli)	Próbka wzorcowana zmęczeniowo 52% (80/150 tys. cykli)	Próbka wzorcowana zmęczeniowo 39% (60/150 tys. cykli)
		

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.

7. NUMERYCZNA OCENA MOŻLIWOŚCI DETEKCJI NIECIĄGŁOŚCI STRUKTURALNEJ OD PROCESÓW ZMĘCZENIOWYCH MECHANICZNYCH

Degradacja zmęczeniowa, podczas której zachodzą zjawiska relaksacyjne lub przemiany fazowe, przebiega wraz ze zmianą parametrów elektrycznych (γ) czy magnetycznych (μ). Zmiany parametrów magnetycznych są bardzo subtelne, jednak możliwe do wykrycia. Proste obwody magnetyczne pokazane na rysunku – rys. 8, umożliwiają wykrywanie zmian zmęczeniowych materiału z wysoką skutecznością.



Rys. 8. Modele numeryczne sondy i przykład realizacji układu pomiarowego wraz z sondą.

Widoczne na symulacjach, zmiany wartości indukcji ΔB materiału nowego i poddanego obciążeniom, uzyskane na podstawie pomiaru zmian przebiegu krzywych pierwszego magnesowania, wykazały możliwość adaptacji wiroprowodowych metod defektoskopii pęknięć do detekcji zmian zmęczeniowych struktury. 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.

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 mechanicznych 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 mechanicznych 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+TiB₂ based MMC. IPPT Report 2009 for INASMET w San Sebastian, Hiszpania
12. Żurek Z.H., Czastkiewicz Z.: Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych. PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, IV/2009, 229-232.
14. Żurek Z.H., Janeczek T.: Untersuchung des Ermüdungsprozesses in dem band der Bahn-Radsätze. RAD SCHIENE, Dresden, 2008.
15. 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.
16. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Steel Magnetic Parameters as Material Fatigue Diagnostics Criterion. NDT.net, Issue 2009-03, pp. 251-257.
17. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, 9/2008, strony 670-673.
18. Żurek Z.H., Szudyga M.: Magnetometric diagnostics of constructional steels. Electrical Review, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2009, pp.118-122.
19. Żurek Z.H.: Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych N N507 0807 33.
20. Żurek Z.H.: Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów N N510 238538.
21. 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