

*Efekty magneto-sprężyste i sprężysto-magnetyczne,  
odkształcenia plastyczne, zmiany parametrów magnetycznych,  
zmiany pętli histerezy magnetycznej blach elektrotechnicznych.*

Zbigniew Hilary ŻUREK\*, Dominik KUKLA\*\*, Dariusz BARON\*\*\*

## MATERIAŁOWE WARUNKI BRZEGOWE BLACH ELEKTROTECHNICZNYCH KRZEMOWYCH

**Streszczenie.** Degradacja materiałowa i magnetyczna na krawędziach blach elektrotechnicznych stali krzemowych jest powszechnie pomijana podczas projektowania urządzeń elektromechanicznych. Zmiany magnetyczne materiału na krawędziach blach w znacznie mniejszym stopniu dotyczą transformatorów, w maszynach elektrycznych mogą powodować straty na poziomie ułamkowych części w skali jednego procenta. Dodając do tych strat wpływy zjawisk magnetosprężystych i odwrotnych (Joule'a i Villariego) można mówić już o stratach sięgających 0,5%. Wstępne badania laboratoryjne i symulacyjne dla nowoczesnych rozwiązań maszyn elektrycznych wskazują na istotność tego zagadnienia. W artykule opisano badania wpływu procesu przygotowania wykrojów uzyskanych w różnych technologiach na strukturę materiału.

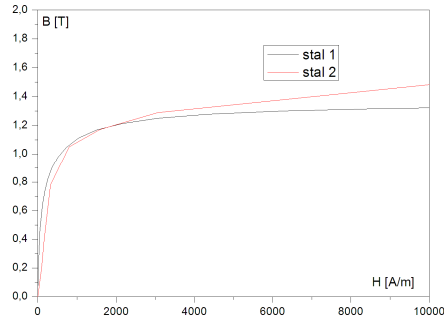
### 1. WPROWADZENIE

Na etapie projektowania urządzeń elektromagnetycznych przyjmuje się, że parametry magnetyczne materiału są stałe, co najwyżej zależne od temperatury. Parametry materiału ferromagnetycznego są zależne w dużej mierze od stanu naprężeń mechanicznych i odkształceń plastycznych. Czułość magnetosprężysta stali konstrukcyjnych jest niska. Czułość stali elektrotechnicznych - szczególnie na blachy transformatorowe jest wysoka i nie można jej pominąć w rozważaniach elektrotechnicznych. Wpływ naprężeń sprężystych zmienia przebieg krzywych magnesowania (rys. 1), wartość natężenia koercji  $H_c$  ( $B$ ,  $H$ ) oraz wpływa na wartość natężenia pola magnetycznego  $H$ , przy której materiał osiąga nasycenie  $J_s$  (stal 2 – pod działaniem odkształceń sprężystych rozciągających).

\* Politechnika Śląska, Wydział Transportu, [zbigniew.zurek@polsl.pl](mailto:zbigniew.zurek@polsl.pl)

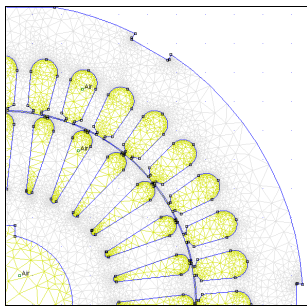
\*\* IPPT PAN, Politechnika Warszawska, [dkukla@ippt.gov.pl](mailto:dkukla@ippt.gov.pl)

\*\*\* TurboCare Poland S.A., [dariusz.baron@turbocare.pl](mailto:dariusz.baron@turbocare.pl)

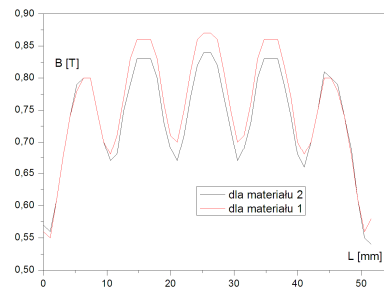


Rys. 1. Krzywe pierwszego magnesowania stali  
Fig. 1. Curves of first magnetization of steel

Badania laboratoryjne zmian magnetycznej pętli histerezy od naprężeń sprężystych i symulacje rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie (rys. 3) wycinka obwodu magnetycznego (rys. 2) maszyny elektrycznej wskazuje na istotne różnice.



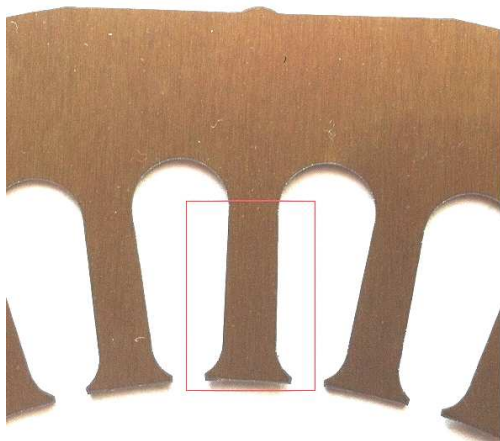
Rys. 2. Wycinek przekroju poprzecznego maszyny elektrycznej  
Fig. 2. Electric machine cross-section sector



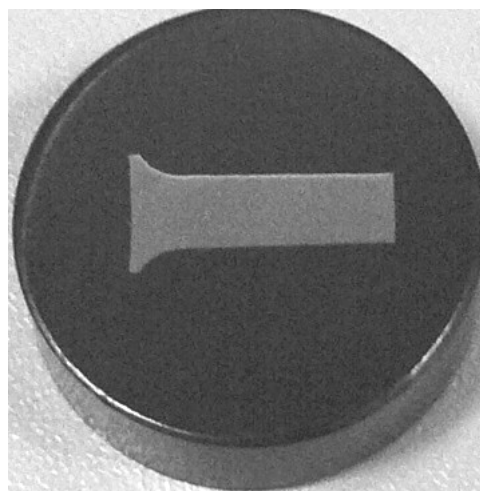
Rys. 3. Przebieg indukcji magnetycznej  
Fig. 3. Magnetic induction function

## 2. BADANIA MIKROSTRUKTURY BLACHY TRANSFORMATOROWEJ

Materiał do badań stanowił wykrój laserowy stojana silnika z blachy elektrotechnicznej krzemowej pokazanej na rys. 4.



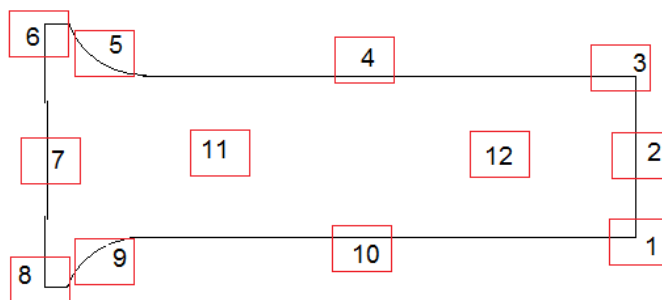
Rys. 4. Wycinek wykroju  
Fig. 4. Shape sector



Rys. 5. Próbkę do badań  
Fig. 5. Test sample

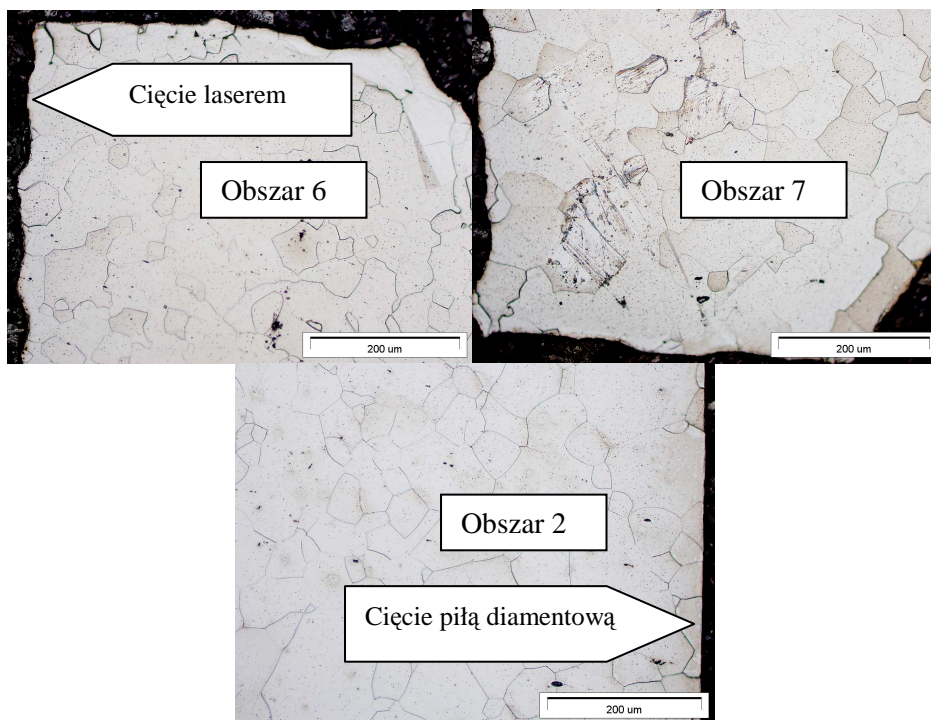
Z wycinka wykroju pobrano próbkę (oznaczoną ramką) do badań metalograficznych. Wykonano zgląd metalograficzny w płaszczyźnie blachy (rys. 5). Zgląd wytrawiono w 5% nitalu.

Badania mikrostruktury wykonano za pomocą mikroskopu optycznego Olympus GX71 w polu jasnym przy powiększeniu 100 i 200x. Analizowano obrazy mikrostruktury próbki w obszarach przedstawionych na rys. 6.



Rys. 6. Miejsca badania struktury stali  
Fig. 6. Steel structure testing places

Mikrostrukturę badanej blachy transformatorowej stanowią równoosiowe ziarna ferrytu, z nielicznymi wydzieleniami węglików (rys. 7).

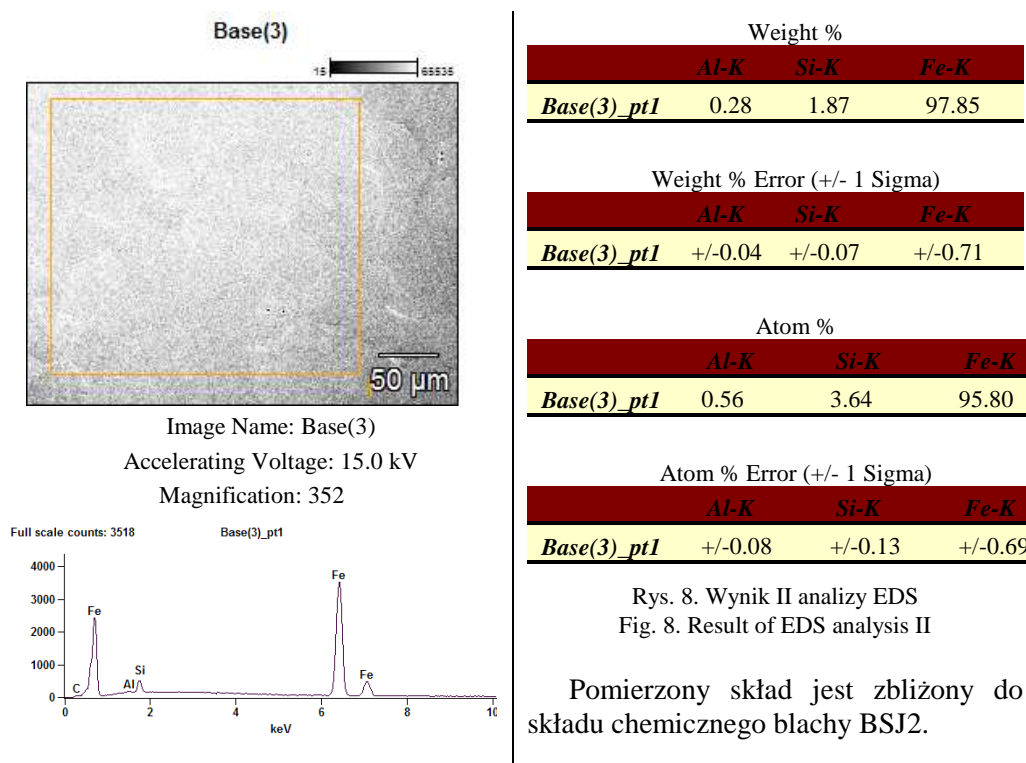


Rys. 7. Obrazy struktury na granicach cięcia  
 Fig. 7. Views of structure on the cutting boundaries

Widoczny wpływ cięcia laserowego (obszar 6 i 7) jak i strefa wycinania tarczą diamentową z chłodzeniem wodnym nie wpłynęły w sposób istotny na budowę kryształu. W badaniach wstępnych nie stwierdzono deformacji mikrostruktury na krawędziach badanej blachy krzemowej. Przed dalszymi badaniami wykonano analizę mikro-rentgenowską materiału. Analiza mikrorentgenowska umożliwia przybliżone poznanie składu chemicznego materiału.

### 3. ANALIZA MIKRO-RENTGENOWSKA MATERIAŁU. EDS

Blachy, z których wykonano silnik prototypowy nie spełniały zakładanych założeń projektowych, dlatego poddano je badaniu na mikroskopie skaningowym z przystawką EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) do mikro-rentgenowskiej analizy składu. Obrazy analizowanej strefy, wyniki pomiaru i analizę błędu podano na rys. 8.



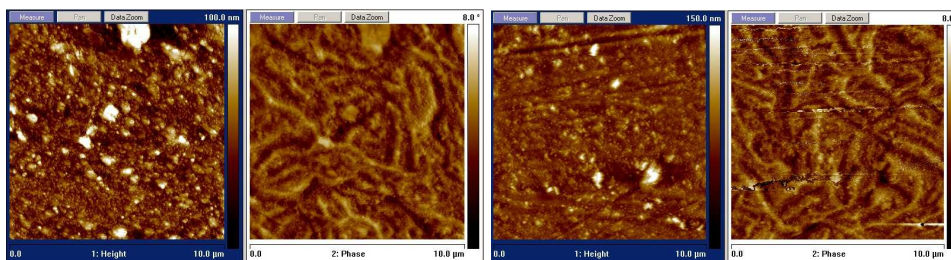
Rys. 8. Wynik II analizy EDS  
Fig. 8. Result of EDS analysis II

Pomierzony skład jest zbliżony do składu chemicznego blachy BSJ2.

#### 4. BADANIA WŁASNOŚCI MAGNETYCZNYCH MIKROSTREF PRÓBKII. MIKROSKOP AFM/MFM

Podstawowym celem zainicjowanych badań przez ośrodki naukowe Politechniki Śląskiej, Politechniki Warszawskiej i IPPT PAN było określenie wpływu procesu przygotowania wykonywania wykrojów z blach krzemowych do budowy maszyn i urządzeń elektrotechnicznych na parametry wyrobu końcowego, a szczególnie sprawność przetwarzania energii. W chwili obecnej przedstawiony zakres badań leży w punkcie zainteresowań zagranicznych instytutów naukowych.

Wynikiem pomiarów przeprowadzonych na MFM (Magnetic Force Mikroskopy) są obrazy sił magnetycznych w strefach oznakowanych na rys. 6. Na rysunku 9 pokazano obrazy ze stref 4 (plansza z lewej) i 10. Po lewych stronach plansz zamieszczono topografię (height) badanego obszaru, a po prawej namagnesowanie (phase). Wyniki te wskazują jedynie zmiany jakościowe. Do wyznaczenia zmian ilościowych konieczne są dalsze badania.



Rys. 9. Przykładowe obrazy badań MFM  
Fig. 9. Sample images of MFM analysis

Pomiar sił magnetycznych jest pomiarem pośrednim i wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań skalujących (nachylenie) sondy mikroskopu na parametry namagnesowania.

## 5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki wstępne otwierają program badań. Badania tak złożonych zagadnień wymagają udziału wielu instytucji naukowych.

## LITERATURA

- [1] ŻUREK Z. H.: *Sprężystość mechaniczna w obwodach magnetycznych*, Zeszyty Problemowe Nr 82/2009, s. 39-43.
- [2] ŻUREK Z. H., ŚLADOWSKI M.: *Influence of Stress In Interference Joint Between Frame and Stator on Flux Density Distribution in the Air Gap*, Komel, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, Nr 85/2010, 167-171.
- [3] ŻUREK Z. H., SZUDYGA M.: *Efekty magnetosprężyste w stalach krzemowych*, *Magnetic effects in silicon steels*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 90/2011.
- [4] ŻUREK Z. H., KUKLA. D., KURZYDŁOWSKI K. J.: *Wybrane metody wykrywania degradacji zmęczeniowej w stalach ferromagnetycznych*, 40KKBN, W-wa, 2011, Przegląd Elektrotechniczny - przyjęty przez redakcję.
- [5] ŻUREK Z. H., BIZOŃ K.: *Presentation of the actual research activities of the Transportation Faculty of the Silesian Technical University, Katowice, to the topic of fatigue characterization by magnetic properties, especially to the case of fatigue of railway wheels*, (referat niepublikowany) Colloquium Fraunhofer- IZFP, 13-14.02.2012.

### MATERIAL BOUNDARY CONDITIONS OF ELECTROMAGNETIC SILICON STEEL SHEETS

**Abstract.** Material and magnetic degradation on the edges of electromagnetic silicon steel sheets is usually passed over at the time of designing electro-mechanical plants/equipment. Magnetic changes of material on the sheet edges to a significantly smaller extent apply to transformers; in the electric machines they can produce losses at the level of fractional parts in the scale of one percent. When adding to the losses the influences of magneto-elastic and reverse phenomena (Joule and Villari), one can expect losses up to 0.5%. Preliminary laboratory and simulation researches of modern electric machine solutions point at the significance of this issue. This article presents researches into shapes preparation process influence on the material structure in different production technologies.