

Mostki i przetworniki pomiarowe LCR w wykrywaniu degradacji zmęczeniowej

Streszczenie. Potencjał stosowanych w przemyśle nieniszczących metod badawczych jest niewystarczający w świetle nowoczesnych metod zarządzania ryzykiem. Również nie są wykorzystane ww. metody badawcze w zakresie detekcji wczesnej fazy zmęczenia materiału, pomimo istnienia przesłanek teoretycznych i możliwości metrologicznych. W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne i możliwości metrologiczne wykrywania lokalnych anomalii (zmęczeniowych) materiału metodą magneto-indukcyjną z użyciem tanich, podręcznych mostków pomiarowych LCR.

Abstract. The potential of industrial non-destructive testing methods in the light of modern methods of risk management is insufficient. Likewise, in this potential there are not used research methods in the field of detection of early stage material fatigue, despite the existence of theoretical premises and metrology capabilities. The article presents metrology capabilities of material local (fatigue) anomaly detection, using magneto-inductive method with inexpensive, handheld LCR measuring bridges. (**LCR bridges and transducers in fatigue degradation detection**).

Słowa kluczowe: degradacja zmęczeniowa materiału, badania nieniszczące, metodologia badawcza, techniki pomiarowe
Keywords: material fatigue degradation, nondestructive testing, testing methodology, measuring techniques

Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem nowoczesnej diagnostyki, realizowanej na potrzeby zarządzania ryzykiem eksploatacji, jest wykrywanie lokalnych zmian zmęczeniowych materiału przed wystąpieniem otwartego pęknięcia, tj. uzyskanie wiarygodnej informacji umożliwiającej podejmowanie działań profilaktycznych przed awarią. Powyższych oczekiwań nie spełniają klasyczne metody badań nieniszczących (VT, UT, ET, MT i RT), których głównym zadaniem jest wykrywanie pęknięć i dużych wad struktury [1]. Wyniki badań nieniszczących (informacja o bieżącym stanie technicznym materiału) nie jest wykorzystywana do identyfikacji przyczyny obserwowanych zmian zmęczeniowych. Potencjał badawczy ww. metod nieniszczących jest również niewykorzystany w zakresie detekcji wczesnej fazy zmęczenia materiału, pomimo istnienia przesłanek teoretycznych i możliwości metrologicznych.

W artykule przedstawiono zagadnienie wykrywania lokalnych anomalii materiału, m.in. stref zmęczenia materiału, metodą magneto-indukcyjną. W pomiarach zastosowano tanie, podręczne mostki pomiarowe LCR, np. UT612 [2] i precyzyjne cyfrowe przetworniki indukcyjności serii LDC 1000 [3]. Ich koszt jest o dwa - trzy rzędy wielkości niższy od aparatury laboratoryjnej czy klasycznej aparatury do badań nieniszczących. Opisana metoda badań może być stosowana zarówno do diagnozowania materiałów ferromagnetycznych jak i paramagnetycznych.

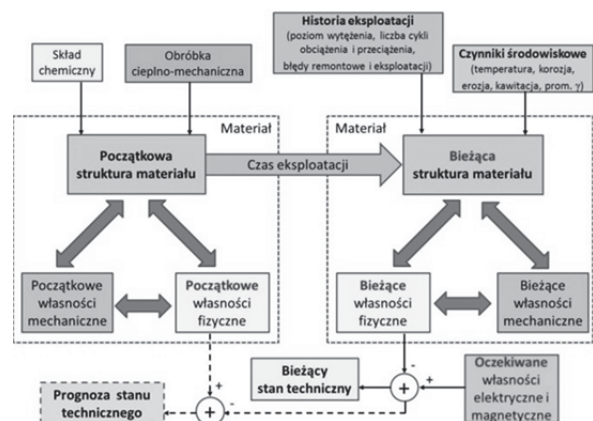
Degradacja zmęczeniowa

Dla każdego materiału istnieje ścisła relacja pomiędzy składem chemicznym i mikrostrukturą, a własnościami mechanicznymi i własnościami fizycznymi [4, 5] (m.in. elektrycznymi, magnetycznymi, akustycznymi) – rys. 1, co jest podstawą teoretyczną wszystkich metod badań nieniszczących (ang. *Non-Destructive Testing*, NDT) [1], systemów monitorowania konstrukcji (ang. *Structural Health Monitoring*, SHM) [6] oraz systemów prognozowania i zarządzania ryzykiem (ang. *Prognostics and Health Management*, PHM) [7].

Związki ilościowe opisujące ww. relacje ulegają zmianie pod wpływem [4, 5, 8-14]:

- obróbki cieplno-mechanicznej,
- wyłężenia materiału,
- przemian fazowych struktury [8],

- historii eksploatacji,
- warunków otoczenia (temperatury pracy, temperatury materiału podczas pomiarów, wpływu agresywnej atmosfery, erozji, korozji),
- poziomu degradacji struktury materiału, odwzorowanego w postaci :
 - zwiększonej gęstości dyslokacji i innych wad mikrostruktury oraz zmian rozmiaru ziarna [8],
 - zmian fazowych i pojawienia się nowych elementów struktury, np. węglików - produktu rozpadu danej fazy [8],
 - modyfikacji parametrów warstwy wierzchniej materiału [8],
 - lokalnych deformacji plastycznych w skali mikro- i makroskopowej oraz zmian poziomu anizotropii strukturalnej i magnetycznej,
 - pojawienia się pustek, mikro i makro pęknięć [8].



Rys.1. Przesłanki teoretyczne zastosowania badań elektromagnetycznych w diagnostyce stanu degradacji metali [9]

Podczas degradacji struktury zmianie ulegają również trzy podstawowe parametry właściwości fizycznych materiału:

- konduktywność (przewodność elektryczna właściwa) σ ,
- względna przenikalność magnetyczna μ ,
- przenikalność elektryczna ε ,

które autorzy używają do monitorowania stanu technicznego materiału wykorzystując związki ilościowe między rejestrowanym sygnałem impedancji Z lub admitancji

$Z = 1/Y$ a mikrostrukturą badanego materiału. Związki wyznaczone na etapie badań laboratoryjnych (eksperymentu czynnego) i zweryfikowane podczas badań poligonowych (eksperymentu biernego).

Obserwator stanu – parametry diagnostyczne

Zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału, występujące podczas jego degradacji zmęczeniowej, są przesłanką do stosowania niskoczęstotliwościowych badań elektromagnetycznych [4, 8] zarówno w NDT jak i SHM. Oczekiwana i potwierdzona nieliniowa relacja pomiędzy stanem technicznym struktury a parametrami elektrycznymi i magnetycznymi wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na etapie opracowania metodyk badawczych i wyznaczenia kryteriów diagnostycznych dla [4, 5, 8, 9, 11]:

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

Postawienie wiarygodnej diagnozy o poziomie degradacji materiału jest równoznaczne z poprawnym rozwiązaniem **nieliniowego zagadnienia odwrotnego** [16, 17, 18] według algorytmu:

zmierzone parametry impedancji sondy pomiarowej lub obwodu elektrycznego 4T → bieżące parametry elektryczne i magnetyczne (oraz nieliniowość) → prawdopodobny stan techniczny materiału.

W tym celu realizowane są:

- 1) Pomiar charakterystyki impedancji materiału $Z_m(\omega)$ w wybranym paśmie częstotliwości $\omega \in (\omega_{min}, \omega_{max})$ z wykorzystaniem wybranej metody pomiarowej [18, 19];
- 2) Analiza ilościowo-jakościowa charakterystyki impedancji materiału $Z_m(\omega)$, z uwzględnieniem specyfiki wybranej techniki pomiaru impedancji i charakterystyki impedancji odniesienia;
- 3) Analiza poziomu nieliniowości materiału;
- 4) Wnioskowanie.

Opracowana metodyka badawcza uwzględnia wpływ warunków brzegowych (lokalnej nieciągłości geometrii materiału i zmian kształtu badanego elementu) oraz konduktywności materiału na wnikanie promieniowania elektromagnetycznego do materiału, rzeczywisty rozkład prądów wirowych w warstwie wierzchniej materiału i tłumienie sygnału (rozpraszanie energii) w materiale.

Przesłanki teoretyczne

Badając postępującą degradację materiału izotropowego metodami elektromagnetycznymi oczekuje się wzrostu poziomu anizotropowości materiału i lokalnej niejednorodności mikrostruktury. W takim środowisku należy jednocześnie uwzględnić prądy przewodnictwa σE , prądy przesunięcia $\partial D / \partial t$ i prądy konwekcji ρv przy obecności prądów wzbudzających I_w i ładunków ρ_w [20]. Dla tak zdefiniowanego zadania obowiązuje pełny układ równań elektrodynamiki:

$$\begin{aligned} (1) \quad & \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ (2) \quad & \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ (3) \quad & \text{div } \mathbf{B} = 0 \\ (4) \quad & \text{div } \mathbf{D} = \rho_w \end{aligned}$$

gdzie: $\varepsilon = D / E$ jest przenikalnością elektryczną, $\mu = B / H$ jest przenikalnością magnetyczną, $\sigma = J / E$ jest konduktywnością (przewodnością właściwą), B jest

wektorem indukcji magnetycznej, D jest wektorem indukcji elektrycznej, E jest wektorem natężenia pola elektrycznego, H jest wektorem natężenia pola magnetycznego, J jest wektorem gęstości prądu, który dla materiału niejednorodnego opisany jest relacją

$$(5) \quad \mathbf{J} = \mathbf{J}_{przew} + \mathbf{J}_{przes} + \mathbf{J}_{kon} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{v} \rho + \mathbf{J}_w + \mathbf{v} \rho_w$$

Dla materiałów jednorodnych J_{kon} przyjmuje wartość zero i prawa strona relacji (5) upraszcza się do pierwszych dwóch składowych.

Dla jednorodnych materiałów izotropowych (materiału wyjściowego) ε, μ, σ są wielkościami skalarnymi – właściwości elektromagnetyczne materiału nie zależą od kierunku przepływu prądu, a oddziaływanie zmiennego promieniowania elektromagnetycznego i prądów przemiennych AC opisują liczby zespolone. Dla materiałów anizotropowych ε, μ, σ są tensorami drugiego rzędu – właściwości elektromagnetyczne materiału są zależne od kierunku pomiaru, a każdy z tensorów zawiera po 9 liczb zespolonych [20, 21].

Parametry elektryczne i magnetyczne materiału

Właściwości elektryczne i magnetyczne metali i innych materiałów przewodzących prąd elektryczny są odwzorowane głównie przez konduktywność i zespoloną przenikalność magnetyczną.

Konduktywność σ (wyrażana w S/m lub wielkości względnej odnoszonej do przewodności miedzi) jest odwrotnością oporu właściwego ρ ($\Omega \cdot m$). Parametr ten jest miarą zdolności materiału do przewodzenia prądu elektrycznego i szybkości przemieszczania swobodnych elektronów poprzez materiał. Im więcej przeszkód na drodze swobodnych elektronów w metalu, tym mniejsza jest wartość przewodności materiału, większe opóźnienie prądu względem napięcia oraz więcej wydzielanego ciepła (strat). Metale ferromagnetyczne i paramagnetyczne mają wysoką konduktywność i bardzo mały opór właściwy [23]. W zmiennym polu elektromagnetycznym i prądach przemiennych AC konduktywność jest wielkością zespoloną, co opisuje relacja

$$(6) \quad \sigma^* = \sigma' + j\sigma''$$

gdzie: $\sigma' = \sigma_{DC}$ (dane katalogowe) i $\sigma'' = \sigma_{AC}$ są składową rzeczywistą i urojoną konduktywności zespolonej σ^* . Wartość zespolona konduktywności sygnalizuje przesunięcie fazowe między polem elektrycznym i natężeniem prądu elektrycznego. Dla jednorodnych materiałów izotropowych (gdy $J_{kon} = 0$ i $\sigma'' = \omega \varepsilon$) tangens strat opisuje relacja

$$(7) \quad \begin{aligned} \tan \delta_{isotropy} &= \frac{\sigma_{DC}}{\omega \varepsilon} = \\ &= \frac{\text{conduction current density}}{\text{displacement current density}} \end{aligned}$$

Dla materiałów anizotropowych i niejednorodnych

$$(8) \quad \begin{aligned} \tan \delta_{anisotropy} &= \frac{\sigma'}{\sigma''} \approx \\ &\approx \frac{\text{conduction current density}}{\text{displacement current density}} \end{aligned}$$

Z relacji (7) i (8) widać, że postępująca degradacja materiału jest odwzorowana przez zmiany poziomu strat przewodzenia prądu elektrycznego AC

$$(9) \quad \Delta(\tan \delta_e) = (\tan \delta_e)_{measure} - (\tan \delta_e)_{isotropy}$$

oraz poziom nieliniowości materiału odwzorowany przez współczynnik dystorsji THD (poziom wyższych harmonicznych) [24-27]. Źródłem zmian wartości $\Delta(\tan \delta_e)$ może być składowa rzeczywista lub urojona przewodności, lub równoczesne zmiany wartości obu składowych.

Zespolona przenikalność magnetyczna μ^* jest właściwością magnetyczną materiału, która mierzy zdolność materiału do indukowania pola magnetycznego wewnątrz materiału. Składowe rzeczywista i urojona odwzorowują odpowiednio zdolność materiału do przewodzenia strumienia magnetycznego i jego rozpraszanie w materiale [18, 22].

$$(10) \quad \mu_r^* = \frac{\mu^*}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r'' = \left(\frac{\mu'}{\mu_0}\right) - j\left(\frac{\mu''}{\mu_0}\right)$$

gdzie: μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni ($4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]). Współczynnik proporcjonalności części urojonej do rzeczywistej zespolonej przenikalności magnetycznej jest nazywany tangensem strat

$$(11) \quad \tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'}$$

który na podstawie pomiaru udostępnia informację ile mocy jest tracone w materiale w odniesieniu do mocy zgromadzonej. Podobnie do relacji (8), można zdefiniować estymator $\Delta(\tan \delta_\mu)$, który odwzorowuje wpływ postępującej degradacji materiału na właściwości magnetyczne materiału

$$(12) \quad \Delta(\tan \delta_\mu) = (\tan \delta_\mu)_{measure} - (\tan \delta_\mu)_{isotropy}$$

Źródłem zmian wartości $\Delta(\tan \delta_\mu)$ może być składowa rzeczywista lub urojona przenikalności magnetycznej materiału, lub równoczesne zmiany wartości obu składowych.

Właściwości elektryczne elementów mikrostruktury metalu, które nie przewodzą dobrze prądu (np. szczelina pęknięcia, wtrącenia niemetaliczne, produkty korozji i erozji) są opisywane przez zespoloną przenikalność elektryczną ε^*

$$(13) \quad \varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0}\right) - j\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0}\right)$$

gdzie: ε_0 jest przenikalnością elektryczną próżni, ε' - część rzeczywista przenikalności, zwana stałą dielektryczną, reprezentuje zdolność materiału do gromadzenia pola elektrycznego kiedy na materiał oddziałuje zewnętrzne pole elektryczne; ε'' - część urojona przenikalności odwzorowuje straty rozpraszania (m.in. wpływ procesów relaksacji momentów dipolowych i związanych ładunków elektrycznych). Kąt

$$(14) \quad \tan \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

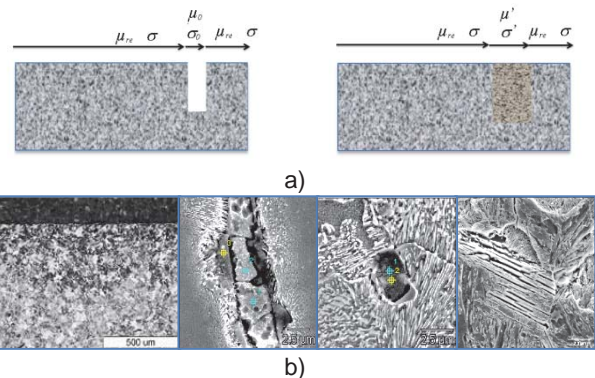
jest miarą opóźnienia w czasie polaryzacji dielektryka (elektronowej, jonowej i/lub orientacyjnej), wywołującej zmniejszenie natężenia pola elektrycznego wewnątrz dielektryka, w stosunku do zmian pola elektrycznego. Również w tym przypadku można zdefiniować estymator $\Delta(\tan \delta_\varepsilon)$, który odwzorowuje wpływ postępującej degradacji badanego materiału na jego właściwości dielektryczne

$$(15) \quad \Delta(\tan \delta_\mu) = (\tan \delta_\mu)_{measure} - (\tan \delta_\mu)_{isotropy}$$

Źródłem zmian wartości $\Delta(\tan \delta_e)$ może być składowa rzeczywista lub urojona przenikalności elektrycznej, lub równoczesne zmiany obu składowych.

Model elektryczny badanego materiału

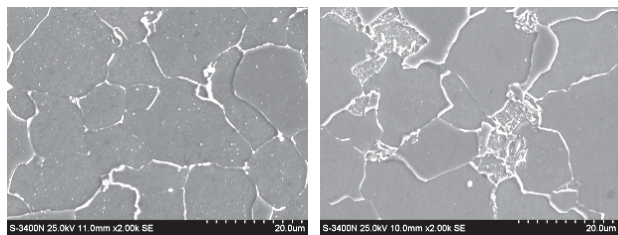
Pęknięcie to skokowa nieciągłość materiału (rys. 2.a) na granicy z powietrzem, które może inicjować się od powierzchni (zagadnienie HCF) lub pod powierzchnią materiału (zagadnienie LCF i VHCF) [11] – jest to końcowa faza degradacji zmęczeniowej materiału poprzedzająca urwanie lub złamanie elementu i stan awaryjny. Pęknięcie jest odwzorowane przez skokowe lokalne zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału [16, 17]. Degradacja zmęczeniowa materiału rozpoczyna się od zmian gęstości defektów struktury, m.in. dyslokacji i wtrąceń niemetalicznych (rys. 2.a), następnie pojawiają się przemiany fazowe struktury (rys 2.b) oraz źródła naprężeń własnych $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$. W końcowej fazie degradacji zmęczeniowej pojawiają się mikro- i makropęknięcia. Diagnozowanie postępującej degradacji materiału (słabych symptomów przed otwartym pęknięciem) wymaga stosowania czulszych algorytmów analizy danych pomiarowych oraz rozszerzonej analizy numerycznej [19]. Do ich opracowania pomocnym jest korzystanie z modelu badanego materiału opracowanego np. w bezpłatnym oprogramowaniu LTSpice [28].



Rys.2. Przykładowy wpływ degradacji zmęczeniowej metalu [4, 5, 8, 10, 11, 17] a) od lewej: schematy pęknięcia, jako lokalna nieciągłość materiału i skokowa zmiana σ , μ , ε oraz ciągła lokalna niejednorodność struktury; b) od lewej: rozdrobnienie (perlitu) struktury warstwy kontaktowej tocznej, popękane płytki cementytu, popękane zmęczeniowo wtrącenie niemetaliczne siarczku magnezu i tlenku aluminium; osadzone w rozsadzanych zmęczeniem mechanicznym pustkach

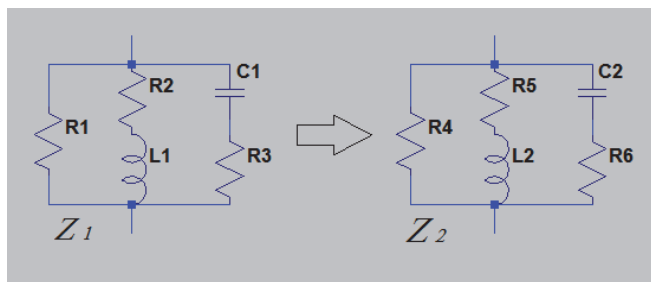
Materiał przewodzący prąd elektryczny, szczególnie metale para- i ferromagnetyczne, można modelować jako rzeczywistą cewkę (induktor) [30] – obwód równoległy, w którym oprócz gałęzi indukcyjności L i rezystancji szeregowej R_s występuje również gałąź pojemności C i rezystancji R_c oraz gałąź rezystancji R_p – rys. 3. Taki model materiału zapewnia właściwe odwzorowanie charakterystyki impedancji Z i admitancji Y w szerokim paśmie częstotliwości, w tym również w rezonansie równoległym (po dostrojeniu modelu do danych eksperymentalnych - wyników badań laboratoryjnych). Obserwowane w czasie eksploatacji t zmiany mikrostruktury (podczas degradacji zmęczeniowej materiału) – rys 3, zmieniają wartość 5 elementów opisujących rzeczywistą cewkę, co oznacza, że $L(t), R_s(t), C(t), R_c(t)$, oraz $R_p(t)$. W efekcie, zmienną w czasie jest również mierzona

impedancja $Z(t)$ i admitycja $Y(t)$ obwodu zastępczego oraz ich składowe rzeczywiste i urojone.



a)

b)



c)

Rys.3. Związek mikrostruktury materiału z mierzoną impedancją: a) stan początkowy stali 13MnHf (obecny ferryt i perlit) [8]; b) stan końcowy degradacji stali 13MnHf (obecny bainit, ferryt i węgliki) [8]; c) model induktora jako układ zastępczy badanego metalu – zmiany mikrostruktury, gęstości defektów i naprężeń własnych zmieniają wartość 5 elementów obwodu zastępczego

Każda zmiana struktury stali jest równoważna zmianie wartości parametrów elektrycznych i magnetycznych obwodu zastępczego LCR materiału, które można zidentyfikować poprzez pomiar impedancji.

Impedancja elektryczna i impedancja falowa

Impedancja jest bardzo ważnym parametrem używanym do identyfikacji charakterystyki obwodów elektrycznych, różnych podzespołów i elementów oraz materiałów konstrukcyjnych (przewodników i izolatorów). Wartość zmierzonej impedancji zależy od wielu czynników, m.in. częstotliwości i poziomu sygnału testowego. Wpływ tych czynników jest uzależniony od rodzaju materiału i poziomu jego degradacji. Do określenia impedancji niezbędny jest pomiar dwóch wielkości, ponieważ impedancja jest wielkością zespoloną. W przypadku badania odpowiedzi materiału na wymuszenie sinusoidalne zespolona impedancja $Z^*(\omega)$ jest opisana przez relację

$$(16) \quad Z^*(\omega) = Z' + jZ'' = |Z|e^{j\arg(Z)} = |Z|\angle\theta$$

gdzie: $Z' = \text{Re}(Z)$, $Z'' = \text{Im}(Z)$ są odpowiednio częścią

rzeczywistą i urojoną impedancji, $|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2}$

jest amplitudą impedancji, θ jest fazą ($\theta = \arctan(Z''/Z')$)

Wiele współczesnych przyrządów do pomiaru impedancji, w tym podręcznych i laboratoryjnych automatycznych mostków LCR oraz analizatorów wektorowych realizuje pomiar obu składowych impedancji i przetwarza wynik pomiaru do typowych parametrów: $|Z|$

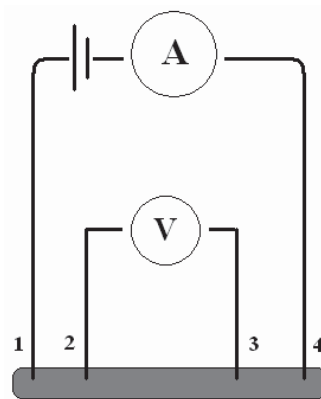
Q , $|Y|$, R , X , G , B , C i L [19].

Przyrządy umożliwiają automatyczną identyfikację impedancji elektrycznej i impedancji falowej materiału w

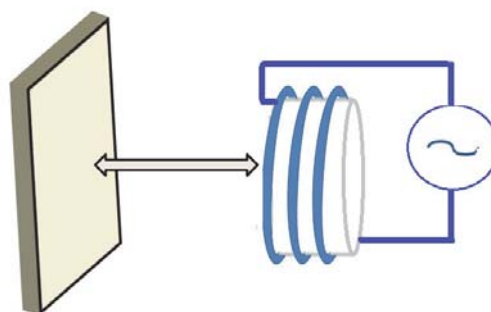
wybranym paśmie częstotliwości kołowej $\omega \in \langle \omega_{\min}; \omega_{\max} \rangle$.

Do wyznaczenia charakterystyki impedancji materiału wystarczy podłączyć badany obiekt do przyrządu (metoda 4T) lub sprzęgnąć go indukcyjnie z cewką pomiarową (metoda pośrednia) – rys. 4. W metodzie 4T mierzona jest impedancja elektryczna badanego materiału, natomiast w metodzie pośredniej mierzona jest impedancja elektryczna cewki pomiarowej, która jest wypadkową:

- impedancji cewki bez wpływu badanego materiału Z_0 ;
- parametrów sprzęgania cewki z badanym materiałem K_M wynikających m.in. z odległości cewki od powierzchni badanego elementu, wpływu warunków brzegowych (krawędzie i zmiana geometrii badanego obiektu), odwzorowanej przez impedancję falową cewka – badany materiał;
- impedancji elektrycznej badanego materiału.



a)



b)

Rys.4. Pomiar impedancji materiału: a) metodą stykową 4T, b) cewką pomiarową

Impedancja elektryczna jest definiowana w dziedzinie częstotliwości, jako współczynnik zespolonego napięcia $U^* = U_0 \exp(j\omega t)$ do zespolonego prądu $I^* = I_0 \exp(j\omega t)$, gdzie $\exp(j\omega t) \equiv \cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)$. Impedancja elektryczna jest odpowiednikiem prawa Ohma dla sygnałów przemiennych

$$(17) \quad Z^* = \frac{U^*}{I^*} = \frac{U_0}{I_0} e^{j\omega t} = |Z|e^{j\arg(Z)} = |Z|\angle\theta$$

Amplituda impedancji elektrycznej $|Z|$ odwzorowuje stosunek amplitudy napięcia różnicowego do amplitudy prądu, natomiast $\arg(Z)$ udostępnia informację o różnicy fazy θ pomiędzy napięciem i prądem, $j = \sqrt{-1}$ jest jednostką urojoną. W układzie współrzędnych kartezyjskich impedancję elektryczną opisuje relacja

$$(18) \quad Z^* = Z' + jZ'' = R + jX$$

gdzie: część rzeczywista impedancji jest rezystancją $R = |Z| \cos \theta$ a część urojona jest reaktancją $X = |Z| \sin \theta$

.Amplituda $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ faza $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$..

Reaktancja X jest wypadkową dwóch form: indukcyjnej (X_L) i pojemnościowej (X_C). Z definicji

$$(19) \quad X_L = \omega L$$

$$(20) \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Reaktancja pojemnościowa X_C i reaktancja indukcyjna X_L przyczyniają się do reaktancji całkowitej X następująco

$$(21) \quad X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

Stąd mierzona impedancja elektryczna

$$(22) \quad Z^* = Z' + jZ'' = R + j(X_L - X_C) = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

Impedancja falowa dotyczy fali promieniowania elektromagnetycznego i jest opisana przez

$$(23) \quad Z^* = \frac{E_0^-(x)}{H_0^-(x)} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$

gdzie: E_0^- jest polem elektrycznym i H_0^- jest polem magnetycznym w reprezentacji wskazów; μ , ε i σ są odpowiednio przenikalnością magnetyczną, przenikalnością elektryczną i konduktywnością materiału, w którym przemieszcza się fala [15].

Tangens strat

Pomiar tangensa kąta strat umożliwia ocenę zachodzących zmian strukturalnych dla metali ferromagnetycznych o strukturze przestrzennie centrowanej [32]. Na wartość tangensa strat całkowitych wpływają cztery składowe:

$$(24) \quad \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_w + \operatorname{tg} \delta_h + \operatorname{tg} \delta_r$$

gdzie: $\operatorname{tg} \delta$ - tangens kąta strat całkowitych, $\operatorname{tg} \delta_w$ - tangens kąta strat na prądy wirowe, $\operatorname{tg} \delta_h$ - tangens kąta strat na histerezę magnetyczną, $\operatorname{tg} \delta_r$ - tangens kąta strat na relaksację

Cewka z badanym materiałem zmienia wartość impedancji wraz ze zmieniającymi się parametrami badanego materiału. Tangens strat całkowitych można wyliczyć ze wzoru:

$$(25) \quad \mu = \frac{Z}{i\omega F} = \frac{(R_x - R_0) + i\omega L}{i\omega F} = \frac{L}{F} - \frac{jR_{corr}}{\omega F}$$

gdzie F : jest funkcją kilku zmiennych [8, 33].

$$(26) \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Im}(\mu_{eff})}{\operatorname{Re}(\mu_{eff})} = \frac{R_{corr}}{\omega L}$$

Składowe strat magnetycznych można oszacować na podstawie wzoru (27) dzieląc obie strony przez ωL [33]:

$$(27) \quad R_{corr} = hLHf + wLf^2 + nLf$$

gdzie: h – współczynnik strat histerezy, H – natężenie pola magnetycznego, f – częstotliwość pola magnetycznego, w – współczynnik strat na prądy wirowe, n – współczynnik strat dodatkowych (m.in. relaksacji).

Symptomy i parametry diagnostyczne stopnia degradacji materiału

Punktem wyjścia do wyznaczenia symptomów diagnostycznych są:

- wyniki badań laboratoryjnych (impedancji, mikrostruktury) uzyskanych dla znormalizowanych rozmiarowo próbek
- współczesne podstawy teoretyczne pomiaru i analizy impedancji
- relacja (28) – (30) zdefiniowana przez Forstera i jego współpracowników [31] opisująca wpływ sprzęgania cewki pomiarowej z badanym rdzeniem.

$$(28) \quad \mu_{sk} = \frac{2 \cdot J_1(kr_0)}{kr_0 \cdot J_0(kr_0)}$$

$$(29) \quad \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_{re} (\operatorname{Re}(\mu_{sk}))$$

$$(30) \quad \frac{R - R_0}{\omega L_0} = \eta \mu_{re} (-\operatorname{Im}(\mu_{sk})),$$

Różnica wartości impedancji ΔZ_m liczba zespolona dla cewki z rdzeniem Z_c i bez rdzenia Z_0 umożliwia pełną diagnostykę zmian zmęczeniowych materiału przewodzącego prąd elektryczny. Jej składowe i amplituda odwzorowują wypadkowy wpływ współczynnika sprzęgania cewki z materiałem $\eta(d)$ oraz właściwości elektrycznych i magnetycznych materiału (konduktywność γ , przenikalność elektryczną ε i przenikalność magnetyczną μ), co odwzorowuje relacja (31).

$$(31) \quad Z(f_{EM}, t) = \frac{u(f_{EM}, t)}{i(f_{EM}, t)} = R + jX_L = |Z| e^{-j\theta} = Z_c + \Delta Z_m = f(\sigma, \mu, \varepsilon, \eta, f_{EM}, t).$$

Do zobrazowania wyników analizy jest stosowana m.in. płaszczyzna impedancji (podobnie jak w defektoskopii prądami wirowymi), przy czym autorzy stosują odwrotny układ osi w celu zapewnienia poprawnego odwzorowania $(\Delta R) / \omega L_0 = f(\omega L / \omega L_0)$ funkcji, $\Delta R = R - R_0$

(jednoznacznego przypisania wartości funkcji do argumentu w identyfikowanej relacji (31). Do oceny parametrów sprzęgania cewki z badanym materiałem stosuje się również analizę poziomu odbicia promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez cewkę od granicy badanego materiału – współczynnik Γ (liczba zespolona) wyznaczany na podstawie zmierzonej impedancji obwodu (cewka – badany materiał) oraz impedancji odniesienia Z_0 (suchego powietrza, $Z_0 = 377 + j \times 0$ [Ω] wg wzoru (32).

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

W przypadku używania toru pomiarowego z dwoma cewkami możliwe jest wyznaczenie transmisyjności T promieniowania elektromagnetycznego przez badany materiał. W rozważaniach teoretycznych jest on uznawany jako parametr proporcjonalny do efektywnej przenikalności [31].

$$(33) \quad \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_{rel}(\operatorname{Re}(\Gamma)),$$

$$(34) \quad \frac{R - R_0}{\omega L_0} = \eta \mu_{rel}(-\operatorname{Im}(\Gamma)),$$

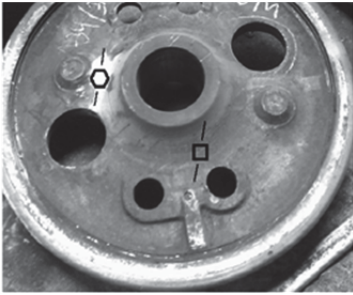
$$(35) \quad T = \frac{7603}{\sigma D \mu_{rel} f (a+b)} = \frac{K}{\sigma D}.$$

gdzie: D – grubość testowanej płyty rozdzielającej cewki; a – odległość cewki wzbudzającej; b – odległość cewki pomiarowej, K – stała przyrządu.

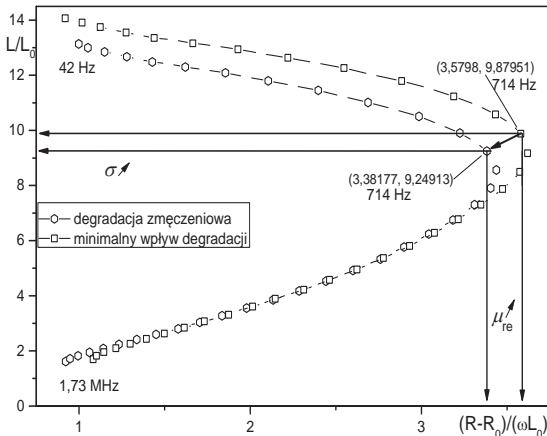
Przykładowe wyniki badań.

Szerokopasmowa identyfikacja impedancji staliwa

Materiał do badań (staliwo) został pobrany z koła kolejowego. Szerokopasmowy pomiar impedancji wykonano mostkiem laboratoryjnym LCR - HIOKI 3532. Miejsce pobrania próbek i uzyskane wyniki badań przedstawiono na rysunku 5a i 5b. Krzywą unormowanych składowych impedancji dla dwóch stref zmęczenia materiału wyznaczono analitycznie i potwierdzono pomiarowo. Bardzo dobre wyniki uzyskano również z przeliczeń pomiaru indukcyjności i rezystancji szeregowy wykonanych podręcznymi mostkami LCR o czterech do pięciu częstotliwościach pomiarowych (100, 120, 1000, 10000 i 100000 Hz) [2]. Na rysunku 6 przedstawiono parametry wnikania pola magnetycznego.



a)

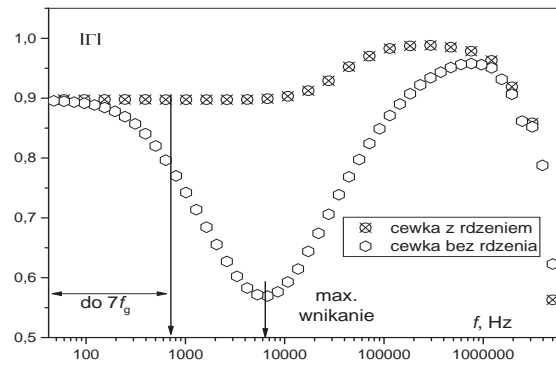
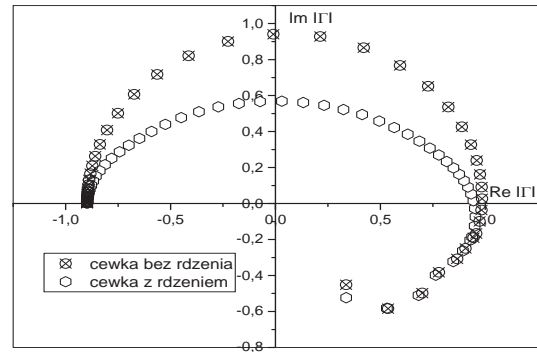


b)

Rys.5: Miejsca pobrania materiału do badań – a i uzyskane wyniki pomiaru impedancji - b.

Wg danych literaturowych istotny zakres pomiarowy dla badanego materiału magnetycznego (staliwa) może być ograniczony do 1000 Hz [17], co wynika z kryterium efektywnej głębokości wnikania promieniowania elektromagnetycznego do materiału i występowania prądów wirowych w warstwie przypowierzchniowej materiału, a nie maksymalnego poziomu absorpcji promieniowania przez materiał i jakości dopasowania sondy do badanego materiału. Optymalizację toru pomiarowego do danego

materiału realizuje się poprzez zmianę wartości indukcyjności, pojemności i rezystancji sondy pomiarowej i analizę charakterystyki $\Gamma(f)$.



Rys.6. Od góry: odwzorowanie na płaszczyźnie współczynnika odbicia Γ ; poniżej – identyfikacja dopasowania parametrów sondy pomiarowej do impedancji badanego materiału oraz poziomu wnikania pola elektromagnetycznego do badanego materiału

Do badań autorzy używali toru pomiarowego, którego częstotliwość rezonansowa obwodu LCR (cewka testująca – badany materiał) zawierała się powyżej 1MHz, tj. pomijalny był wpływ pojemności obwodu na obserwowane zmiany rezystancji i reaktancji. Podczas badań stwierdzono, że maksymalny poziom absorpcji promieniowania elektromagnetycznego przez badany materiał zawierał się w pobliżu 7 kHz (rys. 7) i wynika z bieżących właściwości elektrycznych badanego materiału (konduktywności i przenikalności magnetycznej). Pośrednio współczynnik Γ odwzorowuje również wpływ prądów wirowych indukowanych w badanym materiale i ich rzeczywisty rozkład. Praktyczny zakres badawczy wskazany przez Förstera jest niższy i mieści się w przedziale częstotliwości granicznych definiowanych wzorem (36) od $1f_g$ do $7f_g$.

Na wartość częstotliwości granicznej ma wpływ wymiar średnicy próbki D_p , przewodność elektryczna γ , przenikalność magnetyczna względna μ_{re} .

$$(36) \quad f_g = \frac{2}{\pi D_p^2 \gamma \mu_{re} \mu_0}.$$

W wielu przypadkach diagnozowania próbek o nie opisanych w literaturze (pręty lub elektrody spawalnicze ze stopu miedzi i niklu do spawania staliwa) odpowiednią lokalizację zakresu częstotliwości można było uzyskiwać poprzez dobór średnicy próbki D_p .

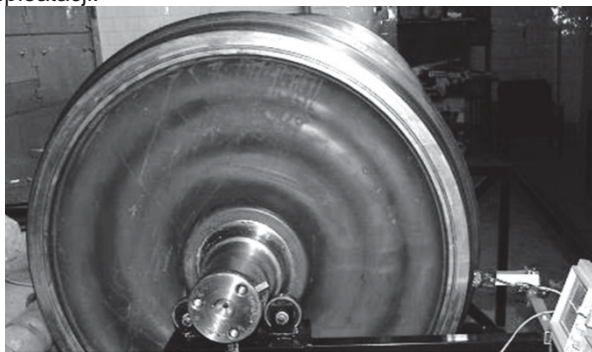
Zdalna detekcja defektów sondą LDC1000

Obiektem badań był klasyczny wzorec defektów stosowany w metodzie magnetycznej – prostokątna płytką na której nacięte zostały poprzeczne rowki o różnej szerokości i głębokości. Pomiaru wykonano dla różnych częstotliwości podawanej na cewkę powierzchniową sondy LDC1000 (w paśmie od 2.5 kHz do 5 MHz), z odległości 2 mm nad badaną powierzchnią. Po numerycznym przetworzeniu danych pomiarowych (indukcyjności L i częstotliwości rezonansu równoległego SRF) stwierdzono, że uzyskane wyniki badań zapewniają wiarygodną detekcję sztucznych wad struktury oraz możliwość rozdzielenia wpływu zmian σ i μ .

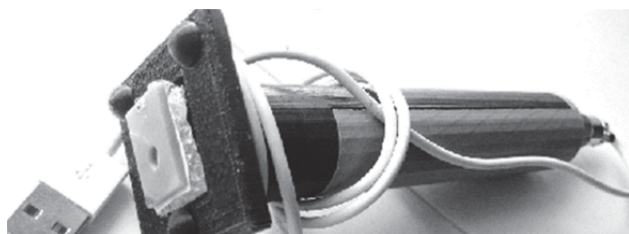
Przetwornik indukcyjny LDC1000 w badaniu zmian parametrów degradacji zmęczeniowej materiału – przykład dla transportu

Przetwornik indukcyjny LDC1000 działa w technologii bezkontaktowej, umożliwiając tani i precyzyjny pomiar właściwości parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału. Stosowana technologia umożliwia również precyzyjny pomiar składu badanego metalu (po wcześniejszej kalibracji na wzorcach). Przetwornik LDC1000 zapewnia 16-bitową rozdzielczość pomiaru rezystancji R_p (impedancji w rezonansie równoległym), 24-bitową rozdzielczość indukcyjności L oraz pomiar w zakresie częstotliwości obwodu LRC od 5 kHz do 5 MHz. Moduł umożliwia pomiar częstotliwości rezonansu równoległego, składowej rzeczywistej impedancji i indukcyjności obwodu cewka – badany obiekt.

Na rysunku 7 pokazano stanowisko pomiarowe i prototyp cyfrowej sondy pomiaru impedancji metodą rezonansu równoległego $Z_p = R_p + j \times 0$ [Ω] wykonany na bazie przetwornika LDC1000, stosowany przez autorów do pomiaru zmian parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału zestawów kołowych w eksploatacji.



a)



b)

Rys.7. Widok na zestaw kołowy stanowiska pomiarowego - a i b) prototyp sondy zbudowany na bazie LDC100 [29]

Badania przeprowadzone sondą LDC1000 na testowej obręczy koła kolejowego wykazały następujące zmiany parametrów powierzchni tocznej - tabela 1.

Tabela. 1. Zmiana parametrów materiału w punktach powierzchni testowej

Lokalizacja punktów pomiarowych				
Wyniki pomiarów przetwornikiem LDC1000				
Punkt	Proximity Data (dane RAW)	L [μH]	R_p [kΩ]	SRF [MHz]
1	26575	12.94	0.964	4.42438
2	26430	12.96	0.969	4.42097
3	25960	13.08	0.985	4.40064
4	26800	13.20	0.957	4.38059
5	26700	13.37	0.961	4.35266
6	25980	13.02	0.984	4.41077

Parametry zmierzone w punktach pomiarowych 1 i 2 odwzorowują materiał bez wad. W punktach pomiarowych 3 – 6 występują złożone defekty struktury (równoczesne zmiany mikrostruktury i naprężeń własnych), które zostały wygenerowane w warunkach laboratoryjnych i zweryfikowane metodami laboratoryjnymi [8, 29]. Największe zmiany danego parametru zaznaczono w tabeli pogrubieniem czcionki i kolorem czerwonym. Zacięciem pola komórki tabeli zaznaczono trzy zmiany własności struktury Wyniki pomiarów uzyskane przetwornikiem LDC1000 umożliwiają wiarygodne różnicowanie przyczyny anomalii własności elektromagnetycznych materiału.

Podsumowanie

Możliwe jest diagnozowanie stopnia degradacji struktury stalowych i staliwnych elementów metodą niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji, realizowanej z wykorzystaniem tanich przenośnych mostków LCR i precyzyjnego przetwornika LDC100 firmy Texas Instruments.

Rozwój miniaturowych, mikroprocesorowych modułów pomiarowych obniża koszty badań nieniszczących o kilka rzędów wielkości oraz otwiera nowe możliwości badawcze wiarygodnej detekcji wczesnej fazy degradacji zmęczeniowej materiału (w fazie poprzedzającej otwarte pęknięcie), realizowanej w rzeczywistych warunkach eksploatacji maszyn i urządzeń.

Wraz z rozwojem technik mikroprocesorowych badania procesu degradacji materiału nabrały nowego tempa i znacznie poszerzyły krąg badaczy. Badania takie są prowadzone wspólnie głównie na potrzeby transportu kolejowego i lotniczego na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej i Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Sonda LDC1000 znalazła innowacyjne zastosowanie w badaniu zmian eksploatacyjnych stali austenitycznej kołpaków wirników generatorów na potrzeby pracy doktorskiej pracownika EthosEnergy w Lublińcu.

LITERATURA

- [1] <http://www.ndt.net>
- [2] http://www.uni-rend.com/en/product/2014_0728_739.html
- [3] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lcdc1000.pdf>
- [4] http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/36.pdf
- [5] <http://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/251.pdf>
- [6] <http://www.ishmii.org/>

- [7] <https://www.phmsociety.org>
- [8] Żurek Z. H. Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki stali, Gliwice 2012, ISBN 978-83-7880-092-7
- [9] Witoś M., Zieja M., Komputerowe wsparcie badań nieniszczących i monitorowania konstrukcji na przykładzie metody MPM, XVIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu” TransComp 2014, Zakopane, 1- 4.12.2014, Logistyka 6/2014, s. 11233-11242, doi: 10.13140/2.1.4519.8406
- [10] Żurek Z. H. Badanie stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym, Gliwice 2005, ISSN 0072-4688
- [11] Dobrzański J., Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki. Open Access Library, 2011, t. 3, s. 1-228, ISBN 83-89728-90-7
- [12] Nabarro F. R. N., Dislocations in a Simple Cubic Lattice. Proc. Phys. Soc. 59(2), 1947, 256-272
- [13] Shaniavski A.A.: Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation. Publishing House of Scientific and Technical Literature “Monography”, Ufa 2007, (ros.)
- [14] Vilysa 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 Moravici
- [15] Witos M. Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie. Prace Naukowe ITWL, z. 29, 2011, s. 1-324, doi: 10.13140/RG.2.1.4341.4560
- [16] 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
- [17] Żurek Z. H., Duka P. RLC circuits for material testing and NDT, Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL, Katowice 2015, PL ISBN 978-83-931909-8-0
- [18] Keysight Technologies, Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques, 4th Edition, Keysight Technologies, 2014, <http://www.keysight.com>
- [19] Agilent Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques, 4th Edition, Agilent Technology Inc., 2013, <http://www.agilent.com/find/impedance>
- [20] Sikora R. Teoria pola elektromagnetycznego, WNT Warszawa 1985, ISBN 83-204-0661-7
- [21] Newnham R., Properties of materials. Anisotropy, symmetry, structure, Oxford University Press, 2005
- [22] G. Lei, P.C. Dong, S.Y. Mo, S. Yang, Z.S. Wu, S.H. Gai: Calculation of full permeability tensor for fractured anisotropic media. J. Petrol Explor. Prod. Technol (2015) 5:167-178, doi: 10.1007/s13202-014-0138-6
- [23] <http://eddy-current.com/conductivity-of-metals-sorted-by-resistivity/>
- [24] X. Ma, A.J. Peyton, Y.Y. Zhao, Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals. NDT&N International 39(2006), 562-568
- [25] Leunis E. et al.: Quantitative phase analysis of multi-phase steels – PHAST. Final report EUR 22387 EN, European Communities 2006, ISBN 92-79-02658-5, ISSN 1018-5593
- [26] Hofmann U. et al.: Non-destructive evaluation (NDE) of quality characteristics of heavy plates. Final report EUR 21436 EN. European Communities 2005, ISBN 92-79-00085-3
- [27] Stolzenberg M. et al.: Online material characterisation at strip production (OMC). Final report EUR 25879 EN. European Communities 2013, ISBN 978-92-79-28961-3, doi: 10.2777/77313
- [28] <http://www.linear.com/designtools/software/>
- [29] Żurek Z. H. New measuring applications of inductive methods in diagnostic of material and steel structure, IC SPETO, 2015
- [30] Green L., RF-inductor modeling for the 21st century <http://m.eet.com/media/1142818/19256-159688.pdf>
- [31] Heptner H., Stroppe H. Magnetische und magnetoinduktive Werkstoffprüfung Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1962, VLN 152-915/34/69
- [32] Rasek J., Kinetyka zjawisk wydzielania i rozpuszczania w roztworach stałych, Uniwersytet Śląski, 1982, ISBN83-00-00562-5
- [33] Stokłosa Z., procesy magnesowania i straty magnetyczne w amorficznych materiałach miękkich na bazie żelaza, Uniwersytet Śląski 2012, ISBN 978-83-60743-64-5

Autorzy:

*Dr hab. inż. profesor nzw. Politechniki Śląskiej
Zbigniew H. ŻUREK, Politechnika Śląska, Wydział Transportu,
Katedra budowy pojazdów, Katowice, zbigniew.zurek@polsl.pl*

*Dr inż. Mirosław WITOŚ, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,
Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki, ul. Ks. Janusza 6, 01-494 Warszawa skr.poczt.96@itwl.pl, e-mail: witosm@itwl.pl*