

Zbigniew Hilary Żurek, Bartosz Chmiela, Politechnika Śląska, Gliwice  
 Paweł Idziak, Krzysztof Kowalski, Politechnika Poznańska, Poznań  
 Piotr Wolnik, Schneider Electric Transformers Poland Sp. z o. o., Mikołów

## MAGNETO - SPREŻYSTOŚĆ W STALACH KRZEMOWYCH DIAGNOSTYKA STRUKTURY I DEFektU - EKSPERYMENT

### MAGNETO-ELASTICITY IN SILICON STEELS STRUCTURE AND DEFECT DIAGNOSTICS - AN EXPERIMENT

**Streszczenie:** Blachy krzemowe o zastosowaniach elektrotechnicznych są produkowane ze względu na przeznaczenie. W obwodach magnetycznych transformatorów struktura blach jest projektowana ze względu na zgodność kierunku magnesowania z kierunkiem wektora indukcji. Są to blachy o strukturze zorientowanej (GO - e.g. anisotropic transformer sheets). W napędach przetwarzających energię pola magnetycznego na ruch obrotowy stosujemy blachy o strukturze niezorientowanej (NGO - e.g. isotropic or generator sheets). Defekty struktury będące wynikiem cięcia lub wycinania (dowolnymi technikami mają wpływ na deformację kierunku magnesowania bez względu na stosowane techniki cięcia. W procesie tym uczestniczą zjawiska magneto-sprężyste i odwrotne, znane jako efekty Vilarięgo i Joule'a. W artykule opisano kierunkowe zmiany magnesowania na dwóch modelach testowych przygotowanych z blachy krzemowej M130 w obszarze materiałowym, elektrotechnicznym i mechanicznym, a także w obszarze badań nieniszczących NDT (Non-destructive testing) i SHM (Structural health monitoring) monitorowanie stanu strukturalnego SHM, a także monitorowanie stanu w procesie eksploatacji (ang. Condition Monitoring - CM).

**Abstract:** Silicone sheets for electrical purposes are made for their intended purpose. In transformer magnetic circuits, the sheet structure is designed due to the compatibility of the direction of magnetization with the direction of the induction vector. These are oriented metal sheets (for example, anisotropic transformer sheets). In drives that convert the energy of a magnetic field into rotational motion, we use plates with a non-oriented structure (NGOs — for example, isotropic or generator sheets). Design defects resulting from cutting or cutting (using any methods that affect the deformation of the magnetization direction, regardless of the cutting methods used.) This process includes magneto-elastic and backward effects, known as the Vilary and Joule effects. tests prepared from silicon steel sheet M130 in the material, electrical and mechanical fields, as well as NDT (non-destructive testing) and SHM (Structural health monitoring), monitoring the state of structures SHM, and monitoring the state (Condition Monitoring - CM).

**Słowa kluczowe:** naprężenia resztkowe, defekty materiału, struktury, nadzór eksploatacyjny, NDT, SHM, CM, F. Förster znormalizowane składowe impedancji, wykresy Förstera

**Keywords:** residual stresses, material defects, NDT, SHM, CM, F. Förster normalized impedance components, Foresters Plot

### 1. Wprowadzenie

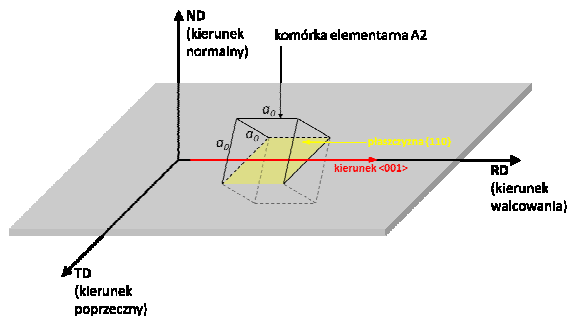
Materiały magnetycznie miękkie poddane naprężeniom mechanicznym, bez względu na przeznaczenie oraz zastosowaną obróbkę mechaniczną, podatne są na zmianę właściwości magnetycznych. W skrajnym przypadku mogą nastąpić zmiany dyskwalifikujące obrobione już detale. Opracowanie i zaimplementowanie takich i względnie dokładnych metod pozwalających oszacować, w trakcie produkcji i podczas eksploatacji, rozmiar zmian tych właściwości staje się dzisiaj jednym z ważniejszych zadań pomiarowo diagnostycznych. Dodatkowo wdrażane metody powinny być metodami, jeśli to w ogóle jest możliwe, bezinwazyjnymi i szyb-

kimi co do czasu prowadzenia weryfikacji. W prezentowanym materiale przedstawiono propozycję jednej z takich metod. Za kryterium stosowalności przyjęto powtarzalność uzyskiwanych wyników badania, ich zgodność z parametrami podawanymi przez producenta w przypadku próbek nie poddawanych naprężeniom mechanicznym oraz czas badania próbki i koszt przeprowadzenia analizy.

### 2. Tekstura blach transformatorowych NGO i GO

Blachy transformatorowe są najczęściej wytwarzane ze stali krzemowej w sposób, aby kieru-

nek  $\langle 001 \rangle$  każdego ziarna był równoległy do płaszczyzny blachy [8, 9, 12, 13, 14]. Wówczas uzyskuje się materiał o możliwie najlepszych parametrach magnetycznych. Jest to stal ferrytyczna o regularnej przestrzenie centrowanej strukturze tzn. typu A2. Od 1935 roku produkowane są blachy charakteryzujące się teksturą Gossa, w której płaszczyzny  $\{110\}$  są równoległe do powierzchni blachy, a kierunki  $\langle 001 \rangle$  są równoległe do kierunku walcowania. Tekstura taka, w powszechnie stosowanej notacji, opisana jest jako  $\{110\}\langle 001 \rangle$  (rys. 1).

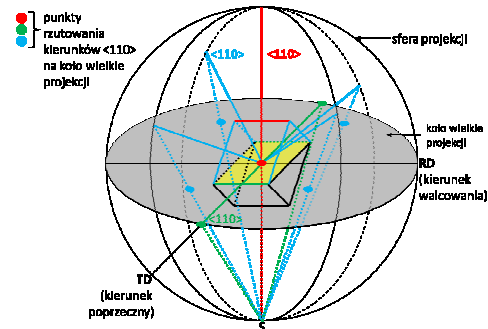


Rys. 1. Tekstura Gossa  $\{110\}\langle 001 \rangle$

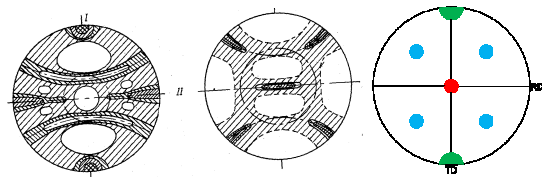
Teksturę Gossa przedstawia się za pomocą projekcji stereograficznej wybranych kierunków krystalograficznych na kole wielkiej projekcji. Do obrazowania tekstur metali i stopów o sieci typu A2 wykorzystuje się zazwyczaj projekcję kierunków  $\langle 110 \rangle$  normalnych do płaszczyzn  $\{110\}$ , tak jak na rysunku 2. W tym celu komórkę elementarną A2 zorientowaną zgodnie z teksturą Gossa umieszcza się w środku sfery projekcji i wykreśla się kierunki  $\langle 110 \rangle$  (rys. 2 – linie ciągłe w kolorach: czerwonym, zielonym i niebieskim). Następnie punkty przecięcia się kierunków  $\langle 110 \rangle$  ze sferą projekcji łączy się z dolnym punktem S sfery projekcji (rys. 2 – linie kropkowane). Punkty przecięcia się linii rzutowania z kołem wielkim projekcji są biegunami badanych płaszczyzn sieciowych  $\{110\}$ . Z projekcji stereograficznej wykreślana jest figura biegunowa (rys. 3).

W celu określenia tekstury blach o ziarnach zorientowanych (ang. grain-oriented – GO) wykonano badanie techniką dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (ang. Elektron Back-Scatter Diffracton – EBSD). Badaniu poddano obszar na powierzchni blach o wymiarach  $1,25 \text{ mm} \times 0,935 \text{ mm}$ , stosując krok przesuwu wiązki elektronowej równy  $5 \mu\text{m}$ . Wyznaczona za pomocą techniki EBSD figura biegunowa  $\{110\}$  ujawniła wyraźną teksturę Gossa (rys. 4a): wszystkie ziarna w badanym obszarze

charakteryzowały się identyczną orientacją krystalograficzną  $\{110\}\langle 001 \rangle$ .

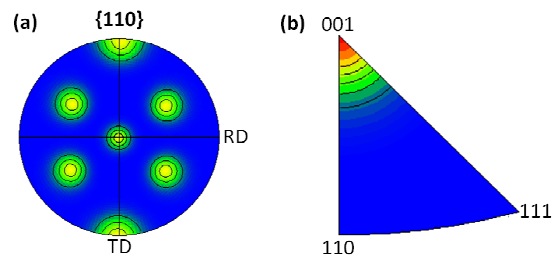


Rys. 2. Projekcja stereograficzna kierunków  $\langle 110 \rangle$  dla tekstury Gossa  $\{110\}\langle 001 \rangle$



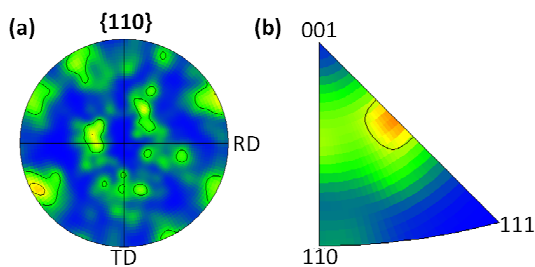
Rys. 3. Figura biegunowa:  $\langle 110 \rangle$  tekstura Gossa  $\{110\}\langle 001 \rangle$ , Williams, 1937 r - z prawej

Równoległość kierunku  $\langle 001 \rangle$  do kierunku walcowania jest wyraźnie widoczna na odwrotnej figurze biegunowej (rys. 4b).



Rys. 4. Figura biegunowa  $\langle 110 \rangle$  (a) oraz odwrotna figura biegunowa (b) dla blachy transformatorowej firmy Sumitomo

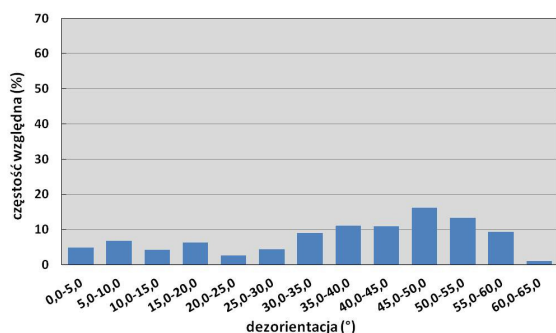
Dla porównania wykonano badanie izotropowej stali krzemowej (ang. Non Oriented – NGO) o strukturze ferrytycznej (A2). Blacha była wielokrotnie walcowana w różnych kierunkach. Mapa orientacji krystalograficznej ujawniła przypadkową orientację ziaren. Figura biegunowa  $\{110\}$  (rys. 5a) potwierdziła brak wyraźnej tekstury badanej blachy. Nie można wyróżnić w niej jednego uprzywilejowanego kierunku krystalograficznego zgodnego z kierunkiem walcowania. Na odwrotnej figurze biegunowej (rys. 5b) widoczne jest maksimum o małej intensywności, odpowiadające odchyleniu kierunku  $[001]$  od kierunku walcowania o kąt  $22^\circ$ .



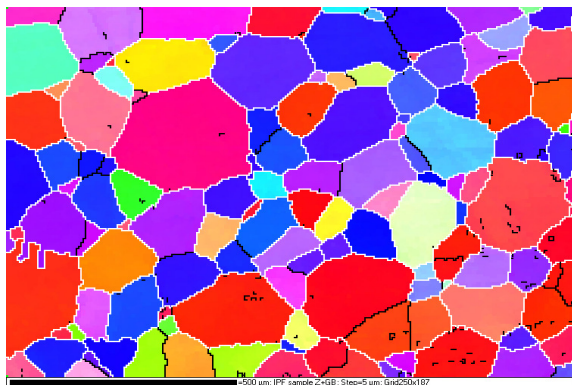
Rys. 5. Figura biegunowa  $\langle 110 \rangle$  (a) oraz odwrotna figura biegunowa (b) dla blachy transformatorowej o wielu kierunkach walcowania

Procentową zmianę dezorientacji ziaren oraz rozkład dezorientacji granic ziaren w blachach NGO przedstawia rysunek 6, a dla blach GO przedstawia rysunek 7. Wielokierunkowa orientacja blach generatorowych NGO, jak i precyzyjna kierunkowa orientacja blach transformatorowych GO jest podyktowana wymogami pracy urządzeń. Dla blach transformatorowych jest to istotna cecha [8, 15] pozwalająca osiągnąć dużą sprawność przetwarzania energii elektrycznej. Jest ona kontrolowana metodami w ramach SHM (ang. Structural Health Monitoring) w procesie produkcji blachy.

a)

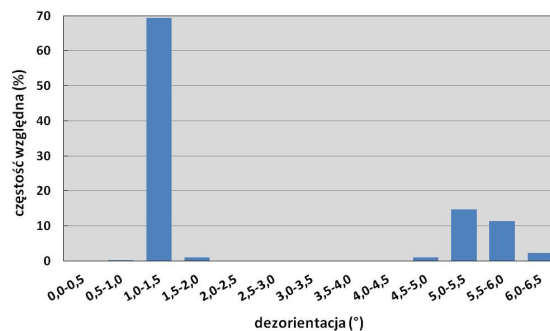


b)

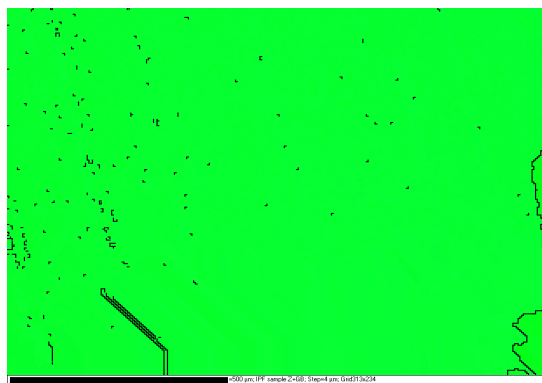


Rys. 6. Rozkład dezorientacji granic ziaren oraz mapa orientacji krystalograficznej dla blachy transformatorowej NGO

a)



b)



Rys. 7. Mapa orientacji krystalograficznej oraz rozkład dezorientacji granic ziaren dla blachy transformatorowej GO

### 3. Wybrane metody monitorowania stanu NDT MC SHM – efekty magnetoelastyczne

Obserwacja zmian przenikalności magnetycznej danego materiału pozwala określić zmiany jego głównych parametrów magnetycznych zależnie od kierunku magnesowania. W testowanej metodzie wykorzystano efekt Villariego [2, 3, 7]. Blacha krzemowa M130 GO użyta w testach charakteryzuje się znakomitą kierunkowością (rys 7.). Odwracalne zmiany wywołane naprężeniami mechanicznymi, w ograniczonym zakresie, występują we wszystkich materiałach spolaryzowanych magnetycznie (zmiany magnetoelastyczne). Dotyczy to materiałów wykazujących magnetostrykcję, a szczególnie tych z technologicznie zadaną kierunkowością. Zmiany magnesowania są zależne od kierunku i od wartości naprężeń oraz ukierunkowania technologicznego domen magnetycznych (dla blach GO). Współczynnik magnetostrykcyjny  $\lambda$  jest równoważny współczynnikowi czułości  $d$ , ( $d \equiv \lambda$ ). Względna zmiana w przenikalności magnetycznej  $S$  na jednostkę naprężenia mechanicznego określa zależność:

$$S_{\mu} = \frac{\Delta\chi}{\chi} : \frac{\Delta\sigma}{\sigma}, \quad (1)$$

gdzie:  $\chi$  – podatność magnetyczna,  $\sigma$  – naprężenie mechaniczne.

Przestrzenne rozmieszczenie magnetycznych momentów obszaru namagnesowania samorzutnego w kryształach jest różne w poszczególnych materiałach. Na przykład dla żelaza kierunek ten jest zgodny z osią  $\langle 000 \rangle$ , dla niklu  $\langle 111 \rangle$ . Magnetostrykcja kryształów o strukturze regularnej rozróżnia współczynniki magnetostrykcji liniowej dla kierunków określonych osiami krystalograficznymi. Współczynnik magnetostrykcji jest zależny także od modułu sprężystości:

$$\lambda_{\langle 100 \rangle} = \frac{2AJ_s^2}{G}, \quad (2)$$

$$\lambda_{\langle 111 \rangle} = \frac{4AJ_s^2}{3G}, \quad (3)$$

gdzie:  $G$  - moduł sprężystości dla ścinania (moduł Kirchhoffa),  $A$  - stała zależna od struktury kryształu ( $A=0,4$  dla sieci przestrzenie centrowanej),  $J_s$  - magnetyzacja nasycenia,  $\lambda_{\langle 100 \rangle}$ ,  $\lambda_{\langle 111 \rangle}$  oznaczają maksymalne wartości magnetostrykcji.

Zmiany indukcyjności obwodu magnetycznego przetwornika pomiarowego wynikają z lokalnych zmian przenikalności magnetycznej. Przenikalność magnetyczna materiału ferromagnetycznego jest funkcją wielu czynników. Najważniejsze z nich są ujęte w zależności:

$$\mu_r \approx f\left(\frac{J_s^2}{3\mu_0 \lambda_s \sigma}\right) = f\left(\frac{J_s^2}{3\mu_0 \lambda_s E \varepsilon}\right), \quad (4)$$

gdzie:  $\mu_r$  - przenikalność względna,  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni,  $E$  - moduł Younga,  $\varepsilon$  - odkształcenie wzdłużne,  $\lambda_s$  - współczynnik magnetostrykcji nasycenia.

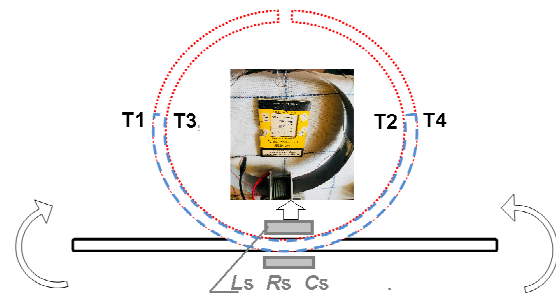
Przestrzenny rozkład odkształceń w badanym arkuszu blachy krzemowej wpływa na rozkład zmian przenikalności magnetycznej. Istotny udział w wyznaczaniu mapy odkształceń ma współczynnik Poissona:

$$\nu = \frac{E - 2G}{2G} \quad (5)$$

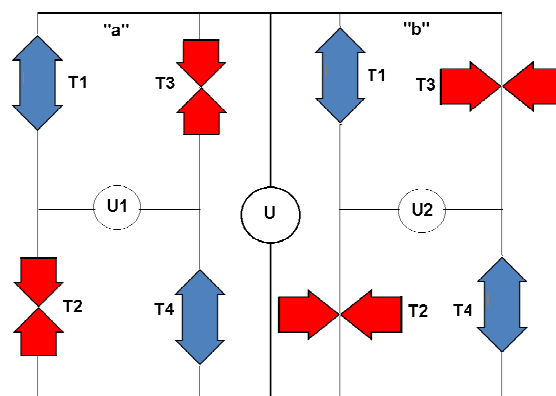
gdzie:  $\nu$  - współczynnik (liczba) Poissona

Wartość współczynnika Poissona dla żelaza wynosi:  $\nu = 0,21$  K 0,259; dla stali konstrukcyjnej: 0,27...0,30; dla stali krzemowej NGO 0,29 - 0,31. Dla stali krzemowej GO jego wartość jest mniejsza niż dla stali NGO.

Dla stali krzemowej M130 o ziarnach zorientowanych (GO) przeprowadzono eksperyment z pomiarem odkształceń klasycznymi tensometrami oporowymi. Wyznaczono zmianę wartości współczynnika Poissona spowodowaną naprężeniem mechanicznym i narzuconym kierunkiem magnesowania zgodnie z procesem technologicznym. Wyznaczone pomiarowo wartości zmiany sztywności poprzecznej do kierunku magnesowania są różne dla stali NGO i GO. Sposób rozmieszczenia tensometrów na badanym pasku blachy krzemowej GO o długości 70 cm przedstawia rysunek 8. Schemat blokowy obwodu pomiarowego z przetwornikami tensometrycznymi przedstawia rysunek 9.



Rys. 8. Koncepcja stanowiska pomiarowego; lokalizacja tensometrów pomiarowych



Rys. 9. Schemat połączeń tensometrów

Korzystając z zależności definiujących wyjściowe wartości napięć mostków tensometrycznych  $U_1$ ,  $U_2$  (rys. 9):

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{\Sigma \varepsilon_1 UK}{4}, & \Sigma \varepsilon_1 &= \frac{4U_1}{UK} \\ U_2 &= \frac{\Sigma \varepsilon_{2(v)} UK}{4}, & \Sigma \varepsilon_{2(v)} &= \frac{4U_2}{UK} \end{aligned}, \quad (6)$$

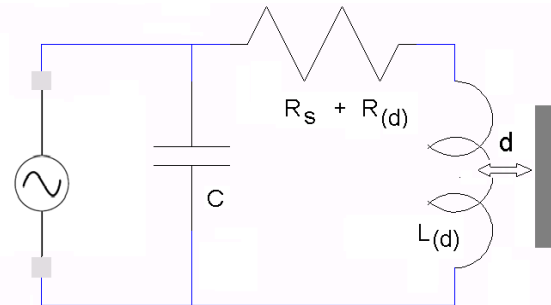
gdzie:  $U_1, U_2$  - napięcia wyjściowe,  $K$  - stała tensometru,  $\varepsilon$  - współczynnik odkształcenia,

wyznaczono współczynnik Poisson'a (liczba Poisson'a). Wyznaczona na podstawie pomiarów wartość liczby Poissona dla próbki stali GO (M130) zawiera się w przedziale 0,14-0,2 i jest mniejsza od wartości podawanej w dostępnej literaturze [2]. Wynik ten będzie analizowany w kolejnych badaniach pomiarowych ze względu na wpływ geometrii blachy i jej grubości.

#### 4. Wybrane metody monitorowania stanu NDT MC SHM – unormowane składowe impedancji

Monitorowanie stanu materiału w nowoczesnych systemach NDT i CM wymaga przesunięcia granicy wykrywalności powstających uszkodzeń zmęczeniowych w kierunku pierwszych, subtelnych i lokalnych zmian struktury materiału. Monitorowanie stanu struktury SHM potwierdza zgodność stanu materiału na wyjściu linii produkcyjnej z wymaganiami kontroli jakości. Dla przeprowadzenia takich testów współcześnie powszechnie stosowane są metody wiropądowe i indukcyjne [4, 6, 10, 11, 15]. Pomiar zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej materiału umożliwia wykrycie degradacji lub uszkodzeń zmęczeniowych już we wczesnej ich fazie [5], przy jednoczesnym zachowaniu kierunkowości magnesowania. Możliwość tę zapewniają, po pewnych modyfikacjach, metody opracowane w pierwszej połowie ubiegłego stulecia przez profesora Förstera. Zagadnienie to opisano w wielu publikacjach, monografiach i materiałach konferencyjnych ostatnich lat [1, 15]. Kompleksowy obraz zmian parametrów magnetycznych i elektrycznych materiału testowanego elementu można prześledzić na przebiegu unormowanych składowych impedancji Förstera (tzw. Förster Plot). Indukcyjny przetwornik pomiarowy może być opisany, jako specyficzny tor pomiarowy szeregowo - równoległy  $RLC$  o zmiennej impedancji  $Z$  zależnej od parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału, a także od geometrii układu sonda - obiekt badany.

Schemat zastępczy takiego układu prezentuje rysunek 10 [4, 6]. Główne zmiany parametrów obwodu widoczne są w składowych  $RLC$  przy pomiarowym wyznaczaniu wartości impedancji  $Z$ .



Rys. 10. Układ szeregowy cewki podłączony do oscylatora

Właściwości elektromagnetyczne materiałów, a także ich stan można określać na podstawie szczególnej interpretacji przebiegu składowych impedancji  $Z$  w funkcji pulsacji pola magnetycznego w unormowanym układzie współrzędnych kartezyjskich. Procesy sprężyste i naprężenia resztkowe oddziałują na składową  $L$ , natomiast procesy degeneracyjne struktury (obciążenia cykliczne i temperatura), przemiany strukturalne, zaburzenia sieci ziaren, wpływają na składową  $R$ . Unormowania tego można dokonać korzystając z układu równań Förstera [1, 3. 4. 5]:

$$\frac{\text{Re } \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{R}{\omega L_0} = -\text{Im } \underline{\mu}_{\text{sk}}, \quad (7)$$

$$\frac{\text{Im } \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\omega R}{\omega L_0} = \text{Re } \underline{\mu}_{\text{sk}}, \quad (8)$$

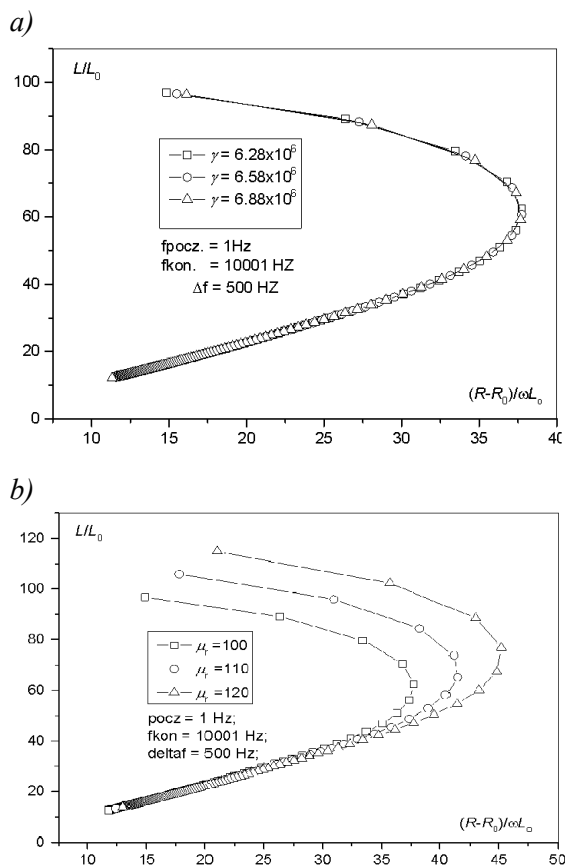
$$\eta = \left[ \frac{D_p}{D_s} \right]^2, \quad (9)$$

$$f_g = \frac{2}{\pi D_p^2 \gamma \mu_r \mu_0}. \quad (10)$$

Zależność (9) uwzględnia stosunek powierzchni próbki  $D_p$  do powierzchni przekroju cewki testującej  $D_s$ . Równanie (10) opisuje wpływ przenikalności względnej, przewodności elektrycznej właściwej i przekroju próbki na częstotliwość graniczną układu pomiarowego z próbką. Wynika z tego, że rozkład natężenia pola i prądów wirowych w próbkach cylindrycznych oraz ich przenikalność skuteczna dla jednakowego stosunku zadanej częstotliwości  $f$  do częstotli-



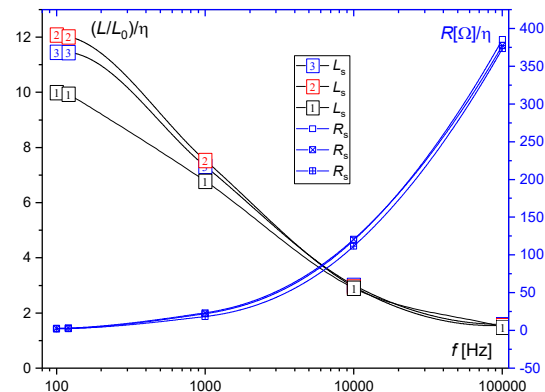
wości granicznej  $f_g$  ( $f/f_g$ ) są identyczne. Jest to tzw. **prawo podobieństwa**, sformułowane przez F. Förstera i jego współpracowników. Przemieszczenie punktu dla zadanej częstotliwości  $f$  lub stosunku  $f/f_g$  na wykresie unormowanych składowych impedancji, precyzuje poprzez korelacje magnetyczne i elektryczne aktualny stan mechaniczny materiału i przynależnych parametrów fizycznych (elektrycznych i magnetycznych). Przedstawia to rysunek 11.



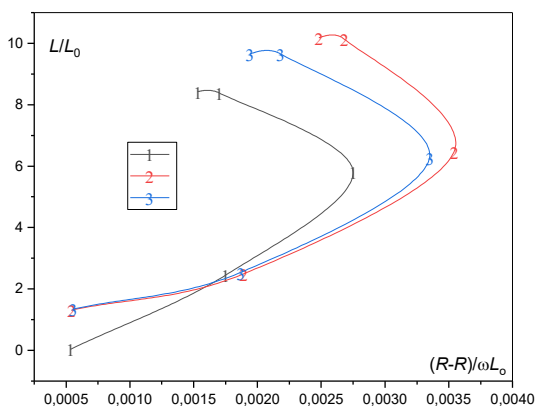
Rys. 11. Przebiegi unormowanych składowych impedancji (Förster Plot) w funkcji przewodności elektrycznej właściwej (a) i zmian przenikalności (b)

Na wykresie (rys. 13) przedstawiono przebiegi unormowanych impedancji F. Förstera dla składowych z rysunku 11. Zmiany parametrów magnetycznych cewki pomiarowej ilustruje rysunek 12. Rozdzielne rozpatrywanie zmian elektrycznych magnetycznych nie pozwala na analizowanie obrazu zmian eksploatacyjnych zachodzących w materiale. Förster Plot wskazuje na optymalny przedział obszaru badawczego i przypisany mu zakres częstotliwości wskazując na zmiany obu składowych zależnych od

przyczyn zarówno magneto-sprężystych, jak i reszkowych, a także zmian strukturalnych wynikających z procesu eksploatacji.



Rys. 12. Przebiegi składowych impedancji

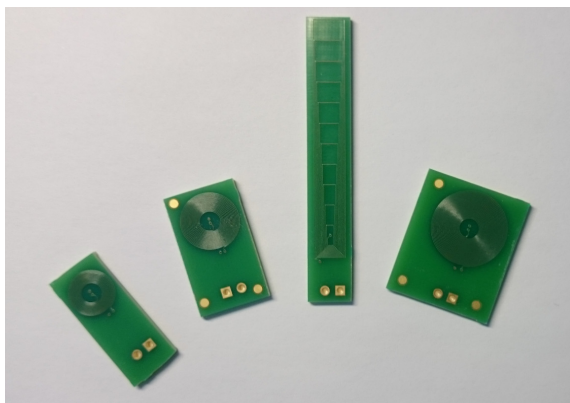


Rys. 13. Unormowane składowe impedancji Förster Plot

Dla stali GO prowadzono badania na pasmach o liniach cięcia równoległych do kierunku walcowania.

## 5. Przykład dla NDT i CM

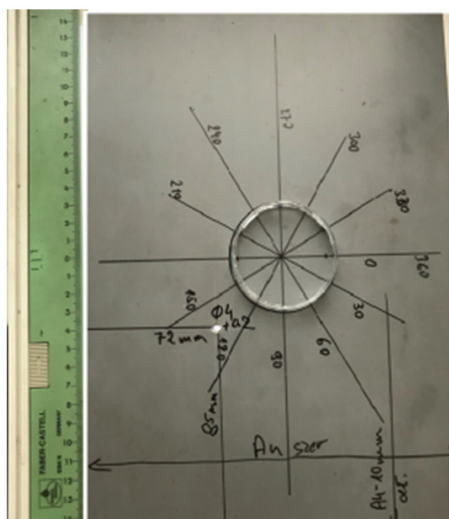
Opracowano i przeanalizowano sparametryzowany model numeryczny blachy wykonany w skali 1:1. Założono, że punkty bazowe i krawędzie modelu blachy są sztywno zamocowane. Wyniki wykonanych obliczeń porównano z wynikami eksperymentu fizycznego. Działania te poprzedzono testami z różnymi, co do wymiarów geometrycznych i liczby zwojów, cewkami pomiarowymi (rys. 14). Do dalszych badań wybrano cewkę o strukturze prostokątnej. Na rysunku 15a przedstawiono fizyczny model, wykonany z blachy elektrotechnicznej z wywierconym otworem i naniesionymi kierunkami pomiaru. Wyniki wykonanych badań wybraną cewką indukcyjną prezentuje rysunek 15b.



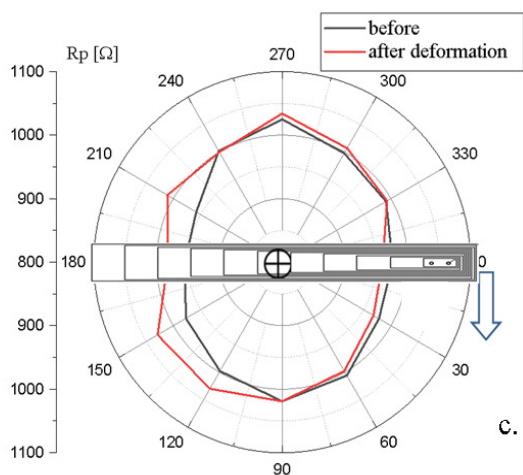
Rys. 14. Testowane warianty cewek pomiarowych

Zmiany składowych impedancji (uzyskanej w testach) pokazano na rysunku 16a. Rysunek 16b przedstawia rozkład naprężeń wyznaczony numerycznie w środowisku COMSOL.

a)

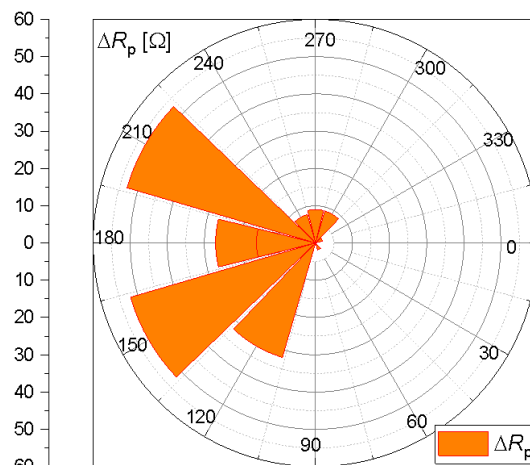


b)

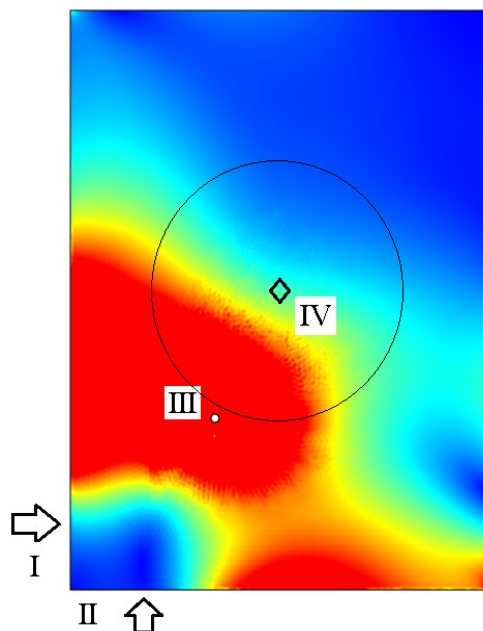


Rys. 15. Testowany arkusz blachy – a; wyniki pomiarów z zaznaczeniem cewki pomiarowej – b

a)



b)



Rys. 16. Pomierzone zmiany składowych impedancji – a; wynik obliczeń rozkładu deformacji w arkuszu blachy – b (I, II miejsca mocowania blachy, III miejsce mechanicznego uszkodzenia (otwór), IV punkt wyznaczający oś obrotu cewki pomiarowej)

Mechaniczne odkształcenia blachy powodują zmiany wartości unormowanych składowych impedancji F. Förstera, impedancji analizowanego obwodu magnetycznego. Zamodelowane deformacje arkusza blachy obrazują, co do kierunku, zmianą składowych impedancji (rysunek 15c i rysunek 16).

### 6. Wnioski

Badanie stali M130 prowadzono przy współpracy przemysłu z uczelnią. Przeprowadzone

testy wykazały, że zastosowane metody i przetworniki magneto-indukcyjne spełniają wymagania systemu kontroli i pomiaru SHM. Przetworniki magneto-indukcyjne (konstrukcja zależna od wymagań i założeń badań) umożliwiają obserwację zmian właściwości magnetycznych stali elektrotechnicznej wywołanych naprężeniami i odkształceniami mechanicznymi, a także służą do sprawdzenia kierunkowości walcowania. Zastosowany układ pomiarowy jest tanim alternatywnym rozwiązaniem umożliwiającym wstępną ocenę stanu naprężeń wewnętrznych. Systemy pomiarowe magneto-indukcyjne LDC wsparte o spektroskopię impedancji są stosowane w wielu aplikacjach przemysłowych [1]. Stwierdzenie zmian współczynnika odmagnesowania [10] związanych z kształtem testowanego detalu sprawia, że problem wymaga szerszej analizy i przeprowadzenia dalszych prac badawczych.

## 7. Literatura

- [1]. <https://www.ndt.net/>, Portal of Nondestructive Testing.
- [2]. A. E. Petrova, V. N. Krasnorussky, S. M. Stishov "Elastic properties of FeSi", *Institute for High Pressure Physics of Russian Academy of Sciences*, Troitsk, 142190 Moscow Region, Russia, November 20, 2009.
- [3]. Z. H. Żurek, G. Dobmann, P. Idziak, K. Kowalski "Structural Health Monitoring and NDT for Thin Steel sheets under LDC testing with flat asymmetric PCB Sensor".
- [4]. Z. H. Żurek, D. Kukla "LDC1000 converter for NDT material diagnostic and characterization", *INSIGHT – Electromagnetics*, Vol 60 – No 7 – July 2018, DOI: 10.1784./insi.2018.60.7.375, ISSN: 1354-2575.
- [5]. Z. H. Żurek, P. Duka "RLC circuits for material testing and NDT", *Institute of Electrical Drivers & Machines KOMEL*, 01-2015, ISBN 978-83-931090-8-0, BOOKomel.
- [6]. [http://www.ti.com/tool/ldc1000\\_evm](http://www.ti.com/tool/ldc1000_evm).
- [7]. Étienne Du Tremolet de Lacheisserie, "Magnetostriction: theory and applications of magnetoelasticity" – 1993.
- [8]. C. Appino, et al. "International comparison on SST and Epstein measurements in grain-oriented Fe-Si sheet steel", 13th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing (2014), *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 48, no. 2,3, pp. 123-133, 2015.
- [9]. J. Sievert "The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel – survey on methods and situation of standards", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volumes 215–216, 2 June 2000, Pages 647-651, [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00251-1).
- [10]. R. I. Joseph, E. Schlömann "Demagnetizing Field in Nonellipsoidal Bodies", *Journal of Applied Physics* 36, 1579, <https://doi.org/10.1063/1.1703091>, 1965.
- [11]. P. Schilder "Eddy current measurements with the LDC1000EVM digital inductance sensor", Universities van Amsterdam, Faculty of Science, van der Waals-Zeeman Institute, *Report Bachelor Project Physics and Astronomy 2015*, <https://esc.fnwi.uva.nl/thesis/centraal/files/fl1250956148.pdf>.
- [12]. M. Garibaldi et al. "Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting", <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.037> Get rights and content, *Acta Materialia*, Volume 110, 15 May 2016, Pages 207-216.
- [13]. W. A. Pluta "Anisotropy influence on loss components, in electrical steel sheets", *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 83 NR 4/2007, 38-41.
- [14]. Shin Sun-Mi, Chang Sam-Kyu, De Cooman B. C. "Evolution of Texture and Related Magnetic Properties in Fe-3%Si Steel during Single-step Annealing", *ISIJ International*, Vol. 48 (2008), No. 12, pp. 1788–1794.
- [15]. Z. H. Żurek, B. Solecka, Z. Stokłosa, M. Witos "Selecting Transformer Sheets with the Method of Low-Frequency Impedance" *2nd IEEE Conference on Advance in Magnetism AIM 2018*, Feb. 4-7, 2018, La Thuile, DOI: 10.13140/RG.2.2.33947.16166.