

Mirosław WITOŚ, Maciej ROSKOSZ, Krzysztof FRYCZOWSKI

## BEZDOTYKOWY POMIAR NAPRĘŻEŃ METODĄ ELEKTROMAGNETYCZNĄ

*W artykule omówiono podstawy teoretyczne metody niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji elektromagnetycznej i możliwości jej zastosowania w diagnozowaniu materiałów ferro- i paramagnetycznych używanych w transporcie. Główną uwagę skupiono na bezdotykowym pomiarze naprężeń z wykorzystaniem taniego toru pomiarowego, np. podręcznego automatycznego miernika LCR, czy zintegrowanego przetwornika LDC1000. Omawianą tematykę zobrazowano wynikami z badań laboratoryjnych. Wykazano, że opisywana metoda może być stosowana w badaniach nieniszczących i systemach monitorowania konstrukcji.*

### WSTĘP

Bezpieczna eksploatacja maszyn i urządzeń wymaga okresowego kontrolowania stanu technicznego elementów krytycznych konstrukcji, przy pomocy różnych metod badań nieniszczących (NDT, ang. *Non-Destructive Testing*) [1]. Coraz częściej stosowane jest również monitorowanie stanu technicznego (SHM, ang. *Structural Health Monitoring*), które w trybie on-line udostępnia użytkownikowi informację o postępującej degradacji materiału [2]. Dane z NDT i SHM w połączeniu z informacją o ogólnych parametrach pracy obiektu (CM, ang. *Condition Monitoring*) są wiarygodną podstawą do [2 - 4]:

- zarządzania ryzykiem stanów awaryjnych i planowania obsługi technicznych (PHM, ang. *Prognostics and Health Management*);
- eksploatacji według stanu technicznego (CBM, ang. *Condition Based Maintenance*);
- aktywnego sterowania procesem zmęczenia materiału.

W uznanych metodach NDT i SHM wykorzystuje się zweryfikowane relacje pomiędzy stanem struktury materiału, mierzonymi parametrami fizycznymi oraz symptomami diagnostycznymi.

Impedancja elektryczna, elektromagnetyczna i akustyczna materiałów (przewodników i izolatorów) jest silnie zależna od:

- widma sygnału testującego,
- składu chemicznego materiału,
- typu i jakości mikrostruktury (jakości obróbki cieplno-mechanicznej, rozmiaru i kształtu ziaren, gęstości defektów struktury),
- historii obciążeń eksploatacyjnych, odwzorowanej m.in. przez zmianę rozkładu gęstości dyslokacji, naprężeń własnych i naprężeń eksploatacyjnych w materiale,
- temperatury materiału.

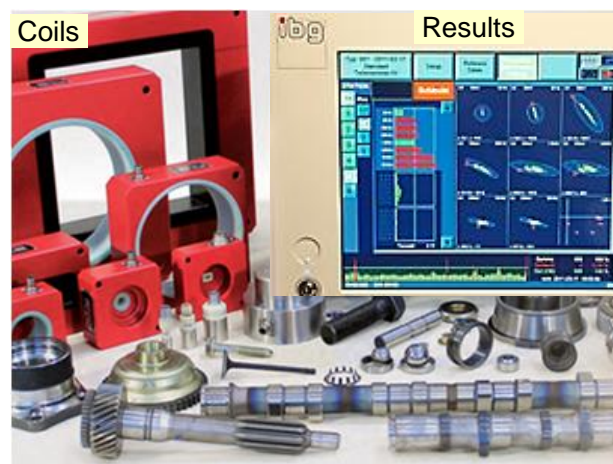
Powyższe niejawnie relacje są szeroko wykorzystywane w badaniach NDT i systemach SHM. Impedancja akustyczna jest używana w badaniach ultradźwiękowych i metodzie emisji akustycznej, natomiast impedancja elektryczna i elektromagnetyczna w różnych metodach NDT bazujących na prądach wirowych indukowanych w badanym materiale [1, 5].

Prądy wirowe wykorzystywane są w kilku zasadniczych sektorach przemysłowych: lotnictwie, przemyśle maszynowym, przemyśle hutniczym, badaniu wymienników ciepła oraz badaniu spoin [6-11]. Metoda wieloczęstotliwościowych prądów wirowych (niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji, LFIS) jest stosowana m.in. do automatycznej kontroli jakości produkcji w przemyśle samochodowym [12]. Zastosowanie przelotowej cewki, kilku częstotli-

wości testujących w paśmie od 5 Hz do 400 kHz oraz analiza zmierzonej impedancji i wyższych harmonik sygnału testującego umożliwia m.in.:

- ocenę typu materiału i jakości mikrostruktury, w tym warstw dyfuzyjnych (sortowanie materiału, kontrola jakości produkcji),
- bezdotykowego monitorowania stanu naprężeń własnych (kontrola jakości produkcji) i eksploatacyjnych,
- diagnozowania wczesnej fazy degradacji materiału.

Podstawy teoretyczne i metodyki badawcze LFIS zostały „zaszyte” w torze pomiarowym i oprogramowaniu profesjonalnej aparatury pomiarowej. Podczas badań użytkownik otrzymuje czytelną informację o różnicy właściwości elektromagnetycznych badanego obiektu względem wzorca (warunków technicznych, WT) – rys 1.



**Rys. 1.** Zobrazowano cewki powietrzne, obiekty badań i wynik pomiarów dla 8 częstotliwości testujących (kolor czerwony – parametr poza WT dla danej częstotliwości testującej; elipsa – obszar WT wyznaczony eksperymentalnie z pomiarów wzorca dla danej częstotliwości testującej) [12]

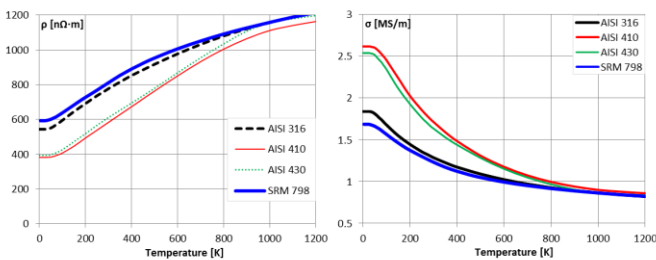
W artykule przybliżono podstawy teoretyczne metody LFIS i jej zastosowanie do identyfikacji przewodników (m.in. para- i ferromagnetycznych stopów na bazie żelaza, niklu i tytanu) przy pomocy taniej aparatury pomiarowej. Omawianą tematykę zobrazowano przykładami z badań laboratoryjnych (prób quasi- statycznego rozciągania). Uzyskane wyniki badań potwierdziły możliwości funkcjonalne niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji opisywane w literaturze (m.in. [5,7-9,12]), w tym możliwość bezdotykowego monitorowania stanu wyęczenia materiału.

## 1. PODSTAWY TEORETYCZNE

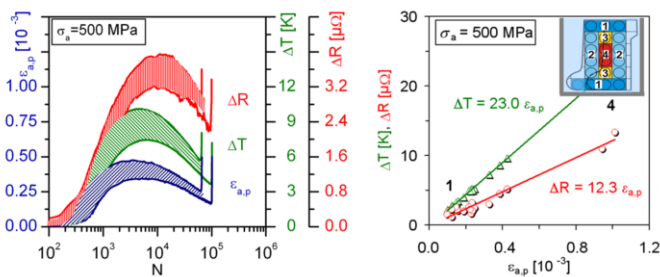
W metodzie LFSI kontrolowane są pośrednio właściwości elektryczne i magnetyczne badanego materiału [5]:

- konduktywność elektryczna (przewodność właściwa),  $\sigma$ ,
- podatność elektryczna,  $\varepsilon$ ,
- przenikalność magnetyczna,  $\mu$ ,

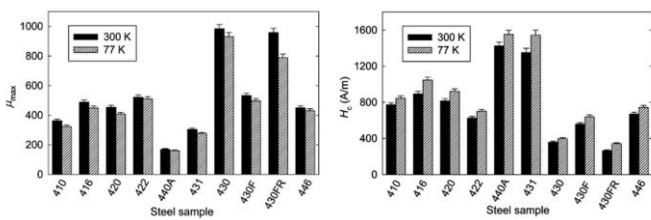
Parametry opisujące wpływ badanego materiału na zewnętrzne pole elektromagnetyczne generowane w cewce pomiarowej, które indukuje w materiale prądy wirowe (ruch elektronów w metalu i ich stopach, wymianę elektronów powłoki  $s$  i  $d$ ) i zmianę polaryzacji spinów (w ferromagnetykach). Gęstość i rozkład przestrzenny prądów wirowych są zależne m.in. od składu chemicznego, typu i parametrów mikrostruktury (w tym gęstości i typu defektów) oraz poziomu naprężeń pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$ ,  $\sigma_{III}$  (odpowiednio w skali: makro - naprężeń międzystrefowych; mikro - naprężeń wewnątrz ziaren lub na granicy przyległych ziaren; nano - naprężeń wewnątrz obszarów nie przekraczających kilku komórek elementarnych sieci krystalicznej) [13]. Właściwości elektromagnetyczne materiału są również zależne od znanej częstotliwości sygnału testującego i temperatury materiału – rys. 2. Elektron-y odpowiedzialne za przepływ prądu elektrycznego i właściwości magnetyczne materiału biorą również udział w przewodzeniu ciepła. Symptomy diagnostyczne opisujące jakość i typ mikrostruktury, na podstawie bieżącej wartości rezystywności  $\rho$  czy konduktywności materiału  $\sigma$ , są najbardziej czule w bardzo niskich temperaturach. W warunkach otoczenia sporadycznie używanych w NDT.



a)



b)



c)

**Rys. 2.** Wpływ: a) temperatury i typu mikrostruktury stali nierdzewnych na rezystywność i konduktywność [14]; b) cyklicznego obciążenia próbki ferrytyczno-perlitycznej ze stali SAE1065 na odkształcenie, temperaturę i rezystancję materiału [15]; c) temperatury na właściwości magnetyczne stali nierdzewnych [16]

### 1.1. Model matematyczny materiału

W ogólnym przypadku, parametry  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  i  $\mu$  są opisane przez zespolone tensory drugiego rzędu (zespolone macierze o rozmiarze 3x3), których elementy odwzorowują własności kierunkowe badanego materiału. Dla materiału izotropowego (jednorodnego kierunkowo)  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  i  $\mu$  są wyrażone przez zespolone skalary, które mogą być przedstawione jako zespolone macierze diagonalne o rozmiarze 3x3. Elementy leżące na głównej przekątnej mają jednakową wartość  $\sigma_{ii} = \sigma$ ,  $\varepsilon_{ii} = \varepsilon$ ,  $\mu_{ii} = \mu$ , a pozostałe są zerowe. Konduktywność elektryczną metali opisuje model Drudego-Sommerfelda [17].

### 1.2. Idea badań LFIS

Pod wpływem naprężeń i postępującej degradacji struktury zwiększa się poziom niejednorodności i anizotropowości materiału, w tym gęstość dyslokacji [18-20]. W wyniku istniejącego sprzężenia parametrów mikrostruktury z właściwościami elektromagnetycznymi, zmianie ulegają również wartości elementów macierzy  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  i  $\mu$ . Zmiany parametrów elektromagnetycznych materiału mogą być wykrywane pośrednio poprzez pomiar impedancji elektrycznej sondy pomiarowej  $Z_p$  indukcyjnie sprzęgniętej z badanym materiałem [5, 21-23].

$$Z_p(\omega) = Z_0(\omega) + \Delta Z(\omega) \quad (1)$$

Składowa  $Z_0$  odwzorowuje impedancję elektryczną cewki powietrznej bez wpływu badanego materiału. Wynika ona z indukcyjności cewki  $L$  i rezystancji szeregowej  $R_s$  sondy. Składowa  $\Delta Z$  odwzorowuje nieliniowy, wypadkowy wpływ:

- sprzężania indukcyjnego cewki pomiarowej z badanym obiektem (obwodem wtórnym wirtualnego transformatora),  $k$ ;
- impedancję badanego materiału,  $Z_m$ , modelowaną dla przewodników przez równoległy obwód zastępczy LCR rzeczywistego induktora [22], którego admitancję opisuje relacja

$$Y_{LCR} = \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_L + j\omega L} + \frac{1}{R_c - j\frac{1}{\omega C}} \quad (2)$$

Pomiędzy elementami obwodu zastępczego LCR i monitorowanymi parametrami elektromagnetycznymi materiału zachodzą relacje proporcjonalności:

$$R \propto \frac{1}{\sigma} \quad (3a)$$

$$C \propto \varepsilon \quad (3b)$$

$$L \propto \mu \quad (3c)$$

Obserwowane zmiany impedancji  $\Delta Z$  są jednoznacznie skorelowane z nieznanymi właściwościami badanego materiału, gdy pomiary wykonano przy:

- stałej odległości cewki od powierzchni badanego obiektu, z dala od krawędzi (min. w odległości 3 średnic cewki) lub
- stałym współczynnikiem wypełnienia cewki przelotowej rdzeniem z badanego materiału.

Powyzsze kryterium nie jest zachowane przy pomiarach naprężeń za pomocą cewki przelotowej, która otacza badany element (opisanych w dalszej części artykułu). Pod wpływem naprężeń rozciągających zmniejsza się:

- pole przekroju badanej próbki (rdzenia cewki),
- współczynnik wypełnienia cewki,
- współczynnik sprzężenia cewki z badanym materiałem,
- stosunek sygnału/szumu (SNR),

Nawet niewielkie zmiany geometrii próbki (rzędu  $\mu m$ ), występujące w zakresie odkształceń sprężystych i w początkowej fazie odkształceń plastycznych, będą generowały wyraźną zmianę impe-

dancji sondy. Ta cecha metrologiczna metody (duża rozdzielczość pomiaru odległości lub powierzchni) jest świadomie wykorzystana w wiroprowodowych czujnikach zbliżeniowych. Zmiany impedancji sondy wynikające z bieżącej geometrii próbki muszą być uwzględnione w algorytmach analizy danych z bezdotykowego pomiaru naprężeń i kryteriach diagnostycznych.

### 1.3. Pomiar impedancji sondy

Pomiary impedancji sondy pomiarowej bazują na definicji impedancji elektrycznej [5], którą opisuje wzór (4).

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

Sygnały  $u(\omega, t)$  i  $i(\omega, t)$  są napięciem i prądem elektrycznym mierzonym na wejściu sondy. W klasycznych aplikacjach używane jest wymuszenie sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości kołowej  $\omega$ . Pomiedzy napięciem i prądem elektrycznym występuje przesunięcie fazowe  $\varphi$  wynikające z oddziaływania reaktancji indukcyjnej  $X_L$ . Dla małych częstotliwości pomijalny jest wpływ reaktancji pojemnościowej cewki  $X_C$  sondy i toru pomiarowego. Spotykane jest również wymuszenie falą prostokątną o różnym współczynniku wypełnienia (metoda PEC, ang. Pulsed Eddy-Current), które zapewnia głębszą penetrację badanego materiału przez prądy wirowe [23]. W celu poprawy poziomu SNR dla bardzo niskich częstotliwości testujących, w metodzie PEC i LFIS stosowane są hybrydowe sondy: cewka nadawcza i magnetometr w torze odbiorczym [24-26].

### 1.4. Zobrazowanie i analiza wyników pomiaru

Po uwzględnieniu (1) i (4) mierzona impedancja elektryczna sondy pomiarowej z wpływem badanego materiału (z pominięciem ( $\omega$ ) przy zmiennych z (4)) można zapisać w postaci

$$Z_p = (R_s + \Delta R) + j(X_L + \Delta X) \quad (5a)$$

$$Z_p = |Z_0 + \Delta Z| e^{-j(\varphi_0 + \Delta\varphi)} \quad (5b)$$

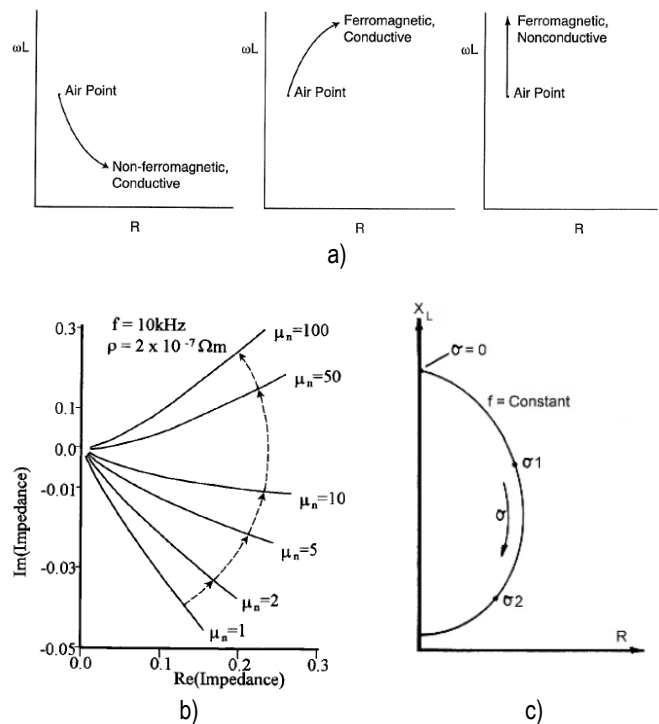
Wynik pomiaru impedancji jest wektorem opisanym przez dwie zmienne, które mogą być zobrazowane na płaszczyźnie impedancji. W układzie współrzędnych kartezjańskich (5a) sprzężenie indukcyjne z badanym materiałem wywołuje zmianę rezystancji i reaktancji sondy – rys. 3. W układzie współrzędnych biegunowych (5b) występuje zmiana wartości modułu impedancji i kąta fazowego. Oczekiwany wpływ częstotliwości testujących na zmiany wartości impedancji sondy zobrazowano na rys. 4. Trend jest podobny do zmian impedancji wyznaczonych dla różnych konduktywności materiału przy stałej częstotliwości testującej, stosowanej w klasycznej metodzie NDT prądów wirowych.

Zmiany impedancji  $\Delta Z$  są najczęściej analizowane na płaszczyźnie unormowanej impedancji – rys. 5. Charakterystykę częstotliwościową unormowanej impedancji można aproksymować wielomianem (6) w szerokim zakresie częstotliwości.

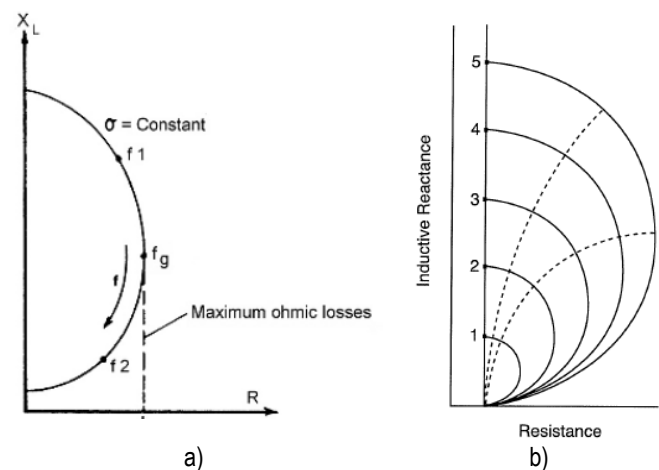
$$\frac{R - R_0}{\omega L_0} = \sum_{i=0}^m a_i \left( \frac{L}{L_0} \right)^i \quad (6)$$

W efekcie możliwe jest:

- ograniczenie liczby częstotliwości testujących w celu wyznaczenia przybliżonych charakterystyk częstotliwościowych impedancji i jej składowych. Przykładowo, gdy używa się podręcznego, automatycznego mostka LCR to pomiary są wykonywane tylko na 5 częstotliwościach: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz;
- analizowanie wartości współczynników wielomianu (6) zamiast przebiegu graficznego charakterystyki impedancji, co upraszcza algorytm automatycznej analizy danych pomiarowych.



**Rys. 3.** Zmiana wartości impedancji sondy pod wpływem [27-29]: a) sprzężenia indukcyjnego sondy z badanym materiałem: paramagnetycznym przewodnikiem, ferromagnetycznym przewodnikiem i ferromagnetycznym izolatorem (air point – impedancja sondy bez wpływu badanego materiału); b) zmiany wartości przenikalności magnetycznej badanego materiału (linia ciągła) przy stałej odległości sondy od obiektu (linia przerywana) i częstotliwości testującej; c) zmiany wartości konduktywności materiału przy stałej częstotliwości testującej.

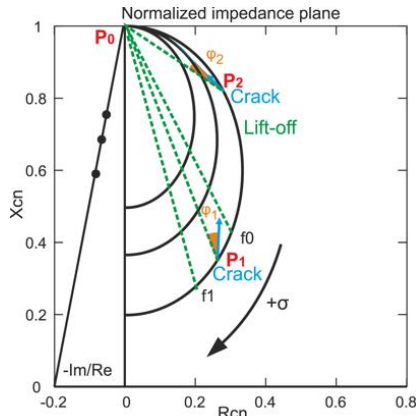


**Rys. 4.** Wpływ zmian częstotliwości testującej na impedancję sondy dla [27-29]: a) stałej konduktywności materiału paramagnetycznego; b) zmiennej konduktywności materiału paramagnetycznego.

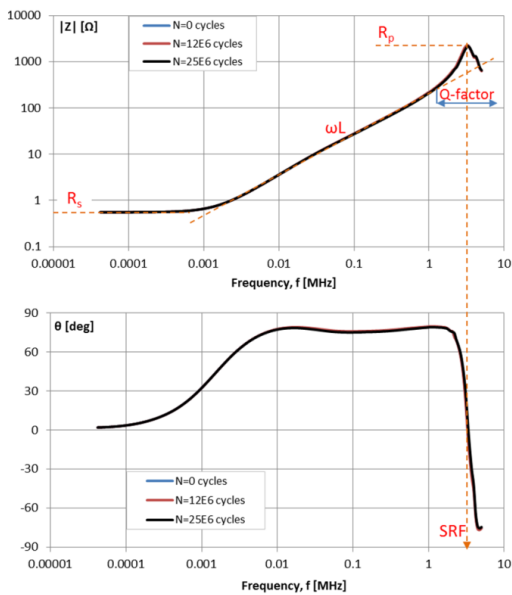
Zobrazowanie wyników pomiarów na płaszczyźnie impedancji (przed i po unormowaniu danych) nie zawiera jawnej informacji o częstotliwości sygnału testującego, co utrudnia identyfikację kryteriów diagnostycznych w metodzie LFIS. Do ich identyfikacji stosowane jest zobrazowanie charakterystyk częstotliwościowych poszczególnych składowych – rys. 6). Analizując zobrazowane dane dostrzega się, że zmiany impedancji w szerokim paśmie częstotliwości są wielokrotnie większe niż wpływ zmian struktury materiału na impedancję - krzywe na rys. 6 pozornie pokrywają się. Największe różnice występują w zakresie oddziaływania częstotliwości

rezonansowej sondy – rys. 7. W celu wzmocnienia bardzo słabych symptomów diagnostycznych, w metodzie LFIS używana jest charakterystyka częstotliwościowa różnicy impedancji  $\Delta Z_r$ , wyznaczana względem impedancji wzorca badanego elementu  $Z_{WT}$  a nie impedancji  $Z_0$  pustej cewki, co opisuje wzór (7)

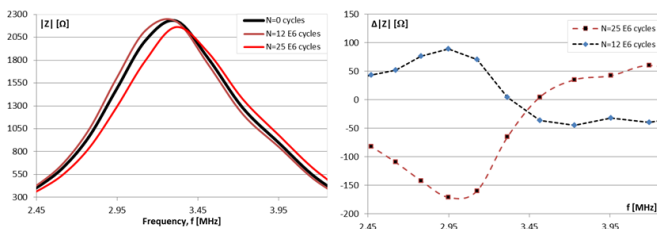
$$\Delta Z_r(\omega) = Z_p(\omega) - Z_{WT}(\omega) \quad (7)$$



**Rys. 5.** Zobrazowanie sygnałów na unormowanej płaszczyźnie impedancji dla badań materiału paramagnetycznego [30]



**Rys. 6.** Charakterystyka częstotliwościowa modułu impedancji i kąta fazowego dla materiału paramagnetycznego o różnym poziomie degradacji [22]



**Rys. 7.** Wpływ poziomu degradacji struktury materiału z rys. 6 na zmiany: a) parametrów zakresu rezonansu równoległego sondy; b) kąta fazowego impedancji różnicowej [22]

### 1.5. Kryteria diagnostyczne

Na podstawie kilkukrotnego pomiaru impedancji pustej cewki i cewki z wzorcem badanego obiektu wyznacza się wartości średnie

i odchylenia standardowe składowych impedancji ( $R$ ,  $X_L$ ,  $|Z|$ ,  $\varphi$ ) dla poszczególnych częstotliwości testujących i danej sondy. Obliczone parametry statystyczne uwzględniają wpływ:

- parametrów toru pomiarowego (typ i rozmiar sondy, czułość i rozdzielczość toru pomiarowego, poziom zakłóceń),
- powtarzalności pomiarów (wpływ operatora, wpływ zakłóceń),
- temperatury materiału.

Na ich podstawie określone są dopuszczalne wartości składowych impedancji ( $R_{min}$ ,  $R_{max}$ ,  $X_{Lmin}$ ,  $X_{Lmax}$ ,  $|Z|_{min}$ ,  $|Z|_{max}$ ,  $\varphi_{min}$ ,  $\varphi_{max}$ ) i kryteria diagnostyczne, w postaci elips o różnym kącie pochylenia i długości osi dla każdej częstotliwości testującej (widoczne na rys. 1). Użytkownik określa tylko kryterium dopuszczalnego obszaru elipsy w postaci współczynnika krotności odchylenia standardowego składowych impedancji,  $K_\sigma$ . Czym wyższa jest wartość  $K_\sigma$  tym większy jest dopuszczalny rozrzut właściwości elektromagnetycznych badanego materiału uznany za zgodny z warunkami technicznymi.

## 2. UWAGI METODYCZNE

Na etapie opracowania metodyki badawczej, doboru częstotliwości testujących, wyznaczania kryteriów diagnostycznych i interpretacji wyników badań należy pamiętać o:

- relacjach opisujących moduł impedancji (8) i kąt fazowy (9)

$$|Z_p| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) \quad (9)$$

- oczekiwanych właściwościach elektromagnetycznych badanego materiału, oszacowanych na podstawie danych katalogowych lub informacji z międzynarodowych bazach danych materiałowych. Dla ferromagnetyków należy pamiętać dodatkowo o nieliniowej zależności  $\mu(H)$  przenikalności magnetycznej materiału od natężenia pola magnetycznego.
- optymalnym dopasowaniu rozmiarów cewki przelotowej do gabarytów badanego elementu. Zalecenia zawiera norma PN-EN ISO 10893-2:2011;
- dopasowaniu impedancji sondy  $Z_0$  do impedancji powierzchniowej badanego materiału;
- wpływie impedancji powierzchniowej materiału na ilość energii pola magnetycznego wnikażącej do materiału i oczekiwanego poziomu sygnału (dobór amplitudy sygnału testującego i czułości toru pomiarowego);
- wpływie naprężeń na gęstość dyslokacji i rozkład przestrzenny dyslokacji w badanym materiale;
- oczekiwanym, wykładniczym rozkładzie prądów wirowych w głąb materiału, mającym wpływ na głębokość wykrywania wad struktury. Parametrem odniesienia jest standardowa głębokość wnikań prądów wirowych dla materiału izotropowego [5, 10], opisana wzorem (10).

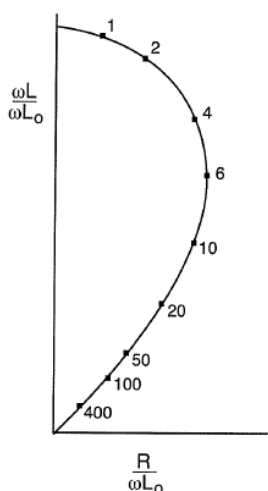
$$\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (10)$$

- wpływie parametrów elektromagnetycznych materiału i średnicy wewnętrznej  $D$  cewki przelotowej na częstotliwość graniczną  $f_g$  i wyniki badań. Dla długiej próbki walcowej umieszczonej w cewce przelotowej częstotliwość graniczna jest opisana wzorem (11), w którym  $f_g$  [kHz],  $\mu_r$  i  $\sigma$  są odpowiednio względną przenikalnością magnetyczną i konduktywnością rdzenia cewki (wartości ekwiwalentne uwzględniająca współczynnik wypełnienia cewki przez badany materiał).

$$f_g = \frac{5.066}{\mu_r \sigma D^2} \quad (11)$$

Standardowa głębokość wnikania to głębokość, na której natężenie pola magnetycznego lub natężenia wzbudzanych prądów wirowych przez wymuszenie sinusoidalne jest tłumione do 1/e (37%) wartości na górnej powierzchni próbki. Wzór (10) jest obowiązujący wyłącznie w przypadku płyty płaskiej o nieskończonej grubości pobudzonej przez falę płaską.

Współczynnik  $ff_g$ , zdefiniowany przez Foerстера dla próbek walcowych badanych w cewce przelotowej, odwzorowuje specyfikę rozkładu prądów wirowych w materiale oraz wypadkowy wpływ czułości, penetracji i rozdzielczości symptomów diagnostycznych. Współczynnik nawiązuje do teorii podobieństwa – jeżeli warunki badań prądami wirowymi uwzględniają wartości  $ff_g$  dla dwóch różnych obiektów badań, to oczekiwane rezultaty będą takie same dla obu obiektów. Dla materiałów paramagnetycznych narastające wartości współczynnik  $ff_g$  przemieszczają się na krzywej impedancji zgodnie z ruchem wskazówek zegara – rys. 8. Częstotliwość graniczna  $f_g$  rozdziela dwa zakresy krzywej impedancji. Gdy  $0 < f < f_g$  to zwiększenie częstotliwości testującej zwiększa straty związane z unormowaną rezystancją sondy. Gdy  $f > f_g$  wzrost częstotliwości testującej zmniejsza straty związane z unormowaną rezystancją sondy.



**Rys. 8.** Wpływ wartości współczynnika  $ff_g$  na krzywej impedancji długiej próbki walcowej badanej w cewce przelotowej [28]

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu wyznaczenia rzeczywistych możliwości monitorowania stanu wyczerpania elementu metodą LFIS wykonano badania laboratoryjne.

#### 3.1. Tor pomiarowy

Do wyznaczania niskoczęstotliwościowych charakterystyk impedancji sondy bez i z wpływem badanego materiału stosowano:

- walcową cewkę powietrzną o indukcyjności 4.246 mH i rezystancji 10.460  $\Omega$ ;
- podręczne automatyczne mostki LCR typ DT-9935 firmy CEM i UT-612 firmy Uni-T, z wymuszeniem sinusoidalnym i częstotliwościami testującymi: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz;
- moduł ewaluacyjny EVAL-AD5933EBZ firmy Analog Device, który umożliwia automatyczny pomiar charakterystyk częstotliwościowych impedancji (do 511 częstotliwości w jednym cyklu badań) w paśmie od 0,1 Hz do 100 kHz z klasą dokładności nie gorszą niż 0,2.

Autorzy zweryfikowali poprawność stosowanej metodologii badawczej i jakość uzyskiwanych wyników przy pomocy laboratoryjnego mostka LCR typ IM3532-50 firmy Hioki [22, 23]. Przyrząd zapewnia klasą dokładności nie gorszą niż 0,08.

Na kolejnym etapie badań – identyfikacji wpływu naprężeń rozciągających na impedancję powierzchniową materiału ferromagnetycznego – zastosowano moduł ewaluacyjny LDC100EVM firmy Texas Instrument, zawierający obwód rezonansowy LC (płaską cewkę przelotową PCB i znaną pojemność) o częstotliwości rezonansowej ok. 3,6 MHz. Przetwornik wyznacza parametry obwodu równoległego LCR w stanach dynamicznych:

- częstotliwość rezonansową  $f_{rez}$  z 24-bitową rozdzielczością,
- impedancję  $R_p$  obwodu równoległego LCR z 16-bitową rozdzielczością,

Możliwości metrologiczne przetwornika LDC1000 do badania materiałów paramagnetycznych Autorzy zweryfikowali w wcześniejszych badaniach [22].

#### 3.2. Obiekt badań

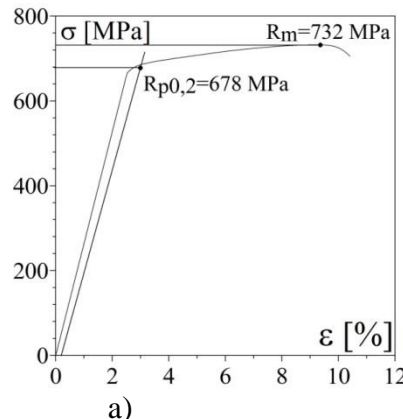
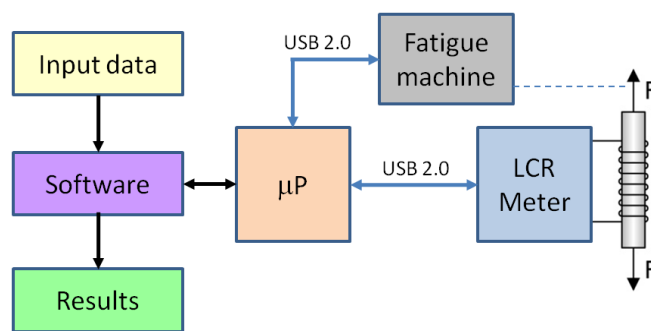
Badania laboratoryjne wykonano na próbkach walcowych o średnicy 4 mm, wykonanych z ferromagnetycznego stopu niklowo-chromowego o nieznannej mikrostrukturze (ang. *black-box testing*) – tab. 1.

**Tab. 1.** Skład chemiczny badanego materiału [31]

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

#### 3.3. Metodyka badań

Badania wykonano z wykorzystaniem cewek przelotowych. Próbkę były rozciągane na maszynie zmęczeniowej sterowanej komputerowo. Strukturę toru pomiarowego i przykładowy wynik naprężeń od odkształceń zobrazowano na rys. 9.



**Rys. 9.** Zobrazowano: a) schemat blokowy toru pomiarowego; b) krzywą rozciągania badanego materiału

W pierwszym etapie badań, podczas próby schodkowej, próbki znajdowały się cały czas pod obciążeniem, którego wartość była zwiększana skokowo co 50 MPa. Dla kolejnych poziomów obciążenia wykonano pomiary impedancji mostkami LCR dla 5 częstotliwości testujących.

W kolejnym etapie badań próbki były rozciągane ze stałą prędkością 1 mm/min. Pomiary impedancji były wykonywane w sposób ciągły przy pomocy modułu LCD1000EVM.

## 4. WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki pomiarów poddano analizie numerycznej z uwzględnieniem danych referencyjnych wykonanych dla pustej cewki oraz cewki z badanym materiałem przy zerowym obciążeniu.

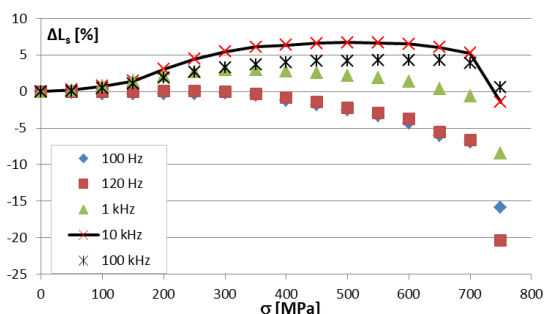
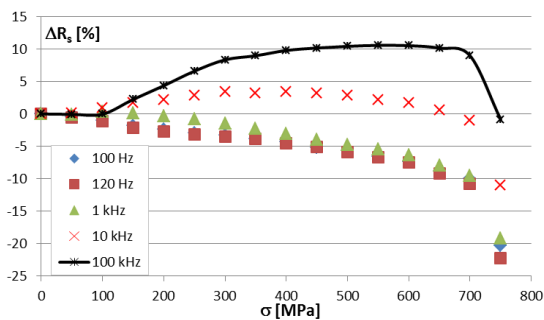
### 4.1. Wpływ naprężeń na charakterystykę częstotliwościową impedancji

Przykładowe wyniki badań z prób schodkowych przedstawiono w tab. 2 i na rys. 10.

**Tab. 2. Uśrednione wyniki pomiaru impedancji mostkiem LCR**

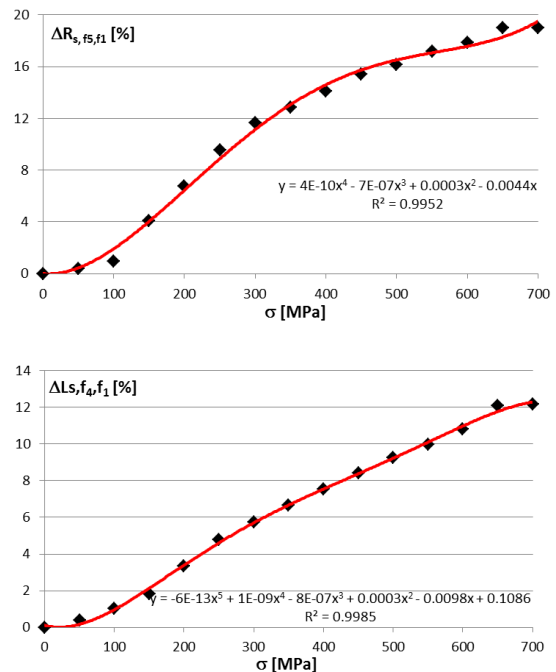
Częstotliwość $f$ [Hz]	Cewka bez rdzenia (druć Cu, $d_{in} = 4.0$ mm)			
	$R_{s0}$ [ $\Omega$ ]	$L_{s0}$ [mH]	$ Z_0 $ [ $\Omega$ ]	$\varphi_0$ [rad]
100	10,460	4,246	10,795	0,250
120	10,460	4,226	10,935	0,296
1000	10,487	4,237	28,613	1,196
10000	12,498	4,237	266,512	1,524
100000	245,80	4,592	2895,69	1,486
Częstotliwość $f$ [Hz]	Cewka z rdzeniem (stop Ni-Cr, $l = 150$ mm, $d = 4.0$ mm) zamontowanym w maszynie, $\sigma = 0$ MPa			
	$R$ [ $\Omega$ ]	$L$ [mH]	$ Z $ [ $\Omega$ ]	$\varphi$ [rad]
100	16,260	36,630	28,180	0,956
120	17,770	35,660	32,229	0,987
1000	68,500	19,020	137,229	1,050
10000	282,100	9,368	652,718	1,124
100000	1410,600	5,916	3975,785	1,208

Uwaga: wynik uśrednienia z 10 pomiarów

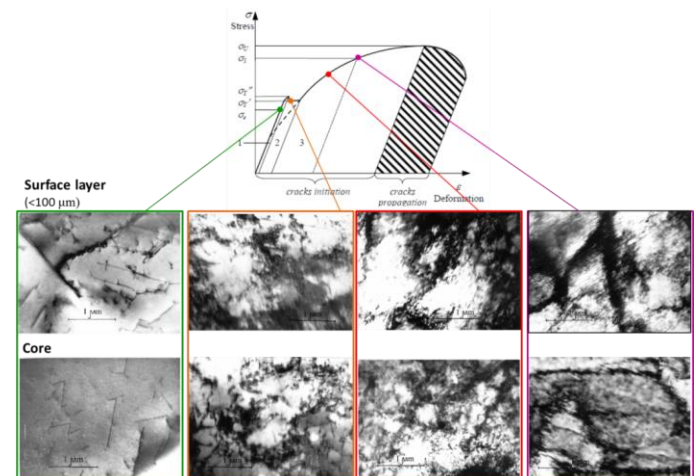


**Rys. 10. Wpływ rozciągania ferromagnetycznego rdzenia na względne zmiany rezystancji i indukcyjności cewki**

Wraz z zwiększaniem poziomu naprężeń rozciągających zmienia się nieliniowo rezystancja i indukcyjność cewki sprzęgniętej indukcyjnie z badanym materiałem ferromagnetycznym. Wartość i trend zmian są zależne od częstotliwości testującej. W zakresie odkształceń sprężystych wartości  $\Delta R_s$  i  $\Delta L_s$  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 – rys. 11, która ujawnia narastającą niejednorodność elektromagnetyczną warstwy wierzchniej (przypowierzchniowej) względem rdzenia próbki opisywaną w literaturze – rys. 12. Podczas quasi-statycznego rozciągania szybszy wzrost gęstości dyslokacji występuje w warstwie przypowierzchniowej. Maksymalne wartości  $\Delta R_s(f, f)$  są obserwowane dla częstotliwości 100 Hz i 100 kHz, natomiast maksymalne wartości  $\Delta L_s(f, f)$  dla 100 Hz i 10 kHz.



**Rys. 11. Wpływ rozciągania ferromagnetycznego rdzenia na różnicowe zmiany rezystancji i indukcyjności cewki wyznaczone dla dwóch częstotliwości testujących (dane wejściowe z rys. 10)**



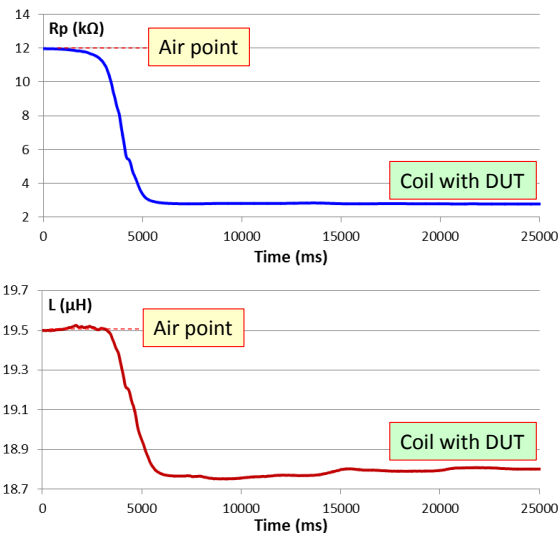
**Rys. 12. Różnica gęstości dyslokacji w warstwie wierzchniej i rdzeniu próbki podczas quasi-statycznego rozciągania [19]**

Uzyskiwane wyniki pomiarów są powtarzalne. Oszacowana dokładność pomiaru naprężeń była nie gorsza od 2% dla danych

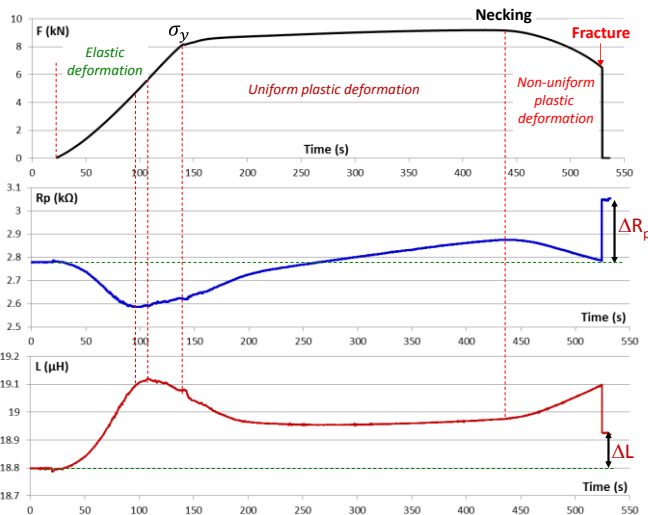
uzyskanych przy pomocy taniego podręcznego mostka LCR z klasą dokładności 2,5. Wyznaczone symptomy diagnostyczne mają większą czułość i SNR niż symptomy metody szumu Barkhausena i metody magnetycznej pamięci metalu [32, 33]. Mniej pracochłonna jest również analiza danych pomiarowych, co jest szczególnie istotne w systemach SHM.

## 4.2. Wpływ naprężeń na impedancję powierzchniową

Przykładowe wyniki pomiaru zmiany impedancji powierzchniowej, zarejestrowane przy pomocy modułu ewaluacyjnego LDC1000EVM i wpływie ziemskiego pola magnetycznego, przedstawiono na rys. 13 i 14.



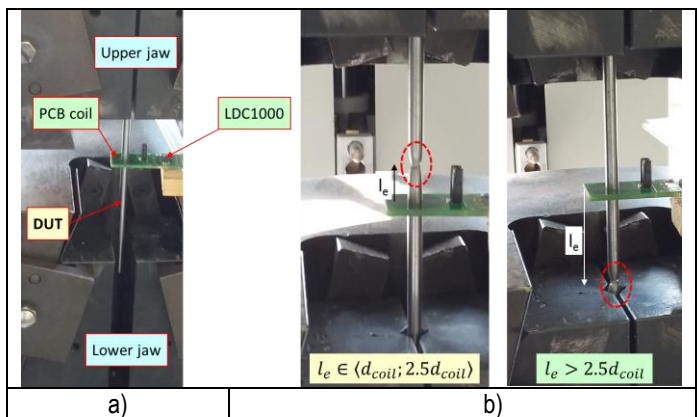
**Rys. 13.** Zmiana rezystancji i indukcyjności obwodu równoległego LCR sondy podczas wprowadzania próbki (rdzenia) – obiektu badań (DUT, ang. Device Under Testing) – do cewki [34]



**Rys. 14.** Wpływ rozciągania ferromagnetycznego rdzenia na parametry impedancji powierzchniowej rdzenia (przed korektą wpływu zmian pola przekroju próbki) przy pomijalnym wpływie szyjki w końcowej fazie uplastycznienia i zerwania (szyjka w odległości ponad 2,5 średnicy zewnętrznej cewki) [34]

Na rys. 13 dostrzega się bardzo silny, oczekiwany wpływ badanego rdzenia na  $R_p$  (impedancję równoległego obwodu LCR w rezonansie,  $X = 0$ ) i  $L$  cewki. Oba mierzone parametry zmniejszają swoją wartość podczas wsuwania rdzenia do cewki przelotowej - rys. 15.a). Podczas quasi-statycznego rozciągania próbki – rys. 14, obserwuje się słabsze, nieliniowe zmiany obu parametrów przy

wysokim poziomie SNR w całym zakresie obciążeń i odkształceń. W zakresie odkształceń sprężystych do ok.  $0,55\sigma_y$  umownej granicy plastyczności ( $\sigma_y = R_{0,2}$  dla materiału bez wpływu historii obciążeń) impedancja obwodu równoległego  $R_p$  maleje, a indukcyjność  $L$  rośnie – obserwowane symptomy nie wynikają z zmian pola przekroju rdzenia. W zakresie naprężeń  $(0,55 - 0,8)\sigma_y$  występują lokalne ekstrema  $R_p$  i  $L$  - przy niższej wartości naprężeń dla  $R_p$ . Podczas dalszego rozciągania z równomiernym zmniejszaniem średnicy próbki wzdłuż jej długości aż do chwili pojawia się szyjka przy naprężeniach  $\sigma = \sigma_u$  ( $\sigma_u = R_m$  dla materiału bez wpływu historii obciążeń) wartość impedancji  $R_p$  rośnie, a krzywa  $R_p(t)$  wykazuje przegięcie w początkowej fazie umocnienia na zimno. Wartość indukcyjności  $L$  początkowo maleje, a następnie słabo rośnie. Punkt przegięcia krzywej  $L(t)$  występuje przy podobnym poziomie wyężenia materiału co punkt przegięcia krzywej  $R_p(t)$ . Wraz z pojawieniem się szyjki, nawet poza strefą czułości cewki PCB – rys. 15.b), zmienia się trend obu parametrów. Po zerwaniu próbki (skokowym wymuszeniu) obserwuje się trwałą zmianę wartości obu parametrów  $\Delta R_p$ , i  $\Delta L$ , która nie wynika z bieżącego przekroju próbki (zmiany współczynnika wypełnienia cewki). Zaobserwowany efekt pamięci ferromagnetycznego przewodnika, zarówno dla konduktywności i przenikalności magnetycznej, będzie badany przez Autorów w kolejnych pracach.



**Rys. 15.** Zobrazowano: a) badany element w końcowej fazie wsuwania do cewki (przed zamknięciem dolnego uchwytu) i elementy toru pomiarowego; b) położenie szyjki i urwania próbki w strefie średniego i słabego oddziaływania na impedancję cewki PCB [34].

Rozdzielczość pomiarowa modułu LDC1000EVM może być zwiększona poprzez zastosowanie przetworników TDC, np. TDC7200 firmy Texas Instruments.

## PODSUMOWANIE

Wykazano eksperymentalnie, że metoda niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji umożliwia wiarygodne monitorowanie stanu wyężenia materiału w zakresie odkształceń sprężystych i plastycznych. Obserwowane symptomy diagnostyczne są skorelowane z niejednorodnością warstwy wierzchniej materiału i rdzenia.

Pomiar impedancji sondy wykonany dla kilku częstotliwości testujących zwiększa prawdopodobieństwo poprawnej diagnozy i ułatwia interpretację wyników.

Wiarygodne wyniki pomiaru naprężeń uzyskano przy pomocy przenośnych, automatycznych mostków LCR (koszt aparatury do 1000 zł) oraz modułów ewaluacyjnych EVAL-AD5933EBZ (koszt do 300 zł) i LDC1000EVM (koszt do 150 zł). Ww. aparatura pomiarowa posiada interfejs USB 2.0 i może być składową systemów monitorowania stanu technicznego konstrukcji.

## BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.ndt.net>
2. Witos M., *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*. „Prace Naukowe ITWL” 2011, zeszyt 29, DOI: 10.13140/RG.2.1.4341.4560.
3. Praca zbiorowa, *Active control of engine dynamics*, RTO AVT/VKI Special Course. VKI 2001.
4. Tinga T., *Aligning PHM, SHM and CBM by understanding the physical system failure behaviour*, European Conference on the Prognostics and Health Management Society 2014.
5. *Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques*, 4th Edition, Keysight Technologies 2014, <http://www.keysight.com>.
6. PN-EN ISO 10893-2:2011 *Badania nieniszczące rur stalowych - Część 2: Automatyczne badanie metodą prądów wirowych rur stalowych bez szwu i spawanych (z wyłączeniem rur spawanych łukiem krytym) w celu wykrycia nieciągłości*.
7. Abu-Nabah B. A. et al., *Eddy current residual stress profiling in surface-treated engine alloys*, “Nondestructive Testing and Evaluation” 2009, Vol. 24, Nos. 1–2, p. 209–232.
8. Junker W. R., Clark W. G., Jr., *Eddy current characterization of applied and residual stresses*, in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2B ed. Thompson and Chimenti. Plenum Press, New York, 1983, p. 1269-1286.
9. Liu J-G, Becker W-J, *Force and Stress Measurements with Eddy Current Sensors*, The 10. Int. Sensor Fairs and Conference, May 8-10, 2001, Nuremberg, Germany, vol. II p. 23-28, DOI: 10.13140/2.1.4425.7285.
10. Żurek Z. H., *Badanie stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym*, „Zeszyty Naukowe. Politechnika Śląska” 2005, nr 1678.
11. Gao J., Pan M., Luo F., *Defect Identification and Classification of Multi-Frequency Eddy Current Test Based on Spectrum Method*, Information and Automation (ICIA), 2010 IEEE International Conference on, DOI: 10.1109/ICINFA.2010.5512024. <http://www.ibgndt.com>.
12. Biel M., *Mikrostruktura i właściwości biomateriałów tytanowych po obróbce powierzchniowej*, Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH, Kraków 2006.
13. Ho C.Y., Chu T.K., *Electrical resistivity and thermal conductivity of nine selected AISI stainless steels*. CINDAS Report 45, CINDAS/TEPIAC Publication, September 1977.
14. Eifler D., Smaga M., Klein M., *Fatigue monitoring of metals based on mechanical hysteresis, electromagnetic ultrasonic, electrical resistance and temperature measurements*, “J-STAGE Mechanical Engineering Journal”, DOI: 10.1299/mej.16-00303.
15. Oxley P., Goodell J., Molt R., *Magnetic properties of stainless steels at room and cryogenic temperatures*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2009, nr 321, p. 2107–2114.
16. Abrikosov A. A., *Fundamentals of the Theory of Metals*. North-Holland, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo 1988.
17. Shaniavski A. A., *Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation*, Publishing House of Scientific and Technical Literature “Monography”, Ufa 2007.
18. Vilysa J., V. Kvedaras V., *Dislocation Structure of Near Surface Layers of Deformed Low-carbon Steel*, 15th Int. Metallurgical & Material Conference METAL 2006.
19. Nabarro F. R. N., *Dislocations in a Simple Cubic Lattice*, Proc. Phys. Soc. 1947, 59(2), p. 256-272.
20. Żurek Z. H., *RLC circuits for material testing and NDT*, KOMEL 2015.
21. Żurek Z. H., Witos M., *Diagnostics of Degradative Changes in Paramagnetic Alloys with the Use of Low Frequency Impedance Spectroscopy*, 7th Int. Symposium on NDT in Aerospace, Bremen 2015, We.5.A.7.
22. Fryczowski K., Roskosz M., Żurek Z. H., *Preliminary Studies on Impact of Tensile Loads on the Parameters of the RLC Circuit*, 44th National Conference NDT, 2015; “Welding Technology Review” 2015, Vol. 87, p. 45-49.
23. Johnson M. J., *Pulsed eddy-current measurements for material characterization and flaw detection*, PhD thesis, Department of Physics, The University of Surrey, Surrey (UK) 1997.
24. Rao K. S. et al., *Pulse eddy current technique for testing of stainless steel plates*, in *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVII)*, K. Capova et al. (Eds.), IOS Press 2014, DOI: 10.3233/978-1-61499-407-7-36.
25. Mook G., Hesse O., Uchanin V., *Deep penetrating eddy currents and probes*, ECNDT 2006, Tu.3.6.2, p. 1-14.
26. *Eddy current testing at level 2: Manual for the syllabi contained in IAEA -TeCDoC-628.rev. 2 “Training guidelines for non destructive testing techniques”*, Training Course Series No 48, IAEA, Wiena 2011.
27. [https://www.nde-ed.org/index\\_flash.htm](https://www.nde-ed.org/index_flash.htm)
28. [http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage\\_testing\\_prevention\\_and\\_detection\\_in\\_aeronautics.htm](http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aeronautics.htm).
29. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E., *Non-destructive techniques based on eddy current testing*, „Sensors” 2011, Vol. 11(3), 2525-2565, DOI:10.3390/s110302525.
30. *Welding guide. Technical handbook of BÖHLER WELDING Products*, Böhler Welding 2009.
31. Błachnio J., *Efekt Barkhausena w diagnostyce maszyn. Biblioteka problemów eksploatacji*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom 2009.
32. Roskosz M., *Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia w diagnostyce elementów ferromagnetycznych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
33. Witos M, Roskosz M., Fryczowski K., Żurek Z. H., *NDE & SHM of technical objects using low-cost impedance method*, 21<sup>st</sup> Int. Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, P-20, Lisbon 25-28 Sep. 2016.

### Contactless electromagnetic method for stress measurement

*Paper discussed the basics of the low-frequency electromagnetic impedance spectroscopy method. The main attention is paid to the non-contact measurement of stress-strain using low-cost measurement path. Discussed topics illustrated the results of laboratory tests. It has been shown that the described method can be used in non-destructive testing and structural health monitoring.*

Autorzy:

**dr inż. Mirosław Witoś** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki, E-mail: [witosm@itwl.pl](mailto:witosm@itwl.pl)

**dr hab. inż. Maciej Roskosz** – Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Zakład Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Energetycznych

**mgr inż. Krzysztof Fryczowski** – Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych,