

Kierunkowość magneto-mechaniczna w stalach krzemowych – teoria i przykłady

Zbigniew Hilary Żurek, Gerd Dobmann, Bartosz Chmiela

Streszczenie: Powszechnie stosowane blachy elektrotechniczne stali krzemowej [15, 16] są zorientowane na ziarno (GO – np. blachy transformatorów anizotropowych) lub niezorientowane na ziarno (NGO – np. blachy izotropowe lub generatorowe).

Badaniu poddano blachę typu M130 o wymiarach odpowiadających formatowi A4. Oceniano dwa przypadki zmiany naprężenia w stosunku do geometrycznego środka arkusza blachy jak i wąskiego paska zwijanego w okrąg. Wprowadzono założenie, że poza zakresem odkształceń plastycznych w blasze pozostaje naprężenie szczątkowe w procesie produkcji i montażu np. transformatorów czy maszyn. Wskazano, że istnieje jakościowa zależność między wynikami pomiarów a przewidywaniami analitycznymi. Podjęto próby ilościowej analizy naprężenia na drodze symulacji i pomiaru. Badano związek stanu naprężenia ze zmianami parametrów podatności magnetycznej na stan odkształceń czy deformacji (efekt magnetosprężysty Villariego,

Słowa kluczowe: Procesy produkcyjne i montażowe dla potrzeb NDT oraz SHM. Sposoby magneto-indukcyjne pomiaru za pomocą unormowanych składowych impedancji według F. Förstera.

1. Wstęp

Gwałtowne procesy produkcyjne są przyczyną deformacji blach elektrotechnicznych, nawet gdy są one wprowadzane do maszyny do cięcia [9 - 16]. W przypadku produkcji elementów maszyn elektrycznych pojedyncze arkusze są produkowane na prasach szybkoobrotowych; następnie są łączone w laminowane podzespoły. Proces ścinania każdego rodzaju arkusza (na przykład przy nierównomiernym naprężeniu) lub każdy inny zabieg, taki jak wiercenie otworów lub nitowanie pakietów arkuszy (np. laminowanie) wprowadza naprężenia mechaniczne, które nie zawsze można wyeliminować nawet w przypadku obróbki cieplnej. Linie produkcyjne wyposażone są w systemy ciągłego badania parametrów blach; stosowane są metody prądów wirowych oraz specjalistyczne sondy pomiarowe. W artykule przedstawiono uproszczoną metodę badania naprężenia szczątkowego w blachach wykonaną asymetrycznym przetwornikiem indukcyjnym na bazie PCB i sondy LCD 1000 [3, 17], która charakteryzuje się szerokim zakresem możliwych zastosowań w diagnostyce SHM i NDT [1].

Teoria i pomiar

Zmiany parametrów magnetycznych blach można przypisać zmianom przepuszczalności opisanym efektem Villariego [5, 6-9]. Odwracalne zmiany magnetosprężyste zachodzą (też w ograniczonym zakresie) we wszystkich materiałach spolarzowanych magnetycznie, a w szczególności w materiałach wykazujących magnetostrykcję w określonym zakresie i dla określonych kierunków naprężenia. Współczynnik magnetostrykcyjny λ jest równoważny współczynnikowi czułości d ($d = \lambda$).

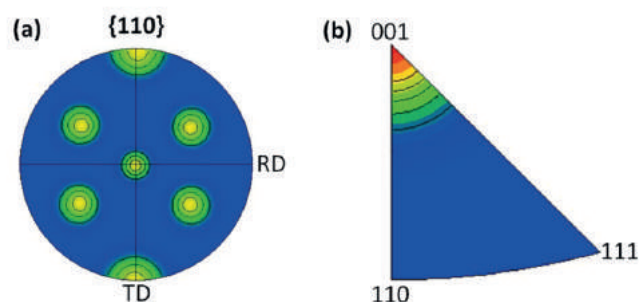
Względna zmiana przenikalności magnetycznej S na jednostkę naprężenia mechanicznego jest opisana zależnością (1):

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

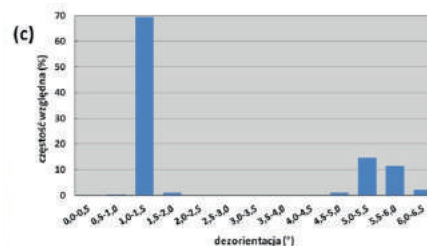
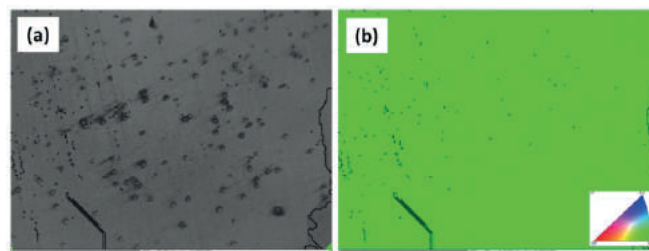
gdzie: χ – podatność magnetyczna, σ – naprężenie mechaniczne.

Analiza deorientacji ziaren blach Fe Si

Wysoka zgodność kierunku magnesowania [4-10, 17] z kierunkiem osi ziaren powoduje, że udziały pozostałych kierunków są nieznaczące jak na rysunku 1 i 2.



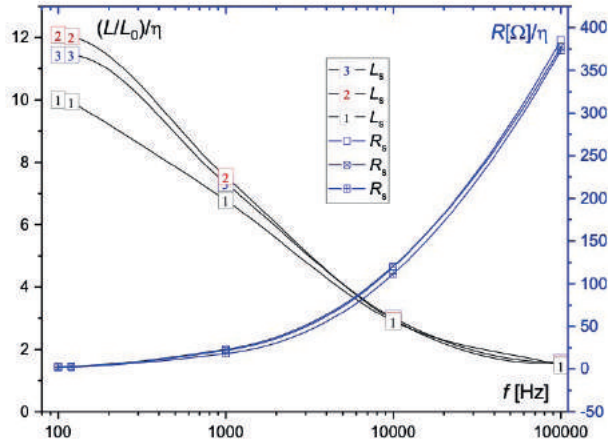
Rys. 1. Pole figure {110} (a) and reverse polar figure (b) for GO company transformer sheet



2. Obraz struktury (a), mapa orientacji krystalograficznej (b), udziały ziaren zorientowanych krystalograficznie (c) dla blach GOtransformer sheet.

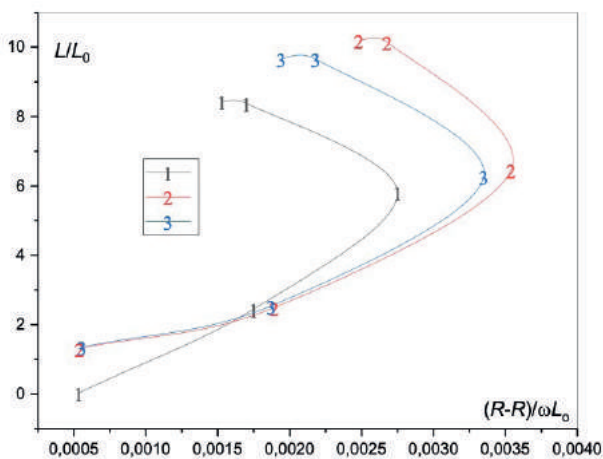
Wyznaczenie związków magneto mechanicznych

Przebieg zmian parametrów magnetycznych i elektrycznych cewki pomiarowej dla kolejnych przypadków (1-2-3) ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Krzywe zmian składowych impedancji cewki pomiarowej w funkcji częstotliwości
 1. otwarty obwód magnetyczny,
 2. closed magnetic circuit $\sigma = 0$,
 3. toroidal circuit $\sigma > 0$

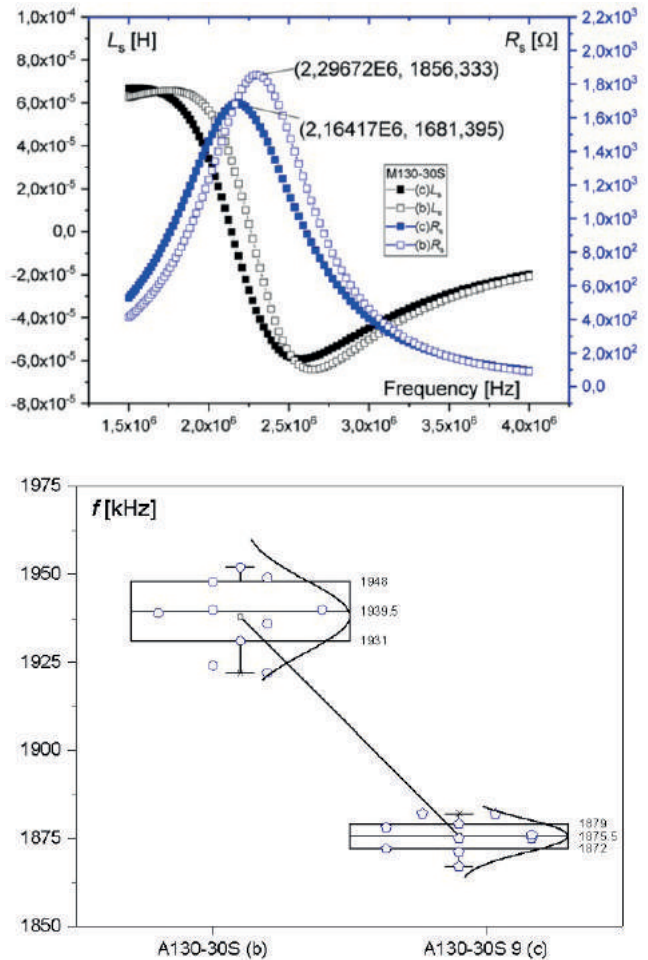
Na wykresie (rys. 4) przedstawiono za pomocą uproszczonego opisu dla spektroskopii impedancji SID2 [4] dla składowych z rysunku 3.



Rys. 4. Obraz zróżnicowania parametrów w ujęciu SID2

Z pomiaru tensometrycznego wyznaczono współczynnik czułości $d = 0,1604 \text{ mV/kG}$.

Pomiar przetwornikiem LDC100 z cewką płaską PCB [17] wykonano dla dwóch blach GO typu M130 w zakresie rezonansu. Wynik porównania z pomiarem mostkiem AGILENT pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Pomiar mostkiem AGILENT - góra, pomiar przetwornikiem LDC1000 w rezonansie - dół

Magneto - sprężystość stali krzemowej o ziarnach zorientowanych - GO

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 różnicza 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,
 A- stała zależna od struktury kryształu ($A = 0,4$ dla sieci przestrzennie centrowanej),
 J_s - magnetyzacja nasycenia,
 $\lambda_{\langle 100 \rangle}, \lambda_{\langle 111 \rangle}$ oznaczają maksymalne wartości magnetostrykcji

Zmiana indukcyjności przetwornika wynika z lokalnych zmian przenikalności. Przenikalność magnetyczna materiału

ferromagnetycznego jest zależna od wielu czynników. Najważniejsze z nich są ujęte w zależności

$$\mu_r \approx \frac{J_s^2}{3 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_s \cdot \sigma} = \frac{J_s^2}{3 \mu_0 \lambda_s E_Y \varepsilon} \quad (4)$$

gdzie: μ_r – przenikalność względna
 E_Y – moduł Younga,
 ε – odkształcenie wzdłużne,
 λ_s – współczynnik magnetostrykcji nasycenia.

Złożony rozkład odkształceń w badanym arkuszu blachy krzemowej wpływa na rozkład zmian przenikalności. Istotny udział w wyznaczaniu mapy odkształceń będzie miał współczynnik Poissona

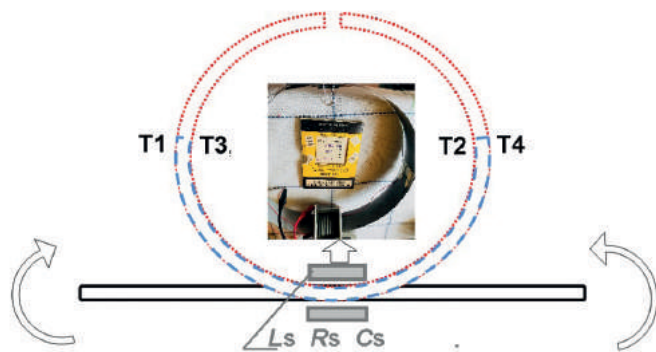
$$\nu = \frac{E - 2G}{2G} \quad (5)$$

Gdzie:
 E – moduł Younga
 G – moduł Kirchhoffa
 ν - liczba Poissona

Współczynnik Poissona dla żelaza wynosi - 0,21...0,259, dla stali - 0,27...0,30, dla stali - krzemowej NGO 0,29 - 0,31, a dla stali krzemowej jest w niższej wartości

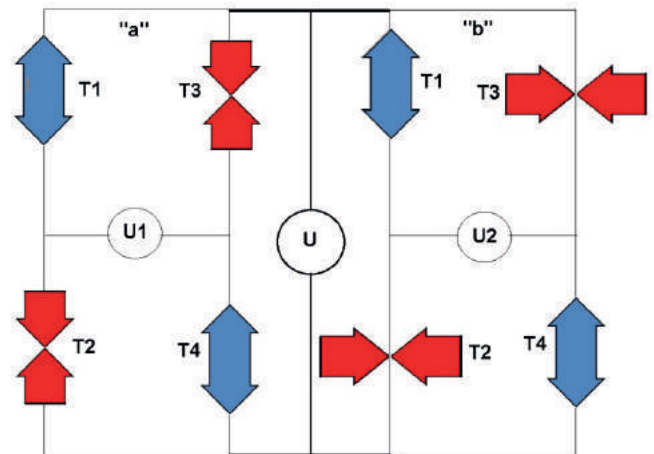
Wyznaczanie współczynnika Poissona dla testowanego układu

Dla stali krzemowej o ziarnach zorientowanych wyznaczono zmianę współczynnika Poissona dla paska stali krzemowej zwiąanej w okrąg (rys. 6). Zmiana sztywności poprzecznej do kierunku magnesowania jest inna dla stali NGO wobec GO.



Rys. 6. Rozmieszczenie tensometrów pomiarowych

Sposób rozmieszczenia tensometrów na pasku z blachy krzemowej GO o długości 70 cm (rys. 6). Schemat funkcjonalny naklejonych przetworników tensometrycznych przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Projekt połączeń porównawczych tensometrów pomiarowych

Porównując napięcia wyjściowe mostków tensometrycznych:

$$U_1 = \frac{\Sigma \varepsilon_1 UK}{4}, \Sigma \varepsilon_1 = \frac{4U_1}{UK} \quad (6)$$

$$U_2 = \frac{\Sigma \varepsilon_{2(\nu)} UK}{4}, \Sigma \varepsilon_{2(\nu)} = \frac{4U_2}{UK}$$

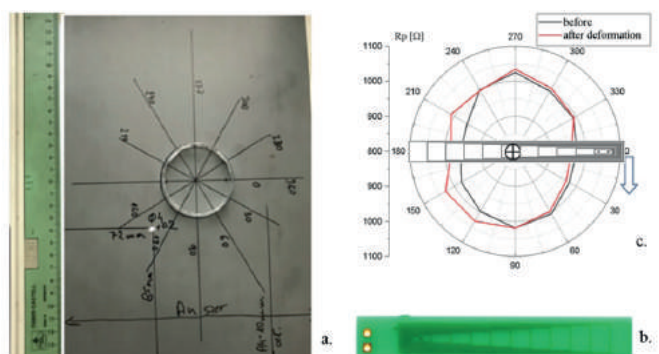
gdzie:
 U_1, U_2 - napięcia wyjściowe
 K - stała tensometru,
 e - współczynnik odkształcenia.

Wyznaczono współczynnik Poissona. Współczynnik jest niższy od zakresu zmian dla stali NGO i wynosi 0,2. Pomiar będzie wielokrotnie powtórzony (dla wpływu geometrii blachy i jej grubości).

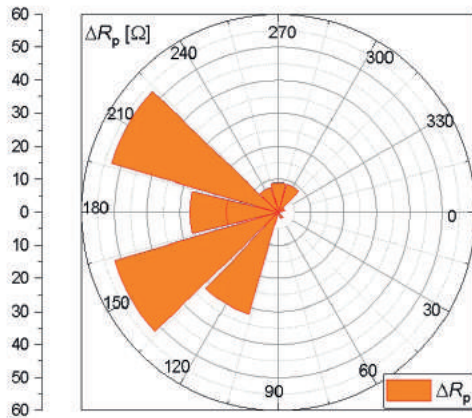
Analizowany przykład

Analizowano parametryczny model blachy w skali 1:1. Przyjęliśmy, że punkty i krawędzie są stałe. Fizyczny model blachy, otworu wierconego i kierunku pomiaru pokazano na ryc. 8a, natomiast wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 8b.

Różnicę w składowej impedancji (uzyskaną w testach) pokazano na rys.9a, natomiast wynik badania rozkładu naprężenia przeprowadzonego w programie COMSOL pokazano na rys. 9b.



Ryc. 8. Blacha - a, cewka pomiarowa PCB i wynik pomiaru - b



Rys. 9a. Zmierzony wzrost składowej impedancji i wynik obliczeń dla odkształceń w blasze (I i II - punkty mocowania modelu, III - defekt /a otwór/, IV - punkt środkowy obrotu sondy)

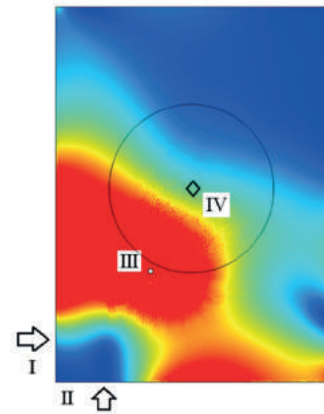
Zmiany spowodowane odkształceniami wpływają na zmiany parametrów cewki, składowe impedancji i są skorelowane z podatnością magnetyczną materiału zgodnie z with (1)

Wnioski

Indukcyjny system kontrolno-pomiarowy SHM, oparty na przetworniku LDC, stanowi tani obwód pomiarowy w porównaniu z alternatywami przyrządami komercyjnymi. Systemy pomiarowe LDC można znaleźć w wielu zastosowaniach inżynierskich (uznanie w publikacji Brytyjskiego Towarzystwa NDT poprzez publikację [17]). Niejednokrotnie bagatelizowane istotne zmiany współczynnika odmagnesowania od procesów technologicznych cięcia i montażu sprawiają, że temat jest dalej analizowany. Powstawanie dodatkowych lokalnych zmian magnesowania jest przyczyną generowania pasożytniczych częstotliwości o szerokim zakresie częstotliwości. W niższych częstotliwościach słyszane jako dodatkowy szum urządzenia czy maszyny.

Literatura

- [1] Aplikacje przemysłowe NDTrlc-e
- [2] Alla E. Petrova, Vladimir N. Krasnorussky and Sergei 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] Żurek Z. H., Duka P., RLC circuits for material testing and NDT, Institute of Electrical Drivers & MachinesKOMEL, 01-2015, ISBN 978-83-931090-8-0,BOOKomel
- [4] Żurek Z. H., Spektroskopia impedancji, Napędy i Sterowanie, miesięcznik naukowo-techniczny, Nr190 (285)/2023, Nr2 (286)/2023
- [5] Étienne Du Tremolet de Lacheisserie.: Magnetostriction: theory and applications of magnetoelasticity – 1993
- [6] <https://brockhaus.com>
- [7] Agilent Technologies Impedance Measurement Handbook, Agilent Technology Co Ltd. 2006
- [8] Keysight Technologies, Impedance Measurement Handbook. A Guide to Measurement Technology and Techniques, 4th ed., Keysight Technologies, 2014, <http://www.keysight.com>.
- [9] Appino, i inni: International comparison on SST and Epstein measurements in grain-oriented Fe-Si sheet steel, 13th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement



Rys. 9b. Zmierzony wzrost składowej impedancji i wynik obliczeń dla odkształceń w blasze (I i II - punkty mocowania modelu, III - defekt /a otwór/, IV - punkt środkowy obrotu sondy)

and Testing (2014).; International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 48, no. 2,3, pp. 123-133, 2015

- [10] 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)
- [11] R. I. Joseph and E. Schlömann.: Demagnetizing Field in Nonellipsoidal Bodies, Journal of Applied Physics 36, 1579 (1965); <https://doi.org/10.1063/1.1703091>
- [12] Patrick 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/f1250956148.pdf>
- [13] Sakda Somkun.: Magnetostriction and Magnetic Anisotropy in Non-oriented Electrical Steels and Stator Core Laminations, A thesis submitted to the Cardiff University in candidature for the degree of Doctor of Philosophy Wolfson Centre for Magnetics Cardiff School of Engineering Cardiff University Wales, United Kingdom September 2010
- [14] L. Daniel, O. Hubert, F. Ossart, R. Billardon.: Experimental analysis and multiscale modelling of the anisotropic mechanical and magnetostrictive behaviours of electrical steels, Journal de Physique IV (Proceedings) · March 2003 DOI: 10.1051/jp4:20030194
- [15] Michele Garibaldi, Ian Ashcroft, Marco Simonelli, Richard Hague.: 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
- [16] Wojciech A. PLUTA.: Anisotropy influence on loss components, in electrical steel sheets, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 83 NR 4/2007, 38-41
- [17] Żurek Z. H., Kukla D.: 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,
- [18] http://www.bindt.org/publications/insight-journal/Insight-vol-60-No-8/?insite_mode=2&insite_tryflushcache=4044,