

Dariusz Baron, EthosEnergy Poland S.A., Lubliniec
Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska, Katowice

BADANIA DODATKOWE KOŁPAKÓW WIRNIKÓW GENERATORÓW

SUPPLEMENTARY TESTING OF GENERATOR ROTOR RETAINING RINGS

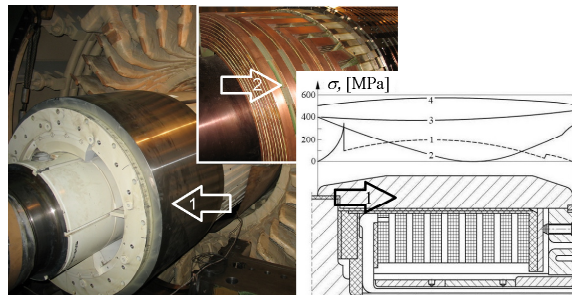
Streszczenie: Artykuł prezentuje przegląd technik obecnie stosowanych do prognozowania czasu eksploatacji kołpaków wirników generatorów wykonanych ze stali austenitycznej. Metoda oparta jest na porównywaniu badanych własności fizycznych kołpaków ze stali G18H18 (ASTM A289 Class C) ze stanem początkowym materiału. Wykrywanie zmian zmęczeniowych w strukturze materiałowej umożliwiają pośrednie pomiary przenikalności magnetycznej względnej i przewodności elektrycznej właściwej w funkcji częstotliwości. Dogodną metodą jest wykrywanie zmian degradacyjnych w rezonansie elektrycznym, przy wykorzystaniu nowej generacji przetworników indukcyjnych serii LDC1000.

Abstract: The paper presents a review of currently used techniques for prediction of service life of austenitic generator rotor retaining rings. The method is based on comparison of the tested physical properties of retaining rings made of G18H18 (ASTM A289 Class C) steel with the material initial condition. Detection of fatigue changes in material structure is possible by indirect measurements of relative magnetic permeability and electrical conductivity versus frequency. A convenient method is detection of degradation changes in electrical resonance, using a new generation of inductive converters LDC1000.

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

1. Wprowadzenie

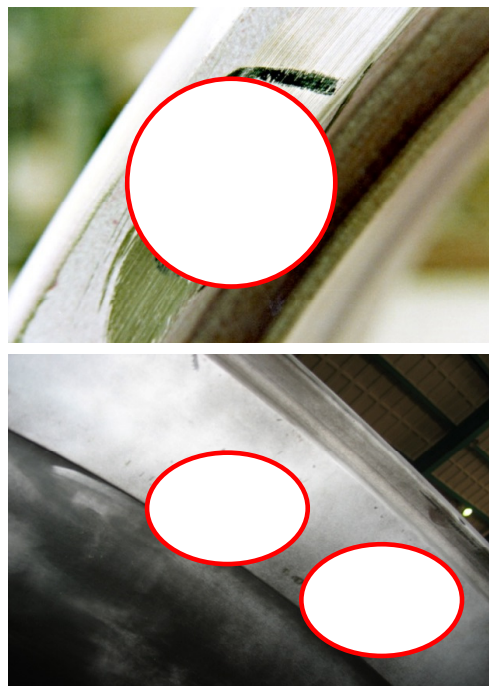
Stale austenityczne stosowane w energetyce charakteryzują się zwiększoną odpornością na nagrzewanie od prądów wirowych w zmiennym polu magnetycznym. Stal austenityczna G18H18 (ASTM A289 Class C) pracuje w warunkach złożonych obciążeń eksploatacyjnych, zarówno mechanicznych, jak i termicznych. Została zaprojektowana i jest stosowana na kołpaki 1 wirników generatorów, które osłaniają połączenia czołowe 2 uzwojenia wzbudzenia - jak pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Lokalizacja kołpaka na wirniku generatora

Obciążenia eksploatacyjne kołpaków wirników generatorów są przyczyną trzech podstawowych rodzajów ich uszkodzeń, mianowicie me-

chanicznych, elektroerozyjnych i korozyjnych. Na rysunku 2 pokazano przykłady uszkodzeń mechanicznych i elektroerozyjnych.



Rys. 2. Uszkodzenia mechaniczne i elektroerozyjne kołpaków

Diagnostyka eksploatacyjna kołpaków jest bardzo ważna z uwagi na potencjalne zagrożenia dla bezpieczeństwa ludzi i elektrowni.

1.1 Charakterystyka stali

Stal G18H18 (ASTM A289 Class C) jest stopem o składzie podanym w tabeli 1, wytrzymałym mechanicznie i stabilnym paramagnetycznie (tab. 2).

Tab. 1. Skład chemiczny stali stosowanych na kołpaki

Skład chemiczny %	C	Mn	Cr	S	Si	N
G18H18	0,12 maks.	17,5-20,0	17,5-20,0	0,015 maks.	0,80 maks.	0,50 min.
ASTM A289-C	0,13 maks.	17,5-20,0	17,5-20,0	0,015 maks.	0,80 maks.	0,45 min.
G18H3	0,45-0,60	17,0-19,0	3,0-4,0	0,035 maks.	0,17-0,50	ok. 0,1

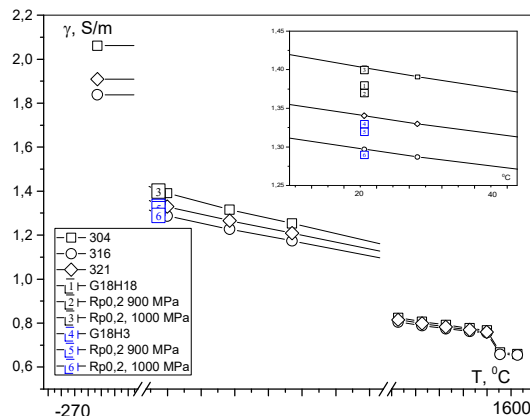
Tab. 1. - ciąg dalszy

P	Al	B	Ni	Ti	V	Fe
0,050 maks.	0,030 maks.	0,001 maks.	-	-	-	reszta
0,060 maks.	0,04 maks.	-	2,00 maks.	0,10 maks.	0,25 maks.	reszta
0,075 maks.	-	-	-	-	-	reszta

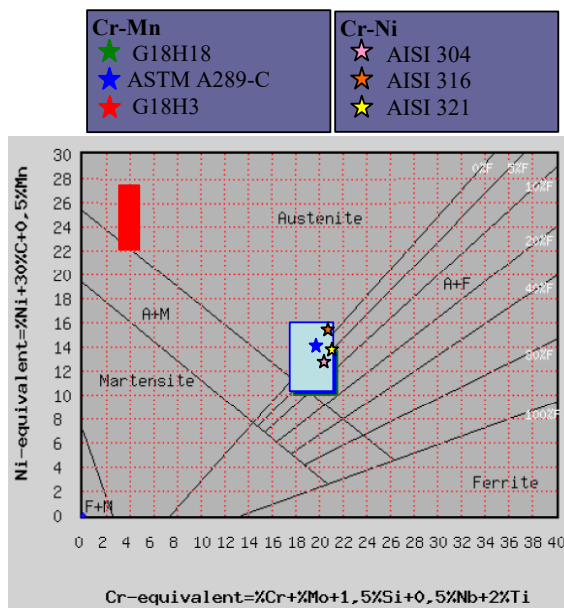
Tab. 2. Katalogowe parametry magnetyczne i elektryczne stali stosowanych na kołpaki

Materiał	μ_r [-]	Przewodność el. właściwa γ [S/m] (rezystywność ρ [Ω m])		
		-	R _{p0,2} 900 MPa	R _{p0,2} 1000 MPa
G18H18	$\leq 1,004$	$1,380 \cdot 10^6$ ($0,725 \cdot 10^{-6}$)	$1,370 \cdot 10^6$ ($0,730 \cdot 10^{-6}$)	$1,400 \cdot 10^6$ ($0,714 \cdot 10^{-6}$)
G18H3	$\leq 1,004$	$1,330 \cdot 10^6$ ($0,752 \cdot 10^{-6}$)	$1,320 \cdot 10^6$ ($0,758 \cdot 10^{-6}$)	$1,290 \cdot 10^6$ ($0,775 \cdot 10^{-6}$)

Zmiany przewodności elektrycznej stali w funkcji temperatury przedstawia rysunek 3. Przewodność elektryczna stali austenitycznych jest funkcją składu chemicznego i wynikowej struktury, jak pokazano dla temperatury 20°C. Związek ten jest widoczny na nomogramie Schaeffler'a (rys. 4). Badanie stali o zaprojektowanej wysokiej stabilności jest utrudnione ze względu na niewielkie dopuszczalne eksploatacyjnie zmiany przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej. Za wyjątkiem stali G18H3 (która stosowana była w przeszłości na kołpaki), pozostałe zgrupowane są na pograniczu fazy austenitycznej i austenityczno-ferrytycznej.



Rys. 3. Przewodność elektryczna stali austenitycznych

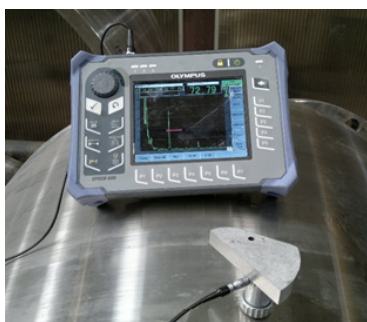
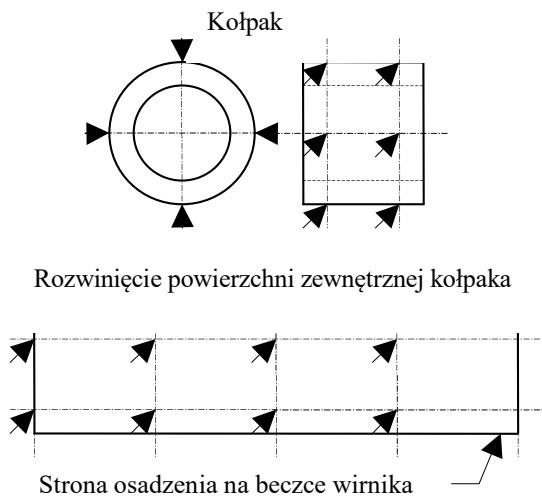


Rys. 4. Nomogram Schaeffler'a dla stali Cr-Mn i Cr-Ni

2. Eksperyment - identyfikacja stanu technicznego

Gromadzenie informacji w okresach międzyna-prawczych jest utrudnione z uwagi na roczny cykl eksploatacyjny. Na badania wstępne złożyło się kilka etapów działań, m.in. wykonano pomiary tłumienia fali ultradźwiękowej w materiale (rys. 5). Wyniki pomiaru tłumienia fali ultradźwiękowej dla ośmiu złomowanych kołpaków zamieszczono w tabeli 3. Pomiary magnetyczne wykonano magnetoskopem 1.069 (rys. 6). Sonda magnetoskopu (rys. 6.b) składa się z magnesu i cewek pomiarowych pola magnetycznego. Magnes wytwarza testowe pole magnetyczne. Po zbliżeniu sondy do materiału o określonej przenikalności magnetycznej, pole magnetyczne ulega zniekształceniu.

Zniekształcenie pola magnetycznego jest mierzone przez cewki pomiarowe w sondzie i wykorzystane do obliczenia przenikalności magnetycznej badanego materiału.

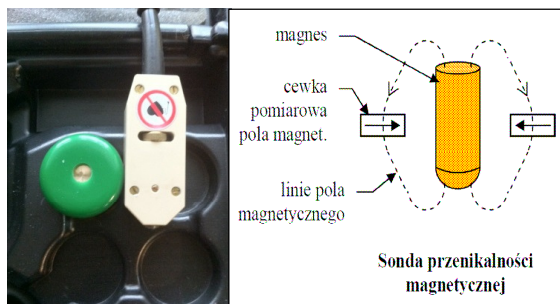
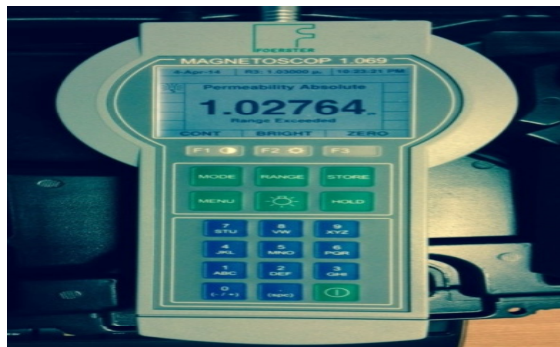


Rys. 5. Punkty pomiarowe i użyta aparatura pomiarowa

Tab. 3. Uśrednione wyniki pomiarów tłumienia fali ultradźwiękowej w materiale kołpaków wycofanych z eksploatacji i fabrycznie nowym

Nr kołpaka	Kołpak (G18H3)						Kołpak (G18H18)		
	K1.1	K1.2	K2.1	K2.2	K3.1	K3.2	K4.1	K4.2	nowy
[dB/m]	61	41	73	66	84	80	38	50	~0

W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej μ_r i podatności magnetycznej κ stali badanych kołpaków [2, 3]. Czcionką pogrubioną zaznaczono wyniki pomiarów stali G18H18 wycofanej z eksploatacji i fabrycznie nowej, które można wzajemnie porównywać. Pozostałe badane kołpaki były wykonane ze stali stosowanej w przeszłości, tj. G18H3. Z uwagi na brak tej stali w stanie początkowym (od lat 80-tych nie jest już produkowana), nie można odnieść się do materiału nowego.



Rys. 6. Magnetoskop Förster'a 1.069 (a) i sonda pomiarowa (b)

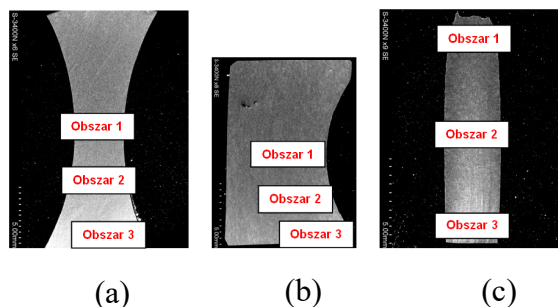
Tab. 4. Wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej μ_r i podatności magnetycznej κ stali badanych kołpaków

Nr kołpaka	Kołpak (G18H3)						Kołpak (G18H18)		
	K1.1	K1.2	K2.1	K2.2	K3.1	K3.2	K4.1	K4.2	nowy
μ_r	1,00275	1,00270	1,00270	1,00270	1,00265	1,00275	1,00355	1,00375	1,00320
κ	0,00275	0,00270	0,00270	0,00270	0,00265	0,00275	0,00355	0,00375	0,00320

Wartości wymagane (dla porównania):
dla materiału nowego $\mu_r \leq 1,004$ (katalog producenta),
wymóg eksploatacyjny $\mu_r \leq 1,05$

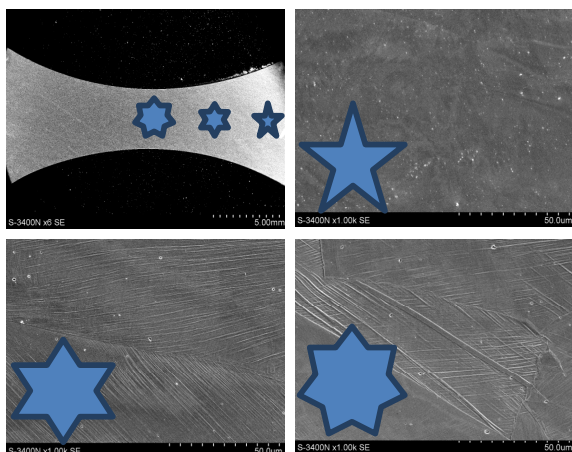
2.1. Badania laboratoryjne – identyfikacja funkcji obserwatora stanu

Badania laboratoryjne rozpoczęto na trzech rodzajach próbek, mianowicie próbkach klepsydrycznych (rys.7a), płaskich (rys.7b) i okrągłych (rys.7c), które poddawano różnym mechanicznym cyklom obciążeniowym (wahadłowym, odzerowo-tętniącym i stałym dodatnim). Dla badanych próbek przyjęto założenia, że największe odkształcenia materiału miały miejsce w obszarach oznaczonych 1, natomiast najmniejsze – w obszarach oznaczonych 3.



Rys. 7. Części środkowe próbek stali G18H18 poddanych mechanicznym cyklicznym obciążeniom zmęczeniowym, z zaznaczonymi obszarami do analizy mikrostrukturalnej; (a) próbka klepsydryczna - naprężana mechanicznie, cykl wahadłowy; (b) próbka płaska - naprężana mechanicznie, cykl odzerowo-tętniący; (c) próbka okrągła - naprężana mechanicznie, stałe dodatnie

Na rysunku 8 pokazano różnice degradacji stref obciążenia cyklicznego próbki klepsydrycznej.



Rys. 8. Przekrój próbki klepsydrycznej i obrazy degradacji struktury

Badana stal, obciążana w warunkach eksploatacyjnych, charakteryzowana jest głównie degradacją struktury i przyrostem pasm poślizgu. Defekt ten jest odpowiedzialny głównie za zmiany przewodności elektrycznej stali. Zakres dalszych badań laboratoryjnych, ze względu na koszty, ograniczono do jednego rodzaju próbek i stanowiska badawczego dostępnego w ramach projektu [15].

2.2. Wybór metody

Próbki stali G18H18 pobrano z odkuwki kołpaka fabrycznie nowego. Na rysunku 9 zaznaczono kierunek pobierania próbek na przekroju poprzecznym odkuwki (zgodny z kierunkiem głównych naprężeń w kołpaku). Na rysunku

tym zamieszczono również widok wyciętych próbek płaskich.

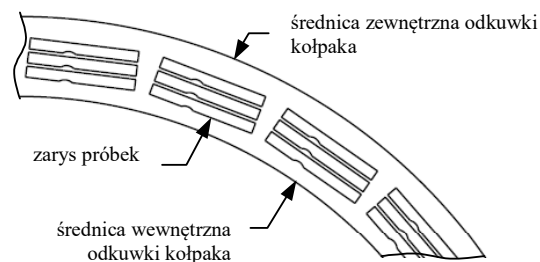


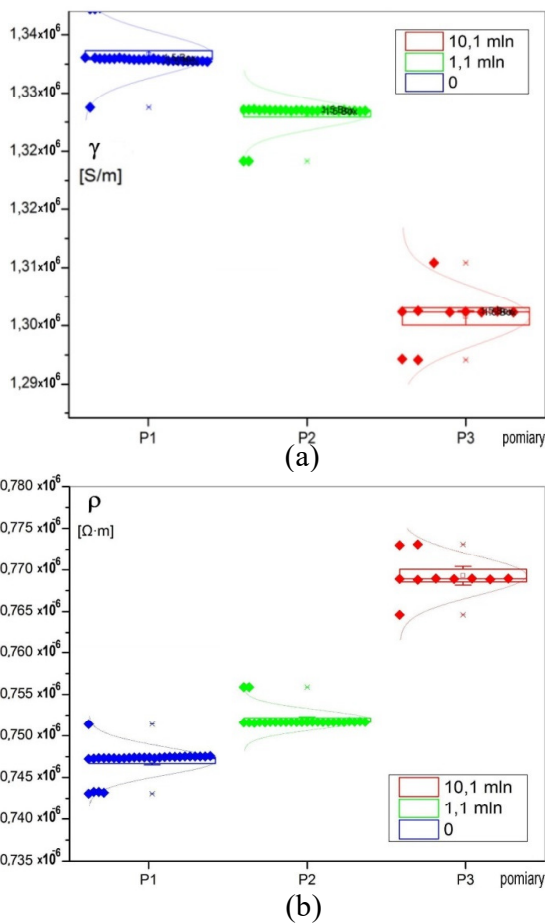
Fig. 9. Wycinek przekroju poprzecznego odkuwki kołpaka z zaznaczonym kierunkiem pobierania próbek oraz widok próbek do badań

Ważnym etapem prowadzonych badań było wstępne laboratoryjne wyznaczenie zakresów zmian parametrów elektrycznych stali G18H18 powodowanych procesami degradacji zmęczeniowej [2, 3].

2.2.1. Pomiary przewodności elektrycznej

Po seriach wysokocyklicznych mechanicznych obciążeń zmęczeniowych próbki poddawano badaniom zmian ich parametrów elektrycznych. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki pomiarów przewodności elektrycznej właściwej γ i rezystywności ρ próbek materiału G18H18 nowego (tj. przed rozpoczęciem obciążeń zmęczeniowych) oraz po seriach 1.100.000 i 10.100.000 cykli. Pomiary wykonywano metodą techniczną półautomatyczną, w układzie poprawnie mierzonego napięcia.

Wyniki pomiarów próbek stali G18H18 wykazały kilkuprocentową (2,5% po 10,1 mln cykli) zmianę wartości ich parametrów elektrycznych po seriach obciążeń zmęczeniowych. W badanym zakresie cykli obciążeń wzrost liczby cykli przełożył się na spadek przewodności elektrycznej właściwej (tj. wzrost rezystywności). Zmierzone zmiany są istotne dla oceny stanu technicznego badanej stali kołpaków i odzwierciedlają poziom jej degradacji zmęczeniowej.



Rys. 10. Zakresy ekwiwalentnych zmian przewodności elektrycznej właściwej γ (a) i rezystywności ρ (b) próbek stali G18H18 w trzech stanach obciążeń zmęczeniowych

3. Podstawy teoretyczne

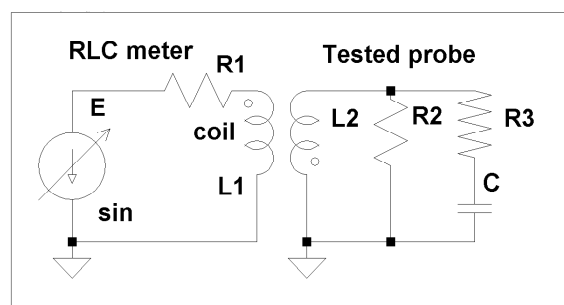
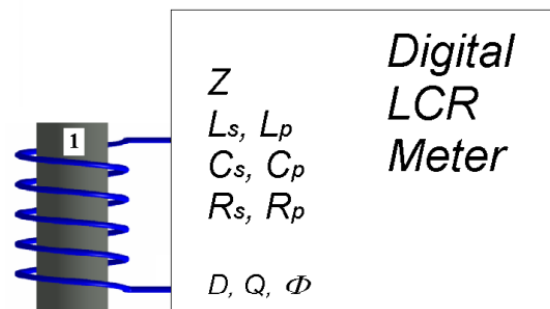
Podczas przepływu prądu mostka RLC (rys. 11) pomiędzy spadkami napięcia E_0 na cewce pustej i E na cewce z próbką (dla materiałów przewodzących element C-R3 obwodu zastępczego jest pomijany), zachodzą następujące zależności [8]:

$$\frac{\bar{E}}{E_0} = \frac{\bar{Z}}{Z_0} \quad (1)$$

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} - j \frac{R - R_0}{\omega L_0} \quad (2)$$

Wielkości $\frac{\omega L_p}{\omega L_0}$ i $\frac{R_p - R_0}{\omega L_0}$ (unormowane składowe impedancji [8]) są głównymi po impedancji Z_m pośrednimi parametrami umożliwiającymi ocenę stopnia postępu degradacji zmęczeniowej i są wyliczane z parametrów połączenia szeregowego L_s i R_s badanego obwodu.

Cewka może obejmować próbkę lub do niej przylegać [8, 11].



Rys. 11. Podstawowy układ pomiarowy i model zastępczy [1]

W przypadku porównywania wyników uzyskiwanych z próbek materiału ważne jest zachowanie geometrii próbki (o promieniu r_0) i geometrii cewki pomiarowej ze względu na istotny wpływ współczynnika wypełnienia η , ($\eta = (D_p / D_c)^2$) [8], jak pokazano we wzorach teoretycznych, na unormowane składowe impedancji (liczone w programie Mathematica).

$$\eta = \left(\frac{D_p}{D_s}\right)^2, \quad k = \text{Sqrt}[-i \times \omega \times \gamma \times \mu_r \times \mu_0] \quad (3)$$

$$\mu s k = \frac{2}{k \times r_0} \times \frac{J_1(k \times r_0)}{J_0(k \times r_0)}, \quad (4)$$

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} [\gamma, \mu_{re}, \omega, \eta] = 1 - \eta + \eta \mu_{re} \text{Re}[\mu_{ef}], \quad (5)$$

$$\frac{R - R_0}{\omega L_0} [\gamma, \mu_{re}, \omega, \eta] = -\eta \mu_{re} \text{Im}[\mu_{ef}]. \quad (6)$$

Stosowane rozwiązania pomiarowe oparte na modelach elektrotechnicznych [7] nie uwzględniają przewodności elektrycznej materiału. Zaproponowane rozwiązanie uwzględnia prądy wirowe i parametry elektryczne materiału [8, 9, 10, 11]. W przypadku badanych ferromagnetyków parametry te są znaczące w zakresach częstotliwości tanich mostków RLC.

4. Pomiary eksperymentalne – mostek HIOKI

Pomiar zmian parametrów prowadzono mostkiem HIOKI (rys. 12.a), pomiarom poddawano próbki po badaniach zmęczeniowych. Dla uniknięcia błędów wynikających z konstrukcji cewki, pomiary wykonywano w ustalonych miejscach przewężenia próbki, z zastosowaniem jednej cewki pomiarowej (rys. 12.b). Pomiary są wynikiem analizy teoretycznych podstaw defektoskopii z wykorzystaniem prądów wirowych. Wyniki porównano na wykresach.



(a)



(b)

Rys 12. Stanowisko pomiarowe i próbka z nałożoną cewką

Na rysunku 13 przedstawiono opracowane wyniki pomiarów trzech grup próbek (nowych oraz po obciążeniu 12 i 24 mln cykli).

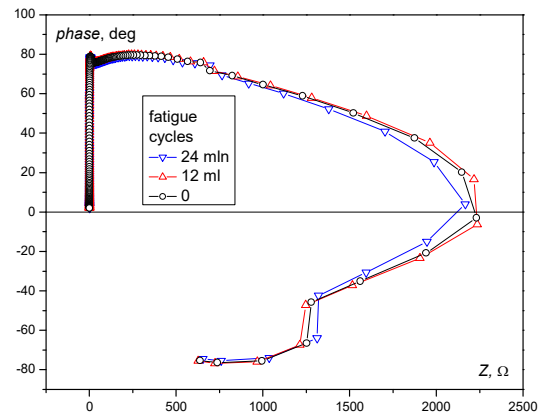
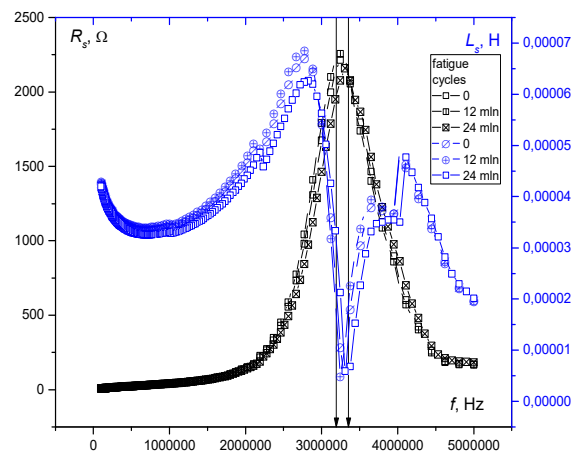
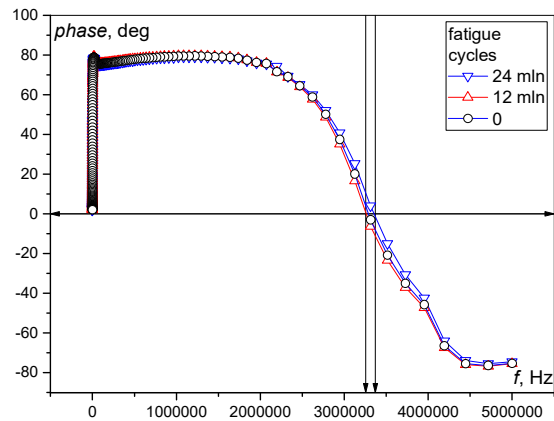
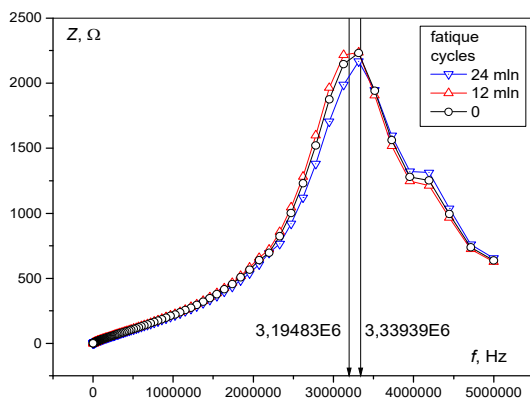


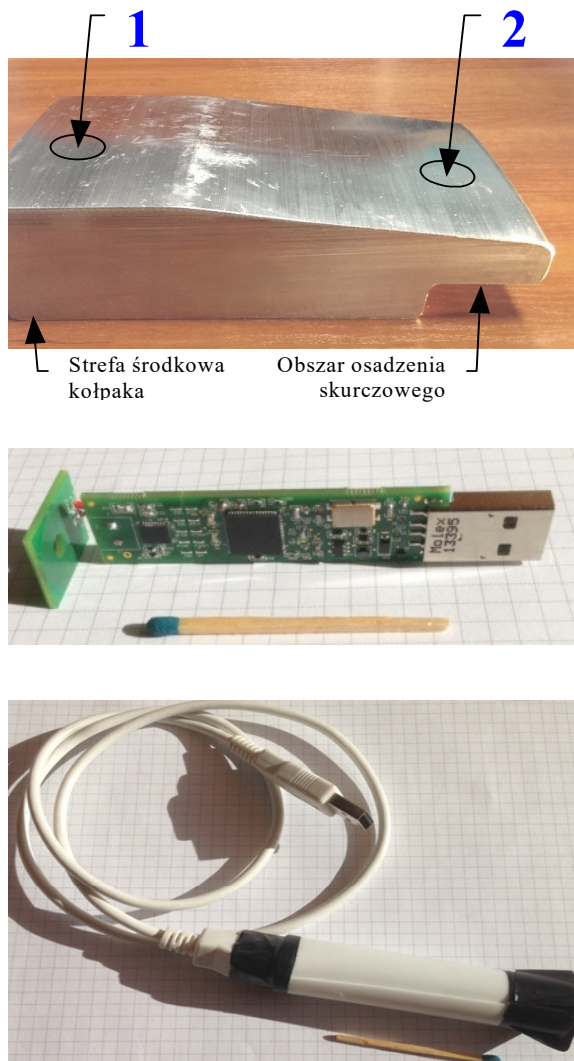
Fig. 13. Wykresy impedancji, fazy, składowych L_s i R_s oraz Z od fazy, dla trzech stanów obciążeniowych

Na wykresach widoczne są zmiany częstotliwości rezonansowej (w punktach zmiany kierunku fazy).

4.1. Pomiary eksperymentalne – moduł LDC1000EVM

W badaniach zastosowano układ na bazie modułu pomiarowego serii LDC1000 [14]. Parametry konstrukcyjne układu z wielowarstwową cewką umożliwiają wykrywanie zmian pasma rezonansu dla badanej stali. Możliwa do wyka-

zania jest zmiana częstotliwości rezonansowej materiału zdegradowanego zmęczeniowo.



Rys. 14. Wycinek kołpaka z lokalizacją punktów pomiarowych, moduł LDC1000 oraz prototypowa sonda pomiarowa

Tab. 5. Wyniki obliczeń zastępczej równoległej składowej rezystancyjnej R_p

Pkt pom.	proximity data [-]	$Y = \frac{\text{proximity data}}{2^{15}}$ [-]	R_{pMIN} [kΩ]	R_{pMAX} [kΩ]	Wartość obliczona
					$R_p = \frac{R_{pMAX} \cdot R_{pMIN}}{R_{pMIN} \cdot (1-Y) + R_{pMAX} \cdot Y}$ [kΩ]
1	3250	0,09918	0,798	9,235	4,508
2	4025	0,12283	0,798	9,235	4,018

Tab. 6. Wyniki obliczeń częstotliwości rezonansowej f_{sensor} i L

Pkt pom.	f_{ext} [MHz]	f_{count} [-]	response time [-]	C [pF]	Wartości obliczone	
					$f_{sensor} = \frac{1}{3} \cdot \frac{f_{ext}}{f_{count}} \cdot \text{response_time}$ [MHz]	$L = \frac{1}{C(2\pi f_{sensor})^2}$ [μH]
1	6	3098	6144	100	3,966	16,104
2	6	3070	6144	100	4,003	15,808

Wyniki przeprowadzonych badań powierzchni kołpaka (tab. 5 i 6) w analizowanych punktach pomiarowych (rys. 14) wykazały różnice wartości wyjściowych sondy pomiarowej (tj. proximity data i f_{count}), jak również przeliczonych parametrów rezonansowych (R_p , f_{sensor} , L). Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania tej sondy do badań eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej materiału kołpaka, czyli stabilnej austenitycznie stali chromowo-manganowej. Dysponując odpowiednimi wzorcami eksploatacyjnej zmienności mierzonych parametrów dla określonej stali, można dokonywać oceny stopnia jej degradacji zmęczeniowej i prognozować czas jej dalszej niezawodnej eksploatacji. Prezentowana sonda pomiarowa umożliwia badanie stali wszystkich gatunków, zarówno ferromagnetycznych, jak i paramagnetycznych. Jest prostym i tanim urządzeniem badawczym, cechującym się wysoką powtarzalnością pomiarów, o uniwersalnych możliwościach, które mogą być wykorzystywane w przemyśle.

5. Podsumowanie

Pomiar zmian degradacyjnych w wysokostabilnych austenitach stosowanych w energetyce jest możliwy nawet przy zastosowaniu tanich przetworników pomiarowych, jakim bez wątpienia jest LDC1000. W badaniach diagnostycznych i ocenie wyników tych badań należy znać parametry materiału nowego bądź wykonywanego wcześniej. Wskazane jest, aby te pomiary były wykonane tą samą metodą i tą samą aparaturą. Badania poprzedzające, mające na celu dokładną charakteryzację materiału, są niezwykle istotne do oceny wyników badań diagnostycznych. Pomiary analizy struktur i niekonwencjonalne metody badań aparaturą standardową LDC 1000, przyniosły efekt nie mniejszy niż przy zastosowaniu profesjonalnej aparatury. Motywacją działań przy niezwykle ograniczonych środkach finansowych została potwierdzona. Najbardziej niezadowoleni mogą być producenci drogiego sprzętu dla NDT i NDE.

6. 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]. Baron D.: Spektroskopia impedancji i rezonans w badaniach stanu technicznego kołpaków wirników turbogeneratorów, Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2015, str. 19-30.
- [3]. Baron D., Żurek Z. H.: Spektroskopia impedancji – metoda oceny stopnia wyeksploatowania kołpaków wirników generatorów, Przegląd Elektrotechniczny nr 03/2014, str. 255-259.
- [4]. Dobrzański J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki. Open Access Library, 2011, t. 3, s. 1-228, ISBN 83-89728-90-7.
- [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]. Kotecki. D. J., Siewert T. A.: Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram Refined constitution diagram offers more accurate FN prediction for Cu-containing stainless steels and dissimilar metal joints.
- [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]. Heptner H., Stroppe H.: Magnetische und magnetoinduktive Werkstoffprüfung Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1962, VLN 152-915/34/69[5].
- [9]. Wheeler H. A.: Formulas for the skin effect. Proc IRE 1942; 30 (9): 412–24.
- [10]. Żurek Zbigniew Hilary, Witoś Mirosław: Diagnostics of degradative changes in paramagnetic alloys with the use of low frequency impedance spectroscopy, 7th International Symposium on NDT in Aerospace, 16-18 November 2015, Bremen, Germany.
- [11]. 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.
- [12]. <http://www.ti.com/general/docs/litabsmultipleleftlist.tsp?literatureNumber=snou136>, LDC Reference Coils User's Guide, Texas Instruments, 14 May 2015.
- [13]. C. Y. HO, T. K. CHU,: Electrical resistivity and thermal conductivity of nine selected AISI stainless steels, by CINDAS report 45, September 1977.
- [14]. www.ti.com/product/LDC1000/technicaldocument
- [15]. Projekt badawczy NN5102383 38, Żurek Zbigniew H.: pt. Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów.

Autorzy

Adresy e-mail:

dariusz.baron@ethosenergygroup.pl

zbigniew.zurek@polsl.pl

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