

## KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE METODY SPEKTROSKOPII IMPEDANCJI. CZ. 1 - CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU BADAWCZEGO

### Streszczenie

Przedstawiono problem badawczy i podstawy teoretyczne niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji oraz przesłanki jej zastosowania do diagnozowania paramagnetycznych i ferromagnetycznych stopów używanych w transporcie. Główną uwagę zwrócono na modelowanie metalu i postępującej jego degradacją przy pomocy obwodu zastępczego RLC.

### WSTĘP

Bezpieczna eksploatacja statków powietrznych, pociągów i innych środków transportu wymaga stosowania wiarygodnych metod nieniszczących (ang. *Non-Destructive Testing*, NDT) i monitorowania stanu technicznego (ang. *Structural Health Monitoring*, SHM). Nowoczesna diagnostyka powinna umożliwić detekcję symptomów postępującej degradacji materiału na etapie poprzedzającym otwarte pęknięcie, co jest podstawą wiarygodnego prognozowania i wydłużania horyzontu bezpiecznej eksploatacji nadzorowanego obiektu, bez zbędnego zwiększenia częstości badań kontrolnych. Powyższych oczekiwań nie spełniają klasyczne metody badań nieniszczących (VT, UT, ET, MT i RT) [1], których głównym zadaniem jest ocena bieżącego stanu technicznego struktury, w tym wykrywanie pęknięć oraz dużych wad i niejednorodności struktury. Potencjał ww. metod NDT jest niewykorzystany do detekcji wczesnej fazy zmęczenia materiału, pomimo istnienia przesłanek teoretycznych i możliwości metrologicznych. Wyniki badań nieniszczących są sporadycznie używane również do identyfikacji przyczyn nietypowych zmian zmęczeniowych.

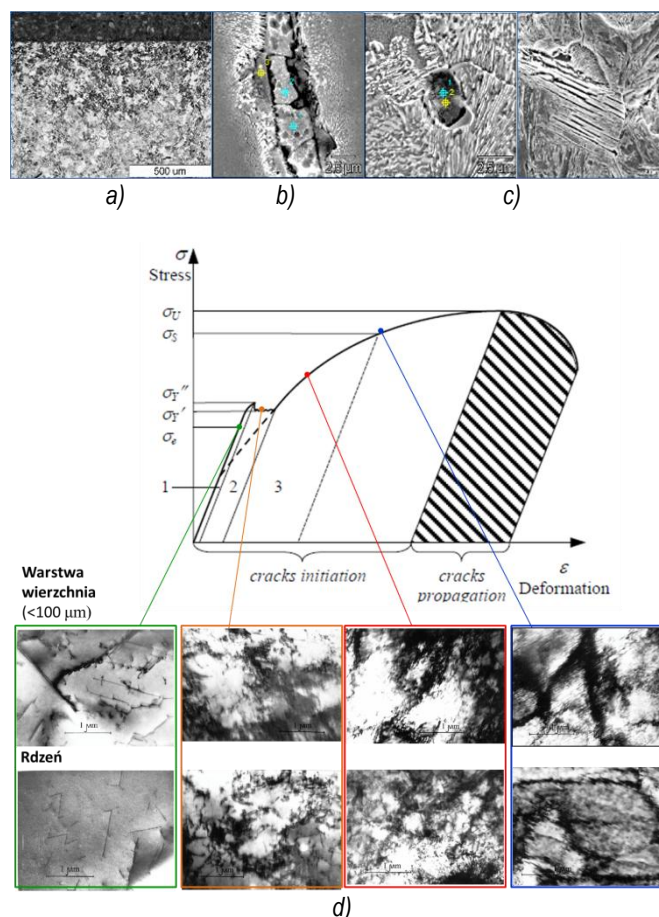
Zagadnienia NDT i SHM są specyficzne w transporcie, ze względu na złożone widmo obciążeń elementów krytycznych, wpływ zmiennych warunków otoczenia oraz różnorodność materiałów konstrukcyjnych podlegających kontroli. Przykładowo, w lotnictwie stosowane są:

- stale ferromagnetyczne,
- stale paramagnetyczne (austenityczne),
- stopy tytanu (ferro- i paramagnetyczne),
- stopy aluminium,
- stopy magnezu,
- stopy żaroodporne i żarowytrzymałe na bazie niklu i wolframu,
- kompozyty,
- materiały hybrydowe (metal – wypełniacz niemetaliczny – metal)
- ceramika;

które w skali atomu, komórki elementarnej i ziarna różnią się: pierwiastkami, typem wiązańiami chemicznego, typem komórki elementarnej. W skali mikro- i makroskopowej różnice dotyczą typu i jednorodności mikrostruktury. Cechy materiału są odwzorowane przez właściwości mechaniczne i fizyczne, które ulegają zmianie pod wpływem różnych mechanizmów degradacji struktury [2-8]. Do wiarygodnego diagnozowania ww. materiałów niezbędna jest optymalizacja metod NDT i SHM, tak aby czynności kontrolne nie zabużyły głównej funkcji badanego obiektu.

W artykule przedstawiono zagadnienie wykrywania symptomów postępującej degradacji materiału (lokalnych anomalii struktury tj.: niejednorodność mikrostruktury, w tym gęstości dyslokacji i

defektów, stref koncentracji naprężeń oraz anizotropii) w metalach ferromagnetycznych i paramagnetycznych – Rysunek 1, z wykorzystaniem metody niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji [9,10]. Opisana metoda badań może być stosowana również do diagnozowania innych materiałów przewodzących prąd elektryczny.

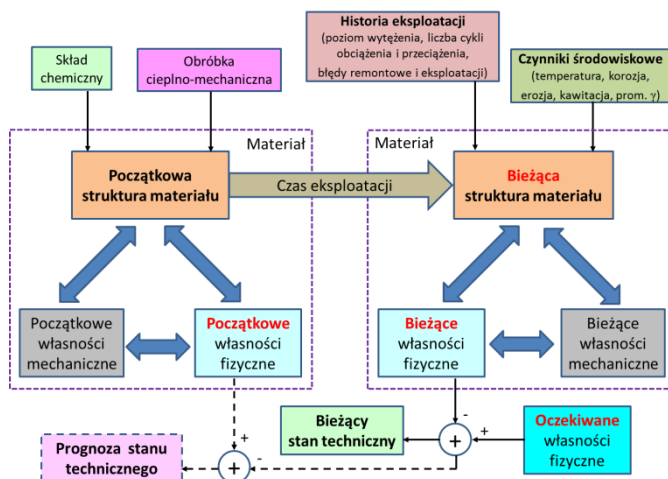


**Rys. 1.** Przykłady degradacji metalu – obiekt badań niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji: a) rozdrobnienie (perlitu) struktury warstwy kontaktowej toczonej [10]; b) popękane płytki cementytu [10]; c) popękane zmęczeniowo wtrącenie niemetaliczne siarczku magnezu i tlenku aluminium [10]; d) struktura dyslokacyjna w warstwie przypowierzchniowej i w rdzeniu deformowanej stali niskowęglowej [5]

Prezentowane zagadnienie podzielono na dwie części. W niniejszym artykule opisano charakterystykę problemu badawczego i podstawy teoretyczne metody diagnostycznej.

## 1. MOTYWACJA

Dla każdego materiału istnieje ścisła nieliniowa relacja pomiędzy składem chemicznym i mikrostrukturą, a własnościami mechanicznymi i własnościami fizycznymi [6, 11, 12], m.in. elektrycznymi, magnetycznymi, akustycznymi – Rysunek 2, co wykorzystują wszystkie metody NDT i SHM oraz algorytmy systemów prognozowania i zarządzania ryzykiem (ang. *Prognostics and Health Management*, PHM).



Rys. 2. Przestanki teoretyczne badań elektro-magnetycznych w diagnozowaniu stanu degradacji metali

Związki ilościowe opisujące relacje między mikrostrukturą, parametrami mechanicznymi i parametrami fizycznymi materiału ulegają zmianie pod wpływem:

- obróbki cieplno-mechanicznej,
- wyężenia materiału,
- przemian fazowych struktury,
- historii eksploatacji,
- warunków otoczenia (temperatury pracy, temperatury materiału podczas pomiaru, wpływu agresywnej atmosfery, korozji, erozji,)
- poziomu degradacji struktury materiału, odwzorowanego w postaci :
  - a) zwiększonej gęstości dyslokacji i innych wad mikrostruktury oraz zmian rozmiaru ziarna,
  - b) zmian fazowych i pojawienia się nowych elementów struktury, np. węglików - produktu rozpadu danej fazy, modyfikacji parametrów warstwy wierzchniej materiału,
  - c) lokalnych deformacji plastycznych w skali mikro- i makroskopowej oraz zmian poziomu anizotropii strukturalnej i magnetycznej,
  - d) pojawienia się pustek, mikro i makro pęknięć.

Podczas degradacji materiału ulegają również zmianie:

- **konduktywność** (przewodność elektryczna właściwa)  $\sigma$ , która odwzorowuje relację między gęstością prądu elektrycznego  $\mathbf{J}$  w materiale z natężeniem pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  powodującego przepływ tego prądu, co opisuje relacja (1)

$$\sigma = \frac{\mathbf{J}}{\mathbf{E}} \quad (1)$$

- **przenikalność magnetyczna**  $\mu$ , która określa zdolność materiału do zmiany indukcji magnetycznej  $\mathbf{B}$  przy zmianie natężenia pola magnetycznego  $\mathbf{H}$ , co opisuje relacja (2)

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad (2)$$

- **przenikalność elektryczna**  $\epsilon$ , która charakteryzuje zdolność materiału do zmiany indukcji pola elektrycznego  $\mathbf{D}$  przy zmianie natężenia pola elektrycznego  $\mathbf{E}$ , co opisuje relacja (3)

$$\epsilon = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{E}} \quad (3)$$

Ww. parametry elektryczne i magnetyczne materiału mogą być obserwowane i analizowane podczas badań elektromagnetycznych w paśmie częstotliwości radiowych od 3 Hz do 3 THz, przy pomocy różnych metod i technik badań nieniszczących [9,13-18]. Pasma obserwacji można zawęzić do częstotliwości [14]:

- a) 0 - 100 kHz, podczas badania stopów ferromagnetycznych,
  - b) 0 - 10 MHz, podczas badania stopów paramagnetycznych i ferromagnetyków w stanie nasycenia magnetycznego,
- co umożliwi stosowanie taniego toru pomiarowego.

Główną zaletą niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji jest analizowanie relacji ilościowych i jakościowych pomiędzy:

- zmierzoną charakterystyką częstotliwościową (amplitudową i fazową) impedancji sondy  $Z_s(\omega)$ ;
- charakterystykami częstotliwościowymi parametrów fizycznych materiału:  $\sigma(\omega)$ ,  $\mu(\omega)$  i  $\epsilon(\omega)$ ;
- mikrostrukturą materiału;

z wykorzystaniem współczesnych możliwości pomiarowych, analizy numerycznej i komputerowego wsparcia badań diagnostycznych. Dodatkową zaletą metody jest używanie taniej aparatury pomiarowej w badaniach polowych. Koszt przenośnej aparatury nie przekracza 200 Euro i jest o dwa - cztery rzędy wielkości niższy od aparatury laboratoryjnej używanej na etapie badań dowodowych (identyfikacji symptomów diagnostycznych), czy klasycznej aparatury do badań nieniszczących metodami elektromagnetycznymi. Niski koszt aparatury, w tym mikroprocesorowych sond, sprzyja zastosowaniu metody spektroskopii impedancji w zintegrowanych systemach NDT i SHM.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE SPEKTROSKOPII IMPEDANCJI

Spektroskopia (dziedzina nauki) bada i wyjaśnia teoretyczne oddziaływanie między materią (zbiorowiskiem atomów i cząsteczek) a promieniowaniem elektromagnetycznym, które jest falowym zaburzeniem pola elektromagnetycznego [9,13]. Spektroskopia wniosła największy wkład eksperymentalny we współczesne zrozumienie budowy otaczającej nas materii, dlatego może również wnieść nową jakość w rozwój metod NDT i SHM.

W spektroskopii impedancji bazuje się na współczesnej teorii oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią, zasadzie zachowania energii oraz prostym modelu podziału energii. Analizowane są związki ilościowe pomiędzy rejestrowanym sygnałem impedancji sondy  $Z_s$  lub jej admitancji  $Y_s = 1/Z_s$ , dla zadanej częstotliwości sygnału testującego  $\omega = 2\pi f$ , a charakterystyką częstotliwościową:

- impedancji materiału,  $Z_m = Z_m(\omega)$  – celu badań, wynikającej z wypadkowego wpływu impedancji elektrycznej  $Z_e$  i impedancji falowej  $Z_w$  materiału,
  - impedancji odniesienia,  $Z_0 = Z_0(\omega)$ ,
  - współczynnika sprzężenia sondy z badanym obiektem,  $K_m = K_m(\omega, R_E, R_M)$ , gdzie  $R_E$  i  $R_M$  są odpowiednio stratami odbicia pola elektrycznego i pola magnetycznego od powierzchni materiału,
- co opisuje relacja (4).

$$Z_m = f(Z_s, Z_0, K_m) \quad (4)$$

Związki ilościowe wyznacza się dla danego materiału i wzorca wady struktury oraz typu sondy na etapie wzorcowania toru pomiarowego i badań laboratoryjnych. Są one używane również do dostrajania modeli numerycznych rozwiązywanego zagadnienia diagnostycznego przy pomocy:

- danych pomiarowych uzyskanych z różnych typów sond (na etapie optymalizacji toru pomiarowego z kryterium  $\max(SNR)$ , gdzie SNR jest stosunkiem sygnału do szumu (ang. **Signal-to-Noise Ratio**);
- identyfikacji symptomów diagnostycznych z uwzględnieniem właściwości rezonansowych toru pomiarowego.

## 2.1. Przesłanki teoretyczne zastosowania spektroskopii impedancji w NDT i SHM

Oczekiwany symptomami postępującej degradacji polikrystalicznego materiału izotropowego jest wzrost poziomu anizotropowości i lokalna niejednorodność mikrostruktury, co zobrazowano przykładami na rysunku 1. Zmiany wywołane koncentracją naprężeń własnych są obserwowane m.in. w postaci rozpadu fazy podstawowej mikrostruktury, pojawieniem się węglików, zwiększeniem gęstości dyslokacji i lokalnej anizotropowości [2-5].

Dla jednorodnych materiałów izotropowych parametry elektryczne i magnetyczne ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ) są wielkościami skalarnymi (dokładniej tensorem drugiego rzędu o jednakowej wartości elementów leżących na przekątnej głównej i zerowych wartościach pozostałych elementów) [19] – kierunek przepływu prądu elektrycznego w materiale jest zgodny z kierunkiem przyłożonego pola elektrycznego, właściwości elektromagnetyczne materiału nie zależą od kierunku przepływu prądu, a oddziaływanie zmiennego promieniowania elektromagnetycznego i prądów przemiennych AC o częstotliwości  $\omega$  opisują liczby zespolone [20,21].

Dla materiałów anizotropowych parametry elektryczne i magnetyczne ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ) są tensorami drugiego rzędu, o różnych wartościach elementów leżących na przekątnej głównej i niezerowych pozostałych elementach [19] – kierunek przepływu prądu elektrycznego nie musi być zgodny z kierunkiem przyłożonego pola elektrycznego, prąd może być przesunięty w fazie względem przyłożonego pola elektrycznego, właściwości elektromagnetyczne materiału są zależne od kierunku pomiaru, a każdy z tensorów zawiera po 9 liczb zespolonych dla danej częstotliwości  $\omega$  [20,21].

Proces degradacji zmęczeniowej metali, odwzorowany przez czas eksploatacji  $t$  i poziom degradacji struktury  $D$ , opisuje nieliniowe zagadnienie proste – relacja (5), stanowiące przesłanką niskoczęstotliwościowych badań elektromagnetycznych stosowanych w NDT i SHM.

$$\text{stan mikrostruktury} \rightarrow \{\epsilon(t, D), \mu(t, D), \sigma(t, D)\} \quad (5)$$

Oczekiwana jest nieliniowa relacja między lewą i prawą stroną relacji (5), co wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na etapie opracowania metodyk badawczych, doboru algorytmów i wyznaczenia kryteriów diagnostycznych dla [6, 10, 14, 18, 21, 22]:

- danego materiału,
- zastosowanej obróbki cieplno-mechanicznej,
- warunków eksploatacji badanego obiektu,
- dominującego procesu degradacji.

## 2.2. Metodologia badawcza

Postawienie wiarygodnej diagnozy o stanie struktury materiału i poziomie jej degradacji wymaga poprawnego rozwiązaniem nieliniowego zagadnienia odwrotnego. W tym celu realizowane są:

1. Pomiar charakterystyki impedancji sondy pomiarowej  $Z_s(\omega)$  i współczynnika sprzężenia  $K_m(\omega)$  sondy z badanym materiałem w wybranym paśmie częstotliwości  $\omega \in \langle \omega_{min}, \omega_{max} \rangle$  przy pomocy wybranej techniki pomiarowej.
2. Obliczanie charakterystyki częstotliwościowej impedancji materiału  $Z_m(\omega)$ , z dopasowaniem krzywej do danych pomiarowych i założonego modelu badanego zjawiska.
3. Analiza ilościowo-jakościowa charakterystyki impedancji  $Z_m(\omega)$  z uwzględnieniem charakterystyki impedancji odniesienia  $Z_0(\omega)$ . Symptomy diagnostyczne są identyfikowane metodą reszt m.in. dla charakterystyki względnej impedancji wyznaczonej przy pomocy relacji

$$\Delta Z(\omega) = \frac{Z_m(\omega) - Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)} \quad (6)$$

gdzie  $Z_0(\omega)$  jest charakterystyką impedancji wzorca materiału (stanu wyjściowego) lub materiału odniesienia (np. suchego powietrza), rzadziej impedancją wzorca defektu struktury.

4. Analiza poziomu nieliniowości materiału na podstawie charakterystyki dystorsji impedancji materiału, wyznaczonej dla stałego poziomu wymuszenia z relacji

$$THD_Z(\omega) = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^n [Z(k \cdot \omega)]^2}{[Z(\omega)]^2}} \quad (7)$$

gdzie  $n$  jest liczbą analizowanych harmonik częstotliwości sygnału wymuszającego (najczęściej  $n = 3 - 6$ );

lub na podstawie charakterystyki zmian impedancji materiału wyznaczonej dla różnego poziomu wymuszenia, wyznaczonej na podstawie relacji

$$\Delta Z(\omega, \Delta I) = \frac{Z(\omega, I) - Z_0(\omega, I_0)}{Z_0(\omega, I_0)} \quad (8)$$

gdzie:

$I_0$  jest referencyjnym poziomem wymuszenia (prądu elektrycznego w sondzie).

5. Wnioskowanie diagnostyczne.  
Etap uczenia (badań laboratoryjnych i opracowania metodyk badawczych) – porównanie wyników pomiarów i analizy impedancji materiału z rzeczywistym stanem struktury materiału. Badania NDT i SHM – wnioskowanie jest realizowane na bazie opracowanych i zweryfikowanych kryteriów diagnostycznych.

Metodyki badawcze i kryteria diagnostyczne muszą uwzględnić wpływ:

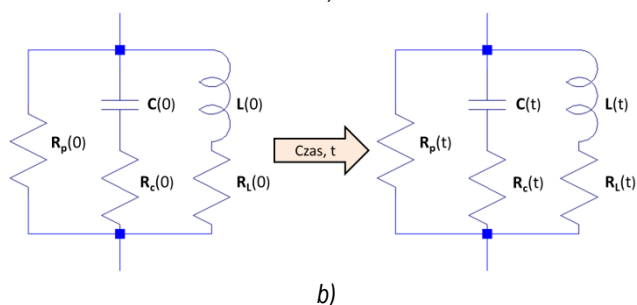
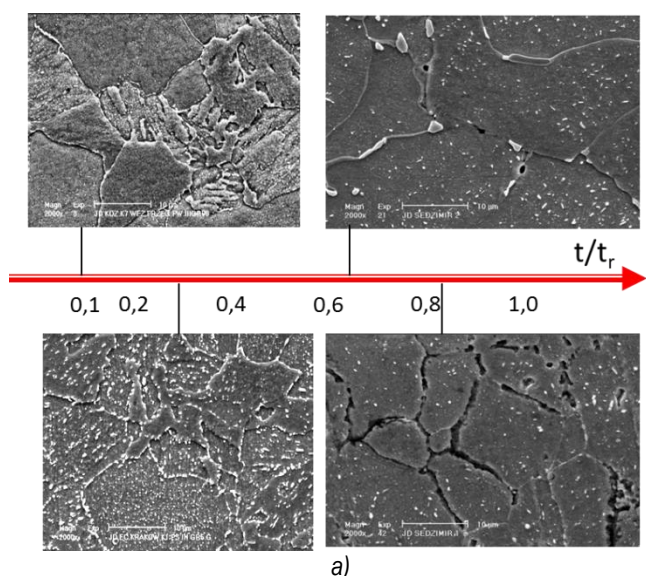
- warunków brzegowych (lokalnej nieciągłości geometrii materiału i zmian kształtu badanego elementu);
- przenikalności elektrycznej, przenikalności magnetycznej i konduktywności warstwy wierzchniej materiału  $(\epsilon, \mu, \sigma)|_{h=0}$  na wartość impedancji powierzchniowej  $Z_m(h=0)$ , która modyfikuje parametry sprzężenia sondy z badanym materiałem przy danym jej położeniu poprzez zmianę wartości strat odbicia promieniowania elektromagnetycznego na granicy dwóch ośrodków o różnej impedancji;
- wpływ impedancji źródła promieniowania elektromagnetycznego, odległości falowej sondy od badanego obiektu i impedancji powierzchniowej materiału  $Z_m(h=0)$  na ilość promieniowania elektromagnetycznego wnikańcego do materiału;
- „defektów”: niejednorodności przenikalności elektrycznej, przenikalności magnetycznej i konduktywności materiału  $(\epsilon, \mu, \sigma)_h$ , które modyfikują impedancję materiału  $Z_m(h)$  na

różnej głębokości  $h$  zmieniając poziom i rozkład strat absorpcji (rozpraszania energii promieniowania elektromagnetycznego i prądów elektrycznych AC w materiale) oraz rzeczywisty rozkład prądów wirowych w warstwie przypowierzchniowej materiału (wtórnie również parametry sprzęgania sondy z badanym materiałem).

### 2.3. Model elektryczny metalu

Gdy długość fali promieniowania elektromagnetycznego jest wielokrotnie większa od rozmiarów elementów mikrostruktury i częstotliwości plazmy  $\omega_p$  w modelu Druda [23], to lokalne i globalne właściwości elektryczne metalu można modelować jako rzeczywistą cewkę (induktor) [24]. Równoległy obwód elektryczny RLC zawierający 5 elementów – Rysunek 3, w którym prąd elektryczny płynie różnymi drogami. Oprócz gałęzi indukcyjności  $L$  zawierającej rezystancję szeregową  $R_L$  o bardzo małej wartości, występuje gałąź pojemności  $C$  z bardzo dużą rezystancją  $R_C$  oraz gałąź rezystancji  $R_p$ . Admitancję obwodu zastępczego RLC opisuje wzór

$$Y_e = \frac{1}{Z_e} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_L + j\omega L} + \frac{1}{R_C - j\frac{1}{\omega C}} \quad (9)$$



**Rys. 3.** Związek procesu degradacji struktury z impedancją elektryczną materiału: a) zmęczenie termomechaniczne stali specjalnej 10CrMo9-10 podczas pełzania ( $t$  jest rzeczywistą trwałością eksploatacyjną materiału zależną od warunków eksploatacji) [25]; b) model induktora jako układ zastępczy badanego metalu – postępująca degradacja mikrostruktury czy zmiany naprężeń własnych modyfikują wartość 5 elementów obwodu zastępczego

Elementy składowe modelu bazują na własnościach [9]:

- **idealnego rezystora R** – elementu, który rozprasza energię elektryczną, niezależnie od częstotliwości wymuszającej i nie wprowadza przesunięcia fazy. Jego wartość jest skorelowana z częścią rzeczywistą konduktywności materiału  $\sigma_1$ ;

- **idealnego induktora L** – elementu, który odwzorowuje zdolność materiału do gromadzenia energii magnetycznej oraz bezstratnej konwersji energii magnetycznej w energię elektryczną oraz energii elektrycznej w energię magnetyczną. Element wprowadza przesunięcie fazy o  $+90$  stopni. Reaktancja indukcyjna, której wartość jest wprost proporcjonalna do częstotliwości pola magnetycznego, jest skorelowana z lokalnymi właściwościami magnetycznymi materiału, m.in. z przenikalnością magnetyczną i stratami histerezy magnetycznej;
- **idealnego kondensatora C** – elementu, który odwzorowuje zdolność materiału do gromadzenia energii elektrycznej. Element wprowadza przesunięcie fazy o  $-90$  stopni. Reaktancja pojemnościowa, której wartość jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości pola elektrycznego, jest skorelowana z lokalnymi właściwościami izolacyjnymi materiału wynikającymi m.in. z gęstością dyslokacji, rozkładu wtrąceń niemetalicznych (niektórych dodatków stopowych, węglików, ilości pustek i mikropęknięć - elementów mikrostruktury, które nie przewodzą prądu elektrycznego z wykorzystaniem swobodnych elektronów (przewodzenie jonowe w dielektrykach wymaga wyższych częstotliwości).

Pomiędzy nieznanymi, rzeczywistymi parametrami elektrycznymi metalu i parametrami modelu rzeczywistego induktora zachodzą relacje

$$R \propto \sigma^{-1} \quad L \propto \mu \quad C \propto \varepsilon \quad (10)$$

### 2.4. Model elektryczny struktury niejednorodnej

W przypadku materiału niejednorodnego, np. materiału z warstwą wierzchnią i rdzeniem o innych właściwościach struktury – Rysunek 1.a), materiał jest modelowany przez zastępczy obwód elektryczny zawierający składowe impedancje  $Z_i$  (lokalne induktory) odwzorowujące cechy materiału. Obwód taki może być zastąpiony przez wypadkową impedancją  $Z_{wyp}$  wyznaczoną na podstawie znanych równań analizy obwodów elektrycznych. Należy jednak pamiętać, że na tym etapie uproszczenia zagadnienia analitycznego gubiona jest informacja o właściwościach rezonansowych poszczególnych obwodów RLC. Tej wady nie posiada analiza obwodu zastępczego realizowana z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

## 3. IMPEDANCJA ELEKTRYCZNA METALU

W niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji zakłada się, że wszystkie elementy obwodu zastępczego RLC – Rysunek 3, mogą zmienić swoje wartości pod wpływem nieznannej historii naprężeń  $\sigma_m(t)$  lub odkształceń  $\varepsilon_m(t)$ , co opisuje relacja

$$L(t) = L(0) + \Delta L(t) \quad (11.1)$$

$$R_L(t) = R_L(0) + \Delta R_L(t) \quad (11.2)$$

$$C(t) = C(0) + \Delta C(t) \quad (11.3)$$

$$R_C(t) = R_C(0) + \Delta R_C(t) \quad (11.4)$$

$$R_p(t) = R_p(0) + \Delta R_p(t) \quad (11.5)$$

gdzie:

$t$  – czasem eksploatacji, który jest również argumentem funkcji postępującej degradacji materiału

$$D = D(D_0, t) \quad (12)$$

gdzie:

$D_0$  jest początkowy stan degradacji struktury.

Zmiana wartości co najmniej jednego z ww. parametrów obwodu RLC zmienia wartość impedancji i admittancji elektrycznej, co przedstawiono w postaci równań

$$Z_e(D, \omega, t) \equiv \frac{U(\omega, t)}{I(\omega, t)} = Z_e(0) + \Delta Z_e(D, \omega, t) \quad (13)$$

$$Y_e(D, \omega, t) \equiv \frac{1}{Z_e(D, \omega, t)} = Y_e(0) + \Delta Y_e(D, \omega, t) \quad (14)$$

gdzie:

U – napięcie testujące materiał

I – prąd elektryczny w materiale.

W przemiennym polu elektrycznym prąd może być przesunięty w fazie względem przyłożonego pola elektrycznego. Zależność pomiędzy gęstością prądu elektrycznego i natężeniem pola elektrycznego opisuje równanie zespolone

$$\mathbf{J}(\omega) = (\sigma_1 + j\sigma_2)\mathbf{E}(\omega) \quad (15)$$

gdzie:

$j$  – jednostka urojona,  $j^2 = -1$ ,

$\sigma_1$  – część rzeczywista konduktywności, która opisuje przewodnictwo i straty dielektryczne. Z równań Maxwella i modelu Druda jest ona opisana dla metali relacją [23]

$$\sigma_1 = \Re(\sigma) = \sigma_{DC} + \omega \varepsilon_2(\omega) = \frac{\sigma_{DC}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (16)$$

$\sigma_2$  jest częścią urojoną konduktywności, wywołaną przez polaryzację dielektryczną. Z równań Maxwella i modelu Druda jest opisana dla metali relacją [23]

$$\sigma_2 = \Im(\sigma) = \omega \varepsilon_1(\omega) = \frac{\omega \tau \sigma_{DC}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (17)$$

gdzie:

$\sigma_{DC}$  – konduktywność materiału dla prądu stałego (dana katalogowa dla materiału nowego),

$\tau$  – czas rozpraszania (rzędu  $10^{-14}$  s)

$\varepsilon_1$  – składowa rzeczywista przenikalności elektrycznej metalu, która z modelu Druda jest opisana wzorem [23]

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} \quad (18)$$

$\varepsilon_2$  – składowa urojona przenikalności elektrycznej metalu, która z modelu Druda jest opisana wzorem [23]

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_p^2}{\omega \tau (\omega^2 + \tau^{-2})} \quad (19)$$

$\omega_p$  – częstotliwość plazmy w modelu Druda (rzędu  $10^{15}$  Hz).

Model Druda i obwód zastępczy RLC zapewnia właściwe odwzorowanie charakterystyki **impedancji elektrycznej**  $Z_e(\omega)$  metalu w szerokim paśmie częstotliwości. Dla stopów metali i postępującej ich degradacji mogą występować lokalne odstępstwa od modelu, które wynikają z wpływu dwóch lub więcej faz struktury i defektów struktury na ruch elektronów swobodnych w materiale.

Dostrojenie parametrów modelu RLC do wyników badań spektroskopowych jest ułatwione po uwzględnieniu spostrzeżenia, że w paśmie częstotliwości DC – 10 MHz, używanym przez autorów, zachodzą przybliżone relacje

$$\sigma_1 \cong \sigma_{DC} \quad \sigma_2 \cong \omega \tau \sigma_{DC} \quad (20)$$

#### 4. IMPEDANCJA FALOWA

Impedancja falowa  $Z_w$  jest wielkością opisującą właściwości ośrodka przenoszącego falę. W opisywanej metodzie  $Z_w$  jest miarą oporu jaki ośrodek (powietrze między cewką i powierzchnią badanego elementu oraz badany materiał) stawia drganiom pola elektrycznego i pola magnetycznego.

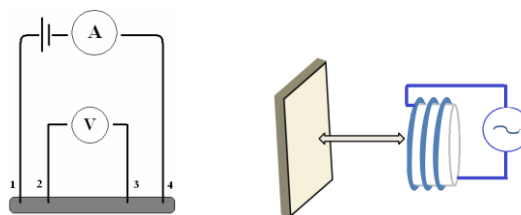
W NDT i SHM badania metodą niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji są wykonywane cewką – Rysunek 4, w polu bliskim, w którym spełniony jest warunek

$$r \ll \lambda/2\pi \quad (21)$$

gdzie:

$r$  – odległość cewki sondy od powierzchni badanego elementu,

$\lambda$  – długością fali elektromagnetycznej.



**Rys. 4.** Pomiar impedancji materiału [9]: a) metodą stykową 4T, b) metodą bezstykową z użyciem cewki pomiarowej

Dla tych warunków badań:

- impedancja falowa pola elektrycznego (generowanego przez źródło o dużej impedancji np. długi pojedynczy przewód elektryczny - monopól) opisana jest wzorem [26]

$$Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi} = Z_0 \frac{\lambda}{2\pi r} \gg Z_0 \quad (22)$$

- impedancja falowa pola magnetycznego (generowana przez źródło o małej impedancji, np. cewkę) opisana jest wzorem [26]

$$Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi} = Z_0 \frac{2\pi r}{\lambda} \ll Z_0 \quad (23)$$

gdzie:

$Z_0$  – impedancja suchego powietrza  $Z_0 = 377 + j \cdot 0$ .

Wartość impedancji falowej wynikającej z wzorów (22) i (23) zobrazowano na rysunku 5.

##### 4.1. Straty odbicia

Straty odbicia R (dB) są generowane na granicy dwóch ośrodków o różnej impedancji falowej. W płaszczyźnie fali straty odbicia mogą być obliczone na podstawie wzoru [26]

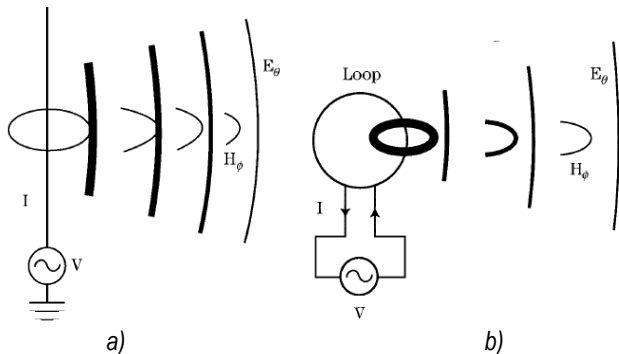
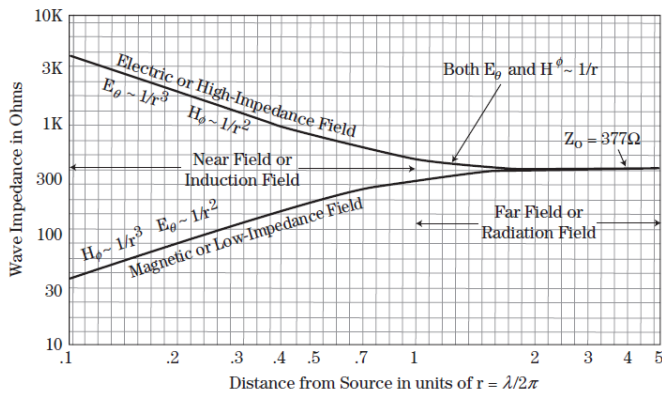
$$R_{dB} = 108 + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f_{MHz}} \right) \quad (24)$$

gdzie:

$\sigma_r = \sigma / \sigma_{Cu}$  – względna konduktywność materiału odniesiona do konduktywności miedzi,

$\mu_r = \mu / \mu_0$  – względna przenikalność magnetyczna materiału odniesiona do przenikalności magnetycznej próżni,

$f_{MHz} = \omega / (2\pi \cdot 10^6)$  – częstotliwość sygnału testującego w (MHz).



**Rys. 4.** Wartość impedancji falowej powietrza zależy od odległości falowej i typu źródła pola elektromagnetycznego [26]: a) długi przewód elektryczny – źródło pola elektrycznego; b) cewka – źródło pola magnetycznego ( $Z_0$  – impedancja próżni lub suchego powietrza; długość fali elektromagnetycznej w powietrzu można wyznaczyć z zależności przybliżonej  $\lambda$  (m)  $\approx 300/f$  (MHz))

Straty odbicia dla fali pola elektrycznego  $R_E$  (dB) w polu bliskim są opisane relacją [26]

$$R_{E,dB} = 354 + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f_{MHz}^3} \right) \quad (25)$$

gdzie:

$r$  – odległość cewki od badanej powierzchni w calach.

Straty odbicia dla fali pola magnetycznego  $R_M$  (dB) w polu bliskim są opisane relacją [26]

$$R_{M,dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{0.462}{r} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r f_{MHz}}} + 0.136r \sqrt{\frac{\sigma_r f_{MHz}}{\mu_r}} + 0.354 \right) \quad (26)$$

Metale, będąc dobrymi przewodnikami, odbijają prawie w całości niskoczęstotliwościowe pole elektryczne towarzyszące polu magnetycznemu generowanemu przez sondę pomiarową. Do badanego materiału wnika pole magnetyczne, które poprzez impedancję powierzchniową materiału jest częściowo przekształcane w pole elektryczne oraz prądy wirowe rozchodzące się prostopadle do kierunku propagowania fali elektromagnetycznej. Prądy wirowe generują wtórne pole magnetyczne, które przeciwdziała zmianom pierwotnego pola magnetycznego. Defekty struktury oraz lokalna anizotropia strukturalna i magnetyczna zaburzają rozkład prądów wirowych.

#### 4.2. Starty rozpraszania (absorpcji)

Straty absorpcji  $A$  (dB) są niezależne od źródła fali elektromagnetycznej poruszającej się w ośrodku. Zależą tylko od cech materiału i są one opisane wzorem [26]

$$A_{dB} = kt \sqrt{\omega \sigma \mu} \quad (27)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik proporcji uwzględniający stosowany układ jednostek miar ( $a = 3,34$  gdy  $t$  jest w calach),

$t$  – grubość materiału,

$\omega$  – częstotliwość kołowa pola elektromagnetycznego,

$\sigma$  – konduktywność materiału,

$\mu$  – przenikalność magnetyczna materiału.

Na ich podstawie wyznacza się tzw. efektywną głębokość wnikania pola elektrycznego AC do materiału (28) i tłumienia prądów wirowych do 37% wartości obserwowanej na powierzchni

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{0.5 \omega \sigma \mu}} \quad (28)$$

Wyznaczona wartość z wzoru (28) obowiązuje wyłącznie w przypadku płyty płaskiej o nieskończonej grubości pobudzonej przez falę płaską.

#### 4.3. Sprzężenie cewki z badanym elementem

Na podstawie wzorów (24) – (27) dostrzega się, że konduktywność i przenikalność magnetyczna badanego materiału wpływają również na parametry sprzężenia cewki z badanym obiektem  $K_m$ . Powyższą zależność opisuje poglądowo relacja

$$K_m = K_m(r, \sigma \mu, \sigma / \mu, \omega) \quad (29)$$

W efekcie indukcyjnego sprzężenia cewki z badanym materiałem zmienia się impedancja  $Z_s$  toru pomiarowego (najczęściej obwodu szeregowego  $R_s L_s C_s$  zawierającego cewkę), której parametry (amplituda i faza) są mierzone. Stąd

$$Z_s = Z_{s,0} + \Delta Z(K_m, Z_m) = Z_{s,0} + f(r, \sigma \mu, \sigma / \mu, \varepsilon, \omega) \quad (30)$$

gdzie:

$Z_{s,0}$  – impedancja cewki pomiarowej w wolnej przestrzeni (bez wpływu badanego materiału),

$\Delta Z$  – zmiana impedancji cewki pomiarowej pod wpływem oddziaływania badanego materiału.

Wypadkowy wpływ impedancji badanego materiału  $Z_m$  i parametrów sprzężenia cewki z badanym materiałem  $K_m$  można wyznaczyć na podstawie zmierzonej impedancji  $Z_s$  i  $Z_{s,0}$ , po przekształceniu wzoru (30) do postaci

$$\Delta Z(K_m, Z_m) = Z_s - Z_{s,0} = f(r, \sigma \mu, \sigma / \mu, \varepsilon, \omega) \quad (31)$$

Analiza ilościowa wyników badań jest realizowana na podstawie modelu idealnego transformatora. Nieznana wartość impedancji materiału  $Z_m$  odwzorowuje obwód wtórny transformatora, natomiast  $K_m$  nieznaną przekładnię transformatora. W modelowaniu uwzględnia się cechy konstrukcyjne cewki pomiarowej (z rdzeniem lub bez rdzenia).

Do wydzielenia informacji o impedancji materiału  $Z_m$  i  $K_m$  uwzględnia się relacje (20) i (29) oraz wartość współczynnika odbicia (dopasowania sondy do badanego obiektu i odległości falowej), wyznaczaną z wzoru

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (32)$$

## WNIOSKI

Istnieje nieliniowy związek pomiędzy składem chemicznym, typem mikrostruktury i stopniem degradacji struktury, a parametrami elektrycznymi i magnetycznymi materiału, który może być zidentyfikowany eksperymentalnie przy pomocy spektroskopii impedancji i współczesnych metod analizy danych pomiarowych.

Do detekcji słabych symptomów wczesnej fazy degradacji materiału wskazane jest zastosowanie metody rezonansowej pomiaru impedancji i wzorców badanego materiału.

## BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.ndt.net>
2. Dobrzański J., *Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki*. Open Access Library, 2011, t. 3, 228 s., <http://www.openaccesslibrary.com/vol03/vol03.pdf>
3. Nabarro F. R. N., *Dislocations in a Simple Cubic Lattice*. Proc. Phys. Soc. 59(2), 1947, 256-272.
4. Shaniavski A.A., *Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation*. Publishing House of Scientific and Technical Literature "Monography", Ufa 2007, (ros.).
5. Vilya J., Kvedaras V., *Dislocation Structure of Near Surface Layers of Deformed Low-carbon Steel*. 15th Int. Metallurgical & Material Conference METAL 2006, 23.- 25.5.2006, Hradec nad Moravicí.
6. Kroos J. et al., *Combined measuring system for an improved non-destructive determination of the mechanical/technological material properties of steel sheet*. Technical steel research. Final report EUR 21339 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg 2005.
7. Leunis E. et al., *Quantitative phase analysis of multi-phase steels – PHAST*. Final report EU 22387 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg 2006.
8. Stolzenberg M. et al., *Online material characterization at strip production*. Research Found of Coal and Steel. Final report EUR 25879 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2013, doi: 10.2777/77313.
9. Keysight Technologies, *Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques*, 4th Edition, Keysight Technologies, 2014, <http://www.keysight.com>.
10. Żurek Z. H., Duka P., *RLC circuits for material testing and NDT*, Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL, Katowice 2015.
11. Żurek Z. H., *Application of flaw detection methods for detection of fatigue processes in low-alloyed steel*, [http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde\\_for\\_safety/36.pdf](http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/36.pdf).
12. Hofmann U. et al.: *Non-destructive evaluation (NDE) of quality characteristics of heavy plates*. Final report EUR 21436 EN. Publication Office of the European Union, Luxembourg 2005.
13. Praca zbiorowa pod red. Zieliński W., Rajcy A., *Metody spektroskopowe i ich zastosowanie do identyfikacji związków organicznych*. WNT Warszawa 2000.
14. *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.
15. Hornsch A., *Automatic identification of induction hardening using eddy current and Preventive Multi-Frequency Testing*, [http://www.ibgndt.ch/wp-content/uploads/2014/10/ibg\\_whitepaper\\_automatic-verification-induction-hardening-by-EC-and-PMFT.pdf](http://www.ibgndt.ch/wp-content/uploads/2014/10/ibg_whitepaper_automatic-verification-induction-hardening-by-EC-and-PMFT.pdf)
16. Abu-Nabah B. A., Nagy P. B., *High-frequency eddy current conductivity spectroscopy for residual stress profiling in surface-treated nickel-base superalloys*. NDT & E International, Volume 40, Issue 5, pp. 405 – 418, July 2007.
17. Heuer H., Hillmann S., Klein M. and Meyendorf N., *Sub Surface Material Characterization using High Frequency Eddy Current Spectroscopy*. MRS Proceedings, (2009) 1195, 1195-B09-02 doi:10.1557/PROC-1195-B09-02.
18. Pitropakis I, Pfeiffer H. Wevers M., *Crack detection in aluminum plates for aerospace applications by electromagnetic impedance spectroscopy using flat coil sensors*. Sensors and Actuators A: Physical Volume 176, April 2012, pp. 57–63, doi:10.1016/j.sna.2012.01.013.
19. Newnham R., *Properties of materials. Anisotropy, symmetry, structure*. Oxford University Press, 2005.
20. *Engineering Design Handbook - Electromagnetic Compatibility (DARCOM P 706-410)*. U.S. Army Material Command, March 1977.
21. Jarvis J. B. et al., *Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, Building Materials, and Negative-Index Materials*. NIST Technical Note 1536, February 2005.
22. Witos M., *Increasing the durability of turbine engine components through active diagnostics and control*. Research works of AFIT, 2011, Issue 29, 324 p. (pol.), doi: 10.13140/RG.2.1.4341.4560.
23. Tanner D. B., *Optical effects in solids. Lecture notes for PHY7097*, Department of Physics, University of Florida.
24. Green L., *RF-inductor modeling for the 21st century*, <http://m.eet.com/media/1142818/19256-159688.pdf>
25. Dobrzański J., *Sposób szacowanie czasu dalszej bezpiecznej pracy materiałów pracujących w warunkach pełzania na przykładzie charakterystyk materiałowych stali 10CrMo9-10 po długotrwałej eksploatacji*. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Projektowanie, Innowacje Remontowe i Modernizacje w Energetyce PIRE 2012, Ustroń 28-30.11.2012.
26. Duff W.G., *Designing Electronic System for EMC*. SciTech Publishing, 2011.

## COMPUTER-AIDED IMPEDANCE SPECTROSCOPY. PART 1. – CHARACTERISTICS OF THE RESEARCH PROBLEM

### Abstract

*In the article theoretical bases of the low frequency impedance spectroscopy method and possibilities of its use in the diagnostics of paramagnetic and ferromagnetic alloys used in transport are explained. The main attention is put on modelling metal and its degradation by equivalent RLC circuit.*

Autorzy:

dr inż. **Mirosław Witoś** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki, e-mail: witom@itwl.pl  
dr hab. inż. **Zbigniew Hilary Żurek**, prof. nadzw. PŚI – Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl