

doi:10.15199/48.2018.02.23

## Anizotropia stratności wybranych blach elektrotechnicznych

**Streszczenie.** W artykule wykazano wpływ anizotropii na właściwości blach elektrotechnicznych. Przedstawiono prosty model matematyczny umożliwiający wyznaczenie stratności dla dowolnego kierunku wycięcia próbki. Model zweryfikowano wykorzystując dane pomiarowe dla wybranych gatunków blach.

**Abstract.** In the paper the influence of anisotropy on properties of electrical steel sheets is proven. A simple mathematical model, which makes it possible to determine the angular dependence of loss density, is described. The model has been verified using measurement data for chosen steel sheets. (*Anisotropy of loss density of chosen electrical steel sheets*).

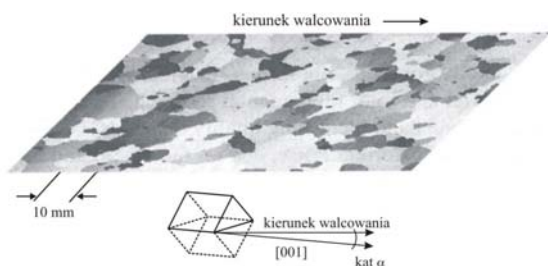
**Słowa kluczowe:** Anizotropia, modelowanie, stratność, blachy elektrotechniczne.

**Keywords:** Anisotropy, modeling, loss density, electrical steel sheets.

### Wstęp

Anizotropia to zależność właściwości magnetycznych materiału od kierunku. Zazwyczaj właściwości magnetyczne podawane są przez producentów blach elektrotechnicznych dla kierunku zgodnego z kierunkiem walcowania materiału (dla kąta 0°), niekiedy podawane są charakterystyki magnesowania również dla kierunku prostopadłego do kierunku walcowania (dla 90°), bądź też dla próbek mieszanych (kombinacja pasków wyciętych dla obu kierunków charakterystycznych, mierzona za pomocą aparatu Epsteina). Charakterystyki magnesowania blach elektrotechnicznych, w tym tzw. blach o ziarnach nieorientowanych, stosowanych w magnetowodach maszyn wirujących, wykazują znaczące różnice dla różnych kierunków [1-5].

Przyczynami występowania tego zjawiska są m.in. interakcje na poziomie mikroskopowym pomiędzy momentami magnetycznymi wewnątrz materiału oraz makroskopowy efekt odmagnesowania [6-8]. W przypadku blach elektrotechnicznych (zarówno transformatorowych, jak też prądnicowych) istotną rolę odgrywa stopień stekstrowania materiału (zorientowanie części ziaren żelaza zgodnie z orientacją Gossa  $\{110\}\langle 001 \rangle$ ) [9-12], por. rys. 1.



Rys. 1. Struktura blachy elektrotechnicznej o ziarnach zorientowanych (GO) z wyróżnionym kątem łatwego magnesowania

Lepsze zrozumienie złożonych zjawisk zachodzących podczas przemagnesowania blach SiFe może przyczynić się do podwyższenia efektywności przetwarzania energii elektrycznej w maszynach elektrycznych (zarówno w transformatorach, jak też w maszynach wirujących) [13-19], czym można wytłumaczyć wzrastające zainteresowanie środowiska inżynierskiego tą tematyką, przejawiające się m.in. organizacją cyklicznych imprez naukowych poświęconych przemagnesowaniu np. 1 & 2 DM [20-21].

Międzynarodowe normy (m.in. IEC 60404-8) definiują miarę ilościową stopnia anizotropii stratności materiału magnetycznie miękkiego za pomocą zależności [7,21]

$$(1) \quad \delta P = \frac{P_{90} - P_0}{P_{90} + P_0} \cdot 100\%,$$

gdzie  $P_0$  i  $P_{90}$ , (W/kg), to stratności blachy odpowiednio dla kierunku magnesowania zgodnego z kierunkiem walcowania i prostopadłego do niego.

Już w 1990 r. dostrzeżono potrzebę prowadzenia dalszych badań w zakresie opracowania lepszego opisu kierunkowych właściwości blach elektrotechnicznych [22]. Prace poświęcone temu zagadnieniu można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich obejmuje uogólnienia istniejących skalarnych makroskopowych modeli procesu magnesowania (Chuy [23,24], Preisacha-Mayergoyza [25-28] czy Jilesa-Atherтона [29-31]), często wprowadzane są do istniejących modeli dodatkowe fenomenologiczne zależności, umożliwiające bardziej dokładne odwzorowanie eksperymentalnych krzywych histerezy [32-35].

Druha grupa obejmuje opisy krzywych magnesowania nie uwzględniające zjawiska histerezy oraz zależności empiryczne na straty w funkcji kąta [4, 36-45]. W tej grupie szczególne znaczenie mają modele oparte na koncepcji koenergii [4, 36, 37, 39-40, 44], ponieważ mają silne uzasadnienie w zasadach termodynamiki procesów nieodwracalnych oraz wymagają wykonania stosunkowo niewielkiej liczby pomiarów do swojej kalibracji do danych doświadczalnych (niezbędne są pomiary dla kierunku zgodnego z kierunkiem walcowania i kierunku prostopadłego do niego). W pracy [40] wskazano jednak na pewne ograniczenia modelu sformułowanego przez Biró i współpracowników [39], polegające na tym, że dla niektórych kierunków magnesowania dla dużych wartości natężenia pola magnetycznego procedura obliczeniowa nie jest zbieżna.

Alternatywną wobec podejścia opartego na pojęciu koenergii może być model zaproponowany w pracach [46-48]. W modelu tym niezbędne jest wykonanie pomiarów dla trzech kierunków wycięcia blachy: 0°, 45° oraz 90° (kąt 0° oznacza kierunek walcowania blachy). Zgodnie z zaproponowanym opisem dowolną wielkość (np. natężenie koercji, stratność, maksymalną przenikalność) dla arbitralnie wybranego kierunku można przedstawić za pomocą kombinacji wartości tej wielkości dla wyżej wymienionych kątów, co można zapisać jako

$$(1) \quad A = A_0 + A_1 \cos 2\phi + A_2 \cos 4\phi,$$

gdzie

$$(2) \quad A_0 = 0.25 \left[ A(0^\circ) + A(90^\circ) + 2A(45^\circ) \right],$$

$$(3) \quad A_1 = 0.5 \left[ A(0^\circ) - A(90^\circ) \right],$$

$$(4) \quad A_2 = 0.25 \left[ A(0^\circ) + A(90^\circ) - 2A(45^\circ) \right].$$

Przedstawiony opis ma – podobnie jak model oparty na koncepcji koenergii – silne uzasadnienie teoretyczne. Można stwierdzić, że przesłanką do sformułowania modelu matematycznego były wyniki badań stopnia stekstrowania materiałów metodą ODF (Orientation Distribution Function) analizowane m.in. przez Bungego [49]. W inżynierii materiałowej analiza tekstur odgrywa niezmiernie istotną rolę [49, 50]. Występują analogie pomiędzy analizowanym modelem a metodą opartą na tzw. parametrze Lankforda, stosowaną w metalurgii do oceny stopnia anizotropii arkuszy blach po obróbce plastycznej [51].

We wcześniejszych pracach [52,53] do opisu anizotropowych właściwości blach elektrotechnicznych stosowano zależności oparte na uśrednieniu charakterystyki energii magnetokrystalicznej od kąta; można wykazać, że średnia wartość tej energii jest funkcją stałych anizotropii  $K_1$  i  $K_2$  oraz tzw. parametrów tekstury czwartego i szóstego rzędu, wyrażonych za pomocą funkcji sferycznych Legendre'a pierwszego rodzaju. De Campos [46] wykazał, że opis dany wyrażeniami (1)-(4) jest równoważny uproszczonej zależności analizowanej we wspomnianych pracach, uwzględniającej wpływ tylko stałej  $K_1$  (wartości przyjmowane przez stałą  $K_2$  są dla większości materiałów o rząd mniejsze niż wartości przyjmowane przez  $K_1$ ). Charakterystykę kątową energii magnetokrystalicznej można zatem zapisać jako

$$(5) \quad \bar{E}(\Phi, \beta) \cong \frac{1}{9n_4\sqrt{\pi}} \frac{K_1}{5} F_4(\Phi, \phi),$$

gdzie  $n_4 = 0.64636$  [49], natomiast

$$(6) \quad F_4(\Phi, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2}} C_4^{11} \bar{P}_4^0(\Phi) + C_4^{12} \bar{P}_4^2(\Phi) \cos 2\phi + \dots + C_4^{13} \bar{P}_4^4(\Phi) \cos 4\phi$$

$C_4^{11}, C_4^{12}$  oraz  $C_4^{13}$  to parametry tekstury materiału,

natomiast wyrażenia typu  $\bar{P}_4^q(\Phi)$  ( $q = 0, 2, 4$ ) oznaczają odpowiednie wielomiany Legendre'a pierwszego rodzaju czwartego rzędu. Dla płaszczyzny blachy przyjmuje się  $\Phi = 90^\circ$ . Z porównania zależności (1) i (6) można wyciągnąć wniosek o równoważności obu opisów.

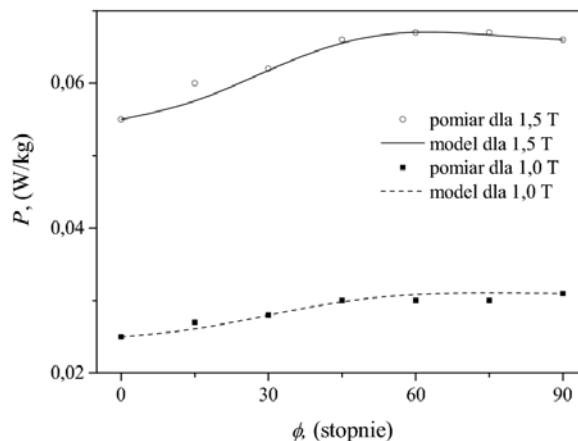
Z punktu widzenia metrologii pomiarów magnetycznych poprawność opisu danego wzorami (2)-(5) implikuje konieczność zweryfikowania dotychczasowego podejścia do wyznaczania właściwości magnetycznych próbek z wykorzystaniem aparatu Epsteina (IEC 6040402), o czym wspominają Penin Santos i współpracownicy [54]. Metoda ta jest powszechnie stosowana w praktyce przemysłowej z uwagi na doskonałą powtarzalność i kompatybilność pomiarów wykonywanych w różnych laboratoriach [3, 55, 56]. Jest niestety czasochłonna i wymaga dodatkowych zabiegów podczas przygotowania próbek do badań. Występują znaczące różnice pomiędzy wynikami pomiarów tą metodą dla różnych ułożeń pasków (wyciętych wzdłuż jednego kierunku bądź próbek mieszanych), por. [57] oraz rys. 7.10 w pracy [55]. Zaproponowana przez

Penin Santosa i współpracowników [54] metoda uśredniania charakterystyk magnesowania z jednej strony zapewnia dobrą zgodność opisu z eksperymentem i jest wyjątkowo prosta, z drugiej natomiast - wymaga dodatkowego nakładu pracy (przygotowanie próbek wycinanych wzdłuż trzech kierunków).

### Weryfikacja modelu

Weryfikacji opisu danego zależnościami (1)-(4) dokonano dla wybranych gatunków blach elektrotechnicznych. W pracach [58-59] podano przykładowe zależności stratności blachy elektrotechnicznej od kąta dla gatunku M530-50A. Próbki pochodziły od różnych producentów (z Republiki Czeskiej oraz z Korei Płd.), co zdaniem autorów prac implikowało ich różny skład chemiczny. Wydaje się jednak, że nieznaczne różnice mierzonych wartości stratności mogły być również spowodowane naprężeniami powstałymi przykładowo na etapie transportowania próbek lub w trakcie ich obróbki. Szczegółową analizę wpływu operacji technologicznych na właściwości blach elektrotechnicznych zawarto w monografii [60].

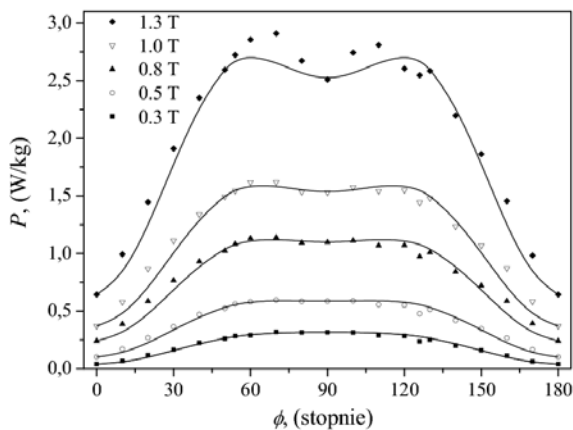
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki modelowania stratności dla egzemplarza blachy pochodzącego z Republiki Czeskiej. Na podstawie rysunku można wnioskować o przydatności analizowanego modelu do opisu zależności kątowej stratności dla rozważanej blachy o ziarnach niezorientowanych. Procentowy błąd odwzorowania nie przekraczał 4,9% i był największy dla kąta  $15^\circ$  i indukcji 1,5 T.



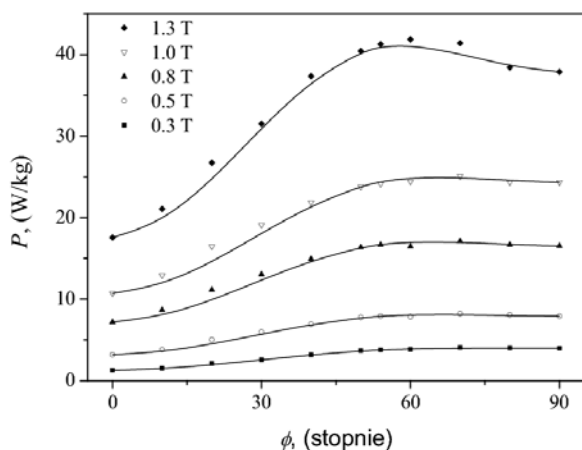
Rys. 2. Wyniki modelowania zależności stratności od kąta wycięcia dla blachy M530-50A.

W pracy [61] przedstawiono wyniki pomiarów stratności dla wybranych gatunków blach o ziarnach zorientowanych o grubości 0,27 mm wykonane przez jednego z autorów. Eksperymentalne zależności stratności od kąta wycięcia z wyżej wymienionej pracy wykorzystano do weryfikacji modelu danego zależnościami (1)-(4). Pomiaru dokonywane były z wykorzystaniem przyrządu do pomiarów na pojedynczym pasku (SsT) z kompensacją cewki pomiarowej. Częstotliwość przemagnesowania dla przypadku pokazanego na rysunku 3 wynosiła 50 Hz, natomiast dla przypadku pokazanego na rysunku 4 wynosiła 400 Hz. Na podstawie rysunków 3 i 4 można wnioskować o użyteczności zaproponowanego opisu. Maksymalny błąd modelowania dla częstotliwości technicznej wyniósł 22,8% (dla  $B = 1.3$  T), jednak uśredniona wartość błędów była znacznie niższa, tj. wynosiła około 12%. Interesujący jest fakt otrzymania lepszej zgodności wyników modelowania z wynikami pomiarowymi dla podwyższonej częstotliwości (400 Hz). Maksymalna wartość błędów w tym przypadku wyniosła 11,9%, natomiast

wartość przeciętna była rzędu 3%. Porównywalne wyniki modelowania otrzymano dla innych gatunków blach z pracy [61].



Rys. 3. Charakterystyki kątowe stratności dla blachy o ziarnach zorientowanych 0,27 mm (ozn. 2-3-170) przy częstotliwości przemagnesowania 50 Hz



Rys. 4. Charakterystyki kątowe stratności dla blachy o ziarnach zorientowanych 0,27 mm (ozn. 2-3-170) przy częstotliwości przemagnesowania 400 Hz

### Wnioski

Anizotropię charakterystyk magnesowania można zaobserwować zarówno dla blachach elektrotechnicznych silnie steksturowanych (o ziarnach zorientowanych), jak też dla blach prądnicowych. Właściwość ta ma silny wpływ na cechy użytkowe maszyn elektrycznych, dlatego niezbędne jest uwzględnienie jej na etapie projektowania.

W pracy przedstawiono stosunkowo prosty model matematyczny, umożliwiający wyznaczenie stratności blach elektrotechnicznych dla dowolnego kierunku magnesowania na podstawie charakterystyk wyznaczonych dla trzech kątów wycięcia próbek. Wskazano na podstawy teoretyczne zaproponowanego modelu, wynikające z analizy krystalograficznej metodą ODF. Model zweryfikowano wykorzystując wyniki pomiarów dla wybranych gatunków blach elektrotechnicznych.

W przyszłości będą prowadzone dalsze prace nad włączeniem zaproponowanego modelu do opisu charakterystyk magnesowania otrzymanych w warunkach przemagnesowania obrotowego.

**Autorzy:** dr inż. Stanisław Żurek, Megger Instruments Ltd, Dover CT17 9EN, U.K., E-mail: [stan.zurek@ieee.org](mailto:stan.zurek@ieee.org); mgr inż. Piotr Borowik, słuchacz studiów doktoranckich, Wydział Elektryczny PCz E-mail: [piotr.borowik1990@gmail.com](mailto:piotr.borowik1990@gmail.com); dr hab. inż. Krzysztof

Chwastek, prof. PCz, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Częstochowska, Al. Armii Krajowej 17, 42-201 Częstochowa, E-mail: [krzysztof.chwastek@gmail.com](mailto:krzysztof.chwastek@gmail.com)

### LITERATURA

- [1] Shiozaki M., Kurosaki Y., Anisotropy of magnetic properties in non-oriented electrical steel sheets, *Textures and Microstructures*, 11 (1989), 159-170.
- [2] Tumański S., Investigations of the anisotropic behaviour of SiFe steel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254-255 (2003), 50-53.
- [3] Tumański S., Handbook of magnetic measurements, CRC Press/ Taylor & Francis Group, Boca Raton 2011.
- [4] Paltanea V., Paltanea Gh., Gavrilă H., Magnetic anisotropy in silicon iron alloys, *Electrical and Electronic Engineering* 2 (6) (2012), 383-388.
- [5] Chwastek K., Anisotropic properties of non-oriented steel sheets, *IET Electric Power Applications* 7 (2013), 575-579.
- [6] Callen E. R., Callen H. B., Anisotropic magnetization, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 16 (1960), 310-328.
- [7] Soiński M., Moses A. J., Anisotropy in iron-based soft magnetic materials, Chapter 4 in Handbook of Magnetic Materials, Vol. 8 (Ed. K. H. J. Buschow), Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [8] O'Handley R., Modern magnetic materials. Principles and applications, J. Wiley & Sons, New York 2000.
- [9] de Campos M. F., Landgraf F. J. G., Tschiptschin A. P., A method to estimate magnetic induction from texture in non-oriented electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 226-230 (2001), 1536-1538.
- [10] Landgraf F. J. G., Paolinelli S. C., Cunha M. A., de Campos M. F., Texture optimization in non-oriented electrical steels: the role of the Goss texture component, *Materials Science Forum* 495-497 (2005), 543-554.
- [11] Shin S., Schaefer R., DeCooman B. C., Anisotropic magnetic properties and domain structure in Fe-3%Si (110) steel sheet, *Journal of Applied Physics* 109 (2011), 07A307 (3 pages).
- [12] Gutierrez-Urrutia I., Böttcher A., Lahn L., Raabe D., Microstructure-magnetic property relations in grain-oriented electrical steels: Quantitative analysis of the sharpness of the Goss orientation, *Journal of Materials Science* 49 (1) (2014), 269-276.
- [13] Moses A. J., Importance of rotational losses in rotating machines and transformers, *Journal of Materials Engineering and Performance* 1 (2) (1992), 235-244.
- [14] Pluta W., Wpływ anizotropii magnetycznej blach elektrotechnicznych na straty mocy przy przemagnesowaniu obrotowym, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2001.
- [15] Żurek S., Two-dimensional magnetization problems in electrical steel, PhD Thesis, Cardiff University, Cardiff, Wales (UK) 2005.
- [16] Anuszczyk J., Pluta W., Ferromagnetyki miękkie w polach obrotowych, WNT Warszawa 2009.
- [17] Pluta W., Badanie i właściwości wybranych ferromagnetyków przemagnesowywanych obrotowo, *Przegląd Elektrotechniczny* 4 (2010), 32-35.
- [18] Pfützner H., Mulasalihovic E., Yamaguchi H., Sabic D., Shilyashki G., Hofbauer F., Rotational magnetization in transformer cores – a review, *IEEE Transactions on Magnetics* 47 (11) (2011), 4523-4532.
- [19] Żurek S., Rotational magnetization. A phenomenon in three-phase three-limb transformer cores, *Transformers Magazine* 2 (2) (2015), 44-53, <http://www.transformers-magazine.com/tm-volumes/v2-iss2.html>
- [20] Sievert J., Two-dimensional magnetic measurements – history and achievements of the workshop, *Przegląd Elektrotechniczny* 9b (2011), 2-10.
- [21] Moses A. J., Possible future trends and research challenges related to 1 & 2 D magnetic properties of soft magnetic materials, *Przegląd Elektrotechniczny* 9b (2011), 11-16.
- [22] Hribernik B., Ambrož D., Proposal of a new anisotropy quality evaluation of nonoriented magnetic steel sheets, *IEEE Transactions on Magnetics* 26 (1990), 266-269.
- [23] Zhang Y., Eum Y. H., Xie D., Koh C. S., An improved engineering model of vector magnetic properties of grain-oriented electrical steels, *IEEE Transactions on Magnetics* 44 (11) (2008), 3181-3184.
- [24] Song M., Yoon H., Yang H., Koh C. S., A generalized Chua-type vector hysteresis model for both the non-oriented and

- grain-oriented electrical steel sheets, *IEEE Transactions on Magnetism* 47 (5) (2011), 1146-1149.
- [25] Dlala E., Belahcen A., Fonteyn K., Belkasim M., Improving loss properties of the Mayergoyz vector hysteresis model, *IEEE Transactions on Magnetism* 46 (3) (2009), 918-924.
- [26] Kuczmann M., Measurement and simulation of vector hysteresis characteristics, *IEEE Transactions on Magnetism* 45 (11) (2009), 5188-5191.
- [27] Kuczmann M., Vector hysteresis measurement and simulation, *Przegląd Elektrotechniczny* 12 (2009), 92-95.
- [28] Handgruber P., Stermecki A., Bíró O., Goričan V., Dlala E., Ofner G., Anisotropic generalization of vector Preisach hysteresis models for nonoriented steels, *IEEE Transactions on Magnetism* 51 (3) (2015), 7300604.
- [29] Leite J. V., Sadowski N., Kuo-Peng P., Batistela N. J., Bastos J. P. A., de Espíndola A. A., Inverse Jiles-Atherton vector hysteresis model, *IEEE Transactions on Magnetism* 40 (4) (2004), 1769-1775.
- [30] Jagieła M., Calculation of core loss using the Jiles-Atherton model incorporated into magnetic field analysis, *Archives of Electrical Engineering* 56 (219) (2007), 57-69.
- [31] Li W., Kim I. H., Jang S. M., Koh C. S., Hysteresis modeling for electrical steel sheets using improved vector Jiles-Atherton hysteresis model, *IEEE Transactions on Magnetism* 47 (10) (2011), 3821-3824.
- [32] Chwastek K., Szczygłowski J., The effect of anisotropy in the modified Jiles-Atherton model of static hysteresis, *Archives of Electrical Engineering* 60 (1) (2011), 49-57.
- [33] Baghel A. P. S., Kulkarni S. V., Hysteresis modeling of the grain-oriented laminations with inclusion of crystalline and textured structure in a modified Jiles-Atherton model, *Journal of Applied Physics* 113 (4) (2013), 043908.
- [34] Szewczyk R., Application of Jiles-Atherton model for modelling magnetization characteristics of textured electrical steel magnetized in easy or hard axis, *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, 293-302 (2015) In: Szewczyk R., Zieliński C., Kalczyńska M. (eds) *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 350. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-15796-2\_30
- [35] Baghel A. P. S., Sai Ram B., Chwastek K., Daniel L., Kulkarni S. V., Hysteresis modelling of GO laminations for arbitrary in-plane directions taking into account the dynamics of orthogonal domain walls, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 418 (2016), 14-20.
- [36] Péra Th., Ossart Fl., Waeckerlé Th., Numerical representation for anisotropic materials based on coenergy modeling, *Journal of Applied Physics* 73 (1993), 6784-6786.
- [37] Cornut B., Kedous-Lebouc A., Waeckerlé Th., From metallurgy to modelling of electrical steels: a multiple approach to their behaviour and use based on physics and experimental investigations (invited paper), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 160 (1996) 102-108.
- [38] Jesenik M., Goričan V., Trlep M., Hamler A., Štumberger B., Transient finite element magnetic field calculation method in the anisotropic magnetic material based on the measured magnetization curves, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 304 (2006) e820-e822.
- [39] Bíró O., Außerhofer St., Preis K., Chen Y., A modified elliptic model of anisotropy in nonlinear magnetic materials, *COMPEL* 29 (2010), 1482-1492.
- [40] Chwastek K., Najgebauer M., Szczygłowski J., Wilczyński W., Modelling the influence of anisotropy on magnetic properties in grain-oriented steels, *Przegląd Elektrotechniczny* 3 (2011), 126-128.
- [41] Higuchi S., Nakao T., Takahashi Y., Tokumasu T., Fujiwara K., Ishihara Y., Modeling of two-dimensional magnetic properties based on one-dimensional magnetic measurement, *IEEE Transactions on Magnetism* 48 (11) (2012), 3486-3489.
- [42] Hao Wang, Chang-sheng Li, Tao Zhu, Hard magnetization direction and its direction with magnetic permeability of highly grain-oriented electrical steels, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 21 (2014), 1077-1082.
- [43] Banach A., Mazgaj W., Szular Z., Estimation of power losses in dynamo steel sheets during axial magnetization, *Przegląd Elektrotechniczny* 12 (2015), 276-280.
- [44] Martin F., Singh D., Belahcen A., Rasilo P., Haavisto A., Arkkio A., Analytical model for magnetic anisotropy of non-oriented steel sheets, *COMPEL* 34 (5) (2015), 1475-1488.
- [45] Martin F., Singh D., Rasilo P., Belahcen A., Arkkio A., Model of magnetic anisotropy of non-oriented steel sheets for finite element method, *IEEE Transactions on Magnetism* 52 (3) (2016), 7002704, doi: 10.1109/TMAG.2015.2488100.
- [46] de Campos M. F., Anisotropy of steel sheets and consequence for Epstein test, in Proc. XVIII IMEKO Congress, 17-22.09.2006, Rio de Janeiro, Brazil. Available from: <http://www.imeko.org/publications/wc-2006/PWC-2006-TC4-037u.pdf>
- [47] Chwastek K., Baghel A. P. S., de Campos M. F., Kulkarni S. V., Szczygłowski J., A description for the anisotropy of magnetic properties of grain-oriented steels, *IEEE Transactions on Magnetism* 51 (12) (2015), 6000905.
- [48] Chwastek K., Baghel A. P. S., Wodzyński A., Kulkarni S. V., Anisotropic properties of electrical steel, praca przedstawiona podczas konferencji CPEE'2015 Computational Problems of Electrical Engineering, 2-5.09.2015, Lwów, Ukraina, mat. konf. s. 21-23, *IEEE Catalog Number CFP15A10-PRT*, ISBN 978-617-607-803-6.
- [49] Bunge H.-J., *Texture analysis in materials science - mathematical methods*, Butterworths, London, 1982.
- [50] Engler O., Randle V., *Introduction to texture analysis. Macrostructure, microstructure, and orientation mapping*, CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton 2010.
- [51] Hosford W. F., Caddell R. M., *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge University Press, Cambridge 2010.
- [52] Birsan M., Szpunar J. A., Anisotropy of power losses in textured soft magnetic materials, *Journal of Applied Physics* 80 (1997), 6915-6919.
- [53] Birsan M., Szpunar J. A., The influence of texture on power losses in nonoriented electrical steels, *Journal of Applied Physics* 81 (2) (1997), 821-823.
- [54] Penin Santos J., Landgraf F. J. G., Caixeta Guimarães G., Should Epstein strip arrangement be changed?, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 304 (2004), e571-e573.
- [55] Fiorillo F., *Measurement and characterization of magnetic materials*, Elsevier, Amsterdam 2004.
- [56] Sievert J., On the metrology of the magnetic properties of electrical sheet steel (invited paper), *Przegląd Elektrotechniczny* 5 (2005), 1-5.
- [57] Moses A. J., Philips P. S., Effects of stacking methods on Epstein-square power loss measurements, *Proceedings IEE* 124 (1977), 413-416.
- [58] Banach A., Mazgaj W., Power losses in typical dynamo steel sheets during the axial magnetization, *Komet* 4 (2014), 195-199.
- [59] Warzecha A., Mazgaj W., Magnetization measurements in circle-shaped samples of typical dynamo steel sheets, *Przegląd Elektrotechniczny* 6 (2015), 96-99.
- [60] Wilczyński W., Wpływ technologii na właściwości magnetyczne rdzeni maszyn elektrycznych, *Prace Instytutu Elektrotechniki* 215 (2003), Wydawnictwo IEl, Warszawa
- [61] Żurek S., Rygał R., Soiński M., Asymmetry of magnetic properties of conventional grain-oriented electrical steel, *Przegląd Elektrotechniczny* 1 (2009), 16-19.