

Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska, Gliwice

Dominik Kukła, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Tomasz Jasiński, EthosEnergy Poland S.A., Lubliniec

WYKORZYSTANIE MOSTKA RLC DO OCENY POSTĘPU PEŁZANIA WYSOKOTEMPERATUROWEGO STALI P91

APPLICATION OF RLC MEASUREMENT TECHNIQUES TO EVALUATE CREEP PROGRESS OF HIGH-TEMPERATURE P91 STEEL

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości oceny zmian parametrów fizycznych próbek ze stali P91 w oparciu o zmodyfikowane metody badań magneto-indukcyjnych. Badania przeprowadzono urządzeniami minimalizującymi koszty badań nie wpływającymi na dokładność. Zastosowano mostek pomiarowy RLC [8] i sondę pomiarową LDC1000 [9-11]. Przedstawione wstępne wyniki badań potwierdzają przyjęte założenia i wskazują na szeroki zakres zastosowań w przemyśle.

Abstract: The article presents the diagnostics of changes in the physical parameters of the samples of steel P91 based on the modified method of magneto-inductive testing. The study was conducted devices minimize research costs without affecting accuracy. RLC uses a measuring bridge [8] and probe cover LDC1000 [9-11]. The preliminary results confirm the assumptions and indicate a wide range of applications in industry.

Słowa kluczowe: metody magneto indukcyjne, NDT, NDE

Keywords: magneto inductive method, NDT, NDE

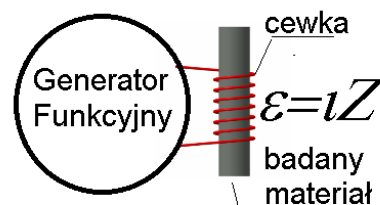
1. Definiowanie problemu

Zmieniające się parametry fizyczne stalowego elementu podzespołu, charakteryzują postęp degradacji w procesie jego eksploatacji. Bieżące parametry elektryczne i magnetyczne charakteryzują stan materiału [1-3] i wraz z parametrami cewki pomiarowej zmieniają przebieg impedancji układu pomiarowego. Zmiana ta, a szczególnie jej składowe, może korelować z przebiegiem eksploatacji. Rozłączna analiza impedancji, przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej jest niewystarczająca do oceny postępu degradacji. Pełna ocena zmian materiału wymaga jednoczesnej analizy unormowanych składowych impedancji w funkcji częstotliwości opartej o pojęcie przenikalności skutecznej Förstera (wartości ujednoliconej we wszystkich kierunkach) [8]. Tak prowadzona analiza umożliwi rozdzielenie wpływu czynników magnetosprężystych i innych opisujących stopień degradacji materiału [4, 5]. Materiał można też niejednokrotnie charakteryzować za pomocą pomiaru zmian częstotliwości rezonansowej układu pomiarowego sonda (cewka) – materiał [7, 8]. Proces pomiaru i diagnozowania zostanie przedstawiony na przykładzie stali P91. W diagnozowaniu wykorzystane zostaną dwie niezależne uproszczone metody pomiaru mostkiem RLC i przetworni-

kiem LDC 1000. Uproszczenie metod nie wpływa na dokładność badań. W obu metodach wykorzystana zostanie cewka płaska przylegająca do powierzchni badanej próbki materiału.

2. Założenia teoretyczne pomiaru unormowanych składowych impedancji

Uzwojenie sondy (cewki) pomiarowej ma rezystancję R . Pusta cewka sondy po podłączeniu do źródła napięcia przemiennego ma impedancję Z_0 . Włożenie rdzenia do cewki powoduje wzrost impedancji do wartości Z . Składowa R_0 impedancji Z wzrasta do wartości R .



Rys. 1. Ogólny schemat układu pomiarowego

Napięcie uzwojenia cewki (sondy) przed włożeniem próbki wynosi ε_0 , a po włożeniu próbki ε zmienia się proporcjonalnie do impedancji Z . W rozważaniu analitycznym zaproponowanym przez Förstera [8] wprowadzono pojęcie przenikalności skutecznej - μ_{sk} . Założono też, że

część rzeczywista R_0 dla pustej cewki pomiarowej jest pomijana. Pozostaje jedynie składowa urojona ωL_0 i składowa rzeczywista przyrostowa R :

$$\frac{\underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{\underline{Z}}{\omega L_0} = j(1 - \eta + \eta \mu_r \underline{\mu}_{sk}), \quad (1)$$

z czego wynikają następujące zależności dla znormalizowanych składowych impedancji [8]:

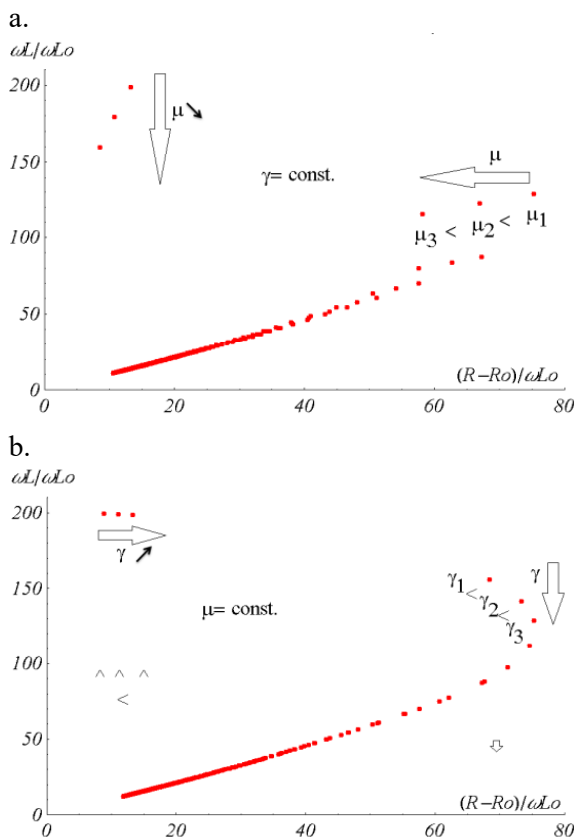
$$\frac{\text{Re } \underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\text{Im } \underline{\mu}_{sk}), \quad (2)$$

$$\frac{\text{Im } \underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re } \underline{\mu}_{sk}). \quad (3)$$

Gdzie: μ_r (μ_{rel}) - przenikalność magnetyczna względna, η - współczynnik wypełnienia cewki definiowany, jako stosunek średnic próbki D_p i cewki D_s

$$\eta = (D_p / D_s)^2 \quad (4)$$

Na rysunku 2 zamieszczono przykłady przebiegów unormowanych składowych impedancji. Wartość $(R-R_0)$ oznacza składową czynną impedancji dla określonej częstotliwości pomniejszoną o rzeczywistą rezystancję uzwojenia mierzona dla prądu stałego.



Rys. 2. Unormowane składowe impedancji przy stałej γ – rys. a, przy stałej μ – rys. b

Przedstawione krzywe wywodzą się z początków badań magnetoindukcyjnych dla NDT (Nieniszcząca Diagnostyka Techniczna). Natomiast forma ich przedstawienia za pomocą MATHEMATIKA jest metodą autorską [8]

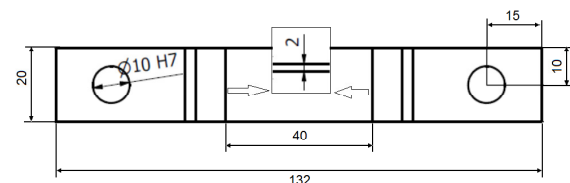
3. Materiał badań i przygotowanie próbek

Stal P91 (XCrMoVNb9-1 DIN) jest stalą martenzytyczną stosowaną na: kotły parowe, elementy kotłów, walczaki i zbiorniki ciśnieniowe. Może pracować ciągle w temperaturach do około 650°C. Skład chemiczny stali zamieszczono w tabeli 1. Wymiary próbek zamieszczono na rysunku 3 (Rys. 3)

Tab. 1. Skład chemiczny stali

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny				
		C	Mn	Si	P	
P91, XCr-MoVNb9-1 W-1.4903	ASME DIN	0,08 0,12	0,30 0,60	0,20 0,50	max	0,035

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



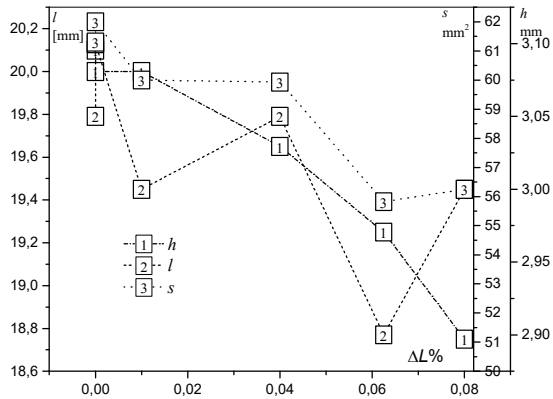
Rys. 3. Wymiary badanych próbek

Badania przeprowadzono na zestawie 5 próbek plus próbka „0” o geometrii pokazanej na rysunku 3. Pięć próbek poddano obciążeniu pełzania w temperaturze 540°C, co odpowiada warunkom pracy instalacji energetycznych.



Rys. 4. Fotografie próbki „0” i próbek po pełzaniu do zadanego wydłużenia

Na rysunku 4 pokazano próbki po pelzaniu wysokotemperaturowym i dodatkowo próbkę testową „0”, po wycięciu elektro-drażarką (przed wywierceniem otworów).

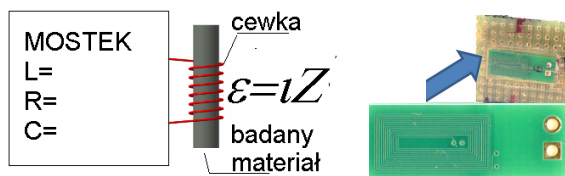


Rys. 5. Zmiany wydłużenia l , przekroju s , grubość h w funkcji $\Delta L\%$ próbek

Zmiany przekroju obrazują trend związany z przewodzeniem. W próbce ostatniej odnotowano lokalne odkształcenia powierzchni materiału wskazujące zerwanie jednorodności stuktury. Wydłużenie równe 16 % niszczy próbkę (zrywa).

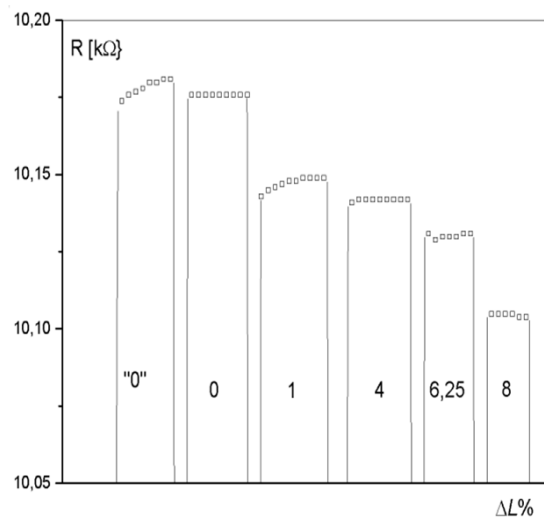
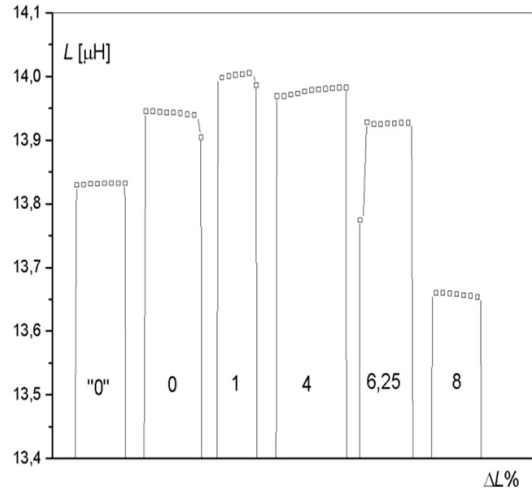
4. Pomiar mostkiem RLC z sondą (cewką) pomiarową płaską

Mostek pomiarowy RLC jest niedocenianym urządzeniem w zastosowaniach defektoskopowych, a szczególnie do wyznaczania zmian parametrów materiału. Na rysunku 6 podano zasadę pomiaru i realizację stykowej sondy (cewki) pomiarowej.



Rys. 6. Ogólna zasada pomiaru mostkiem – z lewej, stykowa sonda pomiarowa (płaska) do pomiaru części środkowej próbki – z prawej

Pomiary mostkiem RLC UT612 zostały zarejestrowane poprzez aplikację urządzenia dla parametrów sondy R_s i L_s przy częstotliwości 100 kHz (Rys.6). Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiaru składowych L_s , R_s kolejnych próbek z rysunku 4.

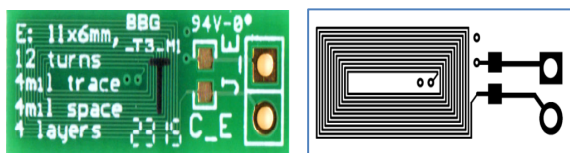


Rys. 7. Wyniki serii pomiarów L_s i R_s wykonane sondą z rys.6, przyłożoną w środku próbek

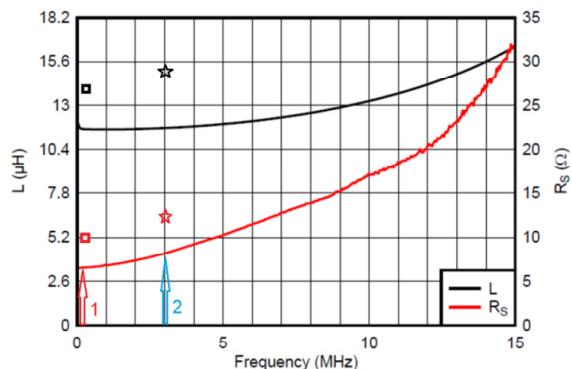
Korelacje wyników pomiarowych pomiędzy próbkami są wiarygodne dopiero po uwzględnieniu obydwu parametrów R_s i L_s . Na wynik pomiaru składa się wypadkowy efekt: pocienienie próbki, zwężenie jej szerokości, łączna zmiana przekroju części środkowej i przyrost grubości warstwy tlenków. Prowadząc analizę konkretnego typu materiału i warunków pracy oraz porównując je z wynikami pomiaru składowych impedancji R_s , L_s można zbudować narzędzie diagnostyczne.

5. Pomiar przetwornikiem LDC1000 z sondą (cewką) pomiarową płaską

Budowę wielowarstwowej sondy pomiarowej pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Przetwornik LDC 1000 i wielowarstwowa sonda (cewka) pomiarowa produkcji TI oraz jej schemat



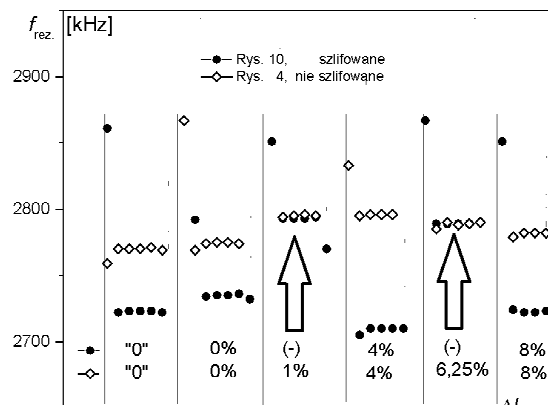
Rys. 9. Charakterystyka sondy pomiarowej

Pomiary przetwornikiem LDC 1000 z sondą, jak na rys.8, wykonano przy ułożeniu próbek, jak na zdjęciu - rys.10. Analizując wyniki pomiarów parametrów L_s i R_s obserwuje się ich zależność od stopnia eksploatacji stali P91 podanej różnym parametrom pełzania.



Rys. 10. Fotografia ułożenia próbek dla pomiaru porównawczego

Pomiary wykonano na grupie próbek pokazanych na rysunku 4 i 10. Wyniki wskazują na możliwość rozróżniania materiału z warstwą tlenku i bez niej oraz na wielkość pełzania. Wyniki zamieszczono na rysunku 11.



Rys. 11. Porównanie częstotliwości rezonansowej dla próbek z rysunków 4 i 10

Metoda jest bardzo czuła, wykonując pomiar na jednej próbce zauważono wpływ na wynik pomiarów, próbek leżących obok. W czasie pomiaru należy zatem separować próbki od siebie, aby wyeliminować wpływ innych próbek na wynik pomiaru.

Podsumowanie

Diagnostyka urządzeń, wykonanych ze stali martenzytycznej P91 (XCrMoVNb9-1 DIN), pracujących w wysokich temperaturach i pod dużym ciśnieniem, jest tematem bardzo ważnym. Ciągłe poszukuje się metod diagnostycznych, wiarygodnych oraz nieniszczących i możliwie prostych w realizacji. W artykule przedstawiono dwie metody pomiarowe bazujące na mostku RLC z cewką pomiarową (sondą) płaską oraz przetworniku LDC 1000 z tą samą sondą (cewką) płaską. Sondę przykładano do powierzchni badanego elementu. Badania są porównywane w stosunku do nieobciążonej próbki wzorcowej „0” wykonanej z tego samego materiału. Wyniki badań wykonane na 5 próbkach o różnym stopniu wyeksploatowania i porównane z wynikami wykonanymi na próbce „0”, potwierdziły użyteczność obu zaprezentowanych metod diagnostycznych. Obie metody pozwalają na szybkie rozróżnianie stanu zużycia badanego materiału. Serię pomiarów diagnostycznych przedstawioną w artykule należy uważać za wstępną, rokującą jednak nadzieję na szerokie jej wdrożenie do badań diagnostycznych oceniających stopień zużycia eksploatacyjnego materiału. Badania należy kontynuować w celu porównania zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej ze stopniem zużycia eksploatacyjnego materiału. Zależności te uzyskamy

analizując wyniki pomiaru składowych impedancji R_s i L_s . Dokładności pomiaru prowadzone mostkiem pomiarowym RLC lub przetwornikiem pomiarowym LDC 1000 dla zastosowań materiałowych są porównywalne. W porównaniu cenowym przetwornika pomiarowego LDC z mostkiem RLC przewaga leży w jego wyższej rozdzielczości pomiarowej. Przewaga obu metod nad metodami ogólnie dostępnymi w NDT wynika z obniżenia kosztu badań o dwa rzędy wartości.

Dominik Kukla, IPPT PAN
Tomasz Jasiński, EthosEnergy Poland S.A.
Adresy e-mail:
zbigniew.zurek@polsl.pl
dkukla@ippt.pan.pl
tomasz.jasinski@ethosenergygroup.pl

Literatura

- [1]. Mohammad A. Omari, Igor Sevostianov,: "Evaluation of the growth of dislocations density in fatigue loading", LETTERS IN FRACTURE AND MICROMECHANICS, International Journal of Fracture (2013), 179:229–235, DOI 10.1007/s10704-012-9780-5 (gęstość dyslokacji)
- [2]. M. Zergoug, G. Kamel, N. Boucherou,: "Mechanical Stress Analysis By Eddy Current Method", The Journal of American Science, 4(4), 2008, ISSN 1545-1003 (zmiana impedancji)
- [3]. André Yashan,: „Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren“, Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften Universität des Saarlandes, 2008
- [4]. Peter B. Nagy, Electromagnetic NDE, University of Cincinnati, Ohio 45221, USA and UK Research Centre in NDE Imperial College London, SW7 2AZ, UK, March 2011
- [5]. Peng Xu,: "Eddy Current Testing Probe Composed of Double Uneven Step Distributing Coils for Crack Detection", A dissertation, By M. E., Harbin Institute of Technology, China, 2005 B. E., Harbin Institute of Technology, China, 2003, September 2008
- [6]. Zbigniew Hilary Żurek, Bogusław Łazarz, Mirosław Witoś, Bernd Rockstroh,: "Hochpräzise, induktive digitale Wandler LDC 1000 zur Erfassung von Ermüdungen des Radsatzstahls", July 2015, DOI: 10.13140/RG.2.1.4264.0489
- [7]. Zbigniew Hilary Żurek, Gerd Dobmann, Bernd Rockstroh, Dominik Kukla,: "Examination of service life of power system components made of p91 steel (X10CrMoVNb9-1) using impedance magnetic resonance technique", WCNDT Non-Destructive Testing 2016 Munch Germany,
- [8]. 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,

Autorzy

Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska
Wydział Transportu