

Badanie relacji między stanem wyężenia a parametrami impedancji niskoczęstotliwościowej

The study of the relationship between the material effort and the low-frequency parameters

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań własnych oraz wybrane dane literaturowe dotyczące identyfikacji stanu wyężenia materiału przy pomocy niskoczęstotliwościowej impedancji elektromagnetycznej. Przedstawiono motywację badań i podstawy teoretyczne metody. Zwrócono uwagę na niejawną, nieliniowy związek istniejący pomiędzy parametrami mechanicznymi i elektromagnetycznymi materiału a stanem jego wyężenia. Omówiono tor pomiarowy używany w badaniach. Omawianą tematykę zobrazowano przykładami. Na podstawie wyników badań wykazano możliwość stosowania taniego mostka LCR do wiarygodnego diagnozowania stanu wyężenia materiału.

Słowa kluczowe: przewodnik; stan wyężenia; NDT; CM; SHM; impedancja

Abstract

The results of research and selected literature data concerning the identification of the state of material effort with using low-frequency electromagnetic impedance have been presented in the article. Motivation of research and theoretical foundations of the method are presented. Attention has been paid to implicit non-linear relationship between the mechanical and electro-magnetic properties of material and the effort of the state. Measuring circuit used in research has been presented. Discussed topics illustrated samples. Based on the result of studies it demonstrated the possibility of using low-cost LCR bridge to reliably diagnose the state of material effort.

Keywords: conductive material; state effort of; NDT; CM; SHM, impedance

Wstęp

Metody elektromagnetyczne, które są stosowane w badaniach nieniszczących i systemach monitorowania konstrukcji, bazują na pośredniej ocenie właściwości elektrycznych i magnetycznych badanego materiału:

- konduktywności elektrycznej $\sigma = J/E$, która odwzorowuje relację między gęstością prądu elektrycznego J w materiale z natężeniem pola elektrycznego E powodującego przepływ tego prądu;
- przenikalności elektrycznej $\varepsilon = D/E$, która charakteryzuje zdolność materiału do zmiany indukcji pola elektrycznego D przy zmianie natężenia pola elektrycznego E ;
- przenikalności magnetycznej $\mu = B/H$, która określa zdolność materiału do zmiany indukcji magnetycznej B przy zmianie natężenia pola magnetycznego H .

Ideę badań elektromagnetycznych mającą na celu kontrolę parametrów fizycznych materiału, niejawnie skorelowanych ze składem chemicznym, strukturą i parametrami mechanicznymi oraz stanem wyężenia i technicznym obiektem [1÷5], w sposób poglądowy przedstawiono na rysunku 1.

W artykule przybliżono zagadnienie identyfikacji symptomów diagnostycznych monitorowania stanu wyężenia materiału przy pomocy niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji. Szczególnym jej przypadkiem jest defektoskopia

metodą prądów wirowych (jedno-, dwu-, wieloczęstotliwościowa) [1,6].

Motywacja

Bezpieczna eksploatacja maszyn i urządzeń wymaga okresowego wykonywania badań nieniszczących i/lub monitorowania warunków pracy krytycznych elementów. Podczas badań diagnostycznych wymagane jest wysokie prawdopodobieństwo detekcji danego zagadnienia badawczego (ang. *Probability of Detection*, POD) przy pomocy wybranej metody badawczej, co jest uwarunkowane od:

- znajomości oczekiwanych symptomów diagnostycznych,
- jakości toru pomiarowego,
- algorytmów analizy numerycznej sygnału i ekstrakcji symptomów diagnostycznych,
- poprawności zdefiniowanych kryteriów diagnostycznych,
- umiejętności praktycznych i wiedzy teoretycznej posiadanej przez operatora.

Spełnienie wymagania wysokiego POD w badaniach elektromagnetycznych przekłada się na:

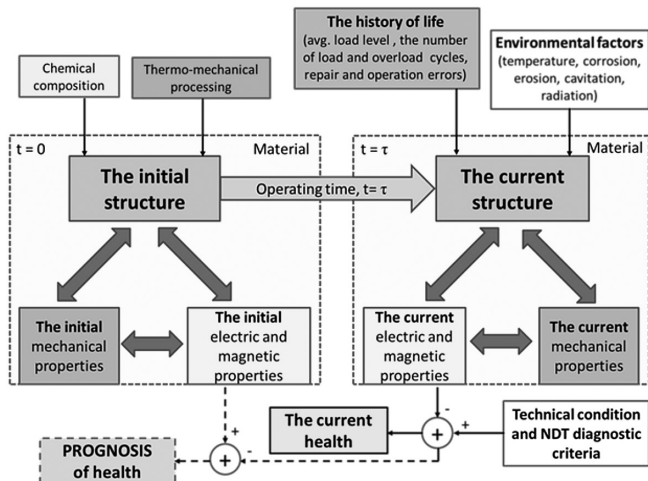
Dr hab. inż. Maciej Roskosz; mgr inż. Krzysztof Fryczowski – Politechnika Śląska Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, dr inż. Mirosław Witoś - Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyk.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: maciej.roskosz@polsl.pl

- właściwy dobór pasma częstotliwości sygnału testującego, w których będą występowały wyraźne zmiany charakterystyk parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału (w ogólnym przypadku tensorów zespolonych drugiego rzędu):

$$\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) + j\sigma_2(\omega), \varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + j\varepsilon_2(\omega), \mu(\omega) = \mu_1(\omega) + j\mu_2(\omega) \quad (1)$$

- dobór odpowiedniej metody i aparatury pomiarowej (w tym typu sond) oraz używanie zweryfikowanych algorytmów analizy danych przez przeszkolonego użytkownika.



Rys. 1. Idea badań elektromagnetycznych materiału nowego i z eksploatacji [5]

Fig. 1. The idea of electromagnetic testing of the material (new and in-service) [5]

Charakterystyki częstotliwościowe $\sigma(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$, $\mu(\omega)$, i są różne dla różnych materiałów konstrukcyjnych, typu mikrostruktury i obróbki cieplno-mechanicznej, co jest świadomie wykorzystywane w systemach automatycznej kontroli jakości produkcji bazujących m.in. na metodzie wieloczęstotliwościowych prądów wirowych (PMFT, ang. Preventive Multi-Frequency Test) i analizie harmonicznych [1,6]. Dobór częstotliwości testujących w metodzie PMFT – tablica 1, uwzględnia właściwości materiału (paramagnetyk, miękki i twardy ferromagnetyk, itp.), cel badań i parametry metrologiczne toru pomiarowego.

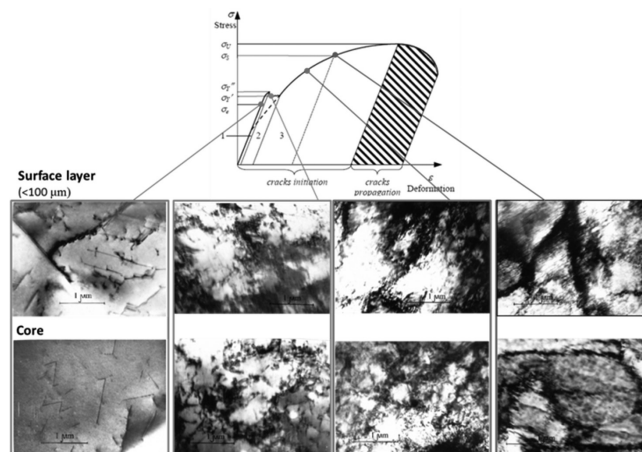
Charakterystyki częstotliwościowe parametrów fizycznych materiału ulegają również zmianie pod wpływem:

- degradacji eksploatacyjnej (wzrostu gęstości dyslokacji, zmian ilościowych fazy podstawowej struktury, wydzieleniu

węglików i pojawieniu się mikro- i makropęknięć) [12,13] – rysunek 2,

- zmian stanu wyęczenia materiału i parametrów warstwy wierzchniej [7-9] i rysunek 2,
- zmian temperatury materiału,
- zmian natężenia zewnętrznego pola magnetycznego (materiały ferromagnetyczne).
- co jest wykorzystywane w badaniach nieniszczących (NDT), systemach monitorowania parametrów pracy (CM) i systemach monitorowania stanu technicznego (SHM).

Dane z tabeli I oraz informacje zamieszczone w różnych ogólnodostępnych raportach i artykułach, bez dodatkowej informacji o parametrach cewki i dopasowaniu jej impedancji do parametrów fizycznych badanego obiektu, oraz ogólna wiedza z elektromagnetyzmu są niewystarczająca do opracowania wiarygodnych kryteriów diagnostycznych. Wymagana jest weryfikacja rozproszonej wiedzy i symptomów diagnostycznych.



Rys. 2. Różnica gęstości dyslokacji w warstwie wierzchniej i rdzeniu próbki podczas quasi-statycznego rozciągania [10]

Fig. 2. The difference in dislocation density in the surface layer and the core of sample during quasi-static tension [10]

Podstawy teoretyczne metody impedancji

Właściwości elektryczne i magnetyczne materiałów przewodzących prąd elektryczny są modelowane jako rzeczywisty induktor - obwód równoległy LCR o 5 elementach (R_p , C , R_σ , L , R_i) i impedancji Z_m [5]. Między parametrami elektromagnetycznymi badanego materiału i elementami zastępczego

Tablica I. Typowe częstotliwości sygnału testującego stosowane w metodzie PMFT do kontroli jakości materiału i gotowych wyrobów [1]

Table I. The typical frequency of the test signal used in PMFT method to control the quality of the material and finished products [1]

Zagadnienie badawcze	Pasma [Hz]	F ₁ [Hz]	F ₂ [Hz]	F ₃ [Hz]	F ₄ [Hz]	F ₅ [Hz]	F ₆ [Hz]	F ₇ [Hz]	F ₈ [Hz]
Materiały ferromagnetyczny	25-100000	25	160	800	2500	6400	16000	40000	100000
Stopy austenityczne	100-100000	100	230	860	2500	6400	16000	40000	100000
Stopy nieferromagnetyczne	100-100000	100	240	600	1500	5000	15000	40000	100000
Materiały twarde	50-60000	50	120	430	860	3200	12000	30000	60000
Odpuszczanie	25-25000	25	80	250	630	1600	4000	10000	25000
Hartowanie powierzchniowe	100-25000	100	250	500	1000	2500	5000	11000	25000

obwodu LCR zachodzą związki: $\sigma \propto R^{-1}$, $\varepsilon \propto C$, $\mu \propto L$. Biezące parametry materiału i stan jego wyłączenia są odwzorowane w charakterystyce częstotliwościowej impedancji $Z_m(\omega)$, którą można kontrolować bezdotykowo przy pomocy cewki zasilanej napięciem zmiennym $u(\omega, t)$. Cewka, przez którą płynie prąd elektryczny $i(\omega, t)$, jest źródłem lokalnego strumienia magnetycznego $\Phi(\omega, t) = \Phi_g(\omega, t) + \Phi_s(\omega, t)$ (strumienia głównego i strumienia rozproszenia) i pola magnetycznego $B(\omega, t)$. Gdy cewka znajduje się w pobliżu badanego elementu i nie jest galwanicznie z nim połączona, to główny strumień magnetyczny $\Phi_g(\omega, t)$ przenika przez badany materiał indukując w materiale siłę elektromotoryczną $e(\omega, t)$ i prądy wirowe $i_{EC}(t)$. Ich widmo i rozkład przestrzenny są zależne od:

- właściwości elektrycznych i magnetycznych badanego materiału, w tym impedancji powierzchniowej i impedancji warstwy wierzchniej materiału - parametrów silnie zmieniających się pod wpływem naprężeń;
- parametrów sprzężenia cewki z badanym elementem - indukcyjności wzajemnej M ,
- częstotliwości sygnału testującego.

Prądy wirowe zmieniają rozkład dotychczasowego pola magnetycznego w materiale i w jego pobliżu, co można wykryć przy pomocy czułego magnetometru lub pomiaru zmian impedancji cewki testującej $\Delta Z_s = Z_{s,m} - Z_{s,0}$ - zmian impedancji obwodu pierwotnego wirtualnego transformatora [2,3], w którym dodano indukcyjność ΔL i rezystancję ΔR odwzorowującą:

- nieznanne parametry badanego materiału (obwodu wtórnego transformatora),
- sprzężenia magnetyczne (indukcyjne) sondy z badanym materiałem.

Dla danej częstotliwości testującej f i jednorodnego materiału, gęstość prądów wirowych na głębokości x od powierzchni badanego elementu maleje wykładniczo [2], co opisuje relacja

$$J_x = J_0 e^{-x(\pi f \mu_0 \mu_r \sigma)^{0.5}} \quad (2)$$

gdzie J_0 jest gęstością prądów powierzchniowych, μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni (wartość skalarna $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H/m] = 12.566370614 \dots [Vs/A]$, μ_r jest względna przenikalnością magnetyczną materiału, σ jest konduktywnością elektryczną materiału [S/m].

Dla materiałów niejednorodnych, np. rdzenia z warstwą wierzchnią wytworzoną przez naprężenia o większej gęstości dyslokacji - rysunek 2, rozkład gęstości prądów wirowych J_x będzie odbiegał od rozkładu teoretycznego opisanego zależnością (2). Poziom niejednorodności właściwości elektrycznych i magnetycznych materiału można identyfikować na podstawie lokalnych zmian charakterystyk $\sigma(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$, $\mu(\omega)$, i względem charakterystyk wzorcowych dla danego materiału, wykonując pomiary dla różnych częstotliwości sygnału testującego. Powyższe spostrzeżenie zostało wykorzystane przez Autorów do monitorowania naprężeń.

Głębokość wnikania prądów wirowych do materiału określa zakres stosowania metody impedancji niskoczęstotliwościowej i wykładnię interpretacji wyników pomiarów. Standardowa głębokość penetracji δ jednorodnego materiału przez prądy wirowe jest zdefiniowana jako punkt, w którym gęstość prądu elektrycznego zmniejsza się o współczynnik $1/e \approx 36,8\%$, co opisuje relacja (3). Czym mniejsza jest częstotliwość sygnału testującego tym głębsza jest penetracja materiału przez prądy wirowe. Praktyczna głębokość badania materiału z wykorzystaniem prądów wirowych nie przekracza 3δ .

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (3)$$

Impedancja elektryczna

Biezące parametry sondy pomiarowej (obwodu pierwotnego wirtualnego transformatora zawierającego dwie równoległe gałęzie: cewki o indukcyjności L i rezystancji R oraz pojemności toru pomiarowego C) są odwzorowane przez impedancję elektryczną opisana relacją:

$$Z(\omega) = \frac{u(\omega, t)}{i(\omega, t)} = |Z| e^{-j\varphi} = R + jX \quad (4)$$

gdzie $|Z| = |Z|(\omega)$ jest modułem impedancji ($|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$); $\varphi = \varphi(\omega)$ jest przesunięciem fazowym między napięciem a natężeniem prądu elektrycznego; $R = R(\omega)$ jest rezystancją (oporem czynnym), która odpowiada za prąd płynący w fazie z napięciem i moc czynną; $X = X(\omega)$ jest reaktancją (oporem biernym), która odpowiada za prąd przesunięty względem napięcia o $\pm 90^\circ$ i moc bierną; $\omega = 2\pi f$ jest częstością kołową; j jest jednostką urojoną liczby zespolonej ($j^2 = -1$).

Współczynnik sprzężenia

Sprzężenie magnetyczne sondy z badanym materiałem (układ dwóch cewek sprzężonych indukcyjnie) jest opisany przez trzy główne parametry:

- indukcyjności własne obydwu cewek (L_1 - o znanej wartości, L_2 - identyfikowanej);
- indukcyjności wzajemnej M .

Indukcyjność wzajemną cewki sondy z wirtualną cewką badanego materiału M_{12} nazywamy stosunek strumienia głównego wytworzonego w cewce sondy i skojarzonego z nieznaną indukcyjnością badanego materiału do prądu płynącego w cewce sondy.

$$M_{12} = N_2 \frac{\Phi_{1g}}{i_1} \quad (5)$$

Analogicznie dla wirtualnej cewki badanego materiału

$$M_{21} = N_1 \frac{\Phi_{2g}}{i_2} \quad (6)$$

Z podstawowych praw elektromagnetyzmu wynika, że dla ośrodka izotropowego (sprzężenie cewki z badanym materiałem poprzez powietrze) zachodzi relacja

$$M = M_{12} = M_{21} = \sqrt{L_{1g} \cdot L_{2g}} \quad (7)$$

Indukcyjność wzajemna jest średnią geometryczną obu indukcyjności głównych.

Wyznaczenie indukcyjności wzajemnej M umożliwia określenie wartości współczynnik sprzężenia k sondy z badanym materiałem. Zgodnie z definicją, współczynnik sprzężenia

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \sqrt{\frac{L_{1g} L_{2g}}{L_1 L_2}} \quad (8)$$

jest wielkością bezwymiarową w zakresie $k \in \langle 0; 1 \rangle$, której wartość zależy od kształtu geometrycznego cewek (sondy i wirtualnej cewki badanego obiektu), ich liczby zwojów (dla materiału: impedancji powierzchniowej i jednorodności elektromagnetycznej), a ponadto od wzajemnego usytuowania sondy względem powierzchni badanego obiektu, które ma wpływ na podział całkowitego strumienia magnetycznego na strumień główny i strumień rozproszenia. Dla cewki bez wpływu badanego materiału $k = 0$.

Impedancja sondy bez i z wpływem badanego materiału

Impedancja cewki powietrznej bez oddziaływania badanego materiału i pojemności toru pomiarowego jest opisana relacją:

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (9)$$

Impedancja cewki powietrznej z oddziaływaniem badanego materiału jest opisana relacją:

$$Z_{eq} = Z_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R_e + j\omega L_e} = \left(R_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R_e^2 + (\omega L_e)^2} R_e \right) + j\omega \left(L_0 - \frac{\omega^2 M^2}{R_e^2 + (\omega L_e)^2} L_e \right) \quad (10)$$

gdzie R_e i L_e są ekwiwalentną rezystancją i indukcyjnością pętli prądów wirowych na powierzchni badanego materiału. Równanie (10) po uwzględnieniu zależności (8) można przekształcić do postaci:

$$Z_{eq} = \left(R_0 + \frac{R_e \frac{L_0}{L_e} k^2}{1 + \left(\frac{R_e}{\omega L_e} \right)^2} \right) + j\omega L_0 \left(1 - \frac{k^2}{1 + \left(\frac{R_e}{\omega L_e} \right)^2} \right) \quad (11)$$

Gdy częstotliwość sygnału testującego jest na tyle wysoka, że dla badanego materiału spełniony jest warunek $R_e \ll \omega L_e$, to impedancję z równania (11) można zapisać w postaci uproszczonej:

$$Z_{eq} \approx \left(R_0 + R_e \frac{L_0}{L_e} k^2 \right) + j\omega L_0 (1 - k^2) \quad (12)$$

Dla pomiarów wysokoczęstotliwościowych rezystancja i indukcyjność cewki z oddziaływaniem badanego materiału są opisane relacjami:

$$R_{eq} \approx \left(R_0 + R_e \frac{L_0}{L_e} k^2 \right) \quad L_{eq} \approx L_0 (1 - k^2) \quad (13)$$

z których wynika:

- potrzeba optymalizacji indukcyjności cewki do przenikalności magnetycznej badanego materiału i dominujący wpływ współczynnika sprzężenia na zmiany rezystancji R_{eq} ;
- pomijalny wpływ konduktywności badanego materiału i dominujący wpływ współczynnika sprzężenia na zmiany indukcyjności L_{eq} .

Jeżeli współczynnik sprzężenia k będzie ulegać zmianie pod wpływem nieznanymi naprężeń czy zmiany wymiarów próbki (współczynnika wypełnienia cewki podczas odkształceń plastycznych), to zmianie ulegać będą równocześnie R_{eq} i L_{eq} .

Dla pomiarów niskoczęstotliwościowych, dla których obowiązuje relacja (11), istnieje dodatkowy nieliniowy wpływ konduktywności i przenikalności magnetycznej materiału na składową rzeczywistą i urojoną mierzonej impedancji.

Badania eksperymentalne

W celu wyznaczenia rzeczywistych możliwości monitorowania stanu wyęczenia elementu metodą niskoczęstotliwościowej impedancji wykonano badania laboratoryjne. W badaniach stosowano:

- walcową cewkę powietrzną o indukcyjności 4.246 mH i rezystancji 10.460Ω dla $f = 100$ Hz;
- podręczny automatyczny mostek LCR typ DT-9935 firmy CEM, z wymuszeniem sinusoidalnym i częstotliwościami testującymi: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz;
- moduł ewaluacyjny z precyzyjnym przetwornikiem impedancji AD5933EVM firmy Analog Device, który umożliwia automatyczny pomiar impedancji w paśmie od 0.1 Hz do 100 kHz z klasą dokładności nie gorszą niż 0.2.

Tablica II. Skład chemiczny badanego materiału (dane katalogowe) [11]

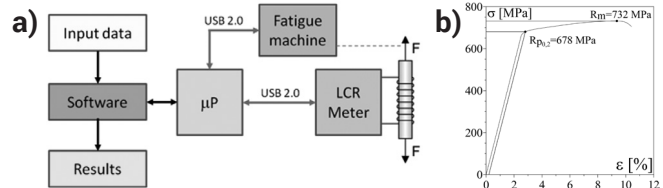
Table II. The chemical composition of the test material (catalog data) [11]

Skład	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Co	Fe
Wagowo %	0.04	0.4	5.0	19.0	67.0	1.5	0.5	2.0	0.08	3.0

Autorzy zweryfikowali poprawność stosowanej metodologii badawczej i jakość uzyskiwanych wyników przy pomocy laboratoryjnego mostka LCR typ IM3532-50 firmy Hioki, zapewniającego klasą dokładności nie gorszą niż 0.08 [5,9].

Eksperyment czynny

Badania laboratoryjne wykonano na próbkach walcowych o średnicy 4 mm, o stabilnej strukturze austenitycznej, wykonanych ze stopu niklowo-chromowego – tablica II, na których zamontowana była cewka pomiarowa. Próbkę były rozciągane na maszynie zmęczeniowej sterowanej komputerowo. Podczas próby schodkowej próbka znajdowała się cały czas pod obciążeniem, którego wartość była zwiększana skokowo co 50 MPa. Dla kolejnych poziomów obciążenia wykonano pomiary impedancji dla 5 częstotliwości testujących. Na rysunku 3 zobrazowano strukturę toru pomiarowego i wyznaczoną krzywą rozciągania materiału.

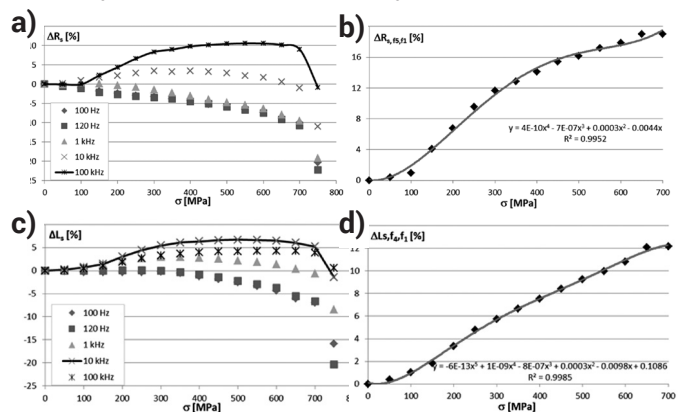


Rys. 3. Zobrazowano: a) schemat blokowo toru pomiarowego; b) krzywą rozciągania badanego materiału - rdzenia elektrody BÖHLER FOX NIBAS 70/20

Fig. 3. Showing: a) schematic diagram of measurement; b) stress-strain curve of the tested material - core of BÖHLER FOX NIBAS 70/20 welding electrode

Wyniki badań

Wyniki pomiarów poddano analizie numerycznej z uwzględnieniem danych referencyjnych wykonanych dla pustej cewki ($k=0$) oraz cewki z badanym materiałem przy zerowym obciążeniu – tablica III. Przykładowe charakterystyki wpływu naprężeń badanego materiału na mierzone parametry cewki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zobrazowano wpływ naprężeń rozciągających próbkę na względną zmianę parametrów sondy: a) rezystancji; b) różnicy rezystancji dla $f_1 = 100$ Hz i $f_5 = 100$ kHz; c) indukcyjności; d) różnicy indukcyjności dla $f_1 = 100$ Hz i $f_4 = 10$ kHz

Fig. 4. Illustrated the effect of tensile stress on the sample relative change in the probe parameters: a) the resistance; b) the difference of resistance for $f_1 = 100$ Hz and $f_5 = 100$ kHz; c) the inductance; d) the difference of inductance for $f_1 = 100$ Hz and $f_4 = 10$ kHz

Dostrzega się, że wraz z zwiększaniem poziomu naprężeń rozciągających zmienia się rezystancja i indukcyjność cewki sprężniętej magnetycznie z badanym materiałem paramagnetycznym, przy czym wartość i trend zmian są zależne od częstotliwości testującej. W zakresie odkształceń sprężystych wartości ΔR_s i ΔL_s maleją dla częstotliwości 100 Hz i 120 Hz, natomiast dla 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz rosną. W efekcie wzrasta różnica rezystancji i indukcyjności wyznaczona dla różnych częstotliwości testujących, ujawniając narastającą niejednorodność elektromagnetyczną warstwy wierzchniej i rdzenia próbki (szybszy wzrost gę-

stości dyslokacji w warstwie wierzchniej). Dla stosowanej cewki maksymalne wartości $\Delta R_s(f_i, f_j)$ są obserwowane dla 100 Hz i 100 kHz, natomiast maksymalne wartości $\Delta L_s(f_i, f_j)$ dla 100 Hz i 10 kHz. W analizie nie uwzględniono zmiany współczynnika wypełnienia cewki spowodowanej odkształceniem plastycznym próbki, mającego wpływ na otrzymywane wyniki pomiarów. Wyniki pomiarów dla stopu paramagnetycznego były powtarzalne, a oszacowana dokładność pomiaru naprężeń była nie gorsza od 2% dla danych pomiarowych uzyskanych przy pomocy taniego podręcznego mostkiem LCR z klasą dokładności 2.5.

Tablica III. Typowe częstotliwości sygnału testującego stosowane w metodzie PMFT do kontroli jakości materiału i gotowych wyrobów [1]
Table III. The typical frequency of the test signal used in PMFT method to control the quality of the material and finished products [1]

Częstotliwość	Cewka bez rdzenia (długość Cu, $d_{in} = 4.0$ mm)				Cewka z rdzeniem (DUT: stop Ni-Cr, $l = 150$ mm, $d = 4.0$ mm, $\sigma = 0$ MPa-próbka zamontowana w uchwytach maszyny)			
	R_{s0}	L_{s0}	$ Z_0 $	φ_0	R	L	$ Z $	ϕ
Hz	Ω	mH	Ω	Rad	Ω	mH	Ω	rad
100	10.460	4.246	10.795	0.250	16.260	36.630	28.180	0.956
120	10.460	4.226	10.935	0.296	17.770	35.660	32.229	0.987
1000	10.487	4.237	28.613	1.196	68.500	19.020	137.229	1.050
10000	12.498	4.237	266.512	1.524	282.100	9.368	652.718	1.124
100000	245.80	4.592	2895.69	1.486	1410.6	5.916	3975.785	1.208

Uwaga: Wyniki uśrednienia z 10 pomiarów.

Wnioski

Wykazano eksperymentalnie, że pomiary niskoczęstotliwościowej impedancji elektrycznej cewki sprężniętej magnetycznie z badanym materiałem paramagnetycznym umożliwiają wiarygodne monitorowanie stanu jego wyężenia w zakresie odkształceń sprężystych. W analizowanym przypadku nie uwzględniono wpływu modyfikacji współczynnika sprężenia k spowodowanego zmianą przekroju próbki na wyniki pomiarów. Wpływ ten zostanie przeanalizowany w zaplanowanych pracach badawczych.

Różnicowe charakterystyki wpływu naprężeń na parametry impedancji elektrycznej sondy są skorelowane z niejednorodnością parametrów elektrycznych i magnetycznych warstwy wierzchniej materiału i rdzenia.

Pomiar impedancji elektrycznej sondy wykonany dla kilku częstotliwości minimalizuje negatywny wpływ sprężania sondy z badanym materiałem (ang. lift-off) i ułatwia interpretację wyników.

Poprzez aproksymowanie wyników uzyskanych dla 5 częstotliwości z podręcznego mostka LCR można również wyznaczyć optymalne częstotliwości do monitorowania stanu wyężenia materiału, nie mierzone bezpośrednio.

Literatura

- [1] <http://www.ibgndt.com>.
- [2] C.V. Dodd et al.; „Some eddy-current problems and their integral solutions”; ORNL-4384 raport for U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tennessee, 1969.
- [3] Z. H. Żurek, P. Duka; „RLC circuits for material testing and NDT” KOMEL, 2014.
- [4] B. A. Abu-Nabah et al.; „Eddy current residual stress profiling in surface-treated engine alloys”; Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 24, Nos. 1–2, s. 209–232, 2009.
- [5] Z. H. Żurek, M. Witoś; „Diagnostics of Degradative Changes in Paramagnetic Alloys with the Use of Low Frequency Impedance Spectroscopy”; 7th International Symposium on NDT in Aerospace, 2015.
- [6] J. Gao, M. Pan, F. Luo; „Defect Identification and Classification of Multi-Frequency Eddy Current Test Based on Spectrum Method”; IEEE International Conference on Information and Automation, 2010.
- [7] W. R. Junker, W. G. Clark Jr.; „Eddy current characterization of applied and residual stresses”; Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2B ed. Thompson and Chimenti. Plenum Press, New York, s. 1269-1286, 1983.
- [8] Ji-Gou Liu, Wolf-Jürgen Becker; „Force and Stress Measurements with Eddy Current Sensors”, The 10. International Sensor fairs and Conference, May 8-10, Nuremberg, Germany, vol. II, s. 23-28, 2001.
- [9] K. Fryczowski, M. Roskosz, Z. H. Żurek; „Preliminary Studies on Impact of Tensile Loads on the Parameters of the RLC Circuit”; 44th National conference NDT, 2015; Welding Technology Review, 2015, 87, s. 45-49.
- [10] J. Vilysa, V. Kvedarasb; „Dislocation Structure of Near Surface Layers of Deformed Low-carbon Steel”; 15th Int. Metallurgical & Material Conference METAL 2006.
- [11] „Welding Guide. Technical Handbook of BÖHLER WELDING Products”, Böhler Welding, 2009.
- [12] Krysztófik J., Kukła D., So-cha G.; Ocena stopnia uszkodzenia stopu Inconel 718 z zastosowaniem prądów wirowych, Przegląd Spawalnictwa, Vol 87, No 12 (2015).
- [13] Kukła D., Grzywna P., Karczewski R.; Ocena rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego na podstawie zmian odkształcenia i parametrów prądowirycznych w kolejnych cyklach obciążenia, Przegląd Spawalnictwa, Vol 86, No 5 (2014).