

## WPLYW WIELKOŚCI ZIARNA NA WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE MIĘKKICH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Radosław JASTRZEBSKI<sup>1</sup>, Adam JAKUBAS<sup>2</sup>

1. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny  
tel.: 792-160-988 e-mail: radoslaw@jastrzebski.info
2. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny  
tel.: 501-784-607 e-mail: adam.jakubas@gmail.com

**Streszczenie:** W pracy przeprowadzono analizę wpływu rozmiaru ziarna w magnetycznie miękkich materiałach kompozytowych na ich właściwości magnetyczne. W pracy wykorzystano próbki rdzeni cylindrycznych wykonanych przez autorów z mieszaniny żelaza z polichlorkiem winylu. Badania obejmowały wyznaczenie takich parametrów jak indukcja nasycenia, natężenie koercji i stratność. Zbadano ponadto wpływ częstotliwości magnesowania na stratność materiału.

**Słowa kluczowe:** Pętla histerezy, Straty wiropądowe, materiały proszkowe. Rozmiar ziarna.

### 1. WSTĘP

Znaczny wzrost zainteresowania magnetycznie miękkimi materiałami kompozytowymi (ang. Soft Magnetic Composites - SMC), które są wykorzystywane między innymi w magnetowodach maszyn i urządzeń elektrycznych może przyczynić się do lepszego poznania właściwości magnetycznych tych materiałów. W zależności od parametrów surowców wykorzystanych do wytworzenia kompozytowego materiału magnetycznego możliwe jest dostosowanie właściwości wyrobów do konkretnych zastosowań [1, 2]. Badania prowadzone nad właściwościami SMC [3-8] wykazują, iż właściwości magnetyczne takie, jak indukcja maksymalna, przenikalność magnetyczna, stratność zależą między innymi od typu zastosowanych materiałów magnetycznych i izolacyjnych.

Idealna budowa kompozytowych materiałów magnetycznych zakłada występowanie materiału magnetycznego w całości osłoniętego warstwą materiału izolacyjnego co przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys 1. Schemat budowy magnetycznego materiału kompozytowego [2]

Ze względu na niedoskonałości procesu wytwarzania materiałów kompozytowych, może dochodzić do zwarć pomiędzy odizolowanymi od siebie obszarami, co może mieć wpływ na straty związane z prądami wirowymi w SMC, nad którymi badania były prowadzone w [9].

### 2. WPLYW WIELKOŚCI ZIARNA ZASTOSOWANYCH SKŁADNIKÓW NA WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE SMC

Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie wpływu rozmiaru ziarna ( $s$ ) wykorzystanego proszku materiału magnetycznie miękkiego na właściwości magnetyczne wytworzonych próbek rdzeni cylindrycznych. Do badań wykorzystano żelazo w postaci proszku o nieregularnym kształcie cząstek i czystości 99,5% o następujących frakcjach:

$$\begin{aligned} s &\leq 50 \mu\text{m} \\ 50 < s &\leq 100 \mu\text{m} \\ 100 < s &\leq 150 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Żelazo oraz suspensyjny polichlorek winylu (ang. polyvinyl chloride - PVC) wymieszano, zachowując stosunek wagowy 99,5% Fe i 0,5% PVC nie zmieniając frakcji składnika izolacyjnego PVC. Dla wszystkich wykonanych próbek frakcja polichloroku winylu mieściła się w zakresie  $100 < s \leq 150 \mu\text{m}$ . Próbki wykonano przy ciśnieniu formowania  $\sim 500 \text{ MPa}$  i w temperaturze uplastycznienia  $\sim 165^\circ\text{C}$ . Próbki miały kształt cylindryczny o parametrach fizycznych przedstawionych w tabeli 1.



Rys 2. Zdjęcie przygotowanej próbki SMC

Tabela 1. Parametry wykonanych próbek SMC

Frakcja ( $\mu\text{m}$ )	$\phi_{\text{zew}}$ (mm)	$\phi_{\text{wew}}$ (mm)	Wysokość (mm)	Masa (g)
$s \leq 50$	50	30	8,8	77,45
$50 < s \leq 100$			8,9	79,65
$100 < s \leq 150$			8,9	79,93

Badania właściwości magnetycznych wykonanych próbek materiałów kompozytowych przeprowadzono z wykorzystaniem systemu pomiarowego Remacomp C-200. Zachowano sinusoidalny kształt indukcji, co wynika z wymagań odpowiedniej normy IEC 60 404-6.

Proces wykonywania pomiarów został podzielony na dwa etapy. Etap pierwszy obejmował zidentyfikowanie wartości indukcji nasycenia  $B_s$  dla każdej frakcji. Wyniki etapu pierwszego zostały przedstawione w tabeli 2. Etap drugi to, wybór największej wspólnej wartości indukcji (indukcji maksymalnej –  $B_{\text{max}}$ ), w celu oceny wpływu stopnia granulacji na właściwości magnetyczne wykonanych rdzeni. Przyjęto  $B_{\text{max}} = 1,0 \text{ T}$  i dla tej wartości indukcji wyznaczono wartości stratności przy częstotliwościach 50 Hz i 400 Hz. Zmierzone ponadto wartości indukcji remanencji i natężenia koercji próbek. W trakcie wstępnych badań stwierdzono, że częstotliwość magnesowania ma znikomy wpływ na kształt pętli histerezy gdy  $f \leq 50 \text{ Hz}$ . W związku z powyższym, charakterystyki przedstawione na rysunku 3 przy częstotliwości 50 Hz można traktować jako quasi-statyczne. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunkach 3 i 4

Tabela 2. Porównanie wartości indukcji nasycenia wykonanych próbek dla każdej frakcji

Frakcja ( $\mu\text{m}$ )	$B_s$ (T) $f = 50 \text{ Hz}$
$s \leq 50$	1,2
$50 < s \leq 100$	1,3
$100 < s \leq 150$	1,4

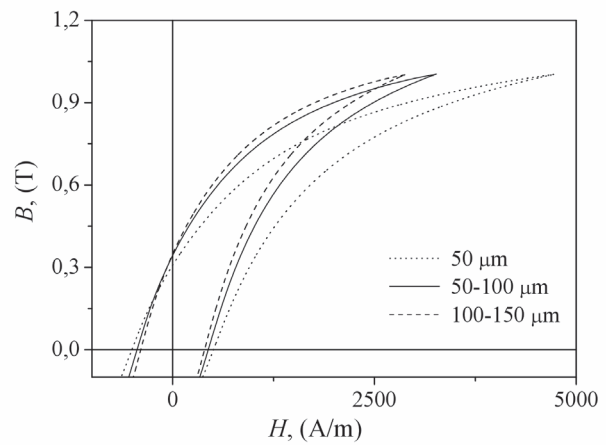
Tabela 3. Punkty charakterystyczne uzyskanych pętli histerezy przy częstotliwości 50 Hz i  $B_{\text{max}} = 1 \text{ T}$

Frakcja ( $\mu\text{m}$ )	$H_{\text{max}}$ (A/m)	$B_r$ (T)	$H_c$ (A/m)
$s \leq 50$	4720	0,31	507
$50 < s \leq 100$	3267	0,35	441
$100 < s \leq 150$	2873	0,35	396

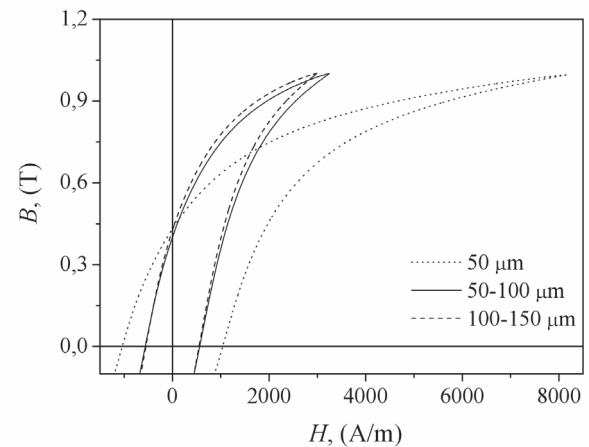
W tabeli 3 zestawiono wartości dla charakterystycznych punktów pętli histerezy wykonanych próbek. Przedstawiono maksymalną wartość natężenia pola magnetycznego oraz wartości indukcji remanencji i natężenia koercji osiągnęte dla  $B_{\text{max}} = 1 \text{ T}$ .

Na podstawie danych zawartych w tabeli 3 stwierdzono, że widoczny jest wpływ rozmiaru frakcji na parametry magnetyczne.

Wraz ze wzrostem rozmiaru ziarna zaobserwowano wzrost indukcji nasycenia (por. Tab. 2), a ponadto zaobserwowano zmniejszenie wartości natężenia koercji. Fakt ten może zostać wykorzystany do optymalizacji procesu wytwarzania rdzeni SMC.

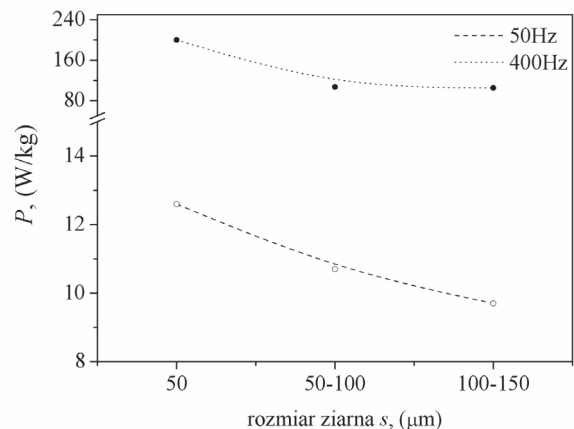


Rys. 3. Pętli histerezy dla każdej frakcji przy  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $B_{\text{max}} = 1 \text{ T}$



Rys. 4. Pętli histerezy dla każdej frakcji przy  $f = 400 \text{ Hz}$ ,  $B_{\text{max}} = 1 \text{ T}$

Na podstawie wyników pomiarów przedstawionych na rysunku 3 można stwierdzić, że krzywe magnesowania dla frakcji 50-100  $\mu\text{m}$  i 100-150  $\mu\text{m}$  są zbliżone do siebie, natomiast próbka o frakcji 50  $\mu\text{m}$  ma zdecydowanie gorsze właściwości magnetyczne. Dla podwyższonej częstotliwości magnesowania ( $f = 400 \text{ Hz}$ ) zaobserwowany efekt pogorszenia właściwości magnetycznych dla próbki o małym rozmiarze ziarna staje się jeszcze bardziej widoczny - rys. 4.



Rys. 5. Straty mocy w funkcji rozmiaru ziarna,  $B_{\text{max}} = 1 \text{ T}$

Z literatury wiadomo, że na podstawie pola powierzchni symetrycznej pętli histerezy można wyznaczyć istotny parametr materiałów magnetycznych jakim są jednostkowe straty mocy. W ten sposób określono straty mocy przypadające na jednostkę masy materiału dla badanych próbek. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.

Z przedstawionych danych jednoznacznie wynika, iż wzrost rozmiaru ziarna ma wpływ na rozmiar strat w badanych próbkach SMC. Efekt ten jest szczególnie widoczny przy częstotliwości 400 Hz, gdzie wzrost rozmiaru ziarna z  $s \leq 50 \mu\text{m}$  do  $s$  zawierającego się w przedziale  $s \in <50,100> \mu\text{m}$  spowodował spadek strat mocy z 200 W/kg do wartości 107 W/kg, co oznacza redukcję strat na poziomie 47%. Dalszy wzrost rozmiaru ziarna nie wpływał już tak znacząco na zmniejszenie strat w badanym materiale.

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości magnetycznych próbek z materiałów SMC o różnym rozmiarze ziarna żelaza. Stwierdzono, że zmiana rozmiaru ziarna ma istotny wpływ na właściwości magnetyczne wykonanych rdzeni (stratność, natężenie koercji, indukcja remanencji). Stwierdzono, że lepszymi parametrami cechują się próbki o większym rozmiarze cząstek żelaza (100-150  $\mu\text{m}$ ).

W pracy zbadano ponadto wpływ zmiany częstotliwości przemagnesowania na kształt charakterystyk  $B(H)$  oraz na poziom stratności. Stwierdzono, że zmierzone charakterystyki przy częstotliwości technicznej  $f = 50 \text{ Hz}$  nie odbiegają kształtem od charakterystyk otrzymanych przy niższych częstotliwościach.

Dla podwyższonej częstotliwości  $f = 400 \text{ Hz}$ , korzyści wynikające z zastosowania większego rozmiaru ziarna żelaza są już znaczące. Oznaczają one obniżenie poziomu strat o ok. 47%.

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Ziębowicz B., Szewieczek D., Dobrzański L.A.: New possibilities of application of composite materials with soft magnetic properties, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, Vol. 20, issue 1-2, s. 207-210.
2. Shokrollahi H., Janghorban K.: Soft magnetic composite materials (SMCs), *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 189, s. 1–12.
3. Füzervá J., Füzér J., Kollár P., Hegedüs L., Bures R., Fáberová M.: Analysis of the Complex Permeability Versus Frequency of Soft Magnetic Composites Consisting of Iron and Fe<sub>73</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16</sub>B<sub>7</sub>, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, (4)48, s. 1545-1548.
4. Kollár P., Füzér J., Bures R., Fáberová M.: AC Magnetic Properties of Fe-Based Composite Materials, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2010, 2(46), s. 467-470.
5. Perigo E.A., Nakahara S., Pittini-Yamada Y., de Hazan Y., Graule T.: Magnetic properties of soft magnetic composites prepared with crystalline and amorphous powders, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323, s. 1938–1944.
6. De Wulf M., Anestiev L., Dupré L., Froyen L., Melkebeek J.: Magnetic properties and loss separation in iron powder soft magnetic composite materials, *J. Appl. Phys.* 2002, 91, 7845.
7. Taghvaei A.H., Shokrollahi H., Janghorban K.: Properties of iron-based soft magnetic composite with iron phosphate–silane insulation coating, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 481, s. 681-686.
8. Jakubas A., Gębara P., Seme S., Gnatowski A., Chwastek K.: Magnetic Properties of SMC Cores Produced at a Low Compacting Temperature, *Acta Physica Polonica A*, 2017, 5(131), s. 1289-1293.
9. Taghvaei A.H., Shokrollahi H., Janghorban K., Abiri H.: Eddy current and total power loss separation in the iron-phosphate–polyepoxy soft magnetic composites, *Materials and Design*, 2009, 30, s. 3989–3995.

## THE EFFECT OF GRAIN SIZE VARIATIONS ON MAGNETIC PROPERTIES IN SOFT MAGNETIC COMPOSITES

The application of soft magnetic composites increases in different branch of electric and electronic engineering. For this reason, it is very important to understand the micro-structural effects on their magnetic properties. The paper focuses on the effect of grain size variations of soft magnetic composites on their magnetic properties such as saturation flux density, coercive field strength, power losses etc. During research self-developed materials made of a mixture of pure iron and polyvinyl chloride were used. Three different grain sizes of Fe, namely: up to 50  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$  – 150  $\mu\text{m}$  were used in the study. All samples contained 99,5% Fe and 0,5% PVC. The grain size of PVC was 100  $\mu\text{m}$  – 150  $\mu\text{m}$ . The effect of grain size variations on the shape of hysteresis loops was also examined. In the paper it was proved, that the increase of grain size improves magnetic properties of ready-made cores, e.g. the power losses are decreased upon the grain size increase. The aforementioned effect is particularly visible for higher excitation frequencies e.g. at  $f = 400 \text{ Hz}$ .

**Keywords:** Hysteresis loop, eddy current loss, soft magnetic composites, grain size.

