

Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska, Katowice, Polska  
Gerd Dobmann, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Germany

## DIAGNOSTYKA ZMĘCZENIOWA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH PRZY NIEZNANEJ HISTORII OBCIĄŻEŃ

### DIAGNOSIS OF STRUCTURAL COMPONENTS FATIGUE WITH UNKNOWN HISTORY OF LOAD

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zastosowanie techniki magneto-indukcyjnej do określania mechanicznej degradacji elementów konstrukcyjnych z nieznaną historią obciążeń zmęczeniowych. Zaprezentowano metodologię, która w wielu przypadkach jest tańsza od obecnie stosowanych oraz umożliwiła uzyskanie wysokiej czułości i powtarzalności badań, zarówno dla prostych jak i precyzyjnych przetworników RLC. Metodologię tę opisano już w wielu artykułach publikowanych w Przeglądzie Elektrotechnicznym [20]. Porównano strefy degradacji materiału o potencjalnie niskim i wysokim stanie obciążeń. Stan maksymalnej degradacji wyznaczano dla stref potencjalnie zagrożonych pękaniem (potwierdzonych statystyką).

**Abstract:** The paper presents an application of magneto-inductive technique to determine a mechanical degradation of construction components, of which the history of fatigue loads is unknown. There is presented a methodology, which in many cases is less in costs than methods presently used, and which enables obtaining high measuring sensitivity and repeatability, for both simple and precise LCR converters. This methodology was described in many articles published in Przegląd Elektrotechniczny [20]. There is made a comparison of degradation for areas of potentially low and high loads condition. State of maximum degradation was determined in areas potentially risky to cracks (statistically confirmed).

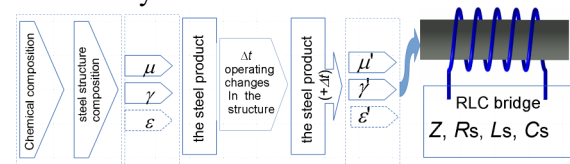
**Słowa kluczowe:** NDE, elektromagnetyczne NDT, detekcja zmęczenia, prądy wirowe, rezonans elektryczny  
**Keywords:** NDE, electromagnetic NDT, fatigue detection, eddy-currents, electrical resonance

#### 1. Parametry fizyczne – obserwator stanu technicznego

Okresowe badanie elementu konstrukcyjnego maszyny wspomaga utrzymanie jej niezawodności eksploatacyjnej. W wielu przypadkach obrazy struktury początkowej i końcowej otrzymane z mikroskopu nie ujawniają w pełni zmian parametrów elektrycznych i magnetycznych. Zmiany parametrów są zależne od zmian na wielu poziomach struktury. Badania parametryczne należy wspomagać analizą układu żelazo-węgiel dla stali węglowych [15, 3, 8] lub nomogramu Schaeffler'a dla stali stopowych [15, 3, 8]. Projektowana struktura określa eksploatacyjną ewolucję parametrów elektrycznych i magnetycznych [15] w określonym zakresie oddziaływania naprężenia, temperatury [12] czy środowiska. Różnorodność składów chemicznych stopów i ich obróbki wymagają różnego postępowania diagnostycznego.

Oprócz twardości [2], stal może być charakteryzowana parametrami magnetycznymi i elektrycznymi [1], które okazują się bardzo istotne w diagnostyce nieniszczącej przy wykrywaniu degradacji zmęczeniowej. Parametrami opisującymi stan ogólny zmian w materiale są: prze-

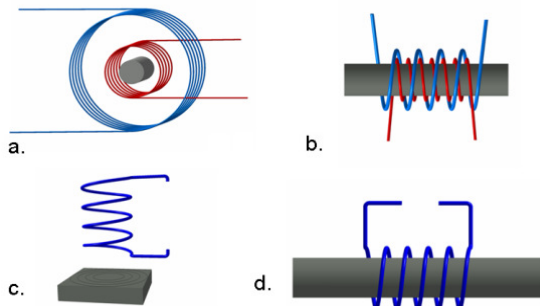
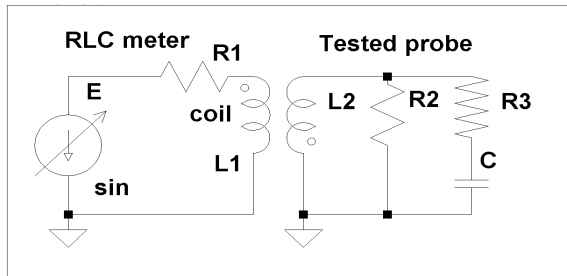
wodność elektryczna, przenikalność magnetyczna jak i przenikalność elektryczna, charakteryzujące wtrącenia niemetaliczne. Wzajemne korelacje tych parametrów tworzą obraz pełniejszy. Uproszczony schemat związku eksploatacji z ewolucją parametrów fizycznych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Procedura badań zmian eksploatacyjnych materiału

Podstawowy model diagnostyczny (wykorzystywany dla celów dydaktycznych) składa się z cewki nawiniętej na materiale (lub zbliżonej do materiału) o parametrach  $R_1$  i  $L_1$  zasilanej prądem sinusoidalnie zmiennym. Napięcie cewki jest funkcją sprzężenia indukcyjnego z materiałem (rys. 2), przejścia fali elektromagnetycznej, odbić zewnętrznych i wewnętrznych. Zmiany parametrów cewki i materiału reprezentuje

obwód L2, R2, R3 i C. Obwód przedstawia eksploatacyjny kierunek zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej, przy założeniu  $\gamma \gg \omega\epsilon$  (pomijana jest przenikalność elektryczna). Parametry elektryczne i magnetyczne wraz z częstotliwością diagnozującą  $f$  są istotnymi parametrami diagnostycznymi – pośrednimi obserwatorami stanu materiału elementu.



Rys. 2. Schemat obwodu testującego z lewej i przykłady cewek

Głównymi czynnikami oddziałującymi na materiał są:

- obróbka cieplna i mechaniczna,
- naprężenie materiału  $\sigma, \sigma_I, \sigma_{II}$ , dla próbek  $\sigma_I, \sigma_{II}$ ,
- przemiany fazowe struktury,
- historia eksploatacji,
- warunki otoczenia (temperatura pracy, temperatura materiału w czasie pomiarów, erozja, korozja).

Poziom degradacji struktury materiałowej na poziomie mikrostrukturalnym może być obserwowany w zmianach:

- konduktywności materiału  $\gamma$ ,
- przenikalności magnetycznej  $\mu$ ,
- przenikalności elektrycznej  $\epsilon$ .

Zależnie od parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału, badania prowadzone są w polu magnetycznym o różnym natężeniu (niskim, wysokim) i odpowiednio dobranych zakresach częstotliwości ze względu na interesującą nas głębokość penetracji materiału [5, 6, 7, 13]. Najprostsze rozwiązanie konstrukcyjne oparte jest na modelu analitycznym [6]

wykorzystującym jedną cewkę, magnesującą i pomiarową (rys. 3). W parametrach cewki zawarte są łączne zmiany eksploatacyjne materiału [10]. Występują również inne rozwiązania oparte na elektrotechnicznych prawach Kirchhoffa [11, 7].

Dodatkowy problem stanowi suma naprężenia wewnętrznego pierwszego i drugiego stopnia oraz sposób ograniczenia jego wpływu na lokalną uśrednioną przenikalność magnetyczną. Analizowano także wpływ dodatkowego odpuszczania cieplnego na zmiany parametrów próbek.

## 2. Parametr diagnostyczny

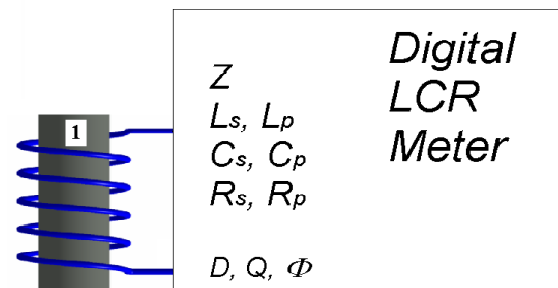
Pomiędzy spadkami napięcia na cewce pustej  $E_0$  i cewce z próbką  $E$  (rys. 3), zachodzą następujące zależności:

$$\bar{E}_0 = \bar{I} \bar{Z}_0 \quad (1)$$

$$\bar{E} = \bar{I} \bar{Z}_c \quad (2)$$

$$\frac{\bar{E}}{\bar{E}_0} = \frac{\bar{Z}}{\bar{Z}_0} \quad (3)$$

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} - j \frac{R - R_0}{\omega L_0} \quad (4)$$



Rys. 3. Podstawowy układ pomiarowy

Wielkości  $\frac{\omega L_p}{\omega L_0}$  i  $\frac{R_p - R_0}{\omega L_0}$  (unormowane składowe impedancji) [6], oprócz impedancji  $Z$ , są parametrami umożliwiającymi dokonywanie oceny postępu stopnia degradacji. Są wyprowadzone z parametrów połączenia szeregowego elementów  $L_s$  i  $R_s$  testowanego obwodu. Cewka może obejmować próbkę lub do niej przylegać [6, 11, 13].

W przypadku porównywania wielu wyników z próbek materiału ważne jest zachowanie geometrii próbki (o promieniu  $r_0$ ) i geometrii cewki pomiarowej uwzględniający znaczenie współczynnika wypełnienia  $\eta$ , ( $\eta = (D_p / D_s)^2$ ). Zależności te łatwo obserwować na manipulatorach opracowanych w programie MATHEMATICA w oparciu o zależności [21]:

$$\eta = \left( \frac{D_p}{D_s} \right)^2 \quad (5)$$

$$k = \text{Sqrt}[-i \times \omega \times \gamma \times \mu_r \times \mu_o] \quad (6)$$

$$\mu_{sk} = \frac{2}{k \times r_o} \times \frac{J_1(k \times r_o)}{J_0(k \times r_o)}, \quad (7)$$

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} [\gamma, \mu_{re}, \omega, \eta] = 1 - \eta + \eta \mu_{re} \text{Re}[\mu_{sk}], \quad (8)$$

$$\frac{R - R_0}{\omega L_0} [\gamma, \mu_{re}, \omega, \eta] = -\eta \mu_{re} \text{Im}[\mu_{sk}]. \quad (9)$$

$$f_g = 2 / (\pi \times D_p^2 \times \gamma \times \mu_o \times \mu_r) \quad (10)$$

Pełny opis oznaczeń i przytoczonych wzorów wymaga śledzenia rozwiązywania równania magnesowania próbki cylindrycznej [6, 13, 21]. Dwa rodzaje materiału zostaną rozpatrzone, ze względu na zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych od wysokiej temperatury eksploatacji i dynamicznych niesymetrycznych obciążeń mechanicznych, w bardzo długim okresie eksploatacji.

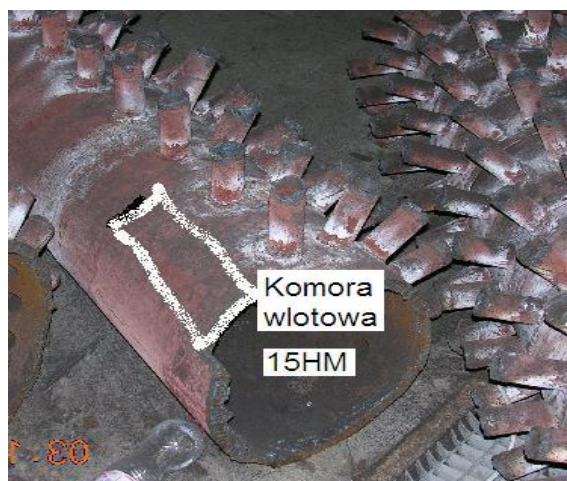
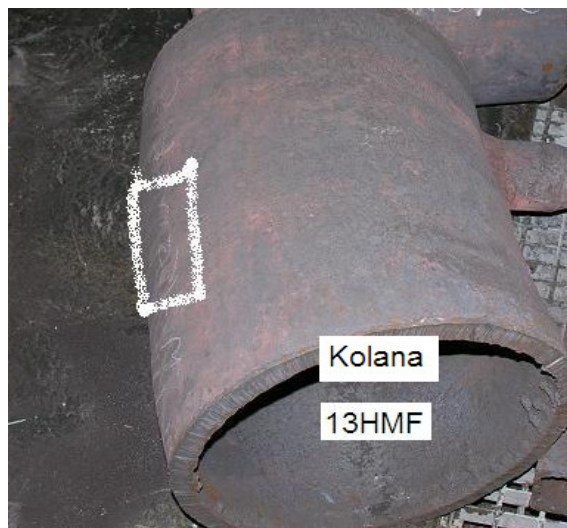
### 3. Zmiana eksploatacyjna parametrów magnetycznych stali pracujących w wysokich temperaturach

Stale martenzytyczne, takie jak 20H12M1F (X20CrMoV12-1 DIN) poprzedzające stal P91 oraz wcześniejsze gatunki stali, jak 13HMF PN-75/H-84024 (14MoV6-3, 1.7715) i 15HM PN-75/H-84024 (13CrMo4-5, EN) przewidziane są do pracy w warunkach pełzania na elementy krytyczne części ciśnieniowych kotłów energetycznych, o nadkrytycznych parametrach pracy (rys. 4) [10, 11].

W przypadku wymienionych stali dysponowano źródłową bazą materiałową i możliwością wyznaczenia początkowych parametrów magnetycznych i elektrycznych (rys. 5).

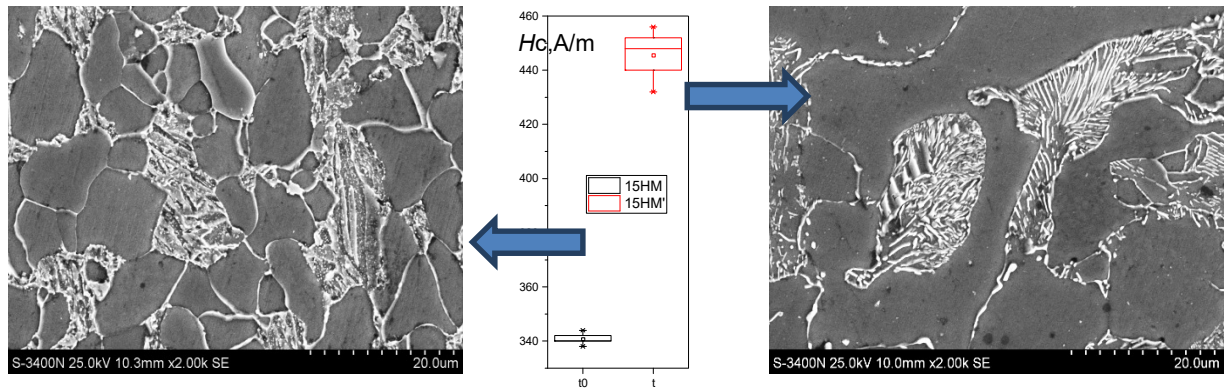
Prezentowane gatunki stali pracują w wysokich temperaturach i przy wysokich obciążeniach mechanicznych. Obraz mikroskopu świetlnego uwidacznia znaczące zmiany w strukturze. Dla pozostałych stali z tej grupy zmiany struktury są mniej wyraźne [15, 16, 17].

Zmiany eksploatacyjne natężenia koercji i przenikalności magnetycznej skutecznej (rys. 5) są wielokrotnością odchylenia standardowego dla grupy analizowanych próbek i mają istotne statystycznie znaczenie. Pomierzone zmiany eksploatacyjne parametrów stali ze względu na możliwość porównania do materiału źródłowego są znaczące.

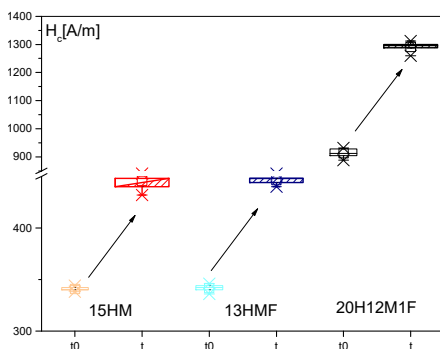


Rys. 4. Elementy instalacji, z których pobrano próbki do badań

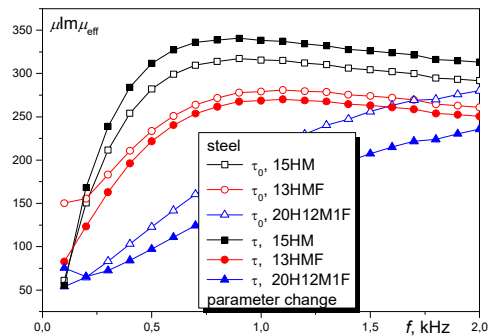




feryt + perlit



bainit, tj. feryt z wydzieleniem węglików

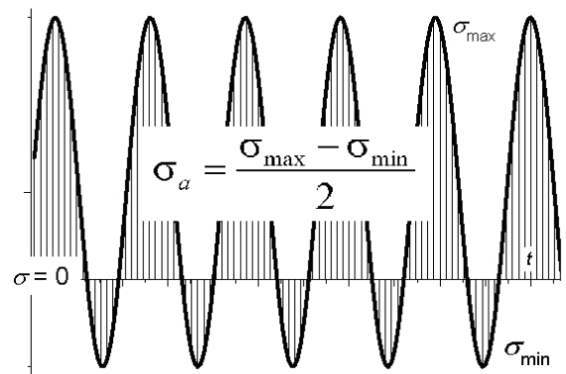


Rys. 5. Przykłady struktur przed i po eksploatacji oraz wyznaczone zmiany natężenia koercji  $H_c$  i składowej przenikalności magnetycznej skutecznej [10, 11]

#### 4. Eksploatacyjna ewolucja parametrów elektrycznych i magnetycznych stali pracujących w wysokich obciążeniach dynamicznych i wysokich temperaturach środowiska

Przykładem wpływu złożonych i wysokich obciążeń dynamicznych na degradację materiału mogą być tarcze kół napędnych lokomotyw. Omawiane tarcze wykonano ze staliwa LII500 PN-H-83152 (PN-ISO3755:1994 270-480). Dla tego staliwa nie dysponowano źródłowymi próbkami materiału. Do porównania zmian eksploatacyjnych parametrów elektrycznych i magnetycznych wybrano strefy tarczy koła będące pod znacząco zróżnicowanym stanem obciążeń dynamicznych. Miejsce pobrania próbek o maksymalnej destrukcji staliwa zaznaczono na rysunku 6.

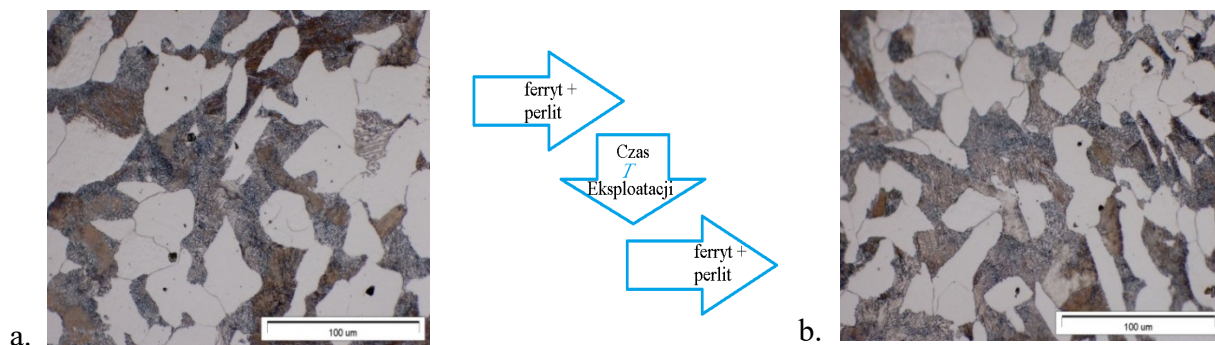
Podstawowa struktura ferrytyczno - perlityczna pozostała bez zmian. Zmianie uległy ilościowe proporcje struktur i ich wymiarów. Analiza ilościowa kilkunastu obrazów przekrojów próbek wskazuje na kilkuprocentowe zmiany w ilości ferrytu.



Rys. 6. Charakter obciążenia dynamicznego, miejsce pobrania próbek (oznaczone gwiazdką)

### 5. Pomiar zmian eksploatacyjnych parametrów magnetycznych

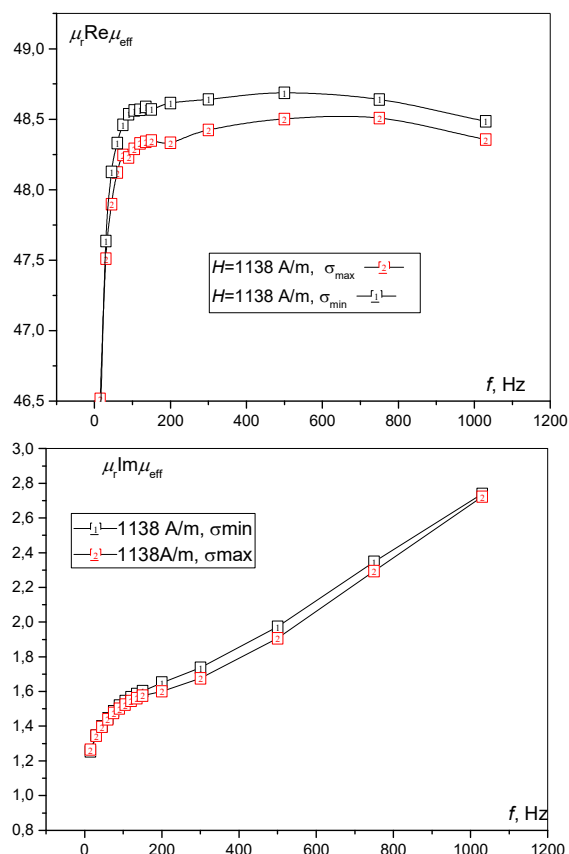
Obraz struktur materiału poddanego wpływowi obciążeń eksploatacyjnych przedstawia głównie zmiany kształtu ziaren (rys. 7).



Rys. 7. Przykład obrazu struktury staliwa w strefach minimalnie i maksymalnie obciążonych mechanicznie, oraz uśrednione zmiany w histogramach obrazów struktur

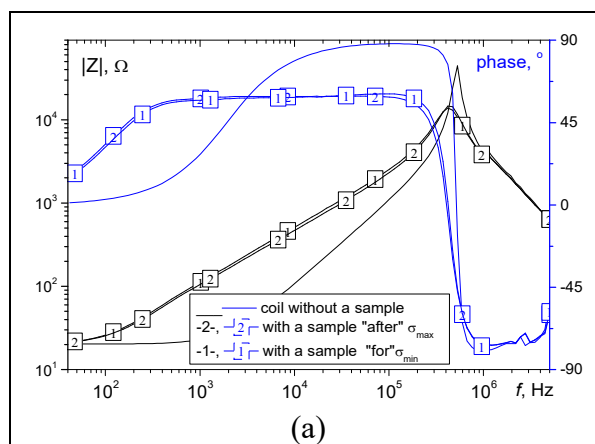
Pomiar parametrów magnetycznych przeprowadzono kolejno na urządzeniu Quantum Design PPMS. Przeliczone parametry składowych przenikalności magnetycznej pokazano na rysunku 8.

W zakresie częstotliwości do 2kHz maksymalne zmiany przenikalności skutecznej nie przekraczają jednego procenta. Znaczącym problemem są gabaryty próbek (< 1mg) i ich przygotowanie do PPMS (Quantum Design). Kolejny pomiar przeprowadzono za pomocą precyzyjnego mostka pomiarowego RLC HIOKI. Dla tych badań przygotowano próbki prętowe o przekroju 4mm<sup>2</sup>. Na rysunku 9a porównano wyniki pomiaru impedancji i kąta przesunięcia fazowego. Dla porównania, w przebiegu unormowanych składowych impedancji wykazano istotne diagnostycznie zmiany [6] w zakresie niskich stosunków  $f / f_g$ , jak pokazano na rysunku 9b.

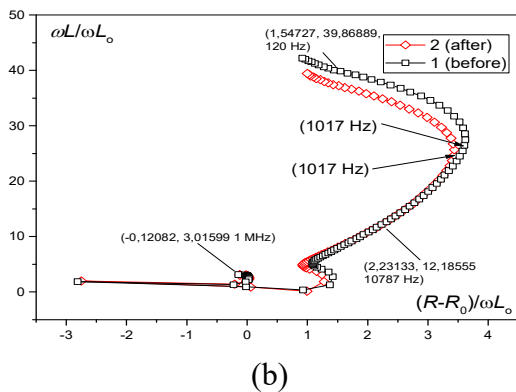


Rys. 8. Przykłady pomiaru składowych przenikalności magnetycznej w funkcji częstotliwości dla prądu wzbudzenia 10 mA

Mierniki takie mają od czterech do pięciu zakresów częstotliwości pomiaru: 100Hz, 120Hz, 1000Hz, 10000Hz, 100000Hz. Celem wiodącym tych badań było wykazanie możliwości stosowania tanich mierników mostkowych RLC w diagnostyce procesu zmian zmęzeniowych.

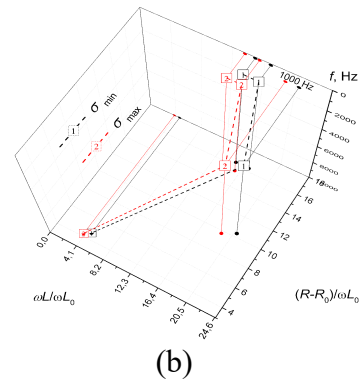
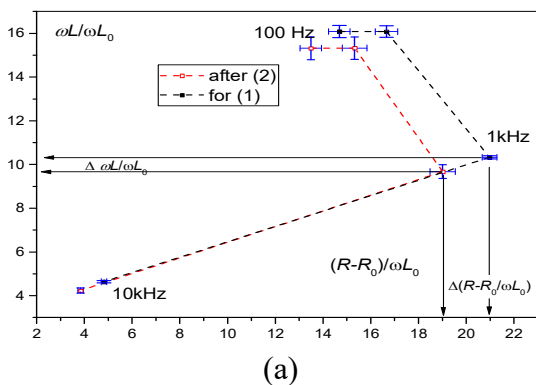


(a)



Rys. 9. Przebiegi impedancji i kąta fazowego - a, unormowane składowe impedancji dla wartości średniej badanych próbek - b

Koszt zastosowanego miernika RLC jest o dwa lub trzy rzędy wielkości tańszy w stosunku poprzednio zastosowanych profesjonalnych urządzeń pomiarowych. Dla dwóch typów mierników oceniano stabilność krótko i długoczasową, przy zalecanym czasie wcześniejszego uruchomienia przyrządu 0,5 h. Na rysunku 10 zamieszczono wyniki pomiaru i podano zakresy odchył standardowych dla mierzonej serii próbek. Dla częstotliwości pomiaru 1kHz i 10kHz wyniki są istotne statystycznie. Częstotliwość 1000Hz zawarta jest w zakresie stosunku częstotliwości  $f / f_g \leq 7$  wskazanej przez Förstera [6] dla ferromagnetyków. Wykres (rys. 10a) jest kreślony w funkcji częstotliwości  $f$  pomiaru i można go obrazować w przestrzeni 3D, jak pokazano na rysunku 10b. Prawdopodobieństwo zdarzenia, że wyniki obu pomiarów przy danych parametrach magnetycznych i elektrycznych (w przedziale czasu eksploatacji  $t_0 \rightarrow t$ ) zrównają się, jest szacowane jako pomijalnie małe. Jeżeli w opisie postępu degradacji eksploatacyjnej przyjmujemy trzy zmienne, to prawdopodobieństwo zrównania wyników jeszcze bardziej maleje, nawet przy zastosowaniu tanich mierników mostkowych RLC.



Rys. 10. Przebiegi średnie unormowanych składowych impedancji próbek pobranych ze stref o minimalnym i maksymalnym zmęczeniu materiałowym - a, obrazowanie zmian w 3D - b

Opis zmian degradacyjnych powinien zawierać minimum trzy parametry pomiarowe.

$$F_{\text{damage}} \approx F(\sigma, \tau, t) \equiv F(\mu, \gamma, \omega) \quad (11)$$

Funkcje zmian parametrów fizycznych są zazwyczaj nieliniowe. Dla pełnego opisu zmian degradacyjnych można zastosować następujący zapis:

stan	materiał	struktura
początkowy	LII500	Feryt + Perlit
końcowy	LII500	Feryt + Perlit

$\frac{L}{\omega L_0} \rightarrow \frac{L'}{\omega L_0}$ 1000Hz	$\frac{(R-R_0)}{\omega L_0} \rightarrow \frac{(R-R_0)'}{\omega L_0}$ 1000Hz	$\frac{L-L'}{\omega L_0}$	$\frac{(R-R)-(R-R)'}{\omega L_0}$
10,323	20,976	0,64741	1,9650
9,6756 $\downarrow(-\mu)$	19,011 $\downarrow(-\mu), \uparrow(\gamma)$		

Normalizując stosowane sondy i mostki pomiarowe RLC, otrzymujemy jednoznaczny pośredni lub końcowy zapis procesu degradacji danego materiału najniższym kosztem. Ze składowej czynnej i urojonej można numerycznie wyznaczyć wartości przenikalności magnetycznej skutecznej i przewodności elektrycznej w pierwszej części przebiegu  $f / f_g \leq 7$ .

### 6. Podsumowanie

Procesy degradacyjne w strukturze materiału w makro i mikro-obszarach są możliwe do detekcji za pomocą prostych zestawów pomiarowych. Możliwe jest wykrywanie subtelnych zmian w budowie ziarna [9]. Wstępna selekcja próbek do precyzyjnych badań na mikroskopach elektronowych obniża koszty badań. Metodologia oparta o podstawy teoretyczne de-

fektoskopii wiroprądowej, najprostsze modele analityczne [6, 7] i tanie mostki pomiarowe RLC jest wiarygodna, powtarzalna w okresie krótko i długoterminowym, a także cechuje się wysoką rozdzielczością pomiaru [15]. Wykazano możliwość badania elementów bez znajomości ewolucji eksploatacyjnej ich parametrów początkowych. Uzyskano wiarygodne narzędzie diagnostyczne, wspierające diagnostykę wiroprądową i ułatwiający diagnostykę oraz zrozumienie zagadnienia. Propagowanie opisanych metod wymaga prostych zabiegów organizacyjnych, potem ujednoczenia sond pomiarowych, wymiarów próbek i typu miernika. Łatwa do realizacji jest budowa sondy na bazie produktów Texas Instruments [18, 19], jakim jest zestaw cewek i moduł pomiarowy, wykorzystujących efekt wzmocnienia wykrywanych zmian w obszarze rezonansu.

## 7. Literatura

- [1]. Altpeter I., Tschuncky R., Hällen K., Dobmann G., Boller C., Smaga M., Sorich A., Eifler D.: Early detection of damage in thermo-cyclically loaded austenitic materials, (2012) Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 36, pp. 130-139.
- [2]. Dobmann G., Altpeter I., Szielasko K., Kopp M.: Nondestructive damage characterization with examples of thermal aging, neutron degradation and fatigue, journal of theoretical and applied mechanics, 44, 3, pp. 649-666, Warsaw 2006.
- [3]. Dobrzański J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki. Open Access Library, 2011, t. 3, s. 1-228, ISBN 83-89728-90-7.
- [4]. C. Y. HO, T. K. CHU.: Electrical resistivity and thermal conductivity of nine selected AISI stainless steels, by CINDAS report 45, September 1977.
- [5]. Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628.Rev. 2, "Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques", Printed by the IAEA in Austria February 2011.
- [6]. Heptner H., Stroppe H.: Magnetische und magneto induktive Werkstoffprüfung Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1962, VLN 152-915/34/69.
- [7]. Hughes R., Fan Y., Dixon S.: Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection, NDT&E International 66 (2014) 82-89.
- [8]. Ugitech, Magnetism and Stainless steel.
- [9]. Zergoug M., Kamel G., Boucherou N.: Mechanical Stress Analysis By Eddy Current Method, The Journal of American Science, 4(4), 2008, ISSN 1545-1003.
- [10]. Wenqian Zhu: Electromagnetic Techniques for On-line Inspection of Steel Microstructure, A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences 2013.
- [11]. Wheeler H. A.: Formulas for the skin effect. Proc IRE 1942; 30 (9): 412-24.
- [12]. Żurek Zbigniew Hilary, Witoś Mirosław: Diagnostics of degradative changes in paramagnetic alloys with the use of low frequency impedance spectroscopy, 7<sup>th</sup> International Symposium on NDT in Aerospace, 16-18 November 2015, Bremen, Germany.
- [13]. Żurek Zbigniew Hilary, Duka Piotr.: RLC circuits for material testing and NDT, Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL, Katowice 2015, PL ISBN 978-83-931909-8-0.
- [14]. Żurek Zbigniew H.: Projekt badawczy NN5102383 38, Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów.
- [15]. Żurek Zbigniew Hilary: Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali. Gliwice: Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2012, 155 pp., MONOGRAFIA ; No 423.
- [16]. [http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde\\_for\\_safety/36.pdf](http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/36.pdf).
- [17]. <http://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/251.pdf>.
- [18]. <http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=snow136>, LDC Reference Coils User's Guide, Texas Instruments, 14 May 2015.
- [19]. [www.ti.com/product/LDC1000/technicaldocument](http://www.ti.com/product/LDC1000/technicaldocument).
- [20]. [https://www.researchgate.net/publication/274694777\\_Niestabilnosc\\_eksploatacyjna\\_parametrow\\_magnetycznych\\_i\\_elektrycznych\\_blach\\_rdzienia\\_stojana\\_generatora\\_TWW-200-2A\\_Operational\\_instability\\_of\\_magnetic\\_and\\_electric\\_parameters\\_of\\_stator\\_core\\_sheets\\_in\\_g](https://www.researchgate.net/publication/274694777_Niestabilnosc_eksploatacyjna_parametrow_magnetycznych_i_elektrycznych_blach_rdzienia_stojana_generatora_TWW-200-2A_Operational_instability_of_magnetic_and_electric_parameters_of_stator_core_sheets_in_g).
- [21]. [https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew\\_Zurek3](https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew_Zurek3).

## Autorzy

Adresy e-mail:

zbigniew.zurek@polsl.pl

gerd.dobmann@t-online.de

*Podziękowanie dla Pani Adiunkt Dr Anny Starczewskiej za czas poświęcony pomiarom materiałów ferro i paramagnetycznych próbek stalowych elementów maszyn. Przeprowadzone pomiary i uzyskane wyniki potwierdziły stosowanie metody spektroskopii impedancji w diagnostyce maszyn. Dr Anna Starczewska pracuje w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Politechniki Śląskiej, Anna.Starczewska@polsl.pl*