

Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska, Katowice, Polska
Gerd Dobmann, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Germany
Bernd Rockstroh, GMH Prüftechnik GmbH, Nürnberg, Germany
Dominik Kukla, IPPT, PAN, Warszawa, Polska

DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA STALI W ENERGETYCE

OPERATING DIAGNOSTICS OF STEELS IN POWER ENGINEERING

Streszczenie: Stal martenzytyczna P91 należy do grupy stali stosowanych w energetyce. Komponenty maszyn i wyposażenie wykorzystujące stale z tej grupy (K18 - P 265 i 13 HMF) są użytkowane w eksploatacji przy podwyższonych temperaturach. Stale te są narażone na obciążenia zmęczeniowe cieplne, przyspieszoną korozję, pełzanie dynamiczne i relaksację powodowane procesami zmęczeniowymi. Trudne warunki eksploatacji (temperatura, ciśnienie) wywierają różny wpływ na proces zmian ich parametrów fizycznych. W przypadku większości stali stosowanych w energetyce, magneto-indukcyjny pomiar właściwości fizycznych jest dogodną techniką badania próbek, a nawet przy ciągłym diagnozowaniu wycinka instalacji. Artykuł prezentuje wyniki badań przeprowadzonych dla próbek stalowych P91, P265 i 13 HMF oraz proponuje niskokosztowe rozwiązanie monitoringu eksploatacyjnego.

Abstract: The martensitic steel P91 belongs to the group of steels used in power engineering. Machine components and equipment using steels from the group (K18 - P 265 and 13 HMF) are utilized in service at increased temperatures. Such steels are exposed to thermal fatigue loads, accelerated corrosion, dynamic creep and relaxation due to fatigue processes. The harsh operation conditions (temperature, pressure) have a diverse influence on the evolution process of their physical parameters. In case of most of the steels used in power industry the magneto-inductive measurement of physical properties is a convenient technique for testing of samples, even for continuous diagnostics of installation sector. The paper presents results of tests performed on P91, P265 and 13 HMF steel samples, and a low cost service life monitoring is proposed.

Słowa kluczowe: *Badania nieniszczące NDT, badania nieniszczące NDE, detekcja zmęczenia, prądy wirowe*
Keywords: *Non-destructive testing NDT, non-destructive examination NDE, fatigue detection, eddy-currents*

1. Wstęp

Wśród metod najdokładniej charakteryzujących procesy degradacyjne są metody neutronowe i rentgenowskie [1]. Metody magneto-indukcyjne czułe na zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych zajmują kolejne miejsca. Metody magneto-indukcyjne stosowane były do wykrywania pęknięć. Obecnie metody te wprowadzane są do detekcji procesów zmęczenia eksploatacyjnego [3, 6, 7, 8]. Szczegółowe porównanie parametrów początkowych (wejściowych) materiału z parametrami materiału eksploatowanego w okresie kilkunastu lub kilkudziesięciu lat, w wielu przypadkach jest wręcz niemożliwe. Takie porównanie jest niezbędne dla NDE i NDT. Zamieszczone fotografie ilustrują kolejno: fragmenty komory wlotowej przegrzewacza II stopnia pary wtórnie przegrzanej (M-2) (rys. 1a), komory wlotowej pary świeżej z III stopnia (rys. 1b) przegrzewacza pary świeżej i kolana rurociągu pary wtórnie przegrzanej (rys. 1c).





Rys. 1. Fragmenty instalacji energetycznych z zaznaczonymi miejscami pobrania próbek, od lewej: komora wlotowa 15HM, komora wlotowa 20H12M1F, kolana 13HMF

Eksplatacyjna ewolucja parametrów mechanicznych [2] i magnetycznych jest nieliniowa, ściśle powiązana ze składem chemicznym materiału, strukturą i charakterem obciążeń eksploatacyjnych. Jeden ze sposobów wyznaczania eksploatacyjnej zmienności własności magnetycznych opisano dla kilku gatunków stali. Wpływ charakteru obciążeń eksploatacyjnych na parametry magnetyczne i elektryczne materiału jest zróżnicowany ze względu na skład chemiczny i strukturę pierwotną. Dlatego dla każdego gatunku stali wymagane są niezależne badania.

2. Charakterystyka stali

Stal chromowo-molibdenowa 15HM (PN-75/H-84024, 13CrMo4-5, EN) jest stalą nierdzewną, przeznaczoną do pracy w podwyższonych temperaturach. Stal ta charakteryzuje się dobrą plastycznością zarówno w wysokich, jak i niskich temperaturach. Jest dobrze obrabialna, stosowana w przemyśle chemicznym i energetyce, w temperaturach podwyższonych do 500°C. Ma zastosowanie m.in. na rury i przewody przegrzewaczy, zbiorniki ciśnieniowe oraz walczaki.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
15HM	PN	0,11	0,40	0,15	max
		0,18	0,70	0,35	0,040
Skład chemiczny – ciąg dalszy					
S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
max 0,040	max 0,25	0,70	max 0,35	0,40	Al max 0,02

Stal stopowa konstrukcyjna chromowo-molibdenowo-wanadowa 13HMF PN-75/H-84024 (lub jej odpowiednik 14MoV6-3, 1.7715) była stosowana w produkcji rur kotłowych, części turbin parowych oraz kotłów pracujących w temperaturach do 560°C.

Gatunek	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
13HMF	PN	0,10	0,40	0,15	max
		0,18	0,70	0,35	0,040

Skład chemiczny – ciąg dalszy					
S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
max 0,040	max 0,25	0,30	max 0,30	0,50	Al max 0,02
		0,60		0,65	

Stal 20H12M1F (X20CrMoV12-1 DIN) była stosowana na wyposażenie energetyczne pracujące w temperaturach do 600°C. Gatunek ten lub jego odpowiednik jest stosowany na pręty okrągło-walcowane, odkuwki, pręty okrągłe i płaskowniki.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
20H12M1F	PN	0,17	0,30	0,10	max
		0,23	0,80	0,50	0,035

Skład chemiczny – ciąg dalszy					
S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
max 0,035	-	0,70	11,00	0,30	v 0,25
		1,00	12,00	0,80	0,035

Powyższe gatunki stali stanowiły podstawę powojennej energetyki, opartej głównie na normach GOST. Stal P91 (XCrMoVNb9-1 DIN) jest szczególnie odpowiednia na kotły parowe, elementy kotłów, walczaki i zbiorniki ciśnieniowe. Może pracować ciągle w temperaturach do około 650°C.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
P91, XCrMoVNb9-1 W-1.4903	ASME DIN	0,08	0,30	0,20	max
		0,12	0,60	0,50	0,035

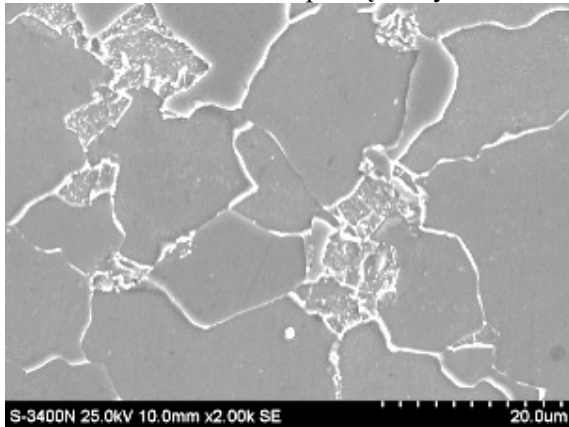
Skład chemiczny – ciąg dalszy						
S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	inne
max 0,035	8,0	<0,40	0,85	0,18	0,06	N:
	9,5		1,05	0,25	0,1	0,03
						0,07

Stal P91 wraz z jej poprzedniczką 20H12M1F należą do grupy stali martenzytycznych.

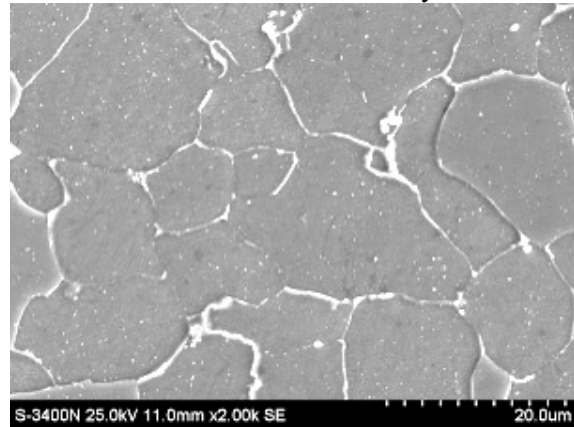
3. Badany materiał

W wyniku przeprowadzonych badań porównano materiały wejściowe zgromadzone w magazynach z materiałami instalacji obecnie eksploatowanych, wykonanymi ze stali: 13HMF, 15HM oraz 20HM12M1F. Badania metalograficzne przeprowadzono przy użyciu mikroskopu skaningowego Hitachi S-4200 sprzężonego z systemem EDS do mikroanalizy rentgenowskiej. Obserwacje wizualne przy powiększeniach 200, 500, 1000 i 2000 prowadzono na całej powierzchni zglądu każdej z próbek. Charakterystyczne elementy struktury ujawnione na każdej z próbek rejestrowano cyfrowo. Wybrane struktury zamieszczono na rys. 2 i 3.

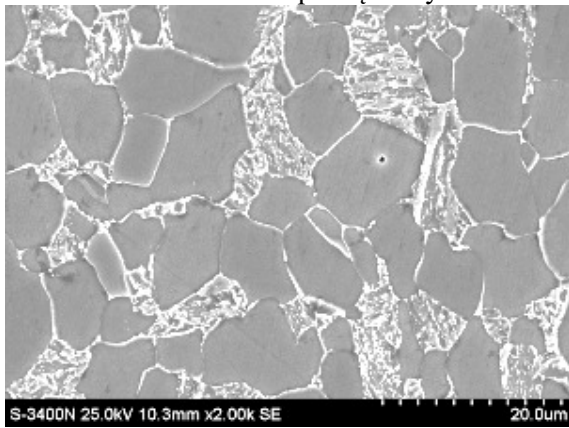
13HMF – stan początkowy



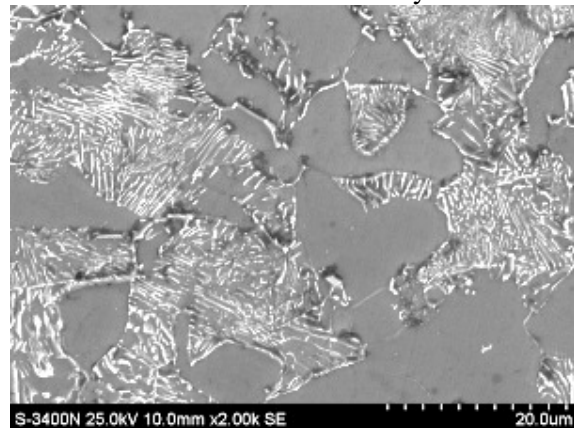
13HMF – stan końcowy



15HM – stan początkowy

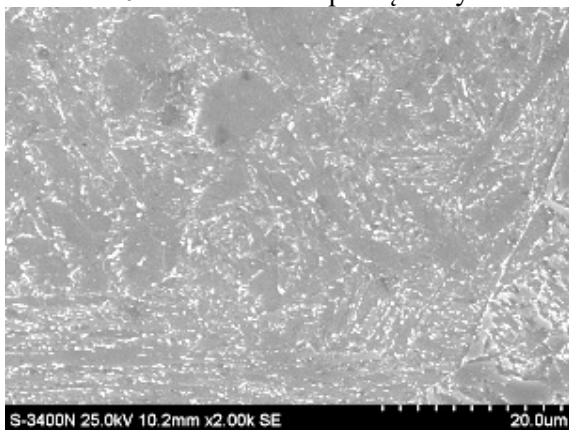


15HM – stan końcowy

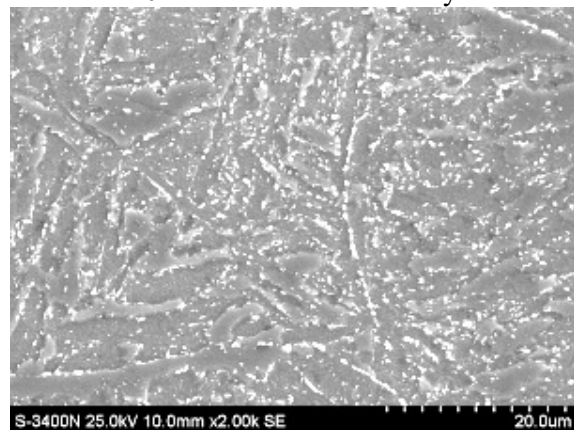


Rys. 2. Porównanie zmian struktur stali 13HMF i 15HM

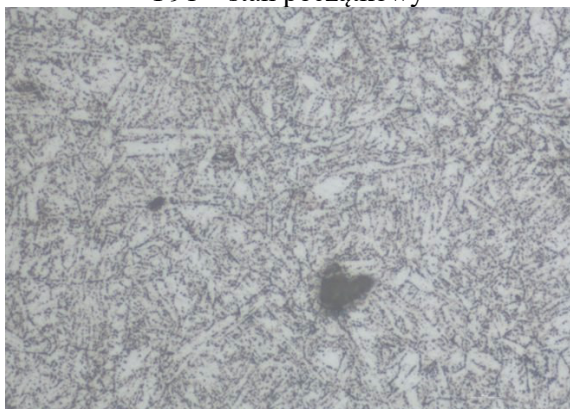
20H12M1F – stan początkowy



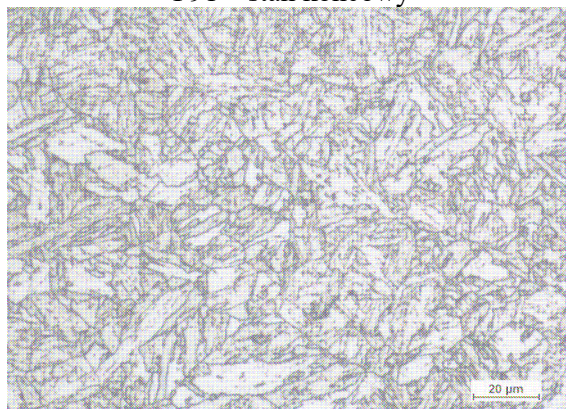
20H12M1F – stan końcowy



P91 – stan początkowy



P91 – stan końcowy



Wizualizacja zmian eksploatacyjnych struktur stali:

13HMF stan początkowy – ferryt + perlit

15HM stan początkowy – ferryt + perlit

20H12M1F stan początkowy – martenzyt

13HMF stan końcowy – bainit

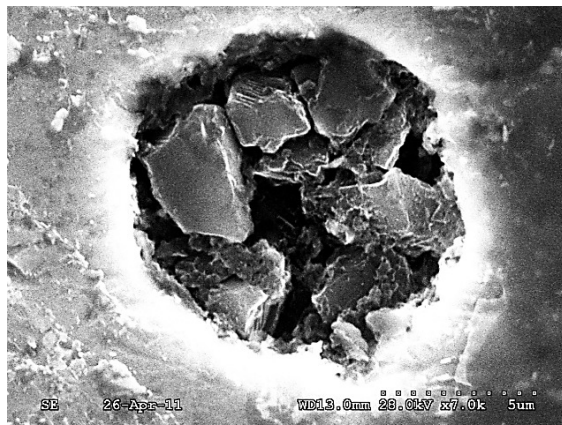
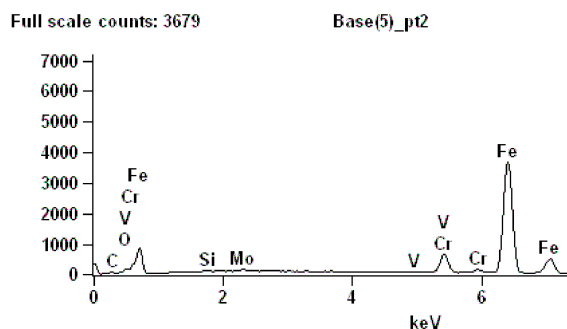
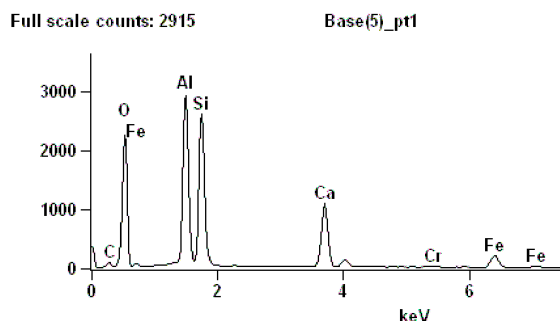
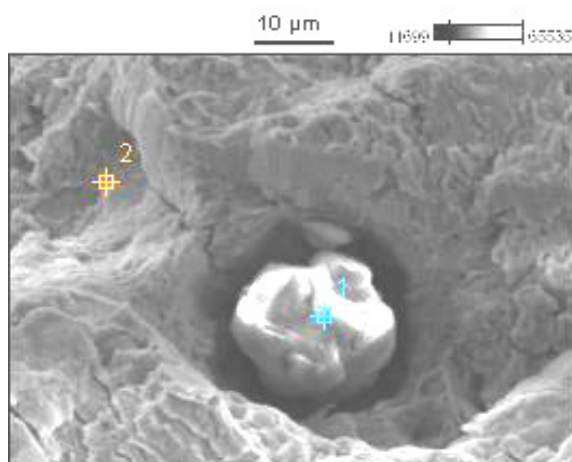
15HM stan końcowy – ferryt + perlit

20H12M1F stan końcowy – martenzyt+ węgliki

Rys. 3. Porównanie zmian struktur stali 20H12M1F i P91

W strukturach stali P91 poddanych eksploatacji lub sztucznie starzonych, typową strukturą jest martenzyt odpuszczony z wydzieleniami węglików na granicach pierwotnego austenitu i listwach martenzytu, z ich widocznym wzrostem [2]. W obciążeniach zadawanych laboratoryjnie

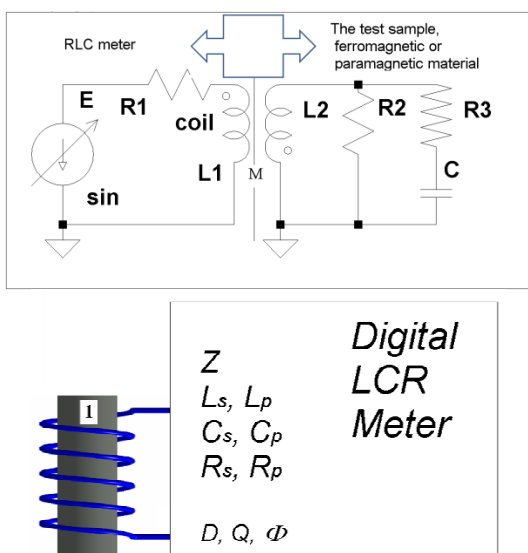
na maszynach zmęczeniowych dominuje w podstawowej strukturze, degradacja polegająca na pękaniu wtrąceń niemetalicznych i propagacji pęknięć na ściany gniazda wtrącenia i sąsiadującej struktury, jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Obrazy i skład wtrąceń niemetalicznych materiału wejściowego, przed i po obciążeniach mechanicznych na stanowisku MTS

4. Zagadnienia teoretyczne pomiaru

Zależności parametryczne materiału można najprościej zobrazować za pomocą modelu. Badany materiał o średnicy D_p (określony swoimi parametrami magnetycznymi i elektrycznymi [4, 10, 11]) oddziałuje na parametry elektryczne cewki pomiarowej (o średnicy D_c) poprzez sprzężenie indukcyjne M (rys. 5).



Rys. 5. Model układu pomiarowego [1]

Wybrany został jeden z najprostszych modeli opisanych przez Forstera [4]. Dokonując porównania proporcji unormowanych składowych impedancji [4]

$$\frac{\omega L_p}{\omega L_0} \quad \text{i} \quad \frac{R_p - R_0}{\omega L_0} \quad (1)$$

uzyskano informację o wpływie procesu eksploatacyjnego na zmiany i defekty struktur. Mierząc składowe impedancji L_s i R_s układu pomiarowego (szeregowego lub równoległego), otrzymujemy informacje o trendzie zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej.

W przypadku porównywania wyników uzyskiwanych z próbek materiału ważne jest zachowanie geometrii próbki [11, 19] (promienia próbki r_0) oraz geometrii cewki pomiarowej, ze względu na istotny wpływ współczynnika wypełnienia η (gdzie $(\eta = (D_p / D_s)^2)$), co przedstawiają wzory uproszczone na unormowane składowe impedancji [4, 11, 12,], analizowane pod względem konstrukcji cewek w programie Mathematica [11]:

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

$$\mu_{sk} = \frac{2}{k \times r_0} \times \frac{J_1(k \times r_0)}{J_0(k \times r_0)}, \quad (3)$$

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} [\gamma, \mu_{re}, \omega, \eta] = 1 - \eta + \eta \mu_{re} \text{Re}[\mu_{sk}], \quad (4)$$

$$\frac{R - R_0}{\omega L_0} [\gamma, \mu_{re}, \omega, \eta] = -\eta \mu_{re} \text{Im}[\mu_{sk}], \quad (5)$$

Częstotliwość graniczna definiowana zależnością

$$f_g = 2 / (\pi \times D_p^2 \times \gamma \times \mu_o \times \mu_r) \quad (6)$$

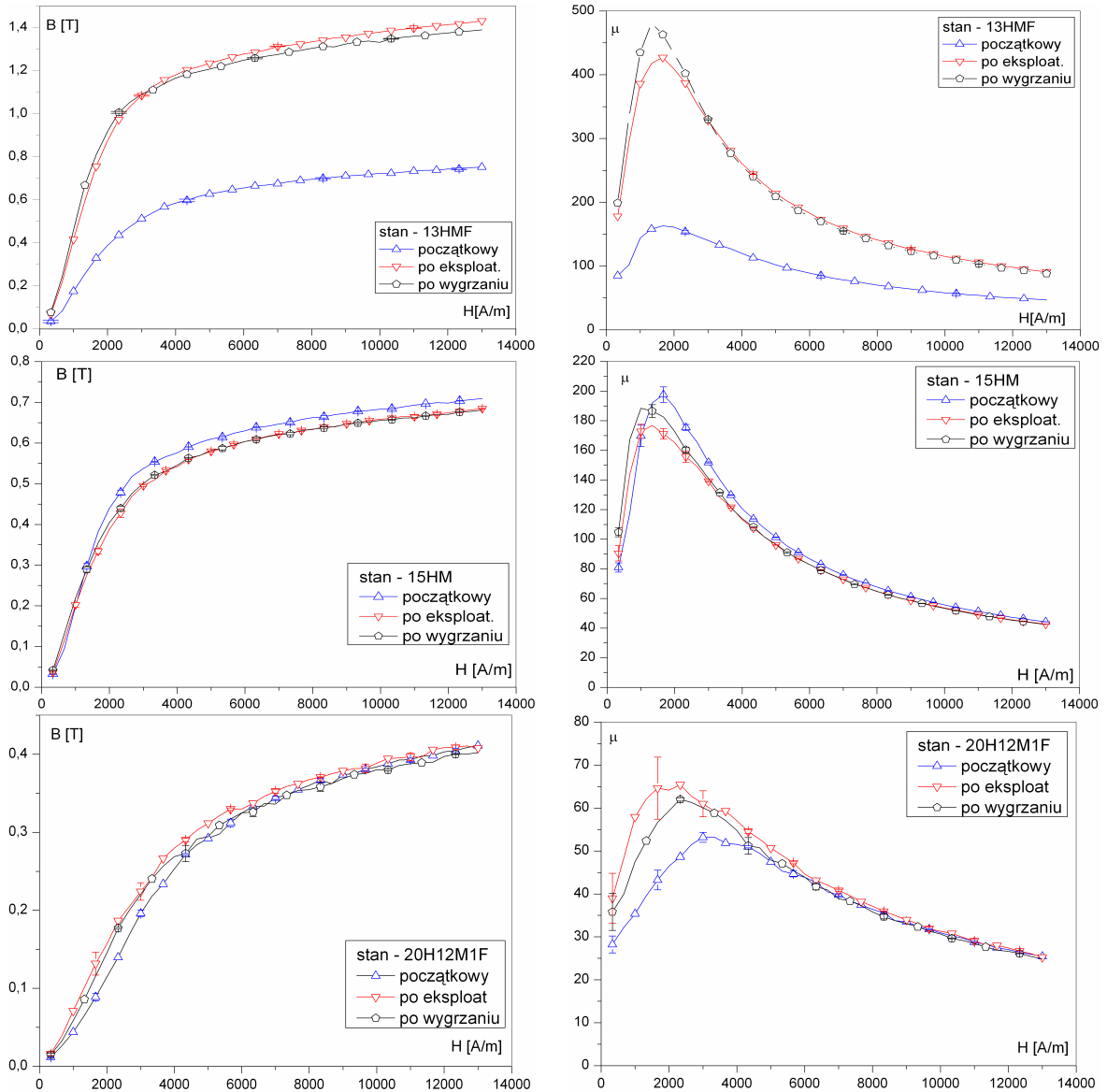
charakteryzuje wnikanie prądów wirowych i pola magnetycznego w głąb próbki cylindrycznej.

5. Pomiary parametrów magnetycznych

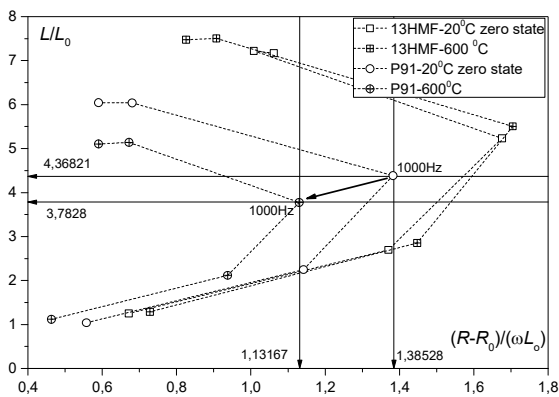
Znaczące zmiany indukcyjności cewki pomiarowej z próbką po eksploatacji zaobserwowano dla stali 13HMF oraz 20H12M1F. W stali 15HM wykryte zmiany obserwowano jedynie dla maksymalnej przenikalności dynamicznej. Przebiegi krzywych pierwszego magnesowania oraz przenikalności magnetycznej dynamicznej, dla materiału początkowego i po eksploatacji oraz materiału wygrzewanego w celu eliminacji naprężeń drugiego rodzaju [12-15], zamieszczono na rysunku 6. Każdy z gatunków stali wykazuje zmiany eksploatacyjne parametrów. Dla zakresu natężenia pola do 200 A/m, wartości odchylenia standardowego potwierdzają możliwość zastosowania pomiarów magnetycznych, jako obserwatora stanu wyeksploatowania.

6. Pomiary mostkiem RLC ewolucji parametrów elektrycznych i magnetycznych stali P91

Stal 20H12M1F stanowiła bazę doświadczalno-pomiarową [14, 15]. Dla stali P91 nie dysponowano stałą wyeksploatowaną w warunkach przemysłowych. Pomiary przeprowadzono na próbkach magazynowych stali P91 oraz na próbkach wyżarzanych. Porównano materiał w stanie początkowym i po wyżarzeniu w temperaturze 600°C. Wykres prezentujący wyniki pomiarów dla pięciu podstawowych zakresów częstotliwości mostka RLC (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz) [11] jest pokazany na rysunku 7.



Rys. 6. Porównanie zmian parametrów eksploatacyjnych stali



Rys. 7. Porównanie zmian unormowanych składowych impedancji dla dwóch gatunków stali stosowanych w energetyce

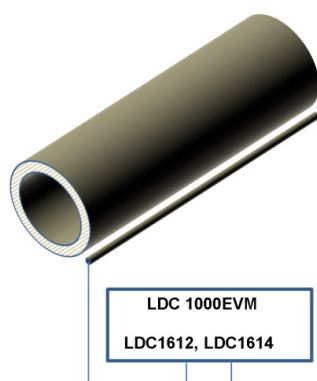
Porównywalne zmiany materiału w stosunku do cyklu eksploatacyjnego stanowi wyżarzanie w czasie 80 do 100 tysięcy godzin, w temperaturze 600°C. Rzeczywiste zmiany skutecznej przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej mogą być wyprowadzone numerycznie ze względnych zmian unormowanych składowych impedancji pokazanych na rys. 7. Znaczne zmiany tych parametrów stali P91 następują wraz ze znaczącymi zmianami parametrów mechanicznych [2].

7. Rozwiązania konstrukcyjne

Zmiana parametrów elektrycznych obejmuje także zmianę wartości częstotliwości rezonansu układu pomiarowego [5, 9, 10, 11]. Obecność ciała ferromagnetycznego w pobliżu przewo-

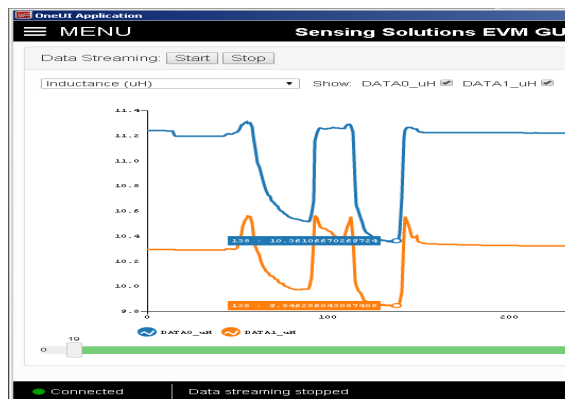
dów stanowi przyczynę, że obwody takie stają się nieliniowe (rys. 8).

Reakcja przewodu na materiał ferromagnetyczny umiejscawia powyższe zagadnienie w kręgu metod diagnostyki nieniszczącej NDT NDE [5, 10, 16-18]. Poprzez sprzężenie indukcyjne jedнопrowodowego kabla pomiarowego można kontrolować parametry odcinka rurociągu, nawet w temperaturze pracy. Jeśli sonda przewodowa jest wyposażona w osłonę silikonową, temperatura rurociągu jest mniej destrukcyjna niż w przypadku wyszukanych tensometrów.



Rys. 8. Przykład zastosowania przetworników LDC w kontroli eksploatacyjnej rurociągu

W skali laboratoryjnej rozpoczęto testowanie rozciągania paska szkła metalicznego, za pomocą dwukanałowego przetwornika LDC1612 [20]. Fotografii doświadczalnego stanowiska badań oraz zarejestrowane wyniki pomiarów naciągu folii zamieszczono na rysunku 9.



Rys. 9. Rejestracja zmian naprężeń w pasku folii szkła metalicznego w programie producenta TI, Sensing Solutions EVM GUI [20]

Przetwornik ten rejestruje także zmiany częstotliwości sprzężenia rezonansowego.

8. Wnioski i kierunki dalszych badań

Spektroskopia impedancji, unormowane składowe impedancji i rezonans magnetyczny są potencjalnymi obserwatorami stanu degradacji materiału. Kolejną przewagą tych metod jest możliwość obniżenia kosztów aparatury, bez utraty powtarzalności i czułości detekcji. Proste metody diagnostyczne nie muszą być zagrożeniem dla koncernów produkujących urządzenia defektoskopowe, mogą służyć modyfikacji klasycznych metod detekcji pęknięć. Proponowana metoda znalazła zainteresowanie w kilku ośrodkach akademickich w kraju, pierwsze aplikacje przemysłowe zostały przeprowadzone. Dostępne na rynku moduły pomiarowe firmy TI [16, 17, 18] są dobrym krokiem w kierunku dalszej miniaturyzacji i obniżki kosztów, przy zapewnionym standardzie metrologicznym.

9. Literatura

- [1]. 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.
- [2]. Dobrzański J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki. Open Access Library, 2011, t. 3, s. 1-228, ISBN 83-89728-90-7.
- [3]. 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.
- [4]. Heptner H., Stroppe H.: Magnetische und magneto induktive Werkstoffprüfung Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1962, VLN 152-915/34/69.

- [5]. Hughes R., Fan Y., Dixon S.: Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection, *NDT&E International* 66 (2014) 82–89.
- [6]. Ugitech, Magnetism and Stainless steel.
- [7]. Zergoug M., Kamel G., Boucherou N.: Mechanical Stress Analysis By Eddy Current Method, *The Journal of American Science*, 4(4), 2008, ISSN 1545-1003.
- [8]. 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.
- [9]. Wheeler HA. 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]. Żurek Zbigniew H.: Projekt badawczy NN5102383 38, Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów.
- [13]. Żurek Zbigniew Hilary: Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali. Gliwice: Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2012, 155 pp., MONOGRAFIA ; No 423.
- [14]. http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/36.pdf.
- [15]. <http://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/251.pdf>.
- [16]. <http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=snow136>, LDC Reference Coils User's Guide, Texas Instruments, 14 May 2015.
- [17]. www.ti.com/product/LDC1000/technicaldocument.
- [18]. <http://www.ti.com/lit/ds/snosc9/snosc9.pdf>.
- [19]. https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew_Zurek3.
- [20]. <https://e2e.ti.com/support/sensor/inductive-sensing/f/938/t/484367>.

Autorzy

Adresy e-mail:

zbigniew.zurek@polsl.pl

gerd.dobmann@t-online.de

B.Rockstroh@gmbh-pruftechnik.de

dkukla@ippt.pan.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