

## WPLYW CIŚNIENIA FORMOWANIA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH NA ICH WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

Adam JAKUBAS<sup>1</sup>, Sebastijan SEME<sup>2</sup>

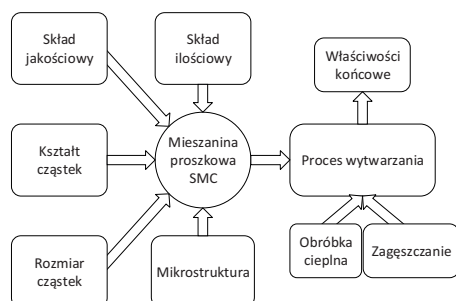
1. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny  
e-mail: adam.jakubas@gmail.com
2. University of Maribor, Slovenia  
e-mail: sebastijan.seme@um.si

**Streszczenie:** Miękkie kompozyty magnetyczne SMC są często stosowane w projektowaniu przetwornic i maszyn elektrycznych. Swoją popularność zawdzięczają łatwości formowania i możliwości dostosowania do konkretnych zastosowań. W pracy przedstawiono właściwości magnetyczne rdzeni wykonanych z proszku żelaza i suspensyjnego polichloru winylu. Próbkę przygotowano przez prasowanie na gorąco mieszanki proszku PVC/Fe przy różnych ciśnieniach formowania. Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że wraz ze wzrostem ciśnienia formowania następuje polepszenie właściwości magnetycznych.

**Słowa kluczowe:** Miękkie kompozyty magnetyczne, właściwości magnetyczne, obróbka, pomiary.

### 1. WPROWADZENIE

Kompozyty magnetycznie miękkie (SMC) są w ostatnim czasie tematem zainteresowania środowiska naukowego oraz przemysłu [1, 2]. Wynika to z posiadanych przez nie interesujących właściwości fizycznych i chemicznych, które można niewielkim nakładem pracy i kosztów dostosować do konkretnych zastosowań poprzez odpowiedni dobór składu i metody przetwarzania materiału. Schemat takiego procesu formowania próbek przedstawiono poniżej:



Rys. 1. Czynniki wpływające na właściwości obwodów magnetycznych wykonanych z SMC

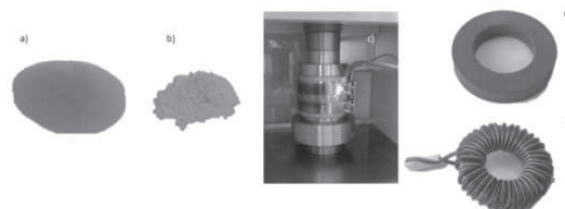
Badania wpływu procesu przetwarzania na strukturę, gęstość i właściwości magnetyczne otrzymanych wyrobów można odnaleźć m.in. w pracach Gilberta i in. [3], który testował dostępne, komercyjne materiały SMC. Inni badacze koncentrowali się na wpływie metodach obróbki termicznej

i wielkości cząstek oraz upakowaniu cząstek opartych na bazie żelaza na straty energii oraz właściwości mechaniczne wytworzonych rdzeni [4, 5]. Kollár i wsp. [6] oraz Lauda i in. [7] skupili się na badaniu dynamicznych właściwości magnetycznych kompozytów na bazie Fe w szerokim zakresie częstotliwości wzbudzenia. Ślusarek i in. zbadała korelację gęstości SMC i właściwości magnetycznych gotowych rdzeni [8].

### 2. MATERIAŁ I POMIARY

#### 2.1. Przygotowanie próbek

Próbki zostały wykonane z proszku żelaza (99,5% czystości) o wielkości ziarna 100-150  $\mu\text{m}$  z dodatkiem suspensyjnego polichloru winylu (PVC-S) o granulacji 15-100  $\mu\text{m}$ . Oba składniki zmieszano ze sobą w proporcji wagowej 99,5% Fe i 0,5% PVC. Zbliżona wielkość cząstek obu substancji pozwoliła na uzyskanie bardzo jednorodnej mieszaniny. Polichlorek winylu został użyty jako spoiwo ponieważ charakteryzuje się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi. Ponadto, jest on odporny na działanie wielu rozpuszczalników oraz odporny na działanie wody oraz stężonych i rozcieńczonych kwasów i zasad, a także olejów mineralnych. Z przygotowanej mieszaniny zostały uformowane cylindryczne próbki, które następnie poddano procesowi prasowania w temperaturze 165°C w czasie 15 min. Metoda wytwarzania jest przedmiotem zgłoszenia patentowego. Następnie, na tak otrzymane rdzenie nawinięto uzwojenia pierwotne  $U_1$  i pomiarowe  $U_2$ . Proces wytwarzania próbek przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Badany materiał na różnych etapach przygotowania: a) surowy proszek Fe, b) PVC-S, c) prasa hydrauliczna z opaską grzewczą, d) przygotowany rdzeń, e) rdzeń z uzwojeniami

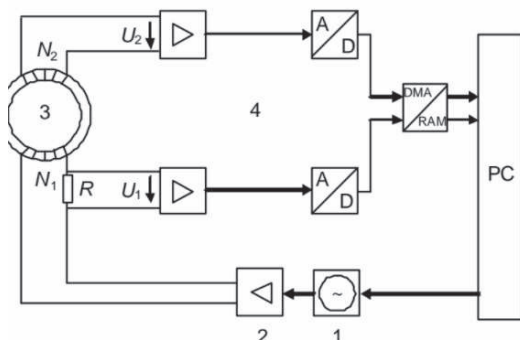
W pierwszym etapie badań opisanym w [9] określono optymalną zawartość PVC przy którym próbki mogły

utrzymać dobre właściwości magnetyczne przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej wytrzymałości mechanicznej. Ustalona wartość wyniosła 0,5% PVC w ogólnej wadze próbki.

W następnym etapie zbadano wpływ parametrów formowania próbek na ich właściwości magnetyczne. W tym celu zmieniano wartość ciśnienia prasowania proszku przy zachowaniu stałości temperatury i czasu wygrzewania. Trzy próbki o wymiarach  $d_o = 50$  mm,  $d_i = 30$  mm,  $h = 9,8$  mm każda, wykonano przy użyciu prasy hydraulicznej o nacisku konstrukcyjnym 75 ton, dla których uzyskano ciśnienie prasowania odpowiednio: 234 MPa (30 ton), 390 MPa (50 ton), 507 MPa (65 ton).

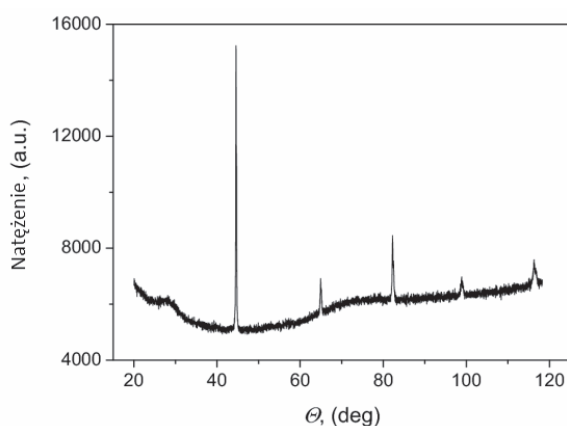
## 2.2. Pomiary

Właściwości magnetyczne wyznaczono przy pomocy sterowanego komputerowo stanowiska pomiarowego Metis HyMac oraz REMACOMP® C-200, którego schemat opearcyjny przedstawiono na rysunku 3.



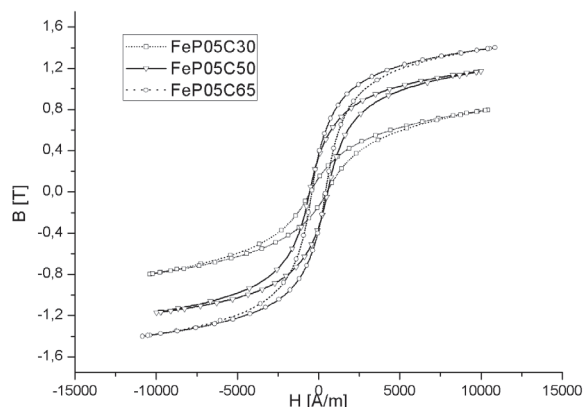
Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Skład gotowych próbek sprawdzono za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego Bruker D8 Advance z promieniowaniem  $\text{CuK}\alpha$  i detektorem LynxEye. Przykładowy dyfraktogram XRD przedstawiono na rysunku 4. Można stwierdzić, że mikrostruktura jest wysoce jednorodna. Refleksje dyfrakcyjne obserwowane w wzorze są typowe dla  $\alpha\text{-Fe}$ .



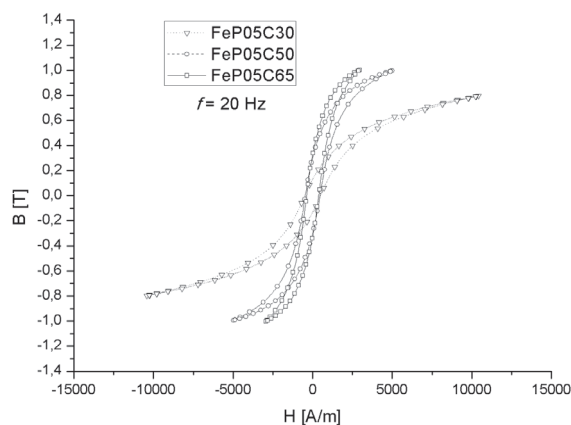
Rys. 4. Przykładowy wzór XRD otrzymany dla badanych rdzeni

Porównanie właściwości magnetycznych wykonano przy stałym poziomie indukcji 1 T dla częstotliwości wzbudzenia: 20 Hz, 50 Hz, 400 Hz. Jedynie wyniki pomiarów dla próbki FeP05C30 (wyprasowanej przy najniższym ciśnieniu) przedstawiono dla indukcji niższej  $B_{max} = 0,8$  T. Na rysunku 4 pokazano typowe wartości  $B_{max}$  osiągnięte przez próbki w zależności od ciśnienia formowania dla częstotliwości wzbudzenia 50 Hz. Najwyższą wartość  $B_{max} = 1,4$  T osiągnęła próbka FeP05C65



Rys. 5. Typowe wartości  $B_{max}$  badanych SMC

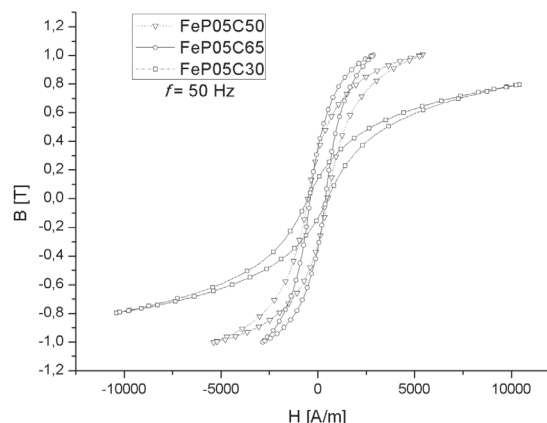
Dane przedstawione na rysunku 5 pokazują istotny wpływ ciśnienia formowania na maksymalną wartość indukcji  $B_{max}$ . W kolejnych etapach pomiarów zbadano wpływ zmian częstotliwości wzbudzenia na parametry magnetyczne próbek SMC. Na kolejnych rysunkach (rys. 6-8) przedstawiono rodziny charakterystyk magnesowania przy częstotliwościach wzbudzenia 20 Hz, 50 Hz i 400 Hz.



Rys. 6. Charakterystyki magnesowania próbek SMC przy częstotliwości 20 Hz

Tablica 1. Zestawienie danych pomiarowych otrzymanych przy częstotliwości wzbudzenia 20 Hz

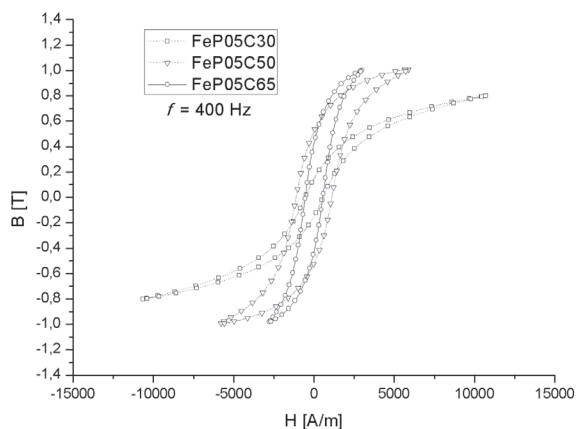
|          | $B_{max}$ [T] | $H_{max}$ [A/m] | $B_r$ [T] | $H_c$ [A/m] |
|----------|---------------|-----------------|-----------|-------------|
| FeP05C30 | 0,796         | 10421           | 0,134     | 505         |
| FeP05C50 | 0,996         | 4991            | 0,302     | 459         |
| FeP05C65 | 1,001         | 2959            | 0,329     | 381         |



Rys. 7. Charakterystyki magnesowania próbek SMC przy częstotliwości 50 Hz

Tablica 2. Zestawienie danych pomiarowych otrzymanych przy częstotliwości wzbudzenia 50 Hz

|          | $B_{max}$ [T] | $H_{max}$ [A/m] | $B_r$ [T] | $H_c$ [A/m] |
|----------|---------------|-----------------|-----------|-------------|
| FeP05C30 | 0,796         | 10410           | 0,137     | 519         |
| FeP05C50 | 1             | 5415            | 0,325     | 518         |
| FeP05C65 | 1,0           | 2874            | 0,349     | 395         |



Rys. 8. Charakterystyki magnesowania próbek SMC przy częstotliwości 400 Hz

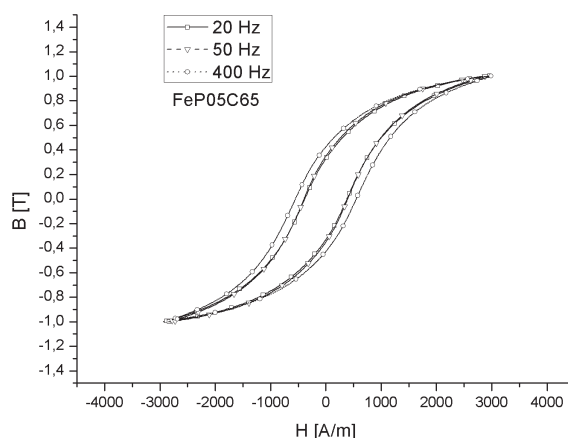
Tablica 3. Zestawienie danych pomiarowych otrzymanych przy częstotliwości wzbudzenia 400 Hz

|          | $B_{max}$ [T] | $H_{max}$ [A/m] | $B_r$ [T] | $H_c$ [A/m] |
|----------|---------------|-----------------|-----------|-------------|
| FeP05C30 | 0,8           | 10686           | 0,147     | 565         |
| FeP05C50 | 0,989         | 5637            | 0,528     | 1108        |
| FeP05C65 | 1,0           | 2984            | 0,426     | 550         |

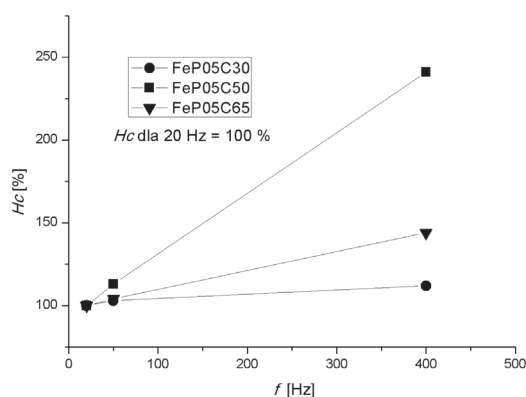
Na podstawie analizy zgromadzonych danych pomiarowych przedstawionych na rysunkach 6-8 oraz w tablicach 1-3, można zaobserwować znaczną zależność pomiędzy parametrami formowania próbek SMC a ich właściwościami magnetycznymi. Wraz ze wzrostem ciśnienia formowania nastąpiło polepszenia parametrów magnetycznych - charakterystyki magnesowania przybrały bardziej strome nachylenie. Wraz ze wzrostem ciśnienia formowania rdzeni było również możliwe osiągnięcie wyższych wartości indukcji  $B$  przy niższym natężeniu pola elektrycznego  $H$ . Wskazuje to na możliwość dalszej poprawy parametrów rdzeni poprzez zwiększenie ciśnienia formowania. Rozszerzenie prowadzonych badań eksperymentalnych pozwoli na wyznaczenie wartości ciśnienia formowania przy którym poprawa parametrów magnetycznych będzie niewielka w stosunku do wzrostu ciśnienia. Należy jednak zaznaczyć, że wzrost ciśnienia formowania wymaga zastosowania bardziej wytrzymałych materiałów do budowy form i pociąga za sobą zwiększone koszty wytwarzania.

W przypadku zmiany częstotliwościach wzbudzenia można zaobserwować niewielkie zmiany kształtu histerezy magnesowania. Na rysunku 9 przedstawiono rodzinę charakterystyk magnesowania próbki FeP05C65, która posiada najlepsze parametry magnetyczne, w funkcji częstotliwości.

Przy poziome indukcji  $B_{max} = 1$  T wartość koercji magnetycznej wzrosła z 381 A/m dla częstotliwości 20 Hz do wartości 550 A/m przy częstotliwości 400 Hz. Dla poziomów indukcji  $B_{max}$  takich jak w tablicach 1-3, wyznaczono zależność korekcji magnetycznej  $H_c$  wszystkich próbek. Zmierzone wartości przedstawiono na rysunku 10 w postaci zmian procentowych.



Rys. 9. Zależność kształtu histerezy od częstotliwości wzbudzenia



Rys. 10. Zależność procentowa wartości koercji magnetycznej  $H_c$  od częstotliwości wzbudzenia

Pomiary wykazały słabą zależność właściwości magnetycznych opracowanych próbek SMC od częstotliwości, szczególnie dla próbek wykonanej przy ciśnieniu prasowania 234 MPa (30 ton) oraz 507 MPa (65 ton). Jednakże próbka FeP05C30 charakteryzowała się najslabszymi właściwościami magnetycznymi. W przypadku próbki FeP05C50 wielokrotnie powtarzane pomiary potwierdziły znacznie większą niż przy pozostałych próbkach zależność  $H_c$  od częstotliwości wzbudzenia. W przypadku próbki FeP05C65 dwudziestokrotne zwiększenie częstotliwości wzbudzenia zwiększyło koercję magnetyczną jedynie o 44%. Stosunkowo niewielka wrażliwość próbek SMC na częstotliwość wzbudzenia ma istotny wpływ na ograniczenie poziom strat mocy przy wyższych niż sieciowa częstotliwościach pracy rdzeni.

Powyższe pomiary pokazują jak istotna jest kontrola i dobór optymalnych parametrów wytwarzania rdzeni kompozytowych.

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione dane pomiarowe pokazują, że jest możliwe wykonanie rdzeni SMC na bazie żelaza i PVC o dobrych właściwościach magnetycznych, przy użyciu łatwo dostępnych komponentów oraz w nieskomplikowanych procesie produkcyjnym. Rdzenie cylindryczne zostały wykonane przy różnych ciśnieniach formowania. Dla przygotowanych próbek określiliśmy podstawowe właściwości magnetyczne. Opisana w artykule metoda wytwarzania kompozytu polimerowo-metalowego jest przedmiotem zgłoszenia patentowego P.420850.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

1. H. Shokrollahi, K. Janghorban, Soft magnetic composite materials (SMCs), *J. Mater. Process. Technol.* 189, 1 (2007), doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034.
2. M. Najgebauer, J. Szczygłowski, Kompozyty magnetyczne w maszynach Elektrycznych, *Sci. J. Silesian Univ. Techn. Series Electr. Eng.* 4 (220), 29 (2011), ISSN 1897-8827 (in Polish), <https://www.elekt.polsl.pl/images/elektryka/220/220-3.pdf>
3. I. Gilbert, S. Bull, T. Evans, A. Jack, D. Stephenson, A. de Sa, Effects of processing upon the properties of soft magnetic composites for low loss applications, *J. Mater. Sci.* 39, 457 (2004), doi: 10.1023/B:JMSC.0000011498.90378.7e.
4. H. Shokrollahi, K. Janghorban, The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites, *Mater. Sci. Eng. B* 134, 41(2006), doi: 10.1016/j.mseb.2006.07.015.
5. H. Shokrollahi, K. Janghorban, *J. Magn. Magn. Mater.* 317, 61 (2007), doi: 10.1016/j.jmmm.2007.04.011.
6. P. Kollár, Z. Birčáková, J. Füzér, J. Füzérová, R. Bureš, M. Fáberová, Wide Frequency Range AC Magnetic Properties of Fe-Based Composite Materials, *Acta Phys. Pol. A* 118, 759 (2010), WoS Accession Number: WOS:000285797100019.
7. M. Lauda, J. Füzér, J. Füzérová, P. Kollár, M. Strečková, M. Fáberová, Magnetic Properties of Soft Magnetic FeSi Composite Powder Cores, *Acta Phys. Pol. A* 126, 144 (2014), WoS Accession Number: WOS:000339833100069.
8. B. Ślusarek, J. Szczygłowski, K. Chwastek, B. Jankowski, A correlation of magnetic properties with material density for soft magnetic composite cores, *COMPEL* 34, 1 (2015), doi: 10.1108/COMPEL-10-2014-0255.
9. A. Jakubas, P. Gębara, S. Seme, A. Gnatowski, K. Chwastek, Magnetic properties of SMC cores produced at low compacting temperature, *Acta Phys. Pol. A*, 131, 5 (2017), DOI: 10.12693/APhysPolA.131.1289

### THE INFLUENCE OF MOLDING PRESSURE OF THE COMPOSITE MATERIALS TO THEIR MAGNETIC PROPERTIES

Soft magnetic composites are often used in the design of electromagnetic converters and electrical machines. Their popularity is due to the ease of molding and the ability to adapt to specific applications. The paper presents magnetic properties of cores made of iron powder and suspension polyvinyl chloride. The samples were prepared by hot compression of the PVC / Fe powder mix at various forming pressures. Measurement of magnetic parameters revealed an improvement in magnetic properties with increasing molding pressures. The presented measurement data show that it is possible to produce of SMC cores with good magnetic properties, using readily available components and in uncomplicated production processes. Cylindrical cores were made at different molding pressures, respectively: 234 MPa (30T), 390 MPa (50T), 507 MPa (65T). For the prepared samples we have determined their basic magnetic properties. The analysis of collected measurement data showed a significant relationship between SMC sample forming parameters and their magnetic properties. In addition, the measurements showed a poor dependence of the magnetic properties in developed SMC samples on the excitation frequency. The method of producing a polymer-metal composite described in the article is the subject of patent application P.420850.

**Keywords:** Soft Magnetic Composites, magnetic properties, processing, measurements.